

8. Филатов В. В., Кузовкин В. А., Порватов А. Н. Система стабилизации активной мощности асинхронного электропривода технологического оборудования // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 3(27). С. 74—78.

9. Филатов В. В., Порватов А. Н., Камнев В. А. Использование асинхронного электродвигателя в качестве датчика механической нагрузки // Станочный парк. 2012. № 10(98). С. 32—33.

10. Козочкин М. П., Маслов А. Р., Порватов А. Н. Управление процессом резания посредством интеграции подсистемы диагностирования в систему ЧПУ металлообрабатывающего станка // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 110—111.

11. Порватов А. Н. Подход к разработке информационной системы диагностирования станочного оборудования с использованием имитационного моделирования // Метрология. 2011. № 5. С. 22—28; Porvatov A. N. An approach to the development of an information system for diagnostics of lathe equipment with the use of simulation modeling // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N. 6. P. 650—654.

12. Маркин Н. С. Основы теории обработки результатов измерений: Учеб. пособие для средних специальных учебных заведений. М.: Изд-во стандартов, 1991.

13. Ратхор Т. С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника. М.: Техносфера, 2004.

Дата принятия 19.11.2013 г.

## РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.32

# Измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля пикосекундной длительности

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

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

Разработан измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля пикосекундной длительности на основе полосковой линии. Преобразователь можно применять в задачах сверхкороткоимпульсного зондирования радиопоглощающих материалов для определения их характеристик в диапазоне частот до 30—40 ГГц.

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, электрическое поле, зондирование, радиопоглощающий материал.

*The measuring transducer of picosecond duration pulsed electric field intensity has been developed. It can be used to determine the characteristics of radio absorbent materials in bandwidth up to 30—40 GHz by methods of ultra-short pulse probing.*

**Key words:** measuring transducer, electric field, probing, radio absorbent material.

Технологии, в которых используют сверхкороткие электромагнитные импульсы (ЭМИ) длительностью менее 1 нс, с каждым годом все шире применяют в радиосвязи, радиолокации высокого разрешения, геологии при разведке недр, промышленности, здравоохранении, на транспорте [1]. Одно из применений сверхкоротких ЭМИ — сверхкороткоимпульсное зондирование (СКЗ) объектов, в основе которого лежит анализ реакции исследуемого объекта на измерительный импульс [2]. Главное достоинство данного метода в том, что за одно измерение возможно получить результат, соответствующий реакции объекта в широком диапазоне частот, верхняя из которых  $t_b \approx 0,35/t_{\phi}$ , где  $t_{\phi}$  — длительность фронта зондирующего импульса [3].

В [4] описан вариант реализации метода СКЗ при исследовании экранирующих и поглощающих характеристик радиопоглощающих материалов (РПМ). В этом случае существенно сокращается время измерений и снижается их стоимость: нет необходимости в большом количестве перестраиваемых узкополосных генераторов и антенн, а использование временной селекции сигналов позволяет отказаться от применения безэховых камер при измерениях. Зондирование

различных образцов РПМ, проводимое сверхкороткими ЭМИ с  $t_{\phi} \approx 150$  пс, т. е. в полосе частот до 2,5 ГГц, рассмотрено также в [4].

Основная тенденция развития современной радиолокационной техники — переход к миллиметровому диапазону длин волн. Создающиеся в настоящее время радиолокационные станции работают на частотах до 30—40 ГГц [5], что обуславливает рабочий диапазон частот современных РПМ от единиц МГц до десятков ГГц. Для охвата этого диапазона необходима разработка систем СКЗ с шириной спектра измерительного импульса до 30—40 ГГц и  $t_{\phi} \leq 10$  пс.

Системы СКЗ состоят из излучателя сверхкоротких ЭМИ и средств измерений (СИ) параметров импульсов. Излучатель можно реализовать на основе широкополосной антенны, возбуждаемой генератором импульсов напряжения с  $t_{\phi} = 5—10$  пс (НПП «Трим», Россия или Picosecond Pulse Labs., США) [6—8]. Первоочередная задача создания системы СКЗ — разработка СИ с быстродействием, позволяющим определять параметры излученного и рассеянных от исследуемых объектов сигналов сверхкоротких ЭМИ.

Средства измерений параметров сверхкоротких ЭМИ должны иметь переходную характеристику, близкую ступенчатой во временном интервале, превышающем длительность измеряемых импульсов поля. Время нарастания переходной характеристики таких СИ должно быть меньше длительности фронта измеряемого импульса. При верхней границе исследуемого диапазона 30—40 ГГц  $t_{\phi} \approx 10$  пс, т. е. время нарастания переходной характеристики СИ должно составлять единицы пикосекунд.

