

Автоматические прецизионные высоковольтные мосты переменного тока

Орнатский О.А., Лысак Е.М., Анохин Ю.Л., Киселев В.В.

На смену прецизионным высоковольтным мостам переменного тока с ручным уравниванием приходят мосты, в которых процесс измерения полностью автоматизирован. Автоматические прецизионные¹ высоковольтные мосты переменного тока, работающие на промышленной частоте, находят применение в составе эталонов и поверочных установок. В первую очередь, речь идет об эталонах масштабного преобразования высокого напряжения промышленной частоты и высоковольтных эталонах емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Эти приборы применяют также при проведении научных исследований и контроле характеристик промышленной продукции, например, изоляции кабелей и проводов (ГОСТ 12179-76).

В настоящее время производство автоматических прецизионных высоковольтных мостов осуществляют фирмы Haefely Test AG (Tettex Instruments) (model 2840) и Measurement International (model 7010C). Уже более десяти лет приборы аналогичного назначения производит также ООО «ОЛТЕСТ» (www.oltest.com.ua).

Прецизионные высоковольтные мосты фирмы ООО ОЛТЕСТ

Первый прецизионный высоковольтный мост СА7100М был разработан для ГП Укрметртестстандарт в 1999 году. Сличения с РТВ [1,2] подтвердили его высокие метрологические характеристики.

Для работы в составе эталона коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига высокого напряжения промышленной частоты, созданного ФГУП ВНИИМС, ООО "ОЛТЕСТ" предоставил прецизионные высоковольтные мосты СА7100МЗ и МВ-трансформатор.

Для ФГУП ВНИИМС были разработаны также мосты МВ-конденсатор для высоковольтного эталона емкости и тангенса угла диэлектрических потерь и МВЭ-02 для эталона переменного высокого напряжения промышленной частоты. Мост СА7100М1, предназначенный для прецизионного измерения емкости и тангенса угла потерь, был поставлен во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева».

В качестве примера рассматриваются технические характеристики, устройство, а также особенности метрологического обеспечения прецизионного высоковольтного моста (далее – мост) СА7100М1 фирмы ООО ОЛТЕСТ.

¹ Под прецизионным подразумеваются автоматические высоковольтные мосты, пределы допускаемых погрешностей которых при измерении основных измеряемых величин (емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, отношения токов и т.д.) не превышают 100 ppm.

Технические характеристики моста СА7100М1

В таблице 1 приведены погрешности² при измерении мостом СА7100М1 емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (далее – тангенса угла потерь).

Таблица 1

№ п/д	C_X/C_0^3	Пределы основной допускаемой относительной погрешности при измерении емкости $\delta_C, \%$	Пределы основной допускаемой абсолютной погрешности при измерении тангенса угла потерь $\Delta_{tg\delta}$	Допустимая сила тока в цепи объекта измерения, А	Подключение объекта измерения
1	0,01...0,1	$\pm[2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-4} \cdot (C_0/C_X - 10) + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} \cdot (C_0/C_X - 10) + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$	0,5	3-х зажимное
	0,1...1,0				
2	1,0...10	$\pm[1 \cdot 10^{-3} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[1 \cdot 10^{-5} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$		
3	10...10 ²				
4	10 ² ...10 ³	$\pm[2 \cdot 10^{-3} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[2 \cdot 10^{-5} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$		
5*	10 ³ ...10 ⁴	$\pm[5 \cdot 10^{-3} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[5 \cdot 10^{-5} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$	0,03...5	4-х зажимное
6*	10 ⁴ ...10 ⁵	$\pm[5 \cdot 10^{-3} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[5 \cdot 10^{-5} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$	0,3...50	
7**	10 ⁵ ...10 ⁶	$\pm[1 \cdot 10^{-2} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[1 \cdot 10^{-4} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$	3...500	
8**	10 ⁶ ...10 ⁷	$\pm[1 \cdot 10^{-2} + tg\delta_X - tg\delta_0]$	$\pm[1 \cdot 10^{-4} + 0,005 \cdot tg\delta_X - tg\delta_0]$	30...500	

* – при использовании расширителя диапазона СА7150;

** – при использовании расширителей диапазона СА7150 и СА7151.

Устройство СА7100М1

Схема измерительной цепи моста (рис.1), реализованная на основе компаратора токов с тесной индуктивной связью, существенно отличается от традиционных схем измерительных цепей подобных прецизионных высоковольтных мостов. Во-первых, отсутствует цепь, уравнивающая активную составляющую тока объекта измерения. Во-вторых, количество витков обмотки W_0 , используемой для уравнивания моста в пределах поддиапазона, регулируется с дискретностью 1 виток, что соответствует трем десятичным декадам, в то время как обычно в прецизионных мостах регулируемая обмотка имеет, по меньшей мере, шесть декад.

