

**Государственный первичный специальный эталон единиц
напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с
длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс
ГЭТ 178–2016**

К. Ю. САХАРОВ, О. В. МИХЕЕВ, В. А. ТУРКИН, А. В. СУХОВ, А. И. АЛЕШКО

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,

Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Представлен Государственный первичный специальный эталон единиц напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс ГЭТ 178–2016. Уменьшена длительность фронта воспроизводимых импульсов напряжённости электрического и магнитного полей до 10 пс. Рассмотрены вопросы оптимизации параметров узла ввода сигнала в полеобразующую систему. Исследованы метрологические характеристики ГЭТ 178–2016, оценена неопределённость воспроизведения единиц.

Ключевые слова: эталон, импульсное электрическое поле, неопределённость, конус над плоскостью.

The results of National primary standard GET 178-2016 upgrade concerning the decreasing of reproduced electric and magnetic field intensities pulse rise time up to 10 ps are presented. Feeding assembly at field-forming system optimization is considered. Standard metrological characteristics are investigated. The units realisation uncertainty is evaluated.

Key words: standard, pulse electric field, uncertainty, cone over the ground.

Государственный первичный специальный эталон единиц напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с

длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс ГЭТ 178–2016 предназначен для обеспечения единства измерений параметров сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта в десятки и сотни пикосекунд. Такая потребность существует в областях сверхширокополосной радиолокации и связи, в промышленности при производстве радиопоглощающих материалов и покрытий, при исследованиях электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры. Особая группа задач, метрологическое обеспечение которых требует применения эталона, обусловлена потребностями защиты радиоэлектронных систем и объектов от преднамеренного (с террористическими целями) воздействия на них импульсных электромагнитных излучений.

Государственный первичный специальный эталон единиц напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов до 20 пс ГЭТ 178–2010 разработан ВНИИОФИ [1]. ГЭТ 178–2010 представляет собой полеобразующую систему типа «конус над плоскостью», возбуждаемую генератором пикосекундных импульсов напряжения. Для передачи единиц вторичным эталонам используется компаратор в виде измерительного преобразователя на основе полосковой линии ИППЛ-Л [2]. Регистрация сигнала с выхода преобразователя осуществляется с помощью стробоскопического осциллографа Tektronix CSA8000B с полосой пропускания 50 ГГц.

Ступенчатый сигнал, воспроизводимый в полеобразующей системе, позволяет при калибровке измерительного преобразователя одновременно определить и коэффициент преобразования, и время нарастания переходной характеристики. До проведения работ по совершенствованию длительность фронта воспроизводимых импульсов составляла не более 20 пс при амплитуде электрического поля не более

30 В/м, а магнитного поля – не более $7,9 \cdot 10^{-2}$ А/м. Расширенная неопределённость воспроизведения единиц не превышала 2,4 % ($k=1,71$, $P=0,99$) в установившемся режиме.

В 2014–2016 гг. ГЭТ 178–2010 был усовершенствован и утверждён как Государственный первичный специальный эталон единиц напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс ГЭТ 178–2016. Цель совершенствования – уменьшение длительности τ_f фронта воспроизводимых импульсов до 10 пс. Это позволяет метрологически обеспечить современные быстродействующие средства измерений (СИ) параметров импульсных электромагнитных полей (в том числе электрооптические) [2]. Такие СИ используются при исследованиях новых материалов, сверхвысокочастотных антенных систем, при решении задач радиолокации высокого разрешения, а также в системах сверхширокополосной радиосвязи.

Принципы совершенствования эталона. В рамках совершенствования были сохранены принципы воспроизведения единиц. В работах [3, 4] показано, что антенна «конус над плоскостью» по совокупности достоинств (предельная широкополосность, лучший способ подключения фидера, большие размеры рабочей зоны и др.) является оптимальным вариантом полеобразующей системы эталона. Длительность τ_f фронта воспроизводимых в системе импульсов определяется: длительностью фронта импульсов возбуждающего генератора τ_r ; параметрами затухания импульсного сигнала в фидере; параметрами узла ввода – места подключения фидера к полеобразующей системе. Оптимизация всех указанных параметров позволяет достичь длительности τ_f не более 10 пс.

Специально для ГЭТ 178–2016 ООО «НПП «Трим СШП Измерительные Системы» разработало генератор TMG007028 с

рекордной длительностью фронта импульсов 5 пс. Кроме того, уникальность генератора заключается в том, что амплитуда выходных импульсов составляет более 20 В. Разработанные за рубежом генераторы со сравнимой длительностью фронта импульсов (применяются для калибровки осциллографов) являются исключительно низковольтными – амплитуда импульсов не превышает 1 В.

