

УДК 621.31.048

В.В. Князев

Національний технічний університет «ХПИ», Харків, Україна

## АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ БЮДЖЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ЭТАЛОНА РЭМП

*Рассмотрено методику метрологической аттестации вторичного эталона единиц максимального значения напряженности импульсного электрического (магнитного) поля, основанную на переносе единицы от соответствующего специального эталона Российской Федерации. Представлен анализ составляющих бюджета систематической погрешности воспроизведения размера единицы напряженности поля вторичным эталоном. Предложена методика метрологической аттестации эталона с использованием имеющихся в Украине государственных эталонов единиц физических величин. Показано пути снижения значений неопределенности воспроизведения размера единицы напряженности электрического (магнитного) поля.*

**Ключевые слова:** эталон, аттестация, неопределенность измерений.

### Введение

**Постановка проблемы.** Импульсные электромагнитные поля достаточно широко применяются во многих областях техники, а также сопровождают электрофизические явления природного и искусственного происхождения. Новые международные стандарты по электромагнитной совместимости, которые с 1996 года вступили в силу в странах ЕС (серия IEC 61000-4), регламентируют требования к техническим средствам по стойкости к действию 18 видов электромагнитных помех, среди которых 11 имеют импульсную природу. В том числе, импульсные полевые воздействия регламентируются действующими в Украине стандартами [1 – 3]. Планом национальной стандартизации Украины на 2009 год предусматривается гармонизация стандарта [4]. Сегодня трудно оценить номенклатуру технических средств, на которые эти требования будут распространены, однако с уверенностью можно утверждать, что в этот перечень войдут изделия, обеспе-

чивающие функционирование объектов повышенной экологической опасности.

Для проведения испытаний устойчивости технических средств, которые содержат в своей основе электронные, радиоэлектронные и/или электротехнические компоненты, к действию таких электромагнитных полей необходимо наличие соответствующих средств измерительной техники (СИТ). СИТ, используемые для проведения сертификационных испытаний, должны быть аттестованы в установленном порядке. Таким образом, метрологическая аттестация СИТ импульсных электрических и магнитных полей стала обязательным требованием.

Анализ данных, представленных в стандартах [1 – 4] показывает, что СИТ должны иметь скорость нарастания переходной характеристики не более 1 нс, а динамический диапазон измерения напряженности электрического поля составляет от 0,5 кВ/м до 300 кВ/м. Для метрологической аттестации таких СИТ требуется соответствующая эталонная база. Рассматриваемый Эталон в значительной

мере решает указанную выше проблему, что обуславливает актуальность настоящей статьи.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Конструктивное исполнение Эталона единиц максимальных значений напряженности импульсного электрического и магнитного полей (Эталон РЭМП) и его нормируемые метрологические выходные параметры описаны в работах [5, 6]. Методика метрологической аттестации Эталона РЭМП как вторичного, путем переноса единицы от Государственного эталона России, описана в документе [7]. Некоторые основные положения этого документа, имеющие отношение в рассматриваемой теме, представлены далее в структурном элементе «Методика проведения аттестации». Важно отметить, что разработан и введен межгосударственный стандарт ГОСТ 8.540-2006 [8], который регламентирует государственную поверочную схему для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсного электрического и магнитного полей. Фактически, существующая нормативная база и имеющееся техническое обеспечение позволяют осуществлять метрологическую аттестацию и поверку СИТ, предназначенных для измерения импульсных электрических и магнитных полей. Существенным недостатком сегодняшней ситуации, является то, что не проведено метрологическую аттестацию Эталона РЭМП как государственного, на основе переноса единиц от имеющихся государственных эталонов Украины. Предполагается, что реализация такого варианта аттестации позволит уменьшить значение погрешности (неопределенности), приписываемой воспроизводимым единицам напряженностей полей. Далее представлена концепция метрологической аттестации, основанная на использовании таких государственных Эталонов Украины:

а) Государственный эталон единицы электрического напряжения постоянного тока в диапазоне от 1 до 180 кВ [9];

б) Государственный Эталон единицы электрического сопротивления [10];

в) Государственный Эталон единицы электрической емкости и фактора потерь [11].

**Цели статьи.** Определение составляющих бюджета систематической погрешности воспроизведения размера единицы напряженности поля вторичным эталоном, которые вносят основной вклад в ее величину.

Обсуждение возможности повышения точности воспроизведения единиц напряженности импульсных электрического и магнитного полей на основе предложенной методики метрологической аттестации Эталона РЭМП.

