

В. В. КНЯЗЕВ, канд. техн. наук, зав. отд., НТУ «ХПИ»;

Ю. С. НЕМЧЕНКО, гл. метролог, НТУ «ХПИ»;

И. П. ЛЕСНОЙ, зав. лаб., НТУ «ХПИ»;

В. Н. ДНЫЩЕНКО, вед. инж., НТУ «ХПИ»;

А. И. ТАНЦУРА, вед. инж., НТУ «ХПИ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭТАЛОНА РЭМП В РАБОТАХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИМПУЛЬСНЫХ ЭКРАНИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ

Описано конструкцію засобів вимірювання (ЗВТ) імпульсних електричних та магнітних полів (3 види), які були застосовані в експериментальних роботах по знаходженню імпульсного коефіцієнта екранування металевої оболонки. Докладно описана процедура метрологічної атестації цих ЗВТ на Еталоні РЕМП, методика обробки експериментальних даних та кінцеві результати метрологічної атестації.

The construction of measure means for measuring the impulsive electric and magnetic fields (3 kinds), which were applied in experimental works on being of impulsive shielding coefficient of metallic shell, is described. The thoroughly described procedure of metrology attestation of these measure means by Standard of REMP, methodology of processing of experimental data and end-point of metrology attestation.

Методы оценки экранирующих свойств корпусов ракетно-космической техники, представляют интерес для разработчиков такой техники. В НИПКИ «Молния» НТУ ХПИ разработана методика расчетной оценки защитных свойств металлических корпусов произвольной формы. Для проверки степени достоверности результатов, получаемых численным методом, в 2010 году проведены экспериментальные исследования. Эти исследования выполнены на модели корпуса в виде полого алюминиевого цилиндра диаметром 0,9 м и длиной 3 м, как сплошного, так и с четырьмя видами локальных неоднородностей, при воздействии на него однократных импульсных электрических и магнитных полей и инжектированного тока.

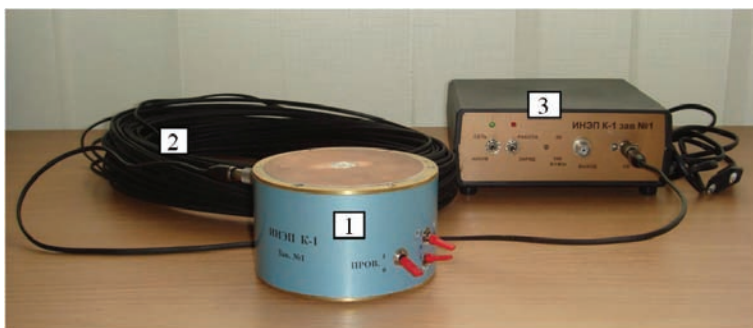
Для проведения этих работ была создана экспериментальная установка, состоящая из генератора импульсов напряжения с различными нагрузками (ГИН-1,2), генератора импульсов тока (ГИТ-50), поочередно нагружаемых на полеобразующую систему ПС в виде двух параллельно расположенных металлических плоскостей с габаритами рабочего объема 5x4x3 м. В этот рабочий объем ПС и помещался исследуемый цилиндр [1].

Амплитудно-временные параметры (АВП) воздействующих факторов [2] приведены в табл. 1.

Не вдаваясь глубоко в методику проведения экспериментов можно только обметить, что при всех экспериментах обязательно измеряются АВП внешних воздействий, а так же АВП электрических и магнитных полей внутри цилиндра, чтобы затем их сравнить и определить коэффициент экранирования.

