

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОНА РЭМП

Кравченко В.И., д.т.н., Князев В.В., к.т.н., Лесной И.П., Немченко Ю.С., Гирка Ю.Н.  
НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"  
тел.(057) 707-61-33, факс (057) 707-68-68, E-mail: nipkimolnija@kpi.kharkov.ua

*Разработан и построен "Исходный Эталон единиц максимальных значений напряжённостей импульсных электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей" с наносекундным временем нарастания напряжённости электромагнитного поля амплитудой до сотен кВ/м и сотен А/м.*

*Розроблено і побудовано "Вихідний Еталон одиниць максимальних значень напруженості імпульсних електричного – вольт на метр (В/м) та магнітного – ампер на метр (А/м) полів" з наносекундним часом зростання напруженості електромагнітного поля амплітудою до сотень кВ/м та сотень А/м.*

Исходный эталон единиц максимальных значений напряжённости импульсных электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей (далее по тексту – Эталон РЭМП) создан в НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" с целью проведения метрологической аттестации нестандартизованных средств измерения (НСИТ), которые применяются как на экспериментальной базе (ЭБ) НИПКИ "Молния" - объекте национального достояния Украины, так и в других аналогичных организациях СНГ. Вышеуказанные НСИТ (более 100 типов), разработанные в НИПКИ "Молния", применяются для измерения выходных параметров мощных импульсных испытательных установок ЭБ (напряжённостей генерируемых ими электрических и магнитных полей), так и для измерения электромагнитных полей (ЭМП), проникающих внутрь технических средств (ТС), испытываемых на этих установках.

Краткие сведения об амплитудно-временном диапазоне (АВП) этих ЭМП приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Амплитудно-временной диапазон моделируемых ЭМП

Параметр ЭМП		Единицы измерения	Величина
Амплитудный диапазон	электрического поля	В/м	$10^{-1} - 10^5$
	магнитного поля	А/м	$10^{-3} - 10^4$
Длительность фронта		с	$5 \cdot 10^{-9} - 10^{-5}$
Длительность спада		с	$2 \cdot 10^{-7} - 10^{-1}$

Из этой таблицы видно, что СИТ используются в чрезвычайно широком АВД, и, казалось бы, нельзя найти при их проектировании общего знаменателя. Однако, метрологические характеристики (МХ) импульсных НСИТ не зависят от АВД СИТ, так как согласно [1] МХ – это, в первую очередь, форма и параметры переходной характеристики (ПХ) СИТ, а именно:

- время нарастания ПХ  $T_n^{ПХ}$  ;

- постоянная времени спада ПХ  $T_c^{ПХ}$  ;

- коэффициент преобразования  $K_{пр}$ .

В соответствии с общепринятой мировой практикой параметры ПХ должны соответствовать следующим критериям:

$$T_n^{ПХ} \leq \frac{T_{\phi}}{3} ; \quad (1)$$

$$T_c^{ПХ} \geq 10T_c ; \quad (2)$$

$$k_{y \min} = \frac{E_{0 \min}(H_{0 \min}) \cdot K_{пр}}{3} , \quad (3)$$

где  $T_{\phi}$ ,  $T_c$  – длительность фронта и спада измеряемых НСИТ импульсов ЭМП, с;  $k_{y \min}$  – минимальная чувствительность осциллографа, В/дел;  $E_{0 \min}$ ,  $H_{0 \min}$  – напряжённость измеряемых электрического и магнитного полей, В/м, А/м;  $K_{пр}$  – предполагаемый коэффициент преобразования НСИТ, В/(В/м), В/(А/м).

Исходя из требований (1) – (3) и данных таблицы 1 параметры ПХ НСИТ должны быть следующими:

-  $T_n^{ПХ}$  – от  $1,7 \cdot 10^{-9}$  с до  $3,4 \cdot 10^{-6}$  с;

-  $T_c^{ПХ}$  – от  $2 \cdot 10^{-6}$  до 1 с;

-  $K_{пр}$  – от  $3 \cdot 10^{-6}$  В/(В/м), В/(А/м) для электрического и магнитного поля.

