

Метрологическое обеспечение средств измерений параметров импульсных электрического и магнитного полей естественного и искусственного происхождения

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

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений,
Москва, Россия, e-mail: sukhov@vniiofi.ru

Рассмотрены вопросы совершенствования Государственного первичного специального эталона единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне 0,1—10,0 нс ГЭТ 148—2013, а также вторичных эталонов с целью метрологического обеспечения средств измерений параметров импульсных электрического и магнитного полей естественного и искусственного происхождения в диапазоне до 1 МВ/м при длительности фронта импульсов не более 100 пс.

Ключевые слова: эталон, электромагнитный импульс, субнаносекундный диапазон, ТЕМ-ячейка.

The problems of National primary special standard GET 148—2013 and of secondary standards improvement is considered. The goal of improvement is the metrological assurance of measuring instruments for pulse electric and magnetic fields of natural and artificial origin over the range up to 1 MV/m with the pulse leading edge duration no more than 100 ps.

Key words: standard, electromagnetic pulse, subnanosecond range, TEM-cell.

Первоначально тематика электромагнитных измерений во ВНИИОФИ была связана с наблюдением за ядерными взрывами и их идентификацией по сопровождающему их электромагнитному импульсу (ЭМИ) [1]. Запрещение испытаний ядерного оружия в трех средах определило необходимость создания имитаторов воздействующих факторов ядерного взрыва, в частности электромагнитного импульса [2]. Для калибровки спутниковой аппаратуры обнаружения ядерных взрывов в 1978 г. создан первый в России имитатор ЭМИ ядерного взрыва с импульсной мощностью 10 ГВт. Решение данной задачи привело к развитию методов расчета антенн для излучения ЭМИ, разработке средств измерений (СИ) импульсных полей и обусловило необходимость создания эталонных установок для калибровки (поверки) таких СИ [3]. Кроме ЭМИ ядерного взрыва, существуют другие виды электромагнитных импульсных воздействий естественного и искусственного происхождения, которые приводят к нарушению работы радиоэлектронной аппаратуры и могут влиять на здоровье человека. Источниками мощных импульсных электромагнитных помех служат коммутационные перенапряжения в высоковольтных линиях электропередачи, контактной сети железных дорог, излучение мощных радиолокационных и радиопередающих станций, электростатические разряды, поля молнии и др. Подобные воздействия могут создаваться преднамеренно с целью нарушения работы инфраструктуры. К импульсным электромагнитным воздействиям искусственного происхождения еще относятся сверхкороткие (СК) электромагнитные импульсы длительностью десятки пикосекунд [4].

Современные технические средства испытывают на устойчивость к воздействию мощных импульсных помех. Для

этой цели во ВНИИОФИ разработан ряд СИ амплитудно-временных параметров импульсов напряженности электрического поля с длительностью фронта как в наносекундном, так и субнаносекундном диапазонах, включая СК ЭМИ. Основой СИ служит измерительный преобразователь на базе полосковой линии. Главное его достоинство — ступенчатая переходная характеристика, т. е. выходной сигнал преобразователя повторяет форму сигнала электрического поля в течение «временного окна», длительность которого равна времени двойного пробега электромагнитной волны вдоль полосковой линии. Быстродействие полоскового преобразователя определяется согласованием волнового тракта полосковой линии и выходного коаксиального кабеля [5].

Быстродействие и чувствительность СИ регламентируются нормативными требованиями к уровням воздействий при испытаниях различной техники. Современные стандарты задают напряженность импульсного электрического поля до 500 кВ/м при длительности фронта импульсов $\tau_{\text{фр}} \leq 100$ пс [6]. Для калибровки (поверки) СИ импульсных полей с такими параметрами необходимы соответствующие эталонные установки [7].

Государственный первичный специальный эталон единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне 0,1—10,0 нс (ГЭТ 148—2013), первоначально созданный в 1985 г., был усовершенствован в 1993 и 2013 гг. [8, 9]. Он используется для метрологического обеспечения измерений параметров ЭМИ большой мощности при проведении испытаний технических средств на устойчивость к воздействию электромагнитных факторов как искусственного, так и естественного происхождения.

Для воспроизведения мощных однократных эталонных импульсов экспоненциальной формы применяется ТЕМ-ячейка наносекундного диапазона (ПС-1), возбуждаемая генератором с ёмкостным накопителем и искровым газонаполненным разрядником. Данная полеобразующая система (ПС) представляет отрезок линии передачи типа прямоугольного коаксиала с согласованной распределённой нагрузкой на конце. В межэлектродный зазор ПС помещается калибруемое или поверяемое СИ. Амплитуда эталонных экспоненциальных ЭМИ в ПС-1 может составлять до 200 кВ/м (530 А/м) при $\tau_{\text{фр}} \leq 8$ нс. Также ПС-1 может возбуждать генератор повторяющихся ступенчатых импульсов с накопителем на длинных линиях, такие ЭМИ имеют $\tau_{\text{фр}} \leq 1$ нс.

