

# Исследование стабильности металлопленочных резисторов С5-61 при гелиевых температурах с помощью криогенного компаратора тока

В. С. ГУМЕНЮК, О. В. КАРПОВ, В. Д. КУТОВОЙ, Ф. Р. ШАКИРЗЯНОВА

Описана конструкция сверхпроводящего компаратора тока с нуль-органом на основе сквида. Приведены методика и оценка погрешности измерений, результаты исследования стабильности резистивных делителей на основе резисторов типа С5-61. Показана возможность использования резисторов С5-61 в делителях электрического тока и напряжения, применяемых в прецизионных измерениях при температуре кипения жидкого гелия.

Последнее время сверхпроводящие компараторы тока нашли широкое применение в метрологической практике [1]. В настоящей работе сверхпроводящий компаратор использовали для исследования при гелиевых температурах стабильности отношения резистивных делителей, применяемых в установках для воспроизведения размера вольта на основе эффекта Джоузефсона, измерения значений фундаментальных физических констант и других электрических измерений [2].

Схема установки для измерения отношения резистивных делителей приведена на рис. 1. Основной элемент ее — сверхпроводящий компаратор тока был выполнен по традиционной топологической схеме [1, 2] и состоял из набора катушек с отношением 1:1:1:2:4:8:16. Намотку катушек сравнения осуществляли сверхпроводящим изолированным ниобиевым проводом диаметром 70 мкм, количество витков единичной катушки — 10.

Для подавления пространственной неоднородности магнитного поля, связанной с геометрическим распределением витков катушек сравнения, использовали трехвитковый свинцовый экран. Швы экрана пропаявали сплавом Розе. Геометрические размеры экрана составляли: внешний диаметр 15 мм, внутренний 9 мм, высота цилиндра 15 мм, высота многослойной трубки для вывода проводников 100 мм. Погрешность компарирования тока для отношения 1:16 не превышала  $1 \cdot 10^{-9}$ .

В качестве нуль-органа компаратора тока применяли сквид Циммермана диаметром 7 мм и высотой цилиндра 20 мм. Диаметр внутренних отверстий составлял 2 мм. Сквид работал по традиционной схеме потокозапирающей системы [1] с модуляцией — демодуляцией сигнала. Частота накачки составляла 15 МГц, уровень шумового потока, приведенный ко входу  $\Phi_{ш}/\Phi_0 = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}^{-1/2}$ , коэффициент преобразования  $10/(2,7 \cdot 10^{-15}) \text{ В/Вб}$ , где  $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ . Коэффициент передачи по току для единичной катушки сравнения при работе сквида в режиме гальванометра составлял  $6,2 \cdot 10^6 \text{ В/А}$ , а приведенный шумовой ток  $I_{ш}^0 = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ А/Гц}^{1/2}$ .

Для экранирования сквида от внешнего магнитного поля применялся двухслойный сверхпроводящий экран с дном полусферической формы. Криогенная часть установки была расположена внутри зонда, выполненного из цилиндрической трубы с внешним диаметром 24 мм из нержавеющей стали. Для охлаждения зонда использовали транспортные сосуды Дьюара типа СТГ-25 или СТГ-40.

Катушки сравнения  $l$  и  $L$  компаратора питали от специального источника (см. рис. 1) соответственно через исследуемого делителя  $R$  и  $r$ . Источник тока был собран на основе термостатированного прецизионного стабилизатора  $V$ , усилителя на базе микросхемы DA1 типа К140УД17 и задающих прецизионных  $1 \text{ кОм}$  резисторов  $R1$  и  $R2$  типа

