

6
А-43

МВНССО - УССР

ЛЬВОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Ш м о р г у н
Евгений Иванович

На правах рукописи
к-471

МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ
(Специальность № 246 - электроизмерительная техника)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Львов - 1969

МВнССО - УССР

ЛЬВОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Ш м о р г у н
Евгений Иванович

На правах рукописи
к-471

МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ТЕРМОМЕТРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

(Специальность № 246 - электроизмерительная техника)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Львов - 1969

Современный этап развития народного хозяйства требует постоянного совершенствования методов и приборов для измерения температуры, являющейся определяющим фактором во многих областях науки и техники. От точности и надежности ее измерения в большой степени зависит ход многих технологических процессов и качество получаемого продукта.

К наиболее совершенным датчикам температуры относятся термометры сопротивления (ТС), которые используются не только для технических измерений, но и в качестве эталонов для воспроизведения международной температурной шкалы.

В последнее время в результате работ, выполненных как в нашей стране (во ВНИИМ, ВНИИФТРИ, КБ "Термоприбор" и др.), так и за рубежом, были созданы новые типы платиновых ТС - низкотемпературные, предназначенные для измерений температур до -260°C , и высокотемпературные, предел применения которых достигает 1300°C . Ведутся работы по созданию ТС из других материалов, способных обеспечить измерение температур до 2000°C и даже выше.

Особенностью наиболее высокотемпературных и низкотемпературных ТС является относительно небольшое сопротивление их чувствительных элементов в области рабочих температур (порядка $0,01 \div 1$ ом). В то же время сопротивление соединительных проводов и выводов этих ТС может достигать нескольких ом. Решение задачи автоматических измерений

температуры с помощью этих ТС было найдено путем применения разработанных с участием автора автоматических компенсаторов переменного тока, которые позволяют практически исключить влияние соединительных проводов и выводов ТС на результаты измерений.

Разработка и широкое внедрение новых типов ТС невозможны без методики и аппаратуры, позволяющей измерять их электрические параметры с высокой точностью. Это необходимо для исследования свойств термометров, для их подгонки и поверки, а также для точных измерений температуры в ряде отраслей новой техники.

В настоящее время требуется обеспечить измерение сопротивлений технических ТС в диапазоне примерно от 0,01 до 1000 ом с погрешностью не более 0,005%. Существующая аппаратура и методика измерений, рассчитанная на измерение сопротивлений порядка 10 ом и более, практически непригодна для этой цели.

Создание методики и аппаратуры, обеспечивающей достаточно точные измерения электрических параметров практически всех современных ТС, в том числе низкоомных, явилось основной задачей настоящей работы.

В основу решения этой задачи была положена разработка новых широкодиапазонных термометрических мостов постоянного тока.

Работа состоит из пяти глав.

В первой главе дан сравнительный анализ и оценка существующих методов измерений электрических параметров ТС с точки зрения их соответствия современным требованиям, намечены наиболее перспективные направления их развития.

Для точных измерений электрических параметров ТС наиболее широкое применение нашли мостовые и компенсационные методы постоянного тока.

Методы переменного тока используются преимущественно для промышленных измерений температуры. Особого внимания среди приборов пере-

менного тока заслуживают автоматические компенсаторы. Сравнительно простые, надежные, они могут работать в качестве вторичных приборов практически с любыми ТС, в том числе с самыми низкоомными. Так, например, автором разработаны варианты таких приборов, успешно применяемые для измерений сопротивлений порядка тысячных и даже десятитысячных долей ома. Однако для поверки и подгонки ТС эти приборы не применяются из-за недостаточной точности. Для точных измерений на переменном токе перспективными являются трансформаторные мосты.

К достоинствам компенсационного метода постоянного тока относятся отсутствие влияния сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС на результаты измерений, а также высокая точность измерения напряжений и токов. Однако широкое применение этого метода для точных измерений сопротивлений ТС затрудняется его относительной сложностью, громоздкостью и влиянием нестабильности тока в измерительной цепи; последнее особенно ощутимо при измерениях сопротивлений низкоомных ТС, токи в которых могут достигать десятков или даже сотен миллиампер.

Мостовой метод обладает существенными преимуществами по сравнению с компенсационным. Главные из них - это независимость показаний от колебаний тока, возможность сравнительно легкого обеспечения широкого диапазона измерений, простота устранения влияния паразитных термо-э.д.с., высокая производительность. Наряду с этим мостовому методу присущ и принципиальный недостаток, заключающийся во влиянии сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС на результаты измерений. Устранение этого влияния является центральным вопросом разработки мостов, предназначенных для измерений электрических параметров ТС.

В работе выполнен подробный сравнительный анализ различных мостовых схем постоянного тока, который показал, что в основу построения широкодиапазонных термометрических мостов целесообразно положить многоплечие мостовые схемы, предложенные Ф.Э.Смитом. Основным преимуществом этих схем является возможность значительного уменьшения влияния сопро-

тивлений соединительных проводов и выводов ТС на результаты измерений без дополнительных операций уравнивания моста. Однако существующие модели мостов, построенных по этим схемам, имеют сравнительно узкие диапазоны измерения и не отличаются оптимальными параметрами. Разработка на базе этих схем новых широкодиапазонных мостов требует не только соответствующих конструктивных решений, но также выработки научно обоснованных рекомендаций по выбору оптимальных параметров и по методике применения. Решение этих вопросов дано в последующих главах.

В первой главе анализируются также пути повышения точности измерений электрических параметров ТС с помощью мостов постоянного тока. Показано, что повышению точности термометрических мостов препятствует главным образом сложность обеспечения высокой точности их плавнорегулируемого плеча. Сравнительно проще достичь высокой точности измерений путем применения метода замещения с использованием секционированных переходных мер. Широкое внедрение этого метода в измерительную практику требует всестороннего исследования особенностей его применения для измерений сопротивлений ТС, а также создания научных основ для разработки переходных мер и компарирующих приборов, отвечающих современным требованиям.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию новых термометрических мостов постоянного тока.

Принципиальная схема разработанного автором широкодиапазонного шестиплечего термометрического моста представлена на рис. 1. В его основу была положена схема моста Смита-Готье. Эволюция мостов, построенных по этой схеме, до настоящего времени шла главным образом в направлении их конструктивного усовершенствования, почти без изменения параметров схемы и пределов измерения. Существующие модели мостов, как правило, имеют постоянные плечи отношения $R_A = 10$ ом и $R_B = 1000$ ом, магазин R_{cp} с максимальным сопротивлением порядка 10000 ом и рассчитаны на точные измерения сопротивлений порядка 10÷100 ом. Анализу

свойств моста Смита-Готье посвящен ряд работ как зарубежных, так и советских ученых (Ф.Э.Смита, М.Готье, К.Барбера, А.Гридли, Дж.Холла, К.П.Широкова, М.А.Быкова и др.), однако все они почти не выходят за рамки рассмотрения существующего частного варианта.

