

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



К-44

15/3-76
P13 - 9375

985/2-76

Ю.Ф.Киселев, Ю.П.Прокофьев

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД
ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

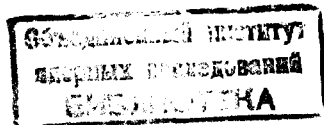
1975

P13 - 9375

Ю.Ф.Киселев, Ю.П.Прокофьев

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД
ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ
ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Направлено в ПТЭ



Введение

Наиболее простым и удобным методом измерения низких и сверхнизких /до 10 мК/ температур является применение угольных термометров сопротивления. Обычно для этих целей используют угольные сопротивления фирм "Speer" и "Allen-Bradly". При точном измерении температуры такими термометрами необходимо исключить возможность разогревания термометра от выделяющейся в нем мощности. На постоянном токе провести такие измерения сложно из-за действия термо-ЭДС в охлажденных цепях и трудности усиления слабых сигналов постоянного тока. При измерениях на переменном токе эти недостатки легко устранимы, однако точность измерений ухудшают паразитная емкость подводющего кабеля и, в общем случае, возможная индуктивность сопротивления. В двух известных нам стандартных приборах фирмы "S.H.E. Manufacturing Corporation" и "Cryo Brige S72" /ЧССР/ для измерений сопротивления применяется мостовая схема с низкочастотным питанием моста.

Влияние паразитной емкости подводющего кабеля устраняется включением компенсирующей емкости в одно из плеч моста, что усложняет работу с прибором. Характерная величина подводимой мощности $\sim 10^{-13} \text{ Вт}$ на сопротивлении $\sim 10 \text{ кОм}$.

В данной работе предложен импульсный метод, содержащий в себе достоинства методов измерений на постоянном и переменном токе. В нашем случае результаты измерений не зависят ни от емкости подводющего кабеля, ни от индуктивности сопротивления, исключается

влияние термо-ЭДС, и мощность, подводимая к сопротивлению, снижается по крайней мере на порядок за счет увеличения скважности измерительных импульсов.

В работе приводятся обоснование метода и результаты экспериментальной проверки схемы, построенной по аналогии с измерителем сопротивлений с заданным током. В применении к мостовым схемам измерений активных сопротивлений наш метод позволит производить баланс моста по активным сопротивлениям плеч независимо от их реактивных параметров.

Принцип работы прибора

В отличие от прибора фирм "S.H.E. Manuf. Corporation" и "Cryo Brige S72", который определяет величину сопротивлений с помощью гармонических сигналов с нулевой постоянной составляющей, наше устройство использует отличную от нуля постоянную составляющую импульсного сигнала. Мы рассмотрим один из возможных вариантов измерителя сопротивлений, аналогичный хорошо известному омметру с заданным постоянным током, проходящим через измеряемое сопротивление. Вместо заданного постоянного тока в данном приборе используется заданная постоянная составляющая импульсного сигнала

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt, \quad /1/$$

где T - период импульсов. Предполагается также, что импульс тока $I(t)$ имеет "зануленную" базовую линию, произвольную форму и отличную от нуля нулевую гармонику Фурье $I_0 \neq 0$. В измерительной цепи могут действовать также постоянные или медленно изменяющиеся ЭДС, например, термо-ЭДС. В отличие от измерителей на постоянном токе в нашем приборе для усиления импульсного сигнала можно использовать широкополосный усилитель с закрытым входом, чтобы отрицательная обратная связь по постоянному току входной разделительной емкости усилителя устранила влияние постоянных или медленно изменяющихся ЭДС, действующих во входной цепи.

Если затем, после усиления, восстановить постоянную составляющую Фурье импульсов и выделить ее интегратором, то для нулевой гармоники Фурье тока I_0 и напряжения U_0 после интегратора закон Ома записывается так же, как и для постоянного тока, то есть:

$$U_0 = k I_0 R_x,$$

где "k" - постоянный коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента усиления усилителя и параметров интегратора.

