

Метод контроля параметров герметичного кабельного ввода

С. П. ВАЩУК¹, С. М. СЛОБОДЯН², Д. С. ВАЩУК¹

¹Самарский университет, Самара, Россия, e-mail: amurgermovvod@mail.ru

²Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия, e-mail: sms_46@ngs.ru

Рассмотрен метод оперативного контроля электрофизических характеристик и параметров герметичного кабельного ввода, выполненного на основе неорганических материалов. Метод применяется для оценки качества состояния кабельного ввода в реальном времени эксплуатации кабельной линии ядерно-физических установок. Учтены особенности подключения защитных экранирующих систем (двойного экрана) ядерно-физических установок. Приведено описание экспериментальной методики применения ввода контрольных кабелей. Проанализированы результаты измерений волнового сопротивления и коэффициента затухания методом четвертьволновой короткозамкнутой линии на опорной частоте. Определено, что разработанный тип герметичного кабельного ввода по электрофизическим параметрам устойчив в стандартных условиях аварий и применим в качестве ввода контрольных кабелей ядерно-физических установок.

Ключевые слова: метод, контроль, оценка, устойчивость, герметичный кабельный ввод.

The operation monitoring of the electrophysical parameters and characteristics of the sealed cable glands in real time is considered. The sealed cable glands are made from the inorganic material and use in underground power cable of the nuclear facility. The method takes into account the peculiar features of the enclosed protective (or double-screen) systems of the nuclear facility. The experiment technique is reported. The characteristic impedance and the damping factor by quarter wavelength short circuited line method at the fundamental frequency are given. The results demonstrate that developed sealed cable glands are applicable to the nuclear facility as control cables and are suitable for the purpose of safety.

Key words: method, control, measure, stability, sealed cable gland.

Создание и применение методов и средств, обеспечивающих повышение точности и быстродействия оперативного контроля физических, механических, электродинамических и других параметров объекта, обусловлено ужесточением требований к качеству измерений и контролю ресурса изделий энергетики и машиностроения [1, 2]. Особенно это актуально в практике измерений и контроля состояния ядерно-физических установок (ЯФУ) [2, 3]. Высокие точность и достоверность измерительной информации позволяют решать проблемы метрологического обеспечения противоаварийной защиты, а также стандартизации в области защиты гражданской инфраструктуры от мощных электромагнитных воздействий [1, 4].

Важный элемент систем ЯФУ – кабельные линии передачи сигналов и силовых линий электроснабжения с устройствами ввода-вывода. Для технически опасных объектов (ЯФУ и, в том числе, атомных станций [5]) эти устройства выполняют в виде герметичных кабельных вводов (ГКВ), устойчивых к воздействию потока ионизирующей радиации. Существует множество публикаций по электромагнитным процессам в кабельных линиях [3–5]. Однако практический интерес представляет учёт электродинамических, механических, тепловых и других факторов, влияющих, в первую очередь, на механическую устойчивость этих линий, которая может существенно повлиять на герметичность ГКВ [6–12]. Электродинамический эффект создаётся магнитным полем токов, индуцирующихся в области контактов токоведущих жил и металлических экранов ГКВ. Этот эффект приводит к росту механического и теплового воздействий.

Непрерывная диагностика ГКВ в составе ЯФУ также по-

зволяет увеличить срок службы гибких кабелей для питания устройств ЯФУ. Принципиальное значение имеет изучение электрофизических и механических свойств узла «кабель – ГКВ – кабель». В период эксплуатации не только на элементы ГКВ, но на кабели воздействует внешняя среда, поток ионизирующего излучения и электромагнитное поле, что может приводить к сложным механическим деформациям кабеля и контактно связанных с ним элементов ГКВ [5–15]. Кабель является сложной составной конструкцией. Обычно в проектных расчётах большое внимание уделяется обеспечению прочности и деструкции элементов кабеля без учёта влияния факторов старения, износа при действии ионизации и электродинамических сил в процессе эксплуатации узла «кабель – ГКВ – кабель» [10–12].

Это объясняет научный интерес к разработке методик экспериментальных измерений и расчётов параметров ГКВ, изготовленных из термоустойчивых (негорючих) материалов, комплексно учитывающих сложный теплоперенос и электродинамические процессы в узле «кабель – ГКВ – кабель» для оценки качества ГКВ. Такая оценка должна включать влияющие факторы – параметры экранов ГКВ и многослойной структуры радиоволновых, силовых кабелей и кабелей связи с термопарами; учитывать воздействие температуры на электрические и теплофизические характеристики кабелей, а также на устойчивые к изменениям температуры неорганические материалы, применяемые в ГКВ.

