

Современные подходы к обеспечению единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов

Андрей Владимирович Клеопин^{1✉}, Иван Михайлович Малай²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл., Россия

¹kleopin@vniiftri.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

Аннотация. Показана необходимость совершенствования на основе электрооптической стробоскопической измерительной установки Государственного первичного специального эталона единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182-2010. Предложены подходы к обеспечению единства импульсных измерений, направленные на развитие новой системы прослеживаемости измерений параметров импульсных сигналов к единицам Международной системы единиц, а также на независимое воспроизведение эталонных сверхширокополосных электрических импульсов. Рассмотренные подходы можно использовать в работах по совершенствованию ГЭТ 182-2010. Сформулированы основные задачи дальнейших исследований, направленных на создание отечественной электрооптической стробоскопической измерительной установки.

Ключевые слова: метрология формы сигналов, эталон, сверхкороткий импульс, электрооптическое стробирование, осциллограф, фемтосекундный лазер

Для цитирования: Клеопин А. В., Малай И. М. Современные подходы к обеспечению единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов // Измерительная техника. 2021. № 9. С. 47–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-9-47-53>

Modern approaches to ensure traceability of fast electrical pulse processes measurements

Andrey V. Kleopin^{1✉}, Ivan M. Malay²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow Region, Russia

¹kleopin@vniiftri.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

²malay@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

Abstract. The necessity of improving the State primary special standard for a unit of pulsed electric voltage GET 182-2010 is substantiated on the basis of an electro-optical sampling system. Approaches to ensure the uniformity of pulse measurements are proposed, aimed at developing a new system of measurements traceability of pulsed signals parameters to the units of the International System of Units, as well as ensuring independent reproduction of reference ultra-wideband electrical pulses. The considered approaches can be used to work on GET 182-2010 improvement. The main tasks of further research in the direction of creating a domestic electro-optical sampling system are formulated.

Keywords: waveform metrology, standard, ultra-short electrical pulse, electro-optic sampling, oscilloscope, femtosecond laser

Введение. С 1990-х гг. бурно развивается производство потребительской электронной техники: компьютеров, мобильных телефонов, смартфонов. Значительно увеличилась полоса пропускания высокоскоростных систем передачи данных, связывающих подобные устройства, а применяемые типы модуляции стали сложнее. Опережающее развитие транспортных сетей, построенных для передачи данных с применением оптоволоконной техники, обеспечило условия для увеличения полосы пропускания и скорости передачи данных по электрическим кабельным линиям и радиоканалу. К настоящему времени символьная скорость передачи

данных по электрическим кабельным линиям и радиоканалу достигла 100 Гбит/с. Сверхкороткие электрические импульсы широко используются в радиотехнических системах и комплексах, применяемых в авиации, медицине, сфере обороны и безопасности. Поэтому актуальны измерения на высоких частотах параметров формы импульсных и цифровых сигналов, а также радиосигналов с цифровой модуляцией.

В Российской Федерации эксплуатируются Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от $4 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182-2010, а также вторичные

эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса от 40 пс (Государственная поверочная схема для средств измерений импульсного электрического напряжения, утверждённая приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.12.2019 г. № 3463). Отечественные эталоны построены с применением традиционных электронных генераторов перепада на основе линий лавинно-пролётных и туннельных диодов, что ограничивает возможность модернизации эталонов и не в полном объёме позволяет решать перспективные измерительные задачи. Современные цифровые и стробоскопические осциллографы с полосой пропускания выше 26 ГГц при испытаниях в России проверяются на соответствие по параметрам модуля амплитудно-частотной характеристики без оценки фазочастотной, переходной и (или) импульсной характеристик, что приводит к зависимости от зарубежной системы калибровки.

Полосы пропускания осциллографов – рабочих средств измерений (СИ) – расширились от 20 ГГц в 1988 г. до 110 ГГц к настоящему времени (Infiniium UXR-Series Oscilloscopes. Data Sheet. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06242/data-sheets/5992-3132.pdf>). Для оценки амплитуды вектора ошибки в радиосигналах с цифровой модуляцией разработана новая группа радиотехнических СИ – анализаторы векторных сигналов.

