

ТЕРМИСТОРНЫЙ УРАВНО-ВЕШЕННЫЙ ОДИНАРНЫЙ МОСТ С КВАЗИПОСТОЯННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ

А.Ф. Иванов

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Градуировка канала относительной электрической проводимости (ОЭП) СТД-систем осуществляется в стационарных лабораторных условиях в баках с активным терmostатированием солевых растворов. Она выполняется в нескольких точках температурного и соленостного диапазонов. Квазипостоянная температура в баке обеспечивается работой электронного регулятора. Для измерения температуры используется термометр сопротивления (термистор) R1, который включается в одно из плеч мостовой схемы (рис. 1). Его сопротивление сравнивается с сопротивлением R2 потенциометра задатчика величины регулируемой температуры, включенного в другое плечо одинарного моста. Точность градуировки канала ОЭП зависит от амплитуды колебаний температуры в баке. Подбрав определенную величину чувствительности регулятора к изменению температуры в заданной точке диапазона, можно значительно уменьшить ее колебания в процессе регулирования. Но чтобы выполнить это же условие в широком диапазоне задаваемых температур необходимо обеспечить, в первую очередь, постоянную чувствительность по температуре схемы сравнения сопротивлений (моста). Один из вариантов решения этой задачи показан в предлагаемой работе. На схеме (рис. 1) R3 и R4 - постоянные сопротивления. Внутреннее сопротивление источника питания E, включенного в одну из диагоналей моста, очень мало и не учитывается в расчетах. С другой диагонали моста, запущенной сопротивлением R5, снимается выходное напряжение U. Сопротивление нагрузки, включенной параллельно шунту, очень

велико и не оказывает заметного влияния на выходное напряжение схемы.

В переходном режиме, возникающем после установки на потенциометре задатчика нового значения температуры и появления большого сигнала рассогласования, схема (рис. 1) представляет собой неуравновешенный мост. Однако, в режиме регулирования температуры и малых сигналов рассогласования этот же мост находится в состоянии близкому к балансу и может теперь рассматриваться как уравновешенный мост.

Выходное напряжение U для неуравновешенного моста связано с напряжением питания E и сопротивлениями моста R1-R5 соотношением:

$$U = \frac{\frac{R2}{(R1+R2)} - \frac{R4}{(R3+R4)}}{1 + \frac{1}{R5} \left(\frac{R1 \cdot R2}{R1+R2} + \frac{R3 \cdot R4}{R3+R4} \right)} \cdot E \quad (1)$$

В положении равновесия моста числитель (1) обращается в нуль. Баланс наступает, когда отношения сопротивлений равны между собой.

$$R1/R2 = R3/R4 = \gamma \quad (2)$$

Чувствительность зашунтиированного моста при его балансе на изменение сопротивления равна

$$\frac{dU2}{dR1} = -\frac{\gamma}{(\gamma+1)^2} \cdot \frac{E}{R1} \cdot \frac{1}{R5} \cdot \frac{R1+R3}{(R1+R3)} \quad (3)$$

Если мост не зашунтирован ($R5 = \infty$), то

$$\frac{dU1}{dR1} = -\frac{\gamma}{(\gamma+1)^2} \cdot \frac{E}{R1} \quad (4)$$

Максимальная чувствительность незашунтиированного моста имеет место, когда $\gamma = 1$. По этой причине далее рассматриваем мосты, в которых сопротивления плеч

$R_1 \div R_4$ либо все равны между собой ($R_1=R_2=R_3=R_4$), либо попарно равны между собой ($R_1=R_2=RT$, $R_3=R_4=RC$). С учетом этого допущения и новых обозначений для R_1 и R_3 формула (3) преобразуется в соотношение

$$\frac{dU_2}{dT} = -\frac{E}{4 \cdot RT} \cdot \frac{1}{2 \cdot R_5} \cdot [1 + \frac{1}{(RT+RC)}]^{-1}, \quad (5)$$

