

*Н. П. Ординарцева*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕДАЧИ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ЕДИНИЦЫ ВЕЛИЧИНЫ КАЛИБРУЕМОМУ КАНАЛУ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

*N. P. Ordinartseva*

### THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY TRANSMISSION IN THE WORKING CONDITIONS OF UNIT VALUES TO THE CALIBRATED CHANNEL MEASURING SYSTEM

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Исследуется возможность передачи единицы величины в рабочих условиях калибруемому измерительному каналу измерительной системы (ИК ИС). **Материалы и методы.** С целью доказательства возможности передать единицу величины в условиях уникально сложившейся совокупности влияющих величин в момент калибровки ИК ИС проведен вычислительный эксперимент с использованием метода Монте-Карло для случаев комплектной калибровки простого ИК, комплектной калибровки сложного ИК в случае одной или двух влияющих величин. Влияющими величинами выбраны температура, вносящая наибольший вклад в погрешность передачи единицы величины, и время, обуславливающее временную нестабильность эталонов. **Результаты.** Полученные результаты эксперимента, приведенные в статье, подтвердили возможность передачи единицы величины в рабочих условиях эксплуатации измерительной системы и калибровки ИК ИС в этих условиях. Это позволит применять калибровку ИК ИС как малозатратный способ повышения точности ИС без демонтажа ИК и его транспортировки в нормальные условия калибровочной лаборатории. **Выводы.** Полученные результаты доказали возможность калибровки ИК ИС в рабочих условиях.

**A b s t r a c t. Background.** The possibility of transfer of units of value in the working conditions of the calibrated measuring channel of the measuring system is research (MC MS). **Materials and methods.** In order to prove the possibility to transfer unit values in the unique conditions prevailing totality of the influence quantities at the time of calibration of the measuring channel of the measuring system (MC MS) carried out computational experiment using Monte-Carlo simulation for the cases of complete calibration of the simple MC MS, complete calibration of the complex MC MS in the case of one or two influencing factors. Influence factors selected temperature, contributed most to the error transmission unit size, and time, causing temporary instability of the standards. **Results.** The obtained results of the experiment presented in the paper confirmed the possibility of transferring units of value in the working conditions of the measuring system and calibration of the MC MS in these conditions. **Conclusions.** The obtained results proved the possibility of calibration of the in the working conditions.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** калибровка измерительных каналов измерительных систем, поправка, стационарный эталон, переносной (транспортируемый) эталон, прослеживаемость единицы величины.

**Key words:** calibration of measuring channels of measuring systems, the correction, stationary standard, portable (transportable) standard, the traceability unit value.

Пользователи средств измерений (СИ) прибегают к калибровке как к способу повышения точности: найденная по результатам калибровки поправка повышает точность калибруемого СИ, приближая ее к точности эталона (с соответствующей неопределенностью измерений при калибровке). Определяемая разность показаний эталона и калибруемого СИ, документально подтвержденная связь эталона с государственным первичным эталоном (ГПЭ) обеспечивают прослеживаемость единицы величины [1, п. 9.2]. Последнее обеспечивает значимую роль и место калибровки в системе обеспечения единства измерений.

Прослеживаемость единицы величины иллюстрирует рис. 1. Передача единицы величины по поверочной схеме является процедурным вопросом; метрологическая прослеживаемость единицы величины как связь переносного эталона с ГПЭ интегрировала в себя неопределенности эталонов на всех уровнях калибровки, начиная с первичного эталона.

