

## **Метод калибровки эталонных делителей напряжения до 1000 В**

**А. С. КАТКОВ**

*Разработан метод калибровки резистивного делителя напряжений для коэффициентов отношения 1000 В/10 В и 100 В/10 В с неопределенностью на уровне  $10^{-7}$ . Метод позволяет проводить калибровку при рабочем напряжении делителя и использован для калибровки транспортируемого эталона отношения напряжений при проведении ключевых сличений ССЕМ-К8.*

**Ключевые слова:** делитель напряжения, калибровка.

*The method of calibration of precise resistive voltage dividers with ratios of 1000 V/10 V and 100 V/10 V with an uncertainty at the level of  $10^{-7}$  is developed. The method allows conducting a calibration under the working voltage applied to divider, and is used for calibration of transportable standard of voltage ratios during key comparisons ССЕМ-К8.*

**Key words:** voltage divider, calibration.

Калибровка прецизионных вольтметров и калибраторов с диапазонами напряжений до 1000 В осуществляется с помощью точных делителей напряжения, которые должны

обеспечивать погрешность коэффициентов отношения напряжений менее  $10^{-6}$ . Метрологическое обеспечение прецизионных вольтметров и калибраторов постоянного на-

пряжения для измерения напряжений до 1000 В основано на использовании резистивных делителей напряжения. Для определения коэффициентов отношения напряжений делителя применяют различные методы, включая мостовые, сравнения сопротивлений и напряжений отдельных секций резистивного делителя, метод Хаммона. Точность измерения отношения напряжений зависит от погрешности измерения разности напряжений сравниваемых секций, изменения сопротивлений секций делителя, отличия напряжений калибровки и рабочего, влияния сопротивлений утечки, соединительных проводов и контактных сопротивлений переключателей. Достигнутые точности измерения отношений для коэффициентов 1000 В / 10 В и 100 В / 10 В при использовании прецизионных делителей напряжения типа Р35 оцениваются погрешностью 0,005—0,001 %. Прецизионный делитель напряжения модели Кельвин—Варлей 720 А фирмы Fluke гарантирует абсолютную линейность порядка  $10^{-7}$  относительно входного напряжения, что в пересчете к коэффициентам 1000 В / 10 В и 100 В / 10 В дает погрешности соответственно  $4,5 \cdot 10^{-6}$  и  $10^{-6}$ . Разработанный метод предназначен для калибровки делителя, составленного из равно номинальных наборов сопротивлений на основе использования отношения 1:1.

Коэффициент отношения напряжений резистивного делителя в общем виде можно выразить через отношение падений напряжения на двух разных группах резисторов.

В [1, 2] предложено измерять отношения напряжений резисторов делителя относительно опорного резистора с помощью дополнительных источников напряжений. Однако этот метод предъявляет высокие требования к стабильности питающего делитель источника и опорных источников на 10 и 100 В, возможно влияние утечек как в цепи нуль-индикатора, так и в цепях источников напряжения.

При последовательном включении резисторов через них протекает один и тот же ток, что позволяет перейти от отношения падений напряжения к отношению сопротивлений групп резисторов, при этом наиболее точно измеряется отношение 1:1. Данный метод реализуется в мостовых схемах, применяемых для калибровки делителей [3]. К недостаткам используемых методов следует отнести отличие мощности, приложенной к делителю при проведении калибровки, от мощности, приложенной к делителю в рабочем состоянии, что вызывает дополнительные погрешности, связанные с температурным режимом делителя напряжения, кроме того, сопротивления соединительных проводников и переключателей могут ограничивать точностные возможности мостовых схем.

Идея предложенного метода рассмотрена на примере калибровки отношений 3:1 и 10:1. Для цепочки из трех равно номинальных резисторов  $R_1, R_2, R_3$  отношение 3:1 можно выразить в виде

$$r_3 = \frac{1}{R_1} \sum_{m=1}^3 R_m = 1 + \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $R_2/R_1, R_3/R_2$  представляют отношение 1:1. Таким образом, измерение отношения  $r_3 = 3:1$  может быть заменено измерением отношения 1:1 для двух групп данного ряда резисторов.