Таким образом отсюда вытекают требования к установкам для экспериментального определения параметров ПХ НСИТ – поверочным установкам (ПУ); а именно ПУ должны генерировать высокостабильные и точно контролируемые импульсы ЭМП, в идеальном случае, со следующими характеристиками:

- амплитудный диапазон ПХ должен лежать в пределах от единиц В/м и мА/м до сотен кВ/м и сотен А/м;

- длительность фронта  $T_{\phi}^{ПУ} \leq \frac{T_n^{СИТ}}{3}$  ;

- длительность спада  $T_c^{ПУ} \gg T_c^{СИТ}$  ;

- габариты рабочего объёма ПУ во всех направлениях должны в несколько раз (не менее 3) превышать габариты аттестуемого НСИТ;

- нестабильность выходных характеристик ПУ  $\leq 1\%$  за период проведения аттестации НСИТ.

Этим требованиям может удовлетворить только Эталон импульсного ЭМП [2]. Такой Эталон и был создан в рамках работ по объекту национального достояния Украины при полной поддержке Министерства науки и образования Украины за период с 2002 по 2005 годы.

Кроме вышеперечисленных причин, острая необходимость в создании собственного Эталона вызвана ещё и отсутствием в Украине нужных нам ПУ. Ближайший аналог нашего Эталона имеет только РФ – Государственный специальный эталон единиц напряжённости импульсных электрических и магнитных полей, созданный ещё в СССР и хранящийся во ВНИИОФИ Госстандарта РФ.

Наш Эталон создан в качестве рабочего или вторичного эталона ИЭМП, но, так как он обладает наивысшей точностью для ПУ аналогичного назначения в Украине, то в соответствии с [3] он автоматически получает статус Исходного Эталона Украины (шифр Эталон РЭМП).

Общий вид Эталона РЭМП приведён на рис. 1, а его структурная схема – на рис. 2 [4], где ЭСИ – эталон субнаносекундных импульсов ЭМП; ЭНИ – эталон наносекундных импульсов ЭМП; ПКУ – пульт

контроля и управления; ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; ГСИ – генератор ступенчатых импульсов; ГЭИ – генератор экспоненциальных импульсов; КПП – коаксиально-полосковый переход; ПЛ-24 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,24 м; ПЛ-48 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,48 м; СН – согласующая нагрузка; ОИК – образцовый измерительный комплекс; УВД- установка высокого давления; Р – регистраторы; ЭИК – экранированная измерительная кабина.



Рис. 1. Общий вид Эталона РЭМП

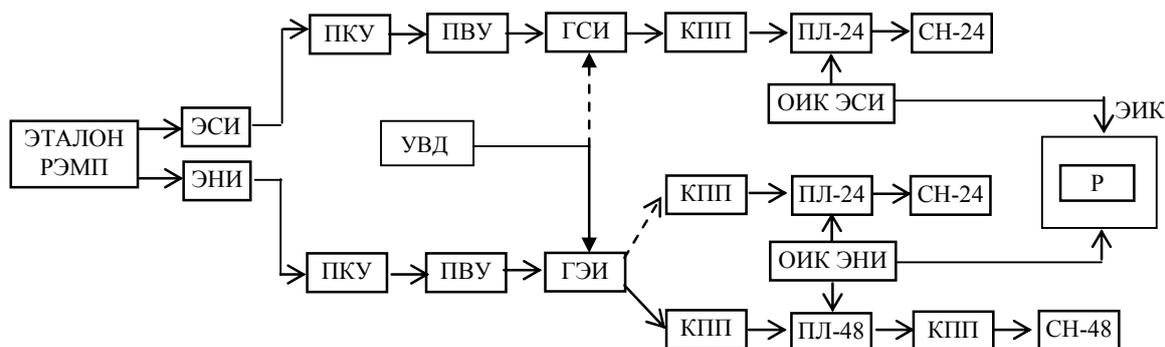


Рис. 2. Структурная схема Эталона РЭМП

Эталон РЭМП – это высоковольтный импульсный источник питания, разряжаемый на ЭМП – полеобразующую систему такого вида, что бы структура и параметры ЭМП в ней можно было легко анализировать, измерять и рассчитывать.

В качестве образцовых полеобразующих систем в Эталоне РЭМП применяются симметричные замкнутые полосковые линии (ПЛ) (ПЛ-24 для Эталона ЭСИ и ПЛ-48 для эталона ЭНИ), где цифрами обозначено расстояние в сантиметрах между электродами.