На рис. 1 показана геометрия узла ввода полеобразующей системы ГЭТ 178–2016. Чем меньше диаметр b фидера, тем меньше искажение фронта вследствие сдвига фаз импульсов тока, распространяющихся по потенциальному и заземлённому электродам антенны. С другой стороны, с уменьшением диаметра фидера увеличивается затухание сигнала в нём, что приводит к затягиванию фронта при распространении сигнала от возбуждающего генератора. Расчёт оптимального диаметра фидера и, соответственно, параметров узла ввода приведён в работе [5]. При этом использован модернизированный метод заданных токов, разработанный С. А. Подосёновым. Метод расчёта учитывает влияние изломов коаксиальных электродов в местах примыкания к электродам полеобразующей системы, что становится существенным при распространении импульсов длительностью единицы пикосекунд.

На рис. 2 представлена зависимость длительности фронта τ_f воспроизводимых импульсов электрического поля от диаметра подводящего фидера b при различных длительностях фронта импульсов возбуждающего генератора τ_r . При $\tau_r < 6,5$ пс и $b = 1,5 \dots 2,0$ мм (по изолятору) длительность τ_f не превысит 10 пс. Исходя из изложенного выше, в качестве фидера был выбран полужесткий коаксиальный кабель РК-50-1,5-22С длиной 30 см. В соответствии с новыми геометрическими параметрами фидера был изготовлен и смонтирован узел ввода – начальная часть конического электрода и центральная часть заземлённого электрода.

Для передачи единиц последующим звеньям поверочной схемы был разработан быстродействующий измерительный преобразователь на основе полосковой линии ИППЛ-Л. Чувствительный элемент преобразователя – микрополосковая линия – состоит из двух участков: начального воздушного и последующего, выполненного из стеклотекстолита. За счёт оптимизации геометрических параметров участков получено, что время нарастания переходной характеристики такого преобразователя не превышает 10 пс.

Структурная схема ГЭТ 178–2016 показана на рис. 3. В составе ГЭТ 178–2016 сохранены генераторы пикосекундных импульсов TMG1010 и TMG4025S, а также генератор Г5-84, используемый в качестве опоры при контроле уровня сигнала в полеобразующей системе (подробнее см. [1]). Для измерения параметров импульсов напряжения в конической полеобразующей системе используется комплект ответвителей (полосковый и согласованный тройник). В состав эталона также входят стробоскопический регистратор Tektronix CSA8000B (полоса пропускания 50 ГГц) и осциллограф Tektronix DPO71604C (полоса пропускания 16 ГГц).

Метрологические характеристики эталона. В табл. 1 приведены результаты исследований метрологических характеристик эталона.

На рис. 4 показаны (выбраны соответствующие вертикальные развертки) осциллограммы импульсов на выходе генератора TMG007028 и компаратора ИППЛ-Л. По результатам обработки осциллограмм получено, что минимальное значение длительности фронта воспроизводимых в ГЭТ 178–2018 импульсов напряжённостей электрического и магнитного полей между уровнями 0,1–0,9 от амплитуды составляет:

$$\tau_{\phi} = \sqrt{\tau_{\text{изм}}^2 - \tau_{\text{осц}}^2 - \tau_{\text{ИППЛ-Л}}^2} = \sqrt{12,5^2 - 7^2 - 5^2} = 9,1,$$

где $\tau_{\text{изм}}$ – измеренная длительность фронта импульсов; $\tau_{\text{осц}}$ – время

нарастания переходной характеристики осциллографа Tektronix CSA8000B; $\tau_{\text{ИПП-Л}}$ – время нарастания переходной характеристики компаратора ИППЛ-Л. Другие метрологические характеристики (см. табл. 1) после совершенствования эталона не изменились.

Оценка неопределённости воспроизведения единиц. Значения амплитуд воспроизводимых импульсов напряжённости электрического E и магнитного H полей в эталоне определяют по следующим формулам:

$$E = 60U_r / (Zr \sin \theta); H = E / (120\pi),$$

где U_r – напряжение импульса генератора в установившемся режиме; Z – волновое сопротивление конической полеобразующей системы; r – длина радиус-вектора от вершины конуса до точки воспроизведения единиц; θ – угол между осью конуса и направлением радиус-вектора из вершины конуса в точку воспроизведения единиц.

В относительных единицах суммарная стандартная неопределённость воспроизведения единиц выражается формулой

$$u_c = \sqrt{u^2(U_r) + u^2(Z) + u^2(r\theta)} \quad (1)$$

где $u(U_r)$ – стандартная неопределённость измерений амплитуды импульса возбуждающего генератора; $u(Z)$ – стандартная неопределённость входного сопротивления полеобразующей системы; $u(r\theta)$ – стандартная неопределённость положения точки воспроизведения единиц в пространстве.