Применяя эталонное сопротивление для калибровки омметра, можно получить

$$\frac{U_{0x}}{U_{0э}} = \frac{R_x}{R_э}, \quad R_x = R_э \frac{U_{0x}}{U_{0э}},$$

где U_{0x} и $U_{0э}$ - показания интегратора при изменении сопротивлений R_x и $R_э$ соответственно. Отметим, что условие баланса мостовых схем для нулевой гармоники Фурье то же, что и для постоянного тока, т.е. баланс моста по нулевой гармонике Фурье не будет зависеть от паразитных реактивных параметров сопротивлений плеч моста.

Блок-схема прибора

Упрощенная блок-схема прибора показана на рис. 1. Здесь L , C и R_x - соответственно индуктивность сопро-

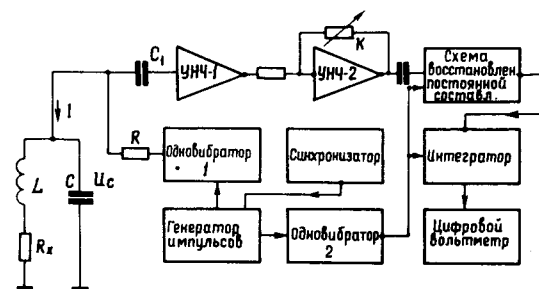


Рис. 1. Блок-схема импульсного прибора для измерения низких температур термометром сопротивления.

тивления, паразитная емкость подводящего кабеля и измеряемое сопротивление. Сопротивление R задает известное значение постоянной составляющей измерительного импульса и выбирается из условия $R \gg R_x$, так же как и в обычном измерителе сопротивлений с известным током. Входное сопротивление усилителя УНЧ-1 должно быть намного больше сопротивления R_x , чтобы его влиянием можно было пренебречь.

Усилитель УНЧ-2 с переключаемым коэффициентом усиления позволяет работать с различной амплитудой импульса, т.е. изменять уровень подводимой мощности. Тактовый генератор импульсов может быть синхронизован от сети, работать в автоколебательном режиме или режиме внешнего запуска. Длительность измерительного импульса задается одновибратором 1 и равна ~ 1 мс. Одновибратор 2 управляет схемой восстановления постоянной составляющей, и длительность его импульса больше или равна длительности импульса одновибратора 1, как показано на рис. 2. Она должна быть такой, чтобы искаженный за счет паразитных L и C импульс

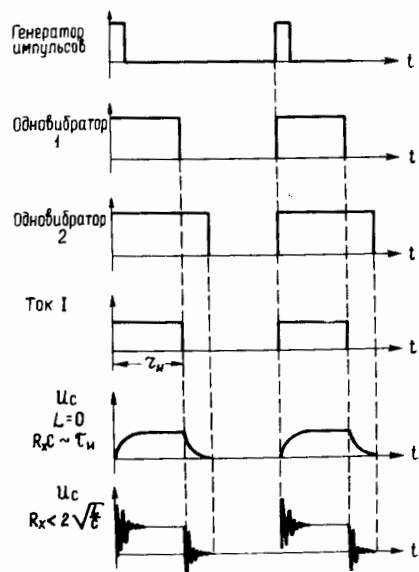


Рис. 2. Импульсная диаграмма измерителя активных сопротивлений.

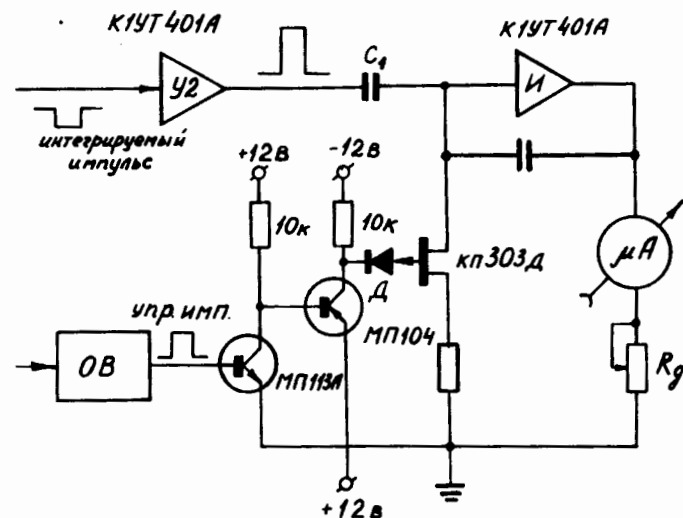


Рис. 3. Схема восстановления постоянной составляющей.

