

УДК 681.7.069

Мачехин Юрий Павлович, д.т.н.,
(Харьковский национальный университет радиоэлектроники)
Тимофеев Евгений Петрович, к.т.н.,
Расчектаева Анжелика Ивановна, научный сотрудник,
Шелехов Андрей Александрович, м.н.с.,
(Национальный научный центр «Институт метрологии», г. Харьков)
Татьянко Дмитрий Николаевич, ведущий инженер,
(Институт радиофизики и электроники, г. Харьков)

Оптические измерения в волоконно-оптических системах связи. Принципы и задачи развития

Обсуждаются особенности измерений параметров оптического излучения в оптическом волокне и волоконно-оптических системах связи. Рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений мощности оптического излучения, состояние и перспективы развития эталонной базы в Украине.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений развития волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) является увеличение скорости передачи большого объема информации с использованием оптических каналов DWDM систем. Гарантия успешного решения этой задачи является обеспечение необходимых параметров волоконно - оптических кабелей. Одной из составляющих требуемого обеспечения является использование современной контрольно-измерительной техники ее метрологического обеспечения для объективно контроля параметров оптического волокна с минимально достижимой погрешностью измерений.

На Украине также последнее десятилетие происходит стремительное развитие волоконно-оптических систем передачи информации. Это делает актуальными вопросы метрологического обеспечения измерения параметров ВОСП, как системы в целом, а также оптического волокна и элементов системы.

При этом качество и технические параметры ВОСП и их соответствие требованиям государственных стандартов определяются точностью измерений и их единством.

Метрологическое обеспечение измерений параметров оптического волокна и ВОСП имеет ряд особенностей:

- необходимость создания комплексной специализированной системы метрологического обеспечения измерений не отдельных физических величин, а области использования ВОСП и соответствующей эталонной базы; необходимость совершенствования уже имеющейся эталонной базы, как по номенклатуре, так и по диапазонам и точностям величин и параметров систем;

- довольно жесткие требования к измеряемым параметрам и величинам;

- с развитием ВОСП происходит быстрый рост как номенклатуры средств измерительной техники (СИТ), так и количества рабочих СИТ. СИТ, которые эксплуатируются на Украине в основном импортного производства;

- постоянная тенденция улучшения точности рабочих СИТ (за последние 10 лет приблизительно в 3 раза), эта тенденция приводит к постоянному отставанию по диапазонам измерения и погрешностям измерения эталонной базы системы метрологического обеспечения от потребностей практики.

Следует подчеркнуть, что номенклатура измеряемых параметров оптического волокна и ВОСП, а следовательно, и необходимость решения задач метрологического обеспечения, определяются требованиями производства и эксплуатации компонентов и систем в целом.

Измерительная техника для контроля параметров ВОСП

Важнейшими информативными параметрами ВОСП являются мощность оптического излучения, длина (место повреждения) оптического волокна (кабеля) и затухание мощности оптического излучения в оптическом волокне (кабеле). Отсюда можно выделить следующие основные СИТ для задач прокладки и эксплуатации ВОСП: оптические тестеры и оптические рефлектометры.

Оптические тестеры предназначены для измерения затухания оптического излучения в оптических волокнах и являются самыми широко используемыми средствами измерительной техники [1].

Оптический рефлектометр предназначен для измерения параметров, характеризующих распространение излучения в волоконно-оптическом тракте - расстояния до мест неоднородности (повреждения) в волокне, а также затухания оптического излучения в оптических волокнах. Основным принципом работы оптического рефлектометра - определение характеристик оптического волокна по измеренному обратному рассеянию. Основное преимущество измерений по обратному расстоянию состоит в том, что они требуют доступа только к одному концу звена волокна, при этом, позволяя определить состояние волокна [2].

При создании высокоточных измерителей мощности оптического излучения и модернизации уже существующих эталонов, одним из важнейших вопросов является выбор типа детектора, как основного элемента.

Можно выделить две группы детекторов оптического излучения:

- термические устройства: это спектрально неселективные устройства, основанные на эффекте изменения температуры, например, в термоэлементах или пироэлектрических детекторах под воздействием оптического излучения и преобразования полученного значения

температуры в электрический сигнал, с последующей его обработкой. Одним из недостатков термических устройств является инерционность изменения температуры;

- фотонные детекторы: это детекторы, которые генерируют электрический сигнал под воздействием фотонов, падающих на фоточувствительную поверхность устройства, то есть устройства, работающие на принципе фотоэффекта. Это такие устройства, как фотоэлектронные умножители, фотоэмиссионные детекторы и полупроводниковые фотодиоды. Их чувствительность, обычно, значительно зависит от длины волны излучения и ограничивается относительно узким спектральным диапазоном.