### **Методика проведения аттестации Эталона РЭМП как вторичного**

Передача размеров единиц максимальных значений напряженностей импульсных электрического и магнитного полей от государственного эталона Рос-

сийской Федерации (ГЭРФ) Эталону РЭМП осуществляется в однократном и частотном режимах. В рамках данной статьи рассмотрен только однократный режим №1 (режим воспроизведения импульсов экспоненциальной формы), в части касающейся электрического поля. Такое ограничение не сказывается на общности выводов, которые будут сделаны.

Результатом передачи размера единицы максимальных значений напряженности импульсного электрического поля является определение коэффициента пропорциональности между амплитудой импульсов напряженности электрического поля и амплитудой импульсов на выходе измерительного преобразователя СПЕФВ-ЕК. Отметим, что при проведении метрологической аттестации исследованию подлежат также и другие метрологические характеристики, которые не рассматриваются в рамках данной статьи.

Методика переноса размера единицы электрического поля состоит из двух этапов.

**Этап 1.** На ГЭРФ установить режим воспроизведения импульсов экспоненциальной формы. В центр рабочей зоны ГЭРФ с межэлектродным размером  $d=0,48$  м поместить первичный измерительный преобразователь СПЕФВ-ЕО, который соединить при помощи оптической линии связи с блоком фотоприемника (БФП). Выход БФП при помощи 50-омного кабеля соединить со входом осциллографа типа Tektronix TDS 784D. Установить входное сопротивление осциллографа равным 50 Ом, чувствительность  $K_{отк} = 0,5$  В/дел, коэффициент развертки  $K_p = 5$  нс/дел. Сбоку от центра рабочей зоны ГЭРФ установить первичный измерительный преобразователь СПЕФВ-ЕК, который соединить при помощи кабельной линии связи с другим входом осциллографа Tektronix TDS 784D. Установить амплитуду  $E_{ГЭРФ}$  воспроизводимых в ГЭРФ импульсов напряженности электрического поля, равной 30 кВ/м. Воспроизвести десятикратно импульсы поля. Определить максимальные значения  $N_a$  импульсов на выходе СПЕФВ-ЕО и  $N_k$  импульсов на выходе СПЕФВ-ЕК. Определить для каждого  $i$ -го измерения отношение  $(N_a/N_k)_{i1}$ , где:  $i = 1, 2, 3...10$  – номер измерения.

Определяются среднее значение и СКО ( $s_{03}$ ). Доверительные границы случайной погрешности результата измерения (без учета знака) при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и  $n = 10$  найти по формуле

$$\varepsilon_{эсп} = 2,262 \times s_{03} \cdot \quad (1)$$

**Этап 2.** На Эталоне РЭМП в центр рабочей зоны ПЛ-48 установить первичный измерительный преобразователь СПЕФВ-ЕО. Сбоку от центра рабочей зоны разместить первичный измерительный преобразователь СПЕФВ-ЕК. Оба преобразователя присоединяются к осциллографу Tektronix TDS 784D аналогично тому, как это осуществлялось на этапе 1. Производя периодически импульсы поля в Эталоне и изменяя зарядное напряжение на емкост-

ном накопителе, установить такое значение  $U_p$ , при котором отношение показаний  $(N_a/N_k)_p$  на выходе СПЕФВ-ЕО соответствует значению  $(N_a/N_k)_3$  с погрешностью не более 5%.

Произвести десятикратно регистрацию максимальных значений сигнала с СПЕФВ-ЕО и напряжения на выходе измерительного преобразователя СПЕФВ-ЕК и определить для каждого  $i$ -го измерения отношение  $(N_a/N_k)_{pi}$ , где  $N_a$  – амплитуда на выходе СПЕФВ-ЕО,  $N_k$  – амплитуда импульса на выходе измерительного преобразователя СПЕФВ-ЕК,  $i = 1, 2, 3...10$  – номер измерения. Определяется среднее значение и СКО.

Вычислить амплитуду импульсов напряженности электрического поля  $E_p$ , воспроизводимых в центре рабочей зоны ПЛ-48 Эталона РЭМП в режиме 1 по формуле:

$$E_p = \dot{A}_{\text{ЭДО}} \times \left( \left( \frac{N_a}{N_k} \right)_{\dot{y}} / \left( \frac{N_a}{N_k} \right)_p \right). \quad (2)$$

Определить коэффициент пропорциональности  $K_p$  в выбранной точке рабочего диапазона 30 кВ/м между амплитудой импульсов напряженности электрического поля  $E_p$  и амплитудой импульсов  $N_k$  на выходе измерительного преобразователя СПЕФВ-ЕК для рабочей зоны ПЛ-48 в режиме 1 по формуле.

$$K_p = E_p / N_k. \quad (3)$$

Провести аналогичные измерения для других значений напряженности электрического поля и на основании сравнения результатов расчета  $K_p$  сделать вывод о его линейности.

