

***В.И.КРАВЧЕНКО***, докт.техн.наук; ***Ю.С.НЕМЧЕНКО***;  
***А.И.ТАНЦУРА***; ***В.Н.ДНЫЩЕНКО***; НТУ «ХПИ»

## **ИСХОДНЫЙ ЭТАЛОН УКРАИНЫ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС**

Стаття присвячена конструкції і параметрам штатного вимірювального комплексу Державного еталона електромагнітних полів Еталона-РЕМП, розташованого в НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ». Вимірювальний комплекс дозволяє вимірювати напруженості електричних та магнітних полів.

This paper describes a structure and parameters of the authorized measuring system employed by the National electromagnetic fields measurement standard (REMP-standard) that is located at the Research-&-Design institute «Molniya» under the National Technical University «Kharkiv Polytechnic University». This system allows us to measure intensity of electric and magnetic fields

За період с 2004 по 2006 гг. по ТЗ, утвержденному Министерством образования и науки Украины, в НИПКИ «Молния» был создан Эталон импульсных электромагнитных полей (Эталон-РЭМП), предназначенный для метрологического обеспечения работы испытательных установок экспериментальной базы (ЭБ) НИПКИ «Молния».

Более глобальное назначение Эталона-РЭМП – обеспечение единства измерения такого рода электромагнитных процессов в Украине, для чего была реализована Государственная поверочная схема, установленная межгосударственным стандартом ГОСТ 8.540-93 «Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсного электрического и магнитного полей».

В процессе выполнения этой задачи в НИПКИ «Молния» была создана высоковольтная импульсная установка с предельными амплитудно-временными параметрами, которая и является энергетическим «сердцем» Эталона-РЭМП. Кроме того, для обеспечения текущего измерения выходных параметров Эталона-РЭМП одновременно был создан образцовый измерительный комплекс и другие элементы инфраструктуры Эталона-РЭМП.

В статье приведены основные итоги разработки и внедрения измерительного комплекса Эталона-РЭМП

**Технические требования.** Технические требования к Эталону-РЭМП регламентируются с одной стороны потребностями ЭБ, а с другой стороны – требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 8.450-95 [2]. Основные требования к Эталону сведены в табл. 1.

**Идеология построения.** В общем случае Эталон такого назначения со-

держит высоковольтный импульсный источник питания (ВИП), разряжаемый на полеобразующую систему (ПС). При этом ВИП должен генерировать однократные импульсы высокого напряжения  $U$  и больших токов  $I$ , временные параметры которых соответствуют требованиям табл. 1, а амплитуды этих импульсов должны обеспечивать создание необходимых уровней  $E$  – и  $H$  – полей с учетом коэффициента преобразования ПС. Основные требования к ПС – это создание  $E$  – и  $H$  – полей с равномерной структурой, четко известными направлениями векторов полей и, по возможности, легко рассчитываемыми амплитудами по геометрическим размерам ПС.

Таблица 1

Наименование характеристики	Размерность	Вид поля	
		электрическое	магнитное
Наносекундный диапазон			
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 $1,5 \cdot 10^{-4}$
Субнаносекундный диапазон			
1. Диапазон макс. значений	В/м (А/м)	от 3 до $1,5 \cdot 10^5$	от $7,5 \cdot 10^3$ до 375
2. Длительность фронта	с	не более $1 \cdot 10^{-9}$	не более $1 \cdot 10^{-9}$
3. Длительность импульса	с	не менее $2 \cdot 10^{-7}$	не менее $2 \cdot 10^{-7}$

Конструкция ВИП различного вида хорошо известна [3] и поэтому мы не будем подробно на ней останавливаться. Наиболее удовлетворяют требованиям к ПС направляющие системы типа полосковых линий (ПЛ). ПЛ – это два достаточно длинных ленточных проводника шириной  $b$  и длиной  $\ell$ , расположенных параллельно на расстоянии  $h$  друг от друга и у которых выполняется требования:

$$b, \ell > h; \tag{1}$$

$$d \ll b, \ell, h; \tag{2}$$

$$\lambda < h, b, \ell, \tag{3}$$

где  $\lambda$  – эквивалентная длина волны.