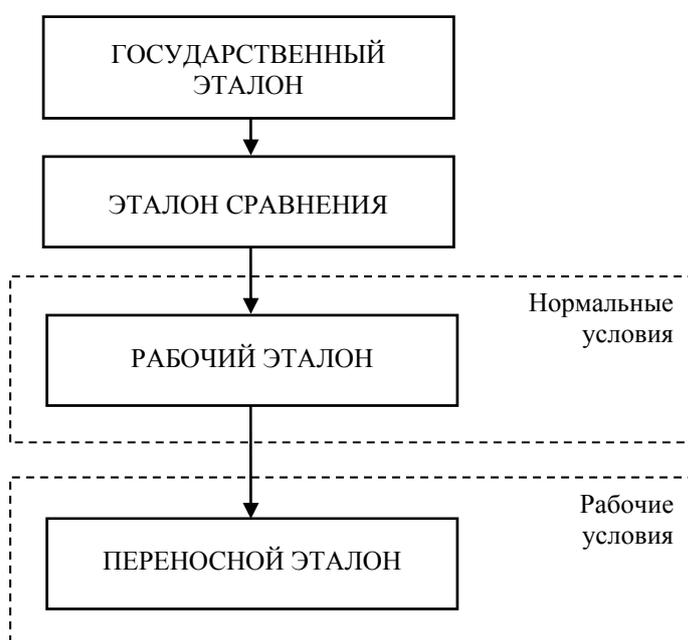


Рис. 1. Прослеживаемость единицы величины

Для калибровки СИ в рабочих условиях эксплуатации предложен новый способ, который состоит в проведении двухэтапной процедуры передачи единицы величины СИ с использованием метода замещения, реализуемого с помощью переносного эталона, применяемого в указанных условиях, и стационарного эталона, находящегося в лабораторных условиях. Предложенный способ подробно описан в [2, 5]. Известен способ передачи единицы величины в рабочих условиях, когда используют переносной (транспортируемый [1, п. 8.15]) эталон, поправка для которого находится при сличении стационарного и переносного эталонов в нормальных условиях, но найденная поправка применяется для условий сложившейся совокупности влияющих величин рабочих условий. Предложенный способ [1–5] позволяет находить поправку воспроизведения единицы величины переносным эталоном именно для уникально сложившейся совокупности влияющих величин, тем самым обеспечивая повышение точности передачи единицы величины калибруемому ИК ИС.

Для доказательства работоспособности и применимости предложенного нового метода [2–5] выполнено моделирование  $\Delta_{py}$ ,  $\nabla_{py}$  (погрешности / поправки) передачи единицы величины калибруемому ИК ИС в условиях, отличных от нормальных [6], методом Монте-Карло. В статье предлагается описание выполненного эксперимента и приводятся полученные результаты, доказавшие возможность выполнения калибровочных работ ИС и их каналов в ра-

бочих условиях эксплуатации без демонтажа и транспортировки элементов системы в нормальные условия калибровочной лаборатории.

Метод Монте-Карло [7] является численным методом моделирования случайных стохастических процессов и лежит на стыке теоретического и экспериментального исследования. В качестве объекта исследования выбрана ИК ИС с токовым входом (входами) и рассмотрены случаи:

- комплектной калибровки простого ИК ИС;
- комплектной калибровки сложного ИК ИС.

В вычислительном эксперименте, реализующемся в работах [2–5], в качестве стационарного эталона использован мультиметр цифровой прецизионный модели Fluke 8508A; в качестве переносного эталона – калибратор многофункциональный МСХ-II-R. Для измерений температуры рабочих условий использован термогигрометр Ива-6Н, а для воспроизведения температуры рабочих условий (для переносного эталона – калибратор многофункционального МСХ-II-R) – испытательная камера WK3-340.70.

Эксперимент выполнен при следующих условиях. Температура окружающей среды, в которой находился калибруемый ИК, в процессе калибровки была в диапазоне  $\Theta \in [34,8; 35,2]$  °С. При межповерочном интервале стационарного эталона (один год) предполагалось, что сличение стационарного и переносного эталонов выполнялось на 200-й день от даты последней поверки стационарного эталона, а с момента работы переносного эталона в рабочих условиях до его сличения со стационарным эталоном прошел один день. Калибруемая точка диапазона измерений ИК ИС – 10 мА.

Схема комплектной калибровки простого ИК в рабочих условиях эксплуатации ИС показана на рис. 2.