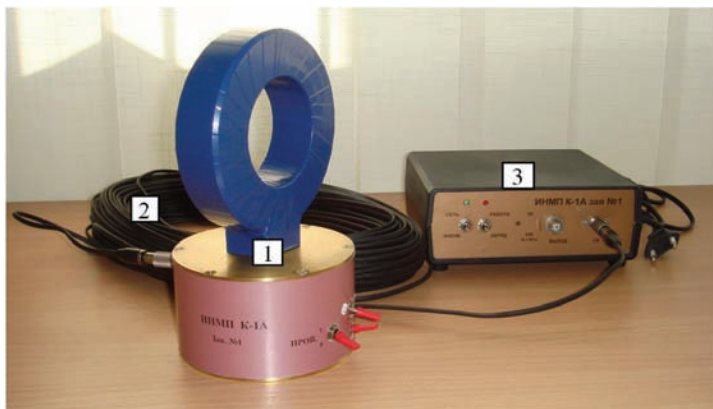
Таблица 1 – АВП воздействующих факторов

Вид воздействующего фактора	Амплитудный диапазон	Временные параметры	
		Длительность фронта	Длительность полуспада
1. Электрическое поле	(50 – 200) кВ/м	0,1 мс	10 мс
2. Магнитное поле	(300 – 500) А/м	2 мкс	50 мкс
3. Ток молнии	(2 – 10) кА	2 мкс	50 мкс



- 1 – блок емкостного измерительного преобразователя (БЕИП);
- 2 – оптический кабель (ОК);
- 3 – блок фотоприемника (БФП)

Рисунок 1 –Общий вид измерителя ИНЭП К-1



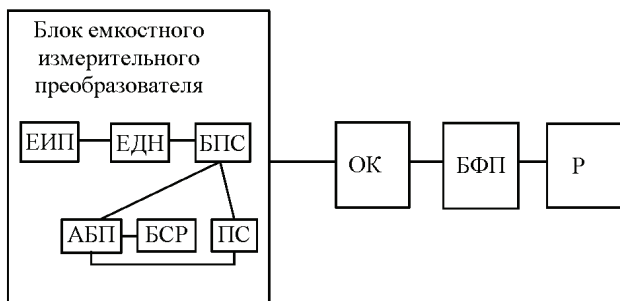
- 1 – блок индукционного измерительного преобразователя (БИИП);
- 2 – оптический кабель (ОК);
- 3 – блок фотоприемника (БФП)

Рисунок 2 –Общий вид измерителя ИНМП К-1А (ИНМП К-1Б)

Для проведения экспериментов созданы три вида измерителей полей (СИТ):

- измеритель внешнего и внутреннего электрических полей типа ИНЭП К-1 (рис. 1);
- измеритель внутреннего магнитного поля типа ИНМП К-1А (рис. 2);
- измеритель внешнего магнитного поля типа ИНМП К-1Б, внешний вид которого аналогичен ИНМП К-1А.

Структурные схемы измерителей электрического и магнитного полей приведены на рис. 3 и 4.



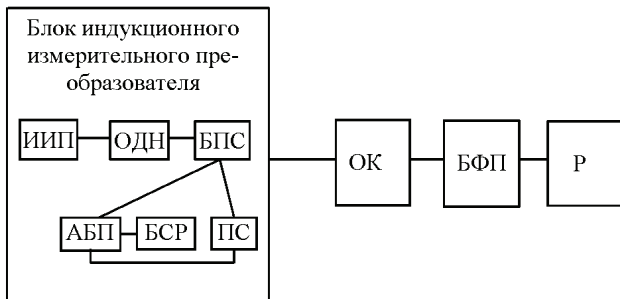
- ЕИП – емкостной измерительный преобразователь;
- ЕДН – емкостной делитель напряжения;
- БПС – блок преобразования электрического сигнала в световой;
- АБП – автономный блок питания;
- БСР – блок сигнализации разряда аккумуляторной батареи;
- ПС – блок проверочного сигнала;
- ОК – оптический кабель;
- БФП – блок фотоприемника;
- Р – регистратор

Рисунок 3 – Структурная схема измерителя ИНЭП К-1

Из этих схем видно, что все измерители содержат измерительный преобразователь (ИП) того или иного вида, блок преобразования электрического сигнала в световой (БПС), гибкий волоконный световод (ОК) длиной 50 м и фотоприемник (БФП). Такое подробное описание структуры измерителей необходимо потому, что как при измерениях электрических и магнитных полей в экспериментальной установке, так и при метрологической аттестации ИП размещаются в точке измерения, БФП вместе с регистратором размещаются в измерительной кабине, а связь между ними осуществляется ОК. Таким образом достигается полная идентичность процедур измерения и МА.