Таким образом, для обеспечения единства измерений импульсных электрических процессов, а также поверки и испытаний новых сверхширокополосных осциллографов и генераторов сверхкоротких импульсов существует острая необходимость совершенствования первичного эталона единицы импульсного электрического напряжения. Традиционные подходы к совершенствованию аппаратуры эталона – это либо разработка наиболее широкополосного осциллографа (время нарастания переходной характеристики 4 пс), либо создание генератора (длительность фронта менее 7 пс). Данные подходы нельзя использовать, так как в разработках генераторов импульсов и осциллографов применяется электронная компонентная база одного технологического уровня с сопоставимым быстродействием. Возникла проблема: для оценки параметров переходной характеристики осциллографов требуются генераторы импульсов с более коротким фронтом, в то же время, для определения длительности фронта импульсов, воспроизводимых генераторами, требуются более широкополосные осциллографы. Из этого следует, что для определения переходной характеристики и (или) импульсной характеристики осциллографа с полосой пропускания 26–110 ГГц и выше нужно искать другие подходы, основанные на другом физическом принципе, в которых не использовались бы электронный стробоскопический смеситель или электронный аналого-цифровой преобразователь осциллографа. Таким образом, метрологические институты столкнулись с проблемой создания исходного эталона для обеспечения единства измерений быстропротекающих электрических переходных процессов.

Активные исследования в этой области проводились в национальных метрологических институтах США, Германии, Великобритании, Франции, Кореи, Китая и др. [1–3].

В настоящее время в национальных метрологических институтах NPL, LNE и KRISS создаются, а в NIST, PTB и NIM эксплуатируются электрооптические стробоскопические измерительные установки (далее ЭОС-установки), обеспечивающие измерение параметров сверхкоротких электрических импульсов длительностью менее 3,5 пс, что позволяет оценивать импульсную характеристику осциллографов с полосой пропускания до 100–110 ГГц. В 2018–2019 гг. проведены первые международные сличения исходных ЭОС-установок, эксплуатируемых NIST, PTB и NIM (BIRMM). Результаты сличений опубликованы в 2020 г. [4].

Цель исследования – определить основные направления исследований по совершенствованию системы обеспечения единства измерений быстропротекающих импульсных электрических процессов.

Подходы к обеспечению единства импульсных измерений. Рассмотрим пять подходов:

создание первой отечественной ЭОС-установки, что обеспечит возможность совершенствования Государственного первичного эталона (ГПЭ) единицы импульсного электрического напряжения (ЭОС-установка будет являться его основной составной частью);

обеспечение прослеживаемости к единицам международной системы единиц в будущих работах по совершенствованию ГПЭ, совершенствованию нормативно-технической документации и государственной поверочной схемы в области осциллографии, так как в настоящее время прослеживаемость обеспечивается не в полном объёме;

применение методов восстановления и регуляризации сигналов, как при исследовании метрологических характеристик ЭОС-установки, так и при эксплуатации ГПЭ и нижестоящих эталонов единицы импульсного напряжения (вторичных и первого разряда);

применение подхода «Метрология формы сигналов» для нормирования метрологических характеристик ГПЭ, нижестоящих эталонов импульсного напряжения, осциллографов, генераторов перепада и генераторов импульсов, а также в перспективе анализаторов оптических компонентов, генераторов гармоник и нелинейных векторных анализаторов цепей;

использование и развитие методов измерений на подложке и по излучению, что не только необходимо для создания ЭОС-установки, но и актуально в рамках общей тенденции развития радиотехнических измерений, а также позволит получить научно-технический задел для реализации и совершенствования других радиотехнических эталонов и СИ.

Электрооптическая стробоскопическая измерительная установка. ЭОС-установки созданы и эксплуатируются в США, Германии и Китае. В настоящее время исследования, направленные на создание ЭОС-установок, проводятся в Великобритании, Франции и Кореи, но пока не начаты в России.

Современные импульсные лазеры могут генерировать импульсы длительностью 0,1 пс и менее. Для стробирования (выборки) электрических сигналов используются фотопроводящие ключи с пико- и субпикосекундными временами отклика [5]. Электрооптическое стробирование основано на линейном электрооптическом эффекте (эффект Поккельса)

в некоторых кристаллах (низкотемпературном арсениде галлия LT-GaAs, танталате лития LiTaO_3 и др.) [6]. Линейно поляризованный оптический луч, распространяющийся сквозь кристалл, меняет свою поляризацию. Это изменение является функцией приложенного электрического поля и регистрируется поляриметрическими методами.

Структурная схема ЭОС-установки, поясняющая её принцип действия, приведена на рис. 1.