Аналогично для цепочки из десяти равно номинальных резисторов  $R_1, \dots, R_{10}$  отношение 10:1 можно записать как

$$r_{10} = \frac{1}{R_1} \sum_{m=1}^{10} R_m = 1 + \frac{R_2}{R_1} + \left\{ \frac{R_2}{R_1} \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_4+R_5+R_6}{R_1+R_2+R_3} \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) \right] \right\} \times \left( 1 + \frac{R_7+R_8+R_9+R_{10}}{R_3+R_4+R_5+R_6} \right), \quad (2)$$

где  $R_2/R_1, R_3/R_2, (R_4+R_5+R_6)/(R_1+R_2+R_3)$  и  $(R_7+R_8+R_9+R_{10}) / (R_3+R_4+R_5+R_6)$  представляют отношение 1:1. Таким образом, измерение отношения  $r_{10} = 10:1$  можно заменить измерением отношения 1:1 для четырех групп данного ряда резисторов.

При последовательном включении двух рядов резисторов, сумма сопротивлений одного из которых эквивалентна резистору другой группы, коэффициент отношения делителя можно получить как произведение коэффициентов отношения первого и второго рядов. Например, первый ряд состоит из десяти резисторов

$$R_1^a \approx R_2^a \approx R_3^a \approx R_4^a \approx R_5^a \approx R_6^a \approx R_7^a \approx R_8^a \approx R_9^a \approx R_{10}^a.$$

Во втором ряду сопротивление резистора  $R_1^b$  представлено суммой сопротивлений резисторов первого ряда:

$$R_1^b = \sum_{i=1}^{10} R_i^a \text{ и } R_1^b \approx R_2^b \approx R_3^b \approx R_4^b \approx R_5^b \approx R_6^b \approx R_7^b \approx R_8^b \approx R_9^b \approx R_{10}^b.$$

В этом случае коэффициент отношения 30:1 может быть получен в виде

$$r_{30} = r_3^b r_{10}^a \quad (3)$$

при измерении двух отношений 1:1 во втором ряду резисторов и четырех отношений 1:1 в первом ряду резисторов, а коэффициент отношения 100:1

$$r_{100} = r_{10}^b r_{10}^a \quad (4)$$

при измерении восьми отношений 1:1.

Измерение отношения 1:1 предлагается проводить с помощью мостовой схемы, составленной из двух сравниваемых резисторов (или групп резисторов) основного делителя  $R_{01}, R_{02}$  и двух дополнительных резисторов  $R_{D1}, R_{D2}$  (рис. 1),

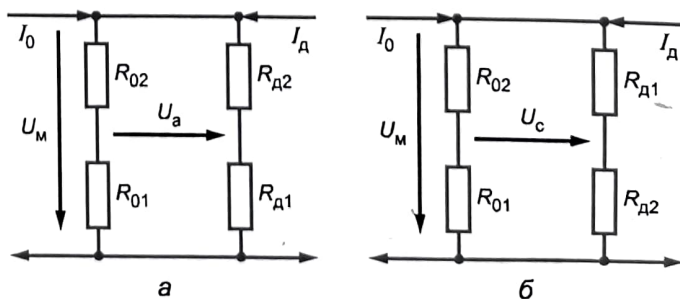


Рис. 1. Схема измерения отношения 1:1 с перестановкой плеч моста

при этом плечи моста получают смещение от независимых источников постоянного тока  $I_0, I_A$ . Данная схема позволяет проводить измерение отношений при заданном (рабочем) напряжении резисторов, что уменьшает погрешность, связанную с мощностью, а введение независимых источников смещения позволяет снизить погрешность, вызываемую сопротивлением соединительных проводников и контактными сопротивлениями переключателей. С целью достижения высокой точности измерения отношения 1:1 в мостовой схеме используется перестановка плеч ( $R_{d1}, R_{d2}$ ), что ослабляет требования к точности и стабильности дополнительных резисторов.

Уравнение для расчета отношения  $K = R_{02} / R_{01}$  в данной схеме измерения записывается в виде

$$K = 1 + 2(U_c + U_a) / U_M = 1 + k, \quad (5)$$

где  $U_M$  — напряжение питания моста;  $U_a$  и  $U_c$  — напряжения в диагонали моста при прямом (см. рис. 1, а) и инверсном подключении  $R_{d1}$  и  $R_{d2}$  (см. рис. 1, б);  $k$  — отличие отношения от единицы при неравенстве сопротивлений  $R_{01}$  и  $R_{02}$ .