Для легитимизации метрологических характеристик измерителей проведена их метрологическая аттестация (МА) – определение АВП переходной характеристики (ПХ) измерителей, т.е. отдельно измерялись время нарастания ПХ и коэффициент преобразования измерителя, а также время спада ПХ [3]. Для этого отдельно снимались осциллограммы фронтальной и спадовой части

напряжения всех видов измерителей. Данная аттестация проводилась с участием специалистов ННЦ «Институт метрологии» на недавно созданном в НИПКИ «Молния» Эталоне единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей (Эталон РЭМП) [4] по утвержденным Госстандартом Украины методикам аттестации средств измерения электрических и магнитных полей [5], [6].



ИИП – индукционный измерительный преобразователь с RL – интегратором;
 ОДН – омический делитель напряжения;
 БПС – блок преобразования электрического сигнала в световой;
 АБП – автономный блок питания;
 БСР – блок сигнализации разряда аккумуляторной батареи;
 ПС – блок проверочного сигнала;
 ОК – оптический кабель;
 БФП – блок фотоприемника;
 Р – регистратор

Рисунок 4 – Структурная схема измерителя ИНМП К-1А (ИНМП К-1Б)



Рисунок 5 – Общий вид Эталона РЭМП

Общий вид Эталона РЭМП приведен на рис. 5, а его метрологические характеристики (в режиме ЭНИ, который использовался для МА) в табл. 2.

Таблица 2 – Метрологические характеристики Эталона РЭМП

Наименование характеристики	Размерность	Вид поля	
		электрическое	магнитное
Наносекундный диапазон (ПЛ-48)			
1. Диапазон макс. значений	В/м (А/м)	от $4 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^5$	от 5 до 500
2. Длительность фронта	с	не более $8 \cdot 10^{-9}$	не более $8 \cdot 10^{-9}$
3. Длительность импульса	с	не менее $1,5 \cdot 10^{-4}$	не менее $1,5 \cdot 10^{-4}$

На рис. 6 приведены типовые осциллограммы фронтальной и спадовой части импульсов электрического и магнитного полей в Эталоне РЭМП в режиме ЭНИ (временные параметры обоих видов полей идентичны).

При МА измерительные преобразователи размещались в рабочем объеме ПЛ-48 таким образом, чтобы вектора электрического и магнитного полей были направлены перпендикулярно плоскостям ИП (рис. 7 и 8).