Цель настоящей работы – разработка методики расчётов и оперативного метода экспериментальных измерений параметров ГКВ из термоустойчивых материалов. Параметры ГКВ комплексно описывают его состояние в условиях слож-

ных корреляционно взаимосвязанных электро- и магнитодинамических процессов и теплопереноса.

Влияющие факторы. Опыт эксплуатации разных ГKB на основе полимерных материалов в качестве электрической изоляции и элемента герметизации в кабельных линиях показывает, что электрическая прочность ГKB ниже, чем применяемых кабелей [3, 4]. Уменьшение электрической прочности объясняется повреждением части оболочки кабеля при её разделке в процессе подключения к ГKB.

Установлено, что ГKB, выполненные из неорганических материалов, имеют преимущество перед полимерными ГKB. Полимерные материалы – основа электрической изоляции и герметизации ГKB [13, 14]. В ГKB из неорганических материалов применены кабели марки КМЖ, изоляция их токопроводящих жил произведена из неорганического материала. Волновые сопротивления и затухания кабелей марки КМЖ и кабелей, подключаемых к ГKB, сильно различаются. Возникает необходимость измерения электрических характеристик кабелей и расчёта электромагнитных параметров электрических цепей, особенно на высоких частотах, с применением кабелей марки КМЖ. Следует также учесть особенности подключения защитных экранирующих систем ЯФУ (двойного экранирования).

Следовательно, оперативное измерение параметров текущего состояния ГKB может служить для эффективного выявления начала деструкции элементов кабеля до истечения срока гарантированного ресурса. При этом расчётная методика может быть основана на аналитической связи свойств структуры ГKB с измеряемыми параметрами узла «ГKB – кабельные линии ЯФУ».

Оценка качества ГKB по его помехозащищённости и заземлению экранов. Принципиальная схема передачи тестового электрического сигнала по одной экранированной жиле кабеля показана на рис. 1. В системе электрических соединений ЯФУ предусмотрена общая точка 3, заземления экранов кабелей. Экраны кабелей, расположенные с обеих сторон ГKB, соединяются с металлическим корпусом ГKB и оболочкой корпуса. Для контроля качества экраны кабелей соединены дополнительной жилой, проходящей в ГKB. Напряжение E генератора с внутренним сопротивлением Z_E подаётся на вход кабеля (с координатой $x = 0$).

Жилы 1, 5 кабелей соединяются с помощью жилы 7 отрезка кабеля внутри ГKB. Оболочка кабеля внутри ввода соединена с его корпусом и заземлена в точке 3₂. Экраны 2, 6 кабелей соединены внутри ввода через жилу 3 дополнительного кабеля 4, оболочка которого соединена с корпусом ГKB. В конце кабельной линии (с координатой $x = l$, где l – длина кабеля) располагается сопротивление нагрузки Z_H , на котором при токе нагрузки I_H возникает напряжение U_H . Под воздействием электромагнитного излучения может возникать напряжение U_n помехи в контуре между точками заземления 3₁, 3₂ и экранами 8, 2. Это ведёт к появлению напряжения помехи U_n в жиле 5 кабеля и нагрузке Z_H . Ниже приведены экспериментальная и расчётная методики оценки уровня этих помех на частоте 50 Гц. Помехи от токов высокой частоты в герметичной зоне не учитывались из-за их сильного затухания в стальном корпусе ГKB.

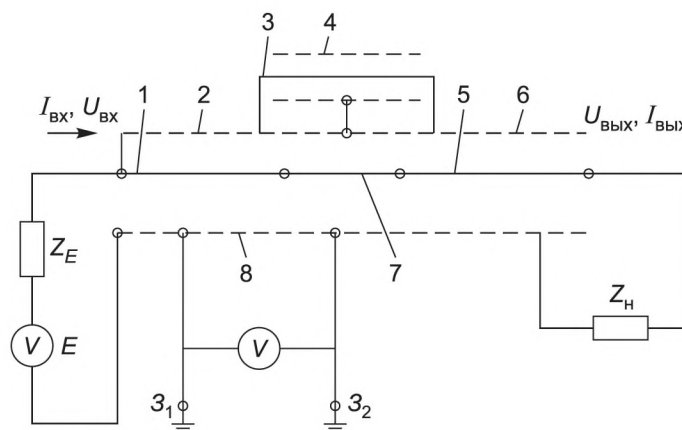


Рис. 1. Принципиальная схема передачи тестового электрического сигнала по одной экранированной жиле кабеля в процессе контроля качества герметичного кабельного ввода (ГKB):