Если записать отношения  $R_2/R_1 = 1 + k1$ ;  $R_3/R_2 = 1 + k2$ ;  $(R_4+R_5+R_6)/(R_1+R_2+R_3) = 1 + k3$ ; и  $(R_7+R_8+R_9+R_{10})/(R_3+R_4+R_5+R_6) = 1 + k4$ , то можно выразить (1) и (2), используя полученные результаты измерения с помощью моста:

$$r_{3m} = 3(1 + (2/3)k1 + (1/3)k2), \quad (6)$$

$$r_{10m} = 10(1 + 0,7k1 + 0,4k2 + 0,6k3 + 0,4k4). \quad (7)$$

Методическая относительная погрешность уравнений (8) и (9), полученных после математических преобразований исходных уравнений (1) и (2) и отбрасывания членов второго порядка малости, не превышает  $10^{-8}$  при отличии сопротивлений резисторов  $R_1, \dots, R_{10}$  от их среднего значения менее  $10^{-4}$ .

**Аппаратура и методика калибровки.** Разработанный метод применен для калибровки резистивного делителя напряжения типа Datron 4902S, который использовали в качестве эталона сравнения в ключевых сличениях ССЕМ-К8 [4], и меры напряжения на диапазон 100—1000 В, содержащей делитель с аналогичными характеристиками.

Калибруемый делитель состоит из десяти последовательно включенных резисторов с номинальным сопротивлением  $R_{ном} = 10$  кОм и девяти с  $R_{ном} = 100$  кОм. Делитель рассчитан на напряжение до 1000 В, при этом выходное напряжение на сопротивлении 100 кОм будет 100 В, а на сопротивлении 10 кОм соответственно 10 В. Для снижения влияния утечек делитель снабжен цепочкой резисторов, аналогичной основному делителю, что позволяет создавать защитные потенциалы в измерительной цепи, не воздействуя на основную делитель.

Калибровке были подвергнуты коэффициенты отношения 1000 В/100 В, 100 В/10 В, 300 В/100 В, 30 В/10 В, а также 1000 В/10 В и 300 В/10 В. Как было показано в (3) и (4), последние два коэффициента отношения можно получить по результатам калибровки первых трех отношений. Относительный разброс сопротивлений резисторов не превышал  $10^{-5}$ . Делитель содержал резисторы с малым температурным коэффициентом и высокой долговременной стабильностью.

Для проведения калибровки в качестве дополнительных резисторов применяли серийные резисторы типа МРХ, из

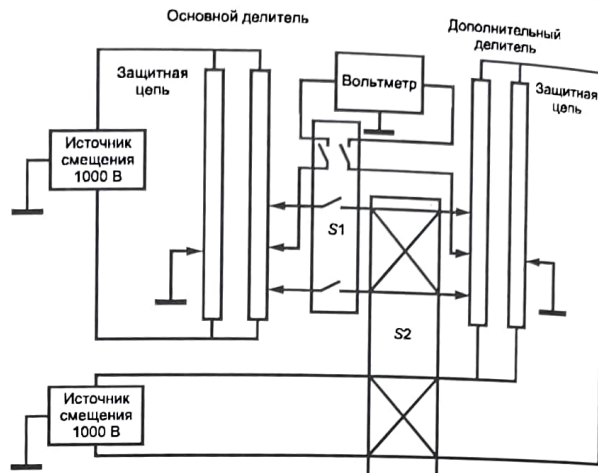


Рис. 2. Схема калибровки делителя

которых была собрана измерительная схема (рис. 2) по построению аналогичная калибруемому делителю. В качестве коммутаторов  $S1$  и  $S2$  использовали переключатели типа П309. Напряжение в диагонали моста измеряли вольтметром с разрешающей способностью 1 мкВ, источниками смещения служили калибраторы напряжения с нестабильностью 0,001 %. Особенность построения предложенной схемы измерения состоит в применении защитных цепей для создания в измерительной диагонали моста нулевого потенциала относительно земли. В такой схеме существенно уменьшено влияние утечек, обусловленных калибратором, вольтметром и соединительными проводниками. При использовании двух источников смещения в сочетании с мостовой схемой включения требования к стабильности источников снижаются примерно в  $R_n / r_{с.п}$  раз ( $R_n$  — сопротивление плеча моста;  $r_{с.п}$  — сопротивление соединительных проводников моста), т. е. не менее чем в  $10^4$  раз при  $R_n = 10$  кОм и  $r_{с.п} = 1$  Ом. Благодаря двум источникам смещения влияние сопротивлений соединительных проводников между основным и дополнительным делителями ослабляется также примерно в  $R_n / r_{с.п}$  раз.