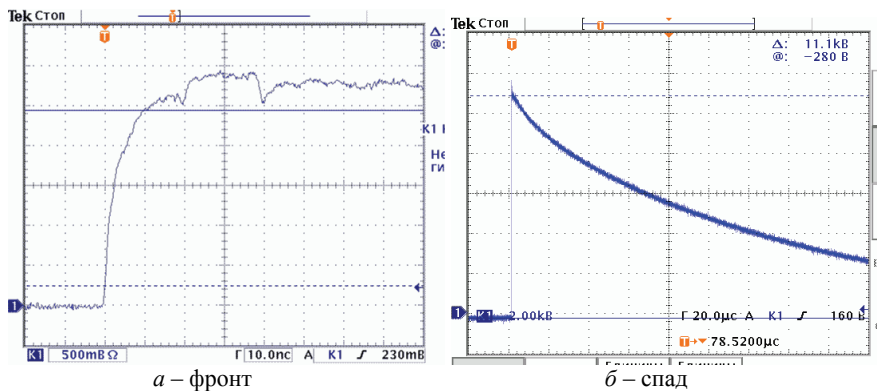


Рисунок 6

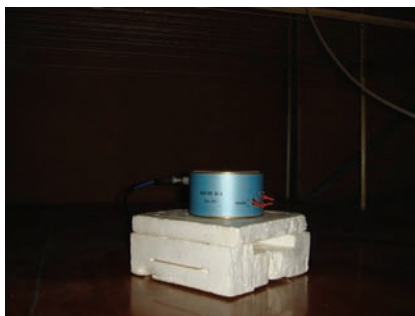


Рисунок 7 – Схема установки ЕИП измерителя ИНЭП К-1 в рабочем объеме ПЛ-48

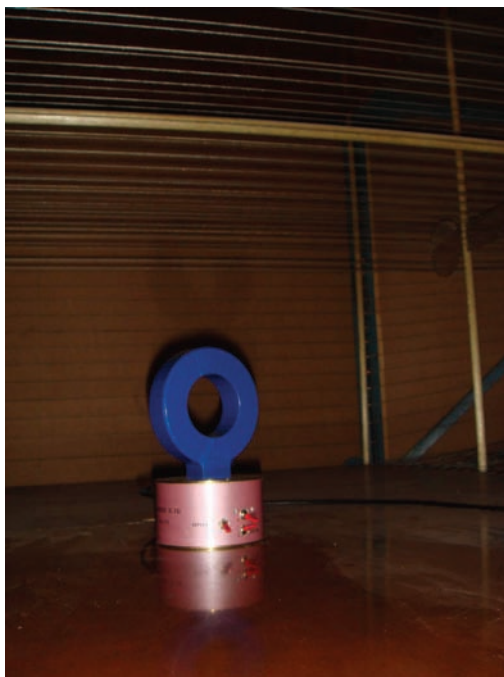


Рисунок 8 – Схема установки ИИП измерителей ИНМП К-1 в рабочем объеме ПЛ-48

При проведении МА снимались осциллограммы с выхода измерителей в трех разных точках их амплитудного диапазона на каждом из его штатных диапазонов (1 или 2). Некоторые виды типовых осциллограмм приведены на рис. 9 - 22, а результаты МА – в табл. 3 – 5.

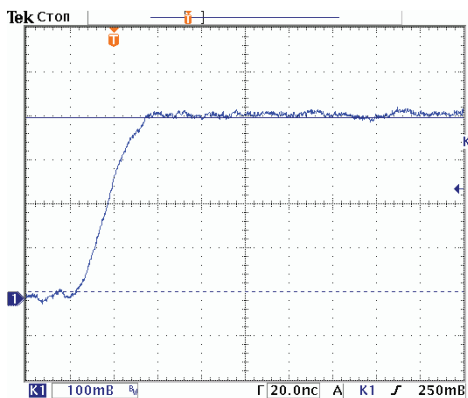


Рисунок 9 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1 на верхнем уровне 1 диапазона

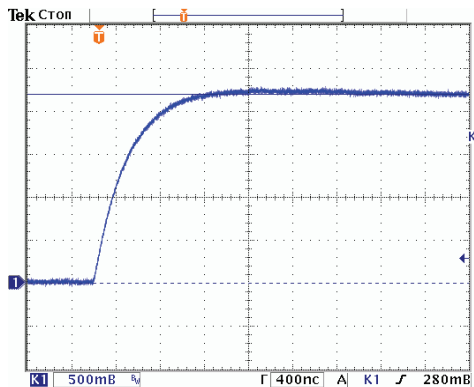


Рисунок 10 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1 на верхнем уровне 2 диапазона

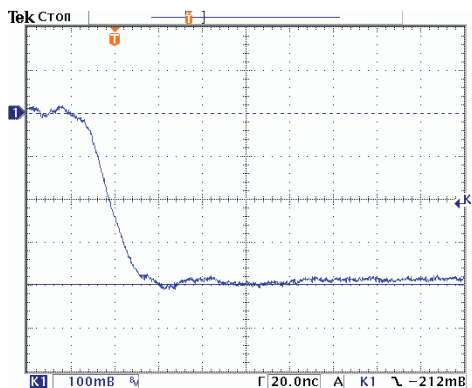


Рисунок 11 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1 на верхнем уровне 1 диапазона