ПЛ хорошо изучены [4] и, что самое главное, вдоль них распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет однозначное направление векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  -полей (рис. 1), а их соотношение определяется формулой

$$E / H = 120\pi, \tag{4}$$

$$E = \frac{U}{H}. \tag{5}$$

Габариты ПЛ определяют габариты рабочего объема, в котором должно располагаться аттестуемое НСИ. По общепринятой методике габариты рабо-

чего объема составляют 1/3 габаритов ПЛ. Из анализа выражений (1-3) вытекает, что чрезвычайно сложно обеспечить выполнение требований табл. 1 в одной ПЛ. Поэтому было принято решение о применении в Эталоне-РЭМП двух ПЛ с различными геометрическими размерами, а именно:

- ПЛ-24 с высотой 24 см для генерирования импульсов ЭМП с длительностью фронта  $\sim 1$  нс и длительностью импульса не более 100 нс;
- ПЛ-48 с высотой 48 см для генерирования импульсов ЭМП с длительностью фронта  $\sim 8$  нс и длительностью импульса не менее 100 мкс.

В Эталоне-РЭМП в качестве ПС применены симметричные замкнутые ПЛ (рис. 2), которые по сравнению с канонической ПЛ по рис. 1 имеют дополнительные преимущества [5], а именно:

- отсутствие излучения ЭМП за пределы ПЛ;
- возможность одновременного использования двух рабочих объемов: сверху и снизу от центральной плоскости.

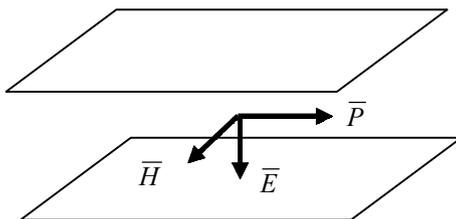


Рисунок 1 – Направление векторов электромагнитного поля в ПЛ

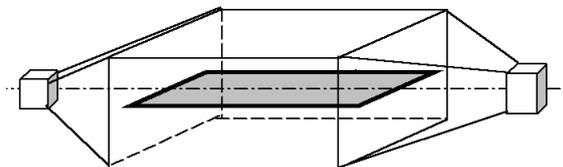


Рисунок 2 – Симметричная замкнутая ПЛ

При этом габариты ПЛ выбраны таким образом, чтобы волновое сопротивление ПЛ составляло величину 50 Ом.

Таким образом, Эталон-РЭМП содержит как бы два независимых эталона: эталон субнаносекундных импульсов (ЭСИ) и эталон наносекундных импульсов (НСИ)

**Состав измерительного комплекса.** Измерительный комплекс состоит из трех самостоятельных средств измерения импульсных электрических и магнитных полей, а именно:

- СПЕФВ-ЕК – измеритель напряженности электрического поля субнаносекундного диапазона;

- СПЕФВ-ЕВ – измеритель напряженности электрического поля микросекундного диапазона;
- СПЕФВ-НВ – измеритель напряженности магнитного поля микросекундного диапазона.

Исходя из особенностей каждого СИТ, можно сказать, что:

- СПЕФВ-ЕК применяется для измерения амплитуды и длительности фронта субнаносекундных импульсов электрического поля в ПЛ-24 (ЭСИ);
- СПЕФВ-ЕВ применяется для измерения амплитудно-временных параметров микросекундных импульсов электрического поля в ПЛ-48 (ЭНИ);
- СПЕФВ-НВ применяется для измерения амплитудно-временных параметров магнитного поля в ПЛ-48 (ЭНИ).

Хотя конструкция всех вышеописанных СИТ позволяет их использовать и в других полосковых линиях.

Ниже приведены описания и конкретные технические характеристики всех видов вышеназванных СИТ.

**Измеритель СПЕФВ-ЕК.** В табл. 2 приведены основные метрологические характеристики измерителя СПЕФВ-ЕК.

Таблица 2

Наименование характеристики	Един. измерения	Величина
Коэффициент преобразования в диапазоне амплитудных значений (10÷200) кВ/м	В/(В/м)	$4,82 \times 10^{-5}$
Время нарастания переходной характеристики между уровнями 0,1-0,9 от установившегося значения при доверительной вероятности $P = 0,95$	пс	$128 \pm 12$
Длительность переходной характеристики на уровне 0,5 установившегося значения амплитуды	нс	150
Доверительные границы относительной погрешности измерения коэффициента преобразования при доверительной вероятности 0,95	%	
– для первых 50 нс длительности ПХ		3,3
– для всей длительности ПХ		4,4

В состав измерителя СПЕФВ-ЕК входит емкостной измерительный преобразователь (ЕИП) в виде плоского конденсатора прямоугольной формы, измерительный кабель (ИК), передающий измеренный сигнал от ЕИП к регистратору – осциллографу. Структурная схема СПЕФВ-ЕК показана на рис. 3, а его общий вид в сборе с регистратором и без него – на рис. 4 и 5.