Основой процесса измерения является вариационный метод. Используемая в мосте разновидность этого метода измерения предусматривает изменение (вариацию) отношения магнитных потоков в сердечнике компаратора на известное с необходимой точностью

² Без учета погрешности эталонного конденсатора.

³ Эталонный конденсатор не входит в состав моста и поэтому поддиапазоны измерения моста определены в виде отношений C_X/C_0 .

значение. Указанная вариация осуществляется изменением числа витков обмотки W_0 . Разность значений измеряемой величины до и после вариации используется в качестве калибровочного сигнала. Вычисления, необходимые для получения результата, осуществляет персональный компьютер (ПК).

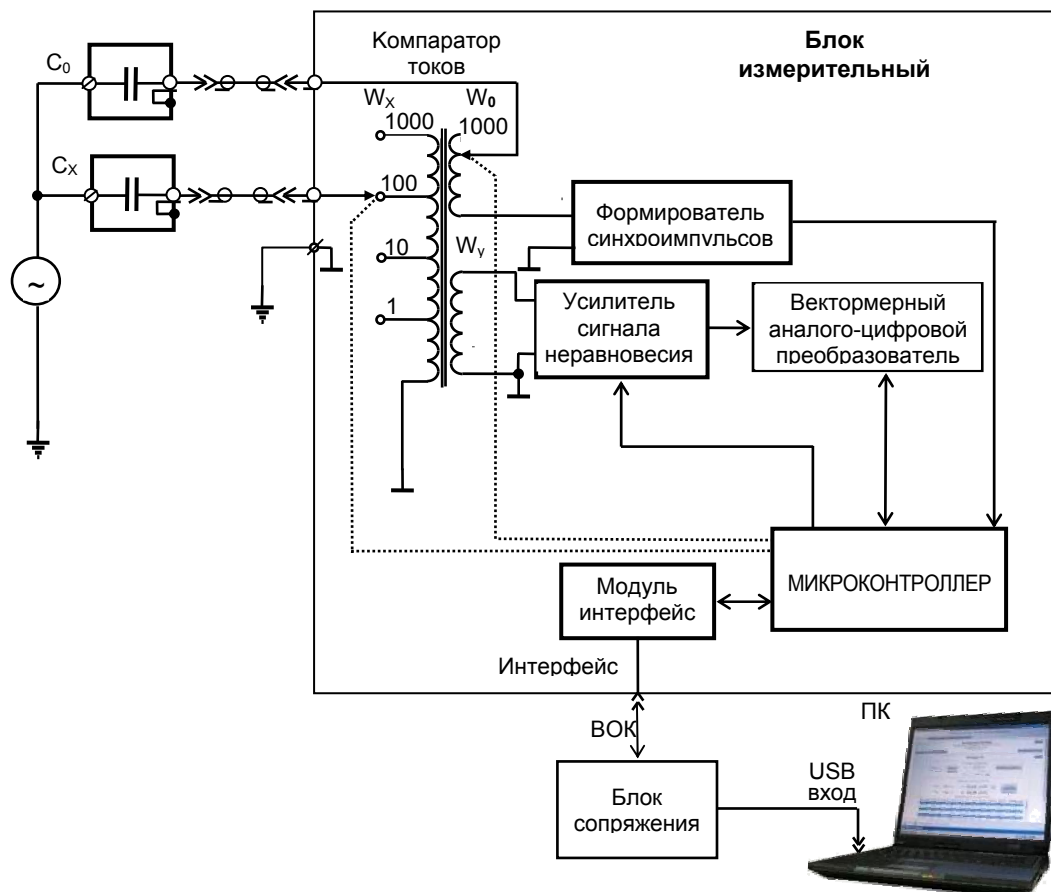


Рисунок 1

Блок измерительный моста обеспечивает измерение емкостей на первых 4-х п/д при отношении C_x к C_0 в диапазоне от 0,01 до 1000. Для измерения емкостей при бóльших отношениях совместно с блоком измерительным используются расширители диапазонов CA7150 и CA7151, представляющие собой прецизионные двухступенчатые трансформаторы тока.