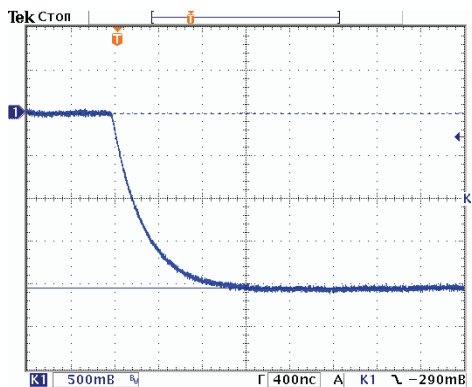


Рисунок 12 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1 на верхнем уровне 2 диапазона

Для измерения времени спада ПХ измерителя электрического поля ИНЭП К-1 Эталон РЭМП в своей классической конструкции не подходит, так как длительность спада аттестационного импульса 150 мкс (см. табл. 2) значительно меньше той, что требуется для этой процедуры (расчетное время спада ПХ измерителя электрического поля ИНЭП К-1 составляет величину не менее 100 мс). Поэтому для получения спада аттестационного импульса электрического поля длительностью в несколько секунд от ПЛ-48 была отключена согласующая нагрузка. В этом случае форма напряжения между электродами ПЛ-48, а следовательно и напряженность электрического поля, определяется кривой разряда формирующего конденсатора Эталона РЭМП через сопротивление утечек импульсного источника питания. На рис. 13 и 14 приведены осциллограммы спада ПХ измерителя ИНЭП К-1, полученные данным методом.

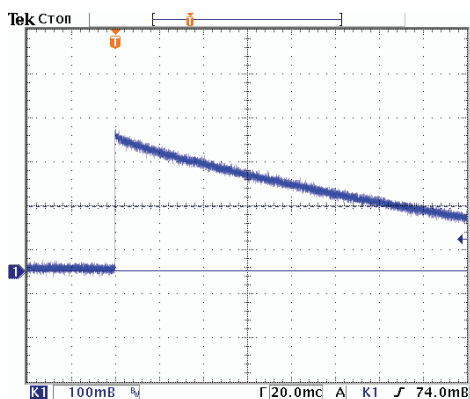


Рисунок 13 – Типовая осциллограмма спада импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1

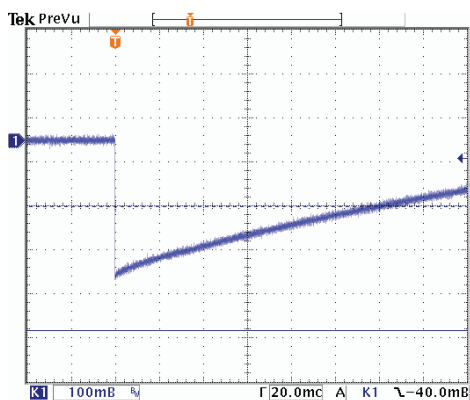


Рисунок 14 – Типовая осциллограмма спада импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1

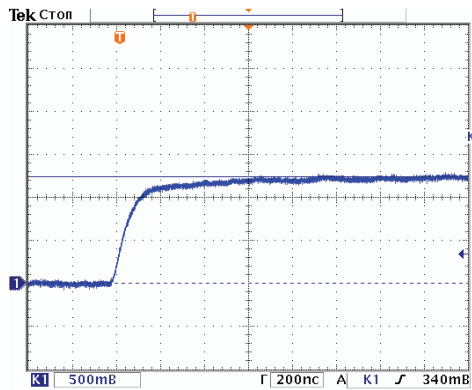


Рисунок 15 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1Б на верхнем уровне 1 диапазона

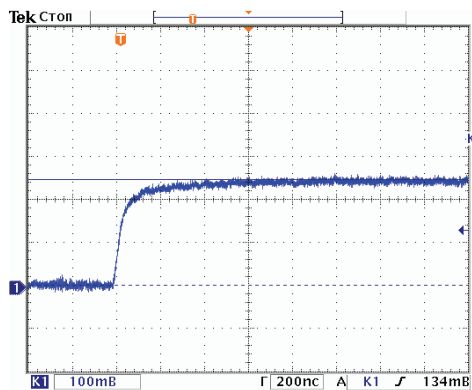


Рисунок 16 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1Б на верхнем уровне 2 диапазона

