

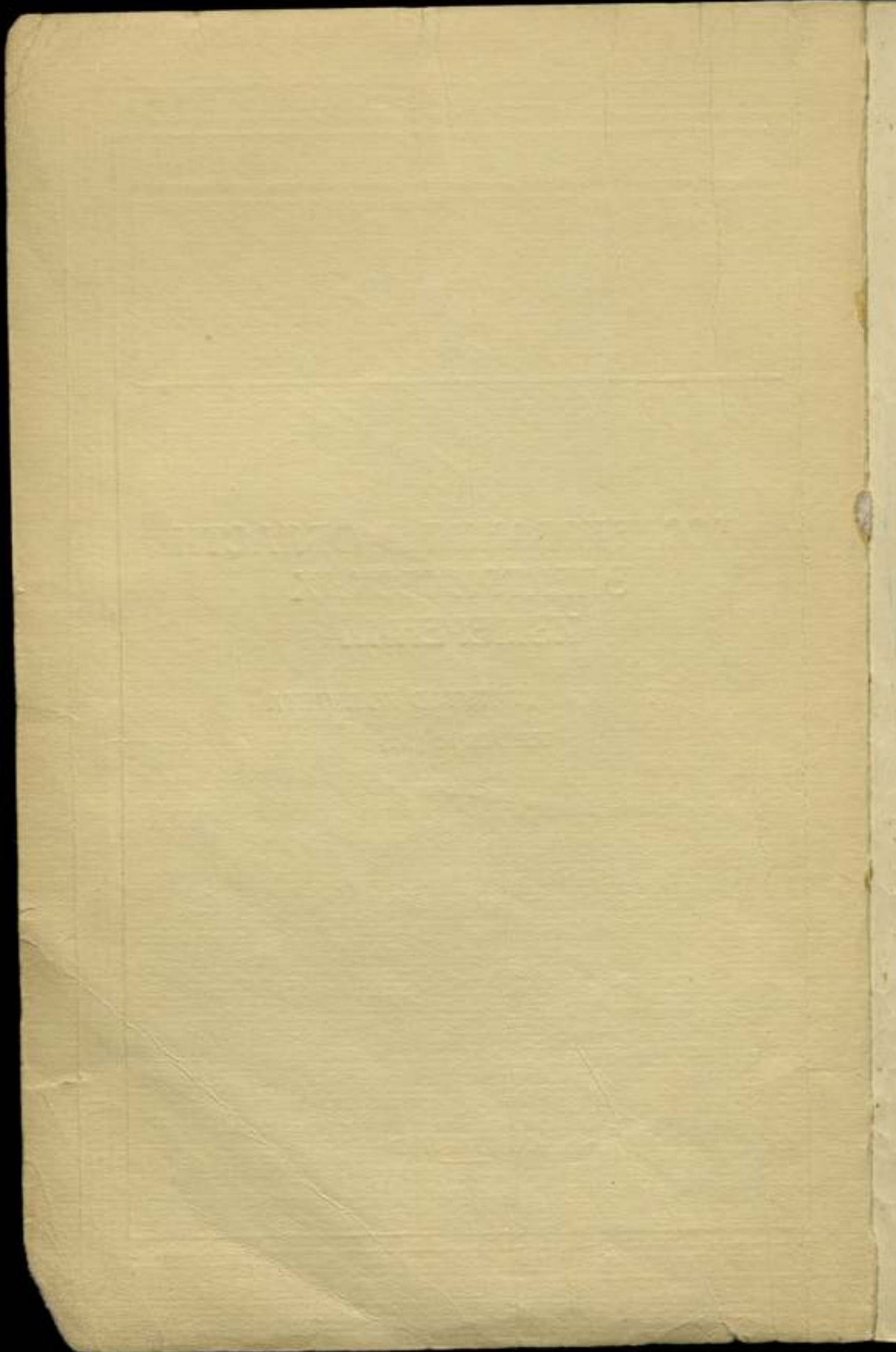
КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ**
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ИЗМЕРЕНИЙ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 52 (112)

СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД
1961



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

м 12554 б

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 52 (112)

Под редакцией
канд. техн. наук К. П. ШИРОКОВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
СТАНДАРТГИЗ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1961

ВНИМАНИЕ! ВНИМАНИЕ!
ВНИМАНИЕ! ВНИМАНИЕ!

ИЗДАНИЕ В ОБЪЕМЕ
ЭЛЕКТРОННОГО
ИЗДАНИЯ

2422-100

ИЗДАНИЕ В ОБЪЕМЕ

Ответственный редактор

д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящий сборник включен ряд работ по электрическим измерениям, выполненных за последний период времени во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ), в его Свердловском филиале и во Всесоюзном научно-исследовательском институте Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР (ВНИИК). В сборнике нашли отражение различные вопросы метрологии электрических измерений. К ним относятся вопросы создания и исследования электрических эталонов, разработки средств и методов передачи единиц измерений, а также работы по исследованию приборов, выпускаемых промышленностью.

В статье А. К. Колосова и Е. А. Чаловой «Международные сравнения национальных эталонов вольта в период 1939—1959 гг.» приводится документальный материал по шести международным сравнениям нормальных элементов, дающий представление об уровне точности, с которой поддерживается в СССР и в различных странах значение вольта. Наиболее убедительным путем для этого являются абсолютные измерения э. д. с., которые производятся во ВНИИМ с 1955 г. Детальное описание этих измерений приведено в статье В. В. Мюллер «Методика измерений э. д. с. нормальных элементов при помощи токовых весов», в которой освещен также принятый во ВНИИМ способ хранения единицы по среднему значению первичного группового эталона.

В статье С. В. Горбачевича и В. П. Шигорина «Методика и аппаратура для точных измерений сопротивлений на постоянном токе» описаны вновь созданные во ВНИИМ приборы и меры, обеспечивающие повышение точности измерения сопротивлений, как равных, так и не равных 10^k (k — целое число) в пределах от 0,001 до 100 000 ом, причем основное внимание уделено вопросу измерения некруглых значений сопротивления.

Не менее важному вопросу передачи значений единиц в область высоких сопротивлений посвящены две статьи: Г. Ф. Панкратова и Т. Б. Рождественской «Передача верных значений единицы электрического сопротивления от эталонов образцовым и рабочим мерам и приборам большого сопротивления» и Г. Ф. Панкратова «Меры и магазины большого сопротивления, особенности их конструирования и пути повышения точности», посвященные описанию методов и средств измерения сопротивлений от 10^5 до 10^{14} ом, разработанных во ВНИИМ.

В двух статьях рассматриваются вопросы измерения малых сопротивлений. В статье А. А. Чухланцева (Свердловский филиал ВНИИМ)

«О расчете мер малого сопротивления на большие токи» приводятся основания методики расчета этих сопротивлений и определения зависимости сопротивления от силы пропускаемого тока. В статье А. С. Румянцева «Новая аппаратура для измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора постоянного тока» дается описание усовершенствований, внесенных в ранее разработанные приборы.

До последних лет отсутствовала аппаратура для прямой поверки мостов переменного тока при показаниях, соответствующих большим значениям индуктивности и емкости. Цикл работ, проведенных во ВНИИК, привел к созданию требуемой для этого аппаратуры. Две работы из этого цикла освещены в статьях Э. С. Лившица «Разработка мер большой индуктивности для поверочных целей» и М. А. Быкова «Измерительная установка для поверки образцовых мер индуктивности и емкости с большими номинальными значениями».

В статье А. Д. Вейсбрута (ВНИИМ) «К вопросу об оценке погрешностей автоматических цифровых приборов сравнения» рассмотрены погрешности этого нового вида приборов и указаны пути уменьшения погрешностей, обусловленных дискретностью показаний и ограниченной чувствительностью нулевого реле.

В статье А. М. Теплинского «Измерение малых переменных токов с помощью подогревных термисторов» приводятся результаты работы по повышению чувствительности аппаратуры для измерения переменных токов звуковых частот.

Измерение сдвига фаз привлекает внимание многих исследователей, для этой цели применяются разнообразные методы, однако вопрос о поверке фазометров все еще не может считаться вполне разрешенным. В статье А. Д. Вейсбрута и Е. Д. Колтика «Метод использования фигур Лиссажу для получения сдвинутых по фазе напряжений» дано описание предложенного ими метода создания известного угла сдвига фаз между напряжениями в диапазоне звуковых частот, обеспечивающего поверку фазометров с требуемой точностью.

Результаты работ Свердловского филиала ВНИИМ по всесторонним исследованиям созданных нашей промышленностью устройств для измерения постоянных токов до 70 000 а изложены во второй статье А. А. Чухланцева «Испытание измерительных устройств типа И58 и И505».

Наконец, в статье А. Д. Вейсбрута и В. К. Потехина «Счетчик импульсов на декатронах и применение его в качестве электронного хронометра и частотомера» описан оригинальный прибор с емкостью счета до 9999 и разрешающей способностью 100 мксек при амплитуде входного сигнала в пределах от 1,5 до 150 в.

Редактор

А. К. КОЛОСОВ, Е. А. ЧАЛОВА
ВНИИМ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СРАВНЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ВОЛЬТА В ПЕРИОД 1939—1959 гг.

В статье сопоставляются результаты шести международных сличений (в 1939, 1948, 1950, 1953, 1955 и 1957 гг.) и приводятся данные об изменениях за этот период единицы э. д. с., воспроизводимой Государственным эталоном вольты СССР.

Международные сравнения эталонов единиц электрического сопротивления и электродвижущей силы (э. д. с.), производимые в Международном бюро мер и весов, имеют большое научное и практическое значение, так как способствуют поддержанию постоянства электрических эталонов и международному единству электрических измерений, а также позволяют установить соотношение между эталонами национальных метрологических лабораторий. Настоящая работа посвящена международным сравнениям национальных эталонов единицы э. д. с. Авторы в течение 20 лет принимали участие в работе, производившейся во ВНИИМ в лаборатории эталонов электрических единиц им. М. Ф. Маликова.

На VII Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся в 1927 г. в Париже, советской делегацией были доложены результаты произведенных Главной палатой мер и весов сравнений эталонов единицы э. д. с. СССР с эталонами других национальных лабораторий. В результате этих сравнений были установлены большие расхождения в значениях эталонов различных стран.

На VII Генеральной конференции в Международную метрическую конвенцию 1875 г. были внесены изменения. На Международное бюро мер и весов (МБМВ), деятельность которого заключалась главным образом в исследованиях в области измерений длины, массы и температуры, были возложены работы в области эталонов электрических единиц.

На той же конференции был решен вопрос об организации Консультативного комитета по электричеству. Этот комитет начал свою деятельность в 1928 г. и сосредоточил ее главным образом на вопросах, связанных со сравнениями национальных эталонов электрических единиц. Работы Консультативного комитета по электричеству и Международного бюро мер и весов, в котором была создана лаборатория для исследования эталонов ома и вольты, способствовали унификации электрических единиц, хранимых в национальных лабораториях.

В статьях М. А. Шателена, М. Ф. Маликова и А. К. Колосова были освещены международные сравнения эталонов электрических единиц с 1925 по 1933 г. [1—7].

Международные сравнения 1939 г.

В международных сравнениях, проведенных в Международном бюро мер и весов в 1939 г., участвовало 7 нормальных элементов * ВНИИМ, изготовленных в 1937 г. В табл. 1 приведены значения э. д. с. этих н. э., определенные путем сравнения с Государственным эталоном вольта СССР до и после международных сравнений. Из табл. 1 видно, что в среднем изменение э. д. с. составляет 3 мкв.

Таблица 1

№ н. э.	Э. д. с. при 20° С. межл. в			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкв
	до сравнения, декабрь 1938 г.	после сравнения, май 1939 г.	среднее	
2705	1,018317	1,018316	1,0183165	-1
2709	318	314	3160	-4
2715	318	312	3150	-6
2716	318	320	3190	2
2743	318	314	3160	-4
2744	316	312	3140	-4
2749	318	314	3160	-4
Среднее	1,0183176	1,0183146	1,0183161	-3

Среднее значение э. д. с. этих семи элементов, выраженное в вольтах МБМВ, было найдено равным 1,0182930 в [8].

В дальнейшем единицы э. д. с., хранимые различными национальными метрологическими институтами, будут обозначаться буквой *V* с добавлением сокращенного обозначения института.

Отклонения значений национальных эталонов от их среднего значения, определенного по формуле

$$V_m = \frac{1}{6} (V_{\text{ВНИИМ}} + V_{\text{PTR}} + V_{\text{ETL}} + V_{\text{NBS}} + V_{\text{LCE}} + V_{\text{NPL}}),$$

характеризовались следующими данными:

$$\begin{aligned} V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) &= V_m + 18,6 \text{ мкв} \\ V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) &= V_m + 32,0 \text{ " } \\ V_{\text{PTR}} (\text{Германия}) &= V_m + 26,9 \text{ " } \\ V_{\text{NBS}} (\text{США}) &= V_m + 23,5 \text{ " } \\ V_{\text{LCE}} (\text{Франция}) &= V_m + 24,1 \text{ " } \\ V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) &= V_m + 29,9 \text{ " } \end{aligned}$$

Следует отметить, что наименьшее отклонение от среднего международного значения имеет эталон ВНИИМ.

* Нормальный элемент в дальнейшем обозначен сокращенно — н. э.

Значения национальных эталонов э. д. с., выраженных в функции среднего международного вольта, установленного в 1935 г., равны:

$$\begin{aligned}V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) &= V_m - 23,1 \text{ мкв} \\V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) &= V_m + 1,3 \text{ .} \\V_{\text{PTR}} (\text{Германия}) &= V_m - 5,5 \text{ .} \\V_{\text{NBS}} (\text{США}) &= V_m - 11,2 \text{ .} \\V_{\text{LCE}} (\text{Франция}) &= V_m + 18,5 \text{ .} \\V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) &= V_m + 6,5 \text{ .}\end{aligned}$$

Из этих данных видно, что наибольшее отклонение от среднего международного вольта, установленного в 1935 г., имеет эталон ВНИИМ.

Приведенные выше данные подчеркивают значение выбранного среднего для международных сравнений.

На сессии Консультативного комитета по электричеству, состоявшейся в 1935 г., единогласно была принята следующая резолюция об унификации значений международного вольта [9].

«Консультативный комитет по электричеству с удовлетворением отмечает решение Центральной электрической лаборатории Франции изменить с настоящего момента значение своей единицы электрического сопротивления и единицы э. д. с. на несколько сотысячных, необходимых для согласования одной и другой со средними значениями единиц того же наименования, хранящихся в пяти других больших национальных лабораториях: PTR, NPL, NBS, ETL и ВНИИМ.

Консультативный комитет, учитывая исключительно малую величину отклонений единиц сопротивления и э. д. с. каждой из этих пяти лабораторий от их средних значений, так как наибольшее отклонение как для ома, так и для вольта едва достигает 11 миллионных, и придавая большое значение скорейшей унификации электрических единиц всех стран, предлагает лабораториям, каждой в относящейся к ней части и когда откроется для этого возможность, принять для ома и вольта значения, определяемые вышеуказанными средними значениями».

При опубликовании этой резолюции Международное бюро мер и весов сделало примечание с указанием значений, на которые следует изменить ом и вольт каждой лаборатории, чтобы исполнить пожелание Консультативного комитета. Для вольта указаны следующие изменения:

$$\begin{aligned}\text{PTR (Германия)} &> 4 \text{ мкв} \\ \text{NBS (США)} &> 12 \text{ .} \\ \text{NPL (Англия)} &< 5 \text{ .} \\ \text{ETL (Япония)} &> 2 \text{ .} \\ \text{ВНИИМ (СССР)} &< 13 \text{ .}\end{aligned}$$

где знак $<$ обозначает «уменьшить на», а $>$ «увеличить на». К этому времени Центральная электрическая лаборатория Франции уже изменила единицу своего вольта, увеличив ее на 76 мкв.

На основании предложения Международного комитета Ученый совет ВНИИМ постановил уменьшить значение эталона вольта ВНИИМ на 13 мкв. Остальные национальные лаборатории не произвели изменений, рекомендованных Консультативным комитетом.

Во время Великой Отечественной войны, в июле 1941 г., вместе с Государственным эталоном вольта из Ленинграда была эвакуирована в Свердловский филиал ВНИИМ и группа н. э. для международных сравнений. В мае 1944 г. эта группа была возвращена во ВНИИМ. В 1945 г. была образована эталонная группа для международных срав-

нений, состоящая из 10 н. э., и с 1946 г. за н. э. этой группы ведутся наблюдения, а также производятся ежегодные сравнения с Государственным эталоном вольта.

По данным сравнений 1946 и 1947 гг., все н. э. находились в хорошем состоянии, изменение среднего значения э. д. с. за год составило около 1 мкв.

Международные сравнения 1948 г.

Для участия в международных сравнениях летом 1948 г. во ВНИИМ были подготовлены 2 группы н. э.: группа из 10 н. э. изготовления 1937 г. и группа из 5 н. э. изготовления 1947 г. Последняя была оставлена в Международном бюро для образования международного эталона.

В табл. 2 приведены результаты сравнений 10 н. э., причем данные измерений в Международном бюро (последняя графа) взяты из доклада М. Романовского [10]. Из приведенных данных следует, что группа н. э., предназначенная для международных сравнений, находилась в хорошем состоянии, среднее значение э. д. с. за время сравнений изменилось всего на 0,1 мкв.

Таблица 2

№ н. э.	Э. д. с. при 20° С, абс. в			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкв	Данные измерений и МЭМВ, май 1948 г., абс. в
	до сравнения, март 1948 г.	после сравнения, ноябрь 1948 г.	среднее		
2705	1,0185862	1,0185857	1,0185860	-0,5	1,0186053
2706	5884	5890	5887	0,6	6105
2709	5944	5956	5950	1,2	6158
2715	5960	5968	5964	0,8	6163
2716	5959	5956	5958	-0,3	6151
2736	5944	5945	5944	0,1	6141
2744	5901	5888	5894	-1,3	6123
2746	5884	5891	5888	0,7	6111
2747	5913	5899	5906	-1,4	6119
2749	5921	5915	5918	-0,6	6136
Среднее	1,0185917	1,0185916	1,0185917	-0,1	1,0186127

По данным этого же доклада [10], значения единиц э. д. с. национальных лабораторий в функции среднего международного значения V_m , установленного в 1948 г., равны

$$V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) = V_m + 21,0 \text{ мкв}$$

$$V_{\text{NBS}} (\text{США}) = V_m - 8,8 \text{ .}$$

$$V_{\text{LSE}} (\text{Франция}) = V_m + 9,4 \text{ .}$$

$$V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) = V_m + 4,6 \text{ .}$$

$$V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) = V_m - 6,8 \text{ .}$$

В течение 3 последующих лет (1949, 1950 и 1951) производились очередные сравнения н. э., предназначенных для международных срав-

нений с Государственным эталоном вольта, показавшие, что средние годовые изменения значения э. д. с. не превысили 2 мкв.

Международные сравнения 1950 г.*

От СССР в международных сравнениях участвовало 5 н. э., изготовленных в 1937 г., результаты сравнений приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ н. э.	Э. д. с. при 20° С, абс. в			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкв
	до сравнения, май 1951 г.	после сравнения, октябрь 1951 г.	среднее	
2706	1,0185887	1,0185838	1,0185862	4,9
2709	5939	5976	5958	-3,7
2715	5959	5961	5960	-0,2
2736	5956	5952	5954	0,4
2746	5865	5840	5852	2,5
Среднее	1,0185921	1,0185913	1,0185917	0,8

Среднее значение э. д. с. группы, найденное в МБМВ [11], равнялось 1,0186150 абс. в, таким образом

$$V_{\text{ВНИИМ}} = V_{\text{МБМВ}} + 23,0 \text{ мкв},$$

где $V_{\text{ВНИИМ}}$ — значение вольта, определяемое средним значением э. д. с. при 20° С 5 н. э., найденным путем сравнения с эталоном вольта СССР;

$V_{\text{МБМВ}}$ — значение вольта Международного бюро.

Результаты международных сравнений 6 национальных лабораторий в 1950 г., выраженные в функции их среднего, следующие [11]:

$$\begin{aligned} V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) &= V_{\text{сред}} + 21,0 \text{ мкв} \\ V_{\text{DAMG}} (\text{ГДР}) &= V_{\text{сред}} - 12,2 \text{ " } \\ V_{\text{NBS}} (\text{США}) &= V_{\text{сред}} - 1,2 \text{ " } \\ V_{\text{LCE}} (\text{Франция}) &= V_{\text{сред}} - 2,1 \text{ " } \\ V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) &= V_{\text{сред}} + 0,2 \text{ " } \\ V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) &= V_{\text{сред}} - 5,5 \text{ " } \end{aligned}$$

Международные сравнения 1953 г.

Для международных сравнений 1953 г. во ВНИИМ были подготовлены 7 н. э., из которых 3 были изготовлены в 1937 г. и 4 — в 1951 г., причем последние были изготовлены по новой спецификации, с электролитом, содержащим 0,03 NH_4SO_4 . Эти н. э. были сравнены с Государ-

* ВНИИМ доставил н. э. только в июне 1951 г. и поэтому они не участвовали в прямых сравнениях с национальными эталонами, а были сравнены с эталоном вольта Международного бюро в августе 1951 г.

ственным эталоном вольта до и после международных сравнений. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

№ н. э.	Э. д. с. при 20° С, абс. в			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкс
	до сравнения, май 1953 г.	после сравнения, октябрь 1953 г.	среднее	
2706	1,0185895	1,0185873	1,0185884	-2,2
2746	5979	5868	5874	-1,1
2747	5975	5976	5976	+0,1
5641	6030	6024	6027	-0,6
5648	6034	6024	6029	-1,0
5649	6024	6012	6018	-1,2
5657	6046	6015	6030	-3,1
Среднее	1,0185983	1,0185970	1,0185977	-1,3

Результаты международных сравнений национальных эталонов э. д. с. в 1953 г. показали [12], что значения эталонов вольта национальных лабораторий, выраженные в функции единицы Международного бюро, характеризуются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 22,3 \text{ мкс} \\
 V_{\text{ДАМД}} (\text{ГДР}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 3,2 \text{ .} \\
 V_{\text{РТВ}} (\text{ФРГ}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 2,3 \text{ .} \\
 V_{\text{NRC}} (\text{Канада}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 3,1 \text{ .} \\
 V_{\text{NBS}} (\text{США}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 3,3 \text{ .} \\
 V_{\text{LCIE}} (\text{Франция}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 1,8 \text{ .} \\
 V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 3,2 \text{ .} \\
 V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 1,4 \text{ .}
 \end{aligned}$$

В октябре 1954 г. по просьбе Международного бюро были отправлены в Париж 7 эталонных н. э. для пополнения международной группы. Эти н. э. были изготовлены во ВНИИМ в 1951 г. и содержали 0,03 N H₂SO₄ в электролите.

В 1955 г. на основании работ по определению вольта посредством токовых весов во ВНИИМ был осуществлен переход на новое значение группового эталона вольта, равное 1,018608 абс. в. Новое значение было утверждено Ученым советом ВНИИМ вместо старого значения, равного 1,018593 абс. в.

Вследствие этого перехода н. э. для международных сравнений также получили новые значения, повышенные на 15 мкс по сравнению со значениями 1954 г.

Международные сравнения 1955 г.

В международных сравнениях 1955 г. участвовало 10 н. э., из которых 6 были изготовлены в 1937 г. и 4 — в 1951 г.

Таблица 5

№ н. э.	Э. д. с. при 20° С, абс. в			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкс
	до сравнения, апрель 1955 г.	после сравнения, ноябрь 1956 г.	среднее	
Н. э., изготовленные в 1937 г.				
2706	1,0186029	1,0186048	1,0186038	1,6
2709	6089	6100	6094	1,1
2715	6088	6103	6096	1,5
2736	6107	6099	6103	-0,8
2746	6024	6023	6024	-0,1
2747	6111	6122	6116	1,1
Среднее	1,0186075	1,0186082	1,0186078	0,7
Н. э., изготовленные в 1951 г.				
5641	1,0186181	1,0186190	1,0186186	0,9
5648	6183	6190	6186	0,7
5649	6179	6179	6179	0,0
5661	6184	6191	6188	0,7
Среднее	1,0186182	1,0186188	1,0186185	0,6

В табл. 5 приведены значения э. д. с. 10 н. э.

Значения единиц э. д. с. национальных лабораторий, выраженные в функции единицы, хранимой в Международном бюро, в 1955 г. составляли [13]:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 9,3 \text{ мкс} \\
 V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 4,5 \text{ .} \\
 V_{\text{DAMG}} (\text{ГДР}) &= V_{\text{МЕМВ}} + 0,5 \text{ .} \\
 V_{\text{РТВ}} (\text{ФРГ}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 0,6 \text{ .} \\
 V_{\text{NBS}} (\text{США}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 0,7 \text{ .} \\
 V_{\text{NRC}} (\text{Канада}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 2,4 \text{ .} \\
 V_{\text{LCIE}} (\text{Франция}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 1,8 \text{ .} \\
 V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) &= V_{\text{МЕМВ}} - 2,0 \text{ .}
 \end{aligned}$$

Следует принять во внимание, что в 1955 г. значение э. д. с. н. э. ВНИИМ было изменено на основании определения ее посредством токовых весов. Этим объясняется большое изменение значения $V_{\text{ВНИИМ}}$ по сравнению с 1953 г.

Для дальнейших международных сравнений в 1956 г. были утверждены эталоны-копии единицы э. д. с. в количестве 10 н. э.: № 2706, 2709, 2715, 2746 и 2747, изготовленные в 1937 г., и № 5641, 5648, 5649, 5661 и 5670, изготовленные в 1951 г.

Международные сравнения 1957 г.

В Международных сравнениях 1957 г. участвовало 5 эталонных н. э., значение э. д. с. которых указано в табл. 6.

Таблица 6

№ п. п.	Э. д. с. при 20° С, абс. з.			Изменение э. д. с. за время сравнения, мкв
	до сравнения, июль 1957 г.	после сравнения, июль 1958 г.	среднее	
2746	1,0186007	1,0186027	1,0186017	2,0
5641	6180	6189	6184	0,9
5648	6185	6187	6186	0,2
5649	6175	6181	6178	0,6
5661	6185	6189	6187	0,4
Среднее	1,0186147	1,0186155	1,0186150	0,8

Значения единиц э. д. с. национальных лабораторий, выраженные в функции единицы, хранимой в Международном бюро, в 1957 г. составили [14]:

$$V_{\text{ВНИИМ}} (\text{СССР}) = V_{\text{МЕМВ}} + 8,4 \text{ мкв}$$

$$V_{\text{NPL}} (\text{Англия}) = V_{\text{МЕМВ}} + 5,4 \text{ .}$$

$$V_{\text{DAMO}} (\text{ГДР}) = V_{\text{МЕМВ}} + 1,1 \text{ .}$$

$$V_{\text{РТВ}} (\text{ФРГ}) = V_{\text{МЕМВ}} + 0,2 \text{ .}$$

$$V_{\text{NBS}} (\text{США}) = V_{\text{МЕМВ}} - 1,3 \text{ .}$$

$$V_{\text{NRS}} (\text{Канада}) = V_{\text{МЕМВ}} - 0,8 \text{ .}$$

$$V_{\text{LCIE}} (\text{Франция}) = V_{\text{МЕМВ}} - 2,1 \text{ .}$$

$$V_{\text{ETL}} (\text{Япония}) = V_{\text{МЕМВ}} - 3,4 \text{ .}$$

Сопоставляя результаты международных сравнений 1957 г. с результатами сравнений 1955 г., можно отметить, что алгебраическая сумма расхождений между значениями э. д. с. эталонов национальных лабораторий в 1957 и 1955 гг. равна 0,7 мкв, что свидетельствует о стабильности значения эталонов Международного бюро и национальных лабораторий.

Все результаты международных сравнений эталонов э. д. с., производимых в Международном бюро, выражаются с погрешностью, составляющей несколько десятых микровольта. Однако, если принять во внимание чувствительность н. э. к перевозкам и к изменению температурных условий, то необходимо окончательное отношение между национальными единицами э. д. с. устанавливать с погрешностью не меньше 1 мкв.

Заключение

На основании цитированной выше резолюция Ученый совет ВНИИМ постановил уменьшить значение единицы э. д. с. на 13 мкв, до полного совпадения со средним международным. Однако ВНИИМ сообщил Международному бюро о согласии изменить значение своей единицы после сессии 1935 г., так как на сессии представителя СССР не было. Изменение единицы э. д. с. было произведено уже после того как было установлено среднее международное значение 1935 г.

Этим объясняется расхождение между значениями единиц э. д. с. ВНИИМ и остальных национальных лабораторий, обнаруженное при последующих международных сравнениях (1939, 1948, 1950, 1953 гг.).

Если принять во внимание уменьшение э. д. с. н. э. ВНИИМ на 13 мкв, то при международных сравнениях 1939 г. действительное отклонение значения единицы э. д. с. ВНИИМ было бы меньше, а именно 10,1 мкв вместо 23,1 мкв.

Государственный эталон вольты СССР в результате ненормальных условий хранения во время Великой Отечественной войны 1941—1945 гг. в период блокады Ленинграда и при эвакуации претерпел изменения и был переформирован. При установлении нового значения э. д. с. при переходе в 1948 г. на абсолютную практическую систему единиц были учтены: старение н. э., изготовленных в 1937 г., и отклонение единицы э. д. с. н. э. при международных сравнениях 1939 г., равное 23 мкв. За основу перехода был принят коэффициент, установленный Международным комитетом: международный вольт равен 1,00034 абс. в.

Международными сравнениями 1948, 1950 и 1953 гг. обнаружены расхождения значения единицы э. д. с. ВНИИМ соответственно на 21,0; 21,0 и 22,3 мкв.

Если бы ВНИИМ в 1948 г. увеличил значение единицы э. д. с. не на 23 мкв, по данным 1939 г., а только на 10 мкв, то расхождение единиц э. д. с. ВНИИМ составило бы 10 мкв, т. е. практически значение единицы э. д. с. ВНИИМ не отличалось бы от значения единиц других национальных лабораторий.

После определения в 1955 г. значения эталона посредством токовых весов и изменения его на 15 мкв значение вольты СССР приблизилось к среднему международному.

Отклонения значения вольты ВНИИМ, определенного в 1934 г. посредством серебряного вольтметра, а в 1955 г. — посредством токовых весов, по данным международных сравнений были равны в 1934 г. +13 мкв и в 1955 г. +9,1 мкв, что свидетельствует об относительной стабильности э. д. с. н. э., изготавливаемых во ВНИИМ.

По данным международных сравнений 1948—1953 гг., значение эталонов э. д. с. ВНИИМ изменилось на 1,3 мкв, NBS (США) — на 5,5 мкв и LCIE (Франция) — на 11,2 мкв, что также указывает на стабильность эталона э. д. с. ВНИИМ.

Мы рассматриваем среднее международное как чисто условную величину, которая служит нейтральной основой для выяснения расхождений между значениями единиц э. д. с. различных национальных лабораторий. Каждая национальная лаборатория вправе сохранять то значение своих эталонов, которое она находит нужным, и не обязана изменять его на основании данных международных сравнений. Необходимо подчеркнуть, что среднее международное может иметь значение только для данного международного сравнения.

Единственное средство приблизиться к этому последнему является определение э. д. с. эталонов посредством токовых весов и эталона абсолютного ома. Если эти определения в дальнейшем будут производиться национальными лабораториями регулярно и, что особенно важно, в одно и то же время, то среднее международное значение э. д. с. эталона будет уточняться.

В результате ряда определений будет уменьшаться погрешность измерений, среднее международное будет все больше приближаться к истинному значению и будет в большей мере способствовать единству электрических измерений во всем мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликов М. Ф., Эталон международного вольта, «Временник Главной палаты мер и весов», вып. 1(13), М.—Л., 1925.
2. Колосов А. К., Международный нормальный элемент Вестона, «Временник Главной палаты мер и весов», вып. 3(15), Л., 1929.
3. Колосов А. К., Нормальные элементы Вестона как эталон международного вольта, Сборник № 100, «Сообщения Главной палаты мер и весов СССР Консультативному комитету по фотометрии», М.—Л., 1932.
4. Шателен М. А., Маликов М. Ф., Общая сводка результатов международных сравнений электрических эталонов Главной палаты мер и весов с 1926 по 1930 г., Сборник № 90, «Международные сравнения электрических эталонов Главной палаты мер и весов СССР», Л., 1930.
5. Маликов М. Ф. и Колосов А. К., Сравнение электрических эталонов СССР с эталонами Германии, Англии, США и Японии в 1929 и 1930 гг., Сборник № 90, «Международные сравнения электрических эталонов Главной палаты мер и весов СССР», Л., 1930.
6. Колосов А. К., Мюллер В. В. и Чураева Е. С., Нормальные элементы Вестона, передаваемые Международным бюро мер и весов, Сборник № 127, «Работы Всесоюзного института метрологии и стандартизации по электрическим и магнитным эталонам в 1930—1932 гг.», Л.—М., 1933.
7. Malikov M. F. et Kolossov A. C., Résultats des comparaisons d'éléments appartenant à divers laboratoires faites par les soins de la Chambre Centrale des poids et mesures de l'U. R. S. S., Comptes Rendus des séances de la septième Conférence générale des poids et mesures réunie à Paris en 1927, Paris, 1927.
8. Romanovski M. et Roux M., Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice (janvier—février) 1939, Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, t. XIX, Paris, 1939, p. E-72.
9. Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, 2-e série, t. XVII, Paris, 1935, p. 94.
10. Romanovski M., Coordination des unités électriques du Bureau International, des poids et mesures (1932—1948). Extrait du, t. XXI des Travaux et Mémoires du Bureau International des poids et mesures, Paris, 1952.
11. Leclerc G. et Gautier M., Rapport sur comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice effectuées en février et avril 1950. Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, 2-e série, t. XXIII-B, Paris, 1953, p. E-85.
12. Gautier M., Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice effectuées en juillet 1953. Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, t. XXIV, Paris, 1955, p. 145.
13. Gautier M., Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice effectuées en 1955. Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, t. XXV, Paris, 1957, p. 137.
14. Leclerc G., Rapport sur les comparaisons des étalons nationaux de force électromotrice (septembre—novembre, 1957). Procès-verbaux des séances du Comité International des poids et mesures, t. 26-A, Paris, 1959, p. 116.

Поступила в редакцию
4/VII 1959 г.

В. В. МЮЛЛЕР

ВНИИМ

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ Э. Д. С. НОРМАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ТОКОВЫХ ВЕСОВ

В настоящей статье изложена методика определения э. д. с. нормальных элементов при помощи токовых весов и эталонной катушки сопротивлений, которая была разработана и применена в лаборатории эталонов электрических единиц им. М. Ф. Маликова в 1955 г. Измерения, произведенные по этой методике, позволили на основе опытных данных установить значение первичного группового эталона вольта в абсолютной мере. Описана общая методика хранения единицы э. д. с. по среднему значению первичного группового эталона вольта.

Решение двух метрологических задач — воспроизведение единицы э. д. с. в абсолютной мере и определение в этой единице э. д. с. нормальных элементов* — осуществляется при помощи токовых весов и эталонной катушки сопротивления.

Методика этих измерений разработана в лаборатории эталонов электрических единиц им. М. Ф. Маликова.

Работами, выполненными по этой методике в 1955 г., на основе опытных данных установлено среднее значение э. д. с. первичного группового эталона вольта с предельной погрешностью $\pm 0,001\%$.

Возможность определения абсолютного значения э. д. с. н. э. на токовых весах позволила ввести дополнительный контроль неизменности э. д. с. первичного группового эталона путем периодических абсолютных определений среднего значения э. д. с. группового эталона методом токовых весов.

Определение значения э. д. с. элементов сравнения с помощью токовых весов и специального эталона ома

В качестве специального эталона ома была применена марганциновая катушка сопротивления в 1 ом особой конструкции. Большие геометрические размеры катушки позволяют пропускать через нее ток в 1 а без заметного нагревания катушки. При измерениях катушка находилась в сосуде, наполненном сухим трансформаторным маслом.

* Нормальные элементы в дальнейшем обозначены сокращенно — н. э.

Температурная формула этой катушки имеет вид

$$R_t = R_{20} + [16,2(t - 20) - 0,538(t - 20)^2] \cdot 10^{-6} \text{ ом},$$

где R_t — значение сопротивления при температуре опыта;

R_{20} — значение сопротивления при 20° С.

Сопротивление катушки было определено по первичному групповому эталону ома, что позволяет считать ее равноценной рабочему эталону ома. Сопротивление R_{20} при 20° С определено с предельной погрешностью 0,0001% и равно 1,000480 ом.

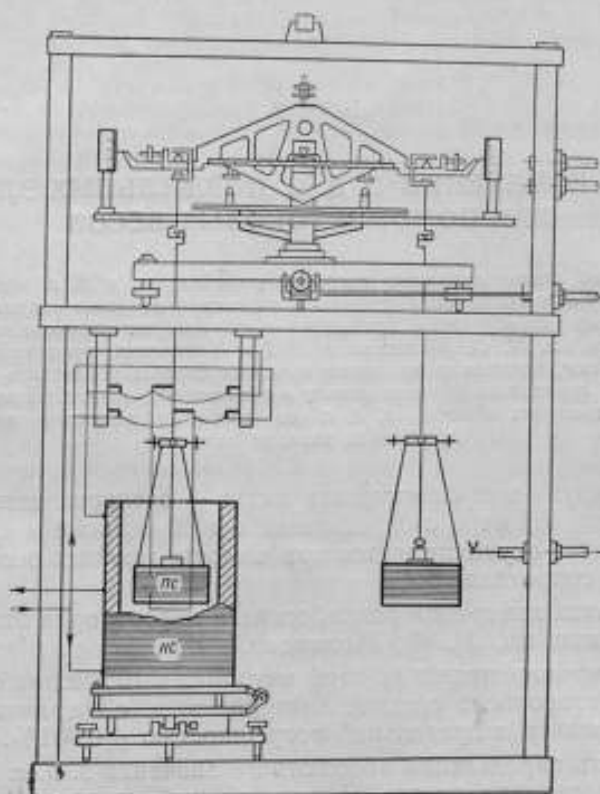


Рис. 1. Схематическое изображение токовых весов.
ПС — подвижный соленоид; НС — неподвижный соленоид.

Единица силы тока (ампер) воспроизводилась при помощи токовых весов [1], которые схематически изображены на рис. 1. В верхней части этой установки расположены весы, в нижней — электродинамическая система. Весы имеют равноплечее коромысло, рейтерную шкалу, оптическую отсчетную систему со шкалой и систему рычагов, при помощи которых осуществляется управление весами из смежной комнаты. Коромысло весов соединяется с электродинамической системой при помощи двух штанг, верхний конец которых подвешен к серьгам коромысла, нижний скреплен с подвижными соленоидами. На каждом из соленоидов имеется приспособление для наложения гири. Таким образом, соленоиды играют роль чашек весов. В то же время подвижный соленоид,* подве-

* Подвижный соленоид в дальнейшем обозначен сокращенно — ПС.

шенный к левому плечу коромысла, в совокупности с неподвижным соленоидом* образует электродинамическую систему весов. К каждому из этих соленоидов подведен ток.

Соленоид *НС* установлен на двойной плите, которая может перемещаться в трех взаимно-перпендикулярных направлениях, что позволяет производить юстировку электродинамической системы. Обмотка соленоида состоит из двух секций.

На той же плите внутри соленоида *НС* под соленоидом *ПС* расположен змеевик, по которому во время работы токовых весов пропускается водопроводная вода с целью охлаждения соленоидов, нагреваемых током.

Токовые весы заключены в стеклянную витрину и установлены на специальном фундаменте, отделенном от фундамента всего здания. В этой же комнате находится эталонная катушка сопротивления. Для сохранения температурного режима наблюдатель находится в смежной комнате, где расположена регулировочная часть электроизмерительной схемы, шкала оптической отсчетной системы и рукоятки упомянутых выше рычагов, служащих для арретирования весов, передвижения рейтера и наложения двух специальных гирь на чашки весов.

Гирь, имеющие цилиндрическую форму, сделаны из латуни и электролитически покрыты хромом. Масса первой гири приблизительно вдвое больше массы второй.

При пропускании постоянного тока по соленоидам *ПС* и *НС* между ними возникает взаимодействие, в результате которого соленоид *ПС* втягивается в соленоид *НС* или выталкивается из него в зависимости от направления тока. В обоих случаях равновесие весов будет нарушено. Для его восстановления на то или другое плечо коромысла накладывают одну из гирь. Масса уравновешивающей гири служит мерой тока.

Малая гиря применяется для уравнивания весов при включении тока, при котором устанавливается положение системы, условно принимаемое за нулевое. Малая гиря выполняет роль тары и поэтому называется тарной гирей. Большая гиря, именуемая эталонной гирей, применяется для уравнивания весов при переключении направления тока. Масса этой гири входит в формулу для вычисления силы тока, т. е. является одной из величин, определяющих значение измеряемого тока. Поэтому масса и объем эталонной гири были определены с высокой точностью в лаборатории мер массы ВНИИМ, причем получены следующие значения: масса $M = 8,14149$ г; объем $V_{20} = 0,914$ см³.

Первые экспериментальные работы по измерению э. д. с. эталонных н. э. на токовых весах производились в 1951 г., а затем повторялись в 1952 и 1953 гг. Согласно отчетным данным за 1953 г., средняя квадратичная погрешность определения значения э. д. с. отдельных элементов на токовых весах лежит в пределах $1,2-3,1$ мкв. Между тем относительные измерения э. д. с. н. э., производимые при помощи компенсатора, вернее определение разности значений э. д. с. сравниваемых элементов, производятся с погрешностью в несколько раз меньшей. Поэтому казалось целесообразным для определения значений э. д. с. элементов сравнения использовать результаты тех и других измерений, что должно было обеспечить получение уточненных значений э. д. с. элементов сравнения.

С этой целью была разработана специальная методика, согласно которой были произведены измерения э. д. с. н. э., названных элемен-

* Неподвижный соленоид в дальнейшем обозначен сокращенно — *НС*.



тами сравнения, и обработаны результаты полученных опытных данных. Необходимые работы были выполнены по следующему плану:

- а) подготовительные работы;
- б) взаимные сличения элементов сравнения при помощи компенсатора — первая серия;
- в) определение значений э. д. с. элементов сравнения на токовых весах;
- г) взаимные сличения элементов сравнения — вторая серия;
- д) обработка результатов.

Подготовительные работы заключались в юстировке токовых весов, в результате которой были достигнуты минимальная неравноплечность, максимальное постоянство показаний и нужная чувствительность весов.

Юстировка электродинамической системы обеспечила коаксиальность, параллельность и совпадение центров соленоидов *НС* и *ПС*, что необходимо для получения максимальной силы взаимодействия электродинамической системы.

В качестве элементов сравнения были применены четыре насыщенных н. э., которые в течение ряда лет находились под наблюдением. Элементы сравнения № 2733 и 2291 были изготовлены в 1937 г. с нейтральным электролитом; элементы № 5643 и 5646 изготовлены в 1951 г. с электролитом, содержащим 0,03 *N* H_2SO_4 .

Элементы сравнения как при взаимных сличениях, так и в дальнейшем при измерениях на токовых весах находились в месте своего постоянного хранения — в термостатированном сейфе, хранилище эталонов вольта. Элементы были смонтированы в ванне, наполненной сухим минеральным маслом. Прямым проводом любой элемент сравнения мог быть включен в измерительную цепь токовых весов. Этим исключалась возможность изменения э. д. с. элементов вследствие изменения их температуры и влияния тряски при перенесении из хранилища в помещение токовых весов.

Определение температуры в ванне с элементами сравнения и в ванне с эталонным сопротивлением производилось ртутными термометрами с ценой деления 0,05° С. Температура воздуха вблизи соленоидов *ПС* и *НС* измерялась термометрами с ценой деления 0,2° С.

Взаимные сличения элементов сравнения производились при помощи компенсатора постоянного тока фирмы Вольфф. Средняя квадратичная погрешность этих измерений не превышала 1 $\mu\text{в}$.

Первая серия взаимных сличений элементов была закончена накануне первого определения э. д. с. элементов на токовых весах. Вторая серия была начата на следующий день по окончании определения на токовых весах.

Повторение взаимных сличений в конце опыта позволило следить за степенью постоянства разностей э. д. с. элементов сравнения и пользоваться средним арифметическим данных измерений.

В той и другой серии было сделано по 7 измерений, т. е. всего 14 измерений для каждой пары сличаемых элементов.

Средние результаты, полученные из 14 сличений в 1955 г., приведены в табл. 1. В той же таблице указаны результаты взаимных сличений элементов сравнения, произведенных в 1953 и 1954 гг.

Из сопоставления этих данных видно, что нестабильность э. д. с. элементов сравнения в течение 3 лет лежит в пределах 1 $\mu\text{в}$.

Для определения значений э. д. с. элементов сравнения на токовых весах была использована установка, электрическая схема которой изображена на рис. 2. Как видно из рис. 2, для измерения э. д. с. н. э.

применена компенсационная цепь, в которой подлежащая определению э. д. с. н. э. уравнивалась падением напряжения, вызванным током, проходящим через эталонное сопротивление.

Таблица 1

Действительные разности Δ_p значений э. д. с. по результатам измерений элементов, мВ			Изменение разностей, мВ		
1953	1954	1955	$\Delta_{E_{21}} - \Delta_{E_{21}}$	$\Delta_{E_{31}} - \Delta_{E_{31}}$	$\Delta_{E_{41}} - \Delta_{E_{41}}$
$E_2 - E_1 = 0,39$	$E_2 - E_1 = 0,43$	$E_2 - E_1 = -0,33$	-0,04	-0,76	-0,72
$E_3 - E_1 = 3,72$	$E_3 - E_1 = 2,89$	$E_3 - E_1 = 3,63$	-0,83	0,74	-0,09
$E_4 - E_1 = 2,02$	$E_4 - E_1 = 0,82$	$E_4 - E_1 = 1,34$	-1,20	0,52	-0,68
$E_4 - E_2 = 1,97$	$E_4 - E_2 = 1,58$	$E_4 - E_2 = 1,69$	-0,39	0,11	0,28
$E_3 - E_2 = 3,68$	$E_3 - E_2 = 3,20$	$E_3 - E_2 = 3,93$	-0,48	0,73	0,25
$E_4 - E_3 = -2,01$	$E_4 - E_3 = -1,44$	$E_4 - E_3 = -2,46$	-0,57	-1,02	-0,45

Обозначения, принятые в табл. 1. E_i — условное обозначение э. д. с. элемента сравнения № 2733; E_j — то же для № 2291; E_k — то же для № 5643; E_l — то же для № 5645.

За несколько часов до начала измерения э. д. с. н. э. измерительную установку с токовыми весами приводили в рабочее состояние: по электрической цепи пропускали постоянный ток в I_a и по охлаждающей системе весов — воду из водопровода. Через 3—4 часа устанавливался постоянный тепловой режим в воздушном пространстве около соленоидов и в масляной ванне, в которой находилось эталонное сопротивление.

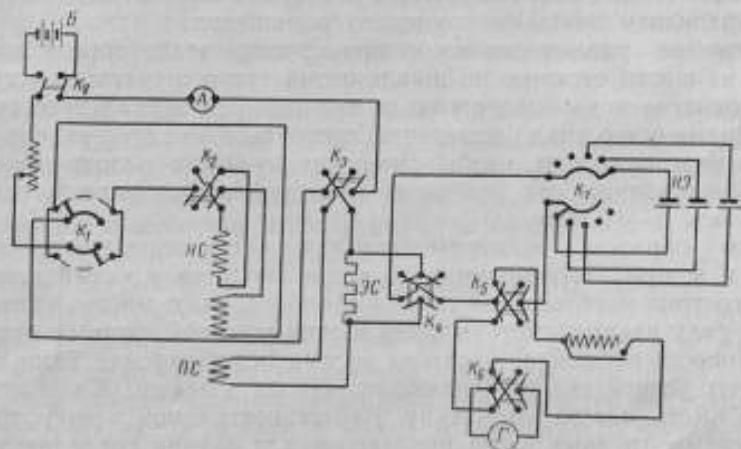


Рис. 2. Электрическая схема установки токовых весов.

$НЭ$ — нормальный элемент сравнения; $ЗС$ — эталонное сопротивление; $ПС$ — подвижный соленоид; $НС$ — неподвижный соленоид; $Б$ — батареи аккумуляторов; $Г$ — гальванометр; $А$ — амперметр; $K_1 \dots K_6$ — переключатели.

Постоянство температуры считали достаточным, когда:

- колебания температуры $t_{ПС}$ и $t_{НС}$, определенные по термометрам вблизи соленоидов $ПС$ и $НС$, не превышали $0,1^\circ C$;
- разность температуры $t_{ПС}$ и $t_{НС}$, определенная по этим термометрам, не превышала $1^\circ C$;
- колебания температуры, определенной по термометру в ванне с сопротивлением, находились в пределах $0,02^\circ C$.

Как только наступало постоянство температуры, комнату, где находятся токовые весы, закрывали, и все дальнейшие операции по измерениям в соответствии с указанными ниже тремя этапами производили из смежной комнаты. Для осуществления всех операций необходимо было участие двух наблюдателей.

Процесс измерения э. д. с. н. э. сравнения на токовых весах состоял из трех этапов.

1. Устанавливали такую силу тока, при которой падение напряжения на эталонном сопротивлении было равно э. д. с. н. э., включенного в компенсационную цепь.