В согласованной ПЛ создаётся плоская бегущая волна ЭМП, вектора которой показаны на рис. 3 [5].

Измерение параметров аттестационного ЭМП в рабочем объёме Эталона проводится образцовым измерительным комплексом, состоящим из трёх СИТ (рис. 4).

Форма ЭМП показана на рис. 5.

По результатам первичной метрологической аттестации Эталона РЭМП, проведённой сотрудниками ВНИИОФИ Госстандарта РФ путём переноса единиц измерения ЭМП с Государственного специального эталона единиц напряжённости импульсных электрических и магнитных полей РФ получены следующие характеристики:

- время нарастания импульсов ЭМП приведено в табл. 2.

Таблица 2

Рабочая зона	T <sub>фр имп</sub> Е, нс		T <sub>фр имп</sub> Н, нс	
	1 режим	2 режим	1 режим	2 режим
ПЛ-24	8,8 ± 0,3	0,66 ± 0,03	8,1 ± 0,4	-
ПЛ-48	9,5 ± 0,3	2,1 ± 0,1	8,3 ± 0,4	-

Время нарастания импульсов ЭМП в Эталоне РЭМП

- диапазон амплитудных значений воспроизводимых импульсов напряженностей электрического и магнитного полей составляет:

в режиме 1: E<sub>1</sub> = (4÷200) кВ/м;

H<sub>1</sub> = (10÷500) А/м

в режиме 2: E<sub>2</sub> = (0,003÷120) кВ/м;

H<sub>2</sub> = (7,5×10<sup>-3</sup>÷320) А/м

- постоянная времени спада воспроизводимых импульсов напряженностей электрического и магнитного полей на уровне 0,367 от амплитуды в режиме 1 составляет: (127 ± 7) мкс, доверительная вероятность P = 0,95.

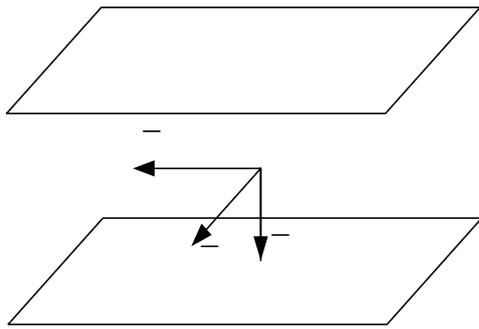
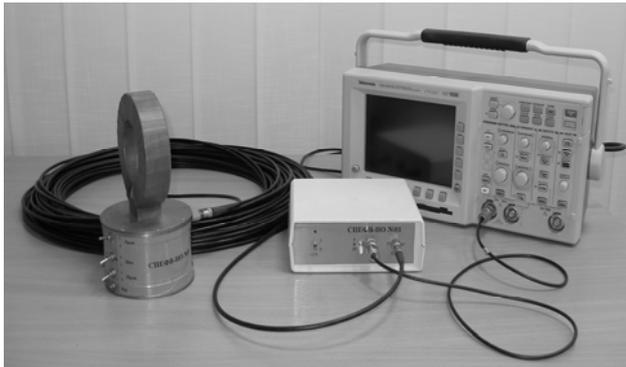
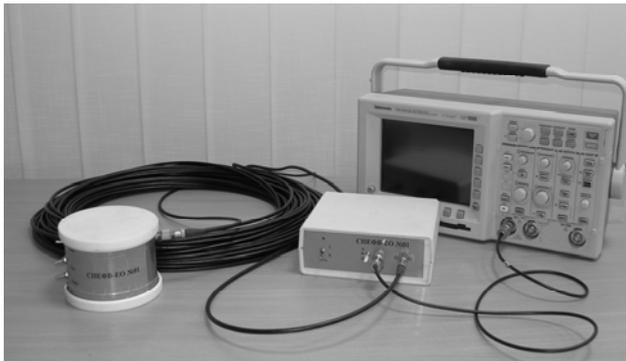