Фемтосекундный лазер $\Phi\text{Л}$ генерирует последовательность оптических импульсов длительностью менее 100 фс. Оптический луч разделяется на два: возбуждающий луч, который действует на вход фотодетектора $\Phi\text{Д}$, и зондирующий луч. Фотодетектор генерирует электрический импульс на коаксиальном выходе. Длительность оптического импульса на порядок меньше, чем время отклика фотодетектора, из-за чего генерируемый фотодетектором электрический импульс равен импульсной характеристике фотодетектора. Эти импульсы распространяются через сверхвысокочастотный пробник ПСВЧ (коаксиально-микрополосковое согласующее устройство) к копланарной микрополосковой линии (coplanar waveguide), изготовленной на фотопроводящей пластине $\Phi\text{П}$ с подложкой из LiTaO_3 . Линейно поляризованный зондирующий луч проходит через перестраиваемую линию задержки, после чего фокусируется под прямым углом на поверхности микрополосковой линии. Поляризация зондирующего луча изменяется пропорционально действующему электрическому полю между токопроводящими проводниками копланарной линии в соответствующий момент времени. Представление электрического импульса во времени осуществляется стробоскопическим методом за счёт приращения задержки между возбуждающим и зондирующим лазерным импульсом.

В качестве начального шага к созданию отечественной ЭОС-установки целесообразно провести эксперименты по воспроизведению сверхкоротких электрических импульсов с помощью макета, состоящего из фемтосекундного лазера и широкополосного фотодетектора. Исследование формы импульсов на данном этапе можно осуществлять с использованием аппаратуры существующего ГЭТ 182-2010.

К основным задачам дальнейших исследований в направлении создания отечественной ЭОС-установки относятся:

исследования по выбору полупроводникового материала для подложки фотопроводящего ключа (LT-GaAs, LiTaO_3 или др.);

электродинамическое моделирование копланарной микрополосковой линии с согласованной нагрузкой для фотопроводящего ключа;

изготовление и экспериментальные исследования набора фотопроводящих ключей с различными (варьируемыми относительно теоретического расчёта) соотношениями ширины полос металлизации копланарной линии и диэлектрического зазора между ними с целью отбора образца с оптимальным согласованием линии и нагрузки в диапазоне частот до 110 ГГц;

расчёт и измерения на подложке комплексных коэффициентов передачи и отражения коаксиально-микрополоскового согласующего устройства между фотопроводящим ключом и выходом коаксиального радиочастотного соединителя размерами 1,042 мм;

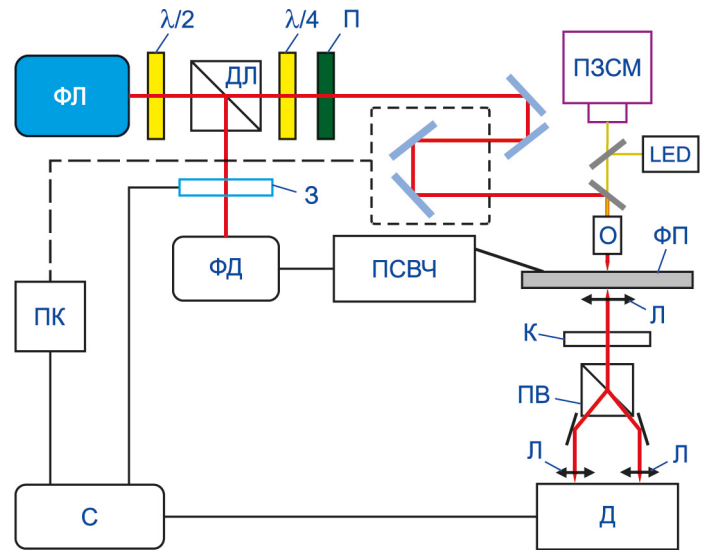


Рис. 1. Структурная схема ЭОС-установки:

$\Phi\text{Л}$ – фемтосекундный лазер; $\lambda/2$, $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая пластины соответственно; ДЛ – делитель луча; П – поляризатор; З – затвор; $\Phi\text{Д}$ – фотодетектор 100 ГГц; ПВЧ – сверхвысокочастотный пробник; ПЗСМ – микроскоп с матрицей светочувствительных фотодиодов, выполненной по технологии приборов с зарядовой связью; LED – светодиод подсветки для микроскопа; О – объектив; $\Phi\text{П}$ – фотопроводящая пластина с подложкой из LiTaO_3 ; Л – линза; К – компенсатор; ПВ – призма Волластона; Д – детектор; С – синхронизация; ПК – персональный компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the EOS system: FL – femtosecond laser; $\lambda/2$, $\lambda/4$ – half-wave and quarter-wave plates, respectively; BD – beam divider; P – polarizer; S – shutter; PD – 100 GHz photodetector; PUHF – ultra-high-frequency probe; CCDM – microscope with an array of photosensitive photodiodes, made according to the technology of devices with a charge-coupled device; LED – light-emitting diode for illumination for a microscope; O – object-glass; PP – photoconductive plate with a LiTaO_3 substrate; L – lens; C – compensator; PW – Wollaston prism; D – detector; SC – synchronization; PC – personal computer

выбор оптимального варианта конструкции ЭОС-установки на основе оптических, оптоэлектронных и радиоэлектронных компонентов, обоснование требований к узлам оптической и оптоволоконной техники;

разработка специального алгоритма, реализующего управление перестраиваемой оптической линией задержки для обеспечения стробоскопического режима и масштабирования выборки отсчётов электрического импульса, исследования по обеспечению синхронизации ЭОС-установки и прослеживаемости временной шкалы к эталонам единицы времени;

исследование функционального макета ЭОС-установки в целом, сравнение результатов измерений амплитудно-частотной характеристики фотоприёмника с результатами, полученными методом частотной калибровки синусоидальным сигналом.

Прослеживаемость к единицам Международной системы единиц. Коэффициент масштабирования ЭОС-установки можно определить посредством сравнения с сигналом, измеренным при возбуждении фотоприёмника оптическим излучением с огибающей прямоугольной формы и известными

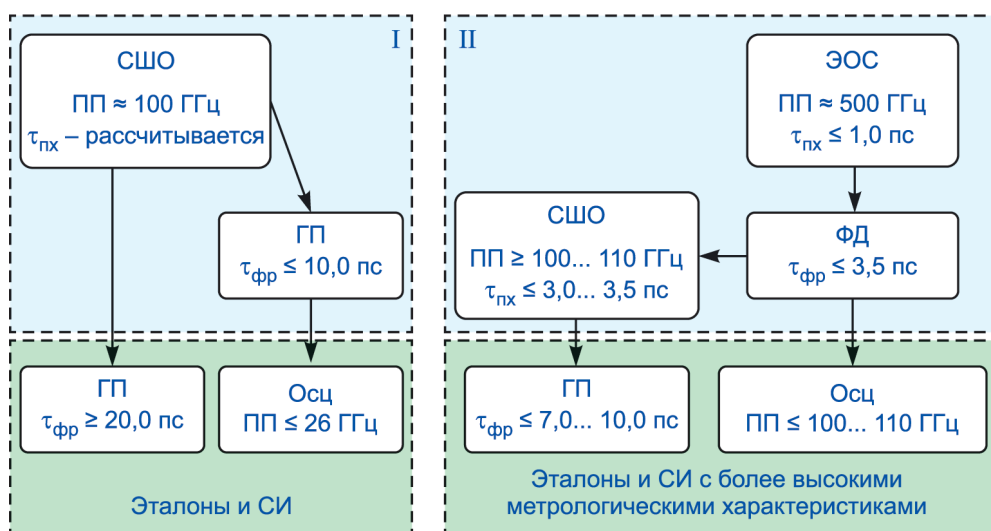


Рис. 2. Существующая I и перспективная II схемы исходных эталонов единицы импульсного электрического напряжения:

СШО – сверхширокополосный осциллограф; ГП – генератор перепада; Осц – осциллографы; ЭОС – ЭОС-установка; ФД – фотодетектор; ПП – полоса пропускания; $\tau_{\text{пх}}$ – время нарастания переходной характеристики; $\tau_{\text{фр}}$ – длительность фронта импульсов

Fig. 2. Diagrams of existing I and proposed II original electrical pulse signal standards:

UWO – ultra-wideband oscilloscope; SG – step generator; Osc – oscilloscopes; EOS – EOS system; PD – photodetector BW – bandwidth; τ_t – the rise time of the transient response; τ_p – pulse rise time

амплитудой и частотой следования. Авторы настоящей статьи проанализировали зарубежные исследования существующих ЭОС-установок. Согласно [7] предпочтительным по отношению к вышеописанному варианту определения коэффициента масштабирования ЭОС-установки является вариант измерений импульсной характеристики фотодетектора только как функции от времени без указания каких-либо единиц измерения значений функции.