1, 2 – жилы и экран кабеля входа; 3, 4 – жилы и экран дополнительного кабеля; 5, 6 – жилы и экран кабеля выхода; 7, 8 – жилы и экран кабеля ГKB; I_{BX} , U_{BX} , $I_{ВХ}$, $U_{ВХ}$ – ток и напряжение на входе и выходе, соответственно, кабеля ГKB; E – задающий генератор (источник тестового напряжения сигнала); V – вольтметр для измерения падения напряжения (помехи) между точками 3₁, 3₂ заземления соединения экранов входного и выходного кабелей с ГKB; Z_E , Z_H – комплексные сопротивления источника напряжения и нагрузки цепи, соответственно

Методика измерений. При измерении электрических параметров ГKB и кабелей ввода марок КМЖ-1×4 и КМЖ-7×2,5 на высокой частоте использовался измеритель добротности Е4-4 [13], однако можно применять и измерители других типов (Е4-7; Е4-10; ВМ 560). При постоянной частоте f из диапазона 50–500 кГц измеряли ёмкости C_1 , C_2 и добротности Q_1 , Q_2 , без кабеля и с подключённым кабелем соответственно. Длину отрезка кабеля варьировали от 0,5 до 1,5 м, его ёмкость рассчитывали по соотношению

$$C_x = C_1 - C_2. \quad (1)$$

Ёмкость единицы длины кабеля определяется как

$$C_{\text{дл}} = C_x / l. \quad (2)$$

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляции кабеля вычисляется по формуле

$$\text{tg} \delta = [C_1 / (C_1 - C_2)] [(Q_1 - Q_2) / (Q_1 Q_2)]. \quad (3)$$

В кабеле марки КМЖ-7×2,5 в качестве внутренней жилы коаксиального кабеля используется центральная токопроводящая жила, внешнего провода – шесть соединённых вместе наружных жил. Экспериментально установлено, что подсоединение шести жил к оболочке не влияет на результаты измерения всех параметров (по сравнению с результатами измерений, при которых внешняя оболочка не соединена с жилами).

Измерения волнового сопротивления Z и коэффициента затухания α проводили методом четвертьволновой коротко-

Результаты обработки экспериментальных данных

Марка кабеля	$C_{\text{ж}}$, пФ/м	$\text{tg } \delta$	Z , Ом	α , дБ/м	$\sqrt{\epsilon}$	ϵ
КМЖ-1×4	475	$8 \cdot 10^{-4}$	15	$10,4 \cdot 10^{-3}$	2,15	4,6
КМЖ-7×2,5	228	$16 \cdot 10^{-4}$	32	$4,5 \cdot 10^{-3}$	2,20	4,8

замкнутой линии на частоте 22,4 МГц [13]. Жилы отрезка кабеля длиной l замыкали с одного конца. С учётом выражений (1)–(3) волновое сопротивление и коэффициент затухания ГКВ находили по соотношениям:

$$Z = (4f l C_{\text{ж}})^{-1}; \alpha = 8,69 \pi C_p (Q_1 - Q_2) / 2 l^2 C_{\text{ж}} Q_1 Q_2,$$

где ёмкость C_p (измеренная ёмкость отрезка кабеля ГКВ в точке частоты собственного резонанса) и частота f определяются по шкалам прибора в конечной стадии измерений четвертьволновой линии.

Коэффициент изменения (уменьшения) длины волны в среде кабеля по сравнению с длиной волны в вакууме учитывается формулой $\sqrt{\epsilon} = 3 \cdot 10^8 (4f l)^{-1}$, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, например, для кабеля марки КМЖ-1×4: $f = 22,4$ МГц, $l = 1,5$ м. Пример обработки экспериментальных данных приведён в таблице.

Расчётные значения используемых в ГКВ электрических параметров кабеля КМЖ-1×4 получали с учётом (3) по формулам [13]:

$$Z = 60(\epsilon)^{-1/2} \ln(D_{\text{Cu}} / d); \quad (4)$$

$$C_{\text{ж}} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 / \ln(D_{\text{Cu}} / d), \quad (5)$$

где D_{Cu} – внутренний диаметр медной оболочки; d – диаметр внутреннего проводника; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – фундаментальная электрическая постоянная.