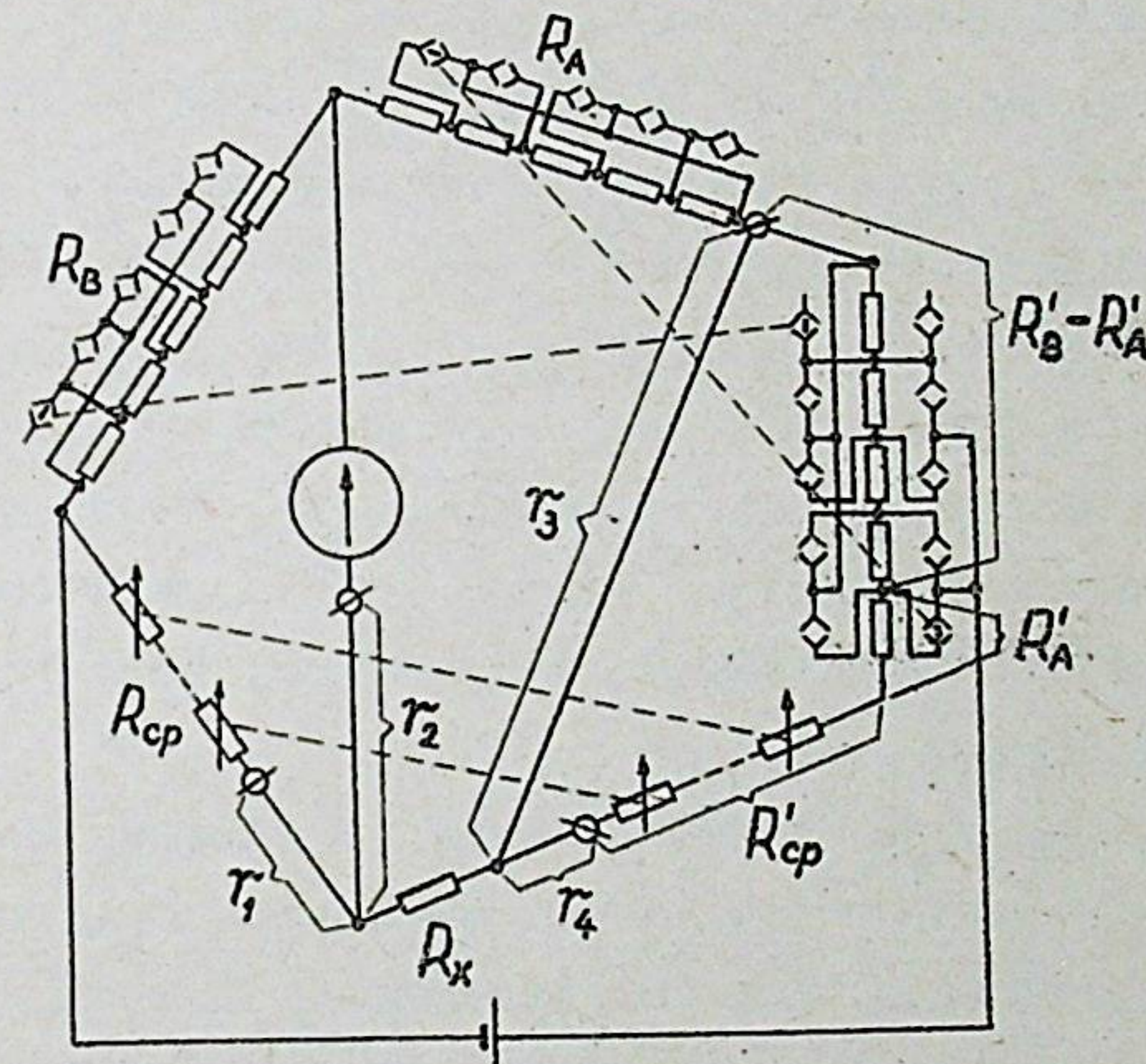


Рис. 1. Принципиальная схема широкодиапазонного шестиплечего термометрического моста.

В настоящей работе впервые поставлена задача применения схемы моста Смита-Готье для измерений сопротивлений в диапазоне 0,01÷1000 ом, поэтому отыскание оптимального решения этой задачи потребовало нового, более глубокого и обобщающего исследования.

Одним из главных является вопрос обеспечения достаточно малого влияния соединительных проводов и выводов ТС на результат измерения. Для оптимального решения этого вопроса исследовано влияние параметров моста на значение поправочного члена d уравнения равновесия. Получены формулы для определения значения поправочного члена и предельной относительной погрешности δ_{dnp} от пренебрежения им. Эти формулы дают возможность отдельно оценить практически для любых значений сопротивлений

плеч моста влияние погрешностей последних, сопротивлений соединительных проводов и их разностей на значения U и U_{dnp} .

В результате анализа, выполненного с помощью этих формул, определены оптимальные, с точки зрения устранения влияния поправочного члена, параметры широкодиапазонного шестиплечего термометрического моста: $R_{cp} = 100 \div 11000$ ом; $R_B = 10^5$ ом; $R_A = 10; 10^2; 10^3; 10^4$ ом. Эти параметры отличаются от принятых в существующих моделях мостов Смита-Готье только увеличением значений сопротивлений плеч отношения. Тем не менее, они обеспечивают значительное преимущество в устранении влияния соединительных проводов и выводов ТС на результаты измерений, что наглядно иллюстрируется данными рис. 2, которые получены при среднем значении сопротивлений проводов и выводов ТС $r = 1$ ом, предельном отклонении этих сопротивлений от среднего значения $\delta_{rnp} = 0,5\%$ и предельной погрешности сопротивлений плеч моста $\delta_{Rnp} = 0,01\%$.

Рассмотрены также пути уменьшения влияния поправочного члена d на результаты измерений. Показано, что при измерениях, выполняемых с погрешностью порядка тысячных долей процента, для устранения влияния наиболее весомой составляющей поправочного члена, пропорциональной разности $T_1 - T_3$ рационально применять способ двукратного уравнивания моста с переключением проводов T_1 и T_3 , T_2 и T_4 . Для устранения влияния составляющей, зависящей от погрешностей плеч моста, предложен способ, основанный на определении и учете ее значения, выработаны рекомендации по нормированию погрешностей вспомогательных плеч моста.

Как видно из рис. 2, при применении указанных способов уменьшения влияния поправочного члена предельная погрешность от пренебрежения им при $r = 1$ ом, $\delta_{rnp} = \pm 0,5\%$ и $\delta_{Rnp} = \pm 0,01\%$ не превышает $0,001\%$ даже для $R_x = 0,01$ ом, с увеличением значения R_x она резко уменьшается, достигая $10^{-7}\%$ при $R_x = 1000$ ом.