Амплитудно-частотную характеристику фотодетектора также можно определить традиционным методом частотной калибровки синусоидальным сигналом. При этом обеспечивается прослеживаемость к единице средней мощности электромагнитных колебаний, а также корректная оценка фазочастотной характеристики фотодетектора. Временная шкала ЭОС-установки непосредственно прослеживается к единице времени. Кроме этого, с помощью лазерного интерферометра параметры ЭОС-установки можно прослеживать к единице длины и рассчитывать временную шкалу с использованием константы скорости света [8]. Таким образом, за счёт прослеживаемости ЭОС-установки к единицам времени (частоты) и средней мощности электромагнитных колебаний, будет обеспечиваться прослеживаемость осциллографов, генераторов перепада и генераторов импульсов к соответствующим эталонам единиц величин.

На рис. 2 приведена используемая в настоящее время упрощённая схема I построения аппаратуры ГЭТ 182-2010. Данная схема имеет следующие основные недостатки:

динамические характеристики сверхширокополосного стробоскопического осциллографа известны только по результатам зарубежной калибровки, при этом с применением

отечественных эталонов и СИ определяется только модуль амплитудно-частотной характеристики осциллографа, а фазочастотная, импульсная и переходная характеристики осциллографа рассчитываются по приближенным формулам; полоса пропускания эталонов и СИ, поверяемых и аттестуемых с использованием исходного эталона, ограничена значением 26 ГГц, длительность фронта импульсов, воспроизводимых эталонами и СИ, не менее 20 пс, что не удовлетворяет современным требованиям.

Создание отечественной ЭОС-установки для совершенствования ГЭТ 182-2010 позволит устранить вышеуказанные недостатки. На рис. 2 представлена также перспективная схема II построения модернизированного ГЭТ 182-2010.

Восстановление и регуляризация электрических сигналов.

В контексте сверхширокополосных измерений на ЭОС-установке

чрезвычайно актуальна задача расчёта входного сигнала из искаженных экспериментальных данных. Для определения с помощью ЭОС-установки импульсной характеристики фотоприёмника необходимо учесть все частотно-зависимые потери пробника, копланарной микрополосковой линии и места их соединения. Одна из методик частотной коррективки, применяемая для ЭОС-установки NIST (США), подробно представлена в [7].

Анализ неопределённостей измерений на подложке эволюционировал со временем, и сейчас существуют различные методы учёта неопределённостей калибровок при измерении [9], а также методы учёта эффекта взаимного влияния пробников [10]. Результат корректировки строго определён только в той частотной области, в которой коаксиальные соединители функционируют в одномодовом режиме. При использовании новых коаксиальных соединителей диаметром 0,8 мм верхняя граница частотного диапазона расширяется до 145 ГГц.

Радиочастотные элементы измерительной ЭОС-системы, а также проверяемые широкополосные осциллографы описываются моделью линейного динамического звена. Подобные системы характеризуются импульсной характеристикой – откликом на входную δ -функцию. Выходной сигнал $u_{\text{вых}}(t)$ представляет собой свёртку (обозначена «*») двух функций – входного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ и импульсной характеристики системы $h(t)$. Операция свёртки описывается интегралом Дюамеля [11]:

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вх}}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{вх}}(t) h(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где τ – независимая переменная времени.

Если на входе исследуемого звена действует детерминированный сигнал $u_{\text{вх}}(t)$, заданный обратным преобразованием Фурье как $U_{\text{вх}}(\omega)e^{j\omega t}$ (где ω – угловая частота), а также если известен комплексный коэффициент передачи $H(j\omega)$ системы, то выходной сигнал представляется как

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(j\omega) U_{\text{вх}}(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2)$$

Восстановление формы входных сигналов – обратная задача, в которой по известным выходному сигналу и характеристике системы необходимо определить входное воздействие, т. е. привести сигнал ко входу. Существует два основных подхода к восстановлению формы сигналов: решение уравнения обратной свёртки во временной области или деление на частотный коэффициент передачи в частотной области (инверсная фильтрация). Однако на практике из-за влияния шумов и неопределённости измерений задача восстановления приводит к уравнениям, обладающим свойством некорректности по Адамару (нарушается хотя бы одно из условий корректности: решение существует, оно единственно и устойчиво), и не может быть решена классическими методами [11]. Например, некорректность решения возникает в частотной области, когда частотная передаточная функция стремится к нулю и деление даёт бесконечно большой разброс решений. Методы решения задач восстановления описаны в теории регуляризации [12, 13].