Структурная схема и схема включения расширителя диапазона CA7150 показана на рисунке 2. Подключение расширителя CA7150 увеличивает допустимое отношение C_x к C_0 до 10^5 (п/д 5 и 6).

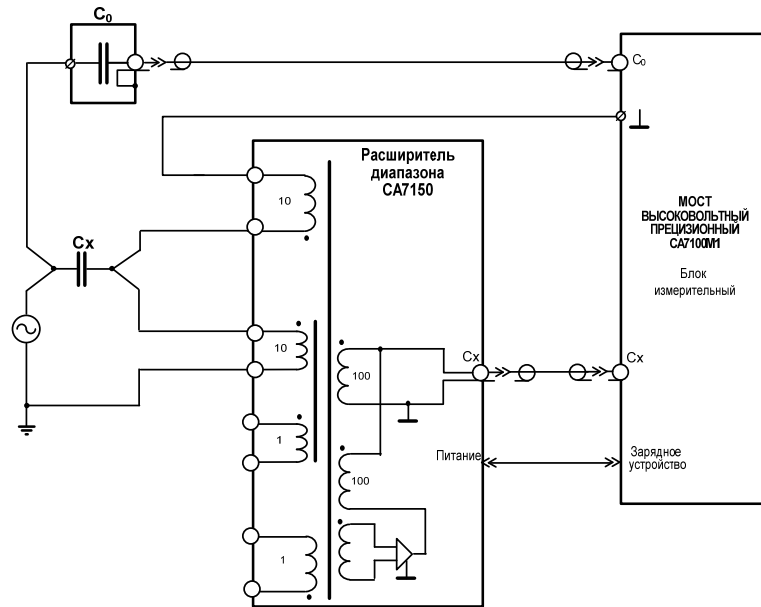


Рисунок 2

Увеличение отношения C_x к C_0 до 10^7 (п/д 7 и 8) обеспечивается включением на вход расширителя диапазона СА7150 расширителя диапазона СА7151, структурная схема и схема подключения которого показана на рисунке 3.

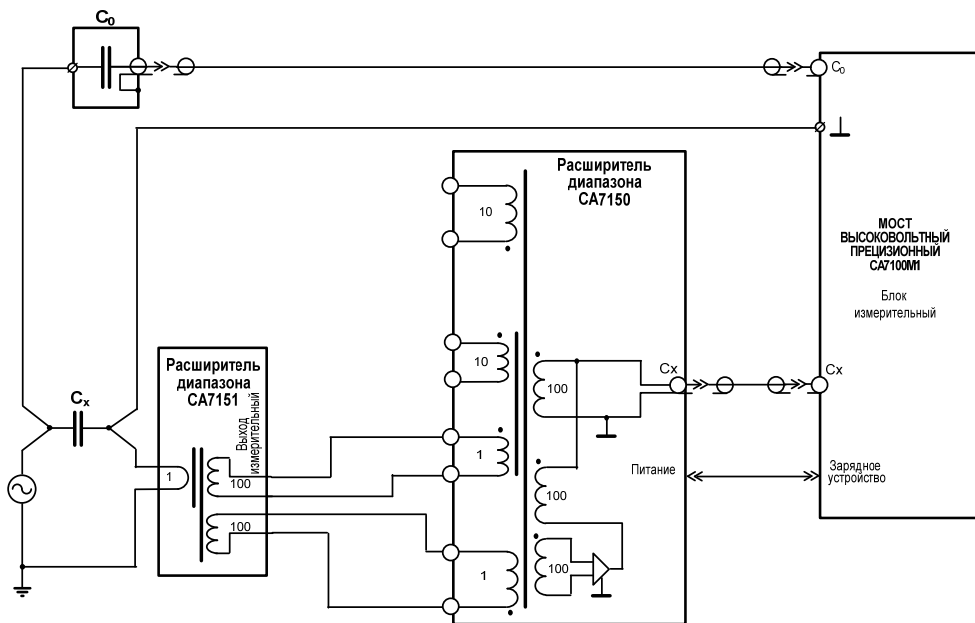


Рисунок 3

На рисунке 4 показано диалоговое окно, с помощью которого осуществляется управление работой моста СА7100M1.