Определены условия получения максимальной чувствительности моста. Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров моста и нульиндика-

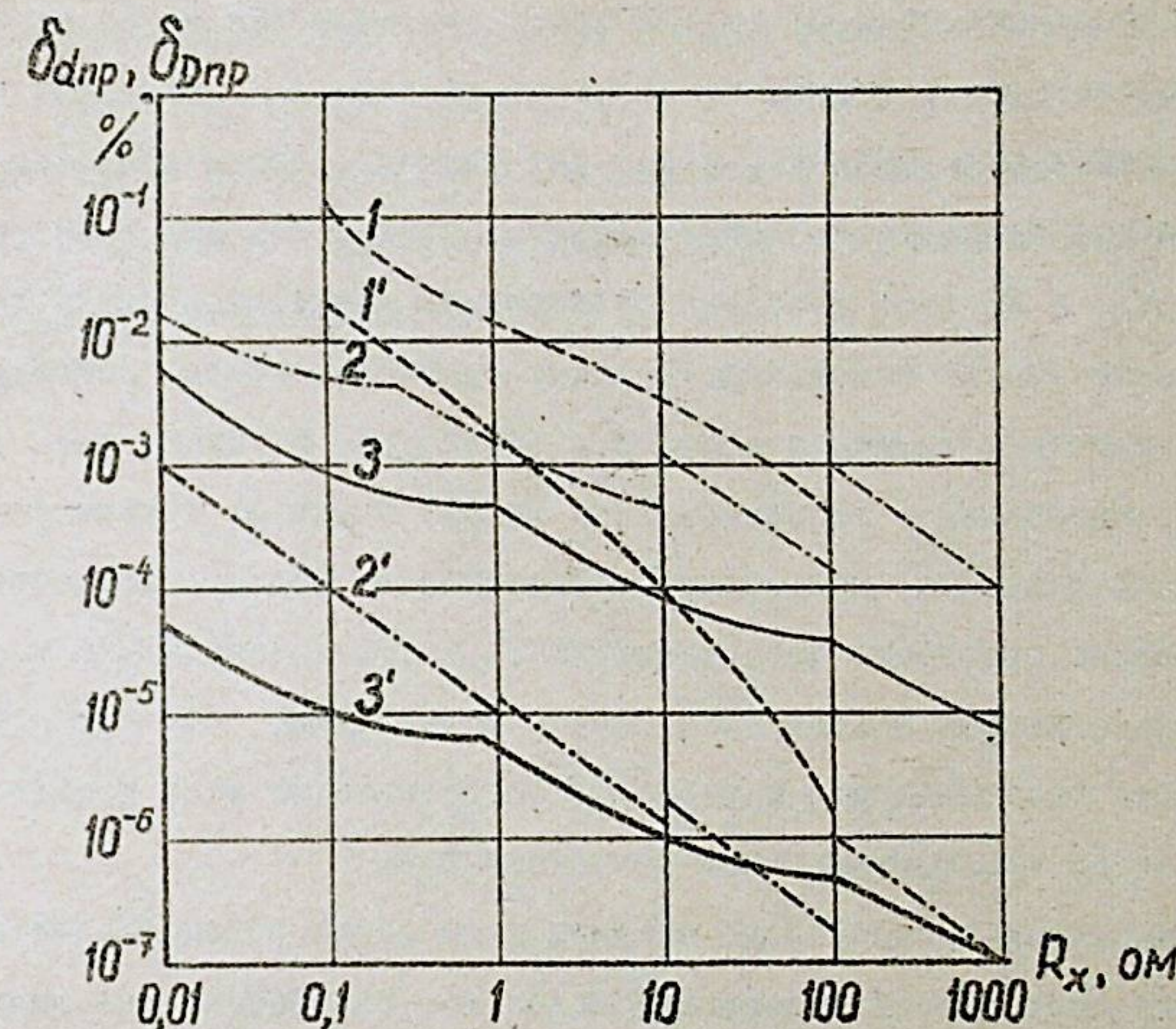


Рис. 2. Предельная относительная погрешность от пренебрежения поправочным членом уравнения равновесия:

- 1 - для существующих моделей моста Смита-Готье;
- 2 - для оптимального варианта шестиплечего термометрического моста;
- 3 - для оптимального варианта восьмиплечего термометрического моста;

1', 2', 3' - то же, но при применении двойного уравнивания моста и устранении влияния составляющей поправочного члена, зависящей от погрешностей плеч моста.

} при обычных измерениях

тора. Установлено, что условия обеспечения максимума чувствительности в значительной степени противоречат условиям устранения влияния поправочного члена d , особенно при измерении низкоомных сопротивлений. Однако, как показывают приведенные в работе конкретные данные, даже для вариантов плеч моста, оптимальных с точки зрения устранения влияния поправочного члена на результат измерения, при использовании чувствительных к напряжению нульиндикаторов, например, зеркального гальванометра типа М17/3 или фотокомпенсационного микровольтаноамперметра типа Р325 может быть обеспечена чувствительность, достаточная для изме-

рений сопротивлений от 0,01 до 1000 ом с погрешностью не более 0,005%.

Рассмотрены пути повышения чувствительности при измерении низкоомных сопротивлений. Найдено, что в тех случаях, когда допустимое значение тока для измеряемого сопротивления больше, чем для резисторов плеч R_{cp} , R'_{cp} и R'_A (это особенно существенно для испытаний ТС на перегрев), целесообразно использовать схему включения моста, подобную обычному включению двойного моста и отличающуюся от схемы рис. 1 перестановкой диагоналей и использованием вместо плеча R_A измерительной катушки сопротивления, допускающей относительно большую мощность.

Проведено сравнение чувствительности шестиплечего моста и существующих компенсаторов постоянного тока и установлено, что при одинаковой мощности рассеивания в измеряемом сопротивлении мост практически не уступает по чувствительности компенсаторам.

На основании проведенного анализа даны общие рекомендации по проектированию шестиплечих термометрических мостов. Обоснована целесообразность серийного выпуска универсальных мостов, которые могут быть использованы не только как шестиплечие термометрические, но и в качестве обычных одинарных и двойных мостов с широкими диапазонами измерений.

Существенным недостатком шестиплечего термометрического моста является относительно сильное влияние на его показания разности между сопротивлениями проводов τ_1 и τ_3 . Применение двукратного уравновешивания моста или других способов устранения этого влияния приводит к усложнению измерительных установок, увеличивает время измерений, усложняет обработку их результатов и повышает требования к квалификации обслуживающего персонала.

Исследование, выполненное в работе, показало, что термометрический мост, практически свободный от этого недостатка, можно создать на основе восьмиплечей схемы, предложенной Ф.Э.Смитом под названием "IU метода". Ф.Э.Смит не вскрыл полностью достоинств этой схемы. Разработанный им вариант моста имел неудачно выбранные параметры и в дальней-

шем не получил широкого распространения. В реферируемой работе эта схема была подвержена всестороннему исследованию, центральной задачей которого был выбор оптимальных параметров широкодиапазонного термометрического моста и, в частности, оптимального соотношения между сопротивлениями основных и вспомогательных плеч, которое оказывает определяющее влияние на свойства моста.