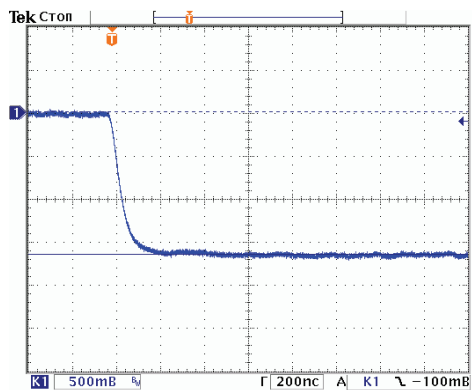


Рисунок 17 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1Б на верхнем уровне 1 диапазона

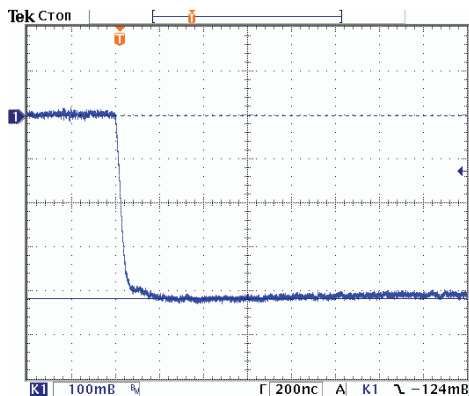


Рисунок 18 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1Б на верхнем уровне 2 диапазона

Провести МА измерителя внутренних магнитных полей типа ИНМП К-1А (он предназначен для измерения более медленной – трансформированной экраном части импульса магнитного поля) в Эталоне РЭМП невозможно, так как Эталон РЭМП не может генерировать длинные по фронту и спаду аттестационные импульсы необходимых временных параметров. Поэтому аттестация измерителя ИНМП К-1А проводилась в измерительных кольцах Гельмгольца КГИ-90 [7], которые наряду с Эталоном РЭМП входят в состав аттестационных установок НИПКИ «Молния». Ниже приведены типовые осциллограммы импульсов магнитного поля в центре колец Гельмгольца (кривая 2) и импульса напряжения на выходе аттестуемого измерителя ИНМП К-1А.

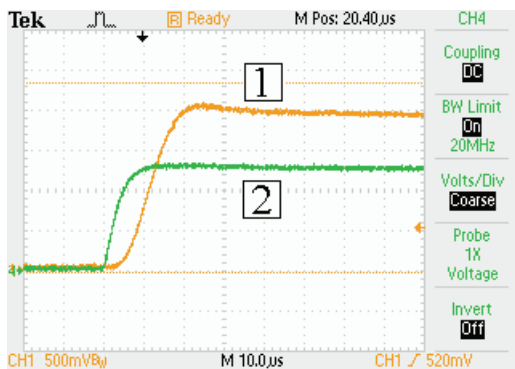


Рисунок 19 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1А на верхнем уровне 1 диапазона – кривая 1 и аттестационного импульса – кривая 2

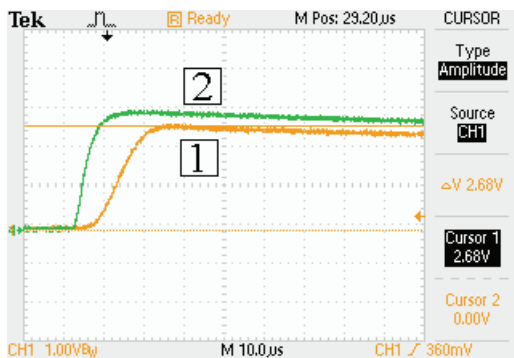


Рисунок 20 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения положительной полярности на выходе измерителя ИНЭП К-1А на верхнем уровне 2 диапазона – кривая 1 и аттестационного импульса – кривая 2