а формула (4) - в соотношение

$$\frac{dU_1}{dT} = -\frac{E}{4 \cdot RT} \quad (6)$$

Термистор является полупроводниковым сопротивлением с отрицательным температурным коэффициентом. Зависимость его электрического сопротивления от температуры T (в диапазоне не более 25 °C) хорошо аппроксимируется аналитическим выражением

$$RT = R_0 \cdot \exp\left(-\frac{B}{T} - \frac{B}{273}\right), \quad (7)$$

где T - температура среды по шкале Кельвина, R_0 - сопротивление термистора при $T=273$ °К, B - константа, зависящая от полупроводникового материала, из которого изготовлен термистор, и его конструктивного оформления. Из (7) видно, что сопротивление RT уменьшается с ростом T .

Абсолютная чувствительность термистора (производная сопротивления по температуре) вследствие нелинейности RT (7) зависит от температуры

$$\frac{dRT}{dT} = -\frac{B}{T^2} \cdot RT, \quad (8)$$

Величина

$$\beta = \left(\frac{dRT}{dT}\right) / RT = -\frac{B}{T^2}, \quad (9)$$

характеризует относительную чувствительность сопротивления термистора к изменению его температуры и называется температурным коэффициентом сопротивления.

Отношение коэффициентов β_1 и β_2 , соответствующих температурам T_1 и T_2 , равно

$$C = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \quad (10)$$

Таким образом, отношение C не зависит от типа термистора, номинального сопротивления R_0 , материала, из которого он изготовлен, а определяется только квадратом отношения температур.

Подставив (8) в (6), получим чувствительность уравновешенного незашунтиированного термисторного моста к изменению температуры термистора dU_1/dT

$$\frac{dU_1}{dT} = -\frac{E}{4} \cdot \frac{B}{T^2}; \quad (11)$$

подставив (8) в (5), получим тот же параметр, но для зашунтированного моста dU_2/dT

$$\frac{dU_2}{dT} = -\frac{E}{4} \cdot \frac{B}{T^2} \cdot \frac{1}{2R_5} \cdot [1 + \frac{1}{(RT+RC)}]^{-1} \quad (12)$$

Из соотношения (11) видно, что чувствительность незашунтированного моста падает с ростом температуры. Из анализа соотношения (12) можно заключить, что хотя первый множитель падает, но второй множитель растет с ростом температуры. Наличие в (12) множителя шунта изменяет ход кривой чувствительности, она имеет максимум в середине рассматриваемого диапазона температур.

Можно связать одним соотношением сопротивления термистора RT_1 и RT_2 на краях температурного диапазона T_1 и T_2 со значениями постоянных сопротивлений $R_3=R_4=RC$ и сопротивлением шунта R_5 . Допустим, что коэффициенты чувстви-

тельности (12) равны между собой при T_1 и T_2

$$\frac{E \cdot B}{4 \cdot T_1^2} \cdot \frac{1}{R_5} \cdot [1 + \frac{1}{(R T_1 + R C)}]^{-1} =$$

$$= \frac{E \cdot B}{4 \cdot T_2^2} \cdot \frac{1}{R_5} \cdot [1 + \frac{1}{(R T_2 + R C)}]^{-1} \quad (13)$$

Из формулы (13), принимая во внимание (10), находим связь сопротивления шунта R_5 с постоянными сопротивлениями R_C .

$$R_5 = \frac{RT_1 - C \cdot RT_2 - (C-1)RC}{2(C-1)} \quad (14)$$

Соотношение (14) показывает, что R_5 линейно зависит от R_C , так как значения RT_1 , RT_2 и C остаются неизменными для выбранного термистора и температурного диапазона.

На рис.2 приведены графики чувствительности незашунтированного (кривая 1) и зашунтированного (кривые 2-5) одинарных мостов, в одном из плеч которого включен термистор.