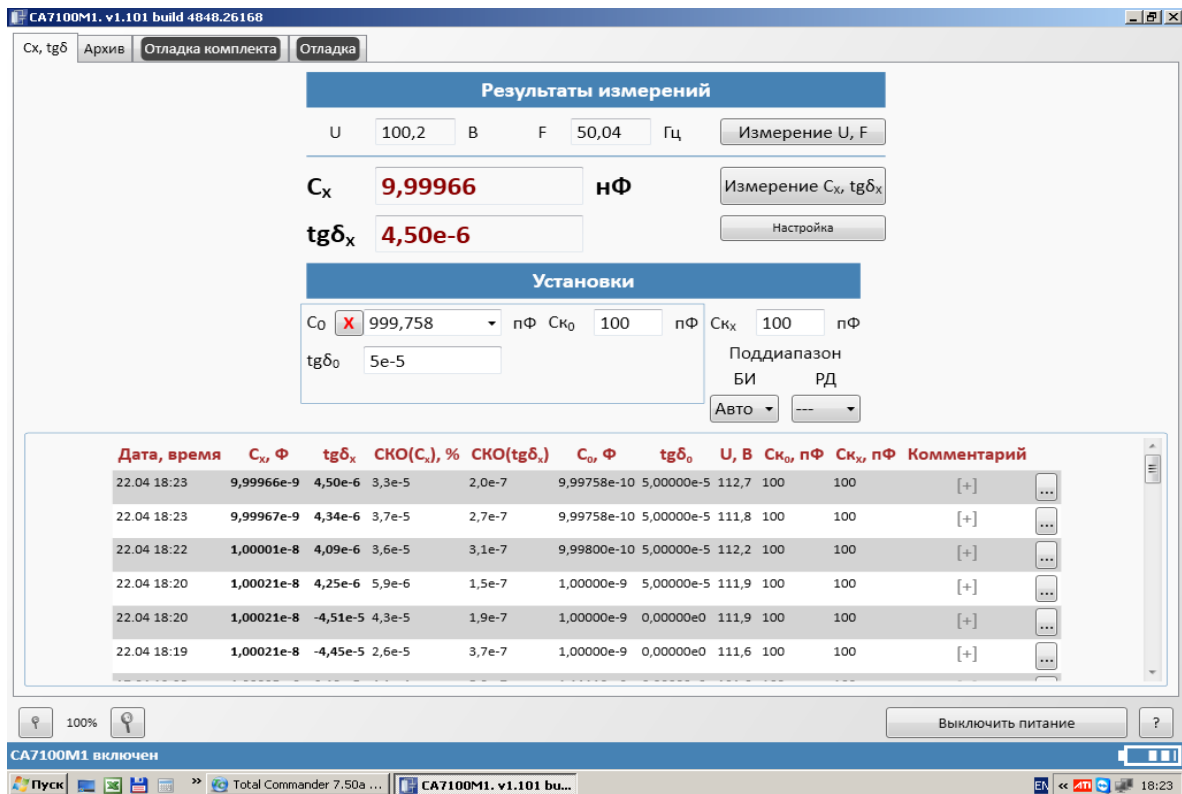


Рисунок 4

Метрологическое обеспечение прецизионных высоковольтных мостов

Метрологическое обеспечение прецизионных высоковольтных мостов представляет собой сложную задачу. Дело в том, что для того, чтобы подтвердить пределы допускаемой погрешности равные ± 10 ppm, нужно иметь эталон с пределами допускаемой погрешности не более ± 3 ppm. Использование для метрологического обеспечения прецизионных высоковольтных мостов мер емкости, значения емкости и тангенса потерь которых известны с требуемой точностью, представляется проблематичным. Дело в том, что для определения погрешностей, вносимых мостом, к нему должны быть подключены две меры емкости и, следовательно, пределы погрешностей каждой из этих мер должны быть еще меньше, чем упомянутые выше ± 3 ppm. Эталоны емкости, имеющие такие погрешности при воспроизведении емкости и тангенса угла потерь, тем более на частоте 50 Гц, практически отсутствуют. Поэтому при определении погрешностей рассматриваемого моста использовались методы, при которых воспроизводились не значения емкостей, а их отношения, а для тангенсов углов потерь – их разности.

Для определения погрешностей на первом и втором поддиапазонах был использован метод циклических перестановок, впервые описанный Cutkosky и Shields в 1960 году [3]. С помощью этого метода авторы определяли погрешности отношения на выходе обмоток трансформатора напряжения, но, с таким же успехом, он может быть применен для

определения погрешностей моста на основе компаратора токов. Метод циклических перестановок позволяет с высокой точностью определить погрешности моста для отношения емкостей равного номинально отношению двух целых чисел m/n (рисунок 5).