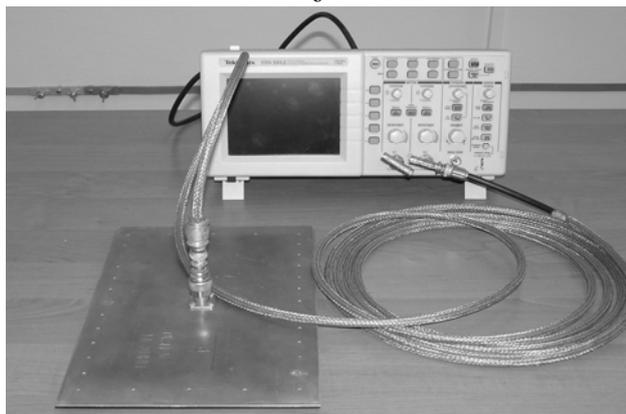
Рис. 3. Структура поля в полосковой линии



а

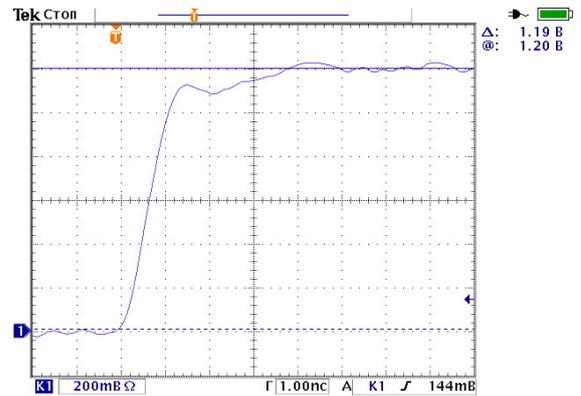


б

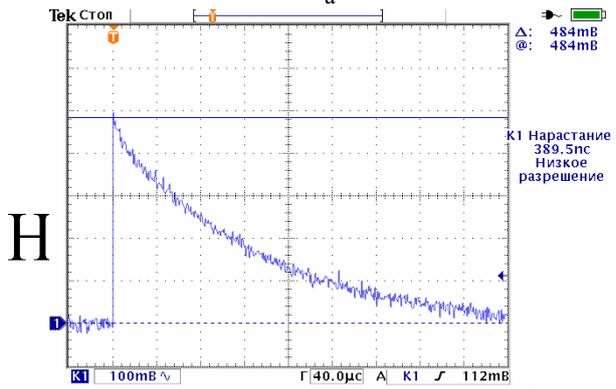


в

Рис. 4. Измерительный комплекс Эталона РЭМП:  
а – измеритель магнитного поля с оптической линией передачи информации; б – измеритель электрического поля с оптической линией передачи информации; в – измеритель электрического поля с кабельной линией передачи информации

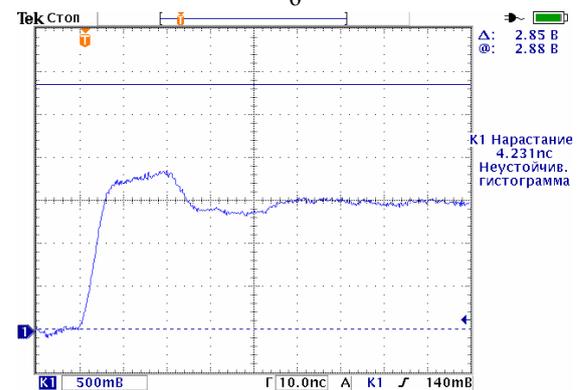


14 Мар 2007  
14:36:20

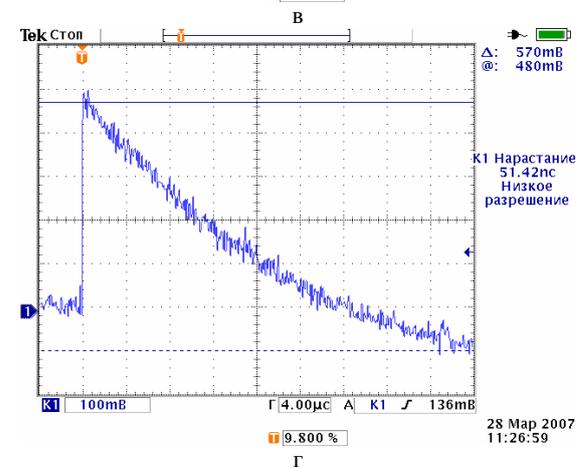


H

27 Мар 2007  
11:01:13



28 Мар 2007  
11:43:06



28 Мар 2007  
11:26:59

Рис. 5. Форма поля в Эталоне РЭМП:  
а, б – фронт и спад импульса электрического поля;  
в, г – фронт и спад магнитного поля

Таким образом, выходные параметры Эталоны РЭМП полностью соответствуют вышеперечисленным требованиям к ПУ.