Во вторичных эталонах и эталонах-переносчиках (Transfer Standard) наибольшее распространение получило использование полупроводниковых фотодиодов, благодаря тому, что они покрывают более широкий спектральный диапазон и более производительны.

Идеальный прецизионный детектор должен иметь следующие свойства [6]: высокую чувствительность, широкий динамический диапазон, однородную пространственную чувствительность, большую фоточувствительную площадку, высокое быстродействие, надежность, стабильность во времени, спектральную однородность (spectrally flat), или, по крайней мере, плавно изменяющуюся спектральную функцию, необходимую спектральную чувствительность в пределах заданного спектрального диапазона.

Всем этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые фотодиоды. Но одним из недостатков является их переменная спектральная чувствительность. К сожалению, это наиболее важный параметр для интерполяции между точками калибровки от криогенного радиометра, как от первичного эталона. То есть, затрудняется передача единицы оптической мощности от первичного эталона в соответствии с поверочной схемой. Важность спектральной чувствительности проявляется в ее влиянии на фототок фотодиода, который является основным метрологическим выходным параметром фотодетектора. Значение спектральной чувствительности связано с коэффициентом отражения от поверхности фоточувствительного слоя фотодиода, зависящего от длины волны падающего оптического излучения. Это также влияет на внешнюю квантовую эффективность фотодиода. При изменении длины волны излучения и при постоянном угле падения излучения на фотодиод и неизменной мощности оптического излучения, будет меняться количество отраженного излучения. Следовательно, будет меняться квантовая эффективность, что приводит к изменению величины фототока. От поверхности фотодиода может отражаться более 35% мощности падающего на него оптического излучения [7]. Таким образом, на основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что большая

часть энергии оптического излучения не учитывается при измерении фототока фотодиода, причем эта величина изменяется (варьируется) от длины волны излучения. Одним из путей снижения влияния этого фактора является уменьшение количества энергии отраженной от поверхности фотодиода.

Для решения данной проблемы, Залевским и Дудой в 1983 году, была предложена схема трап детектора, в которой падающий луч подвергается многократным отражениям в последовательности фотодиодов. Данная конфигурация имеет своей целью, понижение коэффициента отражения детектора и, следовательно, понижение спектральных изменений в квантовой эффективности. Таким образом, благодаря трап конфигурации, детектор можно считать квантово однородным. Предсказуемая спектральная зависимость чувствительности трап детекторов делает их хорошо подходящими для использования в качестве эталонов единицы мощности оптического излучения (вторичные эталоны, эталоны-переносчики (Transfer Standard)).

Ведущие метрологические институты мира, такие как PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Германия), NIST (the National Institute of Standards and Technology, США), используют в качестве вторичных эталонов единицы уровня оптической мощности – системы измерения оптической мощности на базе трап детекторов. В таких устройствах квантовая эффективность достигает значения 99,9%, то есть 99,9% мощности (энергии) оптического излучения, падающего на фоточувствительную поверхность фотодиода, преобразуется в фототок.

Наиболее используемой конфигурацией трап детектора является пространственная конфигурация представленная на рис. 1. За счет наклона фотодиодов под углом 45° по отношению к направлению распространения луча учитывается поляризация излучения отраженного от поверхности фотодиодов [8].

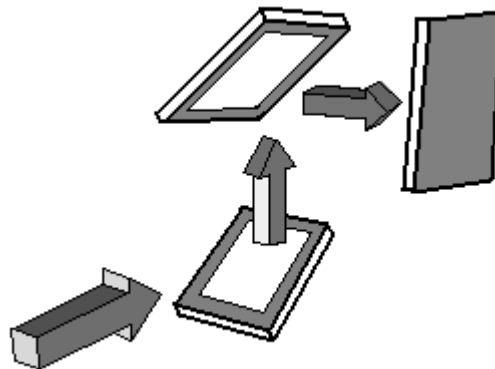


Рис. 1. Поляризационно-независимый трап детектор.