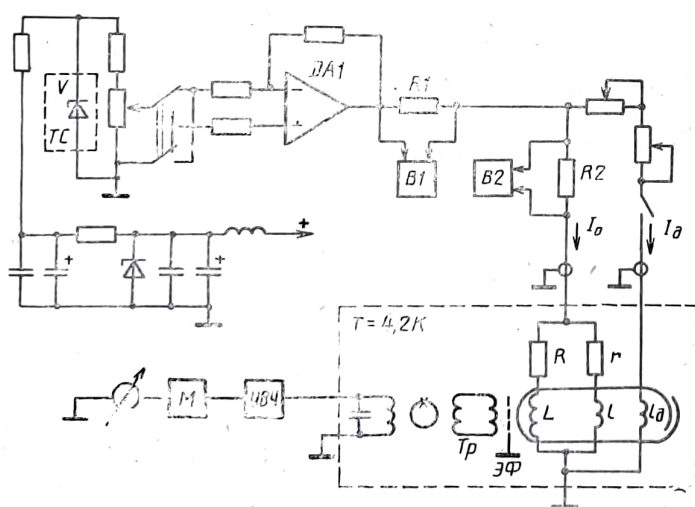


Рис. 1. Принципиальная схема установки:

ТС — термостат стабилизатора;  $T_r$  — трансформатор магнитного потока сквида; ЭФ — латунный экран; УВЧ — усилитель высокой частоты;  $M$  — модулятор-демодулятор;  $B1$  и  $B2$  — измерительные вольтметры;  $R$  и  $r$  — сопротивления плеч резистивного делителя;  $L$  и  $l$  — катушки сравнения компаратора;  $I_0$  — коммутационная катушка компаратора

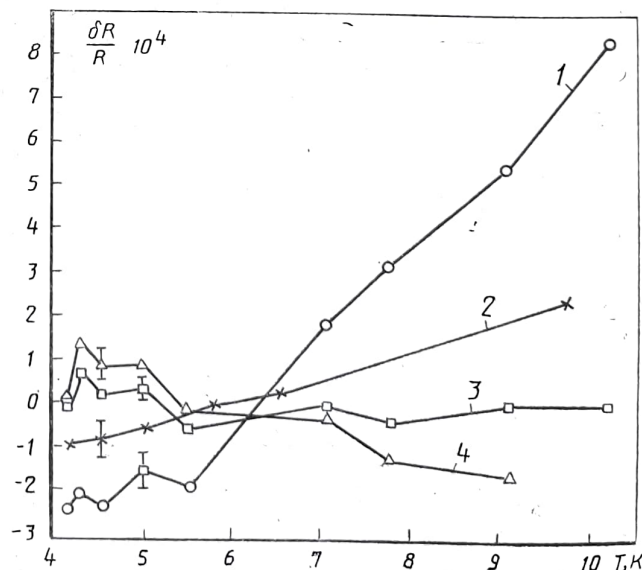


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления резисторов С5-61:

1 — 40,2 Ом  $\pm 0,5\%$ ; 2 — 100 Ом  $\pm 0,05\%$ ; 3 — 1 кОм  $\pm 0,01\%$ ; 4 — 10 кОм  $\pm 0,05\%$ . Рабочий ток Ю мА

Время	Коэффициент деления	Время	Коэффициент деления
14 ч 45 мин	16,003588	18 ч 35 мин	16,003587
15 ч 05 мин	16,003588	19 ч 05 мин	16,003590
15 ч 35 мин	16,003586	19 ч 35 мин	16,003585
16 ч 05 мин	16,003587	20 ч 05 мин	16,003585
16 ч 35 мин	16,003584	20 ч 35 мин	16,003584
17 ч 05 мин	16,003583	21 ч 05 мин	16,003588
17 ч 35 мин	16,003589	21 ч 35 мин	16,003583
18 ч 05 мин	16,003586	22 ч 05 мин	16,003588

С5-60. Термостат обеспечивал стабильность температуры стабилитрона с погрешностью 0,01 °С. Резисторы С5-60 одновременно использовали для измерения силы тока  $I_0$  и  $I_d$  с помощью вольтметров В1 и В2 типа В1-18. Для уменьшения нестабильности тока схему помещали в пенопластовый корпус и экранировали.

Для обеспечения нормального функционирования сквида особое внимание уделили разводке токонесущих проводников. Использовали раздельное заземление для экранов и общего провода источника питания и криогенного зонда, а также систему фильтров.