Рисунок 3 – Структурная схема измерителя СПЕФВ-ЕК:  
 ЕИИП – емкостной измерительный преобразователь; ИК – измерительный кабель;  
 Р – регистратор

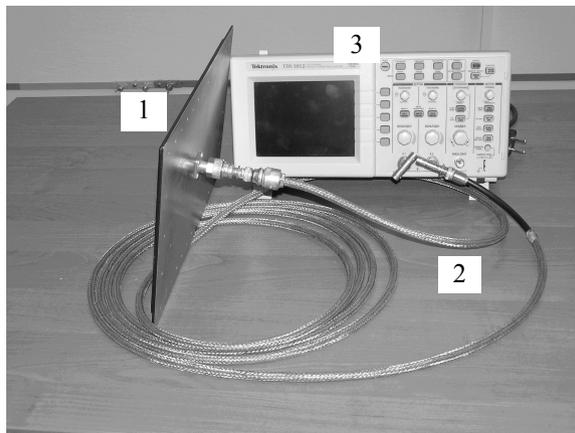


Рисунок 4 – Общий вид измерителя СПЕФВ-ЕК с регистратором:  
 1 – емкостной измерительный преобразователь; 2 – измерительный кабель;  
 4 – регистратор – осциллограф Tektronix TDS-3052B



Рисунок 5 – Измеритель СПЕФВ-ЕК

**Измеритель СПЕФВ-ЕО.** В табл. 3 приведены основные метрологические характеристики измерителя СПЕФВ-ЕО.

Структурная схема СПЕФВ-ЕО показана на рис. 6

В состав измерителя СПЕФВ-ЕО входит блок емкостного измерительно-

го преобразователя (БЕИП). Он состоит из емкостного измерительного преобразователя в виде плоского конденсатора круглой формы и блока преобразования электрического сигнала в световой. Световой импульс по оптическому кабелю передается к блоку фотоприемника (БФП). В БФП световой сигнал преобразуется в электрический и подается на регистратор.

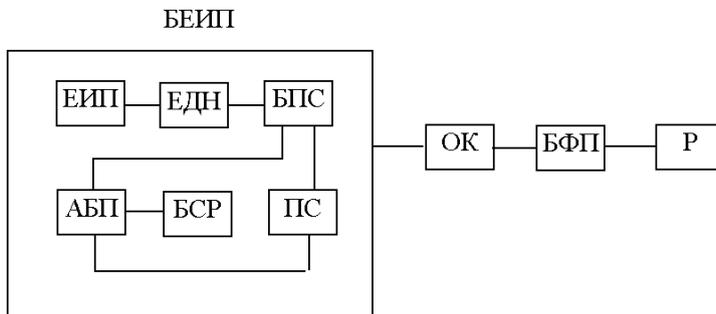


Рисунок 6 – Структурная схема измерителя СПЕФВ-ЕО

БЕИП – блок емкостного измерительного преобразователя; 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

Таблица 3

Наименование характеристики	Един. измерения	Величина
Коэффициент преобразования в диапазоне амплитудных значений: 1 диапазон (10÷40) кВ/м 2 диапазон (40÷200) кВ/м	В/(В/м)	$2,15 \times 10^{-5}$ $4,70 \times 10^{-6}$
Время нарастания переходной характеристики	нс	(4,8±0,2)
Постоянная времени спада переходной характеристики	мс	2,14±0,07
Доверительные границы относительной погрешности измерения коэффициента преобразования	%	4,2
Напряжение питания БФП, при частоте питания 50 Гц	В	220±15
Амплитуда импульса калибровки	мВ	564
Время непрерывной работы БЕИП, не менее	час	6

На рис. 7 и 8 показаны измеритель СПЕФВ-ЕО в сборе с осциллографом и блок емкостного измерителя.