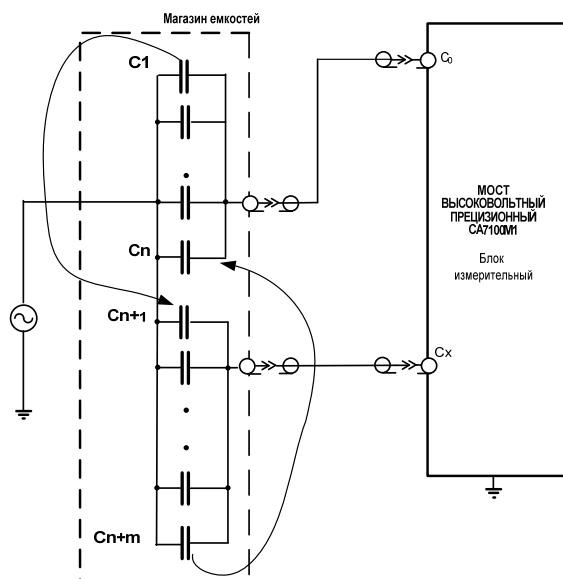


Рисунок 5

Для определения погрешности отношения токов m/n проводилась серия из $m+n$ последовательных измерений, в которых использовались $m+n$ конденсаторов. В каждом измерении из этой серии ко входу C_0 моста параллельно подключались n емкостей, ко входу C_x – m . В каждом последующем измерении один из конденсаторов, подключенный ранее ко входу C_0 , подключался параллельно к группе конденсаторов, подключенных ко входу C_x , а один из конденсаторов, подключенных ко входу C_x подключался параллельно к группе конденсаторов, подключенных ко входу C_0 . Переключения происходили таким образом, чтобы в течение $m+n$ измерений каждый из конденсаторов m раз был подключен ко входу C_x и n раз – ко входу C_0 . По результатам проведенных измерений рассчитывались погрешности: относительная при измерении емкости ($\delta_{C_{m/n}}$) и абсолютная при измерении тангенса угла потерь ($\Delta tg \delta_{m/n}$).

Погрешности при измерении емкости и тангенса угла потерь рассчитывались по формулам:

$$\delta_{C_{m/n}} = \frac{\sum_i^{m+n} \left(\frac{\frac{C_{Xi}}{C_0} - \frac{m}{n}}{\frac{m}{n}} \right)}{m+n}, \quad \Delta tg \delta_{m/n} = \frac{\sum_i^{m+n} \Delta tg \delta_i}{m+n}.$$

Для реализации рассматриваемого метода определения погрешностей был разработан специальный магазин емкостей. Этот магазин содержит 20 высокостабильных

конденсаторов, относительная разность емкостей которых не превышает 2×10^{-4} , а разность тангенсов – 10^{-4} . Для обеспечения высокой кратковременной стабильности указанные конденсаторы помещены в толстостенный металлический корпус, выполняющий роль теплового интегратора, который сверху покрыт теплоизоляцией из пенополиэтилена. Измерения проводились в помещении, температура в котором поддерживалась в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$.

20 конденсаторов, входящих в состав магазина позволяют достаточно подробно (более 50 вариантов отношений) определить погрешности моста для отношений токов от 0,1 до 10, т.е. для 1-го и 2-го поддиапазонов моста.

Погрешности в начале 3-го поддиапазона определялись относительно погрешностей в конце 2-го. Для этого проводились два последовательных измерения одного и того же отношения емкостей, равного 10: в конце 2-го поддиапазона и в начале 3-го.

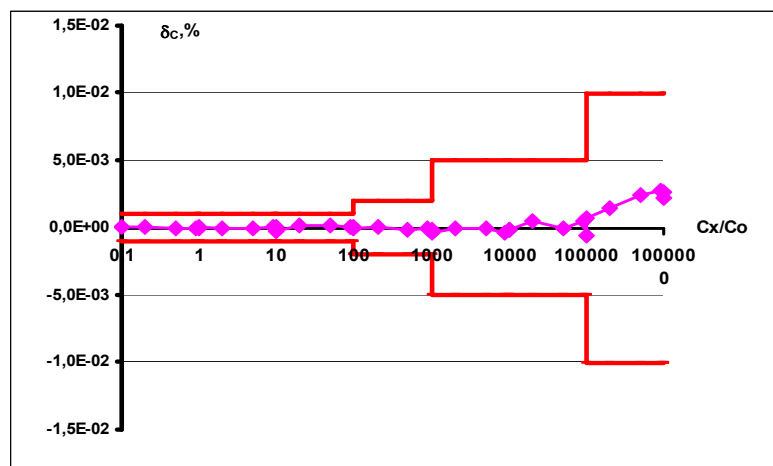
Для определения погрешностей в конце 3-го поддиапазона использовались три меры емкости с номинальными значениями 1 нФ, 10 нФ и 100 нФ. Проводилось три последовательных измерения:

- на 1-ом поддиапазоне мера 1 нФ измерялась относительно 10 нФ;
- на 3-ем поддиапазоне мера 100 нФ измерялась относительно 10 нФ;
- на 3-ем поддиапазоне мера 100 нФ измерялась относительно 1 нФ.

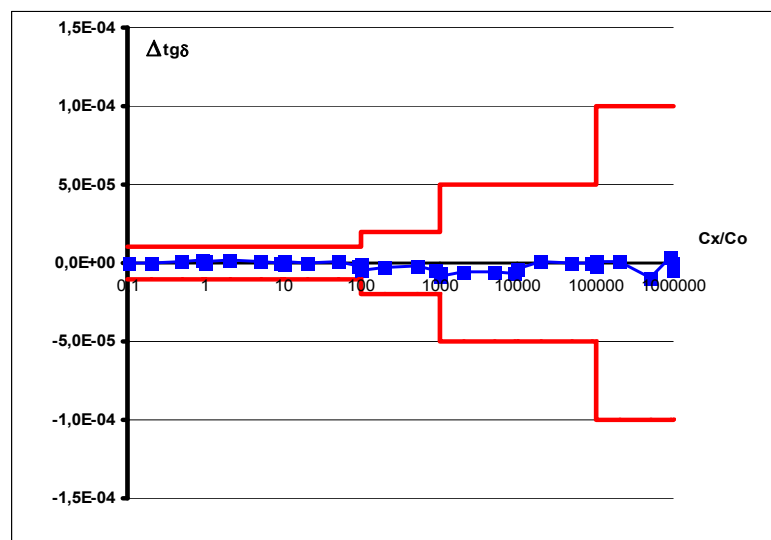
По результатам этих измерений определялись погрешности в конце 3-го поддиапазона. Для определения погрешностей в середине 3-го поддиапазона проводились аналогичные измерения, при этом вместо меры 1 нФ использовалась мера 2 нФ.

По этому же алгоритму определялись погрешности для 4-го – 8-го поддиапазонов, но вместо меры 100 нФ использовались меры 1 мкФ, 10 мкФ и 100 мкФ.

На рисунке 6 показаны результаты определения погрешностей одного из мостов СА7100М1.



а)



б)

Рисунок 6

Выводы

ООО «ОЛТЕСТ» разработаны и выпускаются прецизионные высоковольтные мосты, метрологические характеристики которых соответствуют уровню ведущих фирм производителей аналогичных средств измерительной техники, что подтверждается проведенными исследованиями и международными сличениями.

Литература

1 Surdu M.N., Ornatsky O.A., Bondarchuk S.A., Karpov I.M., Kopshyn V.V., Kikalo V.N., Vogel H., Eckardt H. Precise current comparator for calibration of high voltage standard transformers // CPEM 2000. – Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest – Sydney, Australia, 2000 (14th - 19th May). – P. 411–412.

2 Kopshyn V.V., Kikalo V.N., Butenko O.G., Surdu M.N., Ornatsky O.A., Vogel H., Eckardt H. Intercomparison between PTB and UkrCSM of the calibration of standard current and standard voltage transformers // CPEM 2000. – Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Conference Digest – Sydney, Australia, 2000 (14th - 19th May). – P. 64–65.

3 Cutkosky R.D., and Shields J.Q., 1960, The precision measurement of transformer ratios. *IRE Trans. Instrum.* 9 – P. 243-50.

Сведения об авторах:

Орнатский Олег Антонович, к.т.н.,
технический директор ООО «ОЛТЕСТ»,

Лысак Елена Маратовна,
главный метролог ООО «ОЛТЕСТ».

Анохин Юрий Леонидович,
начальник отдела ГП "Укрметртестстандарт"

Киселев Виктор Вячеславович,
начальник отдела ФГУП «ВНИИМС»