Цикл калибровки делителя включает:

- подачу напряжений смещения на основной и дополнительный делители;
- подключение потенциальных выводов резисторов  $R_2$  и  $R_1$  к соответствующим выводам дополнительных резисторов  $R_{d2}$  и  $R_{d1}$ ;
- подсоединение нулевого потенциала к точкам защитных цепей, соответствующих диагонали моста;
- подключение вольтметра к диагонали моста, образованного резисторами  $R_2, R_1, R_{d2}$  и  $R_{d1}$  и измерение разности напряжений  $U_{a1}$ ;
- перемену местами резисторов  $R_{d2}$  и  $R_{d1}$ ;
- измерение разности напряжений  $U_{c1}$ .

После завершения первого цикла калибровки мостовую схему подсоединяют к резисторам  $R_3$  и  $R_2$  и соответствующим резисторам дополнительного делителя, одновременно переключают точки защитных цепей и вольтметра и измеряют напряжения  $U_{a2}$  и  $U_{c2}$ . Аналогично проводят измерения во всех восьми циклах калибровки. Полученные данные измерения напряжений используют для расчета коэффициентов отношения по формулам (3)—(7). При наличии больших термо-ЭДС в измерительной цепи (более 1 мкВ) калибровку проводят при двух полярностях источников смещения с усреднением полученных результатов.

**Неопределенность калибровки.** Поскольку данный метод применен при проведении международных ключевых сличений ССЕМ-К8, точность отношения напряжений оценивали в соответствии с Руководством по выражению неопределенности [5]. В этих расчетах численные значения относительной стандартной неопределенности практически совпадают со значениями относительной погрешности отношения напряжений, выраженной в виде среднего квадратического отклонения. Неопределенность калибровки отношения напряжений делителя зависит от выбранного коэффициента отношения и в соответствии с методом калибровки определяется через неопределенность отношения 1:1.

Согласно (5) неопределенность отношения  $K \approx 1$  определяется как

$$u(K) = 2 \sqrt{\frac{u^2(U_a) + u^2(U_c)}{U_M^2} + \frac{u^2(U_M)(U_a + U_c)^2}{U_M^4}} \approx 2 \sqrt{\frac{u^2(U_a) + u^2(U_c)}{U_M^2}} \quad (8)$$

Влиянием неопределенности измерения напряжения моста  $u(U_M)$  в (8) можно пренебречь, так как типичное значение  $U_a/U_M$  и  $U_c/U_M$  не превышает  $10^{-5}$ , а  $u(U_M)/U_M \leq 10^{-4}$ .

При проведении калибровки на значения напряжений  $U_a$  и  $U_c$  оказывают влияние различные факторы:

разность напряжений источников смещения, измеряемая при изменении выходного напряжения одного из источников на 10 %, которую пересчитывают на уровень 0,01 %. Влияние разбаланса напряжений источников фиксировали по изменению показаний вольтметра в диагонали моста. Измерения показали, что погрешность от разбаланса напряжений источников на 0,01 % не превышает  $10^{-9}$  для всех циклов калибровки;

сопротивление изоляции между проводами, соединяющими резисторы основного делителя, которое измеряют непосредственно при отключенных делителях, источниках

смещения и вольтметре. Сопротивление изоляции между проводниками составило  $(0,5-1) \cdot 10^{13}$  Ом для секций 10 кОм при испытательном напряжении 100 В и  $(1-2) \cdot 10^{13}$  Ом для секций 100 кОм при испытательном напряжении 500 В. Сопротивление изоляции одной из секций переключателя, подсоединяемой к группе резисторов с общим сопротивлением 400 кОм, составило  $5 \pm 0,6$  ТОм; погрешность от данной утечки не превышает  $(8 \pm 1) \cdot 10^{-8}$ , ее учитывают в виде поправки. Оценка влияния утечек между проводниками, подключаемыми параллельно калибруемым резисторам, зависит от номинального значения сопротивления резистора и не превышает  $4 \cdot 10^{-8}$  для всех циклов калибровки;

утечки измерительных цепей на землю (выходных цепей источников смещения, переключателей, входной цепи вольтметра), которые измеряют в схеме с подключенными цепями защитных делителей при шунтировании возможных сопротивлений утечек резистором 10 МОм. Влияние шунтирования фиксировали по изменению показаний вольтметра в диагонали моста. Результат измерения показал, что действие защитных делителей ослабляет влияние сопротивлений утечек в  $10^4$  раз. Так как сопротивления утечки на землю оценивают  $10^9-10^{12}$  Ом, оценка влияния данных утечек при действии защитных цепей не превышает  $4 \cdot 10^{-9}$  для всех циклов калибровки;