### Оценка величины систематической погрешности

При аттестации эталона путем переноса единицы по описанной выше методике, величина неисключенной систематической погрешности (НСП) воспроизведения амплитуды импульсов напряженности электрического поля вторичным эталоном ( $Q_{02}$ ) формируется вкладом следующих составляющих:

$Q_{01}$  – НСП воспроизведения амплитуды импульсов напряженности электрического поля экспоненциальной формы ГЭРФ (1%);

$Q_{0ЕК}$  – погрешность коэффициента преобразования СПЕФВ-ЕК (3%);

$Q_{0ЕО}$  – погрешность коэффициента преобразования СПЕФВ-ЕО (3,8%);

$Q_{\text{Кпр,рм.ср}}$  – нелинейность коэффициента пропорциональности для электрического поля (0,3%);

$Q_{0ЕК}$  – погрешность осциллографа Tektronix TDS 784D при определении амплитуды импульсов напряжения на выходе СПЕФВ-ЕК (1%);

$Q_{0ЕО}$  – погрешность осциллографа Tektronix TDS 784D при определении амплитуды импульсов напряжения на выходе СПЕФВ-ЕО (1%);

$Q_{0уз}$  – погрешность установки СПЕФВ-ЕО в рабочей зоне ГЭРФ (0,4%);

$Q_{0ур}$  – погрешность установки СПЕФВ-ЕО в рабочей зоне Эталона (0,4%);

$Q_{0мз}$  – погрешность определения межэлектродного зазора в полеобразующей системе Эталона (0,8%).

В скобках после каждой составляющей указаны ее значения, полученные при аттестации Эталона РЭМП. Итоговое значение  $Q_{02}$  равно 5,2%. Значение расширенной неопределенности с учетом равномерного закона распределения при доверительной вероятности  $P = 0,95$  (коэффициент охвата  $k = 1,65$ ) равно 4,9%.

Можно предположить, что повышение точности воспроизведения единицы напряженности электрического (магнитного) поля на Эталоне РЭМП будет достигнуто за счет применения новой методики аттестации. Концепция такой методики изложена далее.

### Концепция метрологической аттестации Эталона РЭМП

Представляется практически реализуемым вариант метрологической аттестации Эталона РЭМП расчетно-экспериментальным путем, основанным на использовании имеющихся государственных эталонов Украины [9 – 11]. Анализ физических явлений, происходящих при формировании единицы максимального значения напряженности электрического (магнитного) поля, указывает на контрольные точки в схеме и физические величины, подлежащие измерению. Для этого, рассмотрим обобщенную блок-схему эталона РЭМП, представленную на рис. 1.

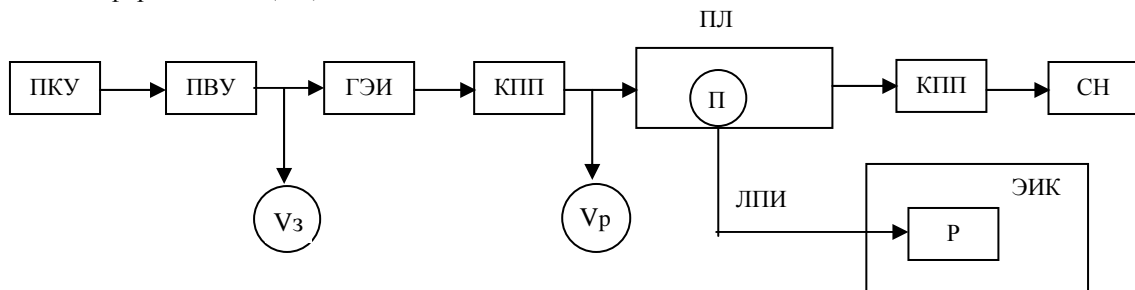


Рис. 1. Блок-схема Эталона РЭМП:

ПКУ – пульт контроля и управления; ПВУ – повысительно - выпрямительное устройство; ГЭИ – генератор экспоненциальных импульсов; КПП – коаксиально-полосковый переход; ПЛ – полосковая линия с заданным расстоянием между пластинами; СН – согласующая нагрузка; П – первичный преобразователь поля; ЛПИ – линия передачи информации (оптическая или кабельная); Р – регистратор; ЭИК – экранированная измерительная кабина;  $V_3$  – прибор для измерения высокого постоянного напряжения;  $V_p$  – схема для измерения импульсного напряжения на входе в ПЛ

Первая контрольная точка  $V_z$  дает возможность измерять высокое постоянное напряжение, до которого заряжен накопитель генератора. Для этих целей можно использовать киловольтметр электростатический, рассчитанный на соответствующее напряжение. Современные киловольтметры имеют погрешность менее 0,1%.