Силу тока устанавливали при включении в компенсационную цепь так называемого установочного н. э., что исключало возможность поляризации элемента сравнения в процессе подбора тока. Подобрав необходимую силу тока, заменяли установочный элемент тем элементом сравнения, э. д. с. которого подлежала определению. Тонкой регулировкой тока добивались компенсации. Направление тока выбирали таким, чтобы происходило втягивание соленоида *ПС* в соленоид *НС*, вследствие чего коромысло весов выходило из положения равновесия. Для восстановления равновесия на правое плечо коромысла накладывали гири. Таким образом устанавливали положение весов, близкое к центральному положению и условно принимавшееся за нулевое.

2. Изменяли направление тока в обеих секциях соленоида *НС*, при этом соленоид *ПС* выталкивался из соленоида *НС*, и равновесие весов снова нарушалось. Для уравнивания весов на ту сторону коромысла, где находится электродинамическая система, помещали эталонную гирию.

3. После снятия эталонной гири повторяли первый этап, что позволяло определить смещение нулевого положения.

Положение равновесия весов при каждом этапе определялось как среднее из шести отсчетов по шкале оптического отсчетного устройства.

Постоянство тока поддерживали при помощи зеркального гальванометра. Время всего цикла измерений, состоявшего из трех этапов, должно быть возможно малым, чтобы смещение нулевого положения оказало наименьшее влияние на результат измерений. Для данных измерений требовалось 5—10 мин.

Таким образом, экспериментальная часть определения значения э. д. с. н. э. при помощи токовых весов сводится к установлению постоянного тока необходимой силы и к определению массы, уравновешивающей силу взаимодействия электродинамической системы весов.

В процессе работы с токовыми весами освобождение весов от артефактного устройства необходимо производить плавно. Колебания весов должны иметь малую амплитуду. Расчет постоянной электродинамической системы токовых весов произведен для случая совпадения центра колебания весов с центром симметрии электродинамической системы и потому всякое отклонение от этого положения требует введения поправки. Определение положения равновесия весов при первом и третьем этапах измерений подсчитывали в процессе опыта. Если положение равновесия весов при первом этапе отличалось от положения равновесия при третьем этапе более чем на 5 делений, произведенные наблюдения считали неполноценными и весь цикл измерений повторяли вновь.

До и после окончания взвешивания определяли температуру в ваннах с элементами сравнения и эталонным сопротивлением и вблизи соленоидов *ПС* и *НС*.

Опыты по определению значения э. д. с. четырех элементов сравнения производили в течение месяца. Значение э. д. с. каждого элемента

определяли от 7 до 10 раз через равные промежутки времени. Температура масла в ванне, где находились элементы сравнения, во время самого опыта определения значения э. д. с. элементов на токовых весах была постоянной в пределах погрешности отсчета, т. е. 0,01 град. Однако абсолютное значение температуры колебалось в течение месяца в пределах 20,34+20,61° С, т. е. в пределах 0,3 град. Указанные отклонения температуры от 20° С потребовали введения поправок, значения которых лежали в пределах 14+25 мкв.

Эти данные позволили вычислить значения э. д. с. элементов сравнения, определенные на токовых весах [1].

Вычисление э. д. с. н. э. производилось по формуле

$$E_t = IR_t,$$

где E_t — э. д. с. данного элемента при температуре опыта;

R_t — сопротивление катушки при температуре опыта;

I — сила тока, установленная при определении э. д. с. данного элемента и вычисленная по формуле

$$I = \sqrt{\frac{M_{np} g}{F}} = \sqrt{\frac{981,931 M_{np}}{7721,110}} a,$$

где M_{np} — приведенная масса груза, примененного для уравнивания весов, т. е. найденная при взвешивании его в воздухе (ρ);

F — постоянная электродинамической системы токовых весов, равная 7721,110 н/а²;

g — ускорение силы тяжести, принятое равным 981,931 см/сек².

Это значение g в Потсдамской системе получено на основании гравиметрических измерений, выполнявшихся в 1947, 1948 и 1956 гг. По этим данным, относительная погрешность значения g не превышает $6 \cdot 10^{-8}$ см/сек² [2].

Из формулы для вычисления силы тока видно, что все величины, стоящие под знаком корня, кроме M_{np} , являются постоянными, только масса груза меняется в зависимости от значения э. д. с. н. э. Поэтому для удобства вычисления силы тока рационально предварительно вычислить постоянные величины и тогда формула примет вид

$$I = \sqrt{\frac{981,931}{7721,110} M_{np}} = 0,356616 \sqrt{M_{np}} a.$$

Однако в процессе определения значения э. д. с. н. э. возникают погрешности, искажающие полученное значение.

Изучение причин возникновения этих погрешностей позволило найти метод количественной оценки и метод исключения их путем введения соответствующих поправок. Исправленное значение э. д. с. элемента сравнения находили по формуле

$$E_{t\text{испр}} = E_t + \Delta_t + \Delta_s,$$

где Δ_t — поправка на температурное расширение соленоидов;

Δ_s — поправка на смещение центра колебания подвижного соленоида от центрального положения электродинамической системы в процессе взвешивания.

Повышение температуры соленоидов вызывает увеличение их диаметров, что влияет на постоянную электродинамической системы и требует введения поправки Δ_t . При этом тепловое расширение соленоидов НП и ПС оказывает противоположное влияние на изменение силы

взаимодействия между ними. Для вычисления поправки Δ_t необходимо принять во внимание разность температур вблизи каждого соленоида. Поправка Δ_t вычислялась по формуле

$$\Delta_t = -5 (t_{\text{ис}} - t_{\text{ис}}),$$

где $t_{\text{ис}} - t_{\text{ис}}$ — абсолютная разность между температурами вблизи соленоидов.

Поправка Δ_a вычислялась по формуле

$$\Delta_a = k\alpha,$$

где α — отклонение по шкале весов;

k — функция от α , определенная расчетным путем.

Далее находили значение э. д. с. элементов сравнения при 20° С по формуле, рекомендованной Международной конференцией 1908 г.,

$$E_t = E_{20} - [40,6 (t - 20) - 0,95 (t - 20)^2 + 0,01 (t - 20)^3] \cdot 10^{-6} \text{ в.}$$

Таким образом, значения э. д. с. элементов сравнения E_{20} при 20° С, определенные на токовых весах, оказались равными: для элемента № 2733 — 1,018614, для № 2291 — 1,018621, для № 5643 — 1,018621 и для № 5646 — 1,018615 в.

Значение э. д. с. элементов сравнения, полученные на токовых весах, и разности между ними, найденные путем взаимных сличений (табл. 1, см. 1955 г.), рассматривались как результаты независимых совокупных измерений. Уточненные значения э. д. с. элементов сравнения были найдены обработкой результатов тех и других измерений по способу наименьших квадратов.

Соответствующие условные уравнения для рассматриваемых измерений состоят из двух групп:

1-я группа	2-я группа
$x = 1,018614$	$\sqrt{6}x - \sqrt{6}y = -0,00000033 \sqrt{6}$
$y = 1,018621$	$\sqrt{6}x - \sqrt{6}z = -0,00000363 \sqrt{6}$
$z = 1,018621$	$\sqrt{6}x - \sqrt{6}t = -0,00000134 \sqrt{6}$
$t = 1,018615$	$\sqrt{6}y - \sqrt{6}z = -0,00000393 \sqrt{6}$
	$\sqrt{6}y - \sqrt{6}t = -0,00000169 \sqrt{6}$
	$\sqrt{6}z - \sqrt{6}t = -0,00000246 \sqrt{6}$

В 1-ю группу входят 4 уравнения, дающие значения э. д. с., полученные на токовых весах. Результаты взаимных сличений дают 2-ю группу из 6 уравнений.

Измерения этими двумя методами имеют различную точность, поэтому вес уравнений 1-й и 2-й групп должен быть принят различным.

Если вес уравнений 1-й группы положить равным единице, то для уравнений 2-й группы вес будет

$$p = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{2}{0,3} = 6.$$

Решение системы уравнений позволило получить уточненные значения э. д. с. каждого элемента сравнения.

В табл. 2 указаны значения э. д. с. элементов сравнения, полученные непосредственно на токовых весах, и уточненные значения э. д. с. этих элементов, а также средние квадратичные погрешности результата.

Таблица 2

№ элемента сравнения	Результаты измерений на токовых весах		Уточненные значения	
	э. д. с. элементов при 20° С, в	средняя квадратичная погрешность результата S_T , мкв	э. д. с. элементов при 20° С, в	средняя квадратичная погрешность результата S_{γ} , мкв
2733	1,018614	1,9	1,018617	1,3
2291	1,018621	2,9	1,018616	1,3
5643	1,018621	1,7	1,018620	1,3
5646	1,018615	1,6	1,018618	1,3

Сравнивая данные табл. 2, видим, что средняя квадратичная погрешность значений э. д. с., определенных двумя независимыми методами, примерно в полтора раза меньше, чем при методе измерений только на токовых весах.

Из изложенного следует, что в процессе проведенных измерений одновременно были решены две метрологические задачи: воспроизведение единицы э. д. с. при помощи токовых весов и определение значения э. д. с. н. э. сравнения в воспроизведенной единице.

Точность воспроизведения единицы э. д. с. характеризуется предельной погрешностью, в которую входит предельная погрешность токовых весов, равная $4 \cdot 10^{-6}$, при доверительной вероятности 0,997 [3], и предельная погрешность значения эталонного сопротивления, равная $1 \cdot 10^{-6}$.

К этим погрешностям следует добавить предельную погрешность определения э. д. с. н. э. на токовых весах и их взаимных сличений. Для той же доверительной вероятности эта дополнительная составляющая погрешность может быть принята равной 6,5 мкв (см. табл. 2). Следовательно, предельная погрешность воспроизведения единицы э. д. с., принимая во внимание другие составляющие, равна 8 мкв, или $8 \cdot 10^{-4}\%$.

Хранение единицы э. д. с.

Хранение единицы э. д. с. осуществляется посредством первичного группового эталона вольта, состоящего из 20 насыщенных н. э.

Передачу единицы э. д. с., хранимой групповым эталоном, согласно поверочной схеме производят через посредство вторичных эталонов и образцовых мер э. д. с., также являющихся н. э.

Единица э. д. с., хранимая групповым эталоном, определяется средним значением э. д. с. E_{cp} всех н. э., входящих в его состав.

Определение значения E_{cp} производится путем сличения элементов группового эталона с элементами сравнения. Методика, принятая для этой цели, требует 4-кратного сличения всех элементов группового эталона с каждым из четырех элементов сравнения. Большое число измерений позволяет снизить погрешность передачи единицы э. д. с. от элементов сравнения к групповому эталону и достаточно хорошо оценить погрешность этой передачи.

Значение группового эталона E_{cp} в результате упомянутых сличений определено по формуле

$$E_{cp} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{j=4} E_{cj} + \frac{1}{80} \sum_{j=1}^{j=4} \sum_{i=1}^{i=20} (E_i - E_{cj}),$$

где E_{cj} — значение э. д. с. элемента сравнения;

E_i — значение э. д. с. элементов группового эталона.

Таким образом, элементы сравнения являются промежуточным звеном между токовыми весами и групповым эталоном.

Погрешность E_{cp} группового эталона определяется погрешностью среднего арифметического из значений э. д. с. отдельных элементов и составляет

$$\Delta_{гр} = \sqrt{\Delta_{0гр}^2 + \Delta_{1гр}^2}$$

где $\Delta_{0гр}$ — предельная погрешность определения уточненного значения элемента сравнения;

$\Delta_{1гр}$ — предельная погрешность метода взаимного сличения элементов.

Как указано выше, предельная погрешность определения уточненного значения э. д. с. элементов сравнения равна 6,5 мкв. Предельная погрешность относительных сличений н. э. при помощи компенсатора фирмы Вольфф (1955 г.) составляет 5 мкв. Таким образом, E_{cp} первичного группового эталона вольта в 1955 г. определено с предельной погрешностью, равной 8 мкв.

Хранение единицы э. д. с. при помощи группового эталона основано на допущении, что среднее значение э. д. с. группы элементов, составляющих групповой эталон, при достаточно большом их числе может считаться неизменным. Это положение равносильно допущению взаимной компенсации изменения значений э. д. с. отдельных элементов, составляющих групповой эталон [4].

Исходя из этого положения, значение данного группового эталона считают неизменным во все время его применения. Поддержание группового эталона, т. е. неизменности установленного среднего значения эталона, заключается в проверке постоянства э. д. с. н. э., составляющих групповой эталон. Оценку последнего производят путем взаимных сличений элементов эталона. При этих сличениях один из элементов выбирается за элемент сличения и с ним поочередно сличаются все элементы группового эталона. Обозначим E_{ca} э. д. с. элемента сличения и получим

$$\left. \begin{array}{l} E_1 - E_{ca} = \Delta_1 \\ E_2 - E_{ca} = \Delta_2 \\ \dots \\ E_{19} - E_{ca} = \Delta_{19} \\ E_{ca} - E_{ca} = 0 \\ \hline \sum_{j=1}^{i=20} E_j \qquad \sum_{i=1}^{i=20} \Delta_i \\ \hline \frac{j=1}{20} - E_{ca} = \frac{i=1}{20} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Уравнение (1) дает возможность найти E_{ca} , так как все Δ_i найдены

из сличений, а $\frac{i=1}{20} = E_{cp}$, откуда

$$E_{ca} = E_{cp} - \frac{i=20}{20} \sum_{i=1}^{i=20} \Delta_i$$

Далее находят значения э. д. с. каждого элемента

$$E_i = E_{ca} + \Delta_i = E_{cp} - \left(\frac{\sum_{i=1}^{i=20} \Delta_i}{20} - \Delta_i \right). \quad (2)$$

Таким образом, значение э. д. с. каждого элемента группового эталона выражается в зависимости от E_{cp} . Среднее арифметическое этих новых значений остается равным установленному значению группового эталона.

Взаимное постоянство э. д. с. н. э. группового эталона, сохраняемое в определенных пределах (0,001%), дает основание полагать, что значение вольта, определяемое E_{cp} группового эталона, остается неизменным.

Из уравнения (2) следует, что изменение э. д. с. любого элемента группы, с одной стороны, оказывает влияние на изменение численных значений э. д. с. всех остальных элементов, так как это изменение входит в выражение

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=20} \Delta_i}{20}$$

и, с другой стороны, зависит от изменения э. д. с. всех остальных элементов. Поэтому значения э. д. с. н. э., найденные при очередном сличении, для части элементов получаются более высокими, для части — более низкими по сравнению со значениями э. д. с. этих элементов при предыдущем сличении. Все это создает иллюзию того, что изменения значений э. д. с. отдельных элементов взаимно компенсируются и потому среднее значение группового эталона остается постоянным.

Это было бы справедливо, если бы изменения э. д. с. н. э. были вызваны только случайными причинами. Но в н. э. происходят еще изменения э. д. с. в силу старения — процесса, закономерно происходящего во всех элементах и приводящего к постепенному понижению э. д. с. элементов со временем [5]. Эти изменения э. д. с. не могут быть обнаружены путем взаимных сличений н. э., так как они (сличения) имеют относительный характер и выражают только разности численных значений э. д. с. элементов, не давая представления об их абсолютных значениях.

Абсолютные значения э. д. с. н. э., а следовательно, и их изменения в силу старения могут быть найдены только путем измерений по эталонам ома и ампера. Поэтому для поддержания единицы э. д. с., хранимой групповым эталоном, неизменной необходимо периодически производить определение значения E_{cp} группового эталона по описанной выше методике.

Групповой эталон является первичным эталоном единицы э. д. с. и потому при передаче единицы вторичному эталону погрешности определения значений э. д. с. элементов вторичного эталона оценивают лишь случайными погрешностями сличения элементов вторичного эталона с элементами группового эталона. При этом, однако, следует иметь в виду, что значение вторичного эталона выражается в единице э. д. с., хранимой первичным эталоном, и лишь приближающейся к точному значению вольта в абсолютной системе МКСА.

Практическим результатом описанных выше работ было установление нового среднего значения э. д. с. первичного группового эталона вольта, равного $E_{cp} = 1,018608 \pm 8 \cdot 10^{-8}$ в.

Принятие нового значения эталона означает, что размер вольты СССР, установленный в 1948 г. [6], в котором выражалось значение E_{cp} с 1948 по 1954 г., уточнен в результате его опытного определения при помощи токовых весов.

Косвенным методом определения степени приближения единицы э. д. с. данной национальной лаборатории к абсолютному вольту системы МКСА являются международные сличения национальных эталонов вольты, периодически производимые в Международном бюро мер и весов. Результаты этих сличений выражаются в виде соотношения между вольтом данной национальной лаборатории и вольтом, хранимым в Международном бюро. Соотношение между вольтом СССР и вольтом Международного бюро с 1948 по 1955 г. приведено в табл. 3 [7].

Таблица 3

Год сличения	1948	1950	1953	1955
Вольт СССР равен вольту Международного бюро, <i>мкс</i> . .	+22,9	+23,0	+22,3	+9,3

Из табл. 3 видно, что вольт СССР в 1955 г. имеет значение, более близкое к вольту, хранимому в Международном бюро, чем то, которое имело место в предыдущие годы.

Следовательно, размер вольты, установленный при помощи токовых весов, более близок к вольту системы МКСА, чем размер вольты, установленный в 1948 г.

Вторым существенным результатом работы явилось также расширение методики проверки сохранности единицы э. д. с., хранимой первичным групповым эталоном и заключающейся прежде только во взаимных сличениях н. э. первичного группового эталона.

Новая методика предусматривает, кроме того, периодические абсолютные определения E_{cp} первичного группового эталона методом токовых весов, что позволяет учитывать изменение э. д. с. н. э., составляющих эталон, вследствие их старения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев С. В., Мюллер В. В. и Лукьянов П. Н., Токовые весы и установление значения эталона вольты, Труды ВНИИМ, вып. 31(91), 1957, стр. 5.
2. Агаецкий П. Н., Егоров К. Н., Марциняк А. И., Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ, Труды ВНИИМ, вып. 32(92), 1958.
3. Горбачев С. В., Анализ погрешностей при измерении на токовых весах э. д. с. эталонных нормальных элементов, Труды ВНИИМ, вып. 38(98), 1959, стр. 5.
4. Маликов М. Ф., Эталон международного вольты, Труды ВНИИМ, вып. 1(13), 1925, стр. 130.
5. Мюллер В. В., Естественное старение нормальных элементов, Труды ВНИИМ, вып. 39(99), 1960, стр. 65.
6. Колосов А. К., Чалова Е. А., Состояние государственного эталона вольты СССР, Труды ВНИИМ, вып. 39(99), 1960, стр. 39.
7. Procès-Verbaux des Séances du Comité International des Poids et Mesures, t. XXIII-B, p. E 74; t. XXIV, p. 147; t. XXV, p. 129.

Поступила в редакцию
4/1 1960 г.

С. В. ГОРБАЦЕВИЧ, В. П. ШИГОРИН

ВНИИМ

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В статье дается краткое описание новой измерительной аппаратуры — моста-компаратора, меры отношений и магазина отношений. Рассматривается методика измерения сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом), в пределах 0,001—100 000 ом. Измерение сопротивлений с помощью моста-компаратора и меры отношений производится методом замещения, а с помощью магазина отношений — методом отдельного уравновешивания сопротивлений. Предельная погрешность измерений составляет 0,0001—0,001%.

В настоящее время при измерении ряда электрических, магнитных и неэлектрических величин в качестве образцовых мер широко применяются сопротивления, не равные $10^{\pm k}$ ом (при k — целом числе), которые должны быть известны с погрешностью не более 0,001%. Существующие методы и аппаратура не обеспечивают необходимой точности измерений таких сопротивлений.

В СССР измерение производится с погрешностью не менее 0,01%, в США и Англии благодаря применению специальных магазинов отношений [1] погрешность измерений понижена до 0,005—0,003%.

Измерение сопротивлений в указанных выше пределах с погрешностью до 0,001% и менее может быть обеспечено при условии применения мостовой измерительной установки [2], в которой предусмотрена возможность точного определения отношения сопротивлений плеч. Решение этой задачи практически возможно путем выбора метода, основанного на применении меры отношений или магазина отношений, которые были разработаны и изготовлены во ВНИИМ в 1957—1958 гг. Одновременно был разработан и изготовлен мост-компаратор [3].

Предназначенный в основном для сравнения эталонных и образцовых сопротивлений мост-компаратор благодаря применению меры отношений с успехом используется для измерения сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом).

Сравнение отношений сопротивлений при использовании моста-компаратора и меры отношений производится методом замещения, а при использовании магазина отношений — методом отдельного уравновешивания моста, в плечи которого включаются сопротивления магазина и сравниваемые сопротивления.

Результаты анализа показали, что более совершенным является метод, основанный на применении моста-компаратора и меры отношений. Благодаря этому методу, впервые примененному во ВНИИМ, погрешность измерения сопротивлений, не равных 10^{2k} ом (при k — целом), в пределах от 0,001 до 100 000 ом понижена до $0,001 \pm 0,0001$ %.

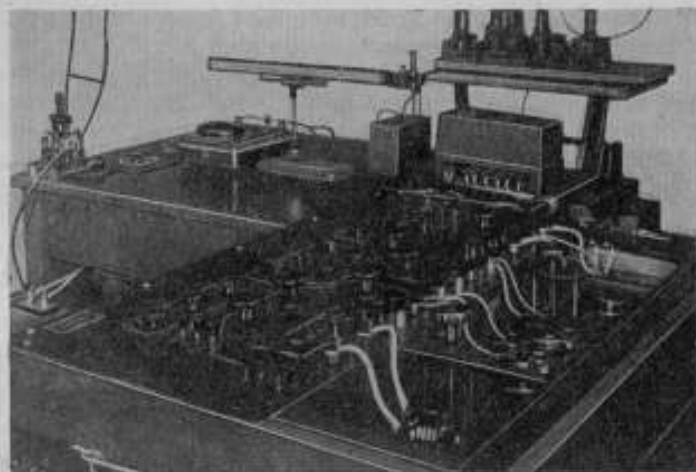


Рис. 1.

Приводим общий вид моста-компаратора (рис. 1), магазина отношений (рис. 2) и меры отношений (рис. 3).

Мост-компаратор и магазин отношений помещены в термостатированные ванны, наполненные трансформаторным маслом. В ваннах предусмотрены перфорированные эбонитовые основания для установки измеряемых сопротивлений. Автоматизированное терморегулирующее устройство с электромешалками позволяет поддерживать температуру масла в ваннах при $20 \pm (0,01 \div 0,02)^\circ \text{C}$.



Рис. 2.



Рис. 3.

Мера отношений конструктивно оформлена в виде «белчьего колеса», заключенного в перфорированный металлический футляр. На верхнюю эбонитовую крышку от всех промежуточных соединений и концов

крайних секций сопротивления предусмотрены выводы к зажимам, предназначенным для включения меры в измерительную цепь компаратора.

Все катушки меры отношений и наиболее ответственные катушки сопротивления компаратора и магазина отношений изготовлены из манганина, имеющего температурный коэффициент не выше 0,0015% на 1°С, и герметизированы.

Мост-компаратор может быть включен как по схеме одинарного, так и по схеме двойного моста с отношением сопротивлений плеч от 1 до 0,1 (или 10), благодаря чему обеспечивается его универсальность.

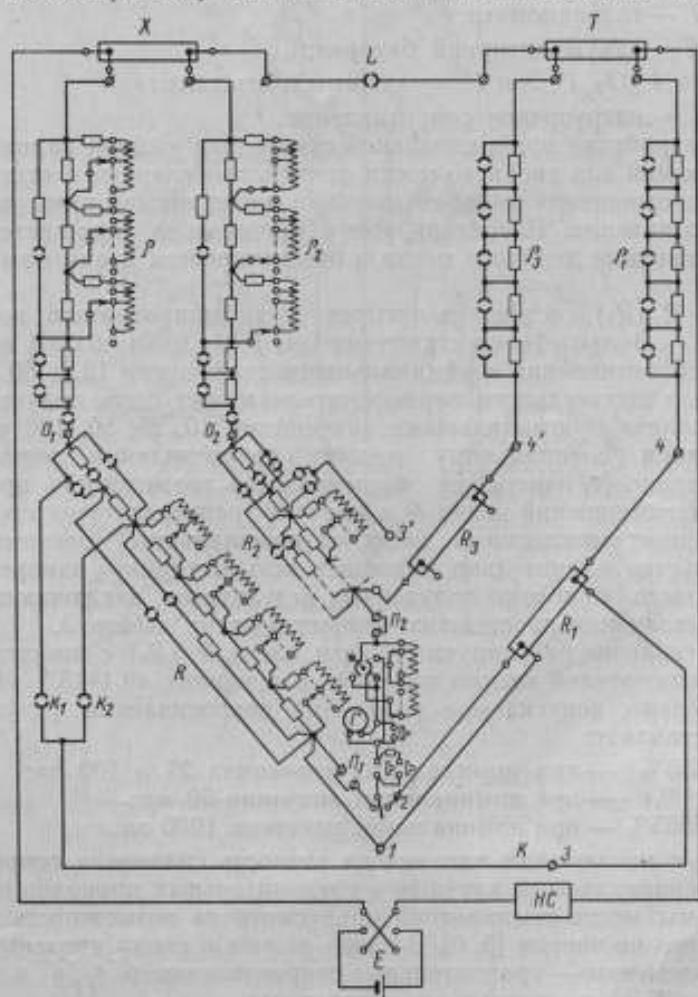


Рис. 4.

Принципиальная схема моста-компаратора приведена на рис. 4, где приняты следующие обозначения:

- R и R_1 — регулируемое и нерегулируемое главные (внешние) плечи отношения двойного моста;
- R_2 и R_3 — регулируемое и нерегулируемое вспомогательные (внутренние) плечи отношения;
- X и T — сравниваемая и тарная (вспомогательная) катушки сопротивления, включенные в цепь моста для сравнения равных сопротивлений методом замещения;

- ρ и ρ_2 — уравнивающие сопротивления, включенные в регулируемые плечи моста;
- ρ_1 и ρ_3 — то же, в нерегулируемые плечи моста;
- K — переключатель для короткого замыкания главных (внешних) плеч моста;
- K_1 и K_2 — штепсельные контакты;
- L — переключатель в цепи сравнения моста;
- Π_1 и Π_2 — переключатели в цепи гальванометра;
- Γ — гальванометр;
- E — аккумуляторная батарея;
- $O_1, 1, 2, 3$ и 4 ($O_2, 1', 3'$ и $4'$) — зажимы в цепи моста;
- HC — нагрузочное сопротивление.

При разработке принципиальной схемы был выбран вариант, предусматривающий для двойного моста одинаковые главные и вспомогательные плечи отношения и последовательно соединенные с ними уравнивающие сопротивления. Благодаря этому значительно упрощается процесс уравнивания двойного моста и обеспечивается взаимозаменяемость плеч.

Плеcho R (R_2) состоит из четырех модифицированных декад типа Вайднера — Вольфа [4] со ступенями 0,1; 0,01; 0,001; 0,0001 ом и трех катушек сопротивления с номинальными значениями 12,5; 50 и 900 ом . С помощью штепсельного переключателя может быть получено сопротивление плеча с номинальными значениями 10, 25, 50, 100 и 1000 ом .

Благодаря специальному расчету сопротивлений регулируемого плеча в процессе измерения обеспечивается возможность производить все отсчеты отношений плеча R к плечу R_1 непосредственно в миллионных или десятимиллионных долях от номинального отношения. Это обстоятельство значительно упрощает всю методику измерений, особенно процесс обработки полученных результатов, заключающийся при этом в выполнении простейших арифметических действий.

Сопротивление регулируемой части плеча R (R_2) с помощью декадных переключателей можно изменять в пределах 49,4445 — 50,5555 ом . Следовательно, допускаемое изменение сопротивления регулируемого плеча составляет:

- $\pm 0,5555\%$ — при номинальных значениях 25 и 100 ом ;
- $\pm 1,111\%$ — при номинальном значении 50 ом ;
- $\pm 0,05555\%$ — при номинальном значении 1000 ом .

С целью исключения влияния на точность сравнения сопротивлений зажимов сравниваемых катушек и соединительных проводов при разработке схемы моста-компаратора предусмотрена возможность уравнивания его по частям [5, 6]. В связи с этим в схему введены дополнительные элементы — уравнивающие сопротивления ρ , ρ_1 , ρ_2 и ρ_3 и переключатели L и K со штепсельными контактами.

В качестве плеч отношения одинарного моста могут быть использованы как внешние, так и внутренние плечи компаратора. В остальном схема компаратора ясна из рис. 4.

Схема магазина отношений изображена на рис. 5. Средняя часть магазина состоит из последовательно соединенных 20 катушек по 100 ом . Щетка рычажного переключателя этого двухдекадного элемента является потенциальным выводом прибора. При перемещении щетки, включенной в цепь гальванометра, секции сопротивления по 100 ом последовательно переключаются из плеча R в плечо R_1 моста, изменяя отношение сопротивлений магазина.

С помощью двух декад с секциями по 10 ом, подключенных к крайним секциям двухдекадного элемента, имеется возможность производить переключение сопротивлений соответственно ступенями по 10 ом. Эти декады имеют двойной рычажный переключатель, при переводе которого сопротивление одной декады возрастает, а другой — убывает. Дальнейшее более плавное регулирование отношения сопротивлений плеч производится с помощью сдвоенных декад с секциями по 1; 0,1

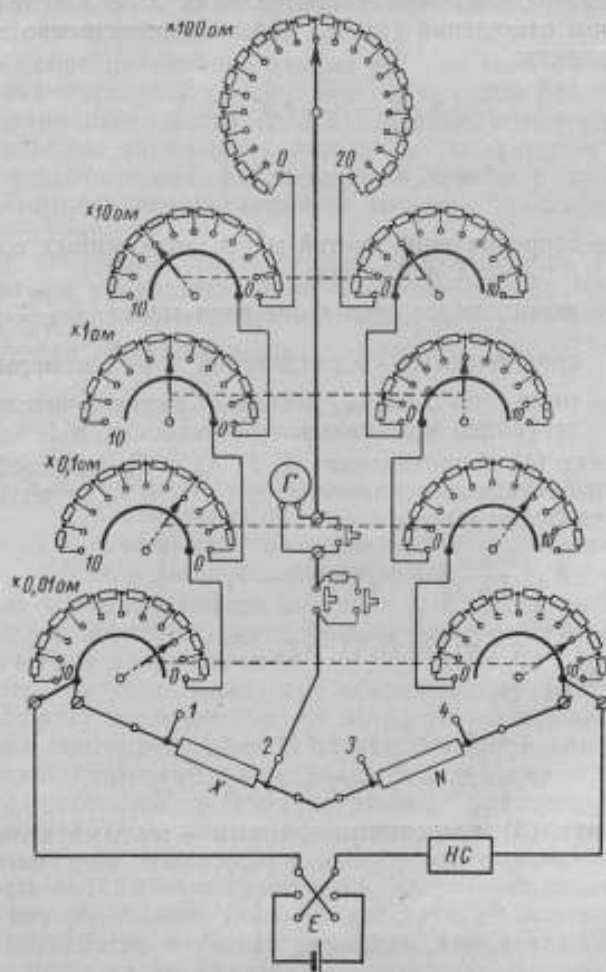


Рис. 5.

и 0,01 ом. Дополнительно к этому, в зависимости от чувствительности установки, можно получить один или два знака в отсчете по отклонениям гальванометра путем интерполяции.

С целью уменьшения влияния нестабильности сопротивлений магазина отношений на результаты измерений необходимо через год или полгода производить его калибровку.

Мера отношений состоит из 10 секций по 10 ом и 10 секций по 100 ом, последовательно соединенных между собой (рис. 3). Предварительно прокалиброванная (в единицах меры) мера отношений применяется для нахождения с помощью моста-компаратора точного отно-

шения сравниваемых сопротивлений, из которых одно является измеряемым и другое — образцовым (эталонным).

Измерение сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом), может производиться как с помощью моста-компаратора и меры отношений, так и с помощью магазина отношений.

В первом случае измерение осуществляется методом замещения плеч сравнения моста-компаратора путем двух его уравновешиваний — при включении сравниваемых сопротивлений X и T (отсчет r) и при включении меры отношений (отсчет r_m). Соответственно этому можно написать уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{X}{T} &= K_n (1 + r - r_x) \\ \frac{X_m}{T_m} &= K_n (1 + r_m - r_x) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где X_m и T_m — сопротивления частей меры, включенных соответственно в плечи X и T моста;

K_n — номинальное отношение плеч моста $\left(\frac{R_{II}}{R_{III}}\right)$, а также сравниваемых сопротивлений $\left(\frac{X_n}{T_n}\right)$ и меры $\left(\frac{X_{mn}}{T_{mn}}\right)$;

r_x — отсчет по лимбам декадных переключателей, соответствующий номинальному отношению K_n .

В уравнениях (1) сопротивления X , T , X_m и T_m целесообразно выразить через относительные отклонения x , t , x_m и t_m от их номинальных значений. Тогда будем иметь

$$\left. \begin{aligned} K_n \left(\frac{1+x}{1+t}\right) &= K_n (1 + r - r_x) \\ K_n \left(\frac{1+x_m}{1+t_m}\right) &= K_n (1 + r_m - r_x) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или

$$\left. \begin{aligned} x &= t + r - r_x + t(r - r_x) \\ x_m &= t_m + r_m - r_x + t_m(r_m - r_x) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

В уравнениях (3) последними членами — малыми величинами второго порядка — можно пренебречь, в результате чего получим

$$\left. \begin{aligned} x &= t + r - r_x \\ r_x &= r_m + t_m - x_m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При выполнении измерений образцовое (или эталонное) сопротивление выбирается в зависимости от значения измеряемого сопротивления таким образом, чтобы отношение $\frac{X}{T}$ по возможности совпадало с используемым номинальным отношением меры. Например, измерение сопротивлений 33,000 и 33,333 ом может быть выполнено путем сравнения с образцовыми (или эталонными) сопротивлениями номинальным значением соответственно 10 ом (плечо X) и 100 ом (плечо T) через отношения меры $\left(\frac{X_{mn}}{T_{mn}}\right)$, равные 0,30 и 0,33. Номинальному отношению меры и сравниваемых сопротивлений должно соответствовать номинальное отношение плеч моста-компаратора $\left(\frac{R_{II}}{R_{III}}\right)$ и $\left(\frac{R_{2II}}{R_{2III}}\right)$.

В зависимости от значений сравниваемых сопротивлений компаратор включается по схеме одинарного или двойного моста. Однако следует отметить, что при включении меры отношений (получении отсчета r_x) во всех случаях используется соединение по схеме одинарного моста.

При обработке результатов измерения по формулам (4) необходимо учитывать знаки перед отсчетами r и r_x . Если измеряемое сопротивление было включено в плечо T , а образцовое — в плечо X , то отсчеты необходимо брать со знаком минус.

Измерение сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом), с помощью магазина отношений осуществляется методом отдельного уравновешивания одинарного моста (рис. 5). Магазин отношений по своему применению подобен длинному реохорду с подвижным контактом; 100 катушек сопротивления, заменяющие в принципе проволоку реохорда, позволяют обеспечить высокую точность и широкие пределы измерения сопротивлений.

В процессе измерения неизвестного сопротивления X необходимо произвести четыре уравновешивания и соответственно четыре отсчета по лимбам декадных переключателей плеча R .

Расчет выполняется по формуле

$$X = \frac{R_2 - R_3}{R_4 - R_1} N, \quad (5)$$

где R_1 , R_2 , R_3 и R_4 — отсчеты, соответствующие равновесию моста при подключении гальванометра к потенциальным зажимам сравниваемых сопротивлений 1, 2, 3 и 4; N — образцовое сопротивление.

С помощью магазина отношений наряду с измерением отдельных сопротивлений удобно производить калибровку точных мостов, компенсаторов и магазинов сопротивления.

Мост-компаратор был подвергнут всестороннему теоретическому и экспериментальному исследованию. В процессе исследования был произведен анализ систематических и случайных погрешностей, обусловленных неточной подгонкой сопротивлений, утечками тока, влиянием сопротивлений контактов и соединительных проводников, влиянием т. э. д. с., недостаточной чувствительностью, влиянием температурного режима и другими причинами [3].

Возможность появления погрешностей, вызванных этими причинами, была учтена при разработке схемы и конструкции моста-компаратора, а также при разработке методики измерений сопротивлений. При этом были приняты меры, чтобы практически полностью исключить все систематические погрешности и уменьшить до минимально возможных значений случайные погрешности, обусловленные известными причинами.

Применение методов замещения и перестановки позволило практически исключить систематические погрешности от неточной подгонки сопротивлений, утечек тока через изоляцию и других причин. Благодаря уравновешиванию двойного моста по частям обеспечивается исключение погрешности, обусловленной сопротивлениями проводников и контактов, с помощью которых подключаются сравниваемые сопротивления. При уравновешивании моста методом «ложного нуля» с переключением направления тока достигается исключение влияния постоянных т. э. д. с., возникающих в измерительной цепи, а также частично исключается влияние на показания компаратора посторонних источников постоянного тока.

При разработке схемы компаратора в качестве регулируемых элементов были выбраны декады Вайднера — Вольфа, которые в процессе уравнивания моста практически не вносят никакой погрешности в его показания (случайная погрешность от вариаций контактных сопротивлений и переменных т. э. д. с. не превышает 0,00001%). Терморегулирующее устройство и надежное термостатирование, предусмотренные при разработке конструкции компаратора, позволяют производить измерения сопротивлений с температурной (случайной) погрешностью не более 0,00003%.

Таким образом, можно полагать, что благодаря применяемой методике сравнения мост-компаратор практически не имеет систематической погрешности. Это убедительно подтверждается результатами калибровки плеча R моста, сравнением результатов измерения двумя методами (замещения и перестановки), а также сравнением с результатами, полученными одновременно с помощью компенсационной установки.

В процессе исследования моста-компаратора было выполнено около 2000 сравнений сопротивлений. С целью определения степени искажения результатов сравнения случайными погрешностями производились повторные измерения одной и той же величины, благодаря чему получены ряды измерений, содержащие до 25 независимых значений X одинакового достоинства.

Предельная погрешность арифметического среднего (с вероятностью 0,997) имеет значение порядка 0,00001 + 0,00005% при сравнении катушек с номинальными значениями 0,1 — 1000 ом и 0,00005 + 0,0001% при сравнении катушек с номинальными значениями 0,01; 0,001; 10 000 и 100 000 ом [3].

Применение меры отношений обеспечило возможность использовать мост-компаратор для измерения сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом), в пределах 0,001 + 100 000 ом.

В связи с этим можно полагать, что результаты измерений сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом, будут искажены погрешностями приблизительно в такой же степени, как и при сравнении эталонных сопротивлений. Общая (суммарная) погрешность результата измерения при этом будет складываться из погрешности образцового (эталонного) сопротивления, погрешности меры отношений и погрешности показаний компаратора. В этом можно убедиться, рассматривая расчетную формулу

$$x = t + (x_m - t_m) + (r - r_m). \quad (6)$$

В данном случае относительная средняя квадратичная погрешность результата измерений может быть вычислена по формуле

$$S_x = \sqrt{S_t^2 + S_m^2 + S_n^2}, \quad (7)$$

где S_t , S_m и S_n — средние квадратичные погрешности (относительные) соответственно образцового (эталонного) сопротивления, меры отношений и показаний компаратора.

Мера отношений состоит из секций сопротивления по 10 и 100 ом, поэтому можно считать, что погрешность S_m калибровки ее не будет превышать 0,00005%.

Исходя из оценки точности сравнения эталонных сопротивлений, можно также полагать, что погрешности S_t и S_n не будут превышать 0,00005% при измерении сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом), в пределах 0,1 — 1000 ом и 0,0001% — при измерении сопротивле-

ний в пределах от 0,001 до 0,1 и от 1000 до 100 000 ом. Тогда S_x не будет превышать соответственно 0,0001 и 0,0002%.

Такой приблизительный расчет погрешности в достаточной мере согласуется с результатами измерений, приведенными в табл. 1. В качестве объекта измерений была использована переходная мера с последовательным соединением 10 секций сопротивления по 10 ом. Каждое

Таблица 1

Значение сопротивления, ом			Разность между значениями, %
номинальное	среднее при измерении с помощью меры отношений	суммарное по результатам измерений отдельных секций	
20	19,998772	19,998771	0,00001
30	29,998282	29,998278	0,00001
40	39,99790	39,99793	0,00007
50	49,99760	49,99761	0,00002
60	59,99696	59,99700	0,00007
70	69,99627	69,99633	0,00009
80	79,99571	79,99576	0,00006
90	89,99519	89,99515	0,00005
Средняя разность между значениями			0,00005

Таблица 2

Значение сопротивления, ом			Разность между значениями, %
номинальное	при измерении с помощью магнитоизмерительной меры отношений	суммарное по результатам измерений отдельных секций	
10	9,99922	9,99921	0,0001
20	19,99884	19,99879	0,0002
30	29,99839	29,99830	0,0003
40	39,99797	39,99795	0,0001
50	49,99767	49,99766	0,0001
60	59,99716	59,99704	0,0002
70	69,99662	69,99640	0,0003
80	79,99580	79,99585	0,0001
90	89,99527	89,99526	0,0001
100	99,9954	99,9951	0,0003
Средняя разность между значениями			0,0002

сопротивление, приведенное в табл. 1, было измерено двумя методами: методом замещения путем сравнения каждой секции переходной меры с образцовой катушкой № 001018 с последующим суммированием результатов и путем непосредственного сравнения с той же катушкой рассматриваемым методом с применением меры отношений.

Несколько позднее те же сопротивления были измерены с помощью магазина отношений и параллельно с помощью моста-компаратора путем сравнения каждой секции переходной меры с образцовой катушкой. Результаты измерений приведены в табл. 2.

На основании изложенного и данных табл. 1 и 2 имеется возможность оценить точность измерений сопротивлений при использовании как моста-компаратора с применением меры отношений, так и магазина отношений.

Выводы

1. Существующие методы и аппаратура не обеспечивают необходимой в настоящее время точности измерения сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом (при k — целом). В связи с этим во ВНИИМ в 1957—1958 гг. разработана и исследована новая измерительная аппаратура, в состав которой входят: мост-компаратор, мера отношений и магазин отношений.

2. В процессе исследования новой аппаратуры установлено, что с ее помощью точность измерения сопротивлений, не равных $10^{\pm k}$ ом, значительно повышается.

Предельная погрешность результатов составляет $0,0001 \div 0,0005\%$ при измерении с помощью моста-компаратора и меры отношений сопротивлений в пределах $0,001 \div 100\,000$ ом и $0,0002 \div 0,001\%$ при измерении сопротивлений в пределах $0,1 \div 100\,000$ ом с помощью магазина отношений.

3. В связи с получением положительных результатов исследования новая измерительная аппаратура может быть рекомендована для использования в институтах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wenner F. and Weibel E., The Testing of Potentiometers, «Bulletin of the Bureau of Standards», v. 11, № 1, 1914, pp. 1—40.
2. Широков К. П., Пути повышения точности измерения сопротивлений, не равных 10^k при k целом числе. Труды конференции по электрическим измерениям и приборостроению, Киев, 1959.
3. Шигорин В. П., Мост для сравнения эталонных и образцовых сопротивлений в пределах от 0,001 до 100 000 ом, «Измерительная техника», № 4, 1960, стр. 33—36.
4. Mueller E. F. and Wenner F., The Waidner—Wolff and other Adjustable Electrical-Resistance Elements, «Journal of Research of the NBS», v. 15, № 5, 1935, pp. 477—492.
5. Широков К. П., Прибор для точного уравнивания двойного моста, Труды ВНИИМ, вып. 24(34), 1954, стр. 94.
6. Wenner F., Methods, Apparatus and Procedures for the comparison of Precision Standard Resistors, «Journal of Research of the NBS», v. 25, № 2, 1940, pp. 229—293.

Поступила в редакцию
2/IX 1959 г.

Г. Ф. ПАНКРАТОВ, Т. Б. РОЖДЕСТВЕНСКАЯ
ВНИИМ

ПЕРЕДАЧА ВЕРНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ЭТАЛОНОВ ОБРАЗЦОВЫМ И РАБОЧИМ МЕРАМ И ПРИБОРАМ БОЛЬШОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В статье рассмотрена часть новой поверочной схемы для мер и приборов электрического сопротивления, относящаяся к значениям $10^5 \pm 10^{14}$ ом, и дано описание методов измерения и аппаратуры, разработанных во ВНИИМ для обеспечения этого вида поверок.

Развитие физики и химии привело к возможности создания высококачественных изоляционных материалов и новых типов более стабильных высокоомных непроволочных и микропроволочных сопротивлений, необходимых в технике счетно-решающих устройств, радиоэлектронике и в других специальных отраслях техники. Для количественной оценки свойств этих материалов и сопротивлений приборостроительная промышленность осваивает выпуск мер и измерительных приборов с верхним пределом измерения $10^{12} - 10^{16}$ ом.

Расширение пределов измерения рабочих мер и приборов, выпускаемых промышленностью, в свою очередь требует разработки новых методов и технических средств, обеспечивающих поверку этих приборов, и пересмотра существующих поверочных схем, устанавливающих соподчинение образцовых мер и измерительных приборов сопротивления различных разрядов, методы их сличения и необходимую точность.

Нами рассмотрена часть новой поверочной схемы,* относящаяся к области измерений больших значений электрического сопротивления на постоянном токе, и приводятся краткие сведения о методах и аппаратуре, обеспечивающих передачу верных значений единицы сопротивления от образцовых мер сопротивления 1-го разряда рабочим мерам и приборам.

Поверочная схема для мер и приборов большого электрического сопротивления, применяемых на постоянном токе

Рабочие меры и измерительные приборы. Нижнее поле поверочной схемы определяет объекты поверки — рабочие меры и измерительные приборы. В качестве рабочих мер большого сопротив-

* См. Поверочные схемы, Стандартгиз, 1960, стр. 41.

ления в промышленности применяются как меры сопротивления, выполненные в виде секционированных катушек сопротивления, так и магазины сопротивления. К сожалению, до последнего времени меры сопротивления с номинальным значением, превышающим 10^5 ом, серийно не выпускаются. Имеются только отдельные конструкции, разработанные ВНИИМ, ВНИИЭП и др., на основании которых были выпущены мелкие серии мер и магазинов большого сопротивления, однако количество их далеко не удовлетворяет запросы промышленности.

В результате создавшегося положения ряд организаций начинает изготавливать меры и магазины полукустарным способом, вследствие чего применяется значительное количество мер и магазинов весьма низкого качества.

Ввиду отсутствия специализированных мер большого сопротивления часто в качестве образцовых начинают использоваться непроволочные и микропроволочные сопротивления, не оформленные конструктивно в виде меры, без соответствующей экранировки, что ведет к некоторой неопределенности их значений, особенно при весьма больших сопротивлениях ($10^{10} \div 10^{14}$ ом).

В табл. 1 приведены данные мер и магазинов, которые могли бы быть выпущены мелкими сериями.

Таблица 1

Тип прибора	Номинальное значение сопротивления меры или наибольшее значение сопротивления, ом	Потребность меры в % от номинального значения	Изготовитель
Магазины			
362-А (непроволочный) . . .	10^{10}	$\pm 10,0$	—
УПМ	10^8	$\pm 3,0$	Завод „Пуна-нэ-Рэт“
МСВ	10^{10}	$\pm 2,0$	ВНИИМ
„DAWE“	10^8	$\pm 1,0$	„DAWE“ (Англия)
МСШ-70 (марганцовый) . . .	10^8	$\pm 0,1$	ВНИИЭП
Катушки			
391, № 1 (марганцовая) . . .	10^7	$\pm 0,05$	—
391-А	$3 \cdot 10^7$	$\pm 0,1$	—
392, № 1	10^6	$\pm 0,05$	—
Меры типа МБС (непроволочные)	10^{12}	$\pm 2,0$	ВНИИМ

Меры и магазины сопротивления до 10^8 ом, изготовленные из марганцовой проволоки или микропроволочки, имеют погрешность по крайней мере на порядок меньшую, чем меры и магазины более высокого сопротивления ($10^8 \div 10^{12}$), изготавливаемые, как правило, из непроволочных сопротивлений и имеющие погрешность в пределах $1 \div 10\%$.

Не лучшее положение с мерами большого сопротивления и за границей. Судя по последним данным [1], в США даже точность образцовых мер, значение которых превышает 10^8 ом, оценивается погрешностью $1 \div 2\%$, что объясняется нестабильностью непроволочных сопротивлений, положенных в основу конструкции мер.

Несмотря на ограниченную точность рабочих мер и магазинов сопротивления, требования к точности поверочной аппаратуры достаточно высоки. Если учесть необходимость по крайней мере трехкратного «запаса точности», то для возможности поверки рабочих мер, указанных в табл. 2, необходимо иметь аппаратуру, обеспечивающую определенное значение мер до 10^9 ом с погрешностью 0,03% и $10^9 \div 10^{12}$ ом — с погрешностью $0,6 \div 1\%$.