Температурный диапазон находится в границах $T_1=-2$ °C и $T_2=35$ °C (изменение температуры в океане). В качестве датчика температуры использован термистор KMT-14 с сопротивлением $R_0=10,6$ ком (при $T=273$ °K) и $B=3000$. Для этих параметров термистора его сопротивления на краях температурного диапазона равны $RT_1=11,5$ ком и $RT_2=3$ ком. Если принять постоянное сопротивление $R_C=5,7$ ком, то сопротивление шунта R_5 согласно соотношению (14) будет равно 10,1 ком. При напряжении питания $E=10$ В чувствительности уравновешенного термисторного моста (изменение напряжения в вольтах на изменение температуры на 1 градус) изменяются в пределах:

а) для незашунтированного моста от 0,079 до 0,102 В/°K при отношении $\max/\min=1,292$;

б) для зашунтированного моста от 0,055 до 0,057 В/°K при отношении $\max/\min=1,038$.

Из анализа результатов расчетов видим, что чувствительность незашунтированного моста в выбранном температурном диапазоне изменяется на 29,2 %, а чувствительность зашунтированного моста (хотя она и ниже предыдущей), изменяется лишь на 3,8 % в том же температурном диапазоне.

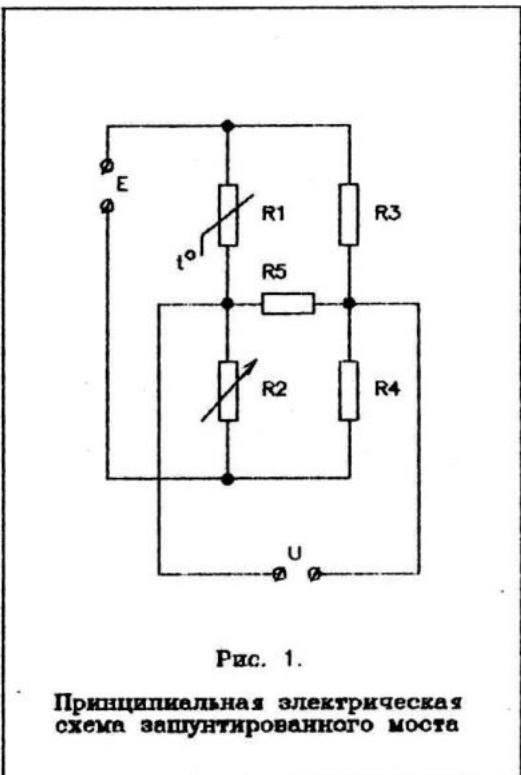
На прямой (14), связывающей сопротивления R_C и R_5 , отношение чувствительностей зашунтированного моста $\max(dU_2/dT)/\min(dU_2/dT)$ остается неизменным и минимальным. Можно поднять (опустить) уровень значений dU_2/dT , уменьшая (увеличивая) величину R_C (рис.3). Для принятых в работе исходных данных B , R_0 , T_1 и T_2 имеем следующие интервалы согласованного изменения R_C и R_5 : \emptyset ком $<R_C < 25,9$ ком и $12,95$ ком $>R_5 > \emptyset$ ком. Если же величины сопротивлений R_C и R_5 выбираются произвольно, то отношение чувствительностей зашунтированного моста $\max(dU_2/dT)/\min(dU_2/dT)$ растет, приближаясь к величине $\max(dU_1/dT)/\min(dU_1/dT)$ для незашунтированного моста (рис.4).

Рассматриваемое в этой работе техническое решение не подходит для случая, когда в качестве датчика температуры используется платиновый (ПТС) или медный (МТС) термометр сопротивления со следующей зависимостью сопротивления от температуры (t °C):

$$\text{для МТС } R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (15)$$

$$\text{для ПТС } R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (16)$$

В обоих случаях первый и второй множители в формуле (12) уменьшаются с ростом температуры. Шунтирование моста с этими измерителями температуры только ухудшает его характеристику чувствительности.