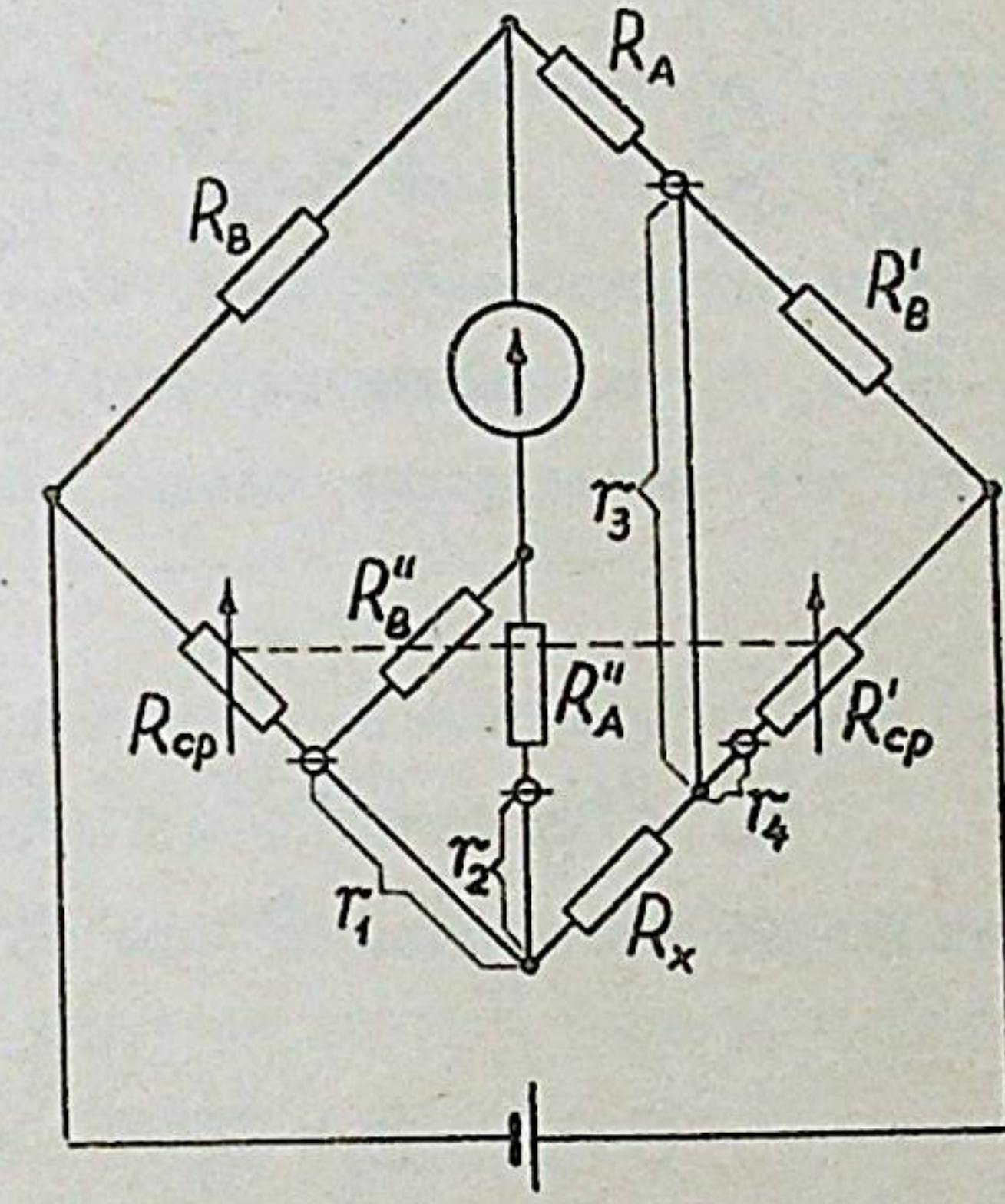


Рис. 3. Принципиальная схема восьмиплечего термометрического моста.

Принципиальная схема восьмиплечего термометрического моста представлена на рис. 3. Уравнение равновесия для этой схемы можно представить в виде

$$R_x = R_{cp} \frac{R_A}{R_B} + D, \quad (1)$$

где поправочный член

$$D = \frac{R''_B \tau_1}{R''_B + R'_A + \tau_1 + \tau_2} \left(\frac{R_A}{R_B} - \frac{R''_A + \tau_2}{R''_B} \right) + \frac{R'_B \tau_3}{R'_B + R'_{cp} + \tau_3 + \tau_4} \left(\frac{R_{cp}}{R_B} - \frac{R'_{cp} + \tau_4}{R'_B} + \frac{R''_B \tau_1}{R_B (R''_B + R'_A + \tau_1 + \tau_2)} \right) \quad (2)$$

Исследование выражения (2), выполненное с учетом влияния погрешностей сопротивлений плеч моста на значение D показало, что в наибо-

лее трудном, с точки зрения устранения влияния проводов, случае измерения сопротивлений низкоомных ТС, когда $R_B \gg R_{cp}$ и R_A , минимальное значение поправочного члена достигается при соотношении между значениями сопротивлений основных и вспомогательных плеч, которое определяется условиями

$$m = \frac{n}{n-1}; \quad n = \frac{m}{m-1}, \quad (3)$$

где

$$m = \frac{R'_{cp}}{R_{cp}} = \frac{R'_B}{R_B}; \quad m = \frac{R''_B}{R_B} = \frac{R''_A}{R_A}$$

В результате дополнительного анализа, при котором учитывалось влияние значений m и n на чувствительность моста, а также бралось во внимание удобство его изготовления, сделан вывод, что оптимальным является

$$m = n = 2, \quad (4)$$

и, следовательно:

$$R'_{cp} = 2R_{cp}; \quad R''_A = 2R_A; \quad R'_B = R''_B = 2R_B.$$

Для оценки влияния поправочного члена D при $m = n = 2$ получены формулы

$$D \approx D_1 + D_2 + D_3 \quad (5)$$

и

$$\delta_{Dnp} \approx \delta_{D1np} + \delta_{D2np} + \delta_{D3np}, \quad (6)$$

где

$$D_1 = \frac{R_{cp} \tau_1 \tau_2 + R_A \tau_3 \tau_4}{2(R_B + R_{cp})(R_B + R_A)}; \quad D_2 = \frac{R_B [\tau_1(\tau_3 - \tau_2) + \tau_3(\tau_1 - \tau_4)]}{2(R_B + R_{cp})(R_B + R_A)};$$

$$D_3 = \frac{\tau_1 R_A (R_B + R_{cp})(\delta_B - \delta'_B + \delta''_A - \delta_A) + \tau_3 R_{cp} (R_B + R_A)(\delta_B - \delta'_B + \delta'_{cp} - \delta_{cp})}{(R_B + R_{cp})(R_B + R_A)};$$

$$\delta_{D1np} = \frac{\tau^2 (R_A + R_{cp})}{2 R_x (R_B + R_{cp})(R_B + R_A)}; \quad \delta_{D2np} = \frac{2 \tau^2 R_B}{R_B (R_B + R_{cp})(R_B + R_A)} \delta_{rnp};$$

$$\delta_{D3np} = \frac{4 \tau R_B (R_A + R_{cp})}{R_x (R_B + R_{cp})(R_B + R_A)} \delta_{rnp};$$

$\delta_{cp}, \delta_A, \delta_B, \delta'_{cp}, \delta'_B, \delta''_B, \delta''_A$ - относительные погрешности сопротивлений плеч моста $R_{cp}, R_A, R_B, R'_{cp}, R'_B, R''_B, R''_A$;

δ_{rnp} - предельное значение этих погрешностей;

$\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ - сопротивления проводов;

$$\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4}{4};$$

δ_{rnp} - предельное относительное отклонение сопротивлений τ_1, τ_2, τ_3 и τ_4 от среднего значения τ .