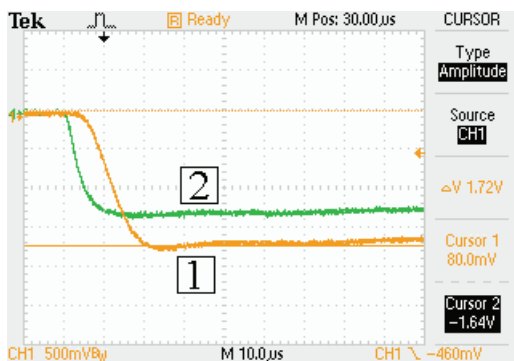


Рисунок 21 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1А на верхнем уровне 1 диапазона) – кривая 1 и аттестационного импульса – кривая 2

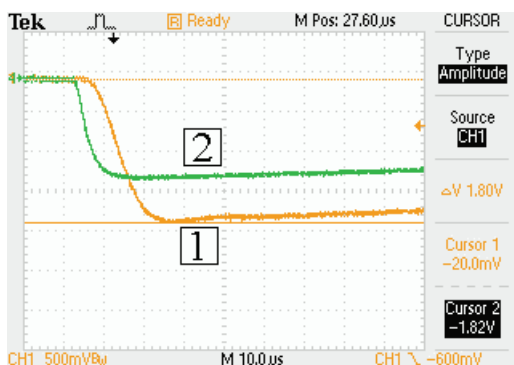


Рисунок 22 – Типовая осциллограмма фронта импульса напряжения отрицательной полярности на выходе измерителя ИНМП К-1А на верхнем уровне 2 диапазона – кривая 1 и аттестационного импульса – кривая 2

Спадочная часть ПХ измерителей магнитных полей экспериментально не снималась, так как для этого необходимы источники магнитных полей очень высокой интенсивности и длительности (порядка 100 мс). Поэтому в соответствии с типовой методикой МА измерителей магнитных полей данная характеристика определялась расчетным путем по параметрам интегрирующих цепей измерителей.

Таблица 3 – Метрологические характеристики ИНЭП К-1

Метрологические характеристики	Требования по НД		Получено при аттестации		
	Величина	Погрешность	Величина	Относительная погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{пр}$, В/(В/м), Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10 %	$0,40 \times 10^{-3}$ $9,10 \times 10^{-6}$	3,94 % 3,94 %	$0,02 \times 10^{-3}$ $0,36 \times 10^{-6}$
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$ с, не более Первый диапазон Второй диапазон	10^{-6}	5 %	$0,625 \times 10^{-6}$ $0,023 \times 10^{-6}$	1,0 % 1,0 %	$6,3 \times 10^{-9}$ $0,2 \times 10^{-9}$
Время спада ПХ, $T_c^{ПХ}$, с, не менее Первый диапазон Второй диапазон	0,1	5 %	$129,00 \times 10^{-3}$ $133,00 \times 10^{-3}$	1,1 % 1,1 %	$1,41 \times 10^{-3}$ $1,46 \times 10^{-3}$

Так как процесс МА на Эталоне РЭМП носит статистический характер, то для определения истинных параметров ПХ был заосциллографирован массив выходных напряжений измерителей (по 10 осциллограмм в каждой аттестационной точке, на обоих диапазонах, отдельно фронт и спад при обеих полярностях). Обработка этого массива экспериментальных данных проводилась по стандарту ГОСТ 8.207-2008 [8]. Обработка экспериментальных данных в ручном режиме занимает очень много времени, поэтому специально для Эталона РЭМП была разработана автоматизированная программа обработки статистических данных «МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА» [9], которая позволяет определять:

- длительность фронта ПХ;
- коэффициент преобразования;
- длительность спада ПХ;
- систематическую составляющую погрешности МА;
- случайную составляющую погрешности МА;

– суммарную погрешность МА.

Результаты машинной обработки экспериментальных данных МА всех вышеперечисленных видов измерителей приведены в табл. 3-5.