Метрология формы сигналов. Формы сигналов при существующем обеспечении единства измерений электрических импульсных процессов описываются параметрически. Для нормирования характеристик эталонов и СИ импульсно-осциллографической группы, а также выражения погрешностей измерений параметров сигналов традиционно используются скалярные параметры: время нарастания переходной характеристики; длительность фронта (спада); выброс; неравномерность; скос вершины и др. (ГОСТ 22737-90 «Осциллографы электронно-лучевые. Общие технические требования и методы испытаний»; IEEE Std 181-2011 “IEEE standard for transitions, pulses, and related waveforms”). Данные параметры рассчитываются из экспериментально полученных функциональных зависимостей, представляющих форму сигнала во временной области. Традиционный подход обладает существенным недостатком – отсутствует чёткая однозначная связь между погрешностями амплитудно-временных и амплитудно-частотных измерений, поэтому нет общего подхода к определению характеристик современных multifunctional радиоизмерительных приборов, работающих одновременно во временной и частотной областях. На рис. 3 схематически представлено нормирование границ погрешности измерений, которое применяется в настоящее время для радиотехнических СИ при амплитудно-частотных и при амплитудно-временных измерениях.

Метрология формы сигналов – это перспективный подход к нормированию метрологических характеристики эталонов и СИ, а также к описанию электрических сигналов. При таком подходе измеряется функция сигнала от времени. На практике функция представляется массивом дискретных, эквидистантных по времени отсчётов. Из полученной функциональной

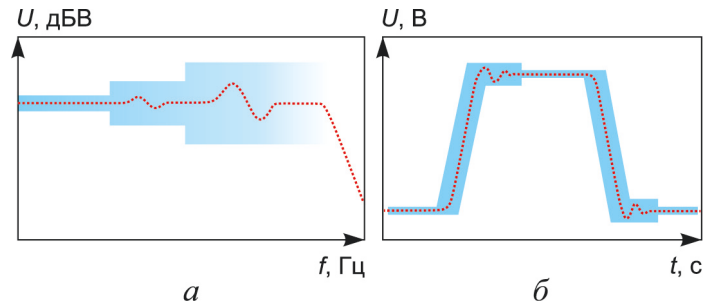


Рис. 3. Границы погрешности измерений для генераторов сигналов, анализаторов спектра, анализаторов цепей и др. (а), для осциллографов, генераторов импульсов и др. (б)

Fig. 3. Typical measurement uncertainties for signal generators, spectrum analyzers, VNAs etc. (a), for oscilloscopes, pulse generators etc. (b)

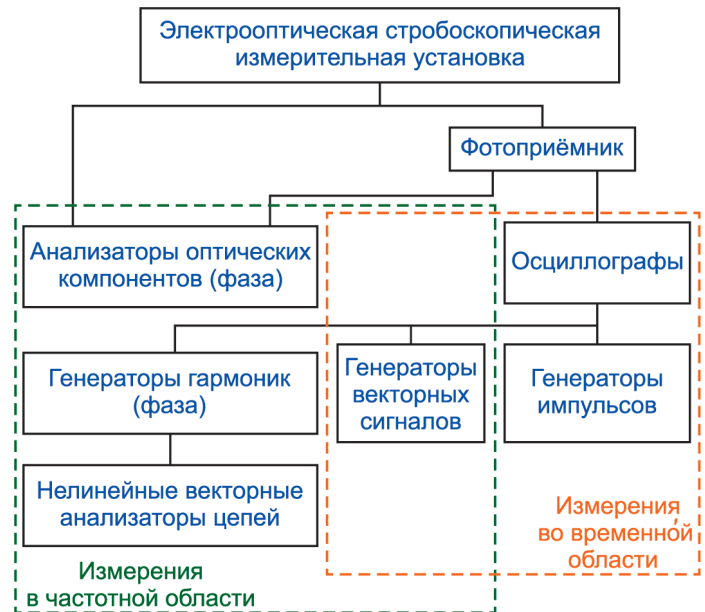


Рис. 4. Схема прослеживаемости амплитудно-временных и амплитудно-частотных измерений от ЭОС-установки

Fig. 4. Frequency response related and transient response related measurements traceability mutuality

зависимости (формы) выводится традиционное параметрическое описание сигнала или характеристики СИ. Важнейшая задача в метрологии формы сигналов – обеспечение единства прослеживаемости в единицах Международной системы единиц при представлении сигнала, как во временной, так и в частотной области, а также исследование соотношений между ними и способов преобразования номинальных значений и неопределённостей измерений из одной области в другую.