Таблица 2

Тип прибора	Верхний предел измерения, ом	Напряжение на измеряемом сопротивлении, в	Допустимая погрешность (по данным изготовителя)	Изготовитель
Тераомметры				
Ф-57	$2 \cdot 10^{14}$	120	$4 \div 15\%$ от длины рабочей части шкалы	Завод „Точэлектрприбор“
372М	10^{13}	100	$4 \div 20\%$ от измеряемого сопротивления	—
ИВС-4	10^{14}	100	$4 \div 10\%$ от длины шкалы	—
Модель 26	$5 \cdot 10^{12}$	100	$1,5\%$ от длины шкалы плюс 3% от данного значения	„Norma“ (Австрия)
3/500	$2,5 \cdot 10^{14}$	$100 \div 500$	3% от среднего значения	ФРГ
2423	10^{13}	$10 \div 100$	$2 \pm 0,2A\%$, где А — измеряемая величина	Bruel und Kjaer (Дания)
200В	10^{16}	—	2% от длины шкалы	Keitley Instruments (США)
Мосты				
Р-190	10^{12}	180	2% от измеряемого сопротивления	Завод „Вибратор“
ПМСШД	10^{14}	180	1% от измеряемого сопротивления	—

В табл. 2* приведены некоторые сведения о приборах для измерения больших сопротивлений как отечественных, так и иностранных, которые являются объектами поверок и также могут применяться в качестве рабочих приборов. Верхние пределы измерения мегомметров и тераомметров ограничиваются пока значением $2,5 \cdot 10^{14}$ ом. Погрешности рабочих приборов в зависимости от измеряемых значений лежат в пределах $1 \div 20\%$ по отношению к измеряемому значению. Поверка омметров и тераомметров, так же как и поверка мостов, осуществляется по образцовым мерам. Для возможности оценки имеющихся приборов значение образцовых мер до 10^{14} ом должно быть известно с погрешностью, не превышающей $0,3 \div 0,5\%$. Образцовые меры таких больших значений при современном уровне техники изготовления сопротивлений могут быть выполнены только из непроволочных элементов, а следовательно, зависят от напряжения и температуры и нестабильны во времени. В силу этого для получения указанной точности определение значений образ-

* Данные, приведенные в табл. 1 и 2, взяты как из литературных источников, так и из технических характеристик приборов, поступающих в поверку во ВНИИМ.

цовых мер должно осуществляться в тех же условиях температуры и при том же напряжении, при которых будет проходить поверка тераомметров.

Кроме того, необходима поверка образцовых мер непосредственно перед их применением. Это усложнение процесса поверки, несомненно, отпадет, как только будут созданы достаточно стабильные непроволоочные сопротивления или высокоомные (до 10^{14} ом) сопротивления из микропроволоки.

Методы поверки. По существующей схеме все меры большого сопротивления 3-го разряда до 10^{10} ом получают свое значение от образцовой катушки сопротивления 2-го разряда, имеющей значение 10^5 ом. Значения образцовых мер сопротивления 10^{10} — 10^{14} ом определяются методом разряда конденсатора, т. е. в этом случае передача значений ведется не от образцовой меры сопротивления, а от образцовых мер емкости и времени.

Такая система передачи значений несколько нарушает стройность поверочной схемы, однако она оправдана рядом соображений. Лучшим вариантом, казалось бы, являлась схема, предусматривающая поверку мер 10^{10} — 10^{14} ом (3-го разряда), так же как и мер меньшего значения, по образцовым катушкам сопротивления 2-го разряда в 10^5 ом. Однако осуществление такой схемы встретило бы значительные практические трудности.

Известно [2, 3], что наиболее точными методами измерения больших сопротивлений в настоящее время являются метод уравновешенного моста и метод, основанный на применении заряда или разряда конденсатора известной емкости при постоянном напряжении.

Сравнение этих методов при измерении сопротивлений, превышающих 10^{10} ом, говорит в пользу последнего. Метод моста прочно вошел в практику точных измерений сопротивлений, однако с увеличением измеряемого сопротивления точность этого метода снижается как в связи с возрастанием влияния токов утечки через изоляцию, так и вследствие снижения комплектной чувствительности моста.

Известно, что комплектная чувствительность S_k мостовой схемы снижается с возрастанием отношения плеч моста. Если считать, что входное сопротивление нулевого указателя моста во много раз больше измеряемого сопротивления, что имеет место при применении в качестве нулевого указателя электрометров или усилителей постоянного тока, то комплектную чувствительность моста можно представить в виде

$$S_k = \frac{mU}{(1+m)^2} S_U \cdot 10^{-2}, \quad (1)$$

где S_k — комплектная чувствительность моста (мм/‰);

m — отношение плеч моста;

U — напряжение питания моста;

S_U — чувствительность нулевого указателя к напряжению (мм/в).

При возрастании измеряемого сопротивления отношение плеч возрастает.

Для того чтобы мостовым методом сравнить сопротивление 10^{10} ом с образцовой мерой 10^5 ом, необходим либо мост с отношением плеч, равным 10^5 , либо промежуточные образцовые меры сопротивления со значениями, превышающими 10^5 ом. На рис. 1 приведен график зависимости комплектной чувствительности моста от отношения плеч при напряжении питания моста $U = 100$ в и при применении в качестве нулевых указателей лучших типов электрометров. График и подсчет показывают, что при увеличении отношения плеч моста $1 \div 10^5$ комплектная

чувствительность падает в 25 000 раз. При отношении плеч, равном 10^5 , комплектная чувствительность моста становится равной $0,1 \text{ мм}/\%$, что явно недостаточно для измерения даже с точностью 1% , так как отклонение нулевого указателя на $0,1 \text{ мм}$ может быть вызвано не только разбалансировкой моста, но и рядом причин (дрейф нуля, влияние паразитных связей и т. п.). Значительно худшее положение наступает при еще большем отношении плеч, необходимом при измерении сопротивлений, превышающих 10^{10} ом . Указанные обстоятельства привели к тому, что передача значений от меры 10^5 ом (1-го разряда) мерам или магазинам 10^{10} ом (3-го разряда) осуществляется в настоящее время путем введения промежуточных (переходных) мер большого сопротивления: $10 \cdot 10^5 \text{ ом}$ и $10 \cdot 10^6 \text{ ом}$, не показанных на поверочной схеме и представляющих собой манганиновые секционированные меры [4].

Каждая секция меры $10 \cdot 10^5 \text{ ом}$ сличается при отношении плеч моста, равном 1, с образцовой мерой 2-го разряда 10^5 ом .

Каждая секция меры $10 \cdot 10^6 \text{ ом}$ сличается также при отношении плеч, равном 1, с суммой секций катушки $10 \cdot 10^6 \text{ ом}$. Таким образом воспроизводятся значения 10^6 и 10^7 ом , причем ежегодные наблюдения показывают, что значение 10^6 ом воспроизводится с погрешностью, не превышающей $0,005\%$, а значение 10^7 ом — $0,01\%$.

Введение промежуточных мер дает возможность применять для поверки сопротивлений 10^{10} ом мост с отношением плеч уже не 10^5 , а 10^2 , что обеспечивает повышение комплектной чувствительности моста на два порядка, т. е. вместо $0,1$ — $10 \text{ мм}/\%$.

Дальнейшее расширение пределов точного измерения сопротивления (свыше 10^{10} ом) на мосте ограничивается как чувствительностью нулевых указателей, так и отсутствием стабильных мер сопротивления со значением большим чем 10^7 ом . Перспективы создания таких мер имеются в связи с освоением промышленного выпуска микропроволочных сопротивлений.

Однако до последнего времени меры 10^8 и 10^9 ом из микропроволочки находятся только в стадии опытных образцов и не могут быть использованы в качестве образцовых мер 2 и 3-го разрядов.

Таким образом, при современном состоянии техники изготовления нулевых высокоомных указателей и образцовых проволочных сопротивлений пределом измерения сопротивлений с метрологической точностью при помощи моста можно считать 10^{10} ом . Возможность повышения чувствительности моста путем увеличения напряжения питания моста в поверочной практике ограничивается прежде всего тем, что поверяемые меры и магазины 3-го разряда со значениями 10^7 — 10^{10} ом могут быть

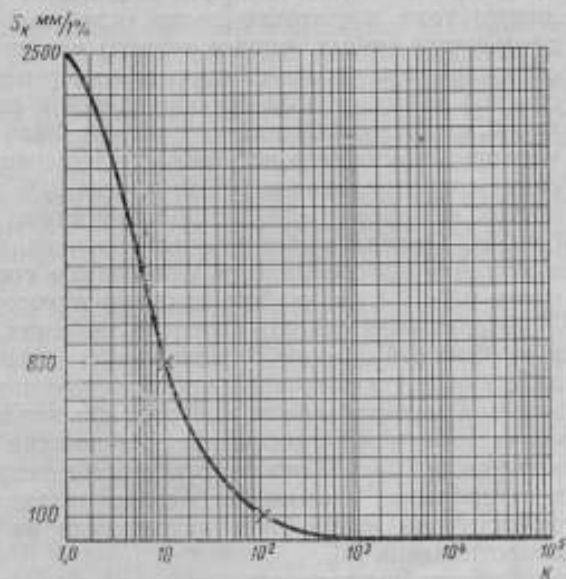


Рис. 1.

изготовлены из непроволочных сопротивлений, значение которых зависит от приложенного к ним напряжения, поэтому их приходится поверять при напряжениях, соответствующих условиям их применения. В силу этого напряжение, при котором ведется поверка, в значительной степени определяется не режимом моста, а объектом измерения.

Кроме рассмотренных выше особенностей мостового метода, ограничивающих его применение при измерениях больших сопротивлений, следует иметь в виду значительные трудности, связанные с защитой мостов, увеличивающиеся с возрастанием измеряемого сопротивления. Несмотря на то, что вопросы защиты от утечек мостовых цепей постоянного тока достаточно полно освещены в работах ряда авторов [5], применение любых методов защиты как правило существенно усложняет схему моста и удлиняет процесс измерения. Независимо от выбранного способа защиты, изоляция образцовой и поверяемой меры должна быть такой, чтобы погрешность от утечки была по крайней мере на порядок меньше допускаемой погрешности измерения. Поскольку по поверочной схеме сопротивления в 10^9 ом класса 0,05 должны поверяться с погрешностью не более 0,015%, то погрешность от утечек не должна превышать 0,005%. Отсюда вытекает, что сопротивление изоляции вершин моста, к которым присоединяется измеряемое сопротивление, должно быть не менее $0,2 \cdot 10^{14}$ ом, что представляет некоторые трудности.

Вторая возможность передачи значения единиц сопротивления мерам и приборам большого сопротивления (свыше 10^{10} ом), предусмотренная действующей в настоящее время поверочной схемой, заключается в применении метода заряда или разряда конденсатора. Учитывая, что значение измеряемого сопротивления должно быть определено при заданном режиме (особенно это относится к непроволочным сопротивлениям), целесообразно применение метода разряда конденсатора переменной емкости при неизменном напряжении на конденсаторе и измеряемом сопротивлении [6].

Емкость конденсатора переменной емкости может быть определена по образцовым конденсаторам 2-го разряда, воспроизводящим значение емкости в пределах $10^{-3} \div 10^4$ пф с погрешностями не более 0,01—0,04%.

Точность определения времени зависит от длительности процесса измерения. Если измеряемый отрезок времени составляет не меньше 100 сек, его определение может быть произведено при помощи рабочих секундомеров 1-го класса с погрешностью, не превышающей нескольких сотых долей процента.

Основным преимуществом метода заряда или разряда конденсатора является возможность более точного измерения больших значений сопротивления (как отношения $\frac{M}{\Delta C}$), чем это возможно при помощи весьма нестабильных непроволочных сопротивлений.

Действительно, при длительности измерения $\Delta t = 100$ сек и изменении емкости $\Delta C = 5$ пф возможно измерить значение $r_x = 2 \cdot 10^{13}$ ом с погрешностью всего в несколько сотых долей процента. В то же время создание образцового сопротивления даже 10^{10} ом с такой точностью при современном состоянии изготовления сопротивлений представляет большие трудности.

Метод, основанный на применении конденсатора, предусмотрен в поверочной схеме главным образом для проверки образцовых сопротивлений 3-го разряда в диапазоне значений $10^{10} \div 10^{14}$ ом.

С уменьшением измеряемого сопротивления возникает необходимость увеличения емкости конденсатора или уменьшения отрезка времени. Первое ведет к конструктивным трудностям создания переменного

воздушного конденсатора большой емкости, а второе снижает точность измерения. Поэтому сопротивления, меньшие чем 10^{10} ом, рекомендуется измерять при помощи моста.

Аппаратура, применяемая для поверки образцовых и рабочих мер сопротивления

В течение последних лет во ВНИИМ разработаны конструкции и создана аппаратура, обеспечивающие возможность поверки мер сопротивления $10^5 \div 10^{14}$ ом.

Образцовыми мерами 3-го разряда, которым передается значение от образцовой катушки в 10^5 ом 2-го разряда, являются две катушки сопротивления: № 1, тип 392, и № 1, тип 391 [4]. Для широкой поверочной практики создана конструкция образцового магазина сопротивления из микропровода до 10^8 ом, являющегося элементом установки типа УПМС-2 завода «Эталон», описанной ниже.

Значение сопротивления магазина определяется сравнением с образцовыми мерами сопротивления 3-го разряда на специальном мосте при отношении плеч, равном 10, и точность определения значения магазина — 0,01 %.

Для поверок мегомметров и тераомметров создан магазин непроволочных сопротивлений до 10^{10} ом и набор мер сопротивления до 10^{12} ом, описание которых приведено в статье Г. Ф. Панкратова.*

Наиболее точной и изученной во времени аппаратурой является мост-компаратор с пределом измерения 10^9 ом, созданный в 1950 г. [2].

На основании опыта эксплуатации образцового моста-компаратора для поверочной практики была разработана мостовая установка УПМС-2, выпуск которой уже освоен заводом «Эталон». Эта установка позволяет измерять сопротивления до 10^{10} ом.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 2, где: 1 — термостат; 2 — выпрямитель; 3 — стабилизатор; 4 — усилитель. Внешний вид установки представлен на рис. 3. Она выполнена в виде стола-бюро, в котором отдельные узлы и детали смонтированы с учетом удобства и простоты работы поверителя.

Монтаж установки выполнен по блочной системе. Отдельные блоки установки — образцовый магазин сопротивления, мост-компаратор с заземляющей ветвью, нулевой указатель с усилителем, стабилизированный выпрямитель, термостат — могут быть использованы как самостоятельные приборы. Питание моста осуществляется от стабилизированного выпрямителя, напряжение которого может плавно регулироваться в пределах $0 \div 500$ в.

В качестве указателя равновесия моста применяется гальванометр типа ГПЗ-2, обеспечивающий в схеме моста (рис. 2) измерение сопротивления до 10^8 ом при напряжении питания моста порядка 200 в с погрешностью порядка 0,05%. При измерении сопротивлений $10^8 \div 10^{10}$ ом гальванометр включается через усилитель постоянного тока на лампах 6Ж1Ж, работающих при пониженном анодном напряжении, что ведет к уменьшению сеточных токов ламп и увеличению входного сопротивления указателя равновесия.

Установка снабжена воздушным термостатом, при помощи которого можно поверять меры сопротивления при температуре до $+40^\circ\text{C}$.

* См. статью настоящего сборника, стр. 50.

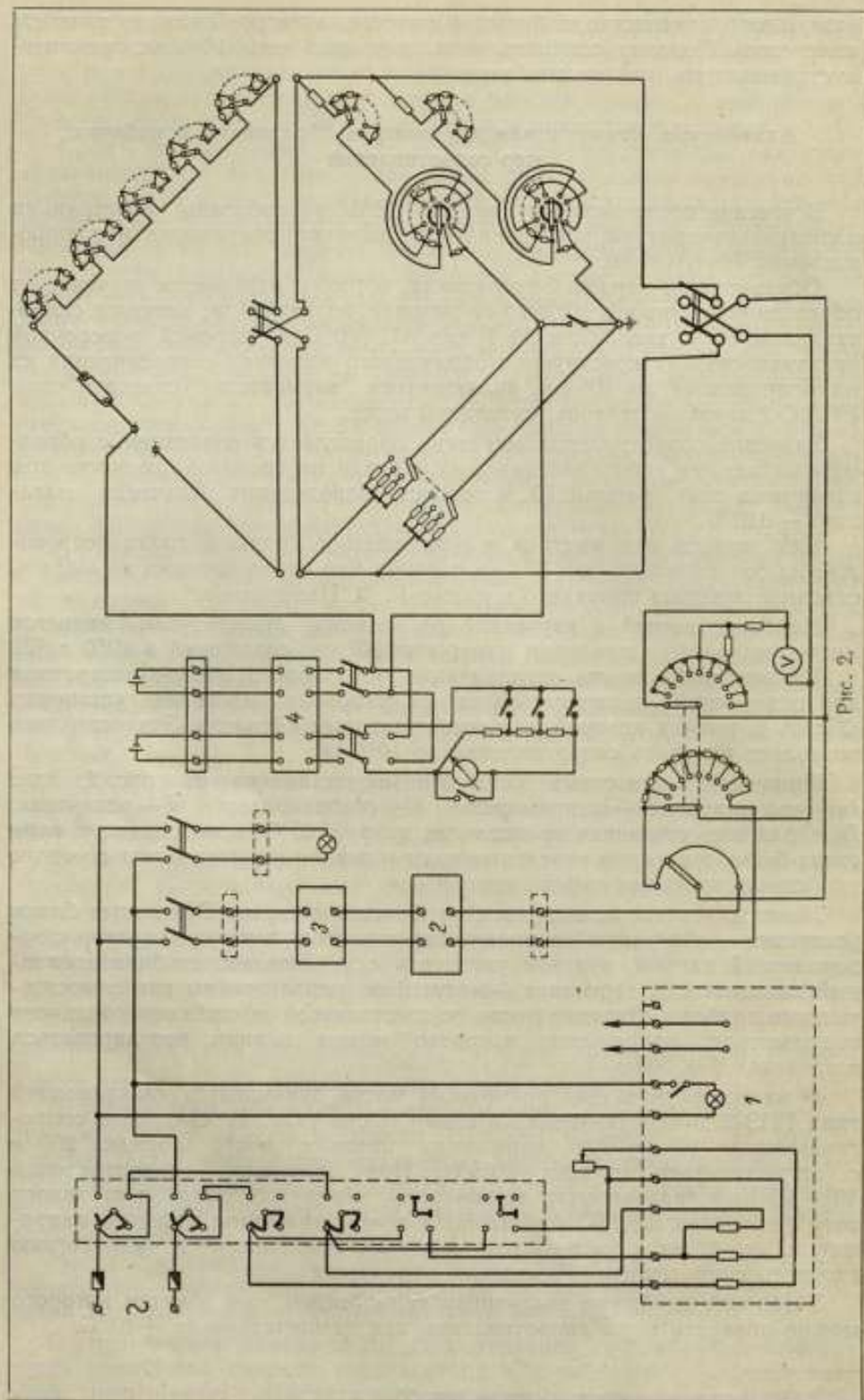


Fig. 2.

Для уменьшения влияния токов утечки по изоляции, кроме использования высококачественных изоляционных материалов, применяется защитная ветвь с экранировкой отдельных элементов мостовой цепи. Сопротивление изоляции наиболее ответственных цепей моста равно приблизительно 10^{13} ом.



Рис. 3.

Подробное исследование ряда установок, выполненных для поверочных органов системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, показало, что они обеспечивают измерения сопротивлений 10^{10} ом с погрешностью, не превышающей $\pm 0,3\%$ и уменьшающейся с уменьшением измеряемого сопротивления до $0,03\%$ (для сопротивлений, меньших 10^7 ом).

При измерении сопротивления мер со значениями, не превышающими полного сопротивления образцового магазина моста, погрешность измерений может быть снижена до $\pm 0,01\%$ путем использования метода перестановки плеч.

На рис. 4 и 5 представлены принципиальная схема и внешний вид установки УБС-1, использующей метод разряда образцового конденсатора через измеряемое сопротивление.

Принцип работы заключается в следующем.

Перед началом измерения ключ K_1 шунтирует нулевой указатель N , конденсатор C_1 заряжен до напряжения батареи B , переключатель K_2 находится в положении I . При этом по измеряемому сопротивлению проходит ток, значение которого зависит от напряжения батареи B ,

коэффициента делителя $K = \frac{r_1 + r_2}{r_2}$ и r_x .

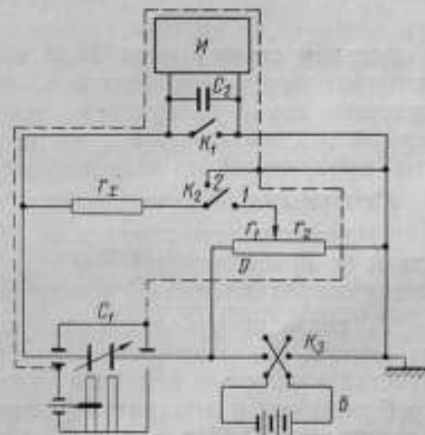


Рис. 4.

Измерение начинается в момент размыкания ключа K_1 , шунтирующего нулевой указатель; при этом конденсатор C_1 начинает разряжаться через измеряемое сопротивление r_x . Одновременно с размыканием ключа K_1 осуществляется пуск секундомера, измеряющего время разряда, а также включается электродвигатель, приводящий во вращение ротор измерительного конденсатора C_1 . По истечении некоторого времени Δt , выбираемого в зависимости от номинального значения измеряемого сопротивления, процесс измерения заканчивается замыканием ключа K_1 с одновременной остановкой ротора конденсатора и вы-



Рис. 5.

ключением секундомера. При измерении скорость вращения ротора измерительного конденсатора, другими словами — скорость изменения емкости его — выбирается такой, чтобы напряжение на конденсаторе оставалось неизменным во все время разряда конденсатора. В силу этого ток, проходящий по измеряемому сопротивлению, не меняется.

Основными достоинствами метода являются:

1) возможность измерения сопротивлений $10^9 \div 10^{14}$ ом с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$, что обеспечивает поверку мер и магазинов сопротивления 3-го разряда со значениями до 10^{14} ом;

2) возможность измерения сопротивлений при любом напряжении от единиц до нескольких сотен вольт. Нижний предел ограничивается чувствительностью нулевого указателя. Верхний предел ограничивается требованиями к аппаратуре; предназначенной для работы при высоком напряжении (500 в и выше) и связанной с этим необходимостью увеличения габаритных размеров конструкции установки;

3) малое влияние на погрешность измерения утечки по сопротивлению изоляции соединительных проводов схемы;

4) малое влияние на погрешность измерения паразитных емкостей схемы;

5) неизменность напряжения на сопротивлении в процессе измерения, что особенно важно для измерения непроволочных сопротивлений, имеющих большую зависимость от приложенного к ним напряжения.

Расчетная формула для определения значения измеряемого сопротивления имеет вид

$$r_x = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta C}, \quad (2)$$

где r_x — измеряемое сопротивление (ом);

ΔC — величина изменения емкости измерительного конденсатора за время измерения (ϕ);

Δt — время измерения (сек);

K — коэффициент делителя напряжения.

Приведенное выражение общеизвестно, однако в нем не учтен ряд факторов, сказывающихся на результате измерения, который зависит от влияния утечек через изоляцию измерительного конденсатора, через изоляцию соединительных проводов схемы, по входному сопротивлению нулевого указателя и т. п.

На погрешность измерения будут влиять паразитные емкости схемы, входная емкость нулевого указателя и емкость вспомогательного конденсатора C_2 .

Анализ основных источников погрешностей позволил получить следующие выражения, характеризующие степень влияния указанных выше причин на результат измерения:

$$\delta_1 = \frac{U_0}{U_C} \cdot \frac{C_2}{\Delta C}, \quad (3)$$

где δ_1 — относительная погрешность от влияния паразитных емкостей схемы;

C_2 — эквивалентная емкость, учитывающая паразитную емкость схемы, емкость вспомогательного конденсатора C_2 и входную емкость нулевого указателя;

U_0 — напряжение на нулевом указателе вследствие неполной компенсации;

U_C — напряжение на измерительном конденсаторе.

Из формулы (3) видно, что погрешность зависит от суммарной емкости схемы C_2 ; последняя в зависимости от значения измеряемого сопротивления r_x может достигать и даже превышать значение изменения емкости измерительного конденсатора ΔC . Однако, имея в виду, что отношение $\frac{U_0}{U_C}$, зависящее от чувствительности нулевого указателя и напряжения на измерительном конденсаторе, обычно мало (не превышает 10^{-3}), значение δ_1 может быть сделано пренебрежимо малым по сравнению с допускаемой погрешностью измерения.

Влияние паразитной емкости сказывается также на том, что увеличивается постоянная времени измерительной цепи, пропорциональная величине $r_x C_2$, что вызывает дополнительную погрешность, которая может быть определена по формуле

$$\delta_2 = \frac{1}{r_x U_C \Delta C} \int_0^t U_0 dt. \quad (4)$$

Утечки по изоляции электродов измерительного конденсатора обуславливают погрешность, которая может быть определена из выражения

$$\delta_3 = \frac{1}{K} \cdot \frac{r_x^2}{r_C}, \quad (5)$$

где r_C — сопротивление изоляции электродов измерительного конденсатора C_1 .

Применяя специальные измерительные конденсаторы, имеющие раздельную изоляцию электродов от корпуса, можно сделать δ_3 пренебрежимо малой по сравнению с допустимой погрешностью измерения.

Влияние на погрешность измерения утечек по изоляции соединительных проводов схемы, а также утечек через входное сопротивление нулевого указателя может быть определено по формуле

$$\delta_4 = \frac{1}{KU_C \Delta C r_s} \int_0^t U_0 dt. \quad (6)$$

где r_s — эквивалентное сопротивление изоляции соединительных проводов схемы и входного сопротивления нулевого указателя.

Так как величина U_0 мала, то практически при $r_s \geq 10^{14}$ ом δ_4 будет малой по сравнению с допустимой погрешностью измерения даже при измерении сопротивлений 10^{14} ом. Конечно, погрешность измерения зависит от погрешности определения величин, входящих в расчетную формулу (2).

На основании анализа источников погрешностей разработаны требования ко всем элементам аппаратуры и их компоновке, которые учтены при создании конструкции установки. Созданная специализированная комплектная установка обеспечивает измерение сопротивлений $10^9 \div 10^{14}$ ом с необходимой для поверочной практики точностью.

Основными узлами установки являются: измерительные воздушные конденсаторы переменной емкости C_1 , делитель напряжения D , струнный электрометр H , электропривод, пуско-регулирующее устройство. Установка снабжена также термостатом, при помощи которого можно поверять меры сопротивления при температуре до $+40^\circ$ С. В комплект установки входят четыре измерительных конденсатора на 4, 20, 180 и 1800 пф.

Выбирая соответствующий образцовый конденсатор, коэффициент делителя напряжения, время измерения и напряжение питания, можно обеспечить измерение на установке сопротивления $10^9 \div 10^{14}$ ом при неизменном напряжении $2 \div 500$ в.

Теоретический анализ метода и экспериментальные исследования разработанной установки позволили выяснить основные погрешности, обусловленные конструкцией аппаратуры (табл. 3).

Таблица 3

Характер погрешности	Величина погрешности $\delta_p, \%$
Коэффициент делителя напряжения	$\delta_K = \pm 0,01$
Измерение времени Δt	$\delta_{\Delta t} = \pm (0,03 \div 0,05)$
Определение изменения емкости образцового конденсатора ΔC	$\delta_{\Delta C} = \pm (0,02 \div 0,05)$
От утечек по изоляции	$\delta_{из} = \pm (0,01 \div 0,1)$
От паразитных емкостей	$\delta_C = \pm (0,01 \div 0,2)$
От нестабильности напряжения источника питания	$\delta_U = \pm (0,02 \div 0,05)$

Примечание. Погрешность $\delta, \%$ получается для указанных предельных случаев измерения $10^9 \div 10^{14}$ ом при напряжении, не большем 20 в.
Погрешности δ_C и $\delta_{из}$ зависят от величины, соответственно, δ_3 , δ_4 и δ_5 , δ_6 (см. формулы 3-6).

Относительная погрешность измерения, определенная по формуле

$$\delta_{r_x} = \sqrt{\sum \delta_i^2},$$

лежит в пределах 0,05 + 0,24 %, в зависимости от конкретных условий — величины измеряемого сопротивления, напряжения и других условий измерения.

Схема и конструкция установки обеспечивают возможность измерения стабильных сопротивлений с указанными выше погрешностями. Однако при измерениях непроволочных сопротивлений, которые чаще всего встречаются, возможен некоторый «разброс» результатов измерения, объясняемый особенностями самого объекта измерения: нестабильностью во времени, зависимостью от напряжения и температуры. Некоторые образцы исследуемых непроволочных сопротивлений обладают способностью поляризации, что приводит к существенно различным результатам при изменении полярности приложенного напряжения.

В ряде случаев требуется измерение незранированных потенциалов относительно окружающих предметов, а следовательно, неопределенными токи утечки. Вследствие этого результат поверки может отличаться от значения, которое имеет сопротивление в условиях его применения.

Однако все это обуславливается качествами объекта измерения и не характеризует погрешность установки, которая при измерении сопротивлений высокого качества в диапазоне $10^9 - 10^{14}$ ом лежит в пределах $\pm (0,1 - 0,5) \%$.

В заключение можно отметить, что образцовая аппаратура, созданная в последние годы во ВНИИМ, в основном удовлетворяет требованиям поверочной схемы, учитывающей новые виды рабочих приборов как по пределам, так и по точности. Возможность повышения точности измерения в диапазоне $10^5 - 10^{14}$ ом в настоящее время ограничивается отсутствием стабильных мер и магазинов сопротивления. Создание таких мер возможно будет только после освоения промышленностью технологии изготовления микропроволочных сопротивлений до $10^6 - 10^{20}$ ом и стабильных непроволочных мер до 10^{14} ом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Higgs H. C., Physical and Electrical Standardization Program for the A. E. C. I. R. F., Transactions on Instrumentation, № 3, 4, v. 1—7, December, 1958.
2. Вальчихин Д. Д. и Рождественская Т. Б., Образцовая установка для измерения больших сопротивлений, Труды ВНИИМ, вып. 14(74), 1951.
3. Measurement of multimegohm resistors, National Bureau of Standards, Technical news bulletin, v. 37, 1953.
4. Вальчихин Д. Д., Желудев Н. Г., Рождественская Т. Б., Образцовые меры электрического сопротивления с номинальным значением 10^6 и 10^7 ом, Труды ВНИИМ, вып. 28(88), 1956.
5. Сидякин Б. С., О влиянии токов утечки на погрешность измерений в цепях постоянного тока, Научные записки ЛПИ, № 4, вып. VIII, 1949.
6. Рождественская Т. Б., Панкратов Г. Ф., Метод и аппаратура для точного измерения сопротивлений до 10^{14} ом, «Измерительная техника», № 5, 1958.

Поступила в редакцию
3/1 1960 г.

Г. Ф. ПАНКРАТОВ

ВНИИМ

МЕРЫ И МАГАЗИНЫ БОЛЬШОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ОСОБЕННОСТИ ИХ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ

В статье освещается вопрос о возможности создания мер и магазинов большого сопротивления, необходимых для поверки приборов для измерения большого сопротивления. Подведены итоги работы лаборатории электрических измерений ВНИИМ за последние годы в области разработки мер большого сопротивления.

Наиболее точным методом поверки мегомметров, тераомметров и других приборов, измеряющих сопротивления до 10^{12} ом, является метод комплектной поверки, заключающийся в измерении поверяемым прибором сопротивления, действительное значение которого известно с необходимой точностью, поэтому имеется потребность в мерах большого сопротивления. К сожалению, отечественной промышленностью до последнего времени не выпускались меры и магазины большого сопротивления, и потребители вынуждены были самостоятельно, кустарным способом, изготавливать меры большого сопротивления, чтобы хотя бы частично удовлетворять насущные нужды производства. Зачастую такие меры не отвечали предъявляемым к ним требованиям.

В настоящей статье приводятся некоторые принципы конструирования мер большого сопротивления, возникшие из опыта разработки и эксплуатации мер и магазинов большого сопротивления во ВНИИМ.

В статье Д. Д. Вальчихина, Н. Г. Желудевой и Т. Б. Рождественской [1] освещаются основные трудности создания катушек большого сопротивления и некоторые способы борьбы с повышенной неустойчивостью для мер до 10^7 ом. Достижения отечественной промышленности в последние годы в области разработки манганиновой микропровода в стеклянной изоляции обеспечат возможность создания в ближайшем будущем надежных мер большого сопротивления — до $10^9 \div 10^{10}$ ом. Однако для поверки существующих типов тераомметров и мостов этот предел мер недостаточен. Уже имеется необходимость в создании мер до 10^{12} и даже до 10^{14} ом.

В таблице представлены обобщенные данные существующих в настоящее время наиболее точных приборов для измерения больших сопротивлений, а также требования к точности мер большого сопротивления, предназначенных для комплектной поверки этих приборов.

Верхний предел измерения мегомметров и мостов, ом	Напряжение на измеряемом сопротивлении, в	Основная погрешность поверяемых приборов, % от r_x	Погрешность действительного значения образцовой меры большого сопротивления, %
$10^6 \div 10^8$	$100 \div 2500$	$0,1 \div 10$	$0,03 \div 3$
$10^{10} \div 10^{12}$	$100 \div 500$	$0,5 \div 15$	$0,2 \div 5$
$10^{12} \div 10^{14}$	$100 \div 500$	$3 \div 20$	$1 \div 7$
Больше 10^{14}	$100 \div 1000$	—	—

Основные требования, предъявляемые к образцовым мерам и магазинам большого сопротивления, вкратце заключаются в следующем.

1. Действительное значение мер должно быть известно с погрешностью, не превышающей трети величины допускаемой погрешности наиболее точных приборов, измеряющих сопротивления в соответствующем диапазоне значений.

2. Дополнительные погрешности, вызванные изменением условий применения мер, не должны превышать допускаемой основной погрешности во всем рабочем диапазоне значений температуры, влажности или напряжения, при которых применяются меры.

В случае, если дополнительные погрешности превышают допускаемую основную погрешность, то должны быть известны соответствующие поправки.

3. Меры большого сопротивления должны обладать высокой стабильностью во времени.

Повышенная неустойчивость мер большого сопротивления обуславливает необходимость более частой их поверки и даже может возникнуть необходимость поверки мер непосредственно перед каждым их применением.

В настоящее время уже имеются магазины и меры сопротивления до 10^8 ом из манганиновой микропроволоки, разработанные во Всесоюзном научно-исследовательском институте электроизмерительных приборов и во ВНИИМ. Они обладают очень хорошими качествами: большой стабильностью во времени, малым температурным коэффициентом и малым коэффициентом напряжения. Эти меры могут обеспечить поверку всех приборов, измеряющих сопротивление до 10^8 ом.

Для разработки мер и магазинов с номинальным значением сопротивления до $10^{12} \div 10^{13}$ ом можно применять пока только непроволочные сопротивления. Нашей промышленностью освоен выпуск высококачественных непроволочных сопротивлений до $10^{12} \div 10^{13}$ ом [2], однако их стабильность необходимо изучить.

В настоящее время стали доступны необходимые для изготовления мер большого сопротивления высококачественные изоляционные материалы, например полистирол, фотопласт, янтарь, которые при соответствующей их конструкции могут обеспечить надежную изоляцию мер. Необходимо, чтобы погрешность от токов утечки по изоляции была пренебрежимо мала по сравнению с допустимой погрешностью измерения. Относительная погрешность от токов утечки по изоляции $\delta_{из}$, шунтирующих меру, может быть определена, как известно, по формуле

$$\delta_{из} = r_m \cdot Y_{из},$$

где r_m — сопротивление меры;

$Y_{из}$ — проводимость изоляции.

Так как идеальных изоляторов нет, то в принципе $\delta_{из}$ имеет место всегда.

Практически в настоящее время без особых трудностей можно получить сопротивление изоляции мер порядка $10^{14} \div 10^{15}$ ом. Значительно

сложнее получить надежную изоляцию свыше 10^{15} ом, ограничивающую пределы и точность образцовых мер.

Обеспечение хорошей изоляции является важной, но не единственной стороной вопроса разработки мер большого сопротивления. Даже лучшие типы непроволочных сопротивлений, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью, имеют большую нестабильность во времени и большую зависимость от приложенного к ним напряжения. Сопротивления типа КВМ, крупносерийный выпуск которых освоен отечественной промышленностью, при изменении приложенного к ним напряжения $10 - 100$ в могут уменьшаться на 5%, а при увеличении напряжения до 300 в — даже на 15%. Абсолютное значение температурного коэффициента сопротивлений типа КВМ составляет $0,1 - 0,2\% / ^\circ\text{C}$. Непроволочные сопротивления больших номинальных значений даже после прохождения обычного цикла искусственного старения обладают нестабильностью во времени, достигающей нескольких процентов в год.

На сопротивление изоляции мер оказывает влияние изменение влажности и запыленность окружающего воздуха. Способами повышения надежности изоляции могут служить применение эквипотенциальной защиты, помещение элементов сопротивления в герметический или в пыленепроницаемый корпус с применением осушения воздуха внутри корпуса меры. Результаты специально проведенных экспериментов показывают, что, например, при помещении осушителя в корпус меры сопротивление янтарной изоляции меры повышалось примерно в 10 раз, а сопротивление изоляции элементов меры из эбонита — в $30 - 50$ раз

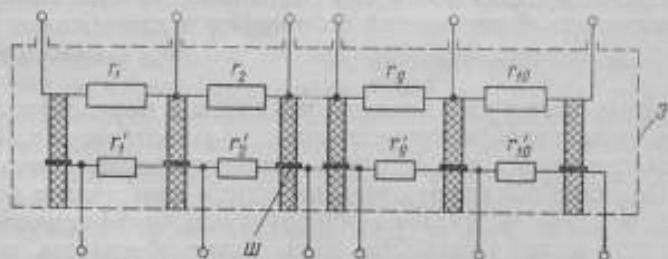


Рис. 1. Принципиальная схема меры большого сопротивления.

r_1, r_2, \dots, r_n — сопротивления меры; r'_1, r'_2, \dots, r'_n — сопротивления вспомогательного делителя; Ш — проводящие шины, разделяющие изоляцию на два слоя; Э — экран.

по сравнению с изоляцией их без осушителя. При этом сопротивление изоляции в меньшей степени зависело от влажности окружающего воздуха. Это может быть объяснено тем, что изоляция внутренней части зажимов при наличии осушителя не зависела от влажности окружающего воздуха, а наружная часть изоляции зажимов, доступная для повседневной очистки от влаги и пыли, поддерживалась в хорошем состоянии.

Применение эквипотенциальной защиты [3] также повышает надежность изоляции и позволяет уменьшить токи утечки по изоляции. С этой целью меры большого сопротивления, изготовленные по чертежам ВНИИМ на заводе «Пунане Рэт», выпускаются со встроенным вспомогательным делителем напряжения. На рис. 1 представлена принципиальная схема этих мер. При изготовлении вспомогательного делителя не требуется большой стабильности и точности подгонки отдельных его сопротивлений, для этого могут быть применены менее высокоомные сопро-

тивления. Для того чтобы случайно появившиеся на поверхности изоляторов пылинки или другие загрязнения не вызывали резкого ухудшения общей изоляции меры большого сопротивления, необходимо предусмотреть такую конструкцию изоляторов, при которой длина пути утечек по их поверхности была не меньше 5—10 мм при наименьшей толщине слоя изоляции (2—3 мм).

Часто меры и магазины большого сопротивления, поступающие в поверку от различных предприятий, не могут применяться для поверки мегомметров и тераомметров из-за отсутствия экранировки, т. е. электростатической защиты элементов мер. Отсутствие экранировки в мерах с сопротивлением от 10^7 ом и выше затрудняет их оценку вследствие влияния ползучих токов и изменения емкости мер относительно расположенных вблизи предметов и самого оператора. При наличии экрана, имеющего некоторый потенциал, например потенциал земли, как при поверке меры, так и при ее применении для поверки приборов существенно облегчается производство поверок приборов сопротивления.

Необходима не только более частая поверка таких мер и магазинов, но также желательно поверку производить при напряжении, равном номинальному рабочему напряжению прибора, для комплектной поверки которого используется образцовая мера большого сопротивления.

Ниже приводится краткое описание конструкции мер и магазинов мер большого сопротивления, разработанных ВНИИМ.

Для поверки мегомметров с верхним пределом измерения, равным 10^{10} ом, был разработан пятидекадный магазин мер сопротивления до $1,1111 \cdot 10^{10}$ ом, значение которого может изменяться ступенями — по 10^5 ом. Для изготовления элементов декад магазина применены сопротивления типа КВМ, МЛПГ и ВС.

Действительные значения сопротивлений подогнаны с допуском $\pm 1\%$. Особенности конструкции магазина следующие.

1. В качестве изолирующих материалов применены полистирол и специальное стекло.

2. Для того чтобы влажность воздуха меньше влияла на величину сопротивления, декады $10 \cdot 10^9$ и $10 \cdot 10^8$ ом собраны из сопротивлений типа КВМ герметического исполнения, имеющих малую зависимость от влажности окружающего воздуха. Декада $10 \cdot 10^7$ ом собрана из сопротивлений типа МЛПГ, а декады $10 \cdot 10^6$ и $10 \cdot 10^5$ ом — из сопротивлений типа ВС. Последние две декады помещены в герметический металлический корпус с выводами через стеклянные изоляторы.

3. Корпус магазина экранирован, монтаж сопротивлений выполнен толстыми жесткими проводами (воздушный монтаж).

4. Чтобы уменьшить зависимость сопротивления от приложенного к магазину напряжения, первые 3—4 катушки каждой декады собраны из нескольких последовательно соединенных сопротивлений приблизительно равной величины. Например, одна из катушек декады $\times 10^9$ ом состоит из трех сопротивлений: $27,45 \cdot 10^7 + 37,39 \cdot 10^7 + 35,14 \cdot 10^7 = 99,98 \cdot 10^7$ ом. При этом принципиально мы имеем возможность не только с достаточной точностью подогнать суммарное значение сопротивления, но при выборе сопротивлений с разными температурными коэффициентами и коэффициентами напряжения получить меру, обладающую сравнительно малым температурным коэффициентом и повышенной стабильностью во времени. Во всяком случае, применение последовательного соединения равновеликих сопротивлений для изготовления первых катушек декады дало значительное уменьшение зависимости сопротивления магазина мер от напряжения.

Наблюдения за изготовленным магазином в течение нескольких лет показали, что в продолжение первого года действительные значения сопротивлений всех декад магазина, за исключением декады $10 \cdot 10^9 \text{ ом}$, изменились на величину не больше $\pm 0,3\%$. Некоторые сопротивления декады $10 \cdot 10^9 \text{ ом}$ за это же время изменились на $1,5\%$. Однако за последующий период длительностью больше 2 лет полное сопротивление декады $10 \cdot 10^9 \text{ ом}$ изменилось на величину $1,1\%$. При этом изменения отдельных сопротивлений хотя и больше $1,1\%$, но не превосходят $2 \div 2,5\%$. Изменения сопротивлений остальных декад не превосходят $\pm 0,2\%$. Результаты наблюдений показывают, что сопротивления магазина за время наблюдения стабилизировались настолько, что поверка

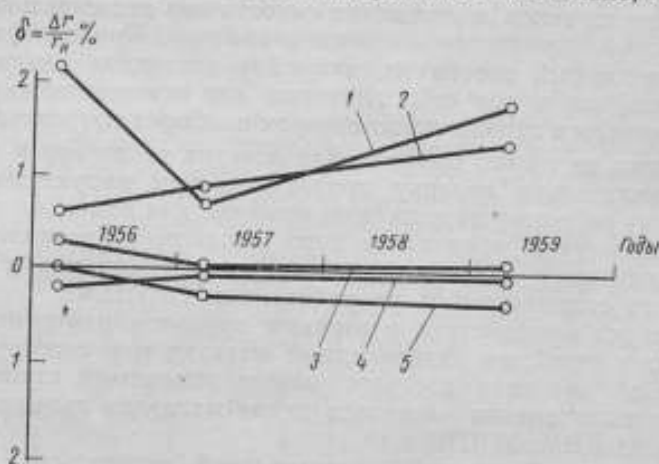


Рис. 2. Относительное изменение полного сопротивления декад магазина во времени.

1 — декада $\cdot 10^9$; 2 — декада $\cdot 10^8$; 3 — декада $\cdot 10^7$;
4 — декада $\cdot 10^6$; 5 — декада $\cdot 10^5$.

его может производиться в дальнейшем не чаще одного раза в год. При этом магазин обеспечивает по точности поверку практически всех мегомметров и мостов, измеряющих сопротивления порядка $10^9 \div 10^{10} \text{ ом}$ при напряжении от нескольких десятков до 1000 в . На рис. 2

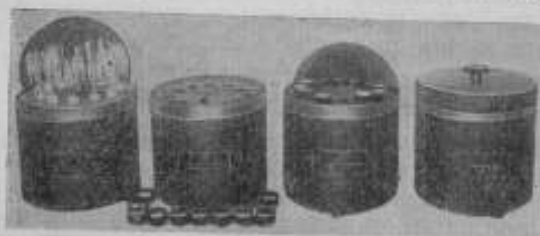


Рис. 3. Внешний вид мер большого сопротивления.

представлены графики изменения сопротивления декад за время наблюдения. Изменение действительного значения сопротивления даже первых катушек декады $10 \cdot 10^9 \text{ ом}$ при изменении напряжения, например $140 \div 210 \text{ в}$, не превышает сотых долей процента.

Для поверки мегомметров и тераомметров, измеряющих сопротивления до 10^{12} ом , разработаны меры в виде отдельных декад сопротивления $10 \cdot 10^8$, $10 \cdot 10^9$, $10 \cdot 10^{10}$ и $10 \cdot 10^{11} \text{ ом}$ из сопротивлений типа КВМ. На рис. 3 представлен внешний вид мер. Действительные значения мер $10 \cdot 10^8$ и $10 \cdot 10^9 \text{ ом}$ подогнаны с допуском $\pm 1\%$, а меры $10 \cdot 10^{10}$ и $10 \cdot 10^{11} \text{ ом}$ — с допуском $\pm 2\%$. Конструкция мер позволяет производить их последовательное соединение при помощи специальных соединительных концов, не нарушающих экранировку соединяемых мер.

Особенности конструкции разработанных мер следующие:

1) сопротивления мер помещены в пыленепроницаемый металлический корпус, который одновременно служит экраном;

2) обеспечена полная экранировка не только сопротивлений меры, но и всех зажимов ее. Последняя обеспечивается особой конструкцией зажимов и специальными колпачками, которые полностью экранируют меру;

3) меры $10 \cdot 10^{10}$ и $10 \cdot 10^{11}$ ом снабжены эквипотенциальной защитой, для чего изоляция каждого из выводных зажимов меры составлена из двух частей, разделенных проводящей шиной. К этой шине в случае необходимости может быть подано напряжение таким образом, чтобы разность потенциалов между любым из выводных зажимов меры и шиной была равна нулю. В этом случае утечка по изоляции выводного зажима меры может быть сведена практически к нулю. В качестве изоляционных материалов для изготовления мер применены полированные янтарь и полистирол, обладающие высоким удельным объемным и поверхностным сопротивлением. Сопротивление изоляции мер превышает $2 \cdot 10^{14}$ ом;

4) каждая секция мер набрана из трех равновеликих последовательно соединенных сопротивлений, которые в сумме подгоняются с соответствующим допуском, указанным выше.

Нестабильность мер большого сопротивления 10^{11} и 10^{12} ом несколько больше нестабильности сопротивлений магазина, поэтому необходима более частая их поверка. Вообще, нестабильность непроволочных сопротивлений во времени в настоящий момент делает нерациональной и преждевременной разработку конструкций образцовых мер на сопротивления, превышающее 10^{13} ом. Даже существующие меры $10 \cdot 10^{10}$ и $10 \cdot 10^{11}$ ом при комплектной поверке наиболее точных тераомметров и мостов должны непосредственно перед поверкой этих приборов поверяться на образцовой аппаратуре, обеспечивающей измерение таких сопротивлений с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$.

С появлением новых, более совершенных высококачественных непроволочных сопротивлений вполне возможна разработка мер большого сопротивления на большие значения.

В заключение можно отметить, что результаты многолетних наблюдений за разработанными мерами и магазином большого сопротивления полностью оправдывают принципы, положенные в основу их конструкции.

Конструкция мер и магазина большого сопротивления разработана в конструкторском бюро ВНИИМ под руководством ведущих конструкторов Л. С. Левина и А. М. Бродского.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вальчихин Д. Д., Желудева Н. Г., Рождественская Т. Б., Образцовые меры электрического сопротивления с номинальным значением 10^9 и 10^7 ом, Труды ВНИИМ, вып. 28(88), 1956.
2. Гальперин В. С., Непроволочные сопротивления, Госэнергоиздат, 1958.
3. Синицын Б. С., О влиянии токов утечки на погрешность измерения в цепях постоянного тока, Научные записки ЛПИ, вып. VIII, № 4, 1949.

Поступила в редакцию
9/III 1959 г.

А. А. ЧУХЛАНЦЕВ

Свердловский филиал ВНИИМ

О РАСЧЕТЕ МЕР МАЛОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА БОЛЬШИЕ ТОКИ

В статье приводятся формулы для расчета минимального сечения манганиновой части сопротивлений, применяемых в цепях с большими силами тока, температуры их перегрева, а также для нахождения зависимости сопротивления от силы пропускаемого тока. Данные расчета сопоставляются с результатами экспериментальной проверки.