Выполнена оценка погрешности δ_{Dnp} , соответствующей значениям R_x от 0,01 до 1000 ом и различным реально возможным комбинациям сопротивлений плеч R_{cp}, R_A, R_B . Определены параметры моста, оптимальные с точки зрения устранения этой погрешности. Проведено сравнение значений δ_{Dnp} для принятого варианта и некоторых других значений m и n . Результаты сравнения показали бесспорное преимущество выбранного варианта по сравнению с предложенным Ф.Э.Смитом ($m = 1; n = 2$). При $R_x = (0,01 \div 1)$ ом значения погрешности для этого варианта оказываются в десятки или даже в сотни раз большими, чем для $m = n = 2$. Еще хуже в этом отношении вариант $m = n = 1$, наиболее удобный для изготовления мостов.

Оптимальный вариант восьмиплечего термометрического моста обладает также существенным преимуществом по сравнению с рассмотренным выше шестиплечим термометрическим мостом. Он позволит при одном уравнивании уменьшить влияние соединительных проводов практически до такого уровня, для достижения которого на шестиплечем мосте необходимо приме-

нить двукратное уравнивание. Эта особенность восьмиплечего моста позволяет снизить требования к равенству сопротивлений проводов, а также упростить и ускорить измерения.

Рассмотрены пути уменьшения влияния поправочного члена D . Для устранения влияния составляющей D_2 предложен способ двукратного уравнивания моста с заменой мест подключения проводов T_1 и T_4 , T_2 и T_3 , а для устранения влияния составляющей D_3 - способ ее экспериментального определения и учета. Даны рекомендации по нормированию погрешностей вспомогательных плеч моста.

Приведенные в работе данные показывают, что при применении указанных способов уменьшения влияния поправочного члена погрешность, вызываемая соединительными проводами при $R_x = (0,01 \div 0,1)$ ом и $r = 1$ ом для восьмиплечего термометрического моста оказывается примерно на порядок меньше, чем для шестиплечего (рис. 2). Последнее обстоятельство делает целесообразным применение восьмиплечего моста для измерений сопротивлений ТС с высокой точностью.

Произведен анализ чувствительности восьмиплечего моста. Определены условия получения максимальной чувствительности и даны рекомендации по выбору оптимальных параметров моста и нульиндикатора. В результате сравнения чувствительности восьмиплечего и шестиплечего мостов установлено, что при равенстве сопротивлений основных плеч мостов, одинаковой мощности рассеивания в измеряемом сопротивлении и согласовании сопротивлений нульиндикаторов с выходными сопротивлениями мостов, мощность, выделяемая в цепи нульиндикатора для восьмиплечего моста в худшем случае может быть в три раза меньше, чем для шестиплечего. Однако при применении гальванометра типа М17/3 или прибора типа Р325 на восьмиплечем мосте может быть обеспечена чувствительность, достаточная для измерений сопротивлений ТС во всем диапазоне от 0,01 до 1000 ом с погрешностью не более 0,005%.

В работе показано, что на базе восьмиплечей схемы можно создать

широкодиапазонный универсальный мост, который может быть использован также в качестве одинарного и двойного, и даны рекомендации по разработке и применению такого моста.

В третьей главе рассмотрены основные особенности применения метода замещения для измерений сопротивлений ТС с помощью мостов постоянного тока. Главными среди этих особенностей являются возможность относительно большого различия между значениями сравниваемых сопротивлений и влияние на результат измерения относительно больших сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС.

Выполнен анализ влияния поправочных членов уравнений равновесия мостов при измерениях сопротивлений ТС по методу замещения и рассмотрены пути уменьшения этого влияния. Установлено, что для обеспечения достаточно малого влияния поправочных членов в рассматриваемом случае следует стремиться к устранению влияния поправочного члена при каждом уравнивании моста.

Исследовано влияние погрешностей плеч мостов на результат измерения сопротивлений по методу замещения. Разработана методика оценки этого влияния. Получены расчетные формулы, позволяющие определить значение методической погрешности измерений, зависящей от погрешностей плеч мостов, практически в любом случае измерений. Определены условия обеспечения минимального значения этой погрешности и даны соответствующие практические рекомендации по методике выполнения измерений.

Рассмотрен и решен вопрос об оптимальном нормировании погрешностей плеч мостов, применяемых для измерений сопротивлений по методу замещения. Показано, что принятое для большинства современных серийных мостов нормирование погрешностей плеч сравнения согласно требованиям, установленным для стандартных магазинов сопротивления, не соответствует условиям обеспечения минимального значения методической погрешности. Основным недостатком такого нормирования является ограничение погрешностей показаний плеча сравнения в целом, допускающее появление

больших различий между значениями погрешностей отдельных резисторов, что приводит к увеличению значения методической погрешности. Установлено, что в мостах, применяемых для измерений по методу замещения, целесообразно гарантировать одинаковые предельные погрешности для отдельных резисторов декад плеч сравнения. Даны рекомендации по распределению допустимых погрешностей среди всех декад плеч сравнения, сформулированы требования к вариации контактов декадных переключателей.

Предложенные в работе принципы нормирования погрешностей плеч применяются для ряда мостов, выпускаемых серийно Львовским заводом электроизмерительных приборов.

Произведена оценка целесообразности применения метода замещения при относительно большом различии между значениями сравниваемых сопротивлений. Показано, что в данном случае для мостов, где выполнены указанные выше оптимальные условия нормирования погрешностей плеч, предельное значение методической погрешности с достаточным приближением определяется формулой

$$\delta_{мпр} \approx 2\delta_{српр} \frac{R^*}{R_c - R^*} \quad (7)$$

где $\delta_{српр}$ - предельная относительная погрешность плеча сравнения моста;

R_c - значение суммы сопротивлений резисторов, которые принимали участие как в показании плеча сравнения $R_{срх}$, соответствующему измеряемому сопротивлению, так и в показании $R_{срн}$, соответствующему образцовому сопротивлению;

R^* - большее из значений R' и R'' , определяемых из выражений

$$R' = R_{срх} - R_c ; \quad R'' = R_{срн} - R_c .$$

Установлено, что при соответствующей точности образцовых мер, правильной методике измерений и рациональном нормировании погрешностей плеч мостов метод замещения позволяет повысить точность измерений сопротивлений по сравнению с непосредственными измерениями в 10-15 раз