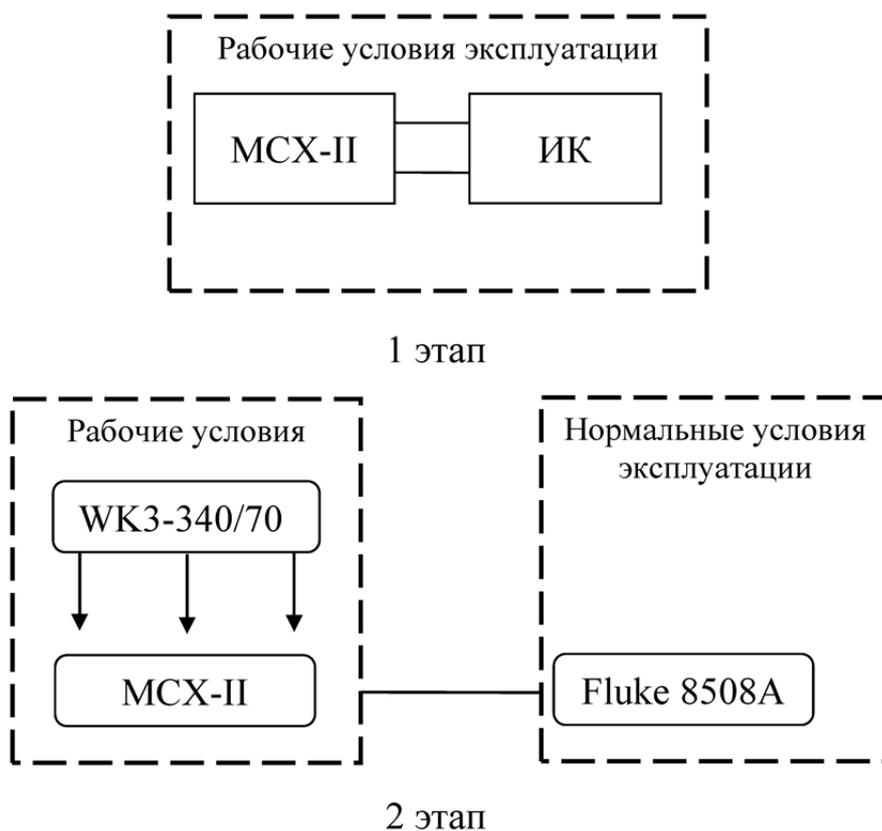


Рис. 2. Комплектная калибровка простого ИК в рабочих условиях

**Этап 1.** С помощью переносного эталона (калибратора многофункционального МСХ-II-R) осуществляем воспроизведение силы постоянного тока, значение которого соответствует калибруемой точке 10 мА; сигнал подаем на вход калибруемого ИК. С помощью термогигро-

метра Ива-6Н осуществляем измерение температуры рабочих условий, которое, предположим, оказалось равно  $\Theta = (35,0 \pm 0,3) \text{ }^\circ\text{C}$ . Выполняем калибровочные работы ИК.

Модель калибровки на этапе 1 представим следующим алгоритмическим оператором. Переносной эталон МСХ-II-R воспроизводит силу постоянного тока с погрешностью, систематическую составляющую которой примем равной  $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,4\Delta_{\text{осн}}, +0,4\Delta_{\text{осн}}]$ , случайную –  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,5\Delta_{\text{осн}}, +0,5\Delta_{\text{осн}}]$ . С учетом допускаемой основной погрешности калибратора многофункционального модели МСХ-II-R  $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$  мА в модели примем равномерный закон распределения  $\varepsilon_{\text{сист}}$ ;  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$  мА, примем нормальный закон распределения  $\varepsilon_{\text{случ}}$ . Коэффициент температурной составляющей дополнительной погрешности примем в модели равным  $\alpha \in \left[-0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10 \text{ }^\circ\text{C}}, +0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10 \text{ }^\circ\text{C}}\right]$  или  $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$  мА/°С,

распределение равномерное, температура находится в диапазоне  $\Theta \in [34,8; 35,2]$  °С, распределение нормальное. Для минимизации случайной составляющей погрешности проводим 4-кратное измерение.

Согласно модели источниками неопределенности на этапе 1 калибровки будут:

- погрешность воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- изменение температуры рабочих условий в течение этапа 1 калибровочного эксперимента.

**Вычислительный эксперимент методом Монте-Карло.** Генерируем массив случайных чисел, используя функцию «Генерация случайных чисел» из пакета «Анализ данных», подключенного в качестве надстройки к основной программе *Microsoft Office Excel*.

Матрица плана эксперимента этапа 1 имеет вид

$$X = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,19} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,19} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{30000,1} & X_{30000,2} & \dots & X_{30000,19} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $X_{ij}$  означает  $i$ -ю реализацию  $j$ -го фактора:  $i = 1, \dots, 30\ 000$ ;  $j = 1, \dots, 19$  и представлена в таблице *Excel* соответственно столбцами A–S (рис. 3). В таблице *Excel* (см. рис. 3) результаты опытов представлены соответственно столбцами:

X1(A) – генерация  $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$  мА, распределение равномерное;

X2(B) ÷ X5(E) – генерация  $\varepsilon_{\text{случ}}$  в 1÷4-м измерениях,  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$  мА, распределение нормальное;

X6(F) – генерация коэффициента температурной составляющей дополнительной погрешности  $\alpha$ ,  $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$  мА/°С, распределение равномерное;

X7(G) ÷ X10(J) – изменение температуры рабочих условий в течение этапа 1 калибровочного эксперимента, распределение нормальное;

X11(K) ÷ X14(N) – температурная составляющая дополнительной погрешности в 1÷4-м измерениях;

X15(O) ÷ X18(R) – суммарная погрешность в 1÷4-м измерениях;

X19(S) – оценка суммарной погрешности в 1÷4-м измерениях;

X(T) – опорный сигнал, воспроизводимый переносным эталоном МСХ-II-R, подаваемый на вход калибруемого ИК.