На рисунках 2, 3 и 4 для сравнения и привязки выделены две кривые чувствительности по температуре уравновешенного моста: линия с кружочками — для незашунтированного моста; линия с точками — для зашунтированного моста с упомянутыми в тексте параметрами ($T_1=-2^{\circ}\text{C}$, $T_2=35^{\circ}\text{C}$, $B=3000$, $R_0=10.6\text{к}\Omega$, $R_C=5.7\text{к}\Omega$, $R_5=10.1\text{к}\Omega$).

На этих же рисунках сплошными линиями изображены кривые чувствительности зашунтированного моста, имеющие другие характеристики.

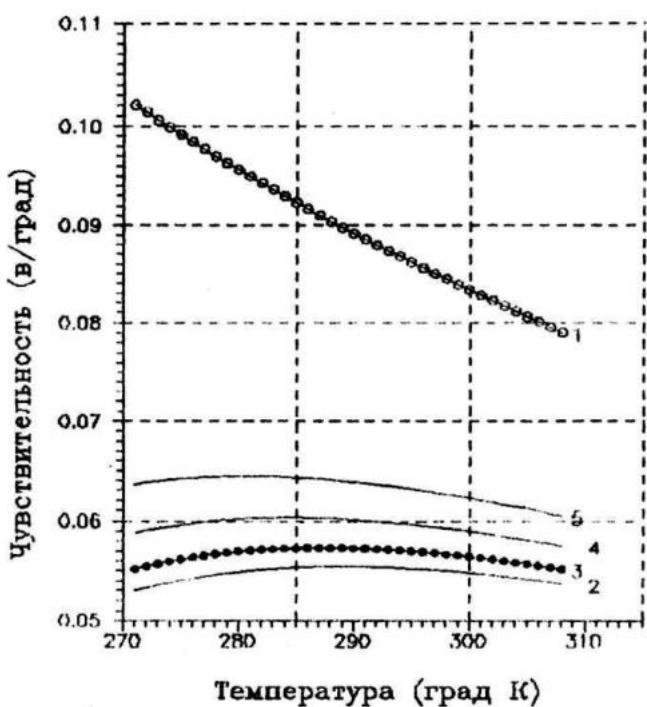


Рис. 2.
Чувствительность термисторного уравновешенного моста:
1 — незашунтированного,
2 — 5 — зашунтированного
в диапазоне от 271 до 308°К,
 $B=3000$, $R_0=10.6\text{к}\Omega$, $R_C=5.7\text{к}\Omega$

Значения температуры с равной чувствительностью моста:
2 — $T_1=280.25^{\circ}\text{K}$, $T_2=298.75^{\circ}\text{K}$,
 $R_5=9.25\text{к}\Omega$, $\text{max}/\text{min}=1.047$;
3 — $T_1=271^{\circ}\text{K}$, $T_2=308^{\circ}\text{K}$,
 $R_5=10.1\text{к}\Omega$, $\text{max}/\text{min}=1.038$;
4 — $T_1=261.75^{\circ}\text{K}$, $T_2=317.25^{\circ}\text{K}$,
 $R_5=11.7\text{к}\Omega$, $\text{max}/\text{min}=1.049$;
5 — $T_1=252.5^{\circ}\text{K}$, $T_2=326.5^{\circ}\text{K}$,
 $R_5=14.2\text{к}\Omega$, $\text{max}/\text{min}=1.066$