Таблица 4 – Метрологические характеристики ИНМП К-1А

Метрологические характеристики	Требования по НД		Получено при аттестации		
	Величина	Погрешность	Величина	Относительная погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, K_{np} , В/(А/м) для положительной полярности: Первый диапазон Второй диапазон для отрицательной полярности: Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10%	560×10 ⁻³	2.45 %	13,7×10 ⁻³
			63,2×10 ⁻³		1,5×10 ⁻³
			520×10 ⁻³		12,7×10 ⁻³
			56,1×10 ⁻³		1,4×10 ⁻³
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$ с, не более	20×10 ⁻⁶	5%	11,3 x 10 ⁻⁶	1,0 %	0,1×10 ⁻⁶
Время спада ПХ $T_c^{ПХ}$, с, не менее Первый диапазон Второй диапазон	5×10 ⁻³	5%	11,0×10 ⁻³	1,1 %	0,12×10 ⁻³
			40,0×10 ⁻³		0,44×10 ⁻³

Выводы:

1. МА измерителей импульсных электрических и магнитных полей типов ИНЭП К-1, ИНМП К-1А и ИНМП К-1Б показала, что созданный в НИПКИ «Молния» Эталон РЭМП позволяет проводить эту процедуру практически в полном объеме.
2. Разработанные в НИПКИ «Молния» и утвержденные Госстандартом Украины типовые методики проведения МА измерителей импульсных электрических и магнитных полей полностью соответствуют требованиям к этой процедуре.
3. По результатам МА измерителей импульсных электрических и магнитных полей Госстандарт Украины выдал свидетельства об их метрологической аттестации [10 - 12].

Таблица 5 – Метрологические характеристики ИНМП К-1Б

Метрологические характеристики	Требования по НД		Получено при аттестации		
	Величина	Отклонение	Величина	Относительная погрешность	Абсолютная погрешность
Коэффициент преобразования, $K_{пр}$, В/(А/м) Первый диапазон Второй диапазон	не устанавливается	10%	$57,8 \times 10^{-3}$ $3,40 \times 10^{-3}$	2,43 %	$1,4 \times 10^{-3}$ $0,08 \times 10^{-3}$
Время нарастания ПХ, $T_n^{ПХ}$, с, не более	300×10^{-9}	5%	$156,9 \times 10^{-9}$	1,1 %	$1,7 \times 10^{-9}$
Время спада ПХ, $T_c^{ПХ}$, с, не менее	$0,5 \times 10^{-3}$	5%	$1,30 \times 10^{-3}$	1,0 %	$0,01 \times 10^{-3}$

Список литературы: 1. Протокол испытаний № 2 от 15.09.2010. 2. Методика определения защитных свойств электромагнитных экранов. Программа испытаний (Часть 1). Приложение к договору № 351082 от 12.10.2007 г. 3. ГОСТ 8.256-77. Державна система забезпечення єдності вимірювання. Нормування й визначення динамічних характеристик аналогових засобів вимірювання. Основні положення. 4. *Nemchenko Yu.S., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I. and Lisnoy I.P.* The development of the pulse electromagnetic processes measurement unity supporting system in Ukraine // IEEE 2006 Third International Conference on ultrawideband and ultrashort impulse signals. September 18-22, 2006. – Sevastopol, Ukraine. – P. 363-366. 5. Средства измерения импульсных электрических полей. Программа и методика Государственной аттестации ИНЭП-000.000.000 ПМА. МА Х 06.1825-2007. 6. Средства измерения импульсных магнитных полей. Программа и методика Государственной аттестации ИНМП-000.000.000 ПМА. МА Х 06.1827-2007. 7. Кільця Гельмгольца вимірювальні КГІ-90. Свідоцтво про перевірку від 09.07.2009. 8. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостережень. Основні положення. 9. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33321. Комп'ютерна програма інтерактивного аналізу експериментальних даних і генерації отчетов «Метрологическая статистика». Дата реєстрації – 17.05.2010 р. 10. Свідоцтво про державну метрологічну атестацію вимірювача імпульсних електричних полів ИНЭП К-1 № 4167 від 23.07.2010 р. 11. Свідоцтво про державну метрологічну атестацію вимірювача імпульсних магнітних полів ИНМП К-1А № 4169 від 23.07.2010 р. 12. Свідоцтво про державну метрологічну атестацію вимірювача імпульсних магнітних полів ИНМП К-1Б № 4168 від 23.07.2010 р.

Поступила в редколлегию 04.04.2011