The figure displays three fragments of an Excel spreadsheet, each showing a matrix of experimental data. The data is organized in rows and columns, with numerical values representing the results of measurements. The first fragment shows columns A through L, the second shows columns AQ through VA, and the third shows columns 29989 through 30001. The values are small, often in scientific notation (e.g., -0.00035, 1.28E-05, 35.05212).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	-0,00035	-0,00052	-0,00016	0,000318	-0,00073	1,28E-05	35,05212	35,05341	34,96571	35,05029	0,000103	0,00010
2	-0,00012	0,000419	0,000373	-0,00045	0,00077	-0,00016	34,95518	35,01706	35,05008	35,07428	-0,00127	-0,0012
3	0,000289	-0,00048	0,000229	0,000299	0,00117	-4,2E-05	34,92704	34,93722	35,04498	34,99073	-0,00033	-0,0003
4	0,0001197	0,000113	-0,00038	-1,6E-05	-0,00034	8,51E-05	35,0283	35,03897	34,99048	34,99163	0,000683	0,00068
5	0,0001154	-1,9E-05	1,01E-05	-0,00184	-0,0011	-0,00015	35,0735	35,09148	35,02689	35,06048	-0,00124	-0,0012
6	0,0001375	-7,4E-05	-0,00145	-0,00065	0,00062	0,000137	34,97984	34,9887	34,93536	34,96155	0,001092	0,00109
7	-0,00146	-0,00072	0,000186	0,000263	-0,00054	-2,4E-05	35,01171	34,95166	35,01829	35,00433	-0,00019	-0,0001
8	-0,00028	0,000386	0,0005	0,000326	0,000656	-0,00016	34,87005	34,96542	35,01935	34,97783	-0,00128	-0,0012
9	0,000109	5,8E-05	0,000553	-0,00093	-0,00033	5,16E-05	34,98259	35,01422	34,97824	34,93515	0,000412	0,0004
10	-0,000108	-0,00027	-0,00055	-3,7E-06	-0,00017	-6,3E-05	34,93223	34,90272	35,10722	34,92681	-0,0005	-0,0005
11	-0,00076	0,000181	-0,00145	-0,00075	-0,00041	-0,00013	35,00074	35,03866	35,02661	35,02375	-0,00102	-0,0010
12	-0,00136	-0,00043	-0,0007	-0,00012	-0,00026	-0,00014	34,9785	35,01662	35,05851	35,09282	-0,00114	-0,0011
13	-0,0014	0,001271	-0,00093	0,000812	-0,0005	9,59E-05	34,931	35,00813	34,95658	34,91615	0,000761	0,00076
14	-0,00101	-0,00039	0,000379	-0,00068	-0,00047	-6,9E-05	35,04461	34,96188	34,97076	35,05813	-0,00056	-0,0005
15	-0,00084	-0,00036	0,000335	-0,00028	0,000425	0,000118	34,98809	35,05052	35,04338	34,98688	0,00094	0,0009
16	-0,00145	-0,00092	-4,7E-05	0,000332	0,000198	4,06E-05	35,03053	34,97419	34,99798	34,97839	0,000326	0,00033
17	-0,00064	-0,00062	-0,00114	-0,00043	0,000507	-4,3E-05	34,98606	35,0087	34,98997	35,04537	-0,00034	-0,0003
18	-0,00047	-0,00066	-0,00028	0,000389	-0,00063	-0,00017	34,94218	34,99245	34,92035	35,01766	-0,00131	-0,0013
19	0,000161	-0,00074	-0,00059	-0,00076	-0,00039	0,000138	34,8793	35,07691	35,03491	34,99766	0,001089	0,0011
20	-0,00043	0,000566	0,000676	-0,00029	-0,0003	0,000117	34,86594	35,04134	35,15187	35,05519	0,000919	0,0009
21	-0,00038	-0,00062	-0,00013	8,44E-05	-0,00011	0,000177	35,11331	35,05038	35,07694	35,03267	0,001437	0,0014
22	-0,00043	2,79E-05	0,000205	-0,0012	0,000179	0,000185	35,02743	34,98176	35,06198	35,14188	0,001483	0,0014
23	0,001231	0,000306	0,000462	-8,6E-05	-0,00083	1,49E-05	35,12187	34,8946	34,88226	34,97766	0,000121	0,0001
24	-0,0001	0,000316	-0,0005	-0,00093	-0,00022	-1E-04	34,99824	35,04906	34,89334	34,97441	-0,0008	-0,0008
25	-0,00022	-0,00082	-0,0005	0,000601	-4,4E-05	0,000182	35,15364	34,95665	34,86387	35,024	0,00148	0,0014