Вторая контрольная точка  $V_p$  предназначена для исследования величины потерь в коммутаторе и коаксиальном переходе, что позволит определить максимальное значение импульсного напряжения, поступающего на вход ПЛ. Погрешность такой оценки составляет около 0,5%. Напряженность электрического поля в рабочем объеме ПЛ определяется расчетным путем, как частное от деления напряжения на расстояние между плоскостями ПЛ. Расстояние между плоскостями измеряется по специальной методике с погрешностью не более 0,1%. Оценка степени влияния изменения согласующих элементов, величины волнового сопротивления ПЛ, емкости накопителя энергии могут быть выполнены с суммарной погрешностью не более 1%. Следовательно, реализация предложенной методики аттестации возможна, а ожидаемое значение неопределенности полученных результатов не должно превысить 2%.

### Выводы

1. Метрологическая аттестация эталона РЭМП методом переноса единицы от государственного эталона РФ приводит к возникновению величины неопределенности около 5%.

2. Возможна реализация метрологической аттестации Эталоны РЭМП по методике, основанной на использовании имеющихся в Украине государственных эталонов физических единиц. Прогнозируемая величина неопределенности в этом случае не превысит 2%.

### Список литературы

1. ДСТУ ІЕС 61000-4-9:2007 ЕМС. Частина 4-9. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до імпульсних магнітних полів (ІЕС 61000-4-9:2001, ІДТ).
2. ДСТУ ІЕС 61000-4-10:2008 ЕМС. Частина 4-9. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до загасного коливального магнітного поля (ІЕС 61000-4-10:2001, ІДТ).
3. ДСТУ 3681-98 СТЗЕ. Стійкість до дії грозових розрядів. Технічні вимоги та методи випробувань.
4. ІЕС 61000-4-25:2001 ЕМС. Part 4-25: Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems.
5. The development of the pulse electromagnetic processes measurement unity supporting system in Ukraine / Yu.S. Nemchenko, V.V. Knyazev, V.I. Kravchenko, I.P. Lisnoy // Proc. of conf. "Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals", 18-22 September, 2006. – Sevastopol, Ukraine. – P. 363-366.
6. Исходный эталон Украины импульсных электрических и магнитных полей – цель создания эталона, требования к нему и его конструктивные характеристики // Електротехніка і електромеханіка – Х.: НТУ «ХПІ» – 2006. – № 2. – С. 76-79.
7. Исходный эталон Украины единиц импульсных электрического и магнитного полей. Программа и методика метрологической аттестации. ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, 2004.
8. ГОСТ 8.540-2006 Государственная поверочная схема для средств измерений максимальных значений напряженностей импульсного электрического и магнитного полей.
9. ДСТУ 3863-99 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричної напруги постійного струму у діапазоні від 1 до 800 кВ.
10. ДСТУ 3712-98 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань електричного опору.
11. ДСТУ 4064-2001 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань ємності та фактора втрат.

Поступила в редколлегию 8.07.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ БЮДЖЕТУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЯК МЕТРОЛОГІЧНОЇ АТТЕСТАЦІЇ ЕТАЛОНУ РЭМП

В.В. Князев

Розглянуто методіку метрологічної аттестції вторинного еталону одиниць максимального значення напруженості імпульсного електричного (магнітного) поля, засновану на перенесенні одиниці від відповідного спеціального еталону Російської Федерації. Представлений аналіз складових бюджету систематичної похибки відтворення розміру одиниці напруженості поля вторинним еталоном. Запропонована методика метрологічної аттестції еталону з використанням наявних в Україні державних еталонів одиниць фізичних величин. Показано шляхи зниження значень невизначеності відтворення розміру одиниці напруженості електричного (магнітного) поля.

**Ключові слова:** еталон, аттестція, невизначеність вимірювання.

### ANALYSIS OF CONSTITUENTS OF THE UNCERTAINTY BUDGET OF THE RESULTS OF METROLOGY ATTESTATION OF STANDARD OF REMP

V.V. Kniaziev

The method of metrology attestation of the second standard of units of maximal value of strength of the pulse electric (magnetic) field is considered, based on transference of unit from proper special standard of Russian Federation. Presented analysis of constituents of budget of systematic error of recreation of size of unit of the field strength by the second standard. The method of metrology attestation of standard with the use of present in Ukraine state standards of the physical sizes unit are presented. The ways of decline of uncertainty values of recreation of size of unit of strength of the electric (magnetic) field are shown.

**Keywords:** Standard, attestation, uncertainty of the measurement.