Основным СИ параметров сверхкоротких ЭМИ в России является измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля на основе полосковой линии ИППЛ-Л [9, 10]. Сигналы на выходе данного преобразователя регистрируют при помощи стробоскопических осциллографов, полоса пропускания которых достигает 100 ГГц.

На рис. 1 показана конструкция первичного измерительного преобразователя ИППЛ-Л. Потенциальный электрод 1 и заземленный электрод 3 микрополосковой линии разделяет диэлектрическая подложка 2 толщиной  $d$ . Микрополосковая линия нагружена на согласованные сопротивления  $Z_1 = Z_2 = 50$  Ом. Переходная характеристика ИППЛ-Л имеет ступенчатую форму в течение времени двойного пробега сигнала по полосковой линии, а ее время нарастания составляет около 30—50 пс. Форма выходного сигнала преобразователя повторяет форму сигнала поля. Подложка 2 (см. рис. 1) выполнена из диэлектрического материала (стеклотекстолита или фторопласта) с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon > 1$ . Вследствие высокочастотных потерь в диэлектрике происходит затягивание фронта, распространяющегося по линии импульса, что приводит к увеличению времени нарастания переходной характеристики ИППЛ-Л. Также ограничение широкополосности преобразователя обусловлено конструкцией узла съема его выходного сигнала, имеющего паразитный емкостно-индуктивный импеданс совместно с активной нагрузкой  $Z_1$ .

В работе предложены конструктивные решения, уменьшающие время нарастания переходной характеристики полоскового преобразователя при сохранении ступенчатой формы его переходной характеристики (рис. 2).

Для уменьшения высокочастотных диэлектрических потерь начальный участок микрополосковой линии длиной  $L$  выполняют в виде линии с воздушным заполнением ( $\epsilon = 1$ , линия без потерь). Длину воздушной части выбирают из условия  $L \geq t_{\phi} c$ , где  $c$  — скорость света. При этом время нарастания переходной характеристики определяется только неоднородностью волнового сопротивления в месте подключения кабеля для съема выходного сигнала.

Длительность переходной характеристики ИППЛ-Л определяется временем двойного пробега сигнала по микрополосковой линии. Скорость распространения измеряемого ЭМИ в диэлектрике, заполняющем полосковую линию, уменьшается в  $\sqrt{\epsilon}$  раз относительно скорости света. Выполнение всей микрополосковой линии в виде линии с воздушным заполнением приводит к значительному уменьшению длительности переходной характеристики, что нежелательно. Предложенная комбинированная конструкция позволяет как сохранить длительность переходной характеристики, используя часть линии с диэлектрическим заполнением,  $\epsilon > 1$ , так и уменьшить время нарастания.

Использование комбинации участков микрополосковой линии с различным значением  $\epsilon$  требует их согласования.

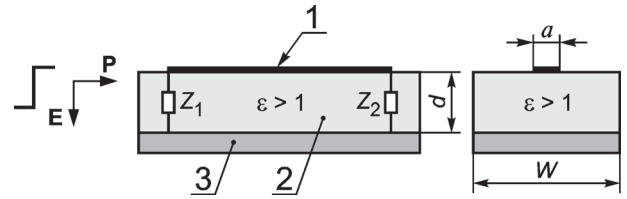


Рис. 1. Первичный измерительный преобразователь ИППЛ-Л: 1 — потенциальный электрод; 2 — подложка; 3 — заземленный электрод

Волновое сопротивление микрополосковой линии конечной толщины зависит от геометрических размеров линии и  $\epsilon$  заполняющего ее материала [11]:

$$Z = f(a, d, \epsilon, t),$$

где  $a$ ,  $t$  — ширина и толщина потенциального электрода, соответственно;  $d$  — толщина диэлектрической подложки.

Решение задачи согласования участков микрополосковой линии сводится к подбору значений  $a$ ,  $d$ ,  $t$ , исходя из следующих условий:

$$Z_b = Z_d = Z_1 = Z_2; d_2 / d_1 = \sqrt{\epsilon}, \quad (1)$$

где  $Z_b$ ,  $Z_d$  — волновые сопротивления воздушной и заполненной диэлектриком частей микрополосковой линии, соответственно;  $d_1$ ,  $d_2$  — толщины этих участков,  $Z_1$ ,  $Z_2$  — сопротивления нагрузки на концах линии.