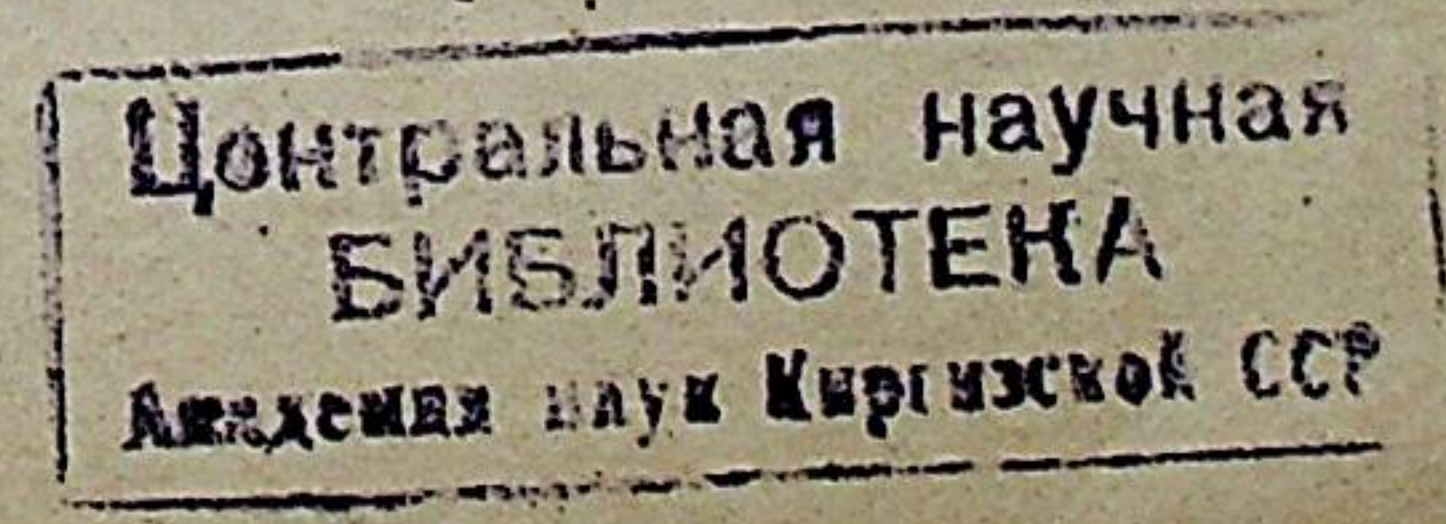
даже в тех случаях, когда различие между значениями сравниваемых сопротивлений достигает 10%.

Проанализированы особенности применения секционированных переходных мер для измерений электрических параметров ТС по методу замещения с помощью мостов постоянного тока. Даны рекомендации по проектированию и практическому применению таких мер. Рассмотрены вопросы повышения производительности труда при измерениях сопротивлений ТС по методу замещения.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке методов измерений отношений сопротивлений ТС в реперных точках. Особое внимание уделено вопросам сравнения ТС, обладающих разными сопротивлениями чувствительных элементов, что весьма актуально в связи с разработкой новых типов ТС.

Выполнен анализ чувствительности и точности измерений отношений сопротивлений ТС в реперных точках путем сравнения исследуемых и контрольных ТС на двойном мосте. Обоснована целесообразность применения в этом случае схемы включения двойного моста, отличающейся от обычно применяемой перестановкой мест включения гальванометра и источника питания. Такое включение моста обеспечивает существенный выигрыш в чувствительности, особенно при сравнении ТС, значения сопротивлений которых сильно отличаются между собой.

Рассмотрено влияние погрешностей плеч двойного моста, различий характеристик сравниваемых ТС, сопротивлений их выводов и соединительных проводов на результат измерения. Определены условия сравнения медных ТС с платиновыми. Показано, что влияние сопротивлений соединительных проводов при измерении отношений сопротивлений ТС на двойном мосте несколько меньше, чем при измерении абсолютных значений сопротивлений, однако для низкоомных высокотемпературных ТС оно недопустимо велико. Устранение этого влияния путем применения метода уравнивания двойного моста по частям приводит к существенному усложнению измерений.



Разработана методика применения рассмотренных во второй главе термометрических мостов для измерений отношений сопротивлений ТС в реперных точках. Показано, что в этом случае измерение может осуществляться как путем измерения значений сопротивлений термометров, соответствующих реперным точкам, так и через сравнение с контрольными ТС. Первый метод может быть применен для всех ТС, значения сопротивлений которых охватываются диапазонами измерений мостов, причем для повышения точности измерений могут использоваться переходные секционированные меры, однако он требует точного определения значений температур, что является существенным недостатком. От этого недостатка, как известно, свободен метод сравнения исследуемых ТС с контрольными, которому в данной главе уделено основное внимание.

При сравнении ТС на термометрических мостах одновременное включение исследуемого и контрольного ТС в цепь моста невозможно. Поэтому сравнение может осуществляться лишь по методу замещения. В работе показано, что, в отличие от обычных измерений сопротивлений по методу замещения, при измерениях отношений сопротивлений ТС в реперных точках возможно сравнение не только равных, но и совершенно разных по сопротивлению термометров. Предложены методы, позволяющие сравнивать платиновые или медные ТС, значения сопротивлений которых отличаются между собой в десятки и сотни раз. Проведенный в работе анализ показывает, что по точности измерений эти методы не только не уступают известному методу сравнения ТС на двойном мосте, но, благодаря особым свойствам термометрических мостов, позволяют практически полностью устранить влияние сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС на результат измерения. Применение указанных методов дает возможность полностью решить задачу поверки отношения R_{100}/R_0 технических ТС с помощью термометрических мостов для всего диапазона сопротивлений от 0,01 до 1000 ом при использовании весьма ограниченной номенклатуры контрольных ТС.

При достаточно малых значениях сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС указанные методы могут быть применены и для одинарных мостов.

Предложен метод сравнения ТС с помощью компенсаторов постоянного тока. Он основан на применении вспомогательной мостовой схемы, представленной на рис. 4. В этой схеме исследуемый (R_x) и контрольный (R_N)