дрейф вольтметра, который определяют по изменению показаний вольтметра в течение 1 мин после момента переключения в измерительной цепи и двухминутной паузы. Это явление обусловлено собственной нестабильностью показаний вольтметра и установлением токов поляризации в изоляции измерительной цепи. Оценка влияния дрейфа зависит от номинала сопротивления резистора и не превышает  $3 \cdot 10^{-8}$  для всех циклов калибровки;

калибровка вольтметра, влияние которой оценивают на уровне  $2 \cdot 10^{-9}$ , так как измеряемая разность показаний не превышает  $1 \cdot 10^{-5}$ , а неопределенность коэффициента усиления и линейность вольтметра не более  $2 \cdot 10^{-4}$ ,

неисключенная термо-ЭДС, которую в коммутационной цепи измеряют при многократных переключениях и оценивают как  $4 \cdot 10^{-9}$  при напряжении питания моста 20 В.

Таблица 1

Неопределенности измерений типа В для делителя с сопротивлениями секций 10 и 100 кОм

Источник неопределенности	Секции 10 кОм						Секции 100 кОм					
	10 В/10 В		30 В/30 В		40 В/40 В		100 В/100 В		300 В/300 В		400 В/400 В	
	$u(k1), u(k2)$	$v_i$	$u(k3)$	$v_i$	$u(k4)$	$v_i$	$u(k1), u(k2)$	$v_i$	$u(k3)$	$v_i$	$u(k4)$	$v_i$
Разность напряжений источников смещения	0,001	5	0,001	5	0,001	5	0,001	5	0,001	5	0,001	5
Утечки в цепи измерения	0,001	5	0,003	5	0,004	5	0,010	5	0,030	5	0,040	5
Утечки на землю	0,001	5	0,001	5	0,001	5	0,002	5	0,004	5	0,004	5
Дрейф показаний вольтметра	0,030	10	0,015	10	0,012	10	0,020	10	0,014	10	0,011	10
Коэффициент усиления и линейность вольтметра	0,002	5	0,002	5	0,002	5	0,002	5	0,002	5	0,002	5
Термо-ЭДС коммутационной цепи	0,004	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10
Стандартная неопределенность	0,030	11	0,016	11	0,013	13	0,023	14	0,033	8	0,042	6

Результаты исследований неопределенностей измерений типа В для отношений 1:1 представлены в табл. 1 для секций с сопротивлениями 10 и 100 кОм. Оценка неопределенности выражена в относительных единицах без множителя  $10^{-6}$  с соответствующей степенью свободы  $\nu_i$ .

Оценка стандартной неопределенности типа В для коэффициентов отношения 30 В/10 В, 100 В/10 В, 300 В/100 В и 1000 В/100 В проведена с использованием оценок единичных отношений (см. табл. 1) по формулам, полученным из уравнений (6) и (7):

$$u(r_{3M}) = [(2/3 u(k1))^2 + (1/3 u(k2))^2]^{1/2}; \quad (9)$$

$$u(r_{10M}) = [(0,7 u(k1))^2 + (0,4 u(k2))^2 + (0,6 u(k3))^2 + (0,4 u(k4))^2]^{1/2}. \quad (10)$$

Оценка стандартной неопределенности типа В для коэффициентов отношения 300 В/10 В и 1000 В/10 В проведена с использованием оценок (9) и (10) по формулам, полученным из (3) и (4):

$$u(r_{3M}^B r_{10M}^n) = [u(r_{3M}^B)^2 + u(r_{10M}^n)^2]^{1/2};$$

$$u(r_{10M}^B r_{10M}^n) = [u(r_{10M}^B)^2 + u(r_{10M}^n)^2]^{1/2}.$$

где  $r_{3M}^B$  означает отношение 3:1 для секции резисторов 100 кОм,  $r_{10M}^B$  — отношение 10:1 для секции резисторов 100 кОм;  $r_{3M}^n$  — отношение 3:1 для секции резисторов 10 кОм;  $r_{10M}^n$  — отношение 10:1 для секции резисторов 10 кОм.