Еще одно конструктивное решение, уменьшающее влияние на переходную характеристику паразитного емкостно-индуктивного импеданса узла съема выходного сигнала преобразователя — продление заземленного электрода за начало микрополосковой линии (см. рис. 2). При исследовании ИППЛ-Л было выявлено, что такая конструкция преобразователя приводит к уменьшению искажений фронта преобразуемого ЭМИ, вызванных взаимодействием с торцом линии [12]. В случае, когда продленный участок длиной  $L$  отсутствует, длительность переходного процесса взаимодействия фронта измеряемого ЭМИ с торцом линии определяется шириной заземленного электрода  $W$ , в противном случае — шириной потенциального электрода  $a$  [13]. Так как выполняется условие микрополосковой линии  $a \ll W$ , влияние переходного процесса минимально, следовательно, минимально и искажение (увеличение длительности) фронта преобразуемого импульса.

В соответствии с предложенными конструктивными решениями был изготовлен образец быстродействующего ИППЛ-Л. Потенциальный электрод воздушной части микрополосковой линии выполнен из медной фольги длиной  $L = 30$  мм и толщиной  $d = 0,2$  мм, а диэлектрический участок — из фольгированного стеклотекстолита ( $\epsilon = 4,8$ ) толщиной 1 мм и длиной 0,2 м. Остальные геометрические размеры выбраны в соответствии с условиями (1). В качестве выходного разъема преобразователя использован радиочастотный соединитель SMA сечением 1,85 мм с полосой пропускания до 70 ГГц. Преобразователь соединен с регистратором посредством радиочастотного коаксиального кабеля

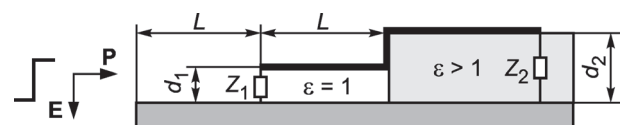


Рис. 2. Новая конструкция ИППЛ-Л для измерений электромагнитных импульсов пикосекундной длительности

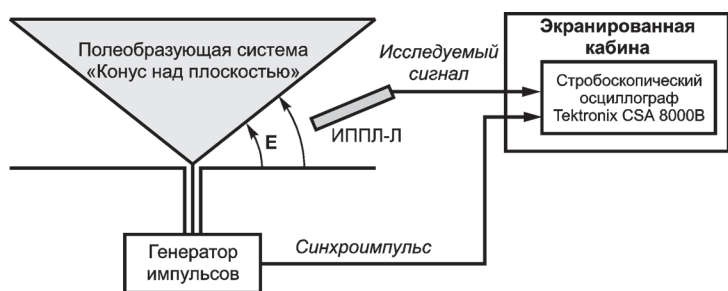


Рис. 3. Схема измерений при исследовании характеристик образца быстродействующего ИППЛ-Л

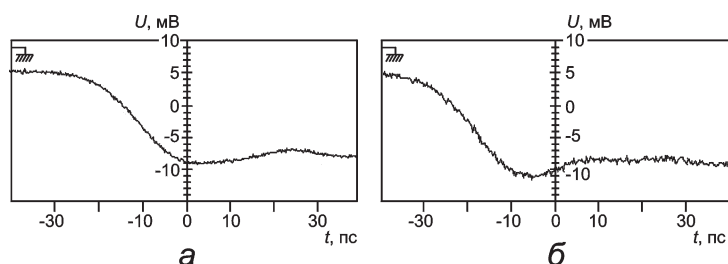


Рис. 4. Осциллограммы фронтовых частей импульсов:

а — эталонного, воспроизводимого в ГЭТ 178-2010; б — зарегистрированного на выходе образца быстродействующего ИППЛ-Л

Rosenberger RTK-FLEX Ultra Low Loss длиной  $l = 0,5$  м и коэффициентом затухания  $\alpha = 6,6$  дБ/м на частоте  $f_r = 70$  ГГц.

Исследования характеристик разработанного ИППЛ-Л выполняли с использованием Государственного первичного специального эталона единиц напряженностей импульсных электрического и магнитного полей ГЭТ 178—2010 [14]. Схема измерений показана на рис. 3. Для определения времени нарастания переходной характеристики образец ИППЛ-Л помещали в рабочую зону полеобразующей системы «Конус над плоскостью» на расстоянии  $Y = 0,6$  м от точки ввода и биссектрисе угла, образованного электродами конуса. Выход измерительного преобразователя соединяли со входом стробоскопического осциллографа Tektronix CSA8000B (полоса пропускания 50 ГГц). Затем воспроизводили эталонные импульсы поля и регистрировали импульсы на выходе измерительного преобразователя.