Меры малого сопротивления на токи в несколько тысяч ампер по конструкции аналогичны шунтам. Разница между мерами сопротивления и шунтами заключается в их целевом назначении. В ряде случаев шунты могут применяться в качестве мер сопротивления, например при измерениях сопротивлений шунтов низших классов точности и т. д., а меры сопротивления иногда могут быть использованы в качестве шунтов, т. е. для расширения пределов измерения приборов, предназначенных для измерения силы постоянного тока. Поэтому рассмотрение вопросов расчета мер малого сопротивления относится также и к шунтам на большие токи.

В настоящее время конструирование шунтов и мер малого сопротивления ведется на основании данных, полученных при испытании ряда опытных образцов. Несмотря на большую затрату времени и средств, этот путь не всегда приводит к желаемым результатам. Лучшие результаты могут быть получены путем теоретически обоснованного расчета мер.

Несмотря на простоту устройства, расчет мер и шунтов на большие токи представляет сложную задачу. Поэтому настоящую работу следует рассматривать как попытку аналитического определения их нагрева и нагрузочных характеристик.

Расчет нагрева

Для упрощения решения задачи нагрева мер, имеющих конструкцию, изображенную на рис. 1, а, вначале не будем учитывать отдачу тепла наконечником и выделение тепла в месте контакта между наконечником и шиной. Это позволит заменить меру с присоединенными к ней шинами системой, состоящей из манганиновых пластин, включенных последова-

тельно с шинами (рис. 1, б), в которой не учитывается отдача тепла с торцевой поверхности шин между мanganгированными пластинами.

За температуру любого сечения примем ее среднее значение в этом сечении. При таком предположении температура будет являться функцией только одной координаты. Аналогичный подход к решению задач подобного рода применялся и ранее [1, 2].

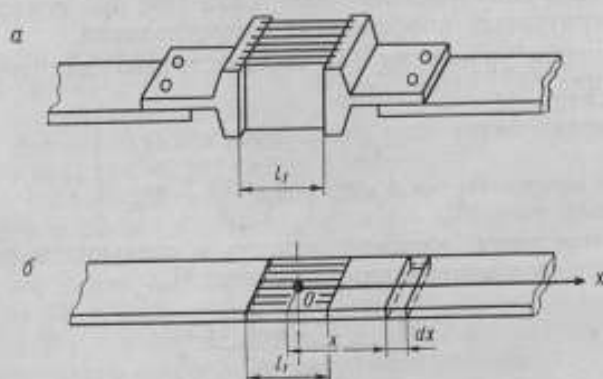


Рис. 1. Мера малого сопротивления с присоединенными к ней шинами.
а — реальная конструкция; б — упрощенная схема.

Расположим ось x вдоль шин с началом координат в середине мanganгированного участка. Напишем уравнение теплового баланса для элемента объема $dV = S dx$ в стационарном режиме

$$dP_q + dP_{\lambda x} - dP_f = 0, \quad (1)$$

где dP_q — мощность, выделяющаяся в элементе объема;
 $dP_{\lambda x}$ — разность мощностей, передаваемых путем теплопроводности через сечения S , ограничивающие элемент объема;
 dP_f — мощность, рассеиваемая с боковой поверхности элемента объема в окружающую среду.

На основании известных в теплотехнике соотношений получим

$$\left. \begin{aligned} dP_q &= \frac{I^2}{S^2} \rho S dx \\ dP_{\lambda x} &= \lambda S \frac{d^2\theta}{dx^2} dx \\ dP_f &= km\theta dx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где I — сила тока;
 ρ ; λ — удельное сопротивление и коэффициент теплопроводности материала элемента объема;
 m — периметр сечения;
 $\theta = t - t_0$ — разность температур: t — боковой поверхности элемента объема dV и t_0 — окружающей среды (перегрев);
 k — коэффициент теплоотдачи.

После подстановки соотношений (2) в (1) получим

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{km}{\lambda S} \theta + \frac{I^2}{S^2} \frac{\rho}{\lambda} = 0. \quad (3)$$

При решении уравнения (3) коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи манганина λ_1 и k_1 , шин λ и k , а также удельное сопротивление манганина ρ_1 будем считать постоянными. Изменение удельного сопротивления материала шин с температурой учтем по известной формуле

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha\theta),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление материала шин при температуре t_0 ;
 α — температурный коэффициент сопротивления.

Общие решения уравнения (3) соответственно для перегрева шин $\theta_{\text{шх}}$ и манганина $\theta_{\text{мх}}$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\text{шх}} &= A_1 e^{cx} + A_2 e^{-cx} + \theta_0 \\ \theta_{\text{мх}} &= A_3 e^{c_1 x} + A_4 e^{-c_1 x} + \theta_{01} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Граничные условия можно записать в следующем виде: условие равенства перегревов манганина $\theta_{\text{мх}}$ и шин $\theta_{\text{шх}}$

$$\theta_{\text{мх}} \Big|_{x=\frac{l_1}{2}} = \theta_{\text{шх}} \Big|_{x=\frac{l_1}{2}}, \quad (4a)$$

условие непрерывности теплового потока из манганиновой части, имеющей площадь сечения S_1 , и шины с площадью сечения S без учета отдачи тепла наконечником

$$\lambda_1 S_1 \frac{d\theta_{\text{мх}}}{dx} \Big|_{x=\frac{l_1}{2}} = \lambda S \frac{d\theta_{\text{шх}}}{dx} \Big|_{x=\frac{l_1}{2}}, \quad (4б)$$

Кроме этих условий, в силу симметрии относительно начала координат имеем:

$$\frac{d\theta_{\text{мх}}}{dx} \Big|_{x=0} = 0. \quad (4в)$$

Используя условия (4a) — (4в), а также имея в виду, что в точках, бесконечно удаленных от начала координат, перегрев шины равен значению θ_0 , соответствующему перегреву шины при протекании тока I в отсутствии других источников тепла, получим соотношения для расчета перегрева манганина и шин

$$\theta_{\text{мх}} = \theta_{01} - \frac{\theta_{01} - \theta_0}{\eta \operatorname{sh} \frac{c_1 l_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{c_1 l_1}{2}} \operatorname{ch} c_1 x, \quad (5)$$

и

$$\theta_{\text{шх}} = \theta_0 - \frac{\eta (\theta_{01} - \theta_0) \operatorname{sh} \frac{c_1 l_1}{2}}{\eta \operatorname{sh} \frac{c_1 l_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{c_1 l_1}{2}} e^{-c \left(x - \frac{l_1}{2} \right)}. \quad (6)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \theta_{01} &= \frac{I^2 \rho_1}{k_1 m_1 S_1}; & \theta_0 &= \frac{I^2 \rho_0}{k m S - I^2 \rho_0 \alpha} \\ c_1 &= \sqrt{\frac{k_1 m_1}{\lambda_1 S_1}}; & c &= \frac{I}{S} \sqrt{\frac{\rho_0}{\lambda \theta_0}}; & \eta &= \frac{\lambda_1 S_1 c_1}{\lambda S c} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где m и m_1 — периметры сечения шин и манганиновой части.

Оценим влияние конечной длины шин и выделения тепла в месте контакта шин с наконечником на результаты расчета перегрева по соотношению (5), учитывая отдачу тепла наконечником.

Решение системы уравнений (4) для шин конечной длины l при условии равенства нулю мощности, передаваемой теплопроводностью в сечениях, ограничивающих длину шин, дает следующее соотношение для перегрева манганина

$$\Theta_{mx} = \Theta_{01} - \frac{\Theta_{01} - \Theta_0}{\eta \operatorname{ch} cl \operatorname{sh} \frac{c_1 l_1}{2} + \operatorname{ch} \frac{c_1 l_1}{2}} \operatorname{ch} c_1 x. \quad (8)$$

Сопоставление результатов расчета по формулам (5) и (8) показывает, что при длине шин 1–1,5 м перегревы практически одинаковы. В условиях эксплуатации длина шин обычно не менее указанных значений, поэтому допущение, что длина шин бесконечно велика, не окажет существенного влияния на результат расчета.

Выделение тепла в месте контакта шин с наконечником согласно электротехническим нормам не должно вызывать дополнительного перегрева Θ_k выше 5 град. Расчет нагрева шин по формуле (6) и измерения температуры их по длине контакта дают расхождение результатов в пределах 1–3 град.

Это показывает, что учет выделения тепла в контакте также не оказывает существенного влияния на результат расчета.

Для учета отдачи тепла наконечником в общем случае следовало бы представить систему мер — шины не в виде двух участков, как это было сделано выше, а в зависимости от формы наконечника в виде четырех или даже шести участков и затем, используя граничные условия, определить постоянные интегрирования дифференциальных уравнений. Однако в практически применяющихся конструкциях мер и шунтов разность температур в различных местах потенциальной части наконечника не превышает 2–3 град. Поэтому температуру потенциальной части наконечника можно принять одинаковой. При сечении контактной части наконечника, мало отличающемся от сечения шин, можно принять также, что отдача тепла с единицы длины наконечника и шин одинакова. Это позволяет произвести учет отдачи тепла наконечником на основании уравнения (4) с помощью граничных условий (4а) и

$$\lambda_1 S_1 \left. \frac{d\Theta_{mx}}{dx} \right|_{x=\frac{l_1}{2}} = \lambda S \left. \frac{d\Theta_{mx}}{dx} \right|_{x=\frac{l_1}{2}} + k_n F_n \Theta_n,$$

где Θ_n — перегрев потенциальной части наконечника, значение которого можно принять равным перегреву манганина при $x = \frac{l_1}{2}$;

k_n ; F_n — коэффициент теплоотдачи и площадь поверхности потенциальной части наконечника.

Учитывая отдачу тепла наконечником указанным выше способом, получим следующее соотношение для определения перегрева манганина и меди в любом сечении:

$$\Theta_{mx} = \Theta_{01} - \frac{\Theta_{01} z - \Theta_0}{\eta \operatorname{sh} \frac{c_1 l_1}{2} + z \operatorname{ch} \frac{c_1 l_1}{2}} \operatorname{ch} c_1 x, \quad (9)$$

где $z = 1 + \frac{k_n F_n}{\lambda S c}$ — коэффициент, с помощью которого учитывается отдача тепла наконечником.

Соотношение (9) связывает между собой тепловые и электрические характеристики меры и ошиновки, что позволяет определить нагрев меры расчетным путем.

Для расчета нагрева меры необходимо знать значение установившегося перегрева шин при данном токе, коэффициентов теплоотдачи манганина и потенциальной части наконечника. Значение установившегося перегрева шин Θ_{0z} может быть определено из таблиц длительно допустимых токов I_z для заданных сечений шин, приводимых в электротехнических нормативах, например в «Правилах устройства электротехнических установок». При значениях токов меньше длительно допустимых установившийся перегрев шин может быть определен по формуле

$$\Theta_0 = \Theta_{0z} \frac{I^2}{I_z^2},$$

где Θ_0 — установившийся перегрев при токе I .

Коэффициент теплоотдачи манганина может быть определен из литературных данных [1] или экспериментально по формуле, полученной из соотношения (9) при $\frac{c_1 l_1}{2} < 1$,

$$k_1 = \frac{1}{\Theta_{\max}} \frac{I^2 \rho_1}{m_1 S_1} - \frac{8 \lambda_1 S_1}{m_1 l_1^2} \Delta \Theta_{\max}, \quad (10)$$

здесь Θ_{\max} — перегрев середины манганиновой части меры;

$\Delta \Theta_{\max}$ — разность температур между серединой манганина и потенциальной частью наконечника.

Если $\frac{c_1 l_1}{2} > 1$, то в формуле (10) следует поставить вместо $\frac{l_1}{2}$ значение x_1 , при котором $c_1 x_1 < 1$, а вместо $\Delta \Theta_{\max}$ — разность температур между серединой манганиновой части и сечением, находящимся от нее на расстоянии x_1 . Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи для различных характерных систем, например для ряда горизонтальных или вертикальных пластин, прутков, расположенных в шахматном порядке, и т. д., дает возможность производить расчет нагрева меры любой конструкции. Коэффициент теплоотдачи наконечника может быть принят равным коэффициенту теплоотдачи шин и вычислен на основании соотношений, приводимых в литературе, например [1], или же по длительно допустимым значениям тока из соотношения (10) для установившегося перегрева Θ_0 .

Соотношения (5) и (9) позволяют определить минимальные размеры манганиновой части меры при заданных значениях максимальных перегревов и сечениях ошиновки.

При этом из соотношения (5) может быть определен минимум расхода манганина при минимальном сечении наконечника, который представляется в этом случае в виде отрезка шины того же сечения, что и общее сечение токопроводящих шин, а из соотношения (9) — минимум расхода манганина при заданных размерах наконечника. Для определения минимального сечения манганиновой части при заданных размерах наконечника преобразуем соотношение (9), подставив значения Θ_{01} , η и c_1 из (7). Выражая длину манганиновой части шунта l_1 через сопротивление шунта R и считая перегрев в середине манганиновой части равным максимально допустимому значению Θ_{z1} , после преобразований получим:

$$\frac{\sqrt{\lambda_1 k_1 d_1}}{\lambda S c} S_1 \operatorname{sh} \sqrt{\frac{k_1 d_1}{\lambda_1} \frac{R}{2 p_1}} S_1 + z \operatorname{ch} \sqrt{\frac{k_1 d_1}{\lambda_1} \frac{R}{2 p_1}} S_1 = \frac{z I_{a p_1}^2 - S_1^2 \Theta_0 k_1 d_1}{I_{a p_1}^2 - S_1^2 \Theta_{z1} k_1 d_1}, \quad (11)$$

где $d_1 = \frac{m_1}{S_1}$ — отношение периметра площади сечения манганиновой части к площади сечения является постоянной величиной для заданной толщины пластин или диаметра прутков;
 I_n — номинальное значение тока.

Остальные обозначения приведены выше.

В качестве примера, подтверждающего, что соотношения (9) и (11) позволяют с достаточной для практики точностью определять значения максимальных перегревов и минимальных размеров манганиновой части мер и шунтов, сопоставим результаты расчета и экспериментов для шунта типа ШС-75 на 4000 а. Расчетное значение максимального перегрева равно 83 град, экспериментально определенное его значение равно 85 град.

На рис. 2 приведено графическое решение уравнения (11) для действительно имеющего место перегрева, равного 85 град. Из рис. 2 видно, что минимальное значение площади сечения манганиновой части должно быть равно 20 см². Фактическая площадь сечения ее равна 19 см², т. е. минимально необходимое сечение манганиновой части определено расчетным путем с достаточной для практических целей точностью.

Приведенный выше пример, а также результаты большого числа других экспериментов показывают, что расхождение между расчетными и экспериментально определенными значениями перегревов составляет около 5 град. Однако, учитывая неточность измерения температуры металлических поверхностей с помощью термомпар, следует считать, что погрешность расчета составляет около 10 град. Необходимо также отметить, что максимальные значения плотностей токов и перегревов для шунтов одного и того же типа с различными значениями номинальных токов при одинаковом номинальном падении напряжения имеют, как показывают расчет и эксперименты, примерно одно и то же значение.

Полученные результаты были использованы при конструировании шунтов с минимально возможным расходом материалов. На рис. 3 приведено графическое решение уравнения (11) для опытного шунта на 4000 а с падением напряжения 45 мв при максимально допустимом перегреве 120 град. Наконечник этого шунта в 2 раза меньше наконечников шунтов типа ШС на этот же ток. Из рис. 3 видно, что в этом в случае кривые пересекаются в точке $S_1 = 0$. Это

показывает, что теоретически площадь сечения может быть как угодно малой, и перегрев при этом не будет превышать 120 град.

Исходя из возможности получения достаточно удовлетворительных нагрузочных характеристик и технологии изготовления, площадь сечения

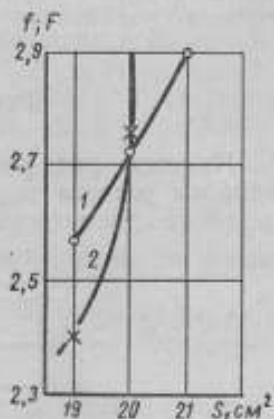


Рис. 2. Графическое решение уравнения (11) для перегрева 85 град.
 1 — кривая значений функции F , соответствующей левой части уравнения (11) для шунта ШС-75 на 4000а; 2 — кривая значений функции f , соответствующей правой части уравнения (11).

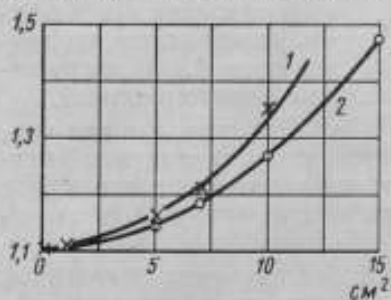


Рис. 3. Графическое решение уравнения (11) для максимального перегрева 120 град.

1 — кривая значений правой части уравнения (11) для шунта на 4000 а 45 мв; 2 — кривая значений левой части уравнения (11).

манганиновой части была принята равной 12 см^2 при длине ее 30 мм .

Перегрев опытных образцов шунтов, определенный путем измерений, составил 105 град . Для изготовления таких шунтов требуется в 2 раза меньше меди и в $1\frac{1}{2}$ раза меньше манганина по сравнению с шунтами типа ШС-45 и в 4 раза — по сравнению с ШС-75. Кривые, аналогичные приведенным на рис. 3, для шунтов на 75 мв имеют место при перегревах, значительно превышающих допустимые ГОСТ 8042—56. Поэтому малогабаритные шунты на 75 мв не могут быть изготовлены без значительного увеличения перегрева.

Расчет нагрузочных характеристик

Имеется ряд работ, например [3, 4], в которых рассматриваются вопросы расчета температурных характеристик мер малого сопротивления на сравнительно небольшие токи в интервале температур порядка $10 \div 40 \text{ град}$.

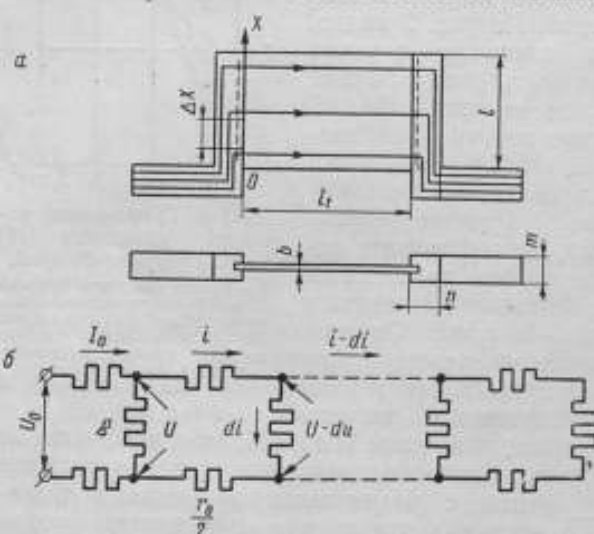


Рис. 4. Плоский элемент меры сопротивления (а) и его эквивалентная схема (б).

Однако температура отдельных частей мер и шунтов на токи в несколько тысяч ампер при изменении нагрузки от минимального значения до номинальной изменяется от $10 \div 20$ до $120 \div 150 \text{ град}$, т. е. в значительно более широком интервале. При этом температура отдельных частей не одинакова, а является, как это было показано выше, функцией координат. В этом случае сопротивление мер и шунтов определяется не температурной, а нагрузочной характеристикой.

Известно, что ряд иностранных фирм, например «Гартман и Браун», выпускает шунты высокой точности. Экспериментальные исследования показывают, что в ряде случаев нагрузочные характеристики таких шунтов могут быть значительно улучшены.

Сопротивление меры на большие токи является сопротивлением объема, заключенного между эквипотенциальными поверхностями, проходящими через место установки потенциальных зажимов. Определение изменения сопротивления меры с нагревом с помощью уравнений Максвелла затруднительно и не позволяет получить достаточно простых соотношений для определения нагрузочных характеристик.

В связи с тем, что нагрузочная характеристика является одной из основных, определяющих класс точности мер, представляет интерес расчет и оценка нагрузочных характеристик по соотношениям, полученным на основе приближенной картины распределения электрического поля тока в мере. Независимость сопротивления меры и ее нагрузочной харак-

теристики от изменения распределения поля, связанного с монтажом меры, может быть достигнута установкой и объединением двух или нескольких пар потенциальных зажимов [5, 6], установкой одной пары потенциальных зажимов на достаточном расстоянии от контактных болтов и другими способами.

В общем случае меру можно представить в виде ряда одинаковых параллельно соединенных элементов с равномерно распределенным между ними общим током и определить нагрузочную характеристику меры путем решения задачи для плоского элемента. Плоский элемент меры (рис. 4, а) может быть представлен в виде эквивалентной схемы, аналогичной схеме электрической цепи с распределенными постоянными (рис. 4, б).

Для этой схемы справедливы следующие дифференциальные уравнения

$$\left. \begin{aligned} -di &= ug_0 dx \\ -du &= ir_0 dx \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где r_0 — сопротивление единицы длины потенциальной части наконечников элемента меры;

g_0 — проводимость манганина и области перехода тока из наконечника в манганин, приходящаяся на единицу длины потенциальной части наконечника.

Решая уравнения (12) совместно и учитывая, что $i = I_0$ при $x = 0$ и $i = 0$ при $x = l$, получим соотношение для определения сопротивления элемента меры между любыми двумя парными потенциальными зажимами, расположенными на расстоянии x от начала координат (рис. 4, а):

$$R_x = C_1 \sqrt{\rho_1} \frac{\operatorname{ch} C_2 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_1}} (l-x)}{\operatorname{sh} C_2 \sqrt{\frac{\rho}{\rho_1}} l}, \quad (13)$$

где

$$C_1 = \sqrt{\frac{l_1}{bmn}}; \quad C_2 = \sqrt{\frac{2b}{l_1 mn}}; \quad \rho_1 = r_{\text{он}} \frac{b}{l_1} + \rho_1$$

ρ и ρ_1 — удельные сопротивления меди и манганина;

$r_{\text{он}}$ — сопротивление области перехода тока из наконечника в манганин на единицу длины наконечника.

Остальные обозначения даны на рис. 4.

Анализ уравнения (13) показывает, что изменение сопротивления R_x с нагревом наконечника при установке потенциальных зажимов в точках $x = l$ имеет знак противоположный, а в точках $x = 0$ — одинаковый со знаком изменения сопротивления материала наконечника. Это объясняется уменьшением плотности тока в верхней части пластины и увеличением ее в нижней части при нагреве наконечника, т. е. перераспределением тока в результате нагрева наконечника. На первый взгляд может показаться, что существуют такие точки $x = x_0$, при установке в которых потенциальных зажимов будет иметь место независимость сопротивления меры от изменения сопротивления наконечника с нагревом. Положение этих точек может быть определено из условия

$$\frac{\partial R_x}{\partial \rho_1} = 0.$$

Продифференцировав уравнение (13) и определив графически x_0 , можно убедиться, что x_0 с повышением температуры наконечника уменьшается, т. е. только в узком интервале температур положение таких точек можно считать неизменным [3]. Изменение сопротивления между любыми двумя парными потенциальными зажимами с нагревом манганина имеет всегда тот же знак, что и изменение сопротивления манганина в области перехода тока из наконечника в манганин. Таким образом, в общем случае изменение сопротивления меры с нагревом зависит не только от изменения удельных сопротивлений меди и манганина, как это часто считают [6, 7], но и от перераспределения тока, которое является функцией геометрических размеров меры и ее конструкции.

Соотношение (13) непригодно для точного определения сопротивления меры, но оно позволяет с достаточной для практических целей точностью оценить относительное его изменение, связанное с нагревом меди и манганина, и таким образом определить нагрузочные характеристики мер.

Относительное изменение сопротивления меры при изменении температуры меди и манганина в общем случае на основании соотношения (13) будет равно

$$\frac{\Delta R_x}{R_{0x}} = \frac{R_x f[\rho_0'(\rho_1)_{t_1, t_2}] - R_{0x}}{R_{0x}}, \quad (14)$$

где R_{0x} — сопротивление меры при температуре t_0 ;

t и t_1 — температуры потенциальной части наконечника и манганина.

Почти для всех практически применяющихся мер значение аргумента гиперболических синуса и косинуса не превышает 0,5 и они с достаточной точностью могут быть заменены в (13) суммой трех первых членов соответствующих рядов, в результате чего соотношение (14) может быть приведено к следующему виду:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R_x}{R_{0x}} \approx & \frac{\Delta \rho_1'}{\rho_1} + \\ & + \frac{\gamma_0^2 \frac{\Delta \rho}{\rho_0}}{2 \left(1 + \frac{\gamma_0^2}{2}\right)} \left\{ \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 - \frac{1}{3} + \frac{\gamma_0^2}{12} \left(2 + \frac{\Delta \rho}{\rho}\right) \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^4 - \frac{1}{5} \right] \right\}, \quad (15) \end{aligned}$$

где

$$\gamma_0 = C_2 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_{01}}}; \quad \frac{\Delta \rho_1'}{\rho_1} \approx \frac{\Delta r_{0m}}{\rho_{01} \frac{l_1}{\rho}} + \frac{\Delta \rho_1}{\rho_{01}};$$

ρ_0 ; ρ_{01} — удельные сопротивления меди и манганина при температуре t_0 ;

$\frac{\Delta \rho}{\rho_0}$; $\frac{\Delta \rho_1}{\rho_{01}}$ — относительные изменения удельных сопротивлений меди и манганина;

Δr_{0m} — изменение сопротивления r области перехода тока из наконечника в манганин.

Соотношения (14) и (15) дают возможность определить относительное изменение сопротивления мер при известных температурах меди и манганина. Как указывалось выше, температура потенциальной части наконечника может быть принята одинаковой по всей ее длине и может быть определена из (9), если принять $x = \frac{l_1}{2}$.

Как видно из того же соотношения, температура манганина при нагреве меры током неодинакова по длине манганиновой части. Поэтому при расчете нагрузочных характеристик должно быть вычислено среднее относительное изменение по длине манганиновой части, т. е.

$$\left(\frac{\Delta\rho_1}{\rho_{01}}\right)_{\text{ср}} = \frac{2}{l_1} \int_0^{\frac{l_1}{2}} \left(\frac{\Delta\rho_1}{\rho_{01}}\right)_x dx. \quad (16)$$

В широком интервале температур относительное изменение удельного сопротивления манганина может быть определено по формуле

$$\frac{\Delta\rho_1}{\rho_{01}} = \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3. \quad (17)$$

Заменяя в (9) гиперболические функции суммой двух первых членов соответствующих рядов и используя (17), после интегрирования получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta\rho_1}{\rho_{01}}\right)_{\text{ср}} = & \alpha \left(\theta_{\text{max}} - \frac{1}{3} \Delta\theta_{\text{max}}\right) + \beta\theta_{\text{max}} \left(\theta_{\text{max}} - \frac{2}{3} \Delta\theta_{\text{max}}\right) + \\ & + \gamma\theta_{\text{max}}^2 (\theta_{\text{max}} - \Delta\theta_{\text{max}}). \end{aligned} \quad (18)$$

Следует отметить, что определение среднего относительного изменения сопротивления манганина по формуле (18) имеет смысл только для мер класса 0,2 и более точных — при разности температур между серединой и концом манганиновой части (наконечником) больше 40 град и в области, близкой к максимуму кривой относительного изменения сопротивления манганина. В остальных случаях с достаточной для практики точностью относительное изменение сопротивления манганина может быть определено по экспериментальной температурной кривой манганина $\frac{\Delta\rho_1}{\rho_{01}} = f(\theta)$, если принять за перегрев манганина $\theta_{\text{ср}}$ его среднее значение, т. е.

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{2}{l_1} \int_0^{\frac{l_1}{2}} \theta_{\text{max}} dx,$$

где θ_{max} определяется соотношением (9) при $\frac{c_1 l}{2} < 1$,

$$\theta_{\text{ср}} \approx \theta_{\text{max}} - \frac{1}{3} \Delta\theta_{\text{max}}.$$

Из (13) и (15) видно, что на нагрузочную характеристику меры оказывает влияние изменение сопротивления области перехода тока из наконечника в манганин, которое в дальнейшем будем называть переходным сопротивлением.

Как показывает опыт, при длине манганиновых пластин или прутков более 100÷150 мм и длине впаянной в наконечник части 5÷8 мм изменение переходного сопротивления не оказывает существенного влияния на нагрузочную характеристику меры и им можно пренебречь. При длине манганиновой части меньше указанных выше значений влияние изменения переходного сопротивления становится заметным и должно быть учтено при расчете нагрузочной характеристики.

Расчет изменения переходного сопротивления представляет наиболее сложную задачу при расчете нагрузочных характеристик ввиду сложности конфигурации электрического поля тока в области перехода из наконечника в манганин.

Однако с точностью, достаточной для практических расчетов, эта задача может быть решена с помощью упрощенного представления картины поля в области перехода тока для характерных конструкций мер и шунтов: с горизонтальным или вертикальным расположением манганиновых пластин, с прутками, расположенными в шахматном порядке, и т. д. Например, расчет, произведенный таким способом для манганиновых прутков диаметром 6 мм и толщиной потенциальной части наконечника 12÷20 мм, впаянных на глубину 6÷8 мм припоем ПСР-45, показывает, что относительное изменение сопротивления меры, вызываемое изменением переходного сопротивления, обратно пропорционально длине манганиновой части меры и составляет 0,011÷0,014% при длине 1 см и повышении температуры наконечника на 1 град.

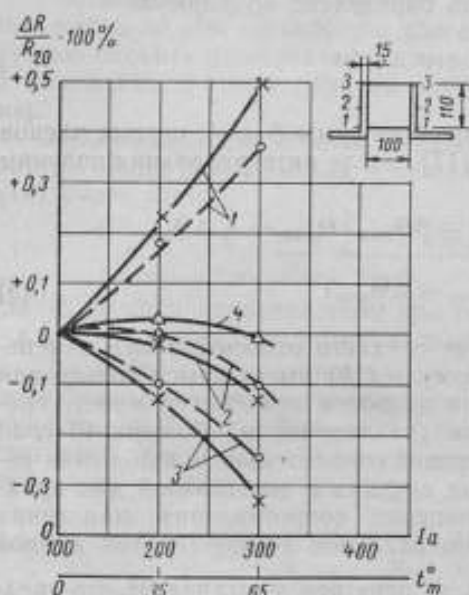


Рис. 5. Расчетные (прерывистые линии) и экспериментальные (сплошные линии) нагрузочные характеристики меры с высокой потенциальной частью наконечника. 1—3 — нагрузочные характеристики плоского образца меры при установившейся потенциальной части соответственно в точках 1—1; 2—2; 3—3; 4 — температурная кривая манганина.

и шунтов, так как омеднение манганина, получающееся при пайке и недостаточном травлении, приводит к изменению температурной характеристики манганина в изделии по сравнению с характеристикой образца, на котором она обычно определяется.

Кроме того, качество пайки также влияет на нагрузочную характеристику меры и шунта.

Однако, как показывает опыт изготовления мер на 10 ка (рис. 6), являющихся элементами образцовой комбинированной меры на ток 100 ка, при соответствующей технологии могут быть изготовлены меры и шунты с практически идентичными характеристиками, близкими к расчетным.

Кроме оценки нагрузочных характеристик мер и шунтов при конструировании, предлагаемый выше метод расчета позволяет определить расчетным путем их нагрузочные характеристики по известной температурной характеристике, а также определить пригодность манганина

для практических расчетов, эта задача может быть решена с помощью упрощенного представления картины поля в области перехода тока для характерных конструкций мер и шунтов: с горизонтальным или вертикальным расположением манганиновых пластин, с прутками, расположенными в шахматном порядке, и т. д. Например, расчет, произведенный таким способом для манганиновых прутков диаметром 6 мм и толщиной потенциальной части наконечника 12÷20 мм, впаянных на глубину 6÷8 мм припоем ПСР-45, показывает, что относительное изменение сопротивления меры, вызываемое изменением переходного сопротивления, обратно пропорционально длине манганиновой части меры и составляет 0,011÷0,014% при длине 1 см и повышении температуры наконечника на 1 град.

Сопоставление расчетных и экспериментальных нагрузочных характеристик для плоского образца меры с высокой потенциальной частью наконечника (рис. 5) и меры $6 \cdot 10^{-6}$ ом на 10 ка с небольшой высотой потенциальной части наконечника и малой длиной манганиновых прутков (рис. 6) показывает, что расчет дает вполне удовлетворительные результаты.

Следует отметить, что нагрузочные характеристики, близкие к расчетным, получаются только при тщательном изготовлении мер

с заданной температурной характеристикой для изготовления мер и шунтов определенного класса точности.

В заключение можно сделать вывод, что с помощью полученных соотношений расчет нагрева и нагрузочных характеристик мер малого сопротивления и шунтов на большие постоянные токи может быть сделан с достаточной для практических целей точностью.

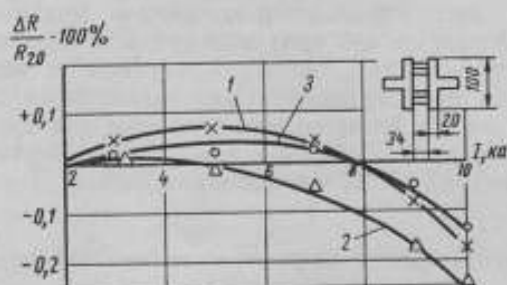


Рис. 6. Нагрузочные характеристики меры сопротивления $6 \cdot 10^{-6}$ ом на 10 000 а.
1 — теоретическая и 3 — экспериментальная характеристики; 2 — температурная кривая материала.

Как показывает практика, полученные результаты могут быть использованы для решения вопросов, связанных с конструированием, эксплуатацией, условиями испытаний и повышением класса точности мер и шунтов на большие токи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Третьяк Г. Т., Лысов Н. Е., Основы тепловых расчетов электрической аппаратуры, М.—Л., 1935.
2. Дудьнев Г. Н., Теория теплового режима поверхностных, объемных сопротивлений и полупроводниковых термосопротивлений, Сборник статей «Исследования в области тепловых измерений и приборов», ЛИТМО, вып. 21, 1957.
3. Маренниа А. И., Способы воздействия на температурный коэффициент образцовых катушек с малым сопротивлением, Труды ВНИИМ, вып. 16(32), 1938.
4. Wenner F., Thomas J., A method of adjusting the temperature coefficient and resistance of low-valued resistance standards, «Bureau of Standards Journal of Research», v. 12, № 2, 1934, p. 147—154.
5. Рудный Н. М., Чухланцев А. А., Повышение точности мер малого сопротивления, «Измерительная техника», № 5, 1957, стр. 56.
6. Румянцев А. С., Чухланцев А. А., Дубовик Е. П., О погрешностях шунтов для измерения больших токов, Труды ВНИИМ, вып. 38(98), 1959.
7. Добротворский Н. С., Методы уменьшения погрешностей калиброванных шунтов, «Вестник электропромышленности», № 5, 1957.

Поступила в редакцию
3/III 1959 г.

А. С. РУМЯНЦЕВ
ВНИИМ

НОВАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО КОМПАРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассмотрены недостатки применявшейся ранее методики и изложена новая методика измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора постоянного тока, а также описаны специальные делители напряжения, применяемые с магнитными компараторами постоянного тока, и оценена погрешность измерения этой аппаратурой.

Необходимость измерения малых сопротивлений при больших токах встречается при поверке шунтов к амперметрам и килоамперметрам. Сопротивление шунтов, рассчитанных на токи до 10 ка и более, составляет несколько микроом. Вследствие зависимости сопротивления шунтов от нагрузки, т. е. от силы тока в них, поверка их должна выполняться при различных токах, до номинальных включительно.

Требуемая точность метода поверки шунтов определяется тем, что в настоящее время изготавливаются шунты класса 0,05. При поверке таких шунтов метод должен обеспечивать возможность измерения их сопротивления с погрешностью не более 0,01 ÷ 0,02 %.

Во ВНИИМ для измерения малых сопротивлений при токах до нескольких сотен ампер с указанной точностью применяются специальные мосты. В качестве образцовых мер при меньших токах используются обычные образцовые катушки сопротивления, а при больших токах — специальные катушки сопротивления, рассчитанные на большие токи и мощности.*

Для тех же целей во ВНИИМ разработан метод магнитного компаратора (реакторного делителя) постоянного тока [1—3]. При токах 0,5 ÷ 10 ка ввиду неустойчивости больших токов и отсутствия точных мер на эти токи для измерения малых сопротивлений с указанной точностью может применяться и применяется только последний метод.

Основным достоинством метода магнитного компаратора тока является возможность использования в качестве образцовых мер обычных образцовых катушек сопротивления, рассчитанных на малые токи

* Например, катушки, рассчитанные на ток 1 ка и мощность 100 вт. Эти катушки используются при токах, значительно меньших номинального (например, 300—400 а), благодаря чему зависимостью их сопротивления от силы тока в них можно пренебречь.

и мощности. Построенная аппаратура обеспечивает измерение сопротивлений до $1 \cdot 10^{-6}$ ом.

Однако до 1954 г. методика измерений с помощью магнитного компаратора тока была недостаточно совершенной и не обеспечивала указанной выше точности измерения малых сопротивлений, требуемой при поверке шунтов высших классов.

Точность измерения малых сопротивлений при больших токах с помощью магнитного компаратора тока была существенно повышена применением новой методики измерений.* Эта методика применяется при измерениях с магнитными компараторами тока на 750 а и 12 ка. В настоящее время эта методика применяется также при измерениях малых сопротивлений на установке УПШ-3, разработанной автором статьи совместно с Т. Б. Рождественской и Л. С. Левиним.

Недостатки прежней методики измерения малых сопротивлений

Методика измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока заключалась в поочередном измерении компенсатором постоянного тока падений напряжения на измеряемом сопротивлении, включенном в цепь большого тока, и образцовом сопротивлении, включенном в цепь малого тока, при скомпенсированных м. д. с. в сердечниках магнитного компаратора тока. Значение измеряемого сопротивления r_x вычислялось по формуле

$$r_x = \frac{r_0}{K} \frac{U_x}{U_0}, \quad (1)$$

где r_0 — значение образцового сопротивления;
 K — коэффициент компаратора;
 U_x и U_0 — падение напряжения соответственно на измеряемом и образцовом сопротивлениях.

Эта методика имеет следующие недостатки:

а) измерение двух падений напряжения требует значительного времени, в течение которого необходимо постоянство токов в обмотках магнитного компаратора тока, а также рабочего тока компенсатора. Практически случайная погрешность вычисленного значения сопротивления, обусловленная нестабильностью токов (в основном — большого) за время между двумя измерениями падений напряжения, может достигать 0,1%;

б) для получения значения измеряемого сопротивления необходимы вычисления по формуле (1).

Путь к повышению точности заключался в одновременном измерении падений напряжения U_x и U_0 двумя компенсаторами постоянного тока. По опубликованным данным [4], такая методика позволяла производить измерение малых сопротивлений с погрешностью в пределах 0,05÷0,02%. Однако полная одновременность измерений практически неосуществима. Поэтому указанную точность измерений следует считать завышенной. Кроме того, такие измерения сложны и неэкономичны, так как требуют участия двух поверителей.

Надежное повышение точности измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока было достигнуто при применении новой методики измерений, которая к тому же является и более простой.

* Е. П. Дубовик, Авторское свидетельство № 105638, 1957 г.

Новая методика измерения малых сопротивлений

Принципиальная схема для измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока по новой методике представлена на рис. 1, где T — магнитный компаратор постоянного тока; w_1 и w_2 — числа витков соответственно его первичной и вторичной обмоток; r_x — измеряемое сопротивление, включенное в цепь большого тока I_1 ; r_0 — сопротивление образцовой катушки, включенной в цепь малого компенсационного тока I_2 ; I_0 — ток в катушке; r_p — сопротивление делителя напряжения; I_p — ток в делителе; r — сопротивление регулируемого участка делителя, с которого снимается напряжение; r_m — сопротивление магазина; r_s — сопротивление соединительных проводников; G — чувствительный гальванометр.

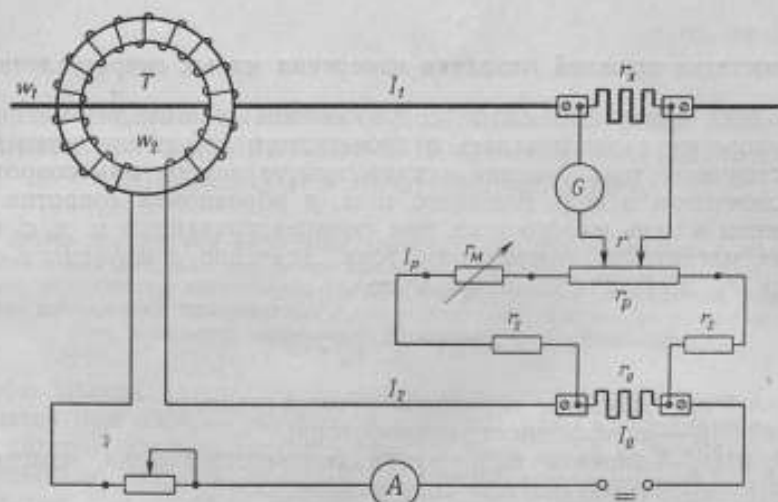


Рис. 1. Схема для измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока.

Соотношение сопротивлений образцовой катушки и шунтирующей ее цепи с делителем и магазином выбрано так, что выполняется равенство

$$\frac{r_0}{K(r_0 + r_p + r_m + r_s)} = 10^{-n}, \quad (2)$$

где n — целое число.

При выбранных значениях сопротивлений, коэффициента K и числа n равенство (2) достигается регулировкой сопротивления магазина r_m .

Как видно из схемы, при скомпенсированных м. д. с. в сердечниках компаратора и уравновешенном с помощью делителя падении напряжения на измеряемом сопротивлении будет выполняться равенство

$$\frac{I_p}{I_1} = \frac{r_0}{K(r_0 + r_p + r_m + r_s)}. \quad (3)$$

Тогда с учетом равенств (2) и (3) значение измеряемого сопротивления будет выражаться формулой

$$r_x = \frac{I_p}{I_1} r = 10^{-n} r. \quad (4)$$

Таким образом, новая методика измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока заключается в уравнивании падения напряжения на измеряемом сопротивлении напряжением, снимаемым с регулируемого участка делителя при скомпенсированных встречных м. д. с. в сердечниках компаратора. После выполнения этих операций значение измеряемого сопротивления непосредственно отсчитывается на декадах делителя напряжения.

Эта методика измерений имеет значительные преимущества по сравнению с прежней, так как вместо двух измерений падения напряжения выполняется только одно уравнивание падений напряжения. Благодаря этому существенно уменьшается случайная погрешность измерений от нестабильности большого тока. Новая методика сокращает время измерения и освобождает от необходимости вычисления значения измеряемого сопротивления.

Однако и с применением новой методики погрешность измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока в схеме рис. 1 достигает 0,05%. Эта погрешность обусловлена погрешностями делителя, магазина сопротивления и образцовой катушки, погрешностью от неточного учета сопротивления соединительных проводников, а также случайными погрешностями измерений с магнитным компаратором тока.

Схема рис. 1 может обеспечивать измерение малых сопротивлений с погрешностью $0,02 \pm 0,03\%$ [5—7], если значение сопротивления магазина r_d , удовлетворяющее выражению (2), находится экспериментальным путем. Для этого в цепь большого тока в качестве измеряемого включается известное сопротивление. Однако такая предварительная регулировка схемы может выполняться только при наличии рассчитанных на большой ток и хорошо изученных катушек сопротивления, которые не всегда имеются.

Надежное повышение точности и значительное удобство измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока были достигнуты применением специально разработанных делителей напряжения. Разработка этих делителей обеспечила возможность широкого внедрения магнитного компаратора тока в поверочную практику.

Специальные делители напряжения

Для измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора тока разработаны два делителя напряжения. Первый делитель (разработан Е. П. Дубовиком) применяется с магнитным компаратором тока, имеющим все значения коэффициента от 1 до 800. Второй делитель* применяется с магнитным компаратором тока, имеющим только три значения коэффициента: 5, 50 и 500.

Основная задача при разработке первого делителя заключалась в обеспечении возможности отсчета значения измеряемых сопротивлений при различных значениях коэффициента компаратора, отношения которых в общем случае не кратны 10. Эта задача была решена путем создания двухкаскадного делителя, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

При скомпенсированных м. д. с. в сердечниках магнитного компаратора тока и уравновешенном падении напряжения на измеряемом сопротивлении значение этого сопротивления вычисляется по формуле

$$r_x = r_0 \frac{A}{K} \cdot 10^{-5} r_{0M}, \quad (5)$$

* Этот делитель входит в комплект установки УПШ-3 для проверки шунтов, разработанной автором статьи совместно с Т. Б. Рождественской и Л. С. Левиным [7].

причем

$$A = \frac{r_c}{(r_p + r_c)(r_0 + r_b) + r_c r_p} \quad (6)$$

Для того чтобы показание измерительных декад делителя соответствовало значению измеряемого сопротивления, должно выполняться равенство: $A = K$. Конструкция делителя обеспечивает выполнение этого равенства для десяти значений коэффициента K . Значения A выставляются на первой ступени (r_d) делителя; вторая ступень (r_p) содержит только измерительные декады.

Схема делителя представлена на рис. 3*, где обозначено: P — первая ступень делителя, декады I, II, III, IV и V — вторая ступень делителя. Делитель применяется с образцовыми катушками 0,1 и 0,01 ом, потенциальные зажимы которых соединяются с соответствующими зажимами делителя. В делителе имеются ключ a и декады b и c для учета поправок к значениям сопротивлений образцово-вой катушки и делителя, а также

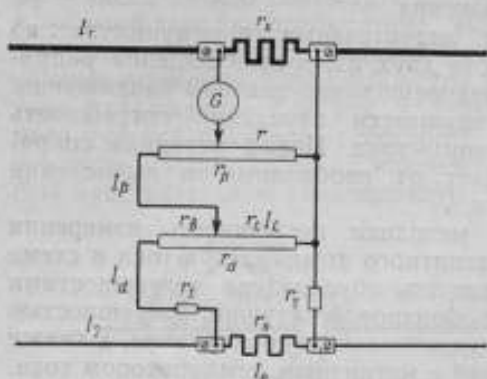


Рис. 2. Принципиальная схема двухкаскадного делителя напряжения.

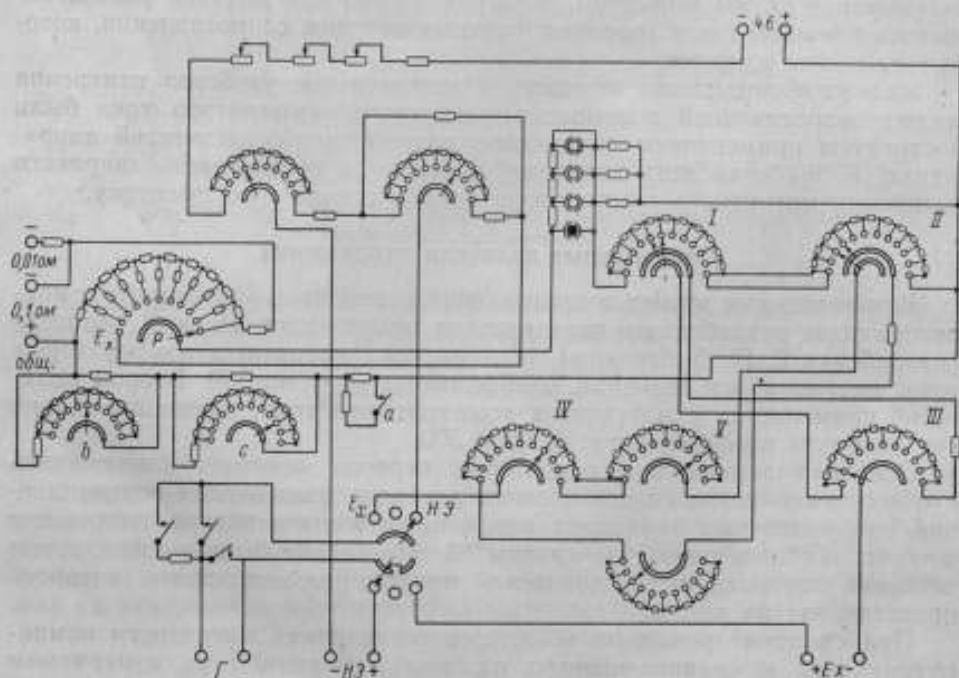


Рис. 3. Схема двухкаскадного делителя напряжения.

* Сложность схемы обусловлена тем, что делитель является универсальным прибором и может быть использован как обычный низкоомный компенсатор для измерения э. д. с. до 1,11 в. Для этой цели в его схеме предусмотрены декады для компенсации температурных изменений э. д. с. нормального элемента.

к отсчету по делителю в пределах от $-0,1\%$ до $+0,11\%$ ступенями в $0,001\%$.

Принципиальная схема для измерения малых сопротивлений с помощью второго делителя отличается от представленной на рис. 1 только отсутствием магазина сопротивления r_m . Сопротивления образцовой катушки, делителя напряжения и соединительных проводников связаны соотношением

$$r_0 + r_p + r_s = 200 \text{ ом.} \quad (7)$$

При скомпенсированных м. д. с. в сердечниках магнитного компаратора тока и уравновешенном падении напряжения на измеряемом сопротивлении значение этого сопротивления вычисляется по формуле

$$r_x = r_0 \omega_1 \cdot 10^{-3} r \text{ ом.} \quad (8)$$

Делитель применяется с магнитным компаратором тока, имеющим три первичные обмотки с числами витков ω_1 , равными 1, 10 и 100, и одну вторичную обмотку с числом витков 500. Сопротивление r регулируемого участка делителя определяется отсчетом на его декадах.