Для измерения отношения (коэффициента деления)  $N'$  резистивного делителя применили метод компенсации магнитного потока [2, 3]. Согласно рис. 1 катушки сравнения компаратора  $l$  и  $L$  включены в токовую цепь встречно. Поэтому протекающий электрический ток  $I_0$  создавал разностный магнитный поток

$$\Phi = \left( L \frac{rI_0}{R+r} - l \frac{RI_0}{R+r} \right) = lI_0 \left( \frac{N}{1+N'} - \frac{N'}{1+N'} \right), \quad (1)$$

где  $N=L/l$ ;  $N'=R/r$ ;  $L$  и  $l$  — индуктивности катушек сравнения.

Если через дополнительную катушку  $l_d$  пропустить электрический ток и скомпенсировать разностный магнитный поток  $\Phi$  магнитным потоком  $l_d I_d$ , то отношения  $N$  и  $N'$  можно выразить через токи  $I_0$  и  $I_d$ . Поскольку  $N$  определяется отношением витков катушек сравнения и известно с хорошей точностью, эта методика позволяет найти  $N'$ .

Для расчета отношения  $N'$  нами использовалась следующая формула, получаемая из условия баланса  $\Phi$  и  $l_d I_d$  и последующей замены отношения  $I_0/I_d$  на  $U_1/U_2$ :

$$N' = (N+1) \left[ 2 - \left( \frac{U_1}{U_1^0} \right) \left( \frac{U_2^0}{U_2} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_2$  в режиме измерения;  $U_1^0$  и  $U_2^0$  — напряжения на резисторах в режиме калибровки, т. е. при отключенной цепи тока  $I_d$ .

Для оценки в дальнейшем достоверности экспериментальных результатов найдем значение случайной погрешности методики. Согласно (2), случайная погрешность  $\delta N'/N'$  определяется погрешностью измерения  $U_1(U_1^0)$  и  $U_2(U_2^0)$ , которая в наших экспериментах не превышала значения  $0,15 \cdot 10^{-6}$ . С другой стороны, выражение (2) получено в предположении полной компенсации магнитных потоков  $\Phi$  и  $l_d I_d$ . В реальных условиях компенсация достигается в пределах некоторой величины  $\delta\Phi_{ш}$ , которая определяется разрешающей способностью нуля-органа и зависит от чувствительности сквида, уровня шумов, нестабильности тока  $I_0$  и т. д. При этом

$$\delta\Phi_{ш}/lI_0 \sim I_{ш}/I_0 \approx 4 \cdot 10^{-7}, \quad (3)$$

где для оценки принято  $I_0 \approx 5$  мА, полоса регистрации 1 Гц, а  $I_{ш} \approx 10 I_0^0$ . Таким образом, случайная погрешность методики (2) будет определяться согласно (3) значением  $\delta N'/N' \leq 4 \cdot 10^{-7}$ .

Нами исследовались серийно выпускаемые металлопленочные прецизионные резисторы типа С5-61. Выбор типа резисторов обусловлен относительно невысоким температурным коэф-фициентом сопротивления при температуре  $T \approx 4,2$  К. За-висимость изменения сопротивления  $\delta R/R$  резисторов с номи-нальным значением 10 кОм, 1 кОм, 100 Ом и 40,2 Ом от температуры приведена на рис. 2. Средние квадратические отклонения (СКО)  $\sigma$  результата измерения обозначены вер-тикальными отрезками.

В этом эксперименте температуру измеряли прецизионным угловым термометром, а сопротивление резисторов — по тра-диционной схеме [4] с помощью компаратора Р3003 и эта-лонного резистора,

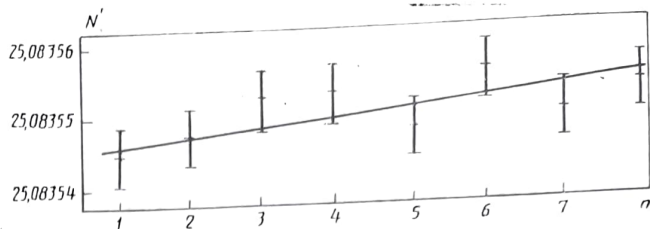


Рис. 3. Временная зависимость  $N'$  от номера измерения  $n$ . Интервал времени между измерениями 1,5—4 ч. Вертикаль- ные отрезки соответствуют случайной погрешности методики. Резисторы типа С5-61:  $R=1$  кОм  $\pm 0,01\%$ ,  $r=40,2$  Ом  $\pm 0,5\%$ . Рабочий ток  $I_0=5$  мА,  $T=4,2$  К.