На рис. 4 показаны осциллограммы эталонного импульса поля, воспроизводимого в ГЭТ 178—2010, и импульса, зарегистрированного разработанным измерительным преобразователем (усреднение по 100 импульсам). Длительность фронта импульса на выходе измерительного преобразователя между уровнями 0,1—0,9 от установившегося значения напряжения составила  $T_\Phi = 18,8$  пс.

Время нарастания переходной характеристики измерительного преобразователя определяли по формуле [3]:

$$T_{\text{НПХ}} = \sqrt{T_\Phi^2 - T_{\text{ПС}}^2 - T_{\text{ОСЦ}}^2},$$

где  $T_{\text{ПС}} = 15,1$  пс — длительность фронта эталонных импульсов, воспроизводимых в полеобразующей системе ГЭТ 178—2010;  $T_{\text{ОСЦ}} = 7$  пс — время нарастания переходной характеристики осциллографа Tektronix CSA8000B.

Таким образом, время нарастания переходной характеристики разработанного образца быстродействующего ИППЛ-Л составило

$$T_{\text{НПХ}} = \sqrt{18,8^2 - 15,1^2 - 7^2} = 8,7 \text{ пс.}$$

**Выводы.** Разработан быстродействующий измерительный преобразователь напряженности импульсного электрического поля на основе полосковой линии. Результаты исследований показали, что примененные конструктивные решения значительно уменьшили время нарастания переходной характеристики преобразователя: от десятков до единиц пикосекунд.

Быстродействующий ИППЛ-Л можно использовать для измерения параметров сверхкоротких ЭМИ с длительностью фронта порядка 10 пс. Необходимость таких измерений возникает при решении задач СКЗ в полосе частот до 30—40 ГГц для определения характеристик радиопоглощающих материалов.

## Литература

1. Сахаров К. Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов и методы измерений их параметров. М.: МИЭМ, 2006.
2. Глебович Г. В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. М.: Радио и связь, 1984.
3. Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И. Импульсные и цифровые устройства / Под ред. Я. С. Ицхоки. М.: Сов. радио, 1972.
4. Шунин О. А. и др. Исследование радиопоглощающих материалов с помощью сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии ЭМС. 2009. № 3. С. 38—46.
5. Кольцов Ю. В. Гигантские фазированные антенные решетки в системах локации. Современные иностранные разработки // Антенны. 2010. № 10. С. 23—38.
6. Рамзей В. Частотно независимые антенны. М.: Мир, 1968.
7. НПП Трим. Сверхширокополосные измерительные системы. Генераторы перепада напряжения. Технические характеристики. [Электрон. ресурс] [http://www.trimcom.ru/index.php?level=Russian\\_nextchild](http://www.trimcom.ru/index.php?level=Russian_nextchild) (дата обращения 08.08.2013 г.).
8. Picosecond Pulse Labs. Product specification. Model 4016 [Электрон. ресурс] [http://www.picosecond.com/product/product.asp?prod\\_id=146#](http://www.picosecond.com/product/product.asp?prod_id=146#) (дата обращения 05.08.2013 г.).
9. Подосенов С. А., Потапов А. А., Соколов А. А. Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур. М.: Радиотехника, 2003.
10. Михеев О. В. и др. Средства измерений для испытаний радиоэлектронной аппаратуры на стойкость к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии ЭМС. 2006. № 2. С. 17—21.
11. Ганстон М. А. Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / Пер. с англ.; под ред. А. З. Фрадина // М.: Связь, 1976.
12. Dobrovorsky M. I. e. a. Measuring instruments of powerful UWB EMP parameters // Proc. 3 Intern. Conf. on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals UWBUSIS. Sevastopol, Ukraine, 2006. P. 373—375.
13. Пат. 2468375 РФ. Устройство для измерения параметров электромагнитного импульса со сверхкороткой длительностью фронта. К. Ю. Сахаров и др. // Изобретения. Полезные модели. 2012. N. 33.
14. Тихомиров С. В. и др. Эталонный комплекс сверхкоротких электромагнитных импульсов с длительностью фронта 20 пс // Измерительная техника. 2010. № 7. С. 57—59; Tikhomirov S. V. e. a. A standard system for producing very-short electromagnetic pulses with a rise time of 20 psec // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N. 7. P. 803—809.

Дата принятия 25.11.2013 г.