Использование ЭОС-установки в составе ГЭТ 182-2010 совместно с метрологией формы сигналов обеспечивает не только описание ультракороткого испытательного импульса сверхширокополосных осциллографов, но и применение новых эффективных способов воспроизведения эталонных сигналов для оценки фазочастотной характеристики анализаторов оптических компонентов, генераторов гармоник и нелинейных векторных

анализаторов цепей [14, 15]. На рис. 4 представлена схема прослеживаемости таких измерений от ЭОС-установки.

Прослеживаемость измерений, как в частотной, так и во временной областях имеет особое значение для современных анализаторов и генераторов векторных сигналов. Указанные группы СИ оперируют импульсно-модулированными радиосигналами, для оценки параметров которых одновременно требуются как узкополосные методы измерений в частотной области с широким динамическим диапазоном и низкой погрешностью, так и методы измерений во временной области, обладающие широкополосностью, быстродействием и широкими возможностями по синхронизации с цифровыми и кодовыми последовательностями.

Бесконтактные импульсные измерения. В настоящее время вместо модульной структуры радиоэлектронной аппаратуры с межблочными соединениями коаксиальными линиями или волноводами часто используются интегральные компоненты. Поэтому импульсные измерения в радиотехнике проводятся непосредственно на подложке без использования каких-либо соединителей. Кроме того, беспроводные системы связи нового поколения, работающие в миллиметровом диапазоне частот, требуют развития новых бесконтактных методов измерений – по электромагнитному излучению. У цифровых антенных решёток высокая степень интеграции и нет радиочастотных входных разъёмов, поэтому потребуется проводить измерения на подложке совместно с измерениями поля в пространстве [16].

При развитии таких измерений появятся новые пробники, радиофотонные измерительные преобразователи, а также измерительные зонды, встроенные в пробники. Для оценки параметров (или калибровки) указанных СИ требуются измерительные ЭОС-системы, с помощью которых обеспечивается воспроизведение связанных по параметрам лазерных и электрических импульсов, а также измерение формы электрических импульсов непосредственно в необходимой точке на копланарной микрополосковой линии.

Закключение. Согласно проведённому анализу подходов основным направлением развития системы обеспечения единства изменений быстропротекающих импульсных процессов в Российской Федерации является создание ЭОС-установки с последующим совершенствованием государственного первичного эталона единицы импульсного электрического напряжения.

В работах по совершенствованию ГЭТ 182-2010, а также при совершенствовании методической, нормативно-технической документации и переработке государственной поверочной схемы в области осциллографии, отдельное внимание необходимо уделить обеспечению прослеживаемости импульсных измерений к государственным эталонам единицы частоты и времени и единицы средней мощности электромагнитных колебаний. При создании и исследовании метрологических характеристик ЭОС-установки потребуется применение методов восстановления и регуляризации сигналов, методов частотной корректировки потерь в микрополосковых линиях, методов учёта неопределённости калибровок и методов учёта эффекта взаимного влияния пробников. Использование вышеперечисленных методов также потребуется при передаче единицы импульсного напряжения нижестоящим эталонам, имеющим в своем составе новые

пробники, радиофотонные измерительные преобразователи, а также измерительные зонды, встроенные в пробники.

Важными направлениями исследований, связанными с созданием ЭОС-установки, также являются развитие метрологии формы сигналов и методов измерений на подложке и по электромагнитному излучению.