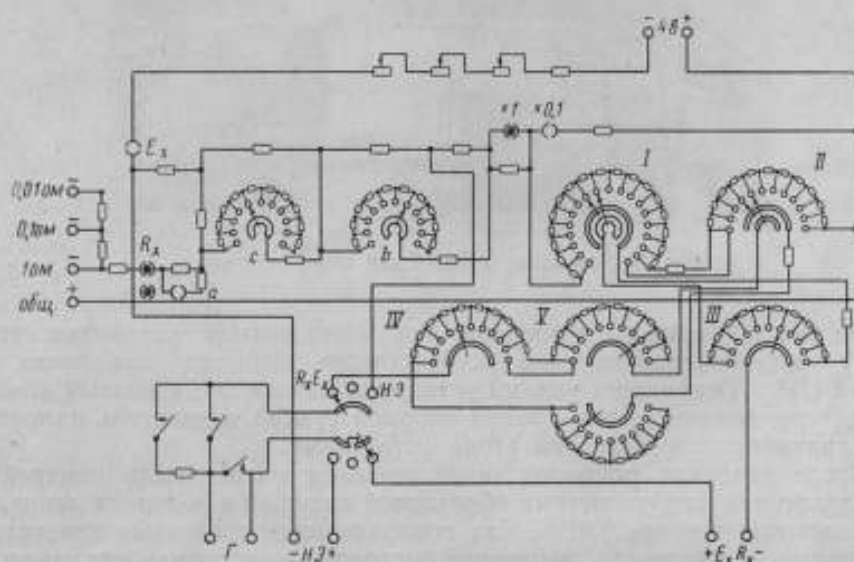


Рис. 4. Схема однокаскадного делителя напряжения.

Схема второго делителя представлена на рис. 4. Делитель применяется с образцовыми катушками 1; 0,1 и 0,01 ом. В этом делителе*, так же как и в первом, имеются ключ a и декады b и c для учета тех же поправок и в тех же пределах.

Принцип действия ключа и поправочных декад в обоих делителях заключается в изменении рабочего тока делителя, а следовательно, и отсчета по нему на относительную величину, равную учитываемой поправке в процентах. Этим полученное значение измеряемого сопро-

* Второй делитель также является универсальным прибором и может быть использован как обычный низкоомный компенсатор для измерения э. д. с. до 1,81 в. В этом случае поправочные декады делителя используются для компенсации температурных изменений э. д. с. нормального элемента.

тивления освобождается от систематических погрешностей, обусловленных погрешностями применяемой аппаратуры.

Если падение напряжения на измеряемом сопротивлении составляет не менее 9 мв и применяется гальванометр с чувствительностью к току около 200 мк/мкв (например, гальванометр типа ГПЗ-2 завода «Эталон»), то можно получать пятизначные отсчеты при измерении сопротивлений: с помощью первого делителя — приблизительно в пределах $1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-5}$ ом, а с помощью второго делителя — приблизительно в пределах $1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-6}$ ом.

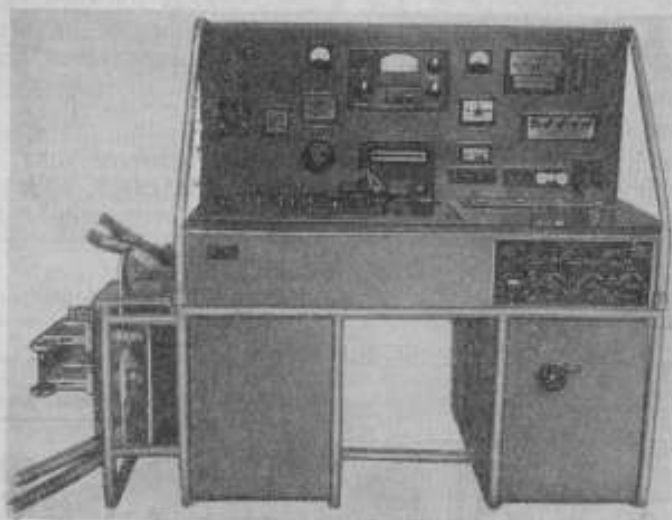


Рис. 5. Установка УПИИ-3 для поверки шунтов.

На рис. 5 представлен внешний вид комплектной установки типа УПИИ-3 для поверки шунтов всех классов точности при токах до 1500 а [7]*. Основными узлами установки являются магнитный компаратор тока (размещается в левой опорной тумбе) и делитель напряжения (размещается слева на столе установки).

После введения поправок неисключенная погрешность измерений, обусловленная погрешностями образцовой катушки и делителя напряжения, составляет менее 0,01%. Как показали многочисленные измерения, случайные погрешности измерений методом магнитного компаратора тока также не превышают 0,01%, если токи в обмотках магнитного компаратора создают в его сердечниках встречные м. д. с. не менее 100 ав, а на выходе магнитного усилителя компаратора включен микроамперметр на 50 ÷ 100 мкв.

Таким образом, погрешность измерения малых сопротивлений при больших токах с помощью магнитных компараторов тока и специальных делителей напряжения заключается в пределах 0,01 ÷ 0,02%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова Е. К., Дроссельный делитель тока для измерения больших постоянных токов в малых сопротивлениях, «Электричество», № 8, 1951.
2. Михайлова Е. К., Реакторный делитель тока для измерения больших постоянных токов в малых сопротивлениях, Труды ВНИИМ, вып. 14(74), 1953.

3. Михайлова Е. К., Исследование погрешностей шунтов на большие постоянные токи, «Вестник электропромышленности», № 1, 1953.

4. Михайлова Е. К., Аппаратура для измерения больших постоянных токов и малых сопротивлений, Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, Сборник № 1, 1956.

5. Румянцев А. С., Дубовик Е. П., Чухланцев А. А., Разработка методики и образцовой аппаратуры для испытания в условиях эксплуатации трансформаторов постоянного тока типа И-58 на 70 ка, Рефераты научно-исследовательских работ институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, Сборник № 2, 1958.

6. Румянцев А. С., Чухланцев А. А. и Дубовик Е. П., О погрешностях шунтов для измерения больших токов, Труды ВНИИМ, вып. 38(98), 1959.

7. Румянцев А. С., Рождественская Т. Б., Дубовик Е. П., Левин Л. С., Установка для поверки шунтов и мер малого сопротивления при больших постоянных токах, Рефераты научно-исследовательских работ, выполненных в институтах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, Сборник № 3, 1959.

Поступила в редакцию

30 1960 г.

Э. С. ЛИВШИЦ

ВНИИ

РАЗРАБОТКА МЕР БОЛЬШОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ДЛЯ ПОВЕРОЧНЫХ ЦЕЛЕЙ

В статье приводятся результаты исследования разработанных измерительных катушек индуктивности и магазинов индуктивности, предназначенных для комплектной поверки мостов переменного тока с пределами измерения до 1000 гн при частоте 50–100 гц.

Наиболее простым и широко распространенным способом поверки и градуировки мостов переменного тока, служащих для измерения емкости и индуктивности, является сопоставление показаний этих мостов с действительными значениями образцовых мер, включенных в качестве измеряемого объекта. Принципиально этот способ, называемый в метрологической практике «методом комплектной поверки», никаких ограничений не имеет, но до настоящего времени имело место одно практическое ограничение: отсутствие соответствующих мер больших значений и, в частности, мер индуктивности для значений, превышающих $1 \div 10$ гн, или, точнее, полное отсутствие такого рода мер при значениях, превышающих 10 гн, и весьма ограниченное количество их в диапазоне значений $1 \div 10$ гн.*

Все возрастающее количество приборов для измерения индуктивности и емкости с большими пределами измерений и необходимость расширения возможностей поверки и градуировки этих приборов в сторону больших значений явилось причиной разработки во ВНИИК отсутствовавших до последнего времени мер большой емкости [1] и большой индуктивности, а также установки для поверки этих мер.**

Ниже рассматриваются основные этапы разработки мер большой индуктивности и полученные при этом результаты.

* По имеющимся сведениям, катушки без ферромагнитных сердечников со значением 10 гн изготавливались в незначительном количестве фирмой «Гартман и Браун», а в настоящее время такие катушки, а также катушки со значениями 2 и 5 гн изготавливаются фирмой «R. F. L.» (ГДР). Отдельные катушки индуктивности и магазины таких же номинальных значений, но другой конструкции (с катушками, намотанными на сердечниках из магнитодиэлектрика), изготавливает фирма «Дженерал Рэдио» (США).

** См. статью настоящего сборника, стр. 88.

Требования к разрабатываемым мерам и выбор конструкции

Выявившиеся в ходе выполнения данной темы требования к мерам большой индуктивности сводятся к следующему:

1. По диапазону значений отдельные катушки или сочетания их (в виде магазинов) должны обеспечивать возможность воспроизведения значения индуктивности в пределах до 1000 гн, поскольку во многих современных мостах предусмотрено измерение индуктивности до значений такого порядка; вместе с тем должно быть обеспечено достаточно плавное изменение значений внутри диапазона, например ступенями через 1 гн.

2. Зависимость индуктивности катушек от амплитуды приложенного к ним напряжения и от частоты должна лежать в определенных пределах. Исходя из того, что, как правило, допустимая погрешность существующих мостов, для поверки которых должны служить эти меры, не бывает меньше 1%, можно считать, что при изменении приложенного напряжения (в пределах, допустимых при работе с мостами, например в 10 раз) изменение индуктивности не должно превышать указанного значения, т. е. 1%. Труднее предъявить аналогичное требование к допустимому изменению индуктивности в зависимости от частоты переменного тока. Во всяком случае это изменение должно быть таким, чтобы его можно было учесть путем введения поправок и чтобы вместе с тем его можно было не учитывать при обычных (в нормальных лабораторных условиях) колебаниях частоты.

3. Образцовые меры должны быть достаточно стабильными во времени: в течение года или, по крайней мере, 6 месяцев изменение их не должно превышать половины погрешности подгонки. Должна быть незначительной зависимость индуктивности от температуры: во всем диапазоне рабочих температур (например $20 \pm 10^\circ \text{C}$) изменение индуктивности не должно превышать $1/4 - 1/5$ погрешности подгонки.

4. В магазинах индуктивности должна быть обеспечена аддитивность, что требует уменьшения индуктивной связи между катушками и обеспечения малого влияния соседних ферромагнитных и металлических масс.

5. Добротность этих мер должна быть достаточно высока, во-первых, для обеспечения возможности поверки тех мостов, сходимость уравнивания которых существенно зависит от добротности измеряемого объекта (к таким мостам относятся, например, универсальные мосты); во-вторых, для обеспечения возможности поверки шкал добротности мостов. В связи с этим необходимо также разработать более точные методы измерения добротности, чем обычно применяемые.

Далее, необходимо было выбрать важное для режима, в котором находятся меры, значение частоты переменного тока. В настоящей работе была выбрана частота 100 гц по той причине, что измерение больших индуктивностей (во всяком случае, в диапазоне значений 100–1000 гн) производится преимущественно на этой частоте.* Следует также отметить, что для катушек со значениями индуктивности, превышающими 100 гн, их параметры при частотах, заметно превышающих 100 гц, могут представлять только специальный интерес, поскольку при этом обычно наблюдается резкая зависимость этих параметров от

* Частоту 100 гц имеет ток после выпрямления с помощью двухполупериодного выпрямителя. При этой частоте работают дроссели в фильтрах выпрямителей.

частоты, что связано с приближением к резонансу или даже с переходом через него.

Эти требования можно удовлетворить в той или иной степени, отказавшись от катушек без ферромагнитных сердечников и применяя катушки, в которые для увеличения и стабилизации индуктивности введены ферромагнитные сердечники с воздушным зазором. Известно, что в настоящее время применяются два основных типа сердечников такого рода: один — наборный, из листового материала, с сосредоточенным воздушным зазором, другой — из магнитодиэлектрика, т. е. вещества, представляющего собой спрессованную, достаточно однородную смесь весьма мелких зерен ферромагнетика с неферромагнитной связующей массой (обычно сердечники из магнитодиэлектрика имеют форму тороидов) [2]. Принципиально оба типа сердечников близки друг другу. Количественно эта близость видна из следующего: при сосредоточенном зазоре действующая относительная проницаемость μ_0 сердечника выражается формулой

$$\mu_0 = \frac{\mu}{1 + \mu\alpha}, \quad (1)$$

где μ — относительная проницаемость материала сердечника;
 α — отношение длины зазора к длине пути магнитного потока по ферромагнетнику.

В случае применения магнитодиэлектрика [3]

$$\mu_0 = \frac{1}{1 + \alpha} \left(\frac{\mu}{1 + \mu\alpha} + \frac{2\alpha + \alpha^2}{1 + \alpha} \right) = \frac{\mu - 1}{(1 + \alpha)^2 (1 + \mu\alpha)} + 1, \quad (2)$$

где α — отношение пути магнитного потока по воздуху к его же пути по ферромагнетнику, т. е. имеет такой же смысл, как и при сердечнике с сосредоточенным зазором.

При малых значениях α и больших значениях μ оба выражения практически совпадают.

Теоретически для нашей цели можно было бы применить сердечники как того, так и другого типов. Практически, однако, между этими решениями имеется существенная разница. Магнитодиэлектрики (главным образом альсифер) изготавливаются лишь в виде тороидов сравнительно небольших размеров, с действующей проницаемостью около 60, и этого вполне достаточно для их применения в качестве сердечников для так называемых пупиновских катушек, индуктивность которых обычно не превышает десятых долей генри. В нашем случае такие сердечники неприемлемы, так как из-за ограниченности размеров тороидов и из-за недостаточной их проницаемости потребовалось бы накладывать большое количество витков. Можно показать, что с выпускаемыми в настоящее время тороидами большие значения индуктивности при соблюдении остальных, ранее перечисленных требований, практически неосуществимы.

Значительно большие возможности представляет другая форма сердечника — наборный сердечник из листового материала с сосредоточенным воздушным зазором, поскольку форма и размеры таких сердечников не стеснены какими-либо жесткими ограничениями.

Подобные катушки индуктивности уже применялись и применяются тогда, когда требуется большая индуктивность, например, в так называемых расчетных столах переменного тока и в моделях электрических систем, а также в колебательных контурах некоторых низкочастотных частотомеров. Однако условия работы катушек и требования, к ним предъявляемые, в указанных случаях и в нашем случае различны.

Так, в колебательных контурах частотомеров к катушкам приложено напряжение, мало изменяющееся по амплитуде и при относительно большой индукции в сердечнике. В то же время, хотя по режиму работы катушки в расчетных столах в известной мере близки к нашим, но по диапазону номинальных значений (так же как и упомянутые катушки в контурах частотомеров) не выходят за пределы 15—20 эГ , тогда как разрабатываемые меры должны иметь номинальные значения по крайней мере до 400 эГ и, сверх того, при совместном включении удовлетворять требованиям аддитивности.

В основу конструкции мер была положена катушка с сердечником, набранным из Ш-образных листов и имеющим воздушный зазор. В первоначальном варианте зазоры имелись в трех местах — и в среднем и в боковых стержнях, так что сердечник получался в форме буквы Ш с приставкой (рис. 1). Обе части нужно было собирать отдельно. Они механически соединялись посредством системы стяжных и упорных винтов, позволяющей достаточно плавно регулировать зазор и жестко фиксировать размер зазора после подгонки. Полного расчета катушек не производилось, так как он весьма сложен.

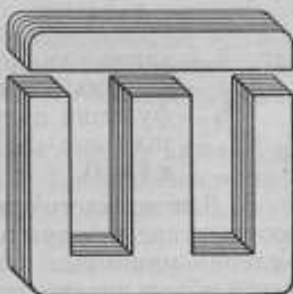


Рис. 1.

Некоторые результаты известных автору работ [3—5], применимые к конструкции и расчету наших катушек, а также результаты, полученные в ходе настоящей работы, изложены ниже.

1. Применение сердечников с зазором важно не только для увеличения индуктивности (по сравнению с катушками без сердечника) и стабилизации ее значения, но и для повышения коэффициента добротности катушек; в отношении добротности катушек применение сердечников без зазора не только бесполезно, но может быть даже вредно, если сравнивать эти катушки с такими же катушками, но без сердечника; при замкнутом сердечнике чем ниже удельные потери в материале и чем выше его проницаемость, тем ниже коэффициент добротности катушки [3].

2. При одинаковых прочих условиях и при некоторой определенной величине воздушного зазора можно свести суммарные потери к минимуму, т. е. получить оптимальный коэффициент добротности; это соответствует равенству потерь в обмотке катушки и в магнитопроводе [3, 5].

3. Увеличение добротности катушки может быть получено путем увеличения размеров магнитопровода и всей катушки, так как добротность приблизительно пропорциональна размерам магнитопровода. Однако возможность увеличения добротности этим путем ограничивается быстрым нарастанием объема и веса катушки [5].

4. Значения индуктивности L катушек с воздушным зазором δ в сердечнике и числом витков n , вычисляемые по обычной формуле

$$L = \frac{\mu_0 n^2 S}{\delta + \frac{l_{\text{ж}}}{\mu}}, \quad (3)$$

где $l_{\text{ж}}$ — длина пути потока по ферромагнетику (в м);

S — сечение сердечника (в м^2);

μ_0 — магнитная проницаемость пустоты, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ эГ/м , сильно расходятся с действительными значениями, поскольку не учитывается рассеяние.

Учет рассеяния можно экспериментально, как это делалось в ходе

нашей работы, путем измерения индуктивности одной катушки с заданным магнитопроводом и определения таким образом поправочного коэффициента к формуле. Полученный коэффициент пригоден для расчета катушек как с заданным магнитопроводом, так и с другим, геометрически ему подобным. Расчетным путем этот коэффициент может определяться по способу, который применял в своей работе М. С. Либкинд [5] для одного частного вида магнитопровода, отличающегося от примененного нами в первом варианте тем, что зазор имеется только в среднем стержне. Результаты расчета, произведенного М. С. Либкиндом для этого типа магнитопровода, дали следующую зависимость указанного коэффициента от геометрических размеров магнитопровода:

$$\xi(\delta) = \left(1 + k_2 \frac{\delta}{b}\right) \xi_0, \quad (4)$$

где δ — длина зазора;
 b — ширина бокового стержня;
 k_2 — функция прочих размеров;
 ξ_0 — значение коэффициента ξ , получаемое путем экстраполяции к $\delta = 0$.

5. Для каждого типа магнитопровода может быть найдено такое соотношение между его размерами, при котором объем его минимален. Условия минимума получаются различными, в зависимости от того, какой объем имеется в виду — активный или определяемый габаритными размерами [5].

6. Для определения зависимости индуктивности от режима, т. е. от амплитуды протекающего тока (или, иными словами, от амплитуды приложенного напряжения), можно исходить из обычной формулы (3), опуская пока поправочный коэффициент, так как он от режима не зависит. Путем простого преобразования формуле (3) можно придать вид

$$L = \frac{\mu_0 n^2 S \mu_0}{l_{\kappa}}, \quad (5)$$

Формулу (1) можно написать в виде:

$$\mu_0 = \frac{k}{1 + \frac{k}{\mu}}, \quad (6)$$

где $k = \frac{1}{\alpha} \rightarrow \frac{l_m}{\delta}$.

При выбранных форме и размерах катушки и сердечника постоянными являются параметры S и l_{κ} , переменными — параметры n и μ_0 . Зависимость L от режима катушки определяется величиной μ_0 . Как видно из формулы (6), уменьшение рассматриваемой зависимости достигается уменьшением k (т. е. увеличением длины зазора) и увеличением μ — проницаемости; и то, и другое имеют, однако, ограничения, которые мы сейчас рассмотрим.

Уменьшение k ведет к уменьшению индуктивности L , что в нашем случае, когда для L требуются большие значения, как раз нежелательно; возможность компенсировать такое уменьшение увеличением количества витков n допустима только при малых значениях L , в интересующих же нас случаях эта возможность чревата другой опасностью — роста собственной емкости, что также весьма нежелательно.

Таким образом, с рассмотренных точек зрения изменение длины зазора может быть полезно в одном отношении и в то же время вредно в другом, поэтому выбор ее должен быть результатом некоторого компромисса.

Иначе обстоит дело с проницаемостью μ , увеличение которой приводит только к уменьшению рассматриваемой зависимости. Поэтому при выборе материала для сердечника следует отдавать предпочтение материалу с более высокой проницаемостью. Однако при этом необходимо всегда иметь в виду следующие дополнительные обстоятельства: а) для нашего случая определяющей является динамическая проницаемость, тогда как техническими условиями нормируется статическая проницаемость; б) чем выше статическая проницаемость материала, тем сильнее выражен в нем поверхностный эффект и, следовательно, тем резче зависит динамическая проницаемость материала от частоты; ослабить поверхностный эффект можно за счет уменьшения толщины материала, однако это лимитируется не только технологическими соображениями, но также уменьшением при уменьшении толщины материала статической (а следовательно, и динамической) проницаемости; последнее обстоятельство отражено в технических условиях [6]; в) чем выше проницаемость материала, тем он более чувствителен к механическим напряжениям, к неточностям термообработки и т. п.

Известно, что для рассматриваемых материалов с ростом амплитуды индукции до нескольких тысяч гаусс динамическая проницаемость возрастает; для оценки качества материала сердечника в отношении независимости индуктивности от режима можно принять за меру этого качества изменение индуктивности при переходе от режима при весьма малой индукции (которой соответствует начальная проницаемость μ_a) к режиму при той индукции, которой соответствует максимум динамической проницаемости, т. е.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\max} = \Delta\left(\frac{k}{\mu}\right),$$

где Δ перед скобкой означает разность между значениями $\frac{k}{\mu}$ при указанных двух режимах или, пренебрегая вторым значением по сравнению с первым,

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\max} \approx \frac{k}{(\mu_a)_{\min}}.$$

Значения динамических проницаемостей для высокопроницаемых материалов не нормируются; их можно найти только в специальных работах; данные для современных материалов отечественного производства были опубликованы недавно [7].

Из существующих железо-никелевых сплавов отечественного производства наиболее высокопроницаемыми являются три — под марками 79НМ, 80НХС и 79НМА, последний отличается особо высокими значениями проницаемости. Выше уже указывалось на затруднения, связанные с применением материалов, обладающих особо высокой проницаемостью; в силу этого было решено материал марки 79НМА не применять.

Что же касается материалов марки 79НМ и 80НХС, то по своим свойствам, как это видно из данных об их статических характеристиках, отраженных в технических условиях [6], а также из цитированной работы [7], они сравнительно близки друг к другу.

Сердечники для катушек были изготовлены из листового материала марки 79НМ толщиной 0,2—0,3 мм и по размерам совпадали с сердечниками Ш 20 × 25 и Ш 25 × 30 для трансформаторов. Из них первый был применен для катушек до 40 гм, а второй — для катушек от 100 гм и выше; общая длина воздушного зазора составляла около 2 мм. Всего

было изготовлено 12 катушек, данные обмоток которых помещены в табл. 1.

Таблица 1

Данные обмотки катушек	Номинальное значение индуктивности катушек, мГ											
	1	2	3	4	10	20	30	40	100	200	300	400
Число витков	1 500	2 100	2 600	3 000	4 800	6 700	8 300	9 500	11 800	16 600	20 500	23 500
Диаметр провода (ПЭ), мм	0,44	0,38	0,35	0,33	0,25	0,2	0,18	0,16	0,23	0,18	0,16	0,15
Сопротивление постоянному току, Ом	22	41	64	80	220	480	770	1 050	920	2 060	3 280	4050

Катушки были собраны в три отдельных магазина — единиц, десятков и сотен генри. Для обеспечения аддитивности катушки в магазинах были расположены так, как показано на рис. 2 (линии параллельны листам сердечника). Экспериментально было найдено, что при этом

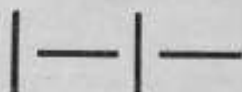


Рис. 2.

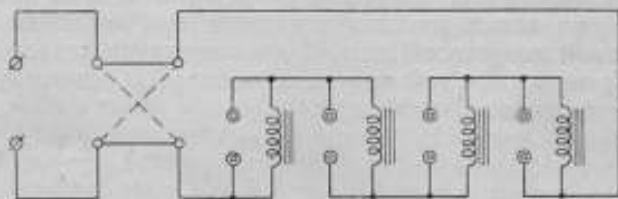


Рис. 3.

коэффициент связи между катушками получался наименьшим из всех возможных и составлял $\sim 0,04\%$. Подгонка катушек производилась регулировкой воздушного зазора. Электрическая схема включения каж-

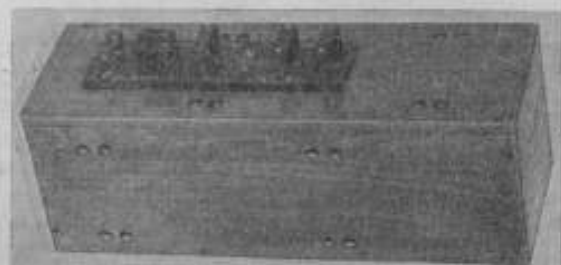


Рис. 4.

дого из магазинов показана на рис. 3. От зажимов каждой из катушек сделаны выводы к парам штепсельных гнезд на наружной панели магазина; для замыкания этих гнезд предусмотрены вилки. Магазин по принципу действия аналогичен обычному штепсельному магазину сопротивления. Внешний вид магазина индуктивности показан на рис. 4.

Исследование изготовленных катушек и магазинов индуктивности

Перед исследованием изготовленных катушек была произведена проверка, соответствуют ли их сердечники, которые специально не расчи-

тывались, оптимальным соотношениям размеров, о которых шла речь выше [5]. Подсчет показал, что условия оптимума для сердечников выполняются.

Затем были произведены экспериментальные исследования катушек и магазинов, результаты которых приводятся ниже.

Таблица 2

Параметр	Номинальное значение индуктивности катушек, μH											
	1	2	3	4	10	20	30	40	100	200	300	400
$R_{-100} (O.M.)$	29,1	57,1	88,0	113	305	644	1000	1380	1795	4000	6220	7850
Q_{100}	21,4	22,0	21,5	22,3	20,6	19,5	18,8	18,2	35,0	31,5	30,3	32,0
$\left(\frac{R_{ж}}{R_{-}}\right)_{100}$	0,26	0,28	0,27	0,29	0,26	0,25	0,23	0,24	0,49	0,48	0,47	0,48
$R_{-50} (O.M.)$	23,8	45,8	70,3	89,0	245	525	825	1130	1160	2530	4020	5000
Q_{50}	13,2	13,7	13,4	14,1	12,8	12,0	11,4	11,1	27,0	24,8	23,4	25,1
$\left(\frac{R_{ж}}{R_{-}}\right)_{50}$	0,09	0,1	0,09	0,1	0,08	0,08	0,07	0,07	0,21	0,19	0,19	0,19

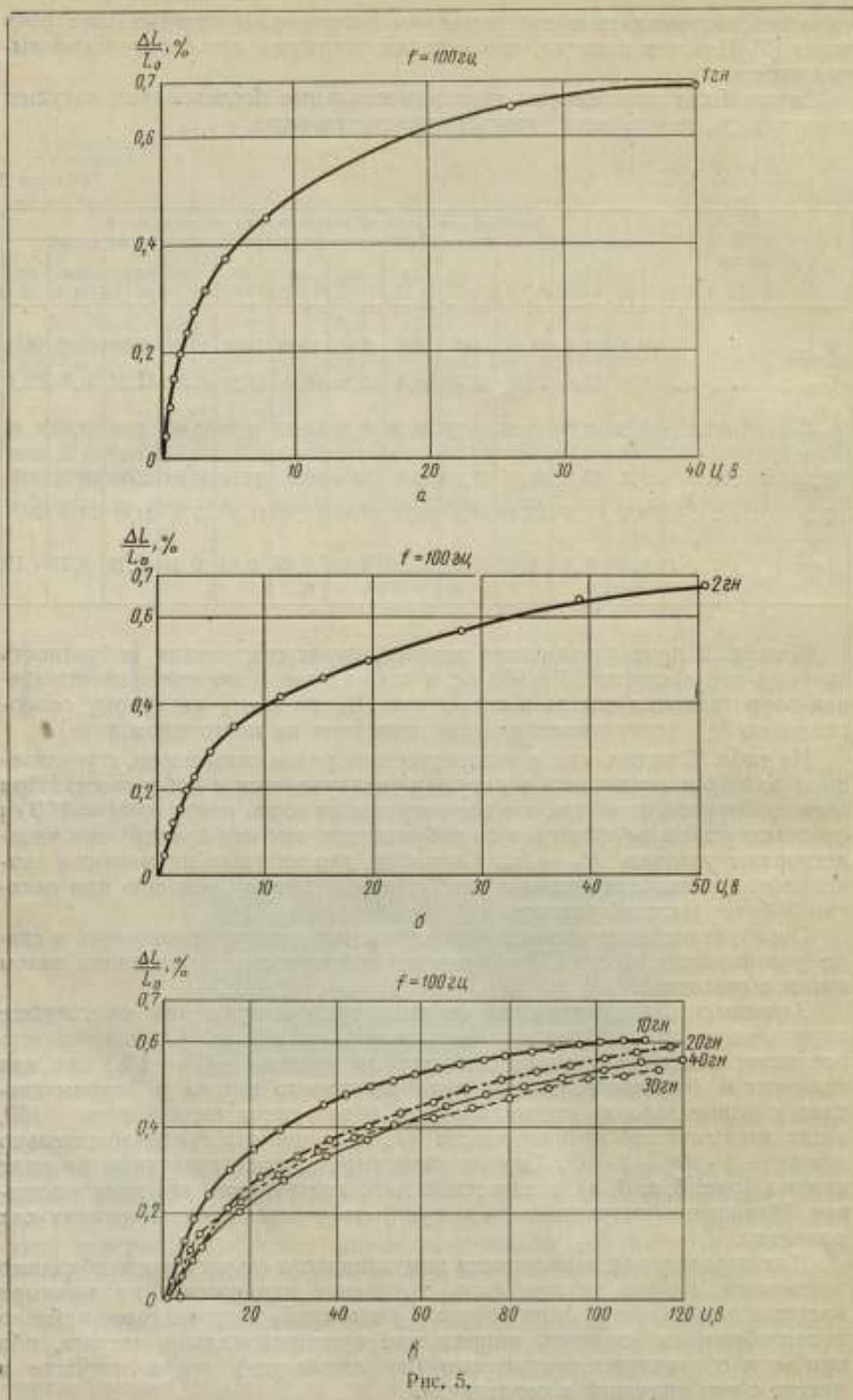
В табл. 2 дана сводка всех данных, характеризующих добротность катушек при частотах 50 и 100 гц , а также приведены значения отношения сопротивления потерь в сердечнике $R_{ж}$ ко всему активному сопротивлению R_{-} (сопротивление меди измерено на постоянном токе) *

Из табл. 2 видно, что, в подтверждение ранее сказанного, с увеличением размеров сердечника и катушки увеличивается и добротность. При этом любопытно отметить, что все катушки на сотни герц при $f = 100 \text{ гц}$ отвечают условиям оптимума по добротности, так как практически удовлетворяют условию $R_{ж} = R_{м}$. Очевидно, что катушки на меньшие значения индуктивности должны приблизиться к этому условию при некоторой более высокой частоте.

Определение активного сопротивления катушек производилось в схеме резонансного моста. Коэффициент добротности определялся затем путем вычисления.

Зависимость индуктивности от амплитуды напряжения на катушке определялась также при двух частотах: 50 и 100 гц . Ожидалось, что эта зависимость не должна выходить за пределы $\sim 0,5 \div 1\%$, так как величина k (отношение длины пути магнитного потока в ферромагнетике к длине зазора) составляла для обоих типов сердечников ~ 100 , а для динамической проницаемости $(\mu_a)_{\text{дин}}$ принято предположительно значение $1 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^4$. Снятые зависимости, представленные на ряде кривых (рис. 5, а, б, в), в известной мере подтвердили это предположение. Изменения индуктивности могут быть учтены при измерениях как поправки.

Для определения зависимости индуктивности от частоты необходимо условиться, каково должно быть отношение напряжения на зажимах катушки к напряжению при прежней, «исходной» частоте. Было найдено целесообразным изменять напряжение пропорционально частоте, ибо при этом сохраняется неизменным (по амплитуде) ток в катушке и вместе с тем индукция в сердечнике.



В результате было найдено, что для катушек с малыми номинальными значениями индуктивности эта зависимость в пределах 50–100 гн невелика; например, для катушки 4 гн индуктивность увеличивается приблизительно на 0,2%. Для катушек с большими номинальными значениями зависимость от частоты сильнее; например, для катушки 100 гн увеличение индуктивности в том же диапазоне изменения частоты (50–100 гц) составляет около 1%.

Сравнительно не очень сильная зависимость от частоты в этом диапазоне указывает на то, что поддержание, а также измерение частоты при работе с данными катушками или магазинами достаточно проводить с умеренной точностью, например с погрешностью не более 2%.

Хотя в число требований к катушкам малая зависимость индуктивности от тока подмагничивания не входит, тем не менее эта зависимость представляет интерес, поскольку в некоторых мостах предусматривается возможность измерений при подмагничивании, а ряд мостов специально предназначен для этой цели.

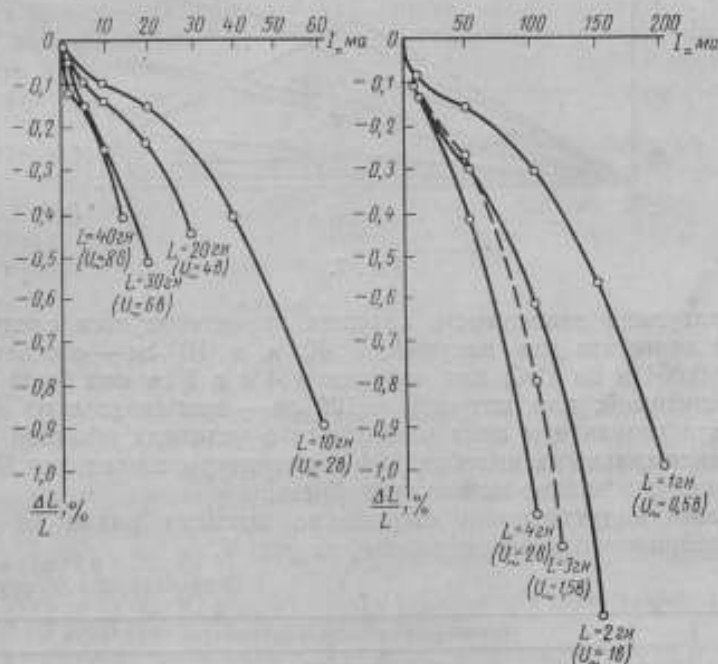


Рис. 6.

Известно, что при наложении постоянного подмагничивания проницаемость магнитномягких материалов уменьшается [7]. В результате этого магнитное сопротивление сердечника должно возрасти, а индуктивность катушки — уменьшиться. Далее, в режиме подмагничивания могут возрастать потери, а это приводит к уменьшению коэффициента добротности Q .

Измерения индуктивности катушек при подмагничивании показали для катушек с номинальным значением 100 гн уменьшение индуктивности на 0,2% при подмагничивании током 10 ма, для катушек в 200 гн — уменьшение индуктивности того же порядка при токе 5,5 ма и т. п. Для катушек, составляющих наборы десятков и единиц генри, получились аналогичные результаты, но при значительно больших зна-

чений подмагничивающего тока, например падение на 0,2% для катушки в 10 гн получалось при токе 25 ма, для катушки в 1 гн — при токе в 70 ма, и т. д. Эти изменения могут быть учтены при измерениях введением поправок. Зависимость от тока подмагничивания представлена в виде кривых на рис. 6.

Увеличение потерь и связанное с этим уменьшение коэффициента добротности катушек при тех же условиях значительно больше, чем уменьшение индуктивности; например, активное сопротивление катушки в 100 гн при токе подмагничивания 10 ма увеличивается на 8%; катушки в 10 гн при токах 20 + 40 ма — на 13%; катушки в 1 гн при токе 70 ма — на 12%, и т. д.

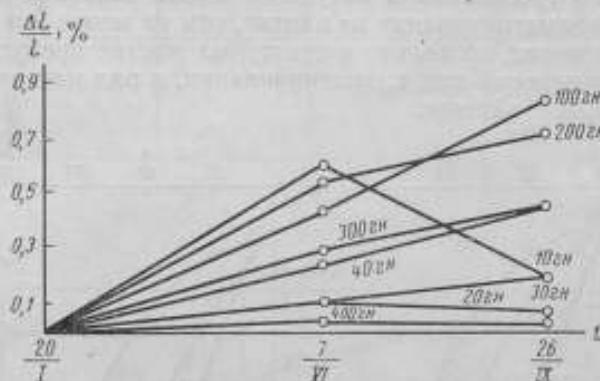


Рис. 7.

Температурная зависимость катушек характеризуется следующими опытными данными: для катушек в 40 и в 10 гн — соответственно +0,01 и +0,004% на 1°С; для катушек в 4 и в 1 гн она была практически неощутимой; для катушки в 100 гн — приблизительно +0,003% на 1°С. Эти результаты показывают, что в условиях обычной лаборатории с максимальными колебаниями температуры в пределах 10 + 20°С этими влияниями вполне можно пренебречь.

Изменение индуктивности катушек во времени видно из данных табл. 3, изображенных в виде кривых на рис. 7.

Таблица 3

Дата (1957 г.)	Номинальное значение индуктивности катушек, гн							
	10	20	30	40	100	200	300	400
18—21/I	10,0 ₀	20,0 ₁	30,0 ₀	40,0 ₁	100,1 ₂	200,0	300,1	400,0
7/VI	10,0 ₀	20,0 ₀	30,0 ₂	40,1 ₁	100,5 ₆	201,0 ₉	300,9 ₆	400,0 ₅
25—26/IX	10,0 ₂	20,0 ₂	30,0 ₀	40,1 ₉	100,9 ₆	201,4 ₂	301,4	400,1 ₂

Из табл. 3 видно, что индуктивность одной катушки (400 гн) оставалась практически неизменной, изменения индуктивности трех катушек составили до 0,2%, а остальных четырех — 40, 100, 200 и 300 гн — 0,4 ÷ 0,8%.

Причину обнаруженных изменений индуктивности следует искать в недостаточной жесткости конструкции, ибо регулировочные винты уменьшают жесткость конструкции.

Влияние на магнитные индуктивности посторонних ферромагнитных тел и взаимные влияния между магазинами изучались следующим образом. В качестве постороннего тела вблизи магазина на сотни генри помещался лабораторный автотрансформатор (типа ЛАТР-1). В зависимости от взаимного положения магазина и автотрансформатора индуктивность (при показаниях 100 и 400 гн) увеличивалась на 0,15–0,18%.

Взаимное влияние между двумя рядом расположенными магазинами (одного — на сотни, другого — на десятки генри) определялось путем сравнения их суммарной индуктивности (в каждом из магазинов было включено по одной катушке) до и после переключения проводов на зажимах одной из них; разность обоих измеренных значений определяла взаимное влияние между магазинами. Максимальное влияние в этих условиях составило $\pm 0,06\%$.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что конструкция, принятая для мер большой индуктивности, может считаться удовлетворяющей поставленным требованиям, за исключением недостаточной стабильности во времени; для обеспечения большей стабильности необходимо перейти к жесткой конструкции сердечника — из цельноштампованных листов.

В настоящей работе изложены результаты, полученные в 1956–1957 гг. Начиная с 1958 г., нами были применены для той же цели катушки на сердечниках жесткой конструкции, давшие хорошие результаты. Однако работы эти пока еще не закончены, и поэтому результаты их будут опубликованы позднее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левинская Н. В., Применение электролитических и металлобумажных конденсаторов как образцовых мер большой емкости, Труды ВНИИК, вып. 4, 1959.
2. Рабкин Л. И. и Шольн Н. Н., Магнитодизэлектрики и феррокатушки, М., 1948.
3. Partridge G. F., Iron-cored Coils of High Efficiency, «Philosophical Magazine», v. 29, № 196, 1940, p. 485.
4. Partridge G. F., The Inductance of Iron-cored Coils having an Air Gap, «Philosophical Magazine», v. 22, № 148, 1936, p. 665.
5. Либкинд М. С., Катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником для расчетных столов и моделей, «Периодическая информация» Института технико-экономической информации АН СССР, М., 1955.
6. Сплавы железо-никелевые с высокой магнитной проницаемостью, Технические условия ЧМТУ 5010–55.
7. Гурвич Е. И., Кондорский Е. И., Попова В. П., Проницаемость и потери магнитно-мягких сплавов разных толщин в переменных полях, Сборник трудов Центрального научно-исследовательского института черной металлургии, вып. 15, М., 1956, стр. 131.

Поступила в редакцию
3/VIII 1959 г.

М. А. БЫКОВ
ВНИИК

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЕРКИ ОБРАЗЦОВЫХ МЕР ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ С БОЛЬШИМИ НОМИНАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ

Статья посвящена разработке установки для поверки мер индуктивности и емкости с большими номинальными значениями (до 1000 гн и до 10 000 мкф), необходимых при комплектной поверке мостов переменного тока, предназначенных для измерения большой индуктивности и большой емкости.

В связи с разработкой образцовых мер большой индуктивности (до 1000 гн)* и большой емкости (до 10 000 мкф) [1] возникла потребность в измерительной установке для их поверки. Поскольку поверка образцовых конденсаторов с емкостью до 1 мкф и катушек с индуктивностью до 1 гн обеспечивается измерительными установками промышленного изготовления (например, установками типа УМПТ-2, изготавливаемыми заводом «Эталон»), нижние пределы измерения новой измерительной установки должны быть равны соответственно 1 мкф и 1 гн. Поверка указанных выше образцовых мер должна производиться при частотах 50 и 100 гц, при которых применяются мосты для измерения большой индуктивности (до 1000 гн) и большой емкости (до 10 000 мкф). Наряду с определением действительных значений емкости и индуктивности в установке должны осуществляться и измерения соответственно угла потерь и коэффициента добротности.

Образцовые меры большой емкости 1000—10 000 мкф выполнены из электролитических конденсаторов и при применении их для поверки мостов переменного тока может возникнуть необходимость приложения к ним поляризующих напряжений, при действии которых несколько изменяются значения емкости и угла потерь. Поэтому в установке должна быть предусмотрена возможность поверки этих мер емкости в условиях подачи на них поляризующих постоянных напряжений (до 10—15 в) с регулировкой и контролем значений этих напряжений.

Аналогично этому, измерения индуктивности и коэффициента добротности образцовых катушек индуктивности, намотанных на пермаллоевые сердечники с воздушными зазорами, должны производиться при различных значениях переменного напряжения, приложенного к поверяемой

* См. статью настоящего сборника, стр. 76.

мере индуктивности. В ряде случаев бывает необходимо пропускать по ее обмотке дополнительный постоянный ток подмагничивания.

Исходя из норм точности для подавляющего большинства как отечественных, так и зарубежных мостов, служащих для измерения больших индуктивностей и больших емкостей, можно установить примерно следующие требования к рассматриваемой установке в отношении допускаемой погрешности измерения:

а) погрешность измерения емкости и индуктивности не должна превышать $\pm 0,1 \div 0,2\%$;

б) погрешность измерения угла потерь не должна превышать $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ рад при значениях емкости до 1000 мкф и $\pm 3 \cdot 10^{-3}$ рад — при значениях емкости свыше 1000 мкф, поскольку в последнем случае практически всегда идет речь об измерениях угла потерь электролитических конденсаторов, имеющего значение не менее $0,03 - 0,05$ рад;

в) погрешность измерения коэффициента добротности не должна превышать $\pm 2 \div 3\%$.

Выбор принципиальной схемы для измерительной установки

Измерительная установка должна состоять из двух измерительных мостов: для измерения емкости и для измерения индуктивности.

При выборе принципиальных схем мостов следует рассмотреть, во избежание чрезмерных усложнений при пользовании ими, прежде всего частотонезависимые схемы, т. е. схемы, состояние равновесия которых не зависит (хотя бы в первом приближении) от частоты.

Затем эти мосты должны давать возможность подачи на поверяемый конденсатор поляризующего постоянного напряжения и пропускания по обмотке поверяемой меры индуктивности подмагничивающего постоянного тока. В обоих случаях поляризующее напряжение и подмагничивающий ток не должны оказывать какого-либо вредного влияния на источник питания моста, на его нулевой индикатор или на какой-либо другой его элемент.

Параметры этих мостов по возможности должны воспроизводиться с помощью аппаратуры, выпускаемой нашей промышленностью, преимущественно заводом «Эталон».

Весьма желательно, чтобы оба эти моста собирались в основном из одной и той же аппаратуры, пересоединяемой с помощью соответствующих коммутационных средств то по одной из схем, то по другой.

Исходя из этих общих соображений была выбрана схема Максвелла — Вина (рис. 1) с одним небольшим, но существенным дополнением для измерения индуктивности и коэффициента добротности, и схема Сотти — Вина (рис. 2) — для измерения емкости и угла потерь.

Схема, изображенная на рис. 1, отличается от классической схемы моста Максвелла — Вина только наличием конденсатора C_{16x} , включенного последовательно с сопротивлением R_1 . При введении источника тока подмагничивания в нулевую диагональ моста, как это будет показано ниже, и измерении этого тока в этой же диагонали, включение в схему конденсатора C_{16x} необходимо для предотвращения ответвления части этого тока в сопротивление R_1 и R_2 . Введение конденсатора C_{16x} в схему равносильно шунтированию сопротивления R_1 (а следовательно, — и конденсатора C_1) некоторым конденсатором C_{16x} . Нетрудно показать, что если коэффициент добротности поверяемой меры индуктивности равен Q , а емкость блокировочного конденсатора C_{16x} взята в n раз больше C_1 , то

$$C_{16x} \approx C_1 \frac{1}{nQ^2} \quad (1)$$

или в относительных единицах

$$\frac{C'_{16a}}{C_1} \approx \frac{1}{nQ^2} \quad (1')$$

Если выбрать $n = 30$ и принять $Q_{\min} > 12$, то

$$\frac{C'_{16a}}{C_1} \leq \frac{1}{30 \cdot 150} = \frac{1}{4500} \leq 2,2 \cdot 10^{-4},$$

т. е. погрешность, вызываемая включением C_{16a} , не превысит 0,02%.

Что касается второго блокировочного конденсатора C_{26a} , то он в измерительную схему моста не входит. Основным соображением при выборе его значения является получение достаточно малой (не более

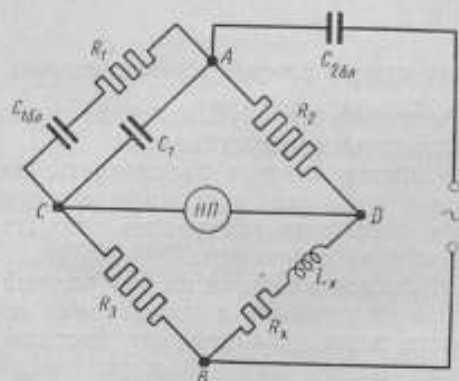


Рис. 1. Мост по схеме Максвелла—Вина с дополнительно введенными блокировочными конденсаторами C_{16a} и C_{26a} .

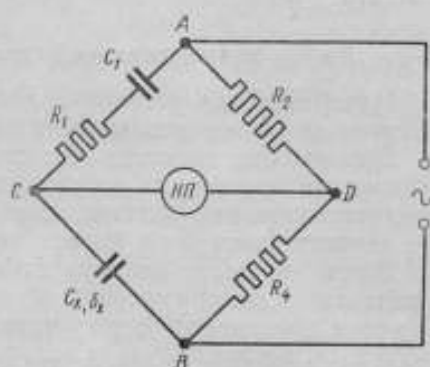


Рис. 2. Мост по схеме Сотти—Вина.

нескольких процентов) разности между напряжением на узловых точках AB питания моста и напряжением на зажимах генератора. В нашем случае для этого достаточно иметь $C_{26a} = 30$ мкф.

Выбор регулируемых элементов моста и числовых значений параметров плеч моста

Возвращаясь к рассмотрению основных явлений в выбранных схемах измерительных мостов, необходимо остановиться вначале на выборе регулируемых элементов в этих схемах.

С точки зрения получения наилучшей сходимости процесса уравновешивания [2] оптимальным в обеих схемах является выбор в качестве регулируемых элементов плеч R_1 и C_1 , что дает идеальную сходимость для этих схем. Однако в измерительной установке, предназначенной специально для проверки образцовых мер большой емкости и большой индуктивности, вопрос сходимости существенной роли не будет играть, так как угол потерь таких мер емкости не превосходит $0,05 - 0,06$, и коэффициент добротности мер индуктивности не бывает ниже $12 - 13$, а в этих условиях достаточно хорошая сходимость получается и при ином выборе регулируемых элементов моста.

Можно было бы подойти к выбору регулируемых параметров, поставив целью получение независимых, а может быть и прямых отсчетов по

L_x и Q_x в одном случае и по C_x и $\text{tg } \delta_x$ в другом. Для моста Максвелла — Вина мы имеем условия равновесия

$$L_x = C_1 R_2 R_3, \quad (2)$$

$$Q_x = \omega C_1 R_1. \quad (3)$$

Для моста Сотти — Вина аналогично

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_4}, \quad (4)$$

$$\text{tg } \delta_x = \omega C_1 R_1. \quad (5)$$

Если бы в первом случае сделать $C_1 = \text{const}$ и $R_3 = \text{const}$ (при $\omega = \text{const}$), а R_2 и R_1 — переменными, то L_x было бы пропорционально R_2 , а Q_x пропорционально R_1 . Аналогично этому во втором случае при $R_4 = \text{const}$, $C_1 = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$, C_x было бы пропорционально R_2 , а $\text{tg } \delta_x$ — пропорционален R_1 .