напряжения на измерительном контуре полностью интегрировался. Характерные искажения импульса напряжения на сопротивлении R_x показаны на рис. 2. При $C=0$ и $L=0$ форма импульса напряжения на сопротивлении совпадает с формой импульса тока, и длительности импульсов одновибратора в этом случае могут быть равны. При $L=0$ и $R_x C \sim \tau_{и}$ форма импульса напряжения искажена и отличается от формы импульса тока, а при $R_x < 2\sqrt{L/C}$ на фронтах импульса напряжения появляется характерный "звон". При этом, если длительность одновибратора 2 выбрана такой, чтобы интегрировался весь искаженный импульс, результаты измерений, как это следует из принципа работы прибора и проверено нами экспериментально, не зависят от этих искажений. Для двух последних случаев на фотографиях /рис. 4 и 5/ показаны импульсы на выходе усилителя УНЧ-2 /вверху/ и инвертированный импульс на выходе схемы восстановления постоянной составляющей /внизу/. Если скважность импульсов невелика, то можно использовать обычный интегратор на интегральной схеме, при этом постоянную времени интегрирования необходимо выбирать такой, чтобы пренебречь разрядом емкости между измерительными

импульсами. В общем случае наиболее удобен "box-car"-стробоскопический интегратор, управляемый стробом от одновибратора 2. Схема восстановления постоянной составляющей изображена на рис. 3 и представляет собой $R_{\Pi}C_1$ -цепь с переключаемым сопротивлением полевого транзистора R_{Π} . В промежутке между импульсами R_{Π} мало и емкость C_1 быстро заряжается до величины напряжения базовой линии импульса. В момент интегрирования R_{Π} велико, так что на входе интегратора импульс появляется на нулевой базовой линии. Сопротивление, включенное последовательно с полевым транзистором, сохраняет необходимую величину постоянной времени в интервалах между импульсами для того, чтобы быстрые помехи не влияли на восстановление базовой линии интегрируемого импульса.

Средняя мощность, подводимая к сопротивлению, равна:

$$P = \frac{1}{R_x T} \int_0^T v^2(t) dt$$

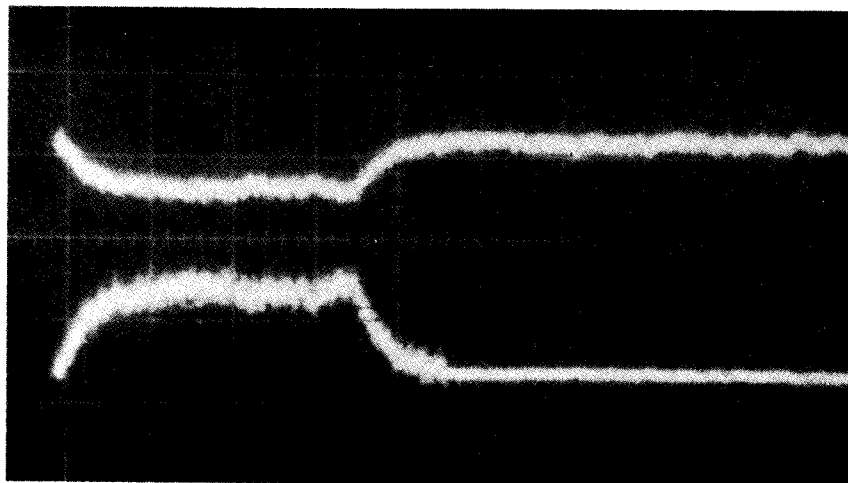


Рис. 4. Импульс напряжения на контуре RC при условии $RC \ll \tau_{и}$ до схемы восстановления постоянной составляющей - вверху - и после схемы восстановления постоянной составляющей - внизу.