Последнее требование к ПУ, а именно – высокая стабильность выходных параметров была определена нами в период опытной эксплуатации Эталоны РЭМП в 2005 – 2007 годах [6].

Факторы, влияющие на выходные характеристики Эталоны РЭМП, можно условно разделить на действующие в течение одной серии испытаний и действующие в течение межповторного интервала.

К кратковременным факторам можно отнести изменение температуры окружающей среды, давления в коммутаторах ЭНИ и ЭСИ и колебания сетевого напряжения питания.

Анализ нестабильности выходных параметров Эталоны РЭМП проводился на основе экспериментов, то есть снимались осциллограммы выходных импуль-

сов ЭМП за длительный период, и по ним определялись отличия во временных и амплитудных характеристиках Эталоны РЭМП. Результаты анализа приведены в табл. 3.

В этой таблице даны значения длительности фронта  $T_{Э0}$  полученные с помощью электронного осциллографа Tektronix TDS 3052B, который имеет собственное время нарастания переходной характеристики  $T_{ПХ(Э0)}$  равное 0,7 нс. Для определения истинного времени нарастания импульса напряжённости электрического поля  $T_{и}$  необходимо воспользоваться формулой:

$$T_{и} = \sqrt{T_{Э0}^2 - T_{ПХ(Э0)}^2}, \quad (4)$$

где  $T_{Э0}$  – длительность фронта импульса на экране осциллографа;  $T_{ПХ(Э0)}$  – время нарастания переходной характеристики осциллографа (указано в паспорте на него).

Таблица 3

Стабильность характеристик Эталоны РЭМП

Параметр	$t, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{зар}}^{\text{min}}, \text{кВ}$		$U_{\text{зар}}^{\text{cp}}, \text{кВ}$		$U_{\text{зар}}^{\text{max}}, \text{кВ}$	
		ПЛ-24	ПЛ-48	ПЛ-24	ПЛ-48	ПЛ-24	ПЛ-48
$E_{\text{вых}}^{\text{max}}, \text{кВ/м}$	18	13,77	25,75	27,2	48,96	49,8	70,12
	22	13,28	25,50	27,17	48,55	49,65	69,74
$T_{\phi}^{0,1-0,9}, \text{нс}$	18	0,97	9,61	0,97	9,60	0,94	9,51
	22	0,97	9,57	0,95	9,55	0,96	9,53
$T_{\phi}^{0,1-0,8}, \text{нс}$	18	0,71	6,50	0,72	6,52	0,72	6,53
	22	0,72	6,51	0,72	6,51	0,71	6,51

Анализ данных, приведённых в таблице 3, показывает, что при росте температуры наблюдается незначительное (менее 1%) падение максимальной амплитуды, а так же, в большинстве случаев, изменение фронтов импульсов (до 0,05 нс). Такая зависимость наблюдается при всех уровнях зарядного напряжения. Колебания выходных характеристик отражены в табл. 4.

Таким образом, можно утверждать, что изменение температуры и зарядного напряжения в пределах определённых при последней метрологической аттестации, не имеют значительного влияния на выходные характеристики Эталоны РЭМП.

Таблица 4

Анализ стабильности работы Эталоны РЭМП

Параметр	ПЛ-24	ПЛ-48
Изменение амплитуды $E_{\text{max}}, \%$	0,4 – 0,6	0,6 – 0,86
Изменение времени нарастания $T_{\phi}, \%$	0,3 – 0,9	0,2 – 0,8

Проводилось изучение зависимости напряжённости электрического поля от уровня напряжения питания, в процессе которого напряжение питающей сети изменялось от 200 до 240 В при постоянной температуре. В результате экспериментов изменений временных характеристик получаемых импульсов не наблюдалось. Единственным отличием осциллограмм на разных уровнях напряжения питания трансформатора было различие в амплитуде.