Однако этот вопрос нельзя решать изолированно от выбора числовых значений параметров плеч моста. Так, например, из только что приведенных соображений как будто вытекает, что в каждой из схем целесообразно сделать регулируемым элементом плечо R_2 (помимо плеча R_1 в обоих случаях). Из расчета же числовых значений параметров моста, приводимого ниже, вытекает, что при значении $C_1 = 1$ мкф (это практически предельно большое значение для хорошего образцового конденсатора) на верхних краях диапазонов измерения в обоих мостах необходимое значение R_2 возросло бы до $1 \cdot 10^6$ ом.

Выполнение сопротивления R_2 переменным, в пределах по крайней мере $1:10$ (от $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$ ом), неизбежно было бы сопряжено с изменениями постоянной времени в пределах $1,5 \div 2,5 \cdot 10^{-6}$ сек, наличие же постоянной емкости монтажа этого плеча и соседних с ним плеч порядка хотя бы 20 пф увеличило бы эти изменения примерно в два раза. Это привело бы при частоте 100 гц к изменениям фазовой погрешности в этом плече до $2-3 \cdot 10^{-3}$, в зависимости от значения R_2 . Насколько легко вводить на том или ином поддиапазоне измерений ту или иную постоянную поправку к значениям угла потерь, настолько сложно и неудобно вводить различные поправки к каждому отдельному показанию моста. Это, очевидно, фактически аннулировало бы преимущество получения прямого отсчета угла потерь, тем более, что в отдельных случаях поправки превысили бы отсчитанные значения.

Наоборот, если переменным элементом вместо плеча R_2 сделать плечо C_1 и осуществить его в виде высококачественного рычажного трехдекадного магазина емкости с декадами « $\times 0,1$ мкф», « $\times 0,01$ мкф», « $\times 0,001$ мкф» и со встроенным в него конденсатором переменной емкости на 1000 пф (например, магазин емкости типа МЕ-4 завода «Эталон», класс 0,1), то оно обеспечит удобную регулировку и достаточно высокую точность, причем фазовая погрешность его будет, во-первых, мала ($\ll 1 \cdot 10^{-3}$) и, во-вторых, постоянна при изменениях емкости в пределах $1 \div 0,1$ мкф.

При этом прямой отсчет значений индуктивности или соответственно емкости сохраняется, хотя значения Q_x или $\text{tg } \delta_x$ уже нельзя будет отсчитывать непосредственно.

Выбор параметров плеч моста может быть сделан, исходя из основных соотношений (2) и (3), определяющих условия равновесия моста.

Не останавливаясь на выборе параметров моста для всего диапазона измерений индуктивности, можно в качестве примера привести их значе-

ния лишь для крайних пределов — для случаев проверки катушек индуктивности с номинальными значениями 1 и 1000 гн .

При значении 1000 гн , согласно выражению (2),

$$C_1 R_2 R_3 = 10^9.$$

Поскольку сопротивления R_2 и R_3 не должны превышать 10^5 ом во избежание слишком больших отрицательных значений постоянной времени, и так как точных измерительных конденсаторов с емкостью более 1 мкф практически не имеется, и, кроме того, сопротивление R_3 входит в цепь тока подмагничивания, что также требует уменьшения этого сопротивления, то при поверяемой мере 1000 гн наиболее удобными значениями являются:

$$C_1 = 1 \text{ мкф}, \quad R_2 = 10^5 \text{ ом}, \quad R_3 = 10^4 \text{ ом}.$$

Аналогично при значениях $L_x = 1 \text{ гн}$ (нижний предел нижнего поддиапазона измерений) и $C_1 = 0,1 \text{ мкф}$, учитывая, что R_2 не должно превышать $1 \cdot 10^4$ ом (так как, например, при $R_2 = 1 \cdot 10^5$ ом напряжение на зажимах поверяемой меры индуктивности не превышало бы 0,3% от напряжения питания моста при частоте 50 гц), получаем $R_2 = 10^4$ ом , $R_3 = 10^3$ ом .

Исходя из аналогичных соображений, были выбраны числовые значения параметров и моста по схеме рис. 2 для измерения емкости.

В таблице приведены номинальные значения C_1 , R_2 , R_3 и R_4 для всех видов и поддиапазонов измерения.

Измеряемая величина	Поддиапазон измерения	C_1 , мкф	R_2 , ом	R_3 , ом	R_4 , ом
L_x	1—10 гн	0,1—1	10^4	10^5	—
	10—100 "	0,1—1	10^5	10^3	—
	100—1000 "	0,1—1	10^5	10^4	—
C_x	1—10 мкф	0,1—1	10^4	—	10^3
	10—100 "	0,1—1	10^4	—	10^2
	100—1 000 "	0,1—1	10^4	—	10
	1 000—10 000 "	0,1—1	10^5	—	10

Что касается сопротивления R_4 , то в случае измерения индуктивности его значения определяются из выражения (3)

$$R_4 = \frac{Q_x}{\omega C_1}.$$

Поскольку с увеличением частоты от 50 до 100 гц коэффициент добротности меры индуктивности с пермалловым сердечником увеличивается несколько менее чем вдвое (из-за увеличения потерь в сердечнике), то отношение $\frac{Q_x}{\omega}$ будет иметь большее значение при 50 гц ; при этом Q_x не превосходит 30 и соответственно

$$R_{4\text{max}} = \frac{30}{300 \cdot 1 \cdot 10^{-7}} = 1 \cdot 10^6 \text{ ом}.$$

Минимальное значение $R_{1 \min}$ будет иметь место при минимальном Q_x (около 12), частоте 100 гц и $C_1 = 1_{\text{мкф}}$:

$$R_{1 \min} = \frac{12}{600 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 20 \cdot 10^3 \text{ ом.}$$

Если активная составляющая поверяемой меры индуктивности составляет около 10% от ее реактивного сопротивления ($Q \approx 10$), а индуктивность этой меры надо определять с точностью, характеризуемой погрешностью 0,1%, то, следовательно, неуравновешенность моста по активной составляющей должна быть не более 1%, а еще лучше — не более 0,2–0,3% [3], поэтому ступени регулирования R_1 при значениях, близких к $R_{1 \min}$, должны быть не более 5 ом.

При измерении емкости значение сопротивления R_1 определяется по формуле

$$R_1 = \frac{\text{tg } \delta_x}{\omega C_1}.$$

Изменение тангенса угла потерь конденсатора в полосе частот 50–100 гц незначительно, поэтому максимальное значение R_1 в этом случае будет иметь место при максимальном значении $\text{tg } \delta_x$ (при измерениях емкости и угла потерь мер емкости, составленных из электролитических конденсаторов, т. е. около 0,06–0,08) и при наименьших значениях частоты и емкости C_1 :

$$R_{1 \max} = \frac{0,08}{300 \cdot 1 \cdot 10^{-7}} \leq 3 \cdot 10^3 \text{ ом.}$$

Минимальное значение $R_{1 \min}$ сопротивления R_1 может оказаться сколь угодно близким к нулю, но из-за необходимой ступенчатости регулирования фазовой составляющей (около $1 \cdot 10^{-3}$ рад или лучше $3 \cdot 10^{-4}$ рад) при максимальном значении частоты и емкости C_1 должно быть выполнено следующее требование:

$$\Delta_{\min} R_1 = \frac{\Delta_{\min} \text{tg } \delta_x}{\omega_{\max} C_{1 \max}} = \frac{(1 \div 0,3) \cdot 10^{-3}}{600 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} \approx 1,7 \div 0,5 \text{ ом.}$$

Таким образом, для осуществления сопротивления R_1 в обеих схемах можно применить один и тот же шестидекадный магазин сопротивления невысокой точности (порядка 1%) с декадами от « $\times 1$ ом» до « $\times 10^5$ ом». В схеме для измерения индуктивности будут применяться главным образом одна-две декады наивысших значений (последующие декады будут служить лишь для тонкого регулирования); во втором случае — измерения емкости — будут использоваться две-три декады наивысших значений.

Выбор источника питания и нулевого прибора; чувствительность установки

В условиях применения разработанных нами образцовых мер большой индуктивности и образцовых мер большой емкости для проверок мостов переменного тока к зажимам мер большой индуктивности приложены переменные напряжения от нескольких вольт до сотен вольт, а к зажимам мер большой емкости — от долей вольта до нескольких десятков вольт. В связи с этим напряжение питания моста должно составлять от 10–15 до 100–150 в, и кажущаяся мощность, потребляемая мостом, может достигать до 5–6 вв. Учитывая эти данные, в качестве генератора, удобного для питания установки, можно выбрать генератор типа ЗГ-12.

В качестве нулевого прибора было решено применить вибрационный гальванометр типа М-501 завода «Точэлектроприбор». Произведенные расчеты показали, что в зависимости от рода и значения измеряемой величины при изменении значения емкости или индуктивности на 0,1%, или изменении значения $\operatorname{tg} \delta$ на $1 \cdot 10^{-3}$, или при соответствующем изменении Q отклонение гальванометра составит от 2—3 до 10 делений, за исключением измерения самых больших емкостей, когда это отклонение будет равно примерно 1 делению. Такую чувствительность можно признать удовлетворительной, учитывая большой размер деления шкалы гальванометра типа М-501 (около 2 мм) и хорошее качество его оптики, что позволяет легко различать отклонения гальванометра на небольшую долю деления его шкалы.

Введение в измерительные мостовые схемы установки постоянного тока подмагничивания и поляризующего постоянного напряжения

В схему рис. 1 введен источник тока подмагничивания, а в схему рис. 2 — источник поляризующего напряжения.

На рис. 3 показано дополнение к схеме моста Максвелла — Вина для подмагничивания поверяемой меры большой индуктивности (L_x).

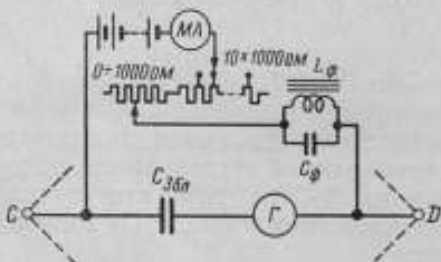


Рис. 3. Дополнение к схеме моста Максвелла — Вина для подмагничивания поверяемой меры индуктивности.

Выше уже был рассмотрен способ предотвращения разветвления тока подмагничивания. Рассмотрим некоторые другие связанные с этим вопросы.

Защита нулевого прибора от тока подмагничивания осуществляется включением последовательно с нулевым прибором блокировочного конденсатора $C_{90\mu}$ и созданием обходного пути для тока подмагничивания путем шунтирования этого конденсатора и нулевого прибора, взятых вместе. Сохранение чувствительности, с одной стороны, достигается

выбором блокировочного конденсатора достаточно большой емкости, чтобы его реактивное сопротивление было мало по сравнению с полным сопротивлением моста со стороны гальванометра и самого гальванометра. Минимальное значение этого сопротивления (при измерениях наибольших значений емкости) составляет около 100 ом. Соответственно этому значение емкости конденсатора $C_{90\mu}$ выбрано равным 60 мкф (реактивное сопротивление около 50 ом при 50 гц и около 25 ом при 100 гц). С другой стороны, для сохранения чувствительности необходимо, чтобы сопротивление шунта переменному току было во много раз выше сопротивления шунтируемого им участка — нулевого прибора с включенным последовательно блокировочным конденсатором $C_{90\mu}$; в то же время для постоянного тока это сопротивление должно быть невелико, по крайней мере, по сравнению с сопротивлением остальной части цепи тока подмагничивания. Минимальное значение этого сопротивления составляет около 1000 ом, и поэтому сопротивление рассматриваемого шунта постоянному току желательно иметь не более 100 ом.

Очевидно, эта задача может быть решена только с помощью фильтра, состоящего из включенных параллельно друг другу катушки индуктивности L_ϕ и конденсатора C_ϕ . Выбор значений L_ϕ и C_ϕ можно

сделать, исходя из следующих соображений. Если для фильтра взята катушка индуктивности с коэффициентом добротности Q_ϕ , то в условиях резонанса сопротивление цепи фильтра переменному току будет равно эквивалентному параллельному сопротивлению потерь этой катушки (если пренебречь потерями в конденсаторе), которое равно $Q_\phi \cdot \omega L_\phi$; сопротивление же фильтра постоянному току равно примерно эквивалентному последовательному сопротивлению потерь этой же катушки $\frac{\omega L_\phi}{Q_\phi}$. Для наших условий это выражается в виде следующих требований:

$$Q_\phi \omega L_\phi \geq 500 \div 1000 \text{ ом}^*; \quad (6)$$

$$\frac{\omega L_\phi}{Q_\phi} \leq 100 \text{ ом}. \quad (7)$$

Кроме того, из основного условия резонанса получаем

$$L_\phi C_\phi = \frac{1}{\omega^2}. \quad (8)$$

Полагая, что $Q_\phi \approx 12$ при $f = 50$ гц и $Q_\phi \approx 20$ при $f = 100$ гц, а также что при обеих частотах применяется одна и та же катушка индуктивности с одним и тем же значением индуктивности L_ϕ , получаем:

а) для частоты $f = 50$ гц: из неравенства (6) $L_\phi \geq 0,14 \div 0,28$ гн, из неравенства (7) $L_\phi \leq 4$ гн;

б) для частоты $f = 100$ гц: из неравенства (6) $L_\phi \geq 0,04 \div 0,08$ гн, из неравенства (7) $L_\phi \leq 3,3$ гн.

Отсюда видно, что имеются довольно широкие возможности для выбора значения L_ϕ , оно может лежать в пределах $0,15 \div 3$ гн. Легче, конечно, построить катушку с меньшим значением индуктивности, но это потребует применения конденсаторов с большими значениями емкости. По этим и некоторым другим чисто практическим соображениям было выбрано значение $L_\phi = 0,25$ гн, тогда необходимые значения C_ϕ , согласно (8), равны: а) $C_\phi \approx 40$ мкф для частоты 50 гц; б) $C_\phi \approx 10$ мкф для частоты 100 гц, что без большого труда может быть осуществлено, например, с помощью металло-бумажных конденсаторов. При этом за счет применения такого шунта чувствительность будет снижена не более чем на 10—12%, последовательное же сопротивление фильтра постоянному току не превысит 6—7 ом.

Применяя в качестве источника тока сухую батарею напряжением до 30 в (существенно большая батарея была бы чрезмерно громоздка), при измерении индуктивности от 1 до 20—30 гн можно значение тока подмагничивания довести примерно до 30 ма. Основным сопротивлением, ограничивающим силу этого тока, является сопротивление плеча R_3 , равное 1000 ом. При измерении индуктивности образцовых мер от 20—30 до 100 гн, когда их сопротивление потерь достигает 1000 ом и несколько более, значение наибольшего тока подмагничивания снижается до 15—12 ма. Для мер со значениями индуктивности $100 \div 1000$ гн, когда сопротивление плеча R_3 возрастает до 10 000 ом, наибольшее достижимое значение тока подмагничивания снижается до 3—2 ма. В случае необходимости эти значения можно несколько увеличить (в $1\frac{1}{2}$ —2 раза), но тогда мощность, рассеиваемая в плече R_3 , в отдельных случаях может увеличиться до 3—4 вт.

* Внутреннее сопротивление переменному току примененного гальванометра типа М-501 равно $70 \div 100$ ом.

При разработке схемы введения поляризующего напряжения задача решалась так же, как и в предыдущем случае, за исключением того, что здесь должна быть обеспечена плавная регулировка поляризующего напряжения; ступенчатая регулировка этого напряжения недопустима, так как при любом скачкообразном изменении поляризующего напряжения значение емкости образцовой меры, выполненной из электролитических конденсаторов, претерпевает значительные изменения, затухающие в течение лишь значительного промежутка времени (измеряемого иногда многими часами). С другой стороны, требуемое максимальное значение поляризующего напряжения не превышает 15—16 в, т. е. составляет примерно только 50% напряжения батареи, соответственно чему и были выбраны схема регулирования этого напряжения (рис. 4) и параметры ее элементов.

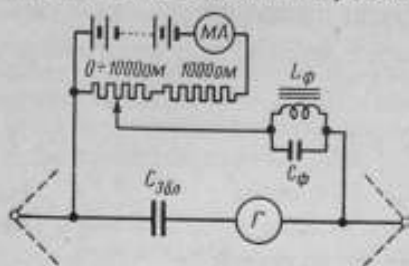


Рис. 4. Дополнение к схеме моста Соти—Вина для поляризации измеряемой меры емкости.

Снижение чувствительности установки за счет введения схемы поляризации в общем столь же невелико, как и при введении токов подмагничивания. Правда, при измерении самых больших емкостей (1000—10 000 мкф) чувствительность при частоте 50 гц снизится еще на 30—40% за счет реактивного сопротивления конденсатора $C_{збо}$, но останется еще вполне достаточной.

Борьба с помехами, экранирование

Основными помехами при тех измерениях, для которых предназначается установка [4], могут быть: при измерении больших индуктивностей — влияние шунтирующей паразитной емкости, при измерении больших емкостей — влияние паразитных индуктивностей и активных сопротивлений.

Если индуктивность L шунтирована некоторой паразитной емкостью $C_{пар}$ (рис. 5), то ее действительное значение зависит от частоты, а именно

$$L_f = L_0 (1 + \omega^2 L_0 C_{пар}), \quad (9)$$

где L_f — значение индуктивности при частоте, равной f ;
 L_0 — значение индуктивности данной катушки при частоте, близкой к нулю;

$\omega = 2\pi f$ — круговая частота.

Например, при $L_0 = 1000$ зм, $C_{пар} = 5$ пф и $f = 100$ гц относительное изменение индуктивности благодаря появлению указанной паразитной емкости было бы равно

$$\Delta L = \omega^2 L_0 C_{пар} \approx 2 \cdot 10^{-3} = 0,2\%.$$

При этом паразитная емкость, обусловленная конструкцией меры индуктивности, будет вносить одинаковое искажение при поверке меры и при последующем ее применении, если частота будет одна и та же, и, следовательно, не исказит результатов измерений с помощью этой меры.

Наоборот, весьма существенным может оказаться влияние паразитной емкости монтажа измерительной установки, которая шунтирует меру

при поверке, но перестает шунтировать ее при использовании в качестве образцовой меры для поверки моста. Такая паразитная емкость в измерительной установке может образоваться между проводниками, присоединенными к узловой точке D (рис. 1), и проводниками, присоединенными к узловой точке B .

Для уменьшения этого влияния нужно предельно снизить емкостную связь между точками D и B и идущими к ним проводниками; допустимая остаточная связь, вызывающая погрешность не более 0,1%, не превышает 1,5—2 пф. Практически достигнуть этого можно только применением экранирования. Экраны должны охватывать проводники, связанные с точкой D , или проводники, связанные с точкой B , в местах их близкого взаимного расположения.

Экраны должны быть соединены с такой точкой цепи, чтобы емкость относительно этой цепи проводников экранируемой группы и проводников другой группы не отражалась вредно на правильности показаний установки при измерении как индуктивности, так и коэффициента добротности. Наиболее удобным оказалось экранирование проводников, связанных с точкой B , с присоединением экранов к точке A , как это показано на рис. 6. При этом емкость этих экранов

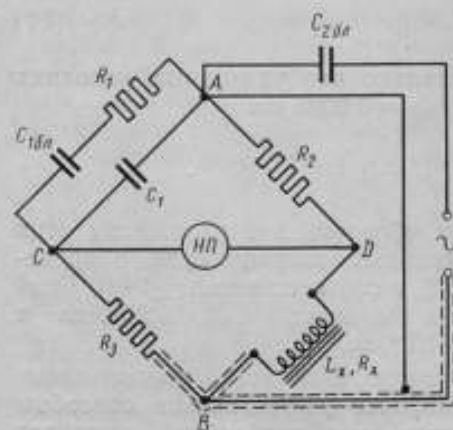


Рис. 6. Схема экранирования в установке для снижения паразитной емкости, шунтирующей поверяемую меру индуктивности L_x, R_x .

относительно экранируемых ими проводников (которая может быть весьма значительной, достигая многих сотен пикофард и даже более) оказывается расположенной в измерительном мосте в его диагонали питания и, следовательно, независимо от ее значения, никакого влияния на условия равновесия моста не имеет. Емкость этих экранов относительно проводников другой группы (связанных с точкой D) шунтирует плечо R_2 моста. Эта емкость оказывает некоторое влияние на условия равновесия моста, она изменяет фазовую погрешность плеча R_2 , однако если эта емкость не превысит 20 пф, то при наибольшем значении $R_2 = 10^5$ ом она вызовет изменение фазовой погрешности плеча R_2 (при частоте 100 гц) примерно только на $1 \cdot 10^{-3}$ рад, что может еще считаться допустимым.

Указанное экранирование можно было бы распространить и на проводники, с помощью которых меры индуктивности присоединяются к установке. Однако это было бы неправильным, так как при применении мер в качестве образцовых при поверке мостов осуществить это экранирование надлежащим образом чаще всего невозможно, и в этих случаях меры индуктивности были бы шунтированы дополнительными емкостями соединительных проводников и, следовательно, имели бы иные значения индуктивности, чем при поверке. Поэтому никакого экранирования соединительных проводников не было предусмотрено, но были специально изготовлены соединительные проводники, применяе-

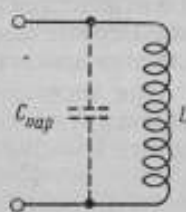


Рис. 5. Схема индуктивности L , шунтируемой паразитной емкостью $C_{\text{пар}}$.

мые как при поверке мер большой индуктивности в установке, так и при применении этих мер в качестве образцовых при поверке мостов.

При поверке и применении мер большой емкости могут возникнуть дополнительные погрешности за счет последовательных паразитных индуктивностей и последовательных паразитных активных сопротивлений. Первые из них вызывают частотные изменения результирующего значения емкости, вторые — изменения угла потерь.

При наличии последовательной паразитной индуктивности $L_{\text{пар}}$ результирующее значение емкости конденсатора C_f при круговой частоте $\omega = 2\pi f$ будет равно

$$C_f = C_0 (1 + \omega^2 C_0 L_{\text{пар}}), \quad (10)$$

где C_0 — емкость конденсатора без влияния паразитной индуктивности.

При поверке или применении меры емкости $C_0 = 10\,000$ мкф, при частоте $f = 100$ гц и паразитной индуктивности $L_{\text{пар}} = 0,5$ мкгн относительное изменение емкости будет равно

$$\omega^2 C_0 L_{\text{пар}} \approx 2 \cdot 10^{-3} = 0,2\%.$$

Последовательное паразитное сопротивление $R_{\text{пар}}$ вызывает дополнительный угол потерь

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \omega C_0 R_{\text{пар}}. \quad (11)$$

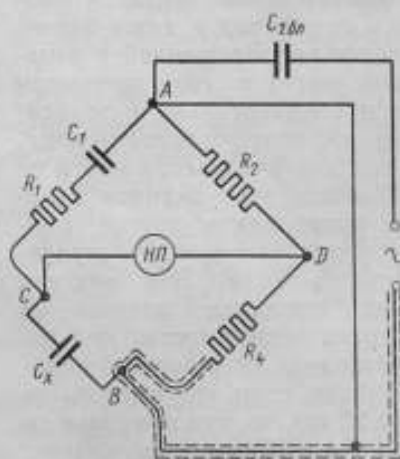


Рис. 7. Схема моста с узловыми точками C и B , перенесенными на зажимы для поверяемых мер большой емкости.

При только что указанных условиях и при $R_{\text{пар}} = 0,0005$ ом

$$\Delta \operatorname{tg} \delta \approx 3 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, для удержания этих дополнительных погрешностей в пределах $\pm 0,1\%$ и соответственно $\pm 1 \cdot 10^{-3}$ рад следовало бы иметь $L_{\text{пар}} < 0,25$ мкгн и $R_{\text{пар}} < 2 \cdot 10^{-4}$ ом.

В измерительной установке по схеме рис. 2 наиболее эффективным способом выполнения этих требований является перенесение узловых точек C и B на зажимы установки, предназначенные для включения поверяемых мер большой емкости, как это показано на рис. 7.

Аналогично мерам большой индуктивности здесь можно было бы распространить этот принцип дальше и перенести узловые точки установки B и C на зажимы самих мер большой емкости. Однако, как и в том случае, это было бы неправильно, так как при применении этих мер для проверок мостов переменного тока меры должны будут включаться в мосты с помощью тех или иных соединительных проводников, и они вызовут некоторые изменения параметров мер. Поэтому были изготовлены постоянные соединительные проводники для включения мер больших емкостей как в образцовую установку, так и в поверяемые по ним мосты. Эти проводники сделаны с возможно малой индуктивностью и сопротивлением, но главное требование — постоянство

этих параметров, их неизменность как при поверке меры, так и при включении ее в поверяемый мост.

Помимо сказанного выше, большое значение имеет экранирование нулевого прибора — вибрационного гальванометра типа М-501, главным образом вследствие наличия в этом гальванометре осветителя, питаемого от сети через понизительный трансформатор, также встроены в корпус гальванометра.

Измерительная цепь гальванометра имеет значительную емкость относительно его металлического корпуса (до 70—80 пф). Встроенный в гальванометр типа М-501 осветитель (6-вольтовая лампочка) в нормальной конструкции гальванометра одним своим полюсом соединен с корпусом гальванометра, а через междуобмоточные емкости питающего понизительного трансформатора имеет значительную емкостную связь с питающей сетью, с которой в не меньшей степени связана и выходная обмотка генератора, питающего установку.

Таким образом, если бы оставить гальванометр типа М-501 в его заводском исполнении, решающее значение имел бы способ включения в схему моста его корпуса, причем при любом способе паразитные емкости шунтировали бы те или иные плечи моста. Поэтому пришлось внести в конструкцию гальванометра типа М-501 некоторые изменения и применить схему включения, показанную на рис. 8.

Осветитель гальванометра был изолирован от его корпуса и емкость между ним и корпусом была уменьшена до 10—15 пф. Осветительный трансформатор был вынесен из корпуса гальванометра и изолирован от него. Корпус гальванометра присоединен к узловой точке С, а один полюс 6-вольтовой обмотки осветительного трансформатора — к узловой точке А моста.

В результате таких включений емкость между измерительной обмоткой гальванометра и его корпусом перестала влиять на условия равновесия моста; также перестали влиять емкостные связи с сетью питания осветительного трансформатора через его междуобмоточные емкости; связи с сетью питания через генератор, питающий мост, действуют лишь в диагонали питания моста. Единственная паразитная емкостная связь, которая остается действующей в мосте, — это емкость между корпусом гальванометра и его осветителем, равная, как указывалось выше, около 10—15 пф; эта емкость оказывается шунтирующей первое плечо моста, в основном — емкость C_1 . Однако, если учесть, что емкость C_1 никогда не бывает менее 0,1 мкф и что шунтирующая паразитная емкость стабильна до долей пикофарда, то легко убедиться в ее практической безвредности.

Магазин сопротивления R_1 , магазин емкости C_1 и размещенные в одном блоке сопротивления R_2 , R_3 и R_4 экранированы; при этом экраны магазинов R_1 и C_1 соединены с точкой А, так как это создает наибольшую устойчивость работы установки и практически полную независимость равновесия моста от прикосновений наблюдателя к панелям и рукояткам этих магазинов.

Для снижения постоянной времени плеча R_2 (при значении его сопротивления 100 000 ом) оно выполнено из четырех микропроволочных

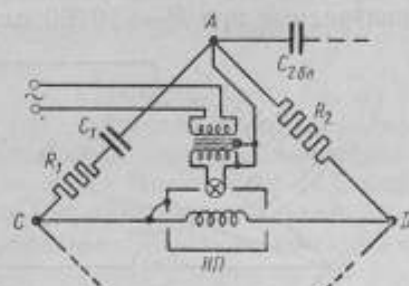


Рис. 8. Схема включения элементов гальванометра и способ их экранирования.

сопротивлений по 100 000 ом, соединенных последовательно-параллельно. Применение четырех сопротивлений было вызвано необходимостью повысить нагрузочную способность этого плеча.

Несмотря на очень небольшую и даже положительную постоянную времени этих сопротивлений, все плечо R_2 (при значении его сопротивления 100 000 ом) обладало большой отрицательной постоянной времени в результате шунтирования емкостью соединительных проводников.

Забегая несколько вперед, можно сказать, что во время исследования установки измерения Q или соответственно $\text{tg } \delta$ меры индуктивности (или емкости) в условиях, когда $R_2 = 100\,000$ ом, вначале давали расхождения с результатами, получаемыми для этих же самых мер при значении $R_2 = 10\,000$ ом (изменение $\text{tg } \delta$ достигало нескольких тысячных). При этом было установлено, что правильными были результаты, получаемые при $R_2 = 10\,000$ ом.

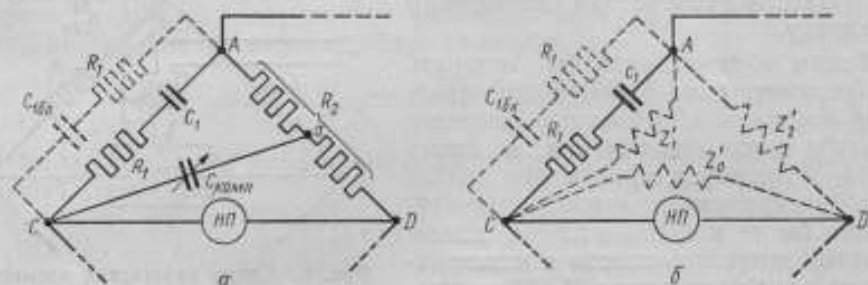


Рис. 9. Компенсация отрицательной постоянной времени плеча R_2 введенной компенсирующей емкостью $C_{\text{комп}}$.

Для компенсации этого эффекта, существенное снижение которого представляло технические трудности, в это плечо была искусственно введена положительная фазовая составляющая по способу, показанному на рис. 9.

Средняя точка a плеча R_2 соединялась с нулевой точкой C моста через регулируемую емкость $C_{\text{комп}}$, как это показано на рис. 9, а. «Звезду» полных сопротивлений, образованную таким образом между точками A, D, C и точкой a как средней точкой этой «звезды», можно заменить эквивалентным ей «треугольником» полных сопротивлений $Z_2 - Z_1$ и Z_0 , что видно на рис. 9, б. Значения сопротивлений Z_2, Z_1 и Z_0 «треугольника» находятся в следующих соотношениях с реальными сопротивлениями «звезды»:

$$Z_1 = Z_0 = \frac{1}{2} R_2 - j \frac{2}{\omega C_{\text{комп}}} \quad (12)$$

и

$$Z_2 = R_2 + j \frac{1}{4} R_2^2 \omega C_{\text{комп}}. \quad (13)$$

Из выражения (12) видно, что полные сопротивления Z_1 и Z_0 можно себе представить как конденсаторы с емкостью $\frac{1}{2} C_{\text{комп}}$, находящиеся каждый в последовательном соединении с сопротивлением, равным $\frac{1}{2} R_2$, или как конденсаторы с емкостью $\frac{1}{2} C_{\text{комп}}$ и с углом потерь

$$\text{tg } \delta_{\text{комп}} = \frac{1}{4} R_2 \omega C_{\text{комп}}. \quad (14)$$

При наладке установки были введены $C_{\text{комп}} \approx 250 \text{ нф}$, $\frac{1}{2} C_{\text{комп}} \approx 125 \text{ нф}$ и при $f = 100 \text{ гц}$, $\lg \delta_{\text{комп}} \approx 1,9 \cdot 10^{-3}$.

Из выражения (13) видно, что полное сопротивление Z_2 представляет собой в основном активное сопротивление R_2 с положительной постоянной времени

$$\tau_2^* = + \frac{1}{4} R_2 C_{\text{комп}}. \quad (15)$$

При указанных значениях параметров

$$\tau_2^* \approx 6 \cdot 10^{-7} \text{ сек},$$

что при частоте $f = 100 \text{ гц}$ дает фазовый угол $\varphi_2^* \approx 3,6 \cdot 10^{-3}$.

Этим и достигается компенсация отрицательной постоянной времени плеча R_2 в целом.

Что касается сопротивления Z_0 , шунтирующего гальванометр, то на условия равновесия моста оно не влияет.

Влияние полного сопротивления Z_1 , шунтирующего плечо C_1 , R_1 и представляющего собой емкость порядка 100 нф с углом потерь порядка $2 \cdot 10^{-3}$, хотя и не равно нулю, но не представляет серьезного осложнения: емкость C_1 , как уже отмечалось, никогда не бывает менее $0,1 \text{ мкф}$ ($100\,000 \text{ нф}$), так что влияние Z_1 только в крайнем случае может достигнуть значения $\sim 0,1\%$, угол же потерь в первом плече может измениться не более чем на $2 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$.

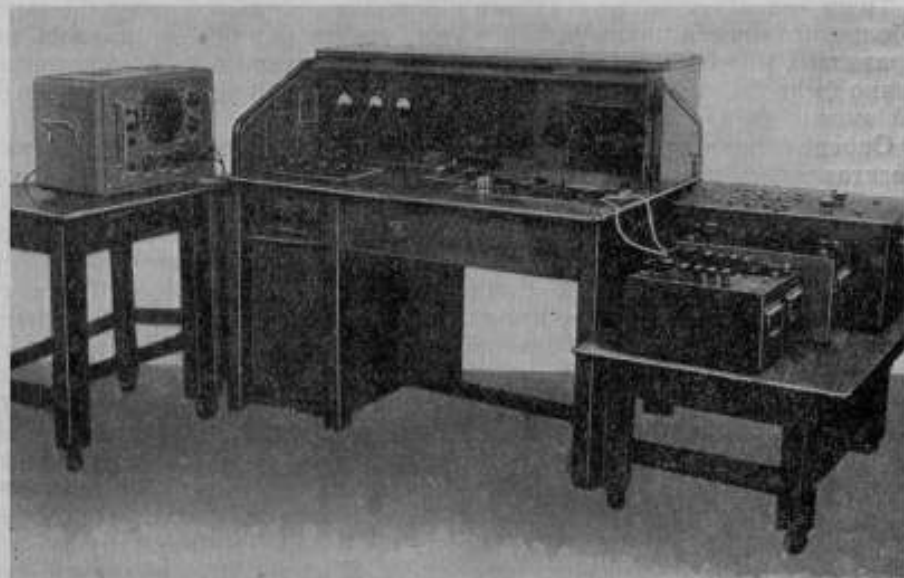


Рис. 10. Общий вид измерительной установки типа УБИЕ-1.

Конструктивное оформление установки

Конструктивное оформление установки было разработано А. М. Бродским и Э. Э. Лудэ (КБ ВНИИМ). Установка выполнена в обычном для завода «Эталон» виде (рис. 10) — стол-бюро, в котором размещены все элементы измерительной схемы, а также все вспомогательные устройства,

кроме питающего генератора (типа ЗГ-12), который расположен на отдельном столике, слева от установки.

Меры большой емкости в виде магазина емкости типа МЕ-9 и большой индуктивности в виде трех однодекадных магазинов индуктивности расположены справа от установки на низком столике на колесах, вместе с которым их можно перемещать в пределах лаборатории для поверки по ним мостов переменного тока.

Переход от одного вида измерения к другому и от одного диапазона измерения к другому производится с помощью соответствующих переключателей. Предусмотрен переключатель для включения цепей тока подмагничивания или поляризирующего напряжения с одновременной коммутацией регулировочных и измерительных средств в этих цепях, при этом при переходе к измерениям индуктивности без подмагничивания конденсатор C_{16a} замыкается накоротко, что позволяет измерять катушки индуктивности со сколь угодно малым значением Q . С помощью отдельного переключателя производится переключения в шунтирующем фильтре к гальванометру (L_{ϕ} , C_{ϕ}) при переходе от частоты 50 гц к частоте 100 гц и обратно.

Для контроля напряжения питания моста (по переменному току) в установке предусмотрен многопредельный вольтметр, встроенный в мост. В установке помещена несложная пересчетная табличка для подсчета напряжения, приложенного к поверяемой мере индуктивности, в процентах от напряжения питания моста.

Аттестация установки и мер большой индуктивности и большой емкости

Трудность аттестации установки и новых мер большой индуктивности в большой емкости заключалась в том, что до сих пор не имелось ни образцовых мер большой емкости и большой индуктивности, по которым можно было бы аттестовать установку, ни изученной установки, на которой можно было бы аттестовать их.

Определение погрешности установки методом поэлементной поверки представлялось недостаточно надежным, хотя, как видно из всего предыдущего, при ее разработке и осуществлении были приняты все меры к тому, чтобы паразитные связи между отдельными элементами установки были сведены к минимуму и чтобы погрешности измерений на ней определялись исключительно погрешностями этих элементов. Поэтому было решено одновременно с изучением установки провести поверку мер большой индуктивности и большой емкости, используя для этого следующие два обстоятельства: а) декады как магазинов большой индуктивности, так и магазина большой емкости состоят из 10 отдельных мер, от 1 до 10 соответствующих единиц, причем 10 единиц данной декады номинально равны единице соседней высшей декады; б) наименьшие из предусмотренных в магазинах мер (1 мкф и 1 гн) могут быть сличены с имеющимися в лаборатории образцовыми мерами тех же номинальных значений.

Поверка была произведена по следующей схеме. В мост для измерения емкости был включен образцовый конденсатор в 1 мкф с известными значениями емкости и угла потерь. После уравнивания моста были определены абсолютные значения поправок к показанию конденсатора C_1 моста и к показанию моста по углу потерь. Эти поправки, в частности, оказались равными +450 нф и $-1,6 \cdot 10^{-3}$ рад. Поправки были выражены таким способом в связи с предположением, что основным источником погрешностей является неучитываемая балластная емкость монтажа в первом плече моста и фазовая погрешность плеча R_2 при значении 10 000 ом или, особенно, 100 000 ом. Выраженные так, эти

поправки могли сохранять свои значения на всех диапазонах для данного вида измерений (при данном виде схемы первого плеча).

Затем в мост был включен исследуемый магазин емкости (типа МЕ-9) и при показании «1 мкф» были определены действительные значения его емкости и угла потерь с применением только что полученных поправок. Этот магазин при том же его показании соединялся параллельно с образцовым конденсатором в 1 мкф и этим способом была создана образцовая мера емкости с номинальным значением 2 мкф. Мера включалась в мост и определялись его показания с введением в них найденных ранее поправок. Полученные результаты были сопоставлены с данными, подсчитанными для этой меры по параметрам составляющих ее конденсаторов. Расхождения не превысили $0,01 \div 0,02\%$ и $(0,1 \div 0,2) \cdot 10^{-3}$ рад. Далее была измерена емкость магазина типа МЕ-9 при его показании 2 мкф, затем к нему снова присоединялся образцовый конденсатор в 1 мкф и была образована составная образцовая мера в 3 мкф; емкость этой меры опять измерялась на установке, затем была измерена емкость магазина типа МЕ-9 при показании 3 мкф, и т. д. Каждый раз вводились одни и те же поправки к показаниям установки, определенные при исходном измерении, и контролировались получаемые при этом расхождения. Так производились измерения в пределах значений до 10 мкф. При проверке декады « $\times 10$ мкф» в качестве образцового конденсатора применялась первая декада исследуемого магазина типа МЕ-9 при ее наибольшем показании, при проверке декады « $\times 100$ мкф» — вторая декада.

При переходе к измерениям на последнем диапазоне 1000–10 000 мкф, когда впервые было включено во втором плече сопротивление R_2 , равное 100 000 ом, и при применении старой поправки по углу потерь появилось значительное расхождение в данных, получаемых по углу потерь; тогда и было предпринято введение конденсатора $C_{\text{комп}}$. Полная компенсация, однако, не была осуществлена, так как для этого пришлось бы ввести значение $C_{\text{комп}}$, которое заметно отразилось бы на поправке к показаниям магазина C_1 . Вместо этого для данного предела была определена несколько иная поправка по углу потерь, чем на предыдущих пределах. Она оказалась равной $-2,6 \cdot 10^{-3}$ рад, т. е. отличной от предыдущей поправки на небольшую величину $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ рад.

При введении указанных выше поправок внутренняя сходимость всех проведенных измерений, а также измерений одних и тех же значений на различных диапазонах измерения, лежала в пределах 0,05% от значений емкости и нескольких десятитысячных долей радиана. Правда, при измерениях емкости более 3000–4000 мкф стали появляться дополнительные угловые погрешности, дошедшие при значении 10 000 мкф примерно до $15 \cdot 10^{-3}$ рад; однако, когда было учтено сопротивление калиброванных проводников, с помощью которых магазин типа МЕ-9 присоединяется к установке, а также к поверяемым по нему мостам переменного тока, остаточные расхождения уже не превысили $4 \cdot 10^{-3}$ рад. Есть все основания относить и эти расхождения не за счет погрешностей установки, а за счет неучтенного остаточного эффекта сопротивления внутреннего монтажа декады « $\times 1000$ мкф» магазина типа МЕ-9, составляющего несколько десятитысячных долей ома.

Аналогичным образом были проведены изучение моста для измерения индуктивности и проверка разработанных мер большой индуктивности. По сравнению с только что описанной проверкой моста для измерения емкости здесь было только два осложнения.

Первое заключалось в том, что хотя зависимость разработанных образцовых мер большой индуктивности от значений приложенного

к ним напряжения переменного тока и была весьма сильно снижена, все же пренебречь ею было нельзя. Поэтому при образовании составных мер было необходимо контролировать напряжения, приложенные к отдельным мерам. Поскольку учет влияния изменений напряжений на отдельные меры, входящих в составные меры, сравнительно громоздок, то при проведении этой аттестации измерения строились так, чтобы к этим мерам как при измерениях их порознь, так и при образовании из них составных мер были приложены одни и те же напряжения.

Второе осложнение было более серьезным и заключалось в том, что примененная при этой аттестации исходная образцовая мера — образцовая катушка индуктивности в 1 *гн* без стального сердечника — имела, естественно, при частоте 100 *герц* очень небольшое значение коэффициента добротности — около 4. В то же время подлежавшие аттестации образцовые меры большой индуктивности имеют при этой же частоте значение коэффициента добротности от 20 до 30.

Это снижало надежность поверки установки и мер большой индуктивности в части измерений коэффициента добротности, так как значение коэффициента добротности образцовой катушки индуктивности, имеющей $Q \approx 4$, могло измеряться на установке с очень высокой степенью точности, поскольку фазовая погрешность $\Delta\varphi$ моста и погрешность ΔQ измерения на нем коэффициента добротности связаны соотношением

$$\Delta Q = \Delta\varphi Q^2. \quad (16)$$

Следовательно, влияние фазовой погрешности $\Delta\varphi$ при малых значениях Q может оказаться невыявленным, а впоследствии, при измерениях больших значений коэффициента добротности, может весьма существенно исказить результаты измерений. Поэтому, наряду с измерениями по описанному выше методу, давшими надежные значения индуктивности, были проведены дополнительные измерения коэффициента добротности мер большой индуктивности на собранном в лаборатории резонансном мосте.

Из совокупности полученных результатов видно, что показания установки по значениям индуктивности (и по значениям емкости) имеют внутреннюю сходимость в пределах приблизительно 0,05% при введении постоянной поправки к показаниям магазина C_1 установки, равной +650 *пф*. Показания установки по значениям коэффициента добротности точны в пределах до 1 при введении поправки

$$\Delta_1 Q = -1,6 \cdot 10^{-3} Q^2$$

при значениях $R_2 < 100\,000$ *ом* и поправки

$$\Delta_2 Q = -2,6 \cdot 10^{-4} Q^2$$

при значениях $R_2 = 100\,000$ *ом*.

Уместно отметить, что эти результаты хорошо совпадают со значениями поправок к показаниям установки по углу потерь при измерениях емкости.

Заключение

Создана измерительная установка, рассчитанная на мелкосерийное промышленное ее изготовление, для поверки образцовых мер большой индуктивности (от 1 до 1000 *гн*) и образцовых мер большой емкости (от 1 до 10 000 *мкф*) при частотах 50 и 100 *гц*, а также в случае надоб-

ности и при промежуточных частотах. Установка обеспечивает измерение указанных значений емкости и индуктивности с погрешностями, не превышающими 0,1—0,2%, угла потерь — с погрешностью, не превышающей $1 \cdot 10^{-3}$ рад, и значений коэффициента добротности примерно до ± 1 при его значениях до 25—30.

Измерения емкости могут производиться в условиях подачи на поверяемый конденсатор поляризующих постоянных напряжений до 15—16 в, а измерения индуктивности в условиях пропускания по поверяемым мерам индуктивности постоянного тока подмагничивания — до 3—30 ма.

В совокупности с разработанными образцовыми мерами большой индуктивности и большой емкости указанных выше значений эта установка создает (насколько автору известно — впервые) реальные возможности для полной и метрологически строгой поверки и испытаний практически почти всех известных мостов переменного тока, предназначенных для измерений большой индуктивности и емкости.

С другой стороны, следует отметить, что в описанном выше выполнении установка может в некоторых отдельных случаях не вполне удовлетворить потребности в той области, для которой она предназначена, например, когда была бы желательна поверка или испытание какого-либо моста при больших токах подмагничивания, или поверка моста, имеющего допустимые погрешности в пределах 0,1% (в мировой номенклатуре имеются 1-2 типа таких мостов). Установка не может также удовлетворить потребности при поверке универсальных мостов переменного тока, в которых измерения индуктивности и емкости производятся обычно при частоте 1000 гц.

Однако решение всех этих задач встречается с существенными затруднениями и должно служить темой дальнейших разработок. Установка же в ее настоящем виде решает достаточно большую, важную и вполне определенную задачу и является вполне законченным ее решением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левицкая Н. В., Применение электролитических и металло-бумажных конденсаторов как образцовых мер большой емкости, Труды ВНИИМ, вып. 4, 1959.
2. Быков М. А., Скользящий минимум при уравнивании мостов переменного тока с плохой сходимостью, «Электричество», № 6, 1954.
3. Быков М. А., Особый способ уравнивания мостов переменного тока, «Измерительная техника», № 4, 1955.
4. Быков М. А., Электрическое экранирование и заземление электроизмерительных схем, «Измерительная техника», № 6, 1956.

Поступила в редакцию
2/VIII 1959 г.

А. Д. ВЕЙСБРУТ

ВНИИМ

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ СРАВНЕНИЯ

В статье дана общая оценка погрешностей автоматических цифровых приборов сравнения. Указаны пути уменьшения погрешностей, обусловленных дискретностью показаний и чувствительностью нулевого реле. Приведены возможные способы выражения допускаемой погрешности цифрового прибора.

Вопрос оценки погрешностей автоматических цифровых приборов сравнения является дискуссионным. Несомненно, что общая погрешность этих приборов состоит из следующих частных погрешностей: а) погрешности, обусловленной дискретностью показаний (погрешности дискретности); б) погрешности сравнения измеряемой и компенсирующей величины; в) погрешности компенсирующей величины.

Произведем оценку этих погрешностей для цифровых вольтметров с дискретным уравниванием и динамической системой компенсации (опрос всех ступеней компенсирующего напряжения производится всегда по одной и той же программе). Приведенные ниже соображения с некоторыми изменениями могут быть применены при оценке погрешностей цифровых приборов, предназначенных также и для измерения других величин.

Допустим, что нулевое реле имеет бесконечно большую чувствительность, а значение U' измеряемого напряжения выбрано таким, что в результате опроса всех ступеней компенсирующего напряжения последнее приняло значение U'_k , равное U' , причем наименьшая ступень U_{n1} компенсирующего напряжения не вошла в отсчет. Тогда, очевидно, при всех значениях измеряемого напряжения U , лежащих в пределах

$$U' \leq U < U' + U_{n1} \quad (1)$$

или, что то же,

$$U'_k \leq U < U'_k + U_{n1}, \quad (2)$$

компенсирующее напряжение равно U'_k , и показание прибора будет оставаться неизменным. Следовательно, погрешность, вносимая в показания прибора дискретностью уравнивания, не превышает U_{n1} — наименьшей ступени компенсирующего напряжения.

Введем в цепь компенсирующего напряжения дополнительное напряжение, не входящее в отсчет и равное $\frac{U_{к1}}{2}$, тогда показание прибора будет тем же для измеряемых напряжений, лежащих в пределах

$$U_k' - \frac{U_{к1}}{2} \leq U < U_k' + \frac{U_{к1}}{2}. \quad (3)$$

В этом случае погрешность, вносимая в показания прибора дискретностью уравнивания, не будет превышать $\pm \frac{U_{к1}}{2}$. Таким образом, при рациональном построении схемы компенсатора принципиально возможно создать условия, при которых показания прибора округляются до половины значения наименьшей ступени компенсирующего напряжения.

Применяемые в реальной схеме компенсатора нулевые реле обладают конечной чувствительностью, благодаря чему в показания прибора вносится погрешность, обусловленная неточностью сравнения измеряемого и компенсирующего напряжений. Нулевое реле срабатывает, когда разность сравниваемых напряжений равна или превышает его порог чувствительности U_n . Следовательно, компенсирующее напряжение будет отличаться от измеряемого на величину U_n . Эта погрешность является систематической и может быть исключена, если соответствующим образом изменить дополнительное напряжение, введенное в цепь компенсирующего напряжения для уменьшения погрешности дискретности. В этом случае погрешность сравнения измеряемого и компенсирующего напряжений будет обусловлена не значением порога чувствительности нулевого реле, а величиной его нестабильности ΔU_n .