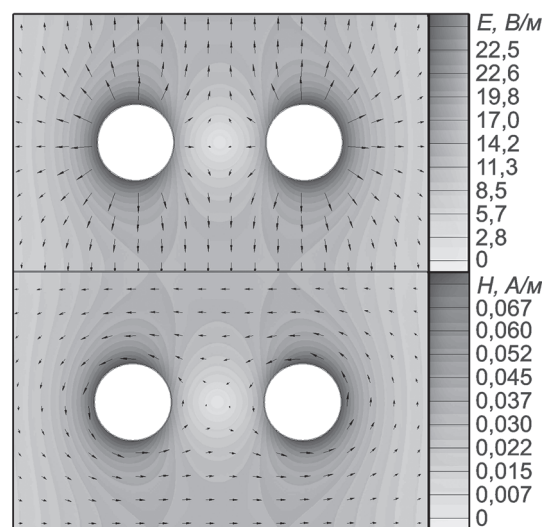
В 2013 г. при совершенствовании эталона в его состав включена высоковольтная ПС для воспроизведения мощных субнаносекундных ступенчатых ЭМИ. В сечении ПС представляет синфазно возбуждаемую двухпроводную линию в экране. По расчетам волновое сопротивление линии составляет 50 Ом, а при амплитуде импульсов возбуждающего генератора 25 кВ напряжённость электрического поля E составляет не менее 300 кВ/м. Моделирование с помощью программы ELCUT в электростатической и магнитостатической постановках дает картины распределения поля в сечении, показанные на рисунке (разность потенциалов на электродах 1 В). Соотношение между напряжённостями E и H полей равно 120π (волновое сопротивление вакуума), т. е. в ячейке распространяется ТЕМ-волна. Эффективный зазор рабочей зоны 74 мм.

На входе ячейки установлен высоковольтный коаксиальный разъём (рабочее напряжение до 40 кВ), который соединяется коническим коаксиально-полосковым переходом с рабочим участком, на выходе которого подключена резистивная нагрузка. Возбуждение полеобразующей системы осуществляется с помощью полупроводникового генератора ступенчатых импульсов напряжения производства фирмы «ФИД-Технологии» (С.-Петербург, Россия). Генератор воспроизводит импульсы напряжения амплитудой 25 кВ с частотой следования до 100 Гц. Длительность фронта воспроизводимых импульсов составляет 86 пс при длительности импульсов $\tau_{\text{и}} \approx 30$ нс.

Экспериментальные исследования полеобразующей системы показывают, что время нарастания ее переходной характеристики не превышает 33 пс. С учетом $\tau_{\text{фр}}$ импульса возбуждающего генератора воспроизводимые импульсы поля имеют $\tau_{\text{фр}} \approx 92$ пс. Длительность импульсов по уровню 0,5 амплитуды составила 30 нс. Максимальная напряжённость электрического поля 338,4 кВ/м и магнитного соответственно 898 А/м.

Стандартные неопределённости не превышают 0,1 % по типу А и 3,4 % по типу В. Последние включают неопределённости измерения напряжения на выходе компаратора, в частности, связанные с неравномерностью вершины импульса, волнового сопротивления линии, сопротивления нагрузки. Расширенная неопределённость воспроизведения единиц U_p при $P=0,99$ и $k=1,71$ составляет 5,7 %.

Основные метрологические характеристики эталона ГЭТ 148—2013 приведе-



Моделирование распределения электрического E и магнитного H полей в сечении высоковольтной субнаносекундной полеобразующей системы

ны в таблице. Полуужирным шрифтом отмечен новый режим воспроизведения единиц.

Передача единиц рабочим эталонам и СИ от первичного эталона осуществляется при помощи вторичных эталонов (ВЭ). Во ВНИИОФИ разработан ряд ВЭ единиц импульсных электрического и магнитного полей. К ним относятся ВЭТ 148-5—2013 на основе плоского конденсатора и колец Максвелла, диапазон воспроизведения единиц до 500 кВ/м (1300 А/м), импульс имеет $\tau_{\text{фр}} \leq 4$ мкс, а также ВЭ на основе ТЕМ-ячейки, в котором единицы воспроизводятся в диапазоне до 200 кВ/м (530 А/м), импульсы имеют $\tau_{\text{фр}} \leq 100$ пс. Также разработан ряд эталонов-приемников — измерительных преобразователей на основе полосковой линии. Данные ВЭ позволяют метрологически обеспечить СИ в диапазоне до 1 МВ/м (2600 А/м), импульсы с $\tau_{\text{фр}} \leq 20$ пс.

В настоящее время продолжают работы по совершенствованию ГЭТ 148—2013 с целью расширения амплитудно-временного диапазона воспроизведения единиц.