Из теории полосковых линий [5] известно, что максимальная напряжённость электрического поля в

согласованных ПЛ рассчитывается по упрощенной формуле:

$$E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{пл}}}{h}, \quad (5)$$

где  $U_{\text{пл}}$  – напряжение между электродами ПЛ, кВ;  $h$  – расстояние между электродами, м.

Так как зависимость между напряжённостью электрического поля и напряжением между электродами ПЛ (которое, в свою очередь, прямо пропорционально напряжению питания) линейна, то естественно амплитуда напряжённости электрического поля будет возрастать с ростом амплитуды напряжения питания ПВУ (рис. 6 и 7).

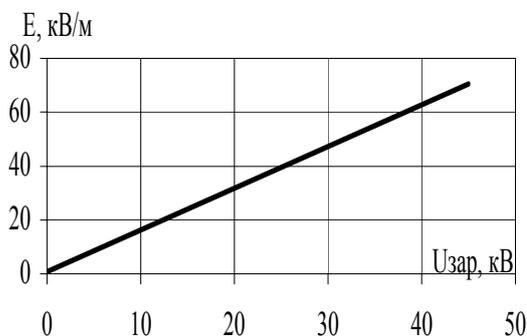


Рис. 6. График зависимости напряжённости электрического поля в ПЛ-48 от зарядного напряжения генератора экспоненциальных импульсов

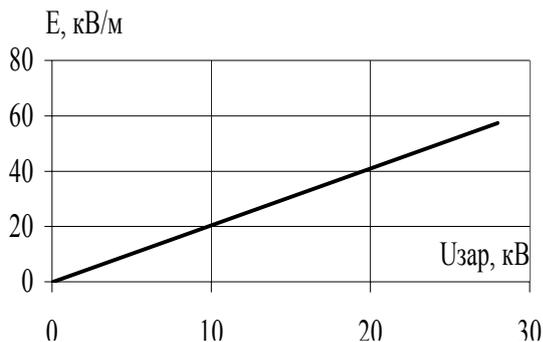


Рис. 7. График зависимости напряжённости электрического поля в ПЛ-24 от зарядного напряжения генератора ступенчатых импульсов

Таким образом, для исключения этого фактора, негативно влияющего на стабильность выходных характеристик Эталона, были приняты два решения:

1) Установить в ПКУ Эталона РЭМП электронный стабилизатор напряжения типа Б2–3.

2) В течение всей работы Эталона поддерживать постоянное зарядное напряжение по штатному цифровому вольтметру Эталона типа В2–22.

В результате исследований было доказано, что, если исключить колебания напряжения питания путём установки в цепь питания электронного стабилизатора, то при установке и контроле зарядного напряжения и давления в газовом оборудовании наблюдающиеся изменения характеристик находятся в пределах допустимых свидетельством о метрологической аттестации (до 1% по амплитуде и до 0,1 нс по времени нарастания импульсов).

К изменениям, имеющим длительный характер, относятся трансформации в высоковольтном и измерительном оборудовании. Если эти изменения и имеют место, то их влияние на выходные характеристики Эталона РЭМП замечены не были.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты метрологической аттестации и последующий опыт эксплуатации Эталона РЭМП показали его полную пригодность, как высокостабильного образцового источника импульсных ЭМП, для проведения метрологической аттестации НСИТ как ЭБ НИПКИ "Молния", так и НСИТ аналогичных установок СНГ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 8.256–77. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерения. Основные положения.
- [2] Техническое задание на разработку и создание Эталона РЭМП от 18.05.2003 г.
- [3] ДСТУ 3231-95. Метрологія. Еталони державні та вторинні одиниць вимірювань. Основні положення, порядок розроблення, затвердження реєстрації, зберігання та застосування.
- [4] Исходный Эталон единиц максимальных значений напряжённости импульсных электрического – вольт на метр (В/м) и магнитного – ампер на метр (А/м) полей. Руководство по эксплуатации. Эталон РЭМП-000.000.000 РЭ.
- [5] Ковалёв И.С. Конструирование и расчёт полосковых устройств. М., 1974, 296 л. с ил.
- [6] Кравченко В.И., Немченко Ю.С., Танцура А.И., Гирка Ю.Н. Экспериментальное исследование стабильности выходных характеристик Эталона РЭМП// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".-Харків: НТУ "ХПІ".-2007.-№20.-С. 3-13.

Поступила 05.11.2007