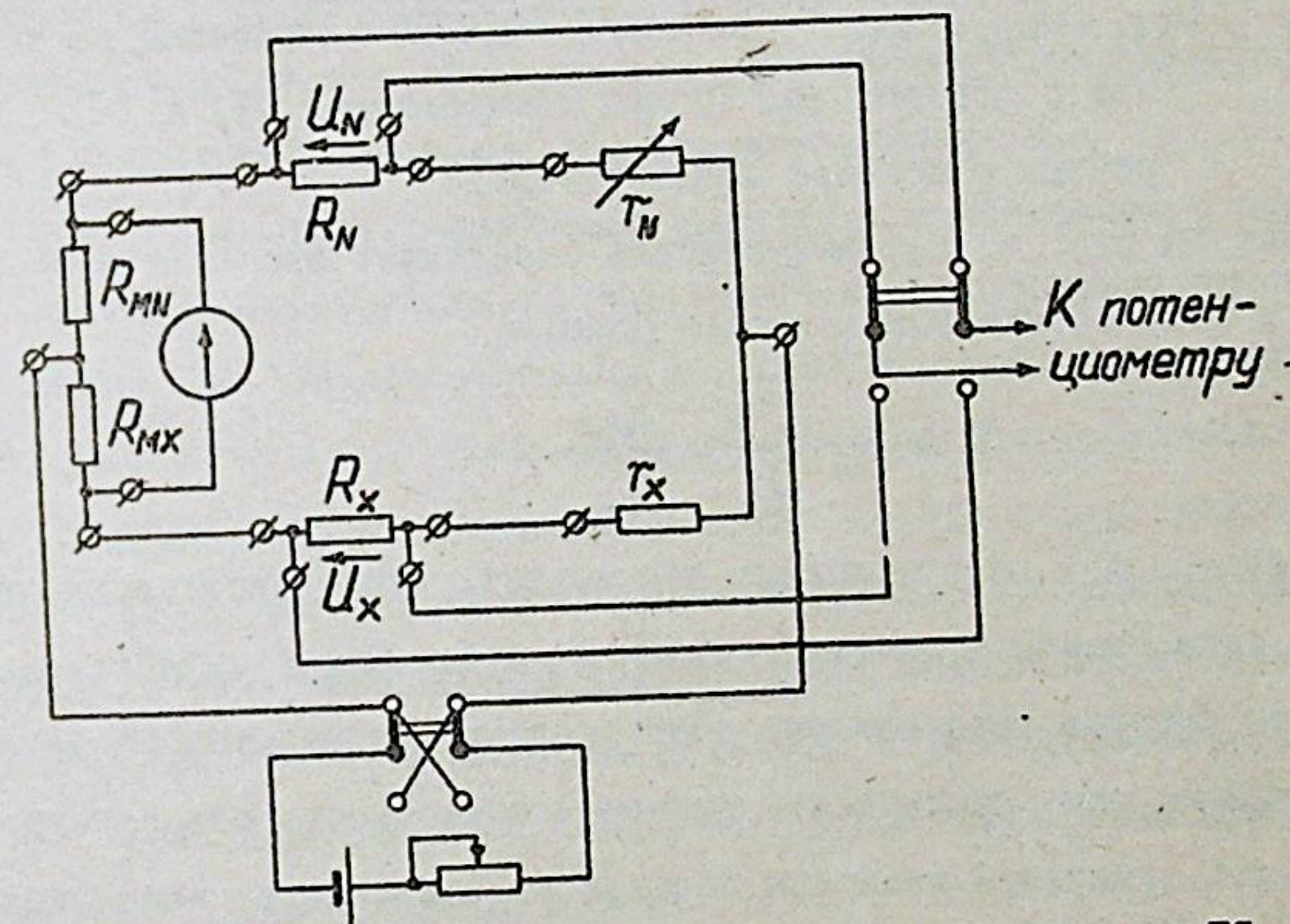


Рис. 4. Схема измерений электрических параметров ТС с помощью компенсатора постоянного тока.

термометры сопротивления включаются в смежные плечи одинарного моста. Два плеча моста выполнены в виде меры отношений, состоящей из сопротивлений R_{Mx} и R_{MN} , и удовлетворяющей условию

$$\frac{R_{Mx}}{R_{MN}} \approx \frac{R_x}{R_N} \quad (8)$$

Перед каждым измерением падений напряжений U_x и U_N мост уравнивается с помощью сопротивлений T_N или T_x .

В работе показано, что при обеспечении неизменности отношения $\frac{R_{Mx}}{R_{MN}}$ за время измерения падений напряжений на сравниваемых ТС при

температурах t_1 и t_2 , отношение сопротивлений испытуемого термометра определяется по формуле

$$\frac{R_{xt1}}{R_{xt2}} = \frac{R_{nt1}}{R_{nt2}} \cdot \frac{U_{xt1}}{U_{xt2}} \cdot \frac{U_{nt2}}{U_{nt1}}, \quad (9)$$

где $\frac{R_{nt1}}{R_{nt2}}$ - значение отношения сопротивлений при температурах t_1 и t_2 для контрольного ТС;

$U_{xt1}, U_{nt1}, U_{xt2}, U_{nt2}$ - значения падений напряжений на испытуемом и контрольном ТС при температурах t_1 и t_2 , измеренные с помощью компенсатора.

Схема на рис. 4 дает возможность определить значения сопротивлений ТС. В этом случае используется формула

$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N} \cdot \frac{R_{Mx}}{R_{MN}}. \quad (10)$$

Выполненный в работе анализ показывает, что предлагаемый метод обладает существенными преимуществами по сравнению с существующим методом, при котором сравниваемые сопротивления включаются последовательно. Главным из этих преимуществ является возможность обеспечения высокой точности измерений даже при большом различии между значениями сопротивлений R_x и R_N , что позволяет сократить до минимума число образцовых мер в установках, обладающих широкими диапазонами измерений. Достоинства данного метода подтвердились на практике в процессе эксплуатации разработанной автором экспериментальной установки, предназначенной для поверки технических ТС с сопротивлениями чувствительных элементов от 0,1 до 1000 ом.

В пятой главе диссертации освещены вопросы практического использования результатов работы.

Проведенные исследования послужили основой для разработки ряда новых мостов постоянного тока, предназначенных для измерений электрических параметров ТС.

В лаборатории НИС-11 Львовского ордена Ленина политехнического института с участием автора разработан универсальный мост постоянного тока класса 0,05 (МТОД-62), который обеспечивает измерение сопротивлений по схеме шестиплевого термометрического моста в пределах от 10^{-3} до 110 ом и может быть использован также в качестве одинарного или двойного мостов. Такие приборы нашли применение для измерений электрических параметров ТС в производственных условиях в качестве нестандартного поверочного оборудования. В частности, они успешно используются для исследований и поверки низкоомных высокотемпературных ТС.

Теоретический и экспериментальный материал, накопленный в процессе разработки и исследования упомянутого выше моста, был использован при разработке в СКБ "Теплоконтроль" (Львов) с участием автора моста постоянного тока класса 0,05 типа МТОД-64. Основой для построения этого прибора послужила та же принципиальная схема, что и для предыдущего моста. В качестве термометрического моста он отличается расширением верхнего предела измерений до 1100 ом, наличием встроенного блока питания и переключателя для переключения проводов ТС при применении метода двукратного уравнивания. Мост МТОД-64 прошел государственные испытания и разрешен выпуск опытной партии.

Под руководством автора на кафедре электроизмерительных приборов Львовского ордена Ленина политехнического института был разработан также универсальный мост постоянного тока класса 0,05 на базе восьмиплековой мостовой схемы (МТОД-67). Обладая пределами измерений, аналогичными пределам моста типа МТОД-64, этот мост позволяет обеспечить значительно меньшее влияние соединительных проводов и выводов ТС на результат измерения. Указанное преимущество полностью подтвердилось на практике при использовании экспериментального образца моста для измерений сопротивлений низкоомных ТС в производственных условиях. Разработаны и находятся в стадии экспериментального исследования универсальные одинарные и двойные термометрические мосты повышенной точности, построенные на ба-

зе шестиплечей и восьмиплечей схем. Отличительной особенностью этих мостов является выполнение их плеч отношений наподобие точных делителей напряжения.

С участием автора на Львовском заводе электроизмерительных приборов разработан переносный термометрический мост (МОТ-69), который дает возможность измерять сопротивления ТС в пределах от 10 до 1000 ом с погрешностью не более 0,05% при практически полном устранении влияния сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС на результат измерения. Этот прибор может быть также использован для измерений разностей температур при одновременном включении двух ТС, а также в качестве магазина класса 0,02 - для поверки вторичных приборов.