В точных цифровых вольтметрах в качестве исходной меры э. д. с. применяются нормальные элементы, причем для повышения точности компенсирующего напряжения пользуются в основном теми же способами, что и при разработке компенсаторов с ручным уравниванием.

Допускаемая погрешность сопротивлений измерительной цепи может быть задана как в виде абсолютной погрешности, так и в виде относительной погрешности отношения сопротивлений. В последнем случае эта погрешность в сумме с допускаемой относительной погрешностью э. д. с. нормального элемента определяет относительную погрешность компенсирующего напряжения, если, конечно, точность установки рабочего тока достаточно велика.

Максимальное значение абсолютной погрешности цифрового вольтметра равно сумме погрешности дискретности δ_d , погрешности сравнения δ_c и погрешности компенсирующей величины δ_k :

$$\delta = \delta_d + \delta_c + \delta_k. \quad (4)$$

Для рациональной схемы компенсатора (при введении в цепь компенсирующего напряжения дополнительного напряжения, равного $\frac{U_{к1}}{2} + U_n$)

$$\frac{U_{к1}}{2} = \delta_d \text{ и } \delta_c = \Delta U_n.$$

Если, кроме того, абсолютная погрешность компенсирующего напряжения для любых значений последнего не превышает некоторого значения ΔU_k и соблюдено условие

$$\Delta U_n + \Delta U_k \leq \frac{U_{к1}}{2},$$

то

$$\delta_c + \delta_k \leq \frac{U_{к1}}{2}.$$

Подставляя в уравнение (4) значение частных погрешностей, получим

$$\delta \leq U_{к1}.$$

Таким образом, представляется возможным иметь цифровые вольтметры с допускаемой абсолютной погрешностью, не превышающей наименьшей ступени компенсирующего напряжения. В этом случае точность прибора можно, так же как и для стрелочных вольтметров, характеризовать приведенной погрешностью

$$\delta_0 = \frac{U_{к1}}{U_{пред}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $U_{пред}$ — напряжение верхнего предела измерения.

Если погрешность компенсирующего напряжения сравнительно велика, то по аналогии с компенсаторами с ручным уравновешиванием допускаемая погрешность цифрового вольтметра может быть выражена формулой

$$\delta = \pm (mU + U_{к1}), \quad (6)$$

где m — некоторая доля показания прибора U .

Например, если погрешность, обусловленная первым членом формулы (6), не должна превышать 0,1% от показания вольтметра, имеющего трехзначный отсчет, верхний предел измерения 9,99 в и работающего по десятичной системе исчисления ($m = 0,001$ и $U_{к1} = 0,01$ в), то получим

$$\delta = \pm (0,001U + 0,01) \text{ в.}$$

Необходимо отметить, что у многопредельных цифровых приборов отношение пределов измерения обычно равно 10 и рабочий участок поэтому начинается от $0,1 U_{пред}$. В данном случае точность измерения в пределах рабочего участка может изменяться в 5—10 раз. Это обстоятельство является существенным недостатком многопредельных цифровых приборов, ограничивающим область их применения. Указанный недостаток может быть частично устранен путем увеличения числа знаков отсчета.

Например, если в трехзначный вольтметр с пределами измерения 9,99; 99,9 и 999 в и приведенной погрешностью 0,1% добавить еще одну декаду, т. е. создать четырехзначный прибор с допускаемой погрешностью: для первого предела измерения $\pm (0,001U + 0,001)$ в, для второго предела измерения $\pm (0,001U + 0,01)$ в, для третьего предела измерения $\pm (0,001U + 0,1)$ в, то в рабочем участке каждого предела измерения точность измерения может изменяться только в 2 раза. Однако в этом случае возникает новый недостаток — при работе вблизи верхнего предела измерения показания прибора содержат недостоверный (четвертый) знак. Кроме того, для четырехзначного прибора необходимо иметь нулевое реле с более высокой чувствительностью. Если же оно имеется, то можно, уменьшив погрешность компенсирующего напряжения, получить еще более точный прибор.

В заключение необходимо отметить, что в статье даны общие пути оценки погрешностей автоматических цифровых приборов и поэтому в качестве примера указаны лишь основные источники, вызывающие погрешность компенсирующей величины. Полная оценка погрешности

компенсирующей величины с учетом всех условий работы может быть произведена только при рассмотрении конкретной схемы прибора и выполняться общеизвестными способами — таким же образом, как и для приборов с ручным уравниванием, полагая, конечно, что погрешности, связанные с переключениями элементов измерительной цепи, исключены.

Следует также обратить внимание на то, что введение в схему прибора дополнительных компенсирующих величин практически невыполнимо в приборах со статической системой компенсации (приборах следящего действия) и не всегда может быть осуществлено в приборах с динамической системой компенсации. Поэтому классификационный признак по виду системы компенсации еще не является прямым указанием на свойственные данному прибору погрешности.

Поступила в редакцию

2/XII 1959 г.

А. М. ТЕПЛИНСКИЙ
вним

ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ПОДОГРЕВНЫХ ТЕРМИСТОРОВ

В статье исследованы вопросы точного измерения малых переменных токов от 20 мка и выше с помощью нового типа подогревных термочувствительных сопротивлений.

В последнее время появились приборы, позволяющие измерять переменные токи от 1 ма до 20 мка с погрешностью не более 1,5–3% при частотах 50–10 000 гц. В связи с этим для поверки и градуировки таких приборов возникла необходимость разработки точных методов измерения малых переменных токов от 20 мка и выше с погрешностью, не превышающей 0,5% в широком диапазоне частот.

Наиболее точные методы измерения переменного тока основаны, как известно [1–3], на сравнении силы переменного тока с эквивалентной по действию силой постоянного тока при помощи приборов, называемых компараторами. Наиболее приемлемыми для широкого диапазона частот являются компараторы, основанные на сравнении постоянного и переменного токов по их тепловому действию. Особенностью измерения весьма малых переменных токов, основанных на таком сравнении, является то, что они требуют применения преобразователей очень высокой чувствительности. Поэтому чувствительность преобразователя вместе со схемой, в которой он работает, в данном случае приобретает первостепенное значение, определяя возможность самого измерения.

Из известных типов преобразователей наиболее пригодны для измерения малых переменных токов термозлементы и полупроводниковые термисторы, так как они обладают высокой чувствительностью и обеспечивают требуемую точность измерения. Однако термозлементы и термисторы существующих конструкций имеют недостаточную чувствительность для решения поставленной задачи. Повышение чувствительности преобразователей с косвенным подогревом может быть достигнуто путем повышения мощности, выделяемой измеряемым током в нагревателе, и снижения потерь энергии вследствие конвекции, лучеиспускания и теплопередачи.

Решение этих задач требовало выбора материала нагревателя, который обеспечил бы получение возможно большего сопротивления в малом объеме, помещения нагревателя и чувствительного элемента в вакуум-

ный баллон, выбора такой конструкции токоподводов, при которой потери тепла нагревателем минимальны. Эти положения были приняты за основу при создании чувствительных подогревных термисторов, которые были разработаны и изготовлены сотрудником Физико-технического института АН СССР С. В. Лузгиным.

Конструкция и основные характеристики чувствительных подогревных термисторов

Подогревный термистор представляет собой вакуумный стеклянный баллон, внутри которого помещен основной элемент — «рабочее тело» подогревного термистора. Конструкция рабочего тела приведена на рис. 1. Полупроводниковое термочувствительное сопротивление (термистор) в виде цилиндра или шарика 3, находится внутри стеклянной трубочки 4, на внешнюю поверхность которой нанесен нагреватель из пленочного углеродистого сопротивления 2. Нагреватель и термистор с помощью очень тонких никелевых подводов 1 соединяются с выводами, впаянными в стеклянный баллон. Давление газа внутри стеклянного баллона составляет около 10^{-4} мм рт. ст.

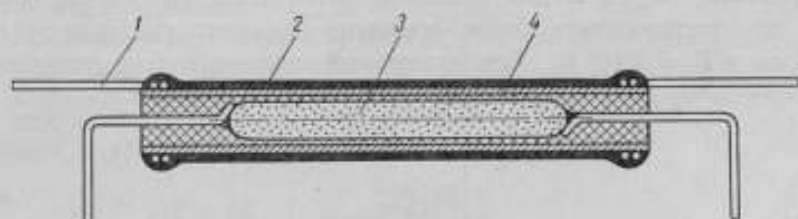


Рис. 1.

ночного углеродистого сопротивления 2. Нагреватель и термистор с помощью очень тонких никелевых подводов 1 соединяются с выводами, впаянными в стеклянный баллон. Давление газа внутри стеклянного баллона составляет около 10^{-4} мм рт. ст.

Параметры подогревных термисторов приведены в табл. 1. Опытные подогревные термисторы сокращенно обозначены ТКПН (термистор косвенного подогрева с непроволочным нагревателем).

Таблица 1

Технические данные подогревного сопротивления ТКПН	Численное значение
Рабочая область по току	20 ± 100 мкА
Сопротивление нагревателя	$25\,000 \div 30\,000$ Ом
Сопротивление термистора в холодном состоянии	$2\,500 \div 5\,000$ Ом
Длина рабочего тела	2,5 мм
Наружный диаметр стеклянной трубочки рабочего тела	0,18 .
Длина непроволочного нагревателя	1,7 .
Толщина проводящего слоя непроволочного нагревателя	$0,01 \div 0,02$ мм
Диаметр никелевых подводов	0,02 мм

Примечание. Были изготовлены 4 типа сопротивления ТКПН. В этой таблице и в следующих приводятся данные последнего, наиболее совершенного типа.

Ниже приведен ряд основных характеристик опытных подогревных термисторов, позволяющих судить об их свойствах и пригодности для

измерений малых токов, а также дающих возможность выбрать оптимальный режим работы сопротивления в схеме компаратора.

1. Температурная зависимость сопротивления термистора, полученная экспериментально, показана на рис. 2. С достаточной для практики точностью эта зависимость аппроксимируется [7] выражением

$$r_T = r_{\infty} \cdot e^{\frac{B}{T}}, \quad (1)$$

где r_T — сопротивление термистора при температуре T (ом);

r_{∞} — предел, к которому стремится сопротивление термистора при беспредельном увеличении температуры;

B — постоянная, зависящая от свойств материала термистора, имеет размерность температуры ($^{\circ}\text{K}$);

T — температура рабочего тела подогревного термистора ($^{\circ}\text{K}$).

Постоянные r_{∞} и B для одного из опытных термисторов, определенные по экспериментальным данным, оказались равными: $r_{\infty} = 0,006$ ом и $B = 3880^{\circ}\text{K}$. Температурный коэффициент сопротивления термистора равен $\alpha_T = 4,5\%/град$ при температуре 20°C .



Рис. 2.

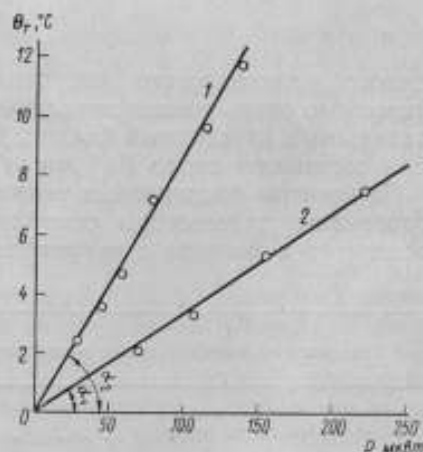


Рис. 3.

2. Зависимости превышения температуры рабочего тела ТКПН от мощностей, выделяемых в термисторе (1) и в нагревателе (2), приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что эти зависимости имеют линейный характер.

Тангенсы угла наклона прямых к оси абсцисс обозначим через F_T и F_H

$$F_T = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{d\theta_T}{dP_T} \quad \text{и} \quad F_H = \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{d\theta_H}{dP_H} \quad (2)$$

и назовем эффективностями термистора и нагревателя.

Теория и эксперимент [4, 5] показывают, что F_T и F_H можно считать величинами постоянными

Эффективности F_T и F_H являются одними из важных характеристик подогревных термисторов и позволяют дать сравнительную оценку рациональности их конструкции с точки зрения экономического использования мощности, рассеиваемой нагревателем, снижения потерь на излучение, теплопередачу и т. д.

Для ТКПН значения F_H и F_T оказались равными

$$F_H = 33 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мвт}} \quad \text{и} \quad F_T = 86 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мвт}}.$$

3. Зависимости сопротивления термистора r_T от тока, проходящего через нагреватель I_H (рис. 4), снимались для ТКПН при различных значениях тока, проходящего через термистор (I_T) и дающего дополнительный подогрев. Изменение тока I_T осуществлялось изменением напряжения питания моста. Кривые, приведенные на рис. 4 и 5, снимались при значениях токов термистора, равных соответственно: 0,8 мка (1), 1,6 мка (2), 80 мка (3), 160 мка (4), 320 мка (5). Снятые кривые характеризуют чувствительность ТКПН, которая может быть определена как тангенс угла наклона касательной к кривой в данной точке

$$S_T = \frac{dr_T}{dI_H}. \quad (3)$$

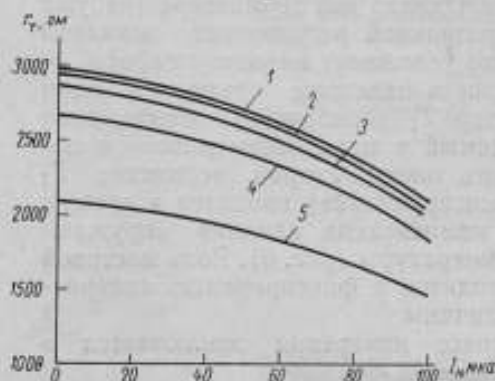


Рис. 4.

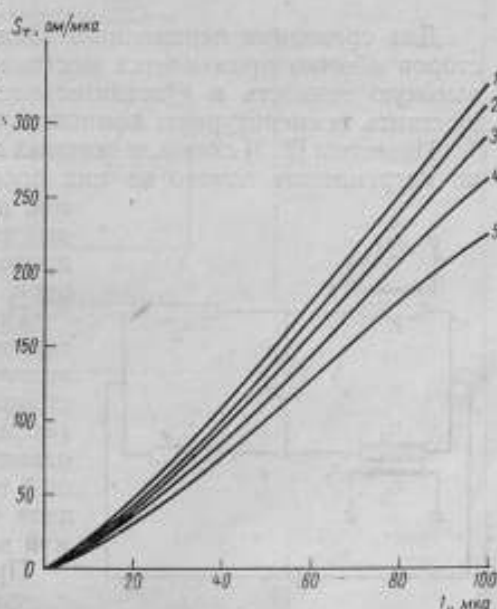


Рис. 5.

Преобразуя это выражение и полагая, что приращение сопротивления термистора пропорционально приращению температуры при достаточно малом изменении тока в нагревателе, можно получить

$$S_T \approx 2\alpha_T r_T r_H F_H I_H, \quad (4)$$

где r_H — сопротивление нагревателя.

Формулу (4) следует считать приближенной, так как величины α_T , r_T , r_H зависят от температуры, т. е. в конечном счете зависят от тока в нагревателе и термисторе. Однако в рабочем диапазоне токов изменение указанных величин не превышает нескольких процентов, введение же более точной зависимости чувствительности термистора от тока в нагревателе неоправданно усложнит ее и сделает непригодной для анализа.

Из формулы (4) следует, что чувствительность термистора падает с уменьшением силы тока по линейному закону, что приблизительно подтверждается экспериментальными кривыми (рис. 5).

5. Подогревные термисторы можно применять в качестве компарирующего элемента в том случае, если термистор обладает достаточной воспроизводимостью сопротивления. Эксперименты показали, что изменение характеристик термистора после температурного цикла (нагрев — охлаждение — нагрев) отсутствует или, во всяком случае, не превышает 0,01 %.

Приведенные результаты исследования опытных термисторов с непроволочными нагревателями показывают, что они обладают большой чувствительностью, обеспечивающей возможность их применения в схемах для компарирования весьма малых токов.

Компаратор с подогревными термисторами

Для сравнения переменного тока с постоянным при помощи термисторов обычно применяется мостовая схема, так как она обеспечивает высокую точность и чувствительность, позволяет легко и просто осуществить температурную компенсацию.

Известны [2, 3] схемы, в которых применены два термистора: T_1 и T_2 ; по нагревателю одного из них пропускается измеряемый переменный ток, по нагревателю второго — постоянный ток. Однако два термистора требуют предварительной регулировки мостовой цепи, что усложняет методику работы.

Проще и надежнее применять один термистор T_1 («рабочий»), попеременно включаемый в цепь переменного и постоянного токов; второй термистор T_2 («компенсирующий») вводится в схему с целью компенсации влияния окружающей температуры (рис. 6). Роль мостовой цепи сводится к фиксированию измеряемой величины.

Процесс измерения заключается в следующем:

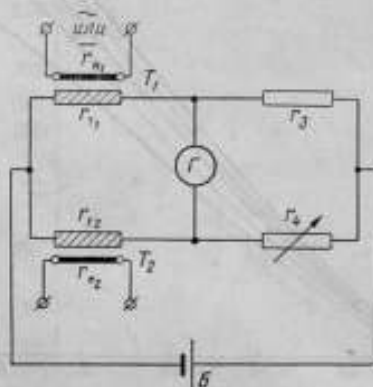


Рис. 6.

а) нагреватель рабочего термистора r_{12} включается в цепь переменного тока

и мост уравнивается изменением одного из его плеч (r_3 или r_4);

б) нагреватель рабочего термистора включается в цепь постоянного тока, который регулируется до тех пор, пока вновь не будет достигнуто равновесие моста;

в) постоянный ток точно измеряется и его значение (после введения поправок) принимается равным действующему значению переменного тока.

На основе этого метода во ВНИИМ был создан специальный компаратор.* В основу компаратора с подогревными термисторами положена принципиальная схема, приведенная на рис. 6, и полная схема компаратора — на рис. 7. Компаратор выполнен в виде прибора (рис. 8), на верхней панели которого смонтированы рукоятки реостатов,

* Конструкция компаратора разработана группой конструкторского бюро ВНИИМ, руководимой Л. С. Левиним. Изготовлен компаратор на заводе «Эталон».

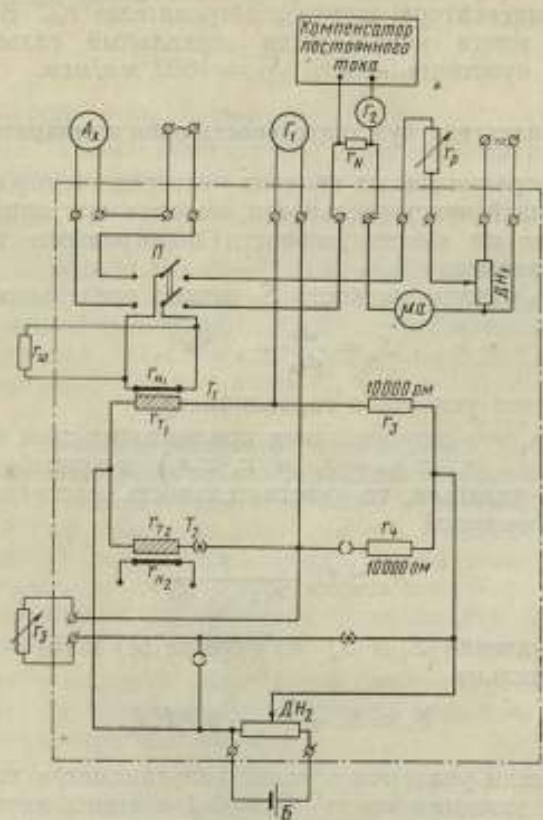


Рис. 7.



Рис. 8.

переключателей, штепсели, а также зажимы (рис. 7) для подключения регулировочных сопротивлений r_p, r_b , гальванометра Γ_1 , поверяемого прибора A_x , компенсатора, шунта к нагревателю r_w . В качестве нулевого указателя моста используется зеркальный гальванометр типа ГЗС, имеющий чувствительность $S_r = 1650 \text{ мм/мкА}$.

Комплектная чувствительность цепи компаратора

Точность измерения малых величин непосредственно связана с получением надлежащей чувствительности, которая при применении мостовой цепи зависит от чувствительности подогревного термистора S_r моста S_m , гальванометра S_r .

Комплектную чувствительность S_k можно представить в виде

$$S_k = \frac{d\alpha}{dI_w} = S_r S_m S_r, \quad (5)$$

где α — отклонение указателя гальванометра.

Если принять, что сопротивления прилежащих плеч моста примерно равны друг другу ($r_{11} \approx r_{13} = r_1$ и $r_2 \approx r_4$) и пренебречь сопротивлением нулевого указателя, то чувствительность моста можно выразить приближенной формулой

$$S_m \approx U_m \frac{1}{2r_1(r_1 + r_3)}. \quad (6)$$

Подставив значения S_r и S_m из формул (4) и (6) в выражение (5), получим окончательно

$$S_k \approx S_r \frac{U_m}{r_1 + r_3} \cdot \alpha_T r_1 F_n I_w. \quad (7)$$

При применении указанного выше гальванометра типа ГЗС и при напряжении на зажимах моста $U_m = 0,2 \text{ В}$ комплектная чувствительность цепи равна 50 мм/мкА при токе в нагревателе, равном 20 мкА .

Оценка погрешностей термисторного метода

Выше было показано, что при применении опытных термисторов ТКПН получается вполне достаточная чувствительность измерительной цепи. Кроме того, имеется возможность повышения комплектной чувствительности путем увеличения напряжения на зажимах моста. Таким образом, чувствительность цепи не может лимитировать точ-

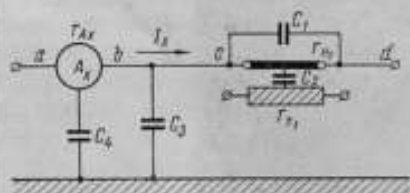


Рис. 9.

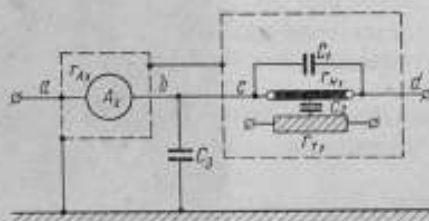


Рис. 10.

ность измерения. Однако при измерениях малых переменных токов имеется ряд источников погрешностей, ограничивающих точность измерения.

Нагреватель термистора можно представить упрощенной эквивалентной схемой с сосредоточенными параметрами в виде сопротивления

$r_{н1}$, шунтированного емкостью C_1 (рис. 9). При приближенном подсчете этой емкости получено значение, равное 1 пф. Погрешность, вызываемая этой емкостью,

$$\gamma_1 = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx -0,5\omega^2 C_1^2 r_n^2 \quad (8)$$

при частоте 100 000 гц не превышает 0,02%.

Основным назначением компаратора является проверка микро- и миллиамперметров для повышенных частот.

Для получения правильного результата, очевидно, необходимо, чтобы через нагреватель ТКПН протекал тот же ток, что и через поверяемый прибор. Для выполнения этого условия необходимо учесть и по возможности снизить влияние паразитных емкостей (рис. 9) как проводов, соединяющих поверяемый прибор с компаратором C_3 , так и емкостей, непосредственно связанных с конструкцией ТКПН (емкости C_1 , шунтирующей нагреватель, и емкости C_2 между нагревателем и термистором).

Емкость C_3 в рассматриваемом компараторе является наиболее серьезным источником частотной погрешности. Несмотря на то, что проводник bc (рис. 10) сделан возможно более коротким, емкость C_3 оказалась равной 30 пф. Влияние этой емкости можно уменьшить путем понижения разности потенциалов между соединительным проводом bc и землей, что достигается выбором определенной точки заземления. Выбор точки заземления определяется соотношением сопротивления r_n нагревателя термистора и внутреннего сопротивления r_{Ax} поверяемого амперметра. С точки зрения уменьшения емкостного тока через C_3 выгоднее заземлять ту часть схемы, к которой подключен прибор, обладающий меньшим сопротивлением.

Рекомендуемая схема заземления при малом сопротивлении r_{Ax} прибора приведена на рис. 10. С входным зажимом поверяемого прибора соединяются экраны прибора и компаратора, что позволяет также полностью избавиться от влияния емкости C_4 между поверяемым прибором и землей.

Погрешность γ_2 от емкости C_3 , вычисленная по формуле

$$\gamma_2 = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx -0,5r_n^2 \omega^2 C_3^2, \quad (9)$$

составляет при частоте 50 000 гц 0,11%, а при частоте 100 000 гц — 0,45%. Сопротивление r_{Ax} поверяемого прибора — не более 5000 ом.

Погрешность, вызываемая емкостью между нагревателем и термистором, при принятом экранировании и заземлении вычисляется по формуле

$$\gamma_3 = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx -0,5\omega^2 C_2^2 (r_{Ax} + 0,5r_n)^2. \quad (10)$$

Емкость C_2 в термисторах ТКПН составляет 2 + 3 пф и погрешность, вызванная ею, равна 0,07% при частоте 100 000 гц.

Созданные термисторы дают возможность измерять токи в пределах от 20 до 100 мка. Конструкцией компаратора предусмотрена возможность расширения пределов измерения до 20 ма путем шунтирования нагревателя безреактивными непроволочными шунтами с сопротивлением 200 + 20 000 ом.

В схеме измерения тока с шунтированным нагревателем может возникнуть погрешность из-за реактивности шунта и нагревателя ТКПН, которую можно определить [1] по формуле

$$\gamma_4 = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx -0,5\omega^2 (\tau_n^2 - \tau_{ш}^2), \quad (11)$$

где τ_n и $\tau_{ш}$ — постоянные времени нагревателя и шунта соответственно.

Непроволочные сопротивления, используемые в качестве шунтов, имеют постоянные времени $\pm(3-15) \cdot 10^{-9}$ сек. Постоянная времени нагревателя имеет приблизительно такое же значение. Наибольшая погрешность, определенная по формуле (12), при частоте 100 000 гц не превышает 0,002%.

Значения частотных погрешностей (в %) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Источник частотной погрешности	Частота, гц			
	10 000	20 000	50 000	100 000
Реактивность нагревателя	—	—	-0,0005	-0,02
Емкость C_1 между соединительным проводом δc и землей	-0,01	-0,02	-0,11	-0,45
Емкость C_2 между нагревателем и термистором	-0,001	-0,003	-0,018	-0,07
Шунтирование нагревателя	—	—	—	$\pm 0,002$
Максимальное значение частотной погрешности	-0,01	-0,02	-0,13	-0,56

Из табл. 2 следует, что если допустить частотную погрешность в 0,13%, то верхним пределом частоты, при которой может применяться компаратор данной конструкции, является 50 000 гц.

Высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) термисторов, полезный с точки зрения чувствительности, создает трудности в устранении влияния изменений окружающей температуры. Из рис. 3 следует, что изменение окружающей температуры всего на $0,1^\circ\text{C}$ соответствует изменению мощности в нагревателе на $3 \cdot 10^{-6}$ вт, что соизмеримо с мощностью, рассеиваемой в нагревателе измеряемым током в 20 мка. Это вынуждает с особым вниманием относиться к указанному источнику погрешности.

Если два термистора (рабочий и компенсационный) имеют одинаковые постоянные B_1 и B_2 , то для равных температур рабочих тел термисторы должны иметь и равные ТКС (α_T).

Выполнить условие $B_1 = B_2$ практически невозможно и, кроме того, температуры рабочих тел термисторов всегда несколько отличаются друг от друга, поэтому $\alpha_{T_1} \neq \alpha_{T_2}$. Можно показать, что погрешность от изменения окружающей температуры на величину $\Delta\theta$ равна

$$\gamma_5 = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx 0,5 \left(\frac{\Delta B}{B} + 2 \frac{\Delta T}{T} \right) \frac{\Delta\theta}{I_n^2 r_n F_n}, \quad (12)$$

где $\Delta B = B_2 - B_1$ — разность постоянных термисторов;

$\Delta T = T_2 - T_1$ — разность температур термисторов.

Из формулы (12) следует, что для уменьшения этой погрешности нужно выбрать такую пару термисторов, для которых постоянные B_1 и

B_2 отличаются друг от друга на весьма малую величину; температуры рабочих тел термисторов T_1 и T_2 должны быть возможно ближе друг к другу; оба подогревных термистора нужно помещать в среду с большой тепловой инерцией с тем, чтобы изменение температуры $\Delta\theta$ за время компарирования ($2 \div 3$ мин) было бы наименьшим. С этой целью термисторы помещены в специальную масляную ванну с толстыми медными стенками. Снаружи ванна покрыта слоем толстого сукна, который затрудняет доступ тепла к стенкам ванны.

При изменении напряжения на зажимах мостовой цепи равновесие моста нарушается вследствие изменения токов в термисторах и изменения, таким образом, их температурного режима. Возникающая при этом погрешность определяется приближенным выражением

$$\gamma_6 = \frac{\Delta U_n}{I_n} \approx \frac{r_T F_T U_n \Delta U_n}{F_n I_n^2 r_n (r_T + r_n)^2} \left[\left(1 + 2 \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta F_T}{F_T} + 2 \frac{\Delta r_T}{r_T} \right) \frac{r_T^2}{r_n^2} - 1 \right], \quad (13)$$

где ΔU_n — изменение напряжения, питающего мост;
 $\Delta F_T = F_{T_2} - F_{T_1}$ — разность эффективностей термисторов;
 $\Delta r_T = r_{T_2} - r_{T_1}$ — разность их сопротивлений.

Из формул (12) и (13) можно сделать вывод, что чем ближе друг к другу параметры и характеристики термисторов, тем влияние окружающей температуры и нестабильности источников питания мостовой цепи меньше.

Опыт показывает, что при питании мостовой цепи от кислотного аккумулятора емкостью 50 а·ч и при описанной выше защите термисторов от влияния окружающей температуры максимальный дрейф нуля в лабораторных условиях составляет одно-два деления за 10 мин, что вызывает погрешность измерения, не превышающую 0,05%. Следует также иметь в виду, что такой дрейф нуля может вызываться не только влиянием температуры и изменением напряжения питания моста, но и целым рядом других факторов, как, например, вибрацией здания, ползучими токами и т. д.

Большая инерционность полупроводниковых термисторов увеличивает время измерения и увеличивает погрешность измерения из-за нестабильности термисторов. Кроме того, при очень медленном движении указателя равновесия наблюдатель может произвести отсчет, хотя переходный процесс, связанный с изменением температуры термистора, фактически не окончен.

Скорость изменения температуры термисторов характеризуется постоянной времени H , определяемой уравнением [6]

$$H = \frac{C_{cp}}{\gamma S},$$

где C_{cp} — «средняя» теплоемкость рабочего тела ТКПН ($\text{дж}^\circ\text{C}$);

γ — коэффициент теплоотдачи ($\text{вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

S — поверхность, через которую осуществляется теплообмен (м^2).

Количество тепла ΔP , рассеиваемое за единицу времени, равно $\eta S \Delta\theta$. Так как $\frac{\Delta\theta}{\Delta P} = F$, то $H = C_{cp} F$.

Термистор имеет два элемента, в которых выделяется тепло с различными коэффициентами теплоотдачи, поэтому следует различать две постоянные времени: $H_n = C_{cp} F_n$ — постоянную времени нагревателя и $H_T = C_{cp} F_T$ — постоянную времени термистора.

Погрешность от инерционности ТКПН можно определить, исходя из скорости движения указателя равновесия. Практически при скорости движения указателя, равной $\frac{dx}{dt} \approx 0,2 \frac{\text{мм}}{\text{сек}}$, наблюдатель полагает, что движение указателя прекратилось и он может произвести измерение тока.

Предположим, что изменение температуры рабочего тела ТКПН описывается экспоненциальным законом

$$\Theta = \Theta_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{H_n}} \right),$$

где t — время, прошедшее с момента включения тока в цепи нагревателя;

Θ — температура рабочего тела через промежуток времени t после включения;

$\Theta_{\text{уст}}$ — установившаяся температура рабочего тела ТКПН.

Если принять, что инерционность всей системы определяется только инерционностью термистора, то погрешность может быть определена из следующего выражения:

$$\gamma_i = \frac{\Delta I_n}{I_n} \approx \frac{H_n}{S_n I_n} \frac{dx}{dt}. \quad (14)$$

Если при первом и втором уравновешивании указатель подходит с разных сторон к положению равновесия, то погрешность от инерционности будет наибольшей и равной удвоенному значению, определяемому из формулы (14).

Для опытных экземпляров термисторов $H_n \approx 5 \text{ сек}$. В случае измерения малых токов погрешность от инерционности будет максимальной вследствие уменьшения S_n и при $I_n = 20 \text{ мкА}$ и $U_n = 0,2 \text{ В}$ погрешность может достигнуть значения 0,1%. Кроме того, инерционность подвижной части гальванометра увеличивает время установки и тем самым увеличивает и погрешность от инерционности. Для уменьшения этой погрешности следует выбирать гальванометр с малым временем успокоения и увеличивать комплектную чувствительность компаратора, повышая напряжение на зажимах мостовой цепи.

Частотная погрешность является систематической погрешностью, и случайная погрешность, вызываемая нестабильностью термистора, элементов цепи и т. д., не зависит от частоты измеряемого тока. Определение случайных погрешностей, вносимых компаратором, производилось путем многократного измерения силы постоянного тока; значение тока устанавливалось при помощи потенциометра постоянного тока и поддерживалось во время измерения неизменным с погрешностью не

Таблица 3

Ток в нагревателе термопреобразователя (мкА)	20	50	100	1000*
Средняя квадратичная погрешность ряда σ (мкА)	0,026	0,02	0,02	0,8
Относительная погрешность $\frac{\sigma}{I} \cdot 100$ (%)	0,13	0,04	0,02	0,08

* Нагреватель шунтирован сопротивлением 2000 Ом.

более 0,01%. При этом предполагалось, что погрешность от нестабильности элементов цепи тока во много раз меньше погрешности компаратора.

На основании 50 измерений каждого значения тока были вычислены средние квадратичные погрешности. Данные вычислений приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что предельное отклонение от среднего арифметического, если принять его равным 3σ , при токе 20 мка не превышает 0,4%.

При измерении тока больше 20 мка предельное отклонение уменьшается и при 100 мка составляет 0,06%. Шунтирование нагревателя безреактивным шунтом увеличивает предельное отклонение до 0,24%. Это связано, по-видимому, с температурными влияниями тока на шунт и нагреватель.

При измерении весьма малых переменных токов возрастает влияние напряжений, индуцированных в отдельных участках измерительной цепи, а также влияния токов утечек и емкостных связей. Эти помехи не поддаются какому-либо учету, но могут существенно исказить результат.

Для ослабления влияния внешних электромагнитных полей компаратор защищен заземленным экраном. Соединительные провода в схеме компаратора выполняются бифилярно; все сопротивления, входящие в цепь переменного и постоянного тока и в цепь моста, выполнены безреактивными, что почти полностью устраняет влияние переменных магнитных полей. В компараторе применена высококачественная изоляция из полистирола.

Результаты испытаний опытного образца термисторного компаратора

Экспериментальная оценка погрешностей при измерении сравнительно больших токов (5 ма) осуществлялась путем сличения термисторного компаратора с термоэлектрическим компаратором типа ТЭКМ-1, погрешность которого не превышает 0,1% при частоте до 20 000 гц. Нагреватель ТКПН при этом был шунтирован безреактивным шунтом. Сличение показало, что расхождение результатов измерения при частотах 100÷20 000 гц не превышает 0,04%.

Термисторный компаратор сличался также с разработанным во ВНИИМ термоэлектрическим компаратором малых токов типа ТЭКФ-1 в диапазоне частот 50÷50 000 гц. Расхождение результатов измерения тока 20 мка при частоте 100÷50 000 гц в этом случае не превышает 0,2%, а при измерении токов 50÷100 мка расхождение не превышает 0,25%. Погрешность ТЭКФ не превышает 0,25% в диапазоне частот 50÷200 000 гц.

Учитывая полученные расчетные и экспериментальные данные, можно сказать, что термисторный метод обеспечивает измерение переменных токов от 50 мка до 20 ма с погрешностью, не превышающей 0,2% в диапазоне частот 50÷50 000 гц. При измерении токов ниже 50 мка погрешность возрастает до 0,4%.

Выводы

1. В лаборатории электрических измерений ВНИИМ для точных измерений весьма малых переменных токов (от 20 мка до 20 ма) создан компаратор, основанный на применении новых подогревных термисторов.

2. Созданы термисторы косвенного подогрева, обладающие значительно большей чувствительностью по сравнению с известными ранее

термисторами подобного типа. В созданном термисторе в качестве нагревателя применено непроволочное высокоомное сопротивление.

3. Использование новых высокочувствительных подогревных термисторов позволило применить мост с обычным зеркальным гальванометром без специального усилителя для повышения чувствительности моста, что значительно упростило схему и процесс измерения, а также повысило точность измерения.

4. Переменный ток и эквивалентный ему по тепловому действию постоянный ток пропускаются по нагревателю одного и того же термистора, благодаря чему не требуется полного совпадения характеристик двух термисторов и ускоряется процесс измерения.

5. Изучены систематические погрешности и выяснены меры борьбы с ними.

6. Разработанный метод и аппаратура обеспечивают поверку практически всех существующих типов микро- и миллиамперметров в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Широков К. П., Комплектная установка для проверки амперметров и вольтметров при повышенной частоте переменного тока, Труды ВНИИМ, вып. 24(84), 1954.

2. Schrader H. J., Wechselstrom-Kompensationmessungen mit indirekt geheizten N. T. C. Widerstanden, «Elektrotechnische Zeitschrift», В. 73, 7, 1952

3. Widdis F. C., The indirectly heated thermistor as a precise a.c./d.c. transfer device, «The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers», v. 103, part. B, № 12, 1956.

4. Дульнев Г. И., Тепловой режим полупроводникового термочувствительного сопротивления с косвенным подогревом, Труды ЛИТМО, вып. 12, 1954.

5. Гнегов В. М., Полупроводниковые термочувствительные сопротивления и изучение их тепловых режимов применительно к условиям измерения мощности саметровых волн, Канд. дисс. ЛИТМО, Л., 1953.

6. Афанасьева Н. С., Опыт работы с термисторами ШТ-1 и Т-8, «Применение полупроводников в приборостроении», Машгиз, 1958.

7. Шефтель И. Г., Термосопротивления, М., 1958.

Поступила в редакцию

2/IX 1959 г.

А. Д. ВЕЙСБРУТ, Е. Д. КОЛТИК
ВНИИМ

МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИГУР ЛИССАЖУ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СДВИНУТЫХ ПО ФАЗЕ НАПРЯЖЕНИЙ

В статье рассматривается метод использования фигур Лиссажу для получения точно известного угла сдвига фаз между напряжениями в диапазоне звуковых частот. Даются обоснования точности метода и рекомендации по его практическому применению для проверки фазометров.

Фигуры Лиссажу широко применяются в практике радиоизмерений, в частности при измерениях сдвига фаз. Ряд авторов [1, 2] отмечает повышение точности измерения сдвига фаз по фигурам Лиссажу при отношении частот $n \gg 2$.

За последние годы опубликовано большое количество работ о точном измерении угла сдвига фаз, что указывает на важность этой задачи для промышленности, однако вопросам проверки фазометров звукового диапазона частот уделялось мало внимания.

Одним из свойств фигур Лиссажу является переход через $2n$ характерных точек с изменением фазы напряжения низшей частоты на 360° . Наиболее удобно фиксировать моменты «вырождения» фигуры Лиссажу в кривую, форма которой напоминает синусоиду, — назовем ее «разомкнутой фигурой Лиссажу» [3]. Это свойство фигур Лиссажу может быть использовано для получения двух синусоидальных напряжений с точно известными фазовыми соотношениями.

Как показано на блок-схеме рис. 1, напряжение U_1 от генератора Γ с частотой колебаний f поступает на делитель частоты $ДЧ$ с коэффициентом n , а также на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки осциллографа $О$. К горизонтально отклоняющим пластинкам прикладывается напряжение U_2 , частота которого равна $\frac{f}{n}$.

Потенциометрический фазовращатель $ПФ$ на выходе делителя частоты изменяет фазу напряжения U_2 от 0 до 360° . Если принять, что напряжение U_0 на входе фазовращателя имеет начальную фазу, равную 0 , то, изменяя фазу напряжения U_2 на выходе от 0 до 360° , можно установить между этими напряжениями точно известные углы сдвига фаз, кратность которых равна $360^\circ/2n$.

Практически с этой целью может быть использован делитель частоты от частотоизмерительной установки типа УЧ-2 [4], представляющий собой цепочку последовательно включенных триггерных ячеек, каждая из

которых понижает частоту своего входного напряжения в 2 раза, что обеспечивает получение выходных напряжений в диапазоне частот 250–7000 гц при коэффициентах деления, равных, например, 32, 64, 128.

Поворот фазы напряжения низшей частоты осуществляется потенциометрическим фазовращателем [5], блок-схема которого показана на рис. 2. Переменное напряжение прикладывается к фазовращателю по

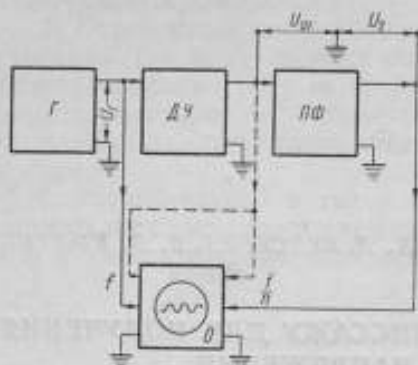


Рис. 1.

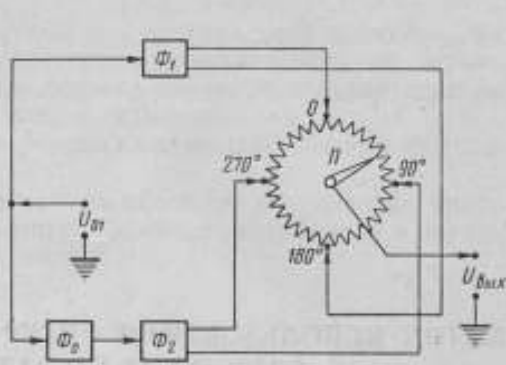


Рис. 2.

двум каналам: по одному каналу — через фазоинверторный каскад Φ_1 , а по другому — через вспомогательный фазовращатель Φ_0 , создающий постоянный угол сдвига фаз 90° в диапазоне звуковых частот, и фазоинверторный каскад Φ_2 . Таким образом, представляется возможным изменять фазовый угол выходного напряжения от 0 до 360° пропорционально углу поворота α ползунка Π . Зависимость значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от угла поворота ползунка Π приведена на рис. 3, откуда видно, что изменение амплитуды напряжения $U_{\text{вых}}$ составляет около 30% от напряжения в точках подключения к круговому потенциометру фазирующих напряжений.

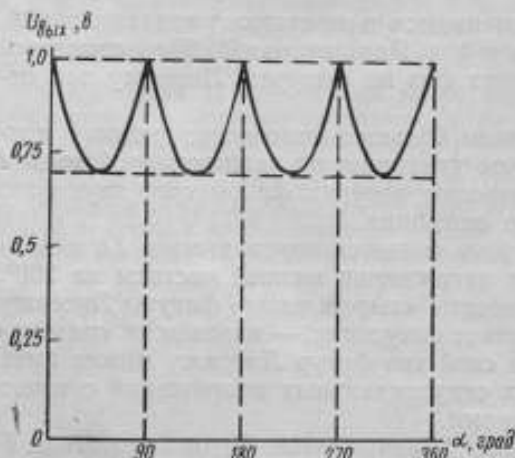


Рис. 3.

Для того чтобы избавиться от этих нежелательных изменений напряжения $U_{\text{вых}}$, последнее преобразуется в импульсы прямоугольной формы с последующим выделением селективным усилителем первой гармоники, что позволяет снизить колебание амплитуды напряжения $U_{\text{вых}}$ до 0,5–1%.

В качестве вспомогательного фазовращателя Φ_0 может быть применен усилитель с глубокой отрицательной связью [6], создающий сдвиг фаз между входом и выходом, близкий к 90° и постоянный в широком диапазоне частот. Принципиальная схема усилителя с обратной связью показана на рис. 4, а его упрощенная эквивалентная схема — на рис. 5.

Легко показать, что напряжение U_2 сдвинуто относительно напряжения U_0 на 90° и имеет амплитуду, равную амплитуде входного напряжения независимо от частоты.

Легко показать, что напряжение U_2 сдвинуто относительно напряжения U_0 на 90° и имеет амплитуду, равную амплитуде входного напряжения независимо от частоты.

Если коэффициент усиления равен K , то

$$U_1' = \frac{U_2'}{K}.$$

Применяя метод наложения, можно написать

$$\frac{U_2'}{K} = U_0 \frac{R_0}{R_0 + (j\omega C_0)^{-1}} + U_2' \frac{(j\omega C_0)^{-1}}{R_0 + (j\omega C_0)^{-1}},$$

откуда

$$\frac{U_0}{U_2'} = \frac{1}{K} + \frac{1}{j\omega R_0 C_0} \left(\frac{1}{K} - 1 \right).$$

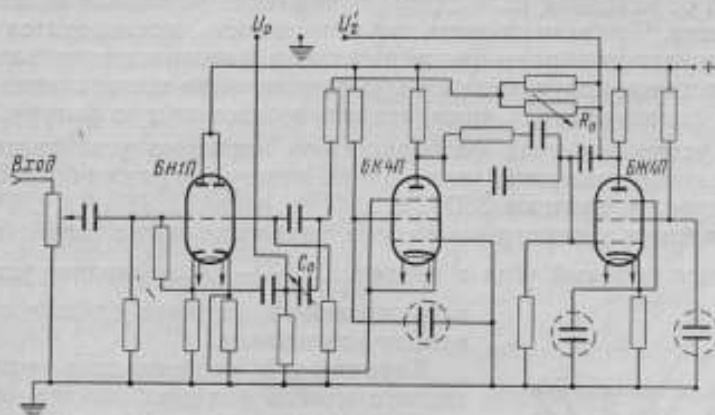


Рис. 4.

При достаточно большом усилении K будет справедливо выражение

$$U_2' = -j\omega R_0 C_0 U_0.$$

При установлении равенства

$$\frac{1}{\omega C_0} = R_0$$

получим

$$U_2' = -jU_0.$$

Таким образом, уравнивая амплитуды на входе и выходе усилителя изменением сопротивления обратной связи R_0 и подбирая определенное значение емкости C_0 , можно получить равноамплитудные напряжения, сдвинутые по фазе на угол 90° . Экспериментальная проверка показала, что усилитель с глубокой обратной связью сохраняет указанное свойство до частот 100 кГц.

Опыт работы с фигурами Лиссажу при отношении частот $n \gg 2$ применительно к измерениям сдвига фаз показывает, что особое внимание следует обратить на фазовую стабильность фигур Лиссажу, которая в первую очередь определяется стабильностью

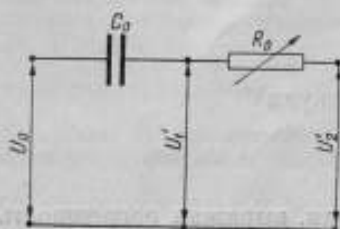


Рис. 5.

частоты генератора; поэтому необходимо использовать генератор, нестабильность частоты которого не превышает $\pm 10^{-6}$.

Установка нулевого фазового сдвига между выходными напряжениями U_{01} и U_2 производится следующим образом. При отношении частот напряжений U_{01} и U_1 , равном $1/n$, с помощью фазовращателя, дополнительно введенного в блок делителя частоты, на экране осциллографа типа ЭО-7 устанавливается исходная разомкнутая фигура Лиссажу. Затем прикладываются напряжения U_{01} и U_2 и регулировкой потенциометрического фазовращателя устанавливается нулевой фазовый сдвиг с погрешностью $\pm(2 \div 4)^\circ$ путем сведения ветвей эллипса в прямую линию.

Наблюдая на осциллографе фигуру Лиссажу при подключении выхода потенциометрического фазовращателя, можно заметить, что она отличается от исходной вследствие погрешности установки нулевого фазового сдвига. Чтобы исключить эту погрешность, производится небольшая подрегулировка потенциометрического фазовращателя так, чтобы фигура Лиссажу, получающаяся при подключении выхода потенциометрического фазовращателя, превратилась в разомкнутую фигуру.

После установки нуля фазовращателя несложно установить любое другое желаемое значение угла сдвига между напряжениями U_{01} и U_2 через интервалы, кратные $360^\circ/2n$.

Добавление к рассмотренной схеме дополнительного фазовращателя, изменяющего фазовый угол в пределах $\pm \frac{360^\circ}{2n}$ [7], позволяет устанавливать желаемый фазовый сдвиг в пределах каждого интервала.

Характерной особенностью рассматриваемого метода является то, что фазовращатель, делитель частоты и другие элементы схемы не вносят погрешностей. Погрешность определяется неточностью совмещения кривых на экране осциллографа.

Обозначая через T_1 период колебаний напряжения U_1 , а через T_2 — период колебаний напряжения U_2 , получаем

$$T_1 = \frac{T_2}{n}.$$

Учитывая, что отрезок AC (рис. 6) соответствует $T_1/2$, а неточность совмещения кривых (отрезок AB) соответствует некоторой доле периода ΔT_1 , будем иметь следующее соотношение:

$$\frac{2AC}{T_1} = \frac{AB}{\Delta T_1},$$

откуда

$$\Delta T_1 = \frac{T_2}{n} \cdot \frac{AB}{2AC},$$

или, выражая погрешность в градусах, получим

$$\Delta \varphi = \frac{360^\circ}{n} \cdot \frac{AB}{2AC}.$$

Таким образом, погрешность $\Delta \varphi$ уменьшается с увеличением коэффициента деления n .