	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA
1	6,6979E-05	-0,001	-0,00053	9,999473	-4,7E-05	9,999953	0,00048		-0,00361	0,003838413	расш неоп-т
2	-0,00304155	-0,00161	-0,00212	9,997875	-0,00016	9,99984	0,001965				
3	0,00026108	0,001158	0,000281	10,00028	3,86E-05	10,00004	-0,00024				
4	0,00189181	0,001478	0,001686	10,00169	0,00016	10,00016	-0,00153			7,99043E-07	среднее
5	-0,00188846	-0,0013	-0,00091	9,999089	0,000154	10,00015	0,001064			-0,0033	
6	0,00187846	0,003228	0,002137	10,00214	0,000183	10,00018	-0,00195			-0,00327	
7	-0,0013923	-0,00218	-0,00185	9,998149	-0,00019	9,999806	0,001657			-0,00327	
8	-0,00114619	-0,00093	-0,00111	9,998888	-3,7E-05	9,999963	0,001075			-0,00327	
9	0,00057881	0,001228	0,001368	10,00136	0,000145	10,00015	-0,00121			-0,00317	
10	-0,00158216	-0,00177	-0,00182	9,998181	-0,00014	9,999855	0,001675			-0,00317	
11	-0,00238979	-0,0021	-0,0023	9,997695	-0,0001	9,999898	0,002203			-0,00315	
12	-0,00262411	-0,00268	-0,00283	9,997169	-0,00018	9,999818	0,002649			-0,00314	
13	0,00027252	-0,00112	-0,00042	9,999577	-0,00019	9,999813	0,000236			-0,00314	
14	-0,00224261	-0,00205	-0,00185	9,998147	-0,00013	9,999866	0,001719			-0,00313	
15	-0,00019336	0,000473	0,000136	10,00014	-0,00011	9,999888	-0,00025			-0,00312	
16	-0,00077612	-0,00092	-0,00124	9,998756	-0,00019	9,999807	0,001051			-0,00311	
17	-0,00142127	-0,00045	-0,00139	9,998607	-8,6E-05	9,999914	0,001307			-0,00311	
18	-0,00150447	-0,00246	-0,00204	9,997964	-6,3E-05	9,999937	0,001974			-0,00309	
19	0,00052907	0,000898	0,000649	10,00065	2,15E-05	10,00002	-0,00063			-0,00308	
20	0,00014558	0,00014	0,00062	10,00062	-5,7E-05	9,999943	-0,00068			-0,00308	
21	0,00104937	0,000972	0,000776	10,00078	-5,1E-05	9,999949	-0,00083			-0,00308	
22	-0,0001811	0,001392	0,000865	10,00086	-5,8E-05	9,999942	-0,00092			-0,00308	
23	0,00126522	0,00051	0,001308	10,00131	0,000164	10,00016	-0,00114			-0,00308	
24	-0,00176881	-0,00111	-0,00124	9,998762	-1,4E-05	9,999986	0,001225			-0,00308	
25	0,00199063	0,001089	0,001017	10,00102	-3E-05	9,999987	-0,00105			-0,00308	

	29989	29990	29991	29992	29993	29994	29995	29996	29997	29998	29999	30000	30001
29989	-0,00042	0,00126	-0,0005	0,000223	0,0002	2,01E-06	34,97427	34,96933	34,92599	35,00216	1,6E-05	1,61	
29990	-0,00045	0,00074	-0,00037	-3,6E-05	0,00075	0,000142	35,07452	34,90784	35,09504	34,9742	0,00115	0,00	
29991	-0,00048	0,000741	-0,00026	-0,00071	-0,0002	-0,00012	34,93783	34,98827	34,91635	35,04668	-0,00098	-0,00	
29992	-0,00131	-0,00036	0,000896	6,26E-05	-0,00046	0,000175	34,97159	35,12828	35,06509	35,03425	0,001397	0,00	
29993	0,000208	0,000466	0,000532	-0,00095	0,000311	-7,9E-05	34,91735	35,03182	35,00478	34,92424	-0,00062	-0,00	
29994	-0,0007	0,00108	-0,00111	-0,00069	0,00021	-1E-05	34,89713	35,04833	34,93195	34,97828	-8,1E-05	-8,21	
29995	-0,00054	0,000426	0,001215	0,000334	-0,00038	-0,00012	35,05867	35,03119	35,01356	35,03484	-0,00096	-0,00	
29996	0,000965	0,001314	0,000789	0,001734	-0,00044	-2,4E-05	35,11106	35,00681	35,02729	34,84287	-0,0002	-0,00	
29997	5,61E-05	0,000913	-9,3E-05	0,000353	-0,00048	1,7E-05	34,94027	34,98093	34,88971	34,96167	0,000135	0,00	
29998	0,00083	-0,00042	0,00099	8,14E-05	-0,00034	-0,00016	35,0055	34,97423	34,98151	34,92273	-0,00129	-0,00	
29999	0,000362	-0,00097	-0,00037	-0,00051	-1E-04	-0,00013	35,05608	34,91384	34,93703	34,96865	-0,00106	-0,00	
30000	0,000717	0,001123	-7E-05	0,00057	-0,00039	6,77E-05	34,94835	34,87288	35,07917	35,14006	0,000538	0,00	
30001													