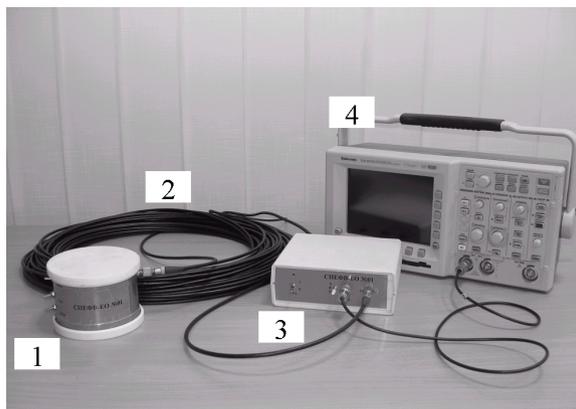


Рисунок 7 – Общий вид измерителя СПЕФВ-ЕО с регистратором:  
1 – блок емкостного измерительного преобразователя (БЕИП); 2 – оптический кабель (ОК); 3 – блок фотоприемника (БФП); 4 – осциллограф Tektronix TDS-3052B

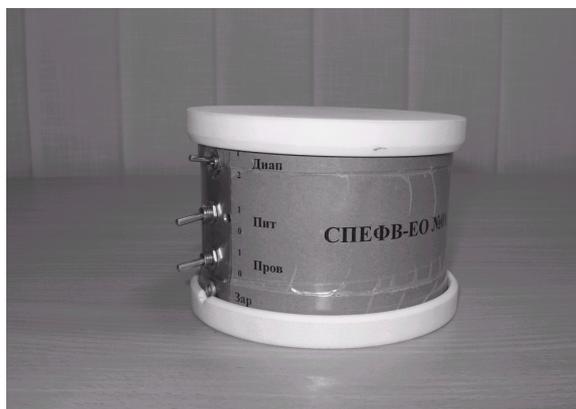


Рисунок 8 – Блок емкостного измерительного преобразователя

Длина оптического кабеля 50м, а вес всего измерителя (без регистратора) не более 4 кг.

**Измеритель СПЕФВ-НО.** В табл. 4 приведены основные метрологические характеристики измерителя СПЕФВ-НО

В состав измерителя СПЕФВ-НО входят: блок индукционного измерительного преобразователя (БИИП). Он состоит из индукционного измерительного преобразователя (ИИП) в виде круглой многovitковой катушки и

блока преобразования электрического сигнала в световой (БПС). Световой импульс по оптическому кабелю передается к блоку фотоприемника (БФП). В БФП световой сигнал преобразуется в электрический и подается на регистратор.

Таблица 4

Наименование характеристики	Един. измерения	Величина
Коэффициент преобразования в диапазоне амплитудных значений: 1 диапазон (25÷105) А/м 2 диапазон (105÷530) А/м	В/(А/м)	$9,41 \times 10^{-3}$ $1,76 \times 10^{-3}$
Время нарастания переходной характеристики	нс	(4,4±0,2)
Постоянная времени спада переходной характеристики	мкс	12,3
Погрешность измерения амплитуды, не более	%	10
Погрешность измерения временных параметров, не более	%	15
Доверительные границы относительной погрешности измерения коэффициента преобразования	%	3,7
Амплитуда импульса калибровки	мВ	270
Напряжение питания БФП, при частоте сети 50 Гц	В	220±5
Время непрерывной работы БИИП, не менее	час	6

Структурная схема СПЕФВ-НО аналогична структурной схеме СПЕФВ-ЕО с той лишь разницей, что вместо емкостного измерительного преобразователя в ней содержится индукционный измерительный преобразователь и вместо емкостного делителя напряжения – омический, схема показана на рис. 9, а общий вид СПЕФВ-НО и БИИП – на рис. 10 и 11.

**Методика использования измерительного комплекса.** При проведении измерений выходных амплитудно-временных параметров Эталона-РЭМП в измеряемое электромагнитное поле помещаются только измерительные преобразователи:

- БИИП измерителей Е-полей обоих видов помещаются внутрь полосковой линии таким образом, чтобы вектор измеряемого электрического поля был направлен перпендикулярно плоскости ЕИП;
- БИИП измерителя Н-полей помещается внутрь полосковой линии та-

ким образом, чтобы вектор измеряемого магнитного поля был перпендикулярен плоскости ИИП;

- БФП измерителей всех видов и осциллографы размещаются в экранированной измерительной кабине ЭИК, располагаемой на расстоянии 10 м от точек измерения;
- Передающие линии обоих видов (ИК и ОК) соединяют элементы измерителей таким образом, чтобы эти линии наименьшим образом искажали измеряемые поля.