Бюджет неопределённости воспроизведения единиц приведён в табл. 2, где T_1 – интервал времени от начала импульса перепада до 150 пс; T_2 – интервал времени от 150 пс до 1 нс.

Амплитуда импульса возбуждающего генератора U_r должна измеряться при его работе на реальную нагрузку, т. е. полеобразующую систему «конус над плоскостью» [6]. Эти измерения проводили косвенным способом с помощью вспомогательного генератора Г5-84 и ответвителя импульсов на входе полеобразующей системы. Амплитуду

импульса возбуждающего генератора U_{Γ} определяли по формуле

$$U_{\Gamma} = U_{\text{TMG}} U_{\Gamma 5-84} / U_{\text{отв}},$$

где U_{TMG} – амплитуда импульса на выходе ответвителя при возбуждении полеобразующей системы с помощью генератора TMG007028; $U_{\Gamma 5-84}$ – амплитуда импульса на выходе генератора Г5-84; $U_{\text{отв}}$ – амплитуда импульса на выходе ответвителя при возбуждении полеобразующей системы с помощью генератора Г5-84.

Тогда стандартная неопределённость измерений амплитуды импульса возбуждающего генератора определяется следующим выражением (в относительных единицах):

$$u(U_{\Gamma}) = \sqrt{u^2(U_{\text{TMG}}) + u^2(U_{\Gamma 5-84}) + u^2(U_{\text{отв}})},$$

где $u(U_{\text{TMG}})$, $u(U_{\Gamma 5-84})$, $u(U_{\text{отв}})$ – стандартные неопределённости измерений соответствующих амплитуд импульсов. Каждая из них, в свою очередь, определяется следующими стандартными неопределённостями (см. табл. 2): измерений амплитуды импульса, оцениваемой по типу А; измерений амплитуды импульса, обусловленной неоднородностью вершины импульса; измерений амплитуды импульса осциллографическим регистратором.

Входное сопротивление антенны конус над проводящей плоскостью является чисто активным [7] и складывается из сопротивления излучения и сопротивления омических потерь: $Z = R_{\text{изл}} + R_{\text{п}}$. В ГЭТ 178–2016 антенна типа «конус над плоскостью» имеет чисто активное сопротивление излучения $R_{\text{изл}} = 50$ Ом. Исходя из геометрии антенны и параметров материалов электродов, получено, что сопротивление потерь составляет $R_{\text{п}} = 21$ мОм. Так как сопротивление потерь значительно меньше сопротивления излучения при дальнейших расчётах им можно пренебречь. Таким образом, стандартная неопределённость входного сопротивления полеобразующей системы обуславливается только отклонением геометрических параметров

конической линии от расчётных. Оценка этого отклонения проведена в работе [9].

Оценка стандартной неопределённостей положения точки воспроизведения единиц определяется параметрами соответствующих измерительных приборов и составляет:

$$u(r\theta) = \sqrt{u^2(r) + u^2(\sin\theta)},$$

где $u(r)$ – стандартная неопределённость измерений длины радиус-вектора в точку воспроизведения единиц; $u(\sin\theta)$ – стандартная неопределённость определения синуса угла между радиус-вектором и осью конуса.

Суммарная стандартная неопределённость воспроизведения единиц, вычисленная по формуле (1), составляет в течение 150 пс от начала перепада $u_c=2,4\%$ и в установившемся режиме $u_c=1,2\%$. В предположении о нормальности закона распределения результатов измерений для уровня доверия $P=0,99$ расширенная неопределённость воспроизведения единиц составит $U(0,99)=7,2\%$ в течение 150 пс от начала перепада и $U(0,99)=3,6\%$ в установившемся режиме.

В 2017 г. ВНИИОФИ начал проведение сличений ГЭТ 178–2016 с аналогичными эталонами в Республике Корея и КНР (тема КООМЕТ 682/RU/16). Для установления эквивалентности национальных эталонов изготовлен эталон сравнения на основе полоскового измерительного преобразователя ИППЛ-Л повышенной чувствительности [10]. На основе анализа параметров воспроизводимых импульсов в эталонах участников сличений планируется проведение измерений при воспроизведении импульсного электрического поля напряжённостью 1–6 В/м с длительностью фронта не менее 35 пс.