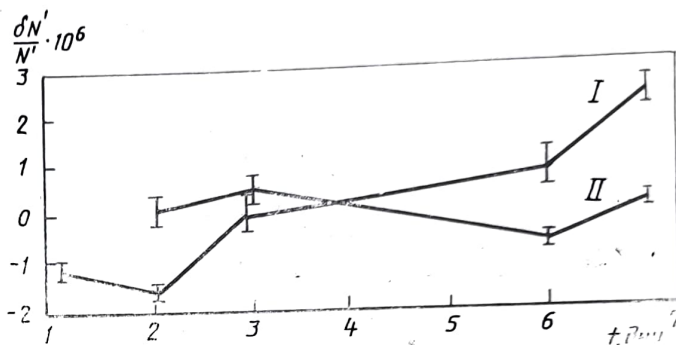


Рис. 4. Недельная нестабильность коэффициента  $N'$ . Верти- кальными отрезками отмечено СКО результатов измерения в течение рабочего дня. Резисторы С5-61:  $R=1$  кОм  $\pm 0,01\%$ ,  $r=40,2$  Ом  $\pm 0,5\%$ . Рабочий ток  $I_0=5$  мА,  $T=4,2$  К. Проме- жуток времени между измерениями кривых I и II равен 4 мес

Результаты измерения отношения  $N'$  делителя, собранного из четырех параллельно и четырех последовательно соединен- ных однотипных резисторов с номинальным значением 200 Ом, приведены в таблице. Из таблицы следует, что разброс экс- периментальных точек  $N'_i$  укладывается в пределах  $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-7}$ , а систематический дрейф отсутствует.

Результаты измерения коэффициента деления  $N'$  делителя из двух резисторов с номинальными значениями 1 кОм и 40,2 Ом во времени приведены на рис. 3 и 4.

Анализ результатов рис. 3 методом наименьших квадратов показал, что без процедуры термоциклирования (охлаждение до 4,2 К и нагрев до комнатной температуры) разброс экс- периментальных точек  $N'$  укладывался в интервал  $\sigma_{N'} = 1,5 \cdot 10^{-7}$ , а суточный дрейф  $N'$  составлял  $4 \cdot 10^{-7}$ . Соответ- ствующие теоретические оценки случайной погрешности уста- новки отмечены на рисунке вертикальными отрезками.

Были также проведены исследования стабильности резисто- ров в течение недельного периода времени с ежедневным за- мораживанием и размораживанием криогенного зонда. Резуль- таты исследования показаны на рис. 4. На этом рисунке вер- тикальные отрезки соответствуют СКО результатов измерения  $N'$  в течение суток. При такой процедуре измерений значе- ние суточного дрейфа  $N'$ , усредненное по семидневному периоду времени исследования, было несколько больше и составило около  $6 \cdot 10^{-7}$ .

Таким образом, проведенные исследования показали воз- можность использования серийно выпускаемых резисторов ти- па С5-61 в прецизионных криогенных делителях, предназна- ченных для проведения измерений электрического напряжения или тока с погрешностью  $(1-3) \cdot 10^{-7}$  в течение 2—3 ч при рабочем токе  $I_0 \leq 5$  мА.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хэмилтон К. Э., Макдоналд Д. Г., Соважо Дж. Э., Уит- ли С. Р. // ТИИЭР. — 1989. — Т. 77. — № 8. — С. 137.
2. Endo T. e. a. // IEEE Trans. — 1989. — IM-38. — N 2. — P. 229.
3. Kinoshita J. e. a. // Ibid. — P. 290.