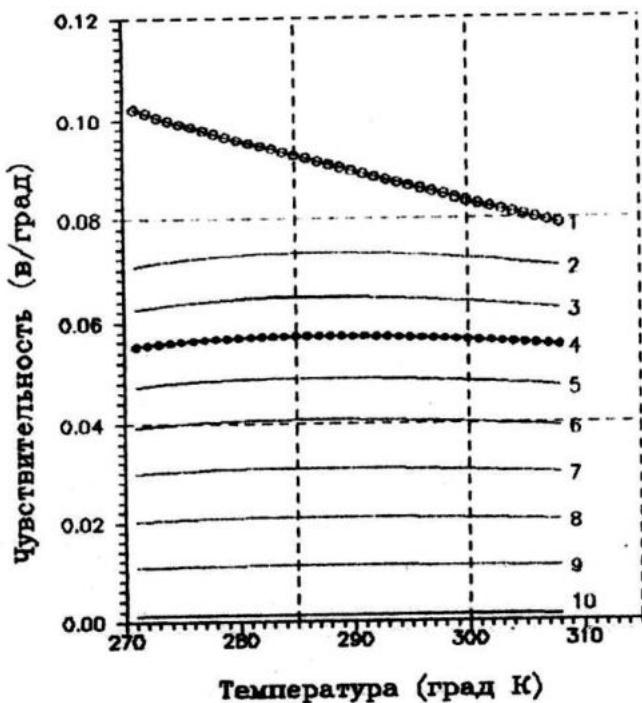


Рис. 3.

Чувствительность термисторного уравновешенного моста:
1 — незашунтированного;
2 — 10 — зашунтированного;
RC и R5 связаны соотношением (14)

1	— RC — любое,	R5 = ∞ ;
2	— RC = 0.1 ком,	R5 = 12.9 ком;
3	— RC = 3.0 ком,	R5 = 11.5 ком;
4	— RC = 5.7 ком,	R5 = 10.1 ком;
5	— RC = 8.6 ком,	R5 = 8.7 ком;
6	— RC = 11.5 ком,	R5 = 7.2 ком;
7	— RC = 15.0 ком,	R5 = 5.5 ком;
8	— RC = 18.5 ком,	R5 = 3.7 ком;
9	— RC = 22.0 ком,	R5 = 2.0 ком;
10	— RC = 25.5 ком,	R5 = 0.2 ком.

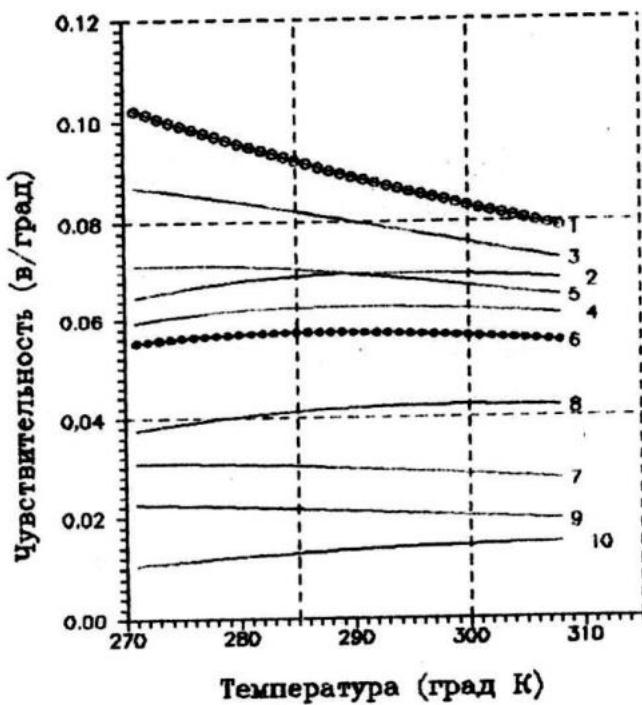


Рис. 4.

Чувствительность термисторного уравновешенного моста:
1 — незашунтированного;
2 — 10 — зашунтированного;
RC и R5 выбираются произвольно

1	— RC — любое,	R5 = ∞ ;
2	— RC = 0.1 ком,	R5 = 10.1 ком;
3	— RC = 5.7 ком,	R5 = 50.0 ком;
4	— RC = 3.0 ком,	R5 = 10.1 ком;
5	— RC = 5.7 ком,	R5 = 20.0 ком;
6	— RC = 5.7 ком,	R5 = 10.1 ком;
7	— RC = 35.0 ком,	R5 = 10.1 ком;
8	— RC = 5.7 ком,	R5 = 5.0 ком;
9	— RC = 60.0 ком,	R5 = 10.1 ком;
10	— RC = 5.7 ком,	R5 = 1.0 ком.