Результаты выполненных автором исследований вопросов, связанных с измерениями сопротивлений ТС по методу замещения, были использованы при разработке ряда секционированных переходных мер, которые применяются для измерений электрических параметров ТС с повышенной точностью на заводе "Львовприбор" и в КБ "Термоприбор" (Львов).

С участием автора разработана универсальная переходная мера, обеспечивающая измерение сопротивлений ТС в пределах от 0,01 до 700 ом с погрешностью не более 0,005% при использовании в качестве компарирующих приборов шестиплечих или восьмиплечих термометрических мостов класса 0,05 или потенциометров класса 0,02.

Результаты работы были использованы при разработке проектов новых стандартов на технические термометры сопротивления.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен сравнительный анализ существующих методов измерений сопротивлений ТС с точки зрения их пригодности для точных измерений электрических параметров ТС в широких пределах, в особенности для наиболее высокотемпературных и низкотемпературных ТС, отличающихся сравнительно небольшим сопротивлением чувствительных элементов (порядка 0,01-1 ом). Обоснована целесообразность применения для этой цели многоплечих мостовых схем постоянного тока. Намечены перспективные направления развития некоторых других методов измерений сопротивлений ТС.

2. Проведено всестороннее исследование основных метрологических свойств мостовой схемы Смита-Готье и разработаны теоретические основы построения на ее базе широкодиапазонного шестиплечевого термометрического моста, который по ряду параметров значительно превосходит существующие образцы мостов такого типа. Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров такого моста, предложены практические способы уменьшения влияния поправочного члена его уравнения равновесия на результат измерения, показаны возможности повышения чувствительности при измерениях низкоомных сопротивлений.

3. Разработан новый восьмиплечий термометрический мост, который обладает существенными преимуществами по сравнению с известными термометрическими мостами в отношении устранения влияния сопротивлений соединительных проводов и выводов ТС, особенно при измерениях низкоомных сопротивлений порядка 0,01-1 ом. Определены оптимальные параметры моста, разработана методика его применения для измерений электрических параметров ТС в широком диапазоне. Показано, что восьмиплечий термометрический мост позволяет обеспечить высокую производительность труда. Его применение особенно целесообразно для поверки и подгонки ТС в производственных условиях.

4. Выполнен анализ влияния поправочных членов уравнений равнове-

сия мостов при измерениях сопротивлений ТС по методу замещения и показаны пути его уменьшения.

5. Разработана методика оценки влияния погрешностей плеч мостов на результат измерения сопротивлений по методу замещения, определены условия уменьшения этого влияния и даны соответствующие рекомендации по методике выполнения измерений. Рассмотрен и решен вопрос об оптимальном нормировании погрешностей плеч мостов, применяемых для измерений сопротивлений по методу замещения.

6. Выработаны рекомендации по разработке и применению секционированных переходных мер для измерений электрических параметров ТС с помощью мостов постоянного тока.

7. Рассмотрены особенности применения двойных мостов для измерений отношений сопротивлений ТС в реперных точках. Даны рекомендации по повышению чувствительности и точности измерений. Определены условия сравнения ТС, обладающих разными сопротивлениями чувствительных элементов, а также выполненных из разных материалов.

8. Разработана методика измерения отношений сопротивлений ТС в реперных точках с помощью шестиплечих и восьмиплечих термометрических мостов постоянного тока. Предложены способы таких измерений, которые позволяют сравнивать по методу замещения ТС, обладающие разными значениями сопротивлений чувствительных элементов.

9. Предложен способ измерений электрических параметров ТС с помощью компенсатора постоянного тока, основанный на использовании специальной мостовой схемы. Применение этого способа в установках, обладающих широкими диапазонами измерений, дает возможность значительно сократить необходимое число образцовых мер и уменьшить требования к точности компенсатора.

10. На основе проведенных исследований разработан ряд новых образцов аппаратуры для измерений электрических параметров ТС (широкодиапазонные универсальные одинарно-двойные-термометрические мосты, перенос-

ный термометрический мост, универсальная переходная мера), большая часть которых внедрена или находится в стадии внедрения в производство. По своим техническим и эксплуатационным характеристикам разработанная аппаратура превосходит отечественные и зарубежные прототипы.

Материалы работы докладывались на следующих научно-технических конференциях:

1. Научно-техническая конференция по вопросам измерения высоких температур. Львов, 1960.

2. Республиканская юбилейная межвузовская научно-техническая конференция по вопросам радиоэлектроники и автоматики. Львов, 1967.

3. Научно-техническая конференция "Методы и средства измерения температуры". Казань, 1968.

4. Научно-технические конференции Львовского ордена Ленина политехнического института, 1964-1968.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Е. И. Ш м о р г у н. Влияние поправочного члена уравнения равновесия моста Смита на результат измерения сопротивлений низкоомных термометров. Вестник Львовского политехнического института. Вопросы электроизмерительной техники, № 23. Изд-во Львовского ун-та, 1968.

2. Е. И. Ш м о р г у н. Некоторые особенности измерения отношения R_{100}/R_0 при поверке технических термометров сопротивления. Контрольно-измерительная техника, вып. 4, Изд-во Львовского ун-та, 1968.

3. Е. И. Ш м о р г у н, В. А. К о ч а н. Новые термометрические мосты постоянного тока. Тезисы докладов научно-технической конференции "Методы и средства измерения температуры", Казань, 1968.

4. Е. И. Ш м о р г у н. Восьмиплечий термометрический мост. Контрольно-измерительная техника, вып. 6. Изд-во Львовского ун-та, 1969.

5. В. А. К о ч а н, Е. И. Ш м о р г у н. К вопросу об измерении сопротивлений по методу замещения. Контрольно-измерительная техника, вып. 3. Изд-во Львовского ун-та, 1966.

6. В. А. Кочан, Е. И. Шморгу н. К вопросу о погрешностях измерений сопротивлений мостовым методом с применением способа замещения. Вестник Львовского политехнического института. Вопросы электроизмерительной техники, № 23. Изд-во Львовского ун-та, 1968.

7. В. А. Кочан, Е. И. Шморгу н, В. А. Лапа. Расчет и конструкция трансформаторов тока для автоматических реохордных и безреохордных компенсаторов переменного тока. Тезисы докладов конференции по вопросам измерения высоких температур, вып. 2, Киев-Львов, 1960.

8. И. Ц. Беринский, В. А. Кочан, Е. И. Шморгу н. Новый метод измерения электрофизических параметров нагрева прядевой арматуры. Доклады ЛПИ, том У, вып. 1, Строительство, Львов, 1962.

9. И. Ц. Беринский, В. А. Кочан, Е. И. Шморгу н. Электрофизические параметры расчетных формул натяжения прядевой арматуры электротермическим способом. Доклады ЛПИ, том У, вып. 1, Строительство, Львов, 1962.

10. Е. И. Шморгу н, Б. И. Гиль: Метод поверки технических термометров сопротивления с помощью компенсатора постоянного тока. Контрольно-измерительная техника, вып. 6. Изд-во Львовского ун-та, 1969.

11. Е. И. Шморгу н, С. Г. Сусуловский. К вопросу о применении одинарного моста для измерения низкоомных сопротивлений. Контрольно-измерительная техника, вып. 7. Изд-во Львовского ун-та, 1969.

---0---