В состав эталона вводятся два измерителя средней мощности оптического излучения. Первый измеритель предназначен для работы в открытом пространстве в спектральном диапазоне от 400 нм до 1100 нм и основан на трап детекторе на базе трех фотодиодов SI 337 [9]. Второй измеритель предназначен для измерения мощности оптического излучения, распространяемого в оптическом волокне, и основан на трап детекторе, создаваемом на базе трех фотодиодов G 8370 [9]. Этот измеритель предназначен для работы в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне на длинах волн от 900 нм до 1600 нм.

Применение выбранных измерителей для эталона позволит, во-первых, обеспечить малую погрешность воспроизведения единицы средней мощности световых потоков, во-вторых, обеспечит прослеживаемость к криогенному радиометру, у которого неисключенная систематическая погрешность – 0,01 %, являющемуся абсолютным средством измерения мощности оптического излучения.

Техническое решение, которое обеспечивает расширение возможностей действующего эталона в области воспроизведения длины световода и времени распространения сигнала в световоде для поверки оптических рефлектометров, было выбрано с учетом современных достижений в области измерения параметров электромагнитного поля в материальной среде. Планируется создание этой части эталона на базе метода предложенного в [10]. В основу метода положена зависимость измеренной длины оптического волокна от времени распространения по нему оптического излучения:

$$L = \overline{cT} \quad (1)$$

где NL – длина оптического волокна;

T – время распространения оптического излучения по оптическому волокну;

c – скорость света в вакууме;

N – показатель преломления волокна.

Таким образом, погрешность определения длины оптического волокна зависит от погрешности измерения времени распространения по нему оптического излучения. Для высокоточного измерения временных интервалов распространения оптического излучения предлагается использовать метод, основанный на преобразовании этих временных интервалов в частоту. Предлагаемый метод может быть реализован на основе метода оптического «гашения» с помощью устройства приведенного в [10], которое является модификацией конструкции предложенной в [11].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В работе [1] была предложена локальная поверочная схема для средств измерения мощности лазерного излучения малых и сверхмалых уровней. В ней присутствует Государственный специальный эталон единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,6 мкм (ДЕТУ 11-03-06) (далее - эталон), который предназначен для воспроизведения, хранения и передачи рабочим эталонам и СИТ единицы средней мощности в импульсе потоков излучения в видимом и близком инфракрасном диапазоне длин волн.

В настоящий момент, метрологические характеристики Государственного специального эталона, который был разработан в 1995 году, не удовлетворяют современным требованиям экономики Украины. Эталон имеет диапазон воспроизведения единицы средней мощности непрерывного излучения у световодах от $1 \cdot 10^{-6}$ Вт до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт на длинах волн 0,85 мкм; 1,3 мкм и 1,55 мкм, среднее квадратическое отклонение (СКО) - $2 \cdot 10^{-2}$ и неисключенную систематическую погрешность - $2 \cdot 10^{-2}$ [3].

Для сравнения приведем характеристики аналогичных российских эталонов, которые созданы ВНИИОФИ [4]:

- рабочий эталон единицы средней мощности, ослабления и обратных потерь: диапазон воспроизведения единицы средней мощности излучения от $1 \cdot 10^{-12}$ Вт до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт (от минус 90 дБм до 10 дБм), $\Delta_p = (0,5 \dots 3) \cdot 10^{-2}$ (от 0,02 дБ до 0,13 дБ); $\Delta_o = (0,5 \dots 2) \cdot 10^{-2}$ (от 0,02 дБ до 0,9 дБ) [5];

- рабочий эталон единицы средней мощности (для поверки оптических тестеров, источников и приемников излучения): диапазон воспроизведения единицы средней мощности излучения от $1 \cdot 10^{-5}$ Вт до $3 \cdot 10^{-2}$ Вт, $\Delta_p = (1,5 \dots 3) \cdot 10^{-2}$ [5];

- рабочий эталон единицы длины и ослабления для световодов (для поверки оптических рефлектометров): диапазон воспроизведения единицы длины от 0,06 км до 500 км, $\Delta_L = (0,2 + 1 \cdot 10^{-5} L)$ м; диапазон воспроизведения единицы ослабления от 0,5 дБ до 25 дБ, $\Delta_A = (0,02 A)$ дБ [5].