Результаты исследований делителя в виде отличий от номинальных отношений и соответствующих относительных стандартных неопределенностей типа А и типа В приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты исследований делителя при различных коэффициентах отношения напряжений

Отношение напряжений делителя	Отличие от номинального отношения, $\times 10^{-6}$	Число измерений	Стандартная неопределенность типа А, $\times 10^{-6}$	Стандартная неопределенность типа В, $\times 10^{-6}$	Число эффективных степеней свободы
1000 В / 10 В	-4,162	31	0,007	0,034	47
100 В / 10 В	-4,485	31	0,022	0,027	23
300 В / 10 В	-4,242	31	0,022	0,042	56
30 В / 10 В	-5,082	31	0,005	0,031	28

Оценка стандартной неопределенности типа А получена по результатам измерений отношений напряжений с помощью описанного метода калибровки. Измерения прово-

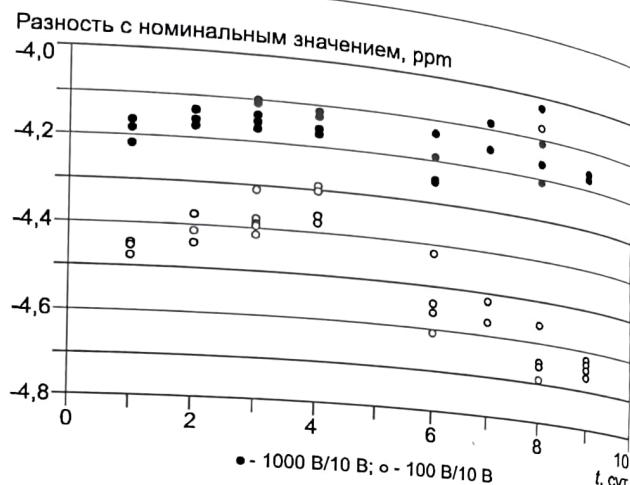


Рис. 3. Результаты измерений коэффициентов отношения 1000 В/10 В и 100 В/10 В делителя Datron 4902S

дили в течение 10 дней. Временная зависимость результатов измерений для двух коэффициентов отношения напряжений приведена на рис. 3.

Поскольку предложенный метод позволяет проводить калибровку коэффициента отношения при любом приложенном к делителю напряжении, имеется возможность использовать данный метод для измерения зависимости коэффициента деления от приложенного напряжения или мощности. На рис. 4 показана зависимость неопределенности результатов измерения одного из коэффициентов деления от приложенного напряжения в диапазоне 10—1000 В.

В заключение следует отметить, что предложенный метод калибровки делителя напряжения, составленного из последовательно включенных групп равно номинальных резисторов, имеет следующие преимущества:

калибровка проводится при рабочем напряжении делителя, что снижает влияние изменений мощности на неопределенность результатов измерений вследствие различного теплового режима делителя либо при калибровке с напряжением, отличным от рабочего, либо при калибровке находящихся под напряжением отдельных резисторов делителя;

устраняется влияние контактных соединений и проводников при проведении калибровки;

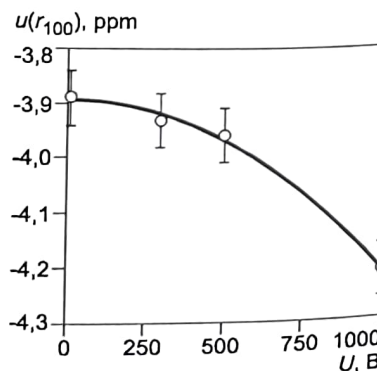


Рис. 4. Зависимость коэффициента отношения 100:1 от приложенного напряжения

исключается влияние утечек измерительных цепей и используемых приборов на землю;

входные цепи вольтметра находятся при нулевом потенциале относительно земли;

отсутствует влияние нестабильности источников смещения;

снижаются требования к стабильности и точности дополнительных резисторов, применяемых при калибровке.

Перечисленные достоинства предложенного метода позволяют достигать высокой точности ( $10^7$ ) калибровки отношения напряжения, а также измерять зависимость коэффициентов отношения от приложенного к делителю напряжения.

Литература

1. **Slinde H., Lind K.** // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2003. — V. 52. — N 2. — P. 461.
2. **Sakamoto Y., Fujiki H.** // Ibid. — P. 465.
3. **The Datron**, 4902 and 4902S voltage dividers, 4901 calibrator bridge/lead compensator. User manual. — Datron Instrum. Limited, 1996.
4. **Marullo-Reedtz G. e. a.** // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2003. — V. 52. — N 2. — P. 419.
5. **Guide** to the Expression of Uncertainty in Measurement. — Geneva: ISO, 1995.

*Дата одобрения 15.11.2004 г.*