Установили, что результаты измерений геометрических размеров кабелей, использованных при создании опытных образцов ГКВ, отличаются от стандартных размеров. Например, для кабеля марки КМЖ-1×4 стандартные размеры составляют:

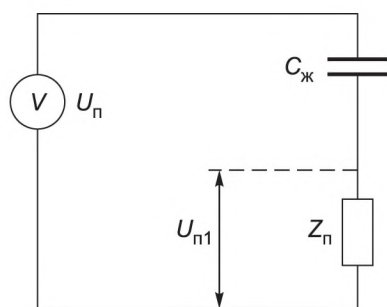


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема герметичного кабельного ввода для оценки качества и расчёта помех в одножильном экранированном кабеле:

U_n – напряжение тестового сигнала помехи; U_{n1} – падение напряжения помехи на сопротивлении цепи измерения; $C_{\text{ж}}$ – ёмкость жилы оболочки отрезка кабеля; Z_n – комплексное сопротивление цепи измерения помех

$d = 2,2$ мм; $D_{\text{Cu}} = 3,8$ мм; толщина $\Delta = 0,36$ мм и электрическое активное сопротивление $R_{\text{об}} = 3,72 \cdot 10^{-3}$ Ом/м оболочки. При подстановке в формулы (4), (5) экспериментально измеренных $\epsilon = 4,6$; $(\epsilon_r)^{-1/2} = 2,15$ получили $C = 472$ пФ/м; $Z = 15,2$ Ом. Таким образом, расчётные параметры $C = 472$ пФ/м; $Z = 15,2$ Ом практически соответствуют экспериментально измеренным $C = 475$ пФ/м; $Z = 15,0$ Ом.

Затухание в коаксиальном кабеле вычисляли по формулам:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d; \alpha_m = 6\epsilon^{-1/2} \ln(D_{\text{Cu}} / d); \alpha_d = 28,8\pi\epsilon^{-1/2} \text{tg } \delta \cdot 10^{-6},$$

где α_m , α_d – коэффициенты затухания в металлических элементах и диэлектрике при $f = 22,4$ МГц, соответственно.

Для кабеля КМЖ-1×4 получили расчётное значение $\alpha \approx 0,0083$ дБ/м (в этом случае α_d можно пренебречь) и экспериментальное $\alpha = 0,0104$ дБ/м, т. е. несколько больше ожидаемых. При изменении напряжений на частоте до 1 МГц затухание в кабелях марок КМЖ будет меньше, и снизится влияние вставки из этих кабелей на затухание в ГКВ.

В системе электрических соединений ЯФУ предусмотрена общая точка заземления экранов кабелей, которая изолирована от защитной оболочки ЯФУ, корпусов ГКВ и внешних проводников-оболочек кабелей. Экраны кабелей соединены жилой 3 (см. рис. 1) в ГКВ.

Методика оценки качества. В соответствии со схемой (см. рис. 1) составили эквивалентную схему для контура, в котором возникают помехи (рис. 2). В контуре ток от напряжения помех U_n протекает через ёмкость $C_{\text{ж}}$ жилы оболочки отрезка кабеля марок КМЖ и далее по жиле 3 кабеля и сопротивлению нагрузки Z_n (см. рис. 1). Согласно закону Ома находили отношение U_{n1}/U_n в комплексной форме и затем его модуль:

$$|U_{n1}/U_n| = |Z_n| / |WC_{\text{ж}} l|. \quad (6)$$

После подстановки значений параметров в (6) получили $|U_{n1}/U_n| = 2,4 \cdot 10^{-5}$. Тогда при $U_n = 10$ В напряжение помехи частотой 50 Гц будет $U_{n1} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ В. Таким образом, относительный уровень помехи не превышает значения $2,4 \cdot 10^{-5}$, равного тысячным долям процента (количественная мера качества).

Известно [3, 6], что аварийные ситуации на ЯФУ связаны с резким ростом температуры (до 990 °С) в области аварийного очага. Как показал опыт аварии на АЭС «Фукусима» (Япония), материал элементов ГКВ должен быть устойчив к воздействию термоударных нагрузок, возникающих в критических и аварийных ситуациях. Рост температуры в замкнутом объёме вызывает сильное увеличение давления внутренней среды, действующей в том числе на ГКВ. Малые взаимные смещения контактных поверхностей элементов ГКВ, вызванные термомеханическим воздействием на ГКВ и кабельную линию, обуславливают изменения их геометрических и электрических параметров [7, 9, 14]. Термомеханическое воздействие на ГКВ – механическую деформацию под давлением, приводящую к дестабилизации свойств ГКВ, можно эффек-

тивно диагностировать разными методами [10–12], в том числе моделированием изменения давления [14, 15].