В результате проведенного анализ современных методов и средств измерений средней мощности оптического излучения и длины оптического волокна, анализа состава и структуры аналогичных эталонов зарубежных стран (РТВ (Германия), NIST (США), ВНИИОФИ (Россия)) можно выделить основные задачи совершенствования украинского Государственного специального эталона единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения:

- расширение динамического диапазона воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения;

- уменьшение погрешности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения;
- замена комплекта полупроводниковых лазеров с волоконными выводами на длины волн 0,85 мкм; 1,3 мкм для одномодового волокна и 1,31 мкм; 1,55 мкм для многомодового волокна;
- создание дополнительного комплекса эталонной аппаратуры для воспроизведения длины и времени распространения сигнала в световоде для поверки оптических рефлектометров;
- модернизация поверочной схемы.

В соответствии с задачами модернизации и усовершенствования эталона, измерительные функции эталона расширяются за счет увеличения количества высокостабильных лазерных источников оптического излучения и расширения рабочего спектрального диапазона измерения оптической мощности. Указанная цель будет достигнута за счет ввода в состав эталона дополнительной измерительной техники: эталонного приемника оптического излучения и комплекта полупроводниковых лазеров с волоконными выводами.

НОВАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭТАЛОНА

Разработана новая функциональная схема эталона, оптическая схема той части эталона, которая обеспечивает воспроизведение и хранение единицы средней мощности оптического излучения и длины и времени распространения сигнала в световоде. Предлагаемая структурная схема эталона, приведенная на рис.2.

Для воспроизведения, хранения и передачи средней мощности оптического излучения в инфракрасном диапазоне используется комплекс лазерных источников 1 с оптоволоконными выводами. Длинами волн излучения эталонных источников являются стандартные длины волн оптического излучения, применяемые в волоконно-оптических линиях связи для многомодовых (0,85 мкм, 1,3 мкм) и одномодовых оптических волокон (1,310 мкм, 1,55 мкм).

Эталонный прецизионный измеритель оптической мощности 3, выполненный, как говорилось ранее, на базе трап детектора, принимает оптическое излучение, преобразует его в напряжение, усиливает и передает на компьютер 7 для дальнейшей обработки. Оптический аттенюатор 8 позволяет эмитировать затухание в оптическом волокне, тем самым, давая возможность исследовать динамический диапазон измерителей оптической мощности. Оптический генератор 9 позволяет измерять среднюю мощность оптического излучения в импульсе. Оптический спектроанализатор 17 позволяет определять спектральные характеристики источников оптического излучения (центральная длина волны, спектральная ширина, количество мод и т.д.).