	29989	29990	29991	29992	29993	29994	29995	29996	29997	29998	29999	30000	30001
29989	-0,0002	-0,00011	9,999891	-5,6E-05	9,999944	5,25E-05		0,003272					
29990	0,001519	0,001037	10,00104	-6E-05	9,99994	-0,0011		0,003276					
29991	-0,00181	-0,00155	9,998446	-6,4E-05	9,999936	0,001491		0,003276					
29992	-0,00038	0,000188	10,00019	-0,00017	9,999825	-0,00036		0,003294					
29993	-0,00012	-0,00033	9,999673	2,77E-05	10,00003	0,000355		0,003357					
29994	-0,00056	-0,0009	9,999096	-9,3E-05	9,999907	0,000811		0,003364					
29995	-0,00179	-0,00103	9,998969	-7,2E-05	9,999928	0,000959		0,003373					
29996	0,00033	0,00161	10,00161	0,000129	10,00013	-0,00148		0,003376					
29997	-0,00028	0,000369	10,00037	7,48E-06	10,00001	-0,00036		0,003396					
29998	-0,0008	-0,00042	9,999584	0,000111	10,00011	0,000527		0,003407					
29999	-0,00074	-0,00121	9,998795	4,82E-05	10,00005	0,001253		0,003474					
30000	0,00088	0,00152	10,00152	9,56E-05	10,0001	-0,00142		0,003477					
30001													

Рис. 3. Фрагменты таблицы Excel с матрицей плана эксперимента комплектной калибровки простого ИК при одном влияющем факторе

**Этап 2.** По окончании калибровочных работ по месту расположения ИК ИС перемещаем переносной экземпляр эталона МСХ-II-R в калибровочную лабораторию. С помощью испытательной камеры WK3-340.70 воссоздаем для МСХ-II-R рабочие условия с измеренным значением влияющей величины  $\Theta = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сличаем показания переносного эталона (МСХ-II-R) и стационарного эталона (Fluke 8508A), обеспечивающего передачу единицы величины и ее прослеживаемость до ГПЭ. Найденную при сличении эталонов поправку  $\nabla_{py} = I_0 - I_{py}$  используем для корректировки результатов калибровки, полученных на этапе 1. Определяем неопределенность поправки  $\nabla_{py}$ .

Модель калибровки на этапе 2 представим следующим алгоритмическим оператором.

Переносной эталон МСХ-II-R воспроизводит силу постоянного тока с погрешностью, систематическую составляющую которой примем равной  $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,4\Delta_{\text{осн}}, +0,4\Delta_{\text{осн}}]$ , случайную –  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,5\Delta_{\text{осн}}, +0,5\Delta_{\text{осн}}]$  или с учетом предела допускаемой основной погрешности калибратора многофункционального модели МСХ-II-R  $\varepsilon_{\text{сист}} \in [-0,0015; 0,0015]$  мА, в модели примем равномерный закон распределения  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$  мА, примем нормальный закон распределения  $\varepsilon_{\text{случ}}$ . Погрешность установки температуры в испытательной камере модели WK3-340.70 (дискретность установки значения влияющей величины) согласно техническим характеристикам,  $\Delta_{1\text{камеры}} = \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , закон распределения  $\Delta_{1\text{камеры}} = \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  равномерный. Погрешность поддержания температуры в испытательной камере модели WK3-340.70 (неравномерность температурного поля по объему камеры)  $\Delta_{2\text{камеры}} = \pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , закон распределения нормальный. Коэффициент температурной составляющей дополнительной погрешности примем в модели равным  $\alpha \in \left[-0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10^0 \text{ }^\circ\text{C}}, +0,5 \frac{\Delta_{\text{осн}}}{10^0 \text{ }^\circ\text{C}}\right]$  или  $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$  мА/°C, распределение равномерное. Для минимизации случайной составляющей погрешности проводим 4-кратное измерение воспроизводимой переносным эталоном единицы величины. В соответствии с техническими характеристиками мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A его основная погрешность  $\Delta_{8508A} = [-0,0002; +0,0002]$  мА, примем закон распределения  $\Delta_{8508A}$  равномерным.