Для экспериментального определения изменений свойств ГKB в аварийных режимах на специальном стенде были созданы условия, соответствующие изменению давления, как при аварийном повышении температуры среды вокруг ГKB. Качество монтажа кабеля и элементов узла определяет проверка на целостность жилы и правильность подключения её и оболочки к соответствующим элементам узла ввода. Сопротивление изоляции ($R_{\text{и}} \geq 10 \text{ МОм}$) ГKB измеряется прибором относительно земли (корпуса) с испытанием изоляции на 2500 В в течение 1 мин. Результаты практических измерений (диагностики и контроля качества ГKB), усреднённые по серии из 20 испытаний (после уточнения гауссова характера их распределения), приведены на рис. 3. При контроле качества по стабильности значений сопротивления изоляции измеряли ёмкость ГKB. Измеренное при моделировании аварийных режимов отклонение ёмкости от паспортных значений не выходило за пределы $\pm 5 \%$. Также находили тангенс угла диэлектрических потерь при $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$; измеренные значения (см. таблицу) по относительной величине не превышали 0,3 % в испытаниях и 0,8 % – в разных условиях эксплуатации.

Эффективность изложенного подхода контроля качества и методики выбора материалов для элементов ГKB в ЯФУ была подтверждена комплексом необходимых испытаний. Испытания партии ГKB типа ВГКК проводили с целью получения количественной оценки соответствия их параметров указанным в конструкторской и технологической документации с учётом требований стандартов [16, 17]. Испытывали партию опытных образцов ГKB в количестве 20 шт. Перечень основных испытаний включал: контроль герметичности; диагностику сопротивления изоляции; испытания на огнестойкость в режиме пожара; испытания в режимах большой и малой аварии и радиационные. Образцы ГKB подвергали испытаниям на старение (тепловым методом), сейсмические воздействия, виброустойчивость; электрическим и механическим испытаниям и другим.

Надёжность любой сложной системы, в том числе и ЯФУ, определяется надёжностью её отдельных элементов, узлов [4]. Повышение радиационной устойчивости обеспечивается подбором материалов ГKB с требуемыми свойствами [1–3, 13]. Для количественной оценки качества соединений и заземлений в ГKB и экранированном кабеле может быть использована методика моделирования, подобная приведённой в [14, 15]. Применение изложенных подходов в разной мере позволяет повысить уровень надёжности всей системы путём увеличения стойкости ГKB к воздействиям.

Заключение. Установлено, что изготовленные на основе металлокерамических материалов ГKB и кабели с минеральной изоляцией обладают повышенной устойчивостью при воздействии аварийных факторов. Разработана методика для оценки влияния электромагнитных полей на параметры цепей, включающих ГKB контрольных кабелей. Выявлено, что электрические параметры кабелей марок КМЖ позволяют применять их в составе создаваемых ГKB контрольных

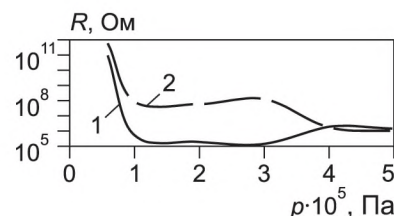


Рис. 3. Изменение сопротивления изоляции герметичного кабельно-го ввода во время испытания в аварийных режимах в зависимости от давления окружающей среды для цепей жила–кабель (1) и жила–жила (2)

кабелей ЯФУ в рамках импортозамещения.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» (Грант РФФИ № 15-08-02265).