Заключение. ГЭТ 178–2016 обеспечивает воспроизведение единиц напряжённости импульсных электрического и магнитного полей с минимальной длительностью фронта 10 пс. Расширенная

неопределённость воспроизведения единиц ($k=3$, $P=0,99$) составляет 3,6 % в установившемся режиме.

В перспективе проведение сличений ГЭТ 178–2016 с национальными эталонами Республики Корея и КНР, а также оснащение организаций вторичными эталонами.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП высокоточных измерительных технологий в области фотоники, созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» и поддержанного Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения №14.595.21.0003 от 28.08.2017 г. (уникальный идентификатор RFMEFI59517X0003).

Литература

1. Тихомиров С. В., Сахаров К. Ю., Михеев О. В., Туркин В. А., Сухов А. В., Алешко А. И. Эталонный комплекс сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта 20 пс // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 57–59.
2. Gaborit G., Jarrige P., Gaeremynck Y., Warzecha A., Bernier M., Lasserre J.-L., Duvillaret L. Pockels' Effect Based Probe for UWB and NPEM Measurements // Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics. 2014. No. 10. P. 411–423.
3. IEEE Std. 1309-2013. Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes Excluding Antennas from 9 kHz to 40 GHz // IEEE Standards Association. 2011.
4. Johnk R., Ondrejka A. Time-Domain Calibrations of D-Dot Sensors // NIST Technical Notes. 1998. No. 1392. P. 1–40.
5. Сахаров К. Ю., Подосенов С. А., Туркин В. А., Михеев О. В., Менькова Е. Р., Сухов А. В., Алешко А. И. Использование метода заданных токов для расчёта во временной области параметров импульсных электромагнитных полей с длительностью фронта до 10 пс

// Измерительная техника. 2015. № 11. С. 55–58.

6. **Youjie Y., Tingyong J., Xiaolong L.** Traceability and uncertainty of ultra-wide band short pulse electric-field standard device // High Power Laser and Particle Beams. 2014. V. 26. No. 6. P. 1–5

7. **Рамзей В.** Частотно-независимые антенны. М.: Мир, 1968.

Дата принятия: 22.03.2018.

Подрисуночные подписи

Рис. 1. Геометрия узла ввода полеобразующей системы:

φ – половина плоского угла у вершины конуса; h – высота, на которую выступает центральный электрод над поверхностью заземлённого электрода; a – диаметр центрального электрода; b – диаметр фидера (по изолятору)

Рис. 2. Зависимость длительности фронта τ_f воспроизводимых импульсов электрического поля от диаметра фидера b при различных длительностях фронта τ_r импульсов возбуждающего генератора

Рис. 3. Структурная схема ГЭТ 178–2016

Рис. 4. Осциллограммы импульсов на выходе возбуждающего генератора TMG007028 и компаратора ИППЛ-Л

Таблица 1

Метрологические характеристики эталона ГЭТ 178-2016

Параметр	Значение
Диапазоны значений напряжённостей импульсных полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне от 10 до 100 пс: электрическое поле, В/м магнитное поле, А/м	0,1–30 $2,6 \cdot 10^{-4}$ – $7,9 \cdot 10^{-2}$
Длительность фронта воспроизводимых импульсов напряжённостей электрического и магнитного полей между уровнями 0,1 и 0,9 от установившегося значения, пс	10–100
Максимальная длительность воспроизводимых импульсов напряжённостей электрического и магнитного полей на уровне 0,5 от установившегося значения, нс	1
Частота следования воспроизводимых импульсов (однократный режим), Гц	$1-1 \cdot 10^4$

Таблица 2

Бюджет неопределённости воспроизведения единиц в ГЭТ 178–2016

Источник стандартной неопределённости	Тип	Значение, %	
		T_1	T_2
Повторные измерения ($n=50$)	A	0,1	0,1
Амплитуда импульса на выходе генератора Г5-84 $u(U_{Г5-84})$: измеренная осциллографическим регистратором обусловленная неоднородностью вершины импульса	B	0,5	0,5
	B	0,3	0,3
Амплитуда импульса на выходе ответвителя при возбуждении полеобразующей системы генератором Г5-84 $u(U_{отв})$: измеренная осциллографическим регистратором обусловленная неоднородностью вершины импульса	B	0,5	0,5
	B	0,3	0,3
Амплитуда импульса на выходе ответвителя при возбуждении полеобразующей системы генератором ТМГ $u(U_{ТМГ})$: измеренная осциллографическим регистратором обусловленная неоднородностью вершины	B	0,5	0,5
	B	2,0	0,3
Входное сопротивление полеобразующей системы $u(Z)$	B	0,6	0,6
Положение точки воспроизведения единиц в пространстве $u(r\theta)$	B	0,2	0,2