Согласно модели калибровки ИК ИС источниками неопределенности на этапе 2 калибровки будут:

- погрешность воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- погрешность установки температуры в испытательной камере модели WK3-340.70;
- погрешность поддержания температуры в испытательной камере модели WK3-340.70;
- дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;
- погрешность измерения силы постоянного тока мультиметром цифровым прецизионным модели Fluke 8508A.

Матрица плана эксперимента этапа 2 имеет вид

$$X = \begin{pmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,24} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{30000,1} & X_{30000,2} & \dots & X_{30000,24} \end{pmatrix} \quad (2)$$

и представлена в таблице *Excel* соответственно столбцами  $V \div AS$  (см. рис. 3). В таблице *Excel* (см. рис. 3) результаты опытов представлены соответственно столбцами:  $X1(V)$  – генерация  $\varepsilon_{\text{сист}}$ ,  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0015; 0,0015]$  мА, распределение равномерное;

$X2(W) \div X5(Z)$  – генерация  $\varepsilon_{\text{случ}}$  в 1÷4-м измерениях,  $\varepsilon_{\text{случ}} \in [-0,0019; 0,0019]$  мА, распределение нормальное;

$X6(AA)$  – генерация коэффициента температурной составляющей дополнительной погрешности  $\alpha$ ,  $\alpha \in [-0,00019; 0,00019]$  мА/°С, распределение равномерное;

$X7(AB)$  – температура в камере, с погрешностью установки  $\Delta_{\text{камеры}} = \pm 0,5^\circ\text{C}$ , распределение равномерное;

$X8(AC) \div X11(AF)$  – погрешность поддержания температуры в испытательной камере в 1÷4-м измерениях, распределение нормальное;

$X12(AG) \div X15(AJ)$  – фактическая температура в испытательной камере;

$X16(AK) \div X19(AN)$  – дополнительная погрешность от температуры воспроизведения силы постоянного тока калибратором многофункциональным модели МСХ-II-R;

$X20(AO) \div X23(AR)$  – суммарная погрешность в 1÷4-м измерениях;

$X24(AS)$  – оценка суммарной погрешности в 1÷4-м измерениях;

$X(AT)$  – сигнал, воспроизводимый переносным экземпляром эталона МСХ-II-R, подаваемый на вход образцового мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A для сличения;

$X(AU)$  – генерация основной допускаемой погрешности мультиметра цифрового прецизионного модели Fluke 8508A  $\Delta_{8508A} = [-0,0002; +0,0002]$  мА, распределение равномерное;

$X(AV)$  – сигнал, воспроизводимый стационарным экземпляром эталона Fluke 8508A, сличаемый с сигналом калибратора многофункционального модели МСХ-II-R;

$X(AW)$  – поправка воспроизведения единицы величины переносным экземпляром эталона МСХ-II-R в рабочих условиях  $\nabla_{py}$ .

Результаты выполненного эксперимента оказались следующими:

1. Случай применения известного способа калибровки, при котором переносной эталон сличают со стационарным эталоном в нормальных условиях калибровочной лаборатории.

Единица величины в рабочих условиях воспроизводится переносным эталоном МСХ-II-R, и номинальный сигнал 10 мА подается на вход калибруемого ИК с погрешностью, максимальное по модулю значение которой равно 0,0037 мА, или 0,04 %. Расширенная неопределенность погрешности  $U = 0,0024$  мА.

2. Применение предложенного нового способа [2–5], который основан на двухэтапной передаче единицы величины калибруемому ИК ИС с использованием метода замещения.

Нахождение поправки к значению единицы величины, воспроизводимому переносным эталоном МСХ-II-R, позволяет воспроизвести единицу величины 10 мА в рабочих условиях с погрешностью, максимальное по модулю значение которой равно 0,00041 мА, или 0,004 %. Расширенная неопределенность погрешности  $U = 0,00021$  мА.

Сравнение полученных результатов эксперимента показало, что применение нового способа калибровки ИК ИС позволяет уменьшить погрешность воспроизведения единицы величины и ее расширенную неопределенность почти в 10 раз. Минимизация погрешности воспроизведения единицы величины и ее расширенной неопределенности в рабочих условиях эксплуатации ИС в сравнении с известным способом достигается следующим образом.

В известном способе поправка определяется в нормальных условиях, а применяется в иных, рабочих условиях. Такая поправка не учитывает действия уникальной совокупности влияющих величин в момент калибровки ИК. Известный способ не определяет поправки для рабочих условий калибровки, что зачастую вообще делает его неприемлемым для калибровки ИК в рабочих условиях.