Можно считать, что наблюдатель фиксирует момент совпадения линий изображения с точностью до ширины линии, т. е. в худшем случае — с погрешностью ± 1 мм. Длина же отрезка AC определяется усилением горизонтального канала осциллографа и может быть $30 \div 50$ мм. Поэтому при коэффициенте деления $n = 128$ абсолютная погрешность установки фазовых сдвигов между напряжениями U_{01} и U_2 равна

$$\Delta\varphi = \frac{360^\circ}{128} \cdot \frac{1}{100} \approx 0,03^\circ.$$

Все сказанное относится также к случаю, когда используется умножитель частоты; блок-схема устройства в этом случае принимает вид, показанный на рис. 7, где $УЧ$ — умножитель частоты; $ДФ$ — дополнительный фазовращатель; Φ — фазовращатель ($0 \div 360^\circ$); Γ — задающий генератор; $О$ — осциллограф.

Рассмотренный метод может быть рекомендован при создании образцовых установок для поверки фазометров звукового диапазона частот.

Созданный в лаборатории электрических измерений ВНИИМ макет, основанный на этом методе, позволил прокалибровать фазометр, разработанный в Институте электро-механики АН СССР [8], который построен по методу измерения геометрической разности векторов напряжений, зависящей от угла сдвига фаз между ними. Учитывая, что фазометр по точности соответствует классу 2,5, оказалось достаточным использование коэффициента деления $n = 32$.

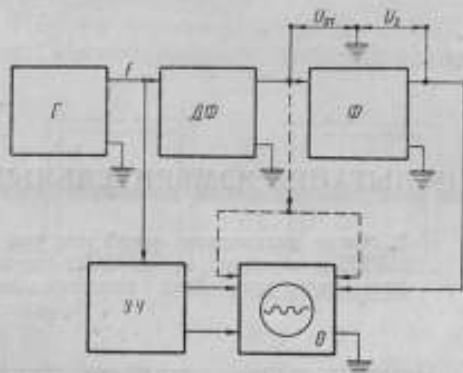


Рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин А. И., Измерение малых углов сдвига фаз при помощи электронно-лучевой трубки, «Измерительная техника», № 5, 1958, стр. 57.
2. Katz E. S., Phase Shift Measuring System, «Tele-Tech», v. 11, № 1, 1952, p. 39.
3. Фюрстенберг А. Н., Сравнение частот методами синусоидальной и эллиптической разверток, «Успехи физических наук», т. LXVIII, вып. 2, 1959, стр. 323.
4. Вейсбрут А. Д., Установки для поверки частотоизмерительных приборов в диапазоне 16 гц — 25 Мгц, Сборник рефератов № 1, Л., 1956, стр. 31.
5. Асеев Б. П., Фазовые соотношения в радиотехнике, Связьиздат, М., 1954.
6. Ragazzini J. R., Zadeh L. A., A Wide Band Audio Phase Meter, «The Review of Scientific Instruments», v. 21, № 2, 1950, p. 145.
7. Калашников Н. И., Синицкий Л. А., Применение RC фазовращателей для измерения малых фазовых сдвигов методом компенсации, «Приборы и техника эксперимента», № 4, 1957, стр. 97.
8. Ковалевская В. В., Попов В. С., Прибор для измерения сдвига фаз между двумя напряжениями, «Передовой научно-технический и производственный опыт», сборник № 1, тема 35, 1958.

Поступила в редакцию
2/ХII 1959 г.

А. А. ЧУХЛАНЦЕВ

Свердловский филиал ВНИИМ

ИСПЫТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ТИПА И58 и И505

В статье рассмотрен метод проверки измерительных устройств типа И58 и И505 с помощью соединенных параллельно мер сопротивления и результаты испытания этих измерительных устройств в эксплуатационных условиях.

Измерительные устройства типа И58 и И505, изготавливаемые киевским заводом «Точэлектроприбор», предназначены для измерения больших постоянных токов. Принцип действия устройств основан на зависимости магнитной проницаемости сердечника дросселя от силы подмагничивающего постоянного тока.

Известно большое число устройств, основанных на этом принципе [1].

Они получили название измерительных трансформаторов постоянного тока.

Принципиальная схема устройства типа И58 приведена на рис. 1. Пакет шин с измеряемым током проходит внутри отверстий двух тороидальных магнитопроводов (сердечников) 1 и 2 из пермаллоя. На каждом магнитопроводе имеются по две обмотки: w_{-} — обмотка переменного тока и w_{oc} — обмотка отрицательной обратной связи.

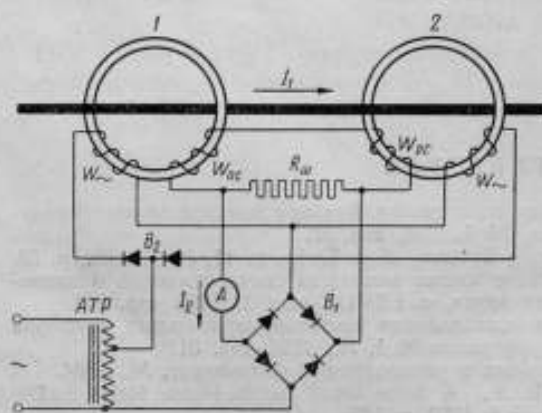


Рис. 1. Принципиальная схема устройства типа И58.

Обмотки переменного тока обоих магнитопроводов соединяются параллельно, с таким расчетом, чтобы они образовали встречные потоки, а обмотки обратной связи — последовательно и согласно. С помощью однополупериодных селеновых выпрямителей B_2 обмотки переменного тока используются для получения дополнительной обратной связи. Переменный намагничивающий ток, поступающий в обмотку w_{-} от автотрансформатора ATP , выпрямляется с помощью моста

из селеновых выпрямителей B_1 . Среднее значение выпрямленного тока I_2 является мерой измеряемого постоянного тока I_1 . По аналогии с обычными измерительными трансформаторами токи I_1 и I_2 называют первичным и вторичным токами.

Сопротивление $R_{ш}$, включенное параллельно обмоткам обратной связи, служит для регулирования обратной связи, чем достигается изменение коэффициента трансформации устройства при подгонке его на заводе-изготовителе.

Измерительные устройства типа И58 изготавливаются на номинальные значения первичного тока 7500, 10 000, 15 000, 20 000, 25 000, 35 000, 50 000 и 70 000 а. Номинальное значение вторичного тока равно 5 а. По точности устройства соответствуют классу 1,5.

Конструктивно устройства типа И58 на первичный ток до 35 000 а выполняются в виде двух блоков: измерительного трансформатора постоянного тока и вспомогательного устройства. Блок трансформатора состоит из двух магнитопроводов с обмотками переменного тока и обратной связи. В блок вспомогательного устройства входят селеновые выпрямители B_1 и B_2 , автотрансформатор, вольтметр для контроля напряжения переменного тока и предохранитель.

Устройства на ток 50 000 и 70 000 а, состоят из двух трансформаторов с номинальными значениями первичного тока 25 000 и 35 000 а, вспомогательного и суммирующего устройства. Трансформаторы постоянного тока монтируются на шинном разветвлении в цепи первичного тока. Вторичные токи трансформаторов поступают в суммирующее устройство, которое является измерительным трансформатором постоянного тока с многовитковой первичной обмоткой и коэффициентом трансформации 10/5 а. Его схема отличается от приведенной на рис. 1 только отсутствием выпрямителей B_2 и сопротивления $R_{ш}$.

Измерительное устройство типа И505 имеет номинальное значение первичного тока 200 000 а и класс точности 1. Устройство состоит из сорока измерительных блоков.

Принципиальная схема одного блока устройства типа И505 приведена на рис. 2. Так же как и у трансформатора типа И58, шина или пакет с постоянным током I_1 , являющимся частью общего измеряемого тока, проходит внутри отверстий двух прямоугольных магнитопроводов 1 и 2 из пермаллоя. Обмотки переменного тока w_{\sim} , по одной на каждом магнитопроводе, соединены последовательно и встречно. В цепь переменного тока включены два малогабаритных измерительных трансформатора $ТТ_1$ и $ТТ_2$. Вторичный ток трансформатора $ТТ_1$ через мост из германиевых выпрямителей поступает в цепь прибора, с помощью которого ведут контроль тока I_1 , получаемого от одного ртутного выпрямителя, мотор-генератора и т. п.

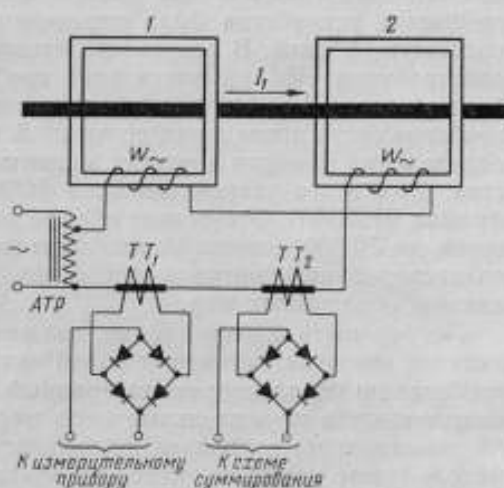


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного блока устройства типа И505.

Вторичный ток трансформатора TT_2 через такой же мост суммируется с токами других измерительных блоков путем параллельного соединения вторичных цепей трансформаторов TT_2 всех измерительных блоков. Сумму вторичных токов измеряют прибором, с помощью которого ведут контроль силы тока в общей цепи источников питания, включенных параллельно.

Следует отметить, что как в устройстве типа И58, так и в устройстве типа И505 для уменьшения влияния потоков рассеяния на погрешность коэффициента трансформации обмотки переменного тока каждого магнитопровода разделены на четыре параллельно соединенные секции.

Метод поверки

Первый образец устройства типа И58 с номинальным значением первичного тока 70 000 *a* был представлен на испытания во ВНИИМ. Погрешность устройства была определена методом эквивалентной магнитодвижущей силы. В результате испытаний было установлено, что устройство типа И58 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приборам класса 1,5. Однако в заключении ВНИИМ было указано на необходимость проведения испытаний в условиях эксплуатации с целью определения влияния внешних магнитных полей на погрешность устройства. Для этого устройство типа И58 было передано в Свердловский филиал ВНИИМ. Отсутствие образцовых мер и приборов для измерения токов до 70 000 *a* потребовало проведения в филиале ВНИИМ работы по исследованию методов измерения больших постоянных токов и созданию образцовых мер.

Погрешность измерений не должна превышать $\pm 0,3 - \pm 0,4\%$ при наличии внешних магнитных полей напряженностью до 10 000 *a/m*. Этому требованию удовлетворяет выбранный метод измерения тока с помощью включенных в параллельные цепи мер сопротивления с объединенными потенциальными зажимами одинаковой полярности. В дальнейшем этот метод будем называть методом объединения потенциальных зажимов. Результаты измерения тока этим методом не зависят от влияния магнитных полей. Достоинством метода является также возможность поверки мер при токах, значительно меньших, чем ток в общей цепи.

Хотя метод объединения потенциальных зажимов и был описан ранее [2, 3], однако вопрос о его практическом применении мог быть решен только после проведения анализа и оценки погрешности, а также после повышения точности мер малого сопротивления, предназначенных для больших токов. В результате ранее проведенных филиалом ВНИИМ работ в принципе была установлена возможность повышения точности мер малого сопротивления на большие токи и изготовления мер класса 0,1, однако такие меры не были еще изготовлены. Поэтому с целью ускорения проведения испытаний устройств типа И58 было решено использовать образцовые меры, созданные путем усовершенствования шунтов, выпускаемых нашей промышленностью.

Ниже приводится анализ погрешности измерения тока методом объединения потенциальных зажимов для наиболее простого и в то же время основного в практике измерений случая применения мер с одинаковым номинальным значением сопротивления. Принципиальная схема включения мер сопротивления представлена на рис. 3, где приняты следующие обозначения: R_1, R_2, \dots, R_n — сопротивления мер; $r_1, \dots, r_n, r'_1, \dots, r'_n$ — сопротивления потенциальных проводов с уравнивательными катушками; $I^1, \dots, I^n; i_1, \dots, i_n, i'_1, \dots, i'_n$ — токи в мерах и потенциа-

ных проводах; ИУ — измерительное устройство; I_1 и I_2 — первичный и вторичный токи; R_N — образцовая катушка сопротивления; R_n — сопротивление нагрузки; Π_1 и Π_2 — потенциометры.

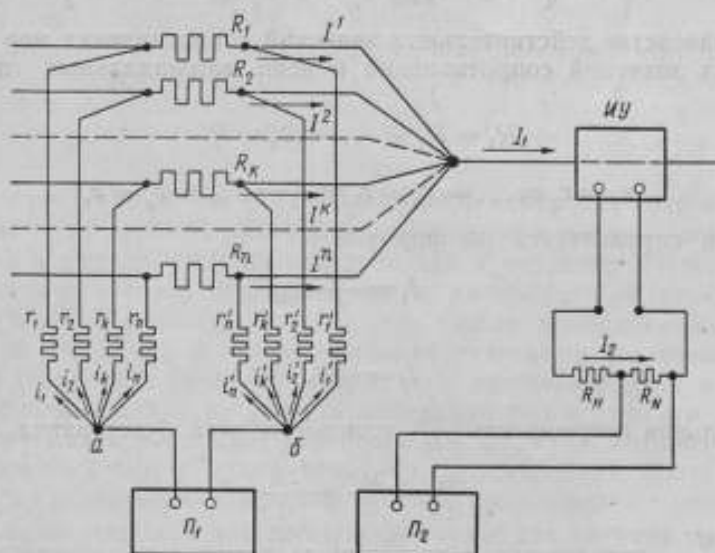


Рис. 3. Принципиальная схема измерения тока с помощью параллельно включенных мер сопротивления и проверки устройств типа И58 и И505.

Измерение падения напряжения между объединенными потенциальными зажимами осуществляется с помощью потенциометра Π_1 . Для каждой ветви между точками a и b справедливо равенство

$$U = i_k r_k + I^k R_k - i_k r_k' \quad (1)$$

где U — падение напряжения между объединенными потенциальными зажимами.

Представим r_k , r_k' , R_k и I^k в виде

$$r_k = r + \Delta r_k; \quad r_k' = r + \Delta r_k'; \quad R_k = R + \Delta R_k; \quad I^k = I + \Delta I_k \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n + r_1' + r_2' + \dots + r_n'}{2n} \\ R &= \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n} \\ I &= \frac{I^1 + I^2 + \dots + I^n}{n} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подставляя значения r_k , r_k' , R_k и I^k из (2) в (1) и производя суммирование по k , получим

$$nU = nIR + \sum_{k=1}^{k=n} (i_k \Delta r_k - i_k \Delta r_k' + \Delta I_k \Delta R_k) \quad (4)$$

отсюда

$$I_1 = \frac{nU}{R} \left[1 - \frac{1}{nU} \sum_{k=1}^{k-n} (i_k \Delta r_k - i'_k \Delta r'_k + \Delta I_k \Delta R_k) \right], \quad (5)$$

При равенстве действительных значений сопротивления мер и действительных значений сопротивлений в цепи потенциальных проводов, т. е. при

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$$

и

$$r_1 = r_2 = \dots = r_n = r'_1 = r'_2 = \dots = r'_n = r, \quad (6)$$

сила тока определяется по формуле

$$I_1 = \frac{nU}{R} \quad (7)$$

или

$$I_1 = \frac{U}{R_s}. \quad (8)$$

Относительная погрешность $\frac{\Delta I_1}{I_1}$ измерения тока будет равна

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta R}{R}, \quad (9)$$

здесь $\frac{\Delta U}{U}$ — относительная погрешность измерения падения напряжения между объединенными потенциальными зажимами; $\frac{\Delta R}{R}$ — относительная погрешность определения среднего арифметического действительных значений сопротивления мер.

Относительная погрешность определения среднего арифметического действительных значений сопротивления мер не превышает максимального значения относительной погрешности определения сопротивления отдельных мер. Условия (6) могут быть выполнены только приближенно, поэтому погрешность измерения тока при вычислении его по формулам (8) или (9) будет равна

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta R}{R} + \delta_0, \quad (10)$$

где δ_0 — относительная погрешность определения тока по упрощенной расчетной формуле.

Из выражения (5) следует:

$$\delta_0 = -\frac{1}{nU} \sum_{k=1}^{k-n} (i_k \Delta r_k - i'_k \Delta r'_k + \Delta I_k \Delta R_k). \quad (11)$$

Обозначим разности потенциалов между объединенными потенциальными зажимами и потенциальными зажимами самих мер, имеющих ту же полярность, соответственно через u_k и u'_k . Подставляя соотношения

$$\left. \begin{aligned} i_k &= \frac{u_k}{r_k} \\ i'_k &= \frac{u'_k}{r'_k} \\ u_k - u'_k &= U - I^k R_k = \Delta U_k \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

в выражение (11) и пренебрегая малыми второго порядка, получим

$$\delta_0 = -\frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} \left[\left(\frac{\Delta r_k}{r} + \frac{\Delta R_k}{R} \right) \frac{\Delta U_k}{U} - \frac{\delta_k}{r} \frac{u_k'}{U} \right], \quad (13)$$

здесь

$$\frac{\delta_k}{r} = \frac{\Delta r_k' - \Delta r_k}{r}$$

Как видно из формулы (13), погрешность измерения тока вследствие применения упрощенной расчетной формулы при неодинаковых сопротивлениях в цепи потенциальных проводов и неравных сопротивлениях мер зависит от степени неравномерности распределения тока в параллельных цепях и разности потенциалов между объединенными потенциальными зажимами и потенциальными зажимами на самих мерах. Формула (13) может быть использована для внесения поправки в результат измерений. Однако в практике измерений более удобным представляется уменьшить погрешность упрощенной формулы до пренебрежимо малой величины путем применения мер сопротивления более высокой точности и уравнильных катушек в цепях потенциальных проводов.

Оценка погрешности упрощенной формулы для расчета тока может быть произведена с помощью соотношения, получаемого на основании формулы (13):

$$\delta_0 \leq \left| \frac{\Delta r_k}{r} + \frac{\Delta R_k}{R} \right|_{\max} \left| \frac{\Delta U_k}{U} \right|_{\text{cp}} + \left| \frac{\delta_k}{r} \right|_{\max} \left| \frac{u_k'}{U} \right|_{\text{cp}} \quad (14)$$

Индексом «ср» обозначены арифметические средние, а индексом «max» — наибольшие значения соответствующих величин. Формула (14) может служить также и для определения требуемой точности подгонки сопротивлений в цепи потенциальных проводов и класса точности мер сопротивления.

Позднее был произведен анализ погрешности метода объединения потенциальных зажимов, а также случая применения мер с неодинаковыми номинальными значениями сопротивления [4].

При испытаниях или поверке устройств для измерения больших постоянных токов с помощью описанного выше метода в качестве мер сопротивления могут быть использованы шунты, включенные в цепи источников питания (ртутных выпрямителей, мотор-генераторов и т. п.), или специальный комплект мер, который монтируется в общей цепи тока.

В первом случае действительные значения сопротивлений шунтов следует измерять на месте установки при тех же значениях токов, которые будут протекать по ним при поверке устройства типа И58. Токи в цепях источников питания отличаются друг от друга не более чем на 10%, так как в нормальном режиме нагрузка между ними распределена приблизительно равномерно.

В самых неблагоприятных случаях максимальное значение разности потенциалов между объединенным потенциальным зажимом и потенциальным зажимом меры может в 10÷15 раз превышать падение напряжения между объединенными потенциальными зажимами. Поэтому, как правило, требуемая точность попарной подгонки сопротивлений в цепи потенциальных проводов, присоединяемых к каждому шунту, выше, чем

точность подгонки сопротивлений в цепях проводов, присоединяемых к разным шунтам, т. е.

$$\frac{\delta_k}{r} < \frac{\Delta r_k}{r}$$

Как показывает расчет, при разности сопротивлений в цепях потенциальных проводов, не превышающей $\pm(0,1-0,2)\%$ от среднего значения, и разности сопротивлений, присоединяемых к каждому шунту попарно, не большей чем $\pm 0,01\%$, погрешность, вызываемая применением упрощенной расчетной формулы, не превышает $\pm 0,1\%$ даже в самых неблагоприятных случаях измерения тока силой до $70-100$ ка.

Если действительные значения сопротивлений шунтов определены с погрешностью, не превышающей $\pm 0,2\%$, и погрешность измерения падения напряжения между объединенными потенциальными зажимами не превышает $\pm 0,1\%$, то согласно выражению (10) максимальная погрешность измерения тока будет не больше $\pm 0,4\%$, что вполне достаточно для поверки приборов класса 1,5. При уменьшении погрешности определения действительных значений сопротивления шунтов до $\pm 0,1\%$ и погрешности измерения падения напряжения до $\pm 0,05\%$ метод может быть применен и для поверки приборов класса 1 на токи до $70-100$ ка.

Применение специального комплекта мер дает повышение точности метода как вследствие уменьшения разности потенциалов между объединенными потенциальными зажимами и потенциальными зажимами мер, так и вследствие применения мер более высокого класса точности.

В этом случае погрешность, вызываемая применением упрощенной расчетной формулы, легко может быть уменьшена до пренебрежимо малой величины, и погрешность измерения тока будет определяться по формуле (9).

При применении комплекта мер класса 0,1 и измерении падения напряжения с погрешностью, не превышающей $\pm 0,05\%$, максимальная погрешность измерения тока не превысит $\pm 0,15\%$, что позволит производить испытания и поверку приборов класса 0,5 при токах силой до 100 ка.

Испытания устройств типа И58 и И505

Для испытания устройств типа И58 на 70 ка в качестве образцовых мер был использован комплект из 12 шунтов типа ШС75 на 6000 а, 75 мв, предварительно исследованных филиалом ВНИИМ совместно с ВНИИМ [5]. При испытании устройства типа И58 шунты были включены в шинном разветвлении последовательно с двумя трансформаторами типа И58/3, входящими в комплект устройства.

Поверка производилась по схеме, представленной на рис. 3. Измерение напряжения на объединенных потенциальных зажимах производилось с помощью пятидекадного потенциометра, а измерение напряжения на образцовой катушке в $0,01$ ом — с помощью технического потенциометра типа ПП. Необходимость применения двух потенциометров вызывалась недостаточной устойчивостью первичного тока.

Применение компенсационных схем, например подобных схеме Шеринга — Альберти, применяемой для поверки трансформаторов переменного тока, не представлялось возможным из-за отсутствия разделительного трансформатора с надежной изоляцией для питания устройства типа И58.

Погрешность определения коэффициента трансформации не превышала $\pm 0,4\%$. Испытание первого образца устройства типа И58 с несекционированными обмотками, проведенное в конце 1955 г., показало, что

погрешность устройства сильно зависит от расположения трансформаторов по отношению к изгибам ошиновки и от центрирования пакета шин в окне трансформаторов, т. е. от неравномерности распределения м. д. с. вдоль магнитопровода.

С целью дополнительной проверки влияния этого фактора трансформаторы типа И58 после демонтажа были поверены методом эквивалентной м. д. с. при равномерном и неравномерном распределении витков с первичным током. Результаты измерений для одного из трансформаторов типа И58/3 приведены в виде кривых на рис. 4. Там же приведены результаты измерений в условиях эксплуатации.

Из результатов испытания видно, что погрешность устройства должна каждый раз определяться на месте установки, что совершенно неприемлемо, так как в этом случае регулировку и подгонку коэффициента трансформации потребовалось бы производить не на заводе-изготовителе, а в условиях эксплуатации.

Кроме того, было установлено, что погрешность устройства сильно зависит от нагрузки вторичной цепи вследствие неудачного выбора режима работы селеновых выпрямителей суммирующего устройства.

На основании результатов испытания заводом «Точэлектроприбор» был изготовлен усовершенствованный образец устройства типа И58. В результате испытания нового образца было установлено, что изменение погрешности коэффициента трансформации устройства

в рабочем диапазоне не превышает 0,7%, но коэффициент трансформации отличается от номинального в среднем на 3%. При этом центрирование пакета шин и наличие изгибов ошиновки на расстоянии 1 ÷ 1,5 м от места установки трансформаторов практически не оказывает влияния на погрешность коэффициента трансформации. Проверка методом эквивалентной м. д. с. показала, что влияние неравномерного распределения витков с первичным током на погрешность коэффициента трансформации значительно уменьшилось по сравнению с первым образцом устройства.

Однако проверка трансформаторов типа И58/3, входящих в комплект устройства, в условиях эксплуатации и проверка их методом эквивалентной м. д. с. дают результаты, отличающиеся в среднем на 2% (рис. 5). Несмотря на это, ввиду благоприятной нагрузочной характеристики устройства типа И58 было решено рекомендовать его к серийному выпуску по классам 1,5 и 1 при условии, что проверка будет производиться заводом-изготовителем при номинальном токе.

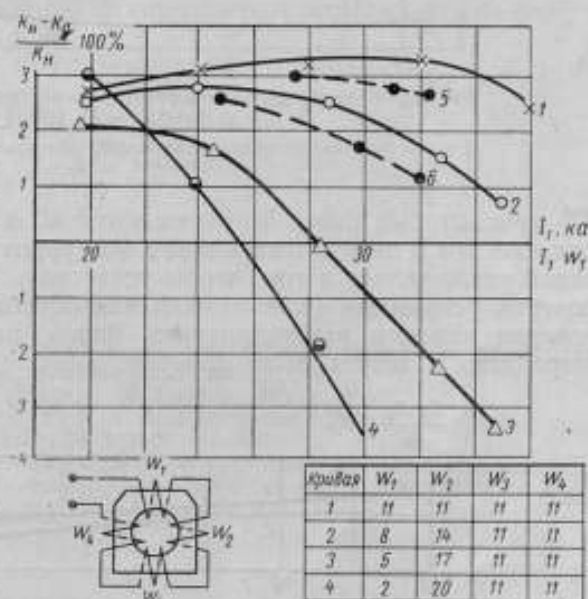


Рис. 4. Кривые погрешностей первого образца трансформатора 35 000/5а типа И58/3.

1—4 — при проверке методом эквивалентной м. д. с.; 5, 6 — при проверке в условиях эксплуатации.

В 1958 г. завод «Точэлектроприбор» представил на испытание устройство типа И505. Ввиду того, что токи до 200 ка на заводах еще не применяются, для испытаний был изготовлен образец устройства типа И505 на 70 ка, состоявший из четырнадцати измерительных блоков вместо сорока. Отличие их от блоков, входящих в устройство на 200 ка, заключалось в том, что коэффициент трансформации трансформаторов

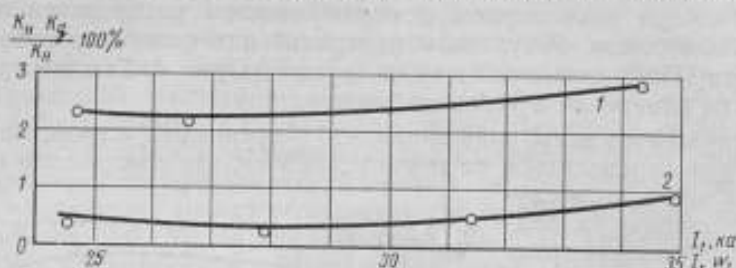


Рис. 5. Кривые погрешностей второго образца трансформатора 35 000/5а типа И58/3.

1 — при проверке в условиях эксплуатации; 2 — при проверке методом эквивалентной м. а. с.

TT_2 (рис. 2) был равен $5/14$ а вместо $5/40$ а, с тем чтобы общий номинальный ток в цепи суммирования был равен 5 а. Главная задача испытаний заключалась в том, чтобы установить возможность поэлементной проверки устройства (т. е. нахождения общей погрешности по данным проверки каждого измерительного блока поотдельности). Для этого устройство в целом было поверено вначале по той же схеме, что и

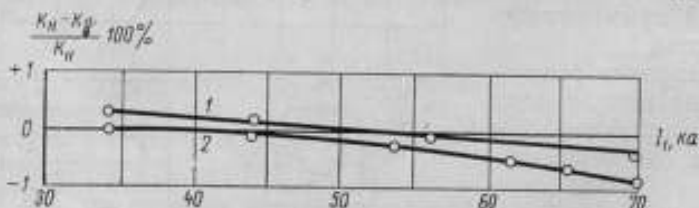


Рис. 6. Кривые погрешностей устройства типа И505.

1 — по результатам измерения первичного тока и тока в цепи суммирования; 2 — на основании проверки отдельных измерительных блоков.

устройство типа И58, а затем была определена погрешность коэффициента трансформации в цепи суммирования каждого измерительного блока. Измерение первичного тока каждого измерительного блока производилось с помощью одного из шунтов типа ШС75, входящих в комплект.

Погрешность, с которой определялся коэффициент трансформации каждого измерительного блока, и устройства в комплекте не превышала $\pm 0,3\%$. На рис. 6 даны нагрузочные характеристики устройства типа И505, построенные по результатам измерения первичного тока и тока в цепи суммирования и на основании проверки отдельных измерительных блоков. Разность между этими характеристиками не превышает $0,5\%$, что находится в пределах погрешности измерений. Это доказывает возможность проверки устройства типа И505 путем проверки отдельных измерительных блоков. Следует отметить, что в диапазоне изменения первичного тока от 50 до 100% номинального значения погрешность коэффициента трансформации изменяется на $0,8\%$, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приборам класса I.

Заключение

Метод объединения потенциальных зажимов мер сопротивления, включенных в параллельные цепи, при применении комплекта мер класса 0,1 дает возможность измерять токи до 70—100 ка с погрешностью, не превышающей $\pm 0,15\%$, и с погрешностью, не превышающей $\pm 0,25 \div \pm 0,4\%$ — при использовании шунтов в цепях источников питания (ртутных выпрямителей, мотор-генераторов т. п.), работающих параллельно на общую цепь.

Метод может быть применен при испытаниях и поверках приборов для измерения постоянных токов до 70—100 ка класса 0,5 \div 1,5.

Поверка измерительных устройств типа И58 и их регулировка на заводе-изготовителе должны производиться при номинальном токе. Необходимо продолжать работы по определению возможности их поверки методом эквивалентной м. д. с.

Устройство типа И505 может поверяться поэлементно, т. е. путем поверки каждого измерительного блока в отдельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толстов Ю. Г. Измерительные трансформаторы постоянного тока, М.—Л., 1951.
2. Нестеренко А. Д. К точным измерениям больших постоянных токов, Сборник трудов Института электротехники АН УССР, вып. 7, 1951.
3. Field M. B., «The Electrician», v. 87, London, 1921, p. 208.
4. Рудый Н. М., Чухланцев А. А. Повышение точности мер малого сопротивления, «Измерительная техника», № 5, 1957, стр. 56.
5. Румянцев А. С., Чухланцев А. А., Дубовик Е. П., О погрешностях шунтов для измерения больших токов, Труды ВНИИМ, вып. 38(98), 1959.

Поступила в редакцию
14/VII 1959 г.

А. Д. ВЕЙСБРУТ, В. К. ПОТЕХИН

ВНИИМ

СЧЕТЧИК ИМПУЛЬСОВ НА ДЕКАТРОНАХ И ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОННОГО ХРОНОМЕТРА И ЧАСТОТОМЕРА

В статье описывается счетчик импульсов на декатронах, могущий найти применение в качестве хронометра и частотомера; даны принципиальные схемы узлов прибора. Основные его характеристики: емкость счета 9999, разрешающая способность 100 мксек, максимальная частота периодических импульсов 10 кгц

В последние годы отечественная промышленность приступила к выпуску специальных газоразрядных счетных ламп-декатронов, способствующих созданию сравнительно простых счетных устройств. В связи с этим в лаборатории электрических измерений ВНИИМ был разработан

прибор, представляющий собой электронный четырехдекадный счетчик импульсов на декатронах с входным устройством, которое позволило расширить область его применения, т. е. использовать прибор не только в качестве счетчика числа импульсов напряжения, а следовательно, и делителя частоты, но и в качестве электронного хронометра или цифрового частотомера.

Блок-схема прибора, состоящего из входного устройства ВУ, формирующих каскадов $\Phi K_1 - \Phi K_4$ и счетных декад $СД_1 - СД_4$, приведена на рис. 1.

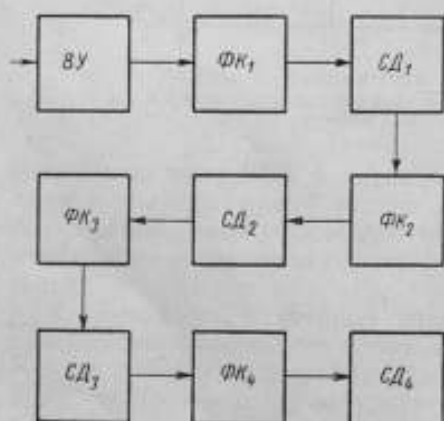


Рис. 1.

Входное устройство, принципиальная схема которого приведена

на рис. 2, состоит из следующих трех каскадов: усилителя-ограничителя на лампе L_1 , предназначенного для обеспечения работы счетчика в широком диапазоне входных напряжений, пуско-останавливающего триггера на лампе L_2 , необходимого для применения прибора в качестве электронного хронометра или частотомера, и следящего реле [1] на лампе L_3 , фор-

мирующего прямоугольные импульсы. Подлежащие счету импульсы подаются на вход *I* (левый триод лампы L_1), усиливаются, ограничиваются и поступают на управляющую сетку следящего реле L_3 . Потенциал управляющей сетки следящего реле L_3 определяется состоянием триггера L_2 . Когда выключатель B_1 разомкнут, правая половина лампы L_2 отперта и потенциал управляющей сетки следящего реле L_3 таков, что оно не заперто и может управляться импульсами, поступающими с анодной цепи правой половины лампы L_1 . В этом случае прибор действует как счетчик импульсов.

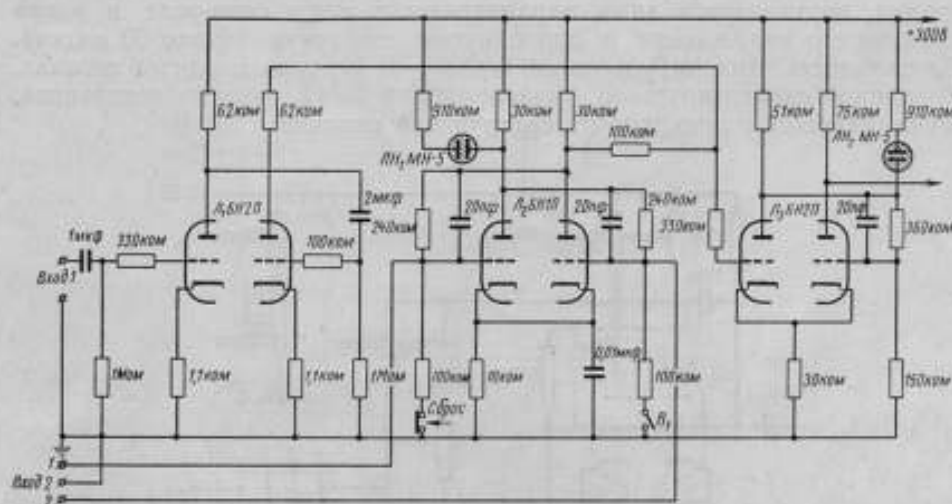


Рис. 2.

Если выключатель B_1 замкнуть, то прибор может быть применен в качестве электронного хронометра. После нажатия кнопки «Сброс» левый триод триггера L_2 окажется отпертым, а правый — запертым. Потенциал на управляющей сетке следящего реле L_3 повышается и оно оказывается также запертым. Поданный на вход 2 пусковой импульс опрокидывает пуско-останавливающий триггер L_2 , следящее реле L_3 отпирается и счетчик начинает считать число периодов напряжения генератора стабильной частоты, который должен быть присоединен к входу *I*. Счет прекращается, когда на вход 2 поступает останавливающий импульс, который возвращает пуско-останавливающий триггер L_2 в исходное состояние, при котором следящее реле L_3 запирается. Показание прибора равно промежутку времени между пусковым и останавливающим импульсами и будет выражено в единицах времени в соответствии со значением частоты генератора.

В случае использования прибора в качестве частотомера на вход 2 должны подаваться секундные импульсы, а на вход *I* — напряжение генератора, частота которого измеряется. Таким образом осуществляется счет числа периодов колебаний генератора неизвестной частоты за единицу времени и поэтому показание прибора будет выражено в герцах.

Необходимо отметить, что пуск и остановка прибора могут производиться импульсами любой полярности, но при условии, если они будут поданы на зажимы 1 и 2 входа 2 в надлежащей последовательности. Например, если пусковой и останавливающий импульсы отрицательны, то первый должен быть подан на зажим 1 и второй — на зажим 2 входа 2.

Принципиальная схема первой счетной декады с формирующим каскадом приведена на рис. 3. На формирующий каскад управляющие импульсы поступают от следящего реле \mathcal{L}_3 (рис. 2), на выходе которого образуются импульсы отрицательной полярности. Благодаря малой постоянной времени переходной цепи эти импульсы дифференцируются и поступают затем на формирующий каскад первой счетной декады (рис. 3), который может управляться только импульсами отрицательной полярности, так как его левый триод нормально открыт, а правый — заперт. Таким образом, длительность импульсов отрицательной полярности на выходе формирующего каскада, предназначенных для управления декастрономом, определяется лишь параметрами данного кипл-реле и равна времени его нахождения в опрокинутом состоянии (около 50 мксек). Длительность этих импульсов не зависит от периода входного сигнала. Временной сдвиг импульсов, подаваемых на кольцо вторых подкатодов, осуществляется с помощью интегрирующей цепочки.

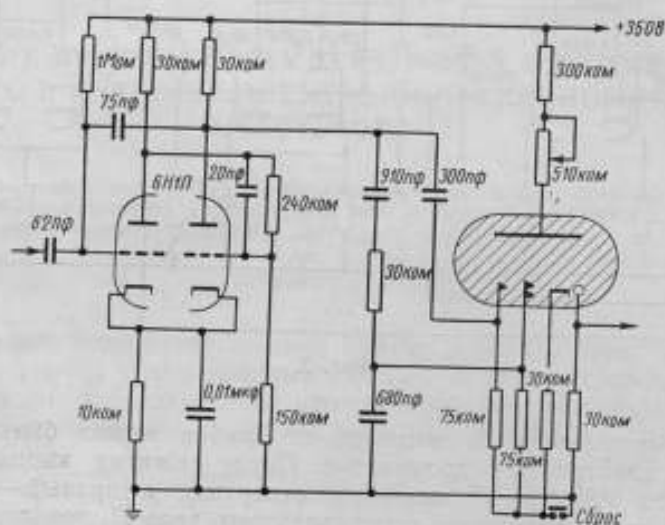


Рис. 3.

Примененные в приборе схемы формирования значительно проще схем, описанных в литературе [2]. В случае использования прибора в качестве счетчика числа импульсов схема формирования может содержать всего 2 лампы (\mathcal{L}_1 и формирующий каскад первой счетной декады), тогда как ранее применявшиеся схемы содержали до 5 ламп. Устройство надежно работает в широком диапазоне частот — от единичных импульсов и до частот $10,5 \div 11$ кГц.

Все остальные счетные декады со своими формирующими каскадами однотипны; схема их приведена на рис. 4. Входные положительные прямоугольные импульсы, полученные в цепи нулевого катода декастроном предыдущей счетной декады, подаются на управляющие сетки нормально запертых триодов и отпирают их. Отрицательные импульсы на кольцо первых подкатодов снимаются с анодной нагрузки левого триода, а на кольцо вторых подкатодов подаются через интегрирующую цепочку с анода правого триода.

Выходные импульсы снимаются с сопротивления в цепи нулевого катода декастроном.

Прибор прост по конструкции, содержит мало деталей и потребляет малую мощность от источника анодного питания. Внешний вид прибора, изготовленного на основании описанной выше схемы, приведен на рис. 5. Прибор имеет следующие основные технические характеристики: емкость счета — 9999, разрешающая способность — 100 мксек, максимальная частота периодических импульсов — 10 кГц, амплитуда входных импульсов $1,5 \pm 150$ в.

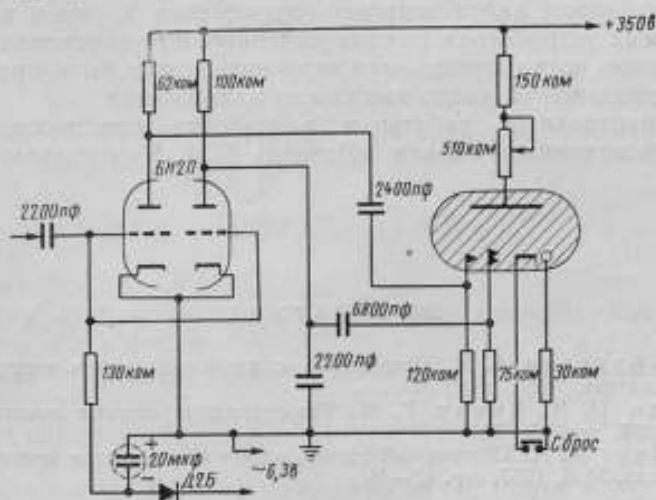


Рис. 4.

Питание прибора производится от сети переменного тока напряжением 110—127—220 в. Анодные цепи питаются от выпрямителей на полупроводниковых диодах. Потребляемая мощность от сети переменного тока — около 50 ватт. Прибор заключен в металлический кожух размерами $330 \times 170 \times 230$ мм.

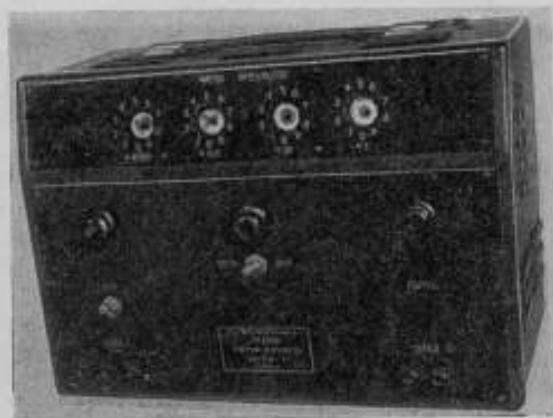


Рис. 5.

Испытания прибора производились с помощью образцового датчика малых промежутков времени типа ДМПВ-1 [3]. В процессе испытаний выяснено, что прибор в режиме электронного хронометра при подаче на его вход 1 эталонной частоты 10 кГц работает устойчиво, позволяя измерять промежутки времени от 100 мксек до 0,9999 сек со случайной

погрешностью ± 100 мксек, свойственной приборам этого рода. Необходимо отметить, что декатроны для данного прибора были тщательно отобраны и после этого прибор продолжал надежно работать в течение длительного времени (около 2 лет).

В заключение следует отметить, что данный прибор значительно проще по конструкции, чем существующие для этих же целей приборы, имеющие ту же точность. Разработанный прибор благодаря своей универсальности может найти широкое применение также и в различных измерительных устройствах, предназначенных для измерения незлектрических величин, когда измеряемая величина может быть преобразована в пропорциональное ей число импульсов напряжения.

Экспериментальные работы и разработка конструкции прибора выполнялись механиком завода «Эталон» Б. А. Камочкиным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1956, стр. 529.
2. Брейдо И. Я., Янкин Г. М., Газоразрядные счетные лампы, «Радиотехника», № 2, 1957, стр. 65—70.
3. Вейсбрут А. Д., Образцовый датчик малых промежутков времени, «Измерительная техника», № 6, 1957, стр. 42—44.

Поступила в редакцию
8/ХП 1959 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
А. К. Колосов, Е. А. Чалова. Международные сравнения национальных эталонов вольты в период 1939—1959 гг.	5
В. В. Мюллер. Методика измерений э. д. с. нормальных элементов при помощи токовых весов.	15
С. В. Горбачевич, В. П. Шигорин. Методика и аппаратура для точных измерений сопротивлений на постоянном токе	27
Г. Ф. Панкратов, Т. Б. Рождественская. Передача верных значений единицы электрического сопротивления от эталонов образцовым и рабочим мерам и приборам большого сопротивления	37
Г. Ф. Панкратов. Меры и магазины большого сопротивления, особенности их конструирования и пути повышения точности	50
А. А. Чухланцев. О расчете мер малого сопротивления на большие токи	56
А. С. Румянцев. Новая аппаратура для измерения малых сопротивлений с помощью магнитного компаратора постоянного тока	68
Э. С. Лившиц. Разработка мер большой индуктивности для поверочных целей	76
М. А. Быков. Измерительная установка для поверки образцовых мер индуктивности и емкости с большими номинальными значениями	88
А. Д. Вейсбрут. К вопросу об оценке погрешностей автоматических цифровых приборов сравнения	106
А. М. Теплинский. Измерение малых переменных токов с помощью полупроводниковых термисторов	110
А. Д. Вейсбрут, Е. Д. Колтик. Метод использования фигур Лиссажу для получения сдвинутых по фазе напряжений	123
А. А. Чухланцев. Испытание измерительных устройств типа И58 и И505	128
А. Д. Вейсбрут, В. К. Потехин. Счетчик импульсов на декадронах и применение его в качестве электронного хронометра и частотомера .	138

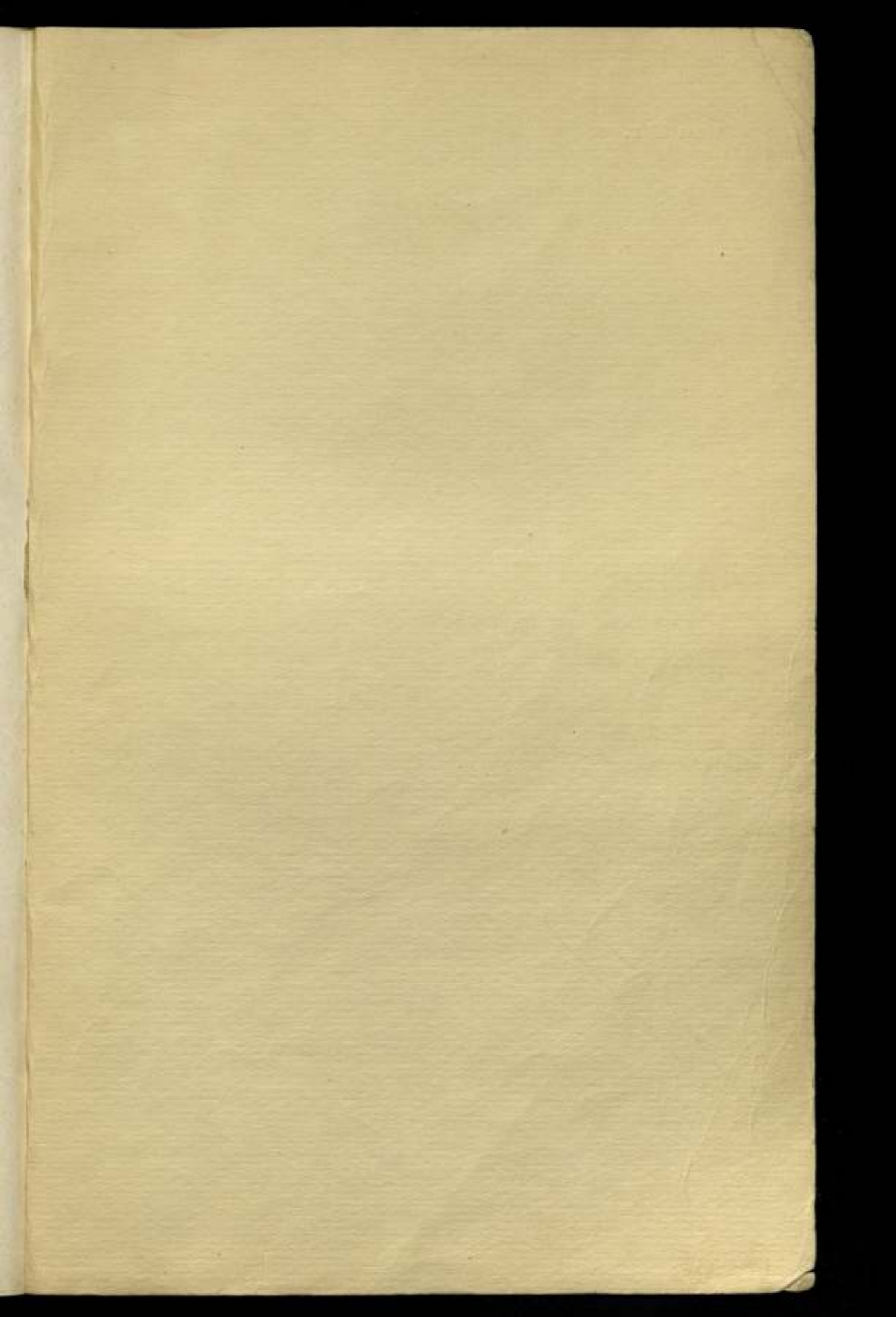
Редактор издательства *Н. Н. Александрова*

Техред *Р. Г. Польская*

Корректор *Л. Н. Кири*

Подписано к печати 27/IV 1951 г. Уч.-изд. л. 12,4 Формат бумаги 70×108^{1/16}
Печ. л. 9 М-08302 Тираж 3000 Заказ 2257

Картфабрика ВМФ



Цена 87 к.