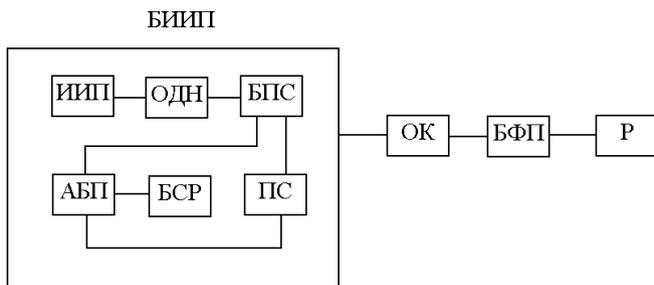


Рисунок 9 – Структурная схема измерителя СПЕФВ-ЕО:

БИИП – блок индукционного измерительного преобразователя; ИИП – индукционный измерительный преобразователь; 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

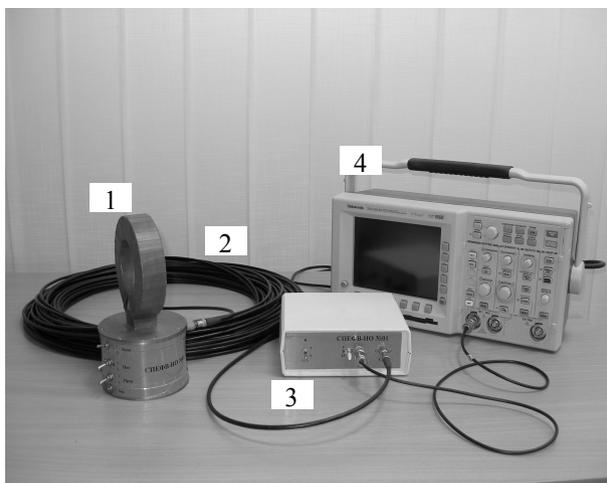


Рисунок 10 – Общий вид измерителя СПЕФВ-НО с регистратором: 1 – блок индукционного измерительного преобразователя (БИИП); 2 – оптический кабель (ОК); 3 – блок фотоприемника (БФП); 4 – регистратор – осциллограф Tektronix TDS-3052B

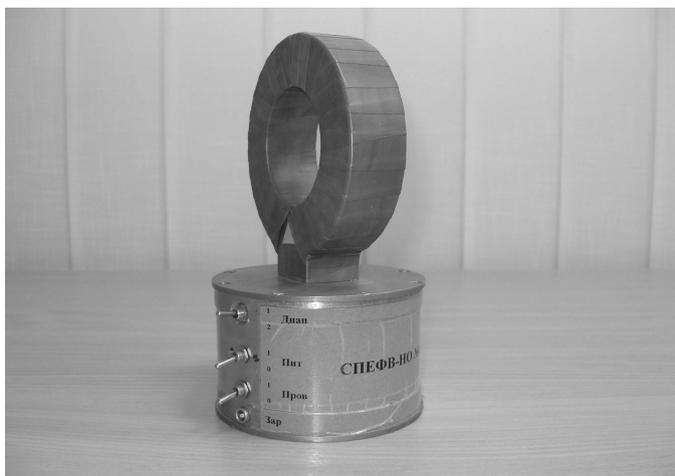


Рисунок 11 – Блок индукционного измерительного преобразователя

Напряженность измеренных полей (Е или Н) рассчитывается по формулам:

$$E = \frac{U_{\text{ЭО}}^E}{K_{\text{пр}}^E}, \quad H = \frac{U_{\text{ЭО}}^H}{K_{\text{пр}}^H},$$

где  $U_{\text{ЭО}}^E, U_{\text{ЭО}}^H$  – напряжение на выходе измерителя соответственно, электрического или магнитного, регистрируемое осциллографом;  $K_{\text{пр}}^E, K_{\text{пр}}^H$  – коэффициент преобразования соответствующего измерителя, берется из свидетельств их метрологической аттестации.

**Выводы.** Все СИ прошли метрологическую аттестацию на Государственном Эталоне электромагнитного поля Российской Федерации, находящемся во Всероссийском НИИ оптико-физических измерений Госстандарта РФ (г. Москва). Они могут использоваться на других эталонах аналогичного профиля и поэтому правомерно их использование на Эталоне РЭМП.

**Список литературы:** 1. IEC 61000-4-32 Electromagnetic compatibility. Part 4-32. Testing and measurement techniques. NEMP simulator compendium. ГОСТ 8.540-2004. 2. Межгосударственный стандарт. Государственная поверочная схема для средств измерения максимальных значений напряженностей импульсных электрических и магнитных полей. 3. Г.А.Месяц Генерирование мощных наносекундных импульсов. – Москва, Советское радио, 1974. 4. Дж.А.Стрэттон Теория электромагнетизма. – М.: ОГИЗ-ГИТТЛ, 1948. 5. Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И.С.Ковалева. – Москва, Советское радио, 1974.

*Поступила в редколлегию 17.11.2006*