Предложенный новый способ позволяет найти поправку воспроизведения единицы величины переносным экземпляром эталона именно для тех условий, с той уникальной сложившейся совокупностью влияющих величин, в которой проводится калибровка ИК. Неопределенность нахождения поправки  $\bar{\nabla}_{py}$  на этапе 2 предложенного способа обуславливается только неточностью воссоздания рабочих условий локально в калибровочной лаборатории. В выполненном эксперименте неточность воссоздания рабочих условий обусловлена:

- погрешностью измерения влияющих величин на этапе 1 (погрешностью измерения температуры  $\Theta$  и ее изменением во время этапа 1);
- погрешностью воссоздания влияющей величины на этапе 2:
  - а) погрешностью установки температуры в испытательной камере,
  - б) погрешностью поддержания температуры в камере, т.е. неравномерностью теплового поля внутри камеры.

Достигнутая точность воспроизведения единицы величины в рабочих условиях обосновывает возможность применения и работоспособность предложенного способа для комплектной калибровки простого ИК в случае одной влияющей величины.

Далее аналогичным образом было выполнено экспериментальное исследование возможности передачи единицы величины в случае двух влияющих величин. Наряду с влияющим фактором температуры, оказывающим наибольшее влияние на точность передачи единицы величины, вторым влияющим фактором в эксперименте выбрано время. Полученные результаты экспериментальных исследований передачи единицы величины калибруемому ИК ИС в рабочих условиях при температуре вне области ее нормальных значений и с учетом нестационарности стационарного и переносного эталонов приведены в табл. 1.

Экспериментальные исследования были продолжены для случая сложного ИК ИС, реализующего косвенные измерения разности сил постоянного электрического тока, результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований передачи единицы величины калибруемому ИК ИС в рабочих условиях

Описание эксперимента		Погрешность передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, мА	Погрешность передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, % от номинального значения	Расширенная неопределенность погрешности передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, мА
Комплектная калибровка простого ИК в случае одной влияющей величины (температуры)	Известный способ	0,0037	0,04	0,0024
	Предложенный [2–5] способ	0,00041	0,004	0,00021
Комплектная калибровка простого ИК в случае двух влияющих величин (температуры и времени)	Известный способ	0,0037	0,04	0,0032
	Предложенный [2–5] способ	0,00045	0,005	0,00021
Комплектная калибровка сложного ИК в случае одной влияющей величины (температуры)	Известный способ	0,0077	0,08	0,0042
	Предложенный [2–5] способ	0,0063	0,06	0,0035
Комплектная калибровка сложного ИК в случае двух влияющих величин (температуры и времени)	Известный способ	0,0078	0,08	0,0044
	Предложенный [2–5] способ	0,0065	0,07	0,0039

Сопоставительный анализ полученных экспериментальных данных доказывает работоспособность и применимость предложенного нового способа калибровки ИК ИС в рабочих условиях в одной точке диапазона измерений [2–5]. Применение способа в каждой регламен-

тированной точке диапазона измерений ИК ИС делает возможным калибровку ИК ИС без демонтажа (если это вообще возможно), транспортировки элементов ИК ИС в калибровочную лабораторию и обратно, нового монтажа ИК ИС с возможной утратой прежнего приработанного режима, а главное, позволяет получить калибровочную кривую ИК ИС именно для представляющих практический интерес рабочих условий эксплуатации ИК ИС.

### *Библиографический список*

1. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2014. – 55 с.
2. Данилов, А. А. Калибровка средств измерений в рабочих условиях / А. А. Данилов, М. В. Бержинская, Ю. В. Кучеренко, Н. П. Ординарцева // Метрология. – 2014. – № 1. – С. 19–22.
3. Danilov, A. A. Calibration of measuring instruments under working conditions // A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, iss. 3. – P. 228–230.
4. Danilov, A. A. Calibration Method of Measuring Instruments in Operating Conditions / A. A. Danilov, M. V. Berzhinskaya, Yu. V. Kucherenko, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2015. – P. 149–156.
5. Danilov, A. A. Calibration method of measuring instruments in operating conditions / A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014) : trouble VNIIM, IMEKO TC21 International Conference. – St. Petersburg, Russia, 2014.
6. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2008. – 7 с.
7. ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Дополнение 1: 2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200088856>

---

#### ***Ординарцева Наталья Павловна***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информационно-измерительной техники  
и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: np\_ordinartseva@mail.ru

#### ***Ordinartseva Natalia Pavlovna***

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of information  
and measuring equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 006.91

#### **Ординарцева, Н. П.**

**Экспериментальное исследование возможности передачи в рабочих условиях единицы величины калибруемому каналу измерительной системы / Н. П. Ординарцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 4 (22). – С. 28–36. DOI 10.21685/2307-5538-2017-4-4.**