Форма импульса	E , В/м	H , А/м	$\tau_{\text{и}}$, с	U_p , % (E -поле)	U_p , % (H -поле)
Экспоненциальная	10^4 — $2 \cdot 10^5$	26—530	$8 \cdot 10^{-9}$	0,9	1,5
Ступенчатая	10^3 — 10^5	2,6—260	$1 \cdot 10^{-9}$	4,2	4,4
	$3 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^5$	80—800	$1 \cdot 10^{-9}$	5,4	5,4
	$3,5 \cdot 10^4$ — 10^5	80—260	$5 \cdot 10^{-10}$	5,6	5,7
	10^5—$3 \cdot 10^5$	260—800	$1 \cdot 10^{-10}$	5,7	5,7
	3—40	0,008—0,1	$5 \cdot 10^{-10}$ — $1 \cdot 10^{-8}$	2,1	2,4
	10—130	0,026—0,35	$1 \cdot 10^{-10}$ — $1 \cdot 10^{-8}$	2,1	2,1

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России (соглашение № 14.624.21.0003 от 11.08.2014 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMTF162414X0003).

Литература

1. Рикетс Л. У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979.
2. Giles J. C., Prather W. D. Worldwide High-Altitude Nuclear Electromagnetic Pulse Simulators // IEEE Trans. Electromag. Compatibility. 2013. V. 55. N. 3. P. 475—483.
3. Соколов А. А. О метрологическом обеспечении измерений напряженности импульсных электрических и магнитных полей // Вопросы излучения и измерения нестационарных электромагнитных полей: сб. статей. М.: Изд-во ВНИИОФИ, 1980. С. 31—47.
4. Сахаров К. Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: Изд-во МИЭМ, 2006.
5. Лебедев Е. Ф., Мелешко Е. А., Протасов Ю. С., Сахаров К. Ю. Импульсная электроника. Ч. 1. М.: Янус-К, 2011.

6. Балюк Н. В., Кечиев Л. Н., Степанов П. В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007.

7. Бзыта В. И., Варюхин Е. Г., Виноградов К. А., Дубровин Е. А., Крохалев Д. И., Сидорюк П. А. Метрологическое обеспечение испытаний вооружения и военной техники на действие электромагнитных факторов природного и техногенного происхождения // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 1. С. 67—72.

8. Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Dobrotvorskyy M. I., Sukhov A. V. The Upgrade of Subnanosecond TEM-cell of Russian National Standard Facility of Units of Pulsed Electric and Magnetic Field Strengths // Proc. 7th Int. Conf. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. Kharkiv (Ukraine), 2014. P. 89—90.

9. Sokolov A. A., Sakharov K. Yu. Test and Standard Sources of Electromagnetic Pulses // Proc. 3^d Int. Conf. Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. Sevastopol (Ukraine), 2006. P. 60—65.

Дата принятия 03.09.2015 г.

621.317.312

Влияние внутренних шумов на погрешность электронного трансформатора тока

Г. И. ВОЛОВИЧ

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия,
e-mail: g_volovich@mail.ru

Приведены результаты исследования влияния шума, создаваемого электрическими цепями цифрового электронного измерительного трансформатора тока, на точность измерений. Показано, что на систематическую составляющую погрешности влияют параметры аналогового антизализингового фильтра, а на случайную — параметры цифрового усредняющего фильтра.

Ключевые слова: электронные трансформаторы тока, влияние помех.

The effect of noise, generated by electric circuits of a digital electronic current transformer, on measurement accuracy is described. It is shown that the system component of the error is affected by the parameters of the analog antialiasing filter of the device, while the random component of the error is affected by the parameters of the digital averaging filter.

Key words: electronic current transformer, interference effect.

Электронные высоковольтные измерительные трансформаторы тока (ИТТ) отличаются от традиционных электромагнитных трансформаторов тока меньшими массой, габаритными размерами, стоимостью (особенно ИТТ класса 220 кВ и более), отсутствием трансформаторного масла и элегаза [1]. Электронный трансформатор тока состоит из двух частей: высоковольтной (ВЧ) с потенциалом, близким к потенциалу линии электрической передачи, и низковольтной (НЧ) с потенциалом, близким к потенциалу земли. Обе части разделены высоковольтной изолирующей опорой. Первичный детектор тока ВЧ, в качестве которого можно использовать трансформатор тока, пояс Роговского или устройство на основе датчика Холла, преобразует измеряемый ток в электрический сигнал тока или напряжения. Первичный кон-

вертор ВЧ преобразует эти сигналы в импульсы с широтной, частотной или кодовой модуляцией. Чаще всего используется аналого-цифровое преобразование. Система передачи, как правило, оптоволоконная, превращает эти импульсы в оптические сигналы, поступающие во вторичный конвертор НЧ, который снова переводит их в аналоговые или цифровые электрические сигналы в нужном формате и передает конечному приемнику.

При проектировании электронных ИТТ важно обеспечить необходимую точность измерений, обусловленную погрешностью первичного преобразователя тока, нелинейностью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), влиянием внешних магнитных полей, помехами (шумом), порождаемыми аналоговыми измерительными цепями.