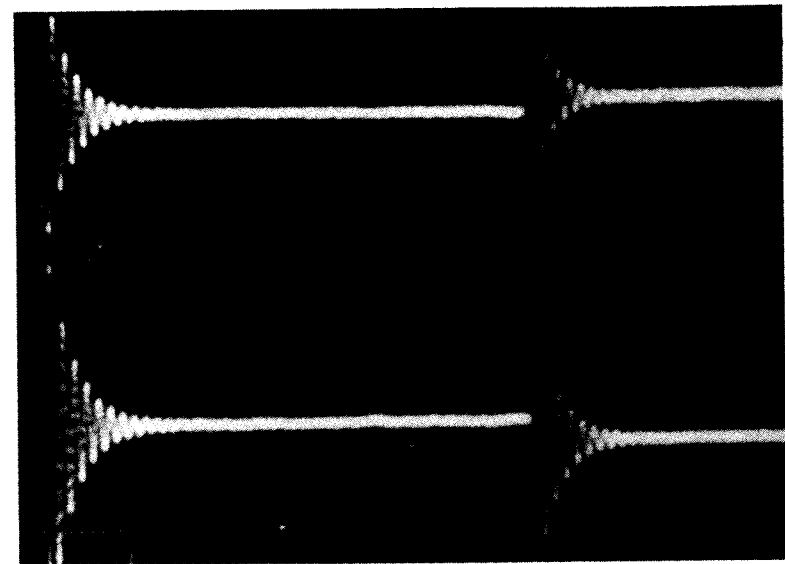


Рис. 5. Импульс напряжения на контуре RLC в случае $R_x < 2\sqrt{L/C}$ до схемы восстановления постоянной составляющей - вверху - и после схемы восстановления постоянной составляющей - внизу.

/где $v(t)$ - мгновенное напряжение на R_x /, и если искажения импульса пренебречь, то для прямоугольного импульса тока

$$P = \frac{v^2}{R_x q},$$

где q - скважность импульсов.

В нашем случае наименьшая возможная амплитуда измерительного импульса $\sim 4 \cdot 10^{-5}$ В. Для экспериментальной проверки метода использован простейший интегратор, поэтому скважность выбрана небольшой ($q=10$), а средняя мощность

$$P = \frac{1,6 \cdot 10^{-10}}{R_x} \text{ Вт.}$$

Для $R_x = 10 \text{ кОм}$ $P = 1,6 \cdot 10^{-14}$ Вт, что соответствует лучшим достигнутым сейчас результатам при ошибке измерения $\sim 1\%$. Получить более точные результаты при

таких измерениях позволяют мостовые схемы. В работе^{/3/} предложена простая схема для измерения температуры 1,2 К–77 К мостом Уитсона с импульсным питанием и индикацией разбаланса по осциллографу.

Средняя мощность $\sim 10^{-8}$ Вт/, выделяемая в термометре, достигается благодаря значительной скважности измерительных импульсов $q \sim 10^4$. В применении к этому случаю схема *рис. 1* могла бы служить чувствительным нуль-индикатором разбаланса моста и существенно расширить возможности прибора^{/1/}. Для баланса моста по нулевой гармонике Фурье импульса неважны искажения амплитуды за счет реактивных составляющих плеч моста, а подводимая мощность может быть существенно уменьшена за счет увеличения скважности импульсов и уменьшения амплитуды измерительных импульсов, что возможно благодаря статистическому усреднению импульсов таким нуль-индикатором.

В заключение авторы приносят благодарность В.Г.Зинову за полезные замечания при обсуждении работы.

Литература

1. Д.Б.Мак-Дональд, Ф.Г.Корнрейх. *Приборы для научных исследований /русский перевод/, 3, 142 /1970/.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
11 декабря 1975 года.*