Список литературы

1. Hale P. D., Williams D. F., Dienstfrey A., Wang J. et al., Traceability of high-speed electrical waveforms at NIST, NPL, and PTB, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 522–523. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251033>
2. Tian W., Allal D., Boudebs G., Charles M., Ndiaye O., Vincent P., Development of an Electro-Optic Sampling System at LNE, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 654–655. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251099>
3. Feng Z., Zhao K., Li B., Yang Z., Song Z., Cui X., Pulse waveform characterization by electro-optic sampling at NIM, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191721>
4. Bieler M., Struszewski P., Feldman A., Jargon J. et al., International comparison on ultrafast waveform metrology, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191926>
5. Shank C., Laubereau A., etc., *Ultrashort laser pulses: Generation and applications*, ed. Wolfgang Kaiser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 494 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0070977>
6. Valdmanis J., Mourou G., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>
7. Hale P., Williams D., Dienstfrey A., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 5, S135. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aad1cd>
8. Stone J., *NCSLI Measure*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1080/19315775.2009.11721483>
9. Williams D., Wang J., Arz U., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 12, pp. 2391–2401. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.819211>
10. Williams D., Schmuckle F., Doerner R., Phung G., Arz U., Heinrich W., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, vol. 62, no. 8, pp. 1748–1761. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2331623>
11. Верлань А. Ф., Сизиков В. С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наукова думка, 1986. 543 с.
12. Dienstfrey A., Hale P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1769–1778. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2297631>
13. Клеопин А. В. Методики восстановления формы сверхкоротких импульсов, используемые при исследовании импульсного электромагнитного излучения // Вестник метролога. 2011. № 1. С. 10–12.

14. Reader H., Williams D., Hale P., Clement T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 515–521. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914630>

15. Ridler N., Salter M., *Metrologia*, 2002, vol. 39, no. 3, 295, <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/3/6>

16. Swindlehurst A., Ayanoglu E., Heydari P., Capolino F., *IEEE Communication Magazine*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453>

References

1. Hale P. D., Williams D. F., Dienstfrey A., Wang J. et al., Traceability of high-speed electrical waveforms at NIST, NPL, and PTB, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 522–523. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251033>

2. Tian W., Allal D., Boudebs G., Charles M., Ndiaye O., Vincent P., Development of an Electro-Optic Sampling System at LNE, *2012 Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, Washington, DC, USA, July 1–6, 2012, IEEE, 2012, pp. 654–655. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2012.6251099>

3. Feng Z., Zhao K., Li B., Yang Z., Song Z., Cui X., Pulse waveform characterization by electro-optic sampling at NIM, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191721>

4. Bieler M., Struszewski P., Feldman A., Jargon J. et al., International comparison on ultrafast waveform metrology, *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, August 24–28, 2020, IEEE, 2020, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM49742.2020.9191926>

5. Shank C., Laubereau A., etc., *Ultrashort laser pulses: Generation and applications*, ed. Wolfgang Kaiser, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 494 p. <https://doi.org/10.1007/BFb0070977>

6. Valdmanis J., Mourou G., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, vol. 22, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1072867>

7. Hale P., Williams D., Dienstfrey A., *Metrologia*, 2018, vol. 55, no. 5, S135. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aad1cd>

8. Stone J., *NCSLI Measure*, 2009, vol. 4, no. 3, pp. 52–58. <https://doi.org/10.1080/19315775.2009.11721483>

9. Williams D., Wang J., Arz U., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2003, vol. 51, no. 12, pp. 2391–2401. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.819211>

10. Williams D., Schmuckle F., Doerner R., Phung G., Arz U., Heinrich W., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, vol. 62, no. 8, pp. 1748–1761. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2331623>

11. Verlan' A. F., Sizikov V. S., *Integral'nye uravneniya: metody, algoritmy, programmy. Spravochnoe posobie [Integral equations: methods, algorithms, programs. Reference manual]*, Kiev, Naukova dumka, 1986, 543 p. (In Russ.)

12. Dienstfrey A., Hale P., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, vol. 63, no. 7, pp. 1769–1778. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2297631>

13. Kleopin A. V., *Metodiki vosstanovleniya formy sverkhkorkotkikh impul'sov, ispol'zuemye pri issledovanii impul'snogo elektromagnitnogo izlucheniya [Ultrashort pulse shape reconstruction techniques used in the study of pulsed electromagnetic radiation]*, *Vestnik metrologa*, 2011, no. 1, pp. 10–12. (In Russ.)

14. Reader H., Williams D., Hale P., Clement T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, vol. 56, no. 2, pp. 515–521. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2007.914630>

15. Ridler N., Salter M., *Metrologia*, 2002, vol. 39, no. 3, 295. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/39/3/6>

16. Swindlehurst A., Ayanoglu E., Heydari P., Capolino F., *IEEE Communication Magazine*, 2014, vol. 52, no. 9, pp. 56–62. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453>

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; принята к публикации 26.04.2021.