Л и т е р а т у р а

1. **Рогов С. Л.** Метрологическое обеспечение подсистем противоаварийной защиты в составе информационно-измерительных и управляющих систем // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 68–71.
2. **Шарков А. В., Кораблёв В. А., Макаров Д. С., Минкин Д. А., Некрасов А. С., Гордейчик А. А.** Измерения тепловых потоков высокой плотности с помощью автоматизированной установки // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 46–48.
3. **Eastham S. D., Coates D. J., Parks G. T.** A novel method for rapid comparative quantitative analysis of nuclear fuel cycles // Ann. Nuclear Energy. 2012. V. 42. P. 80–88.
4. **ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012.** Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Ч. 1.
5. **Vollaro R. L., Fontana L., Vallati A.** Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Appl. Thermal Eng. 2011. V. 31(5). P. 772–778.
6. **Lin Y., Xu Z.** Cable sheath loss reduction strategy research based on the coupled line model // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. V. 30(5). P. 2303–2311.
7. **Romanishina S. A., Katyuk D. Y., Deeva V. S., Slobodyan S. M.** Dynamics layer of the sliding contact collector elements // ELNANO 2015: Proc. IEEE 35th Intern. Conf. on Electronics and Nanotechnology. P. 116–118.
8. **Sadiku M. N.** Elements of Electromagnetics. New York: Oxford University Press, 2015.
9. **Слободян М. С.** Вероятностный фактор контактных измерений // Измерительная техника. 2011. № 1. С. 47–52.
10. **Zhang L., Tian X., Boggs S. A., Bartolucci E. J.** Determination of total resistive loss in a multiple circuit, three-phase cable system // IEEE Trans. on Power Delivery. 2011. V. 26(3). P. 1939–1945.
11. **Oclon P., Cisek P., Pilarczyk M., Taler D.** Numerical simulation of heat dissipation processes in underground power

cable system situated in thermal backfill and buried in a multilayered soil // Energy Conversion and Management. 2015. V. 95. P. 352–370.

12. Gouda O. E., Farag A. A. Factors affecting the sheath losses in single-core underground power cables with two-points bonding method // Intern. J. Electrical and Computer Eng. 2012. V. 2 (1). P. 7–16.

13. Холодный С. Д., Серебрянников С. В., Боев М. А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляции и кабельной технике. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

14. Deeva V., Slobodyan S. Influence of gravity and

thermodynamics on the sliding electrical contact // Tribology Intern. 2017. V. 105 (1). P. 299–303.

15. Deeva V. S., Slobodyan S. M., Teterin V. S. Optimization of oil particles separation disperser parameters // Materials Sci. Forum. 2016. V. 870. P. 677–682.

16. ТУ 7434-4740909-909-001-923. Вводы герметичные контрольных кабелей типа ВГКК для АЭС.

17. ГОСТ 15963–79. Изделия электротехнические для районов с тропическим климатом. Общие технические требования и методы испытаний.

Дата принятия: 10.05.2017.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.328:006.915

Эталон сравнения для сличения первичных эталонов единицы напряжённости импульсного электрического поля

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

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

Рассмотрены вопросы разработки эталона сравнения для сличения национальных эталонов единицы напряжённости импульсного электрического поля. Определены и обоснованы требования к быстродействию и чувствительности эталона сравнения. Предложено выполнить эталон сравнения в виде измерительного преобразователя на основе полосковой линии. Разработана конструкция преобразователя с повышенной чувствительностью, проведены экспериментальные исследования его характеристик, подтвердившие полное соответствие заявленным техническим требованиям.

Ключевые слова: эталон, сличения, импульсное электрическое поле, измерительный преобразователь, чувствительность.

The problems of the transfer measurement standard development for comparisons of National standards of pulse electric field strength unit are considered. The main requirements for response speed and sensitivity of that transfer standard are defined and justified. It was proposed to make the transfer standard as measuring transducer based on strip line. The design of transducer with high sensitivity was developed. Experimental investigations of its characteristics proved full conformity with the specifications.

Key words: measurement standard, comparisons, pulse electric field, measuring transducer, sensitivity.

Сверхкороткие электромагнитные импульсы (СК ЭМИ) находят применение в самых различных областях, например в радиолокации высокого разрешения, задачах подавления радиосвязи и нарушения работы систем видеонаблюдения, промышленности (поиск течей, дефектов), подповерхностных локаторах, системах «зрения сквозь стены», а также при поиске людей под завалами и лавинами, дистанционном разминировании зарядов, определении уязвимости систем защиты, для защиты от космического мусора, поиска перископов подводных лодок и др. [1]. Для обеспечения единства измерений в данной области в Российской Федерации

применяются Государственный первичный специальный эталон единиц напряжённостей импульсных электрического и магнитного полей с длительностью фронта импульсов в диапазоне 0,1–10,0 нс (ГЭТ 148–2013) и 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) (разработаны и содержатся во ВНИИОФИ). В ГЭТ 148–2013 в ТЕМ-ячейках воспроизводятся мощные ЭМИ большой длительности. ГЭТ 178–2016 предназначен для воспроизведения ЭМИ с минимальной длительностью