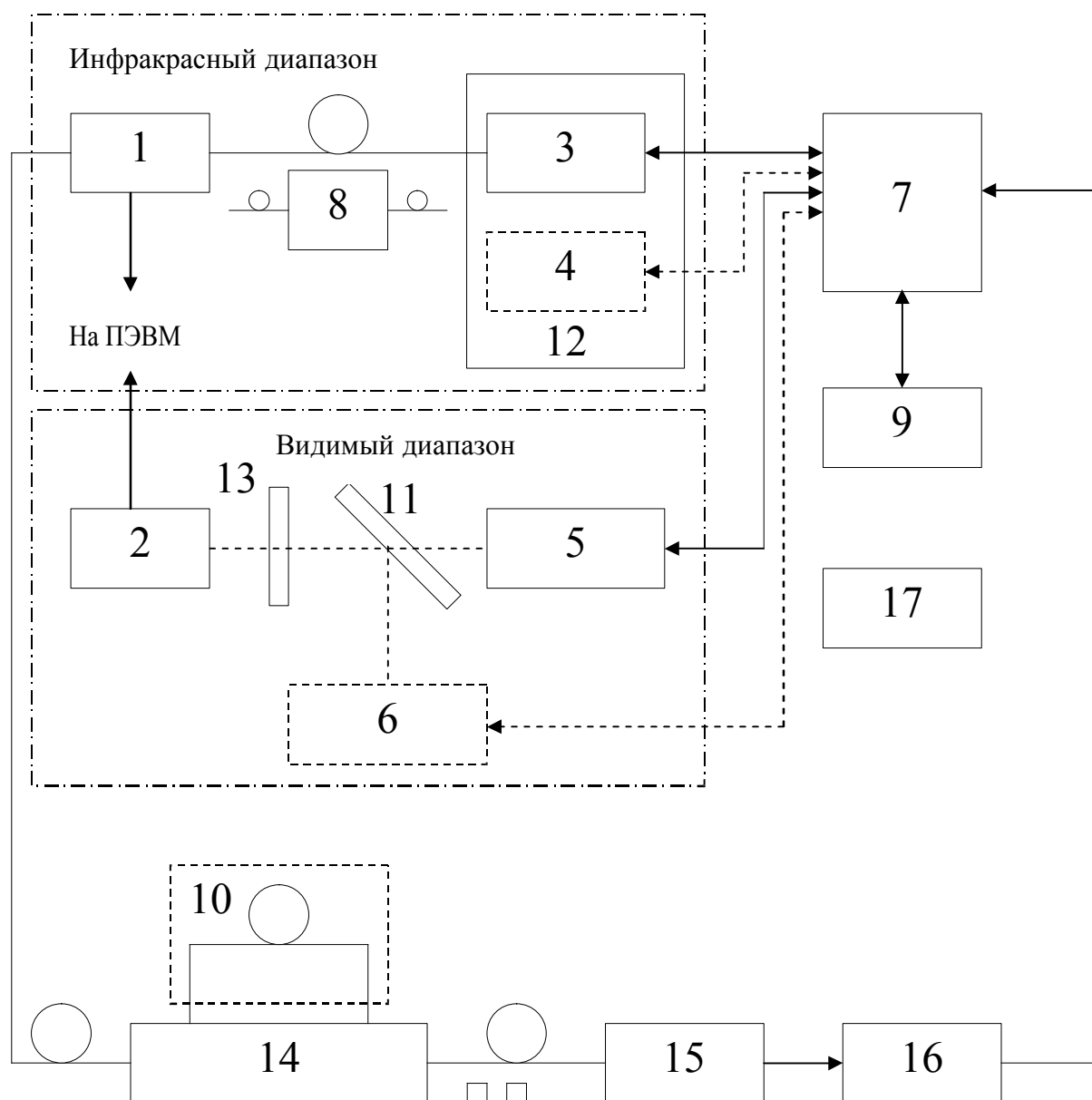


Рисунок 2. Структурная схема модернизируемого Государственного специального эталона единицы мощности слабых потоков импульсного оптического излучения. где 1 и 2 – блоки лазерных источников излучения инфракрасного и видимого диапазонов;

3 и 5 – эталонные приемники оптического постоянного излучения инфракрасного и видимого диапазонов (трап детектор, усилитель, схема передачи данных на ПЭВМ);
4 и 6 – аттестуемые (поверяемые) приемники оптического излучения;

7 – ПЭВМ;

8 – комплект волоконно-оптических аттенюаторов;

9 – оптический генератор;

10 – волоконные меры длин (мерный барабан);

11- разделительная пластина;

12 – поворотный стол;

13 – оптический ослабитель (видимый диапазон);

- 14- система пространственного совмещения лазерных пучков;
- 15 – импульсное фотоприемное устройство;
- 16 – частотомер;
- 17 - оптический спектроанализатор.

Аттестуемое (поверяемое) СИТ 4, находится на поворотном столе 12 вместе с эталонным измерителем оптической мощности. С помощью поворотного стола 12, при передаче воспроизводимой величины оптической мощности от эталонных источников оптического излучения другим СИТ, мы можем попеременно соединять эталонный и аттестуемый (поверяемый) измеритель оптической мощности с неподвижно закрепленным волокном. Это позволяет не перемещать волокно в процессе работы эталона, что повышает точностные характеристики проводимых измерений.

Часть эталона, воспроизводящая, хранящая и передающая единицу оптической мощности в видимом диапазоне спектра излучения, имеет такие же функциональные свойства, как и часть, работающая в ИК диапазоне. Источники излучения 2, передают оптическое излучение измерителю оптической мощности 5, который принимает оптическое излучение, преобразует его в напряжение и передает для дальнейшей обработки в компьютер 7. С помощью делительной пластины 11, имеющей известные метрологические характеристики, излучение от источников 2 передается, также на аттестуемое (поверяемое) СИТ. Оптический ослабитель 13 выполняет функцию аттенюатора 8 для видимого диапазона и позволяет измерять динамический диапазон измерителей мощности в видимом спектре излучения.

Опираясь на результаты исследований, а также на результаты анализа действующих эталонов России, Англии и Германии, главное направления усовершенствования эталона выбрано с учетом средств измерения мощности оптического когерентного излучения в оптических волокнах, и способов измерения времени распространения в оптических волокнах.

Таким образом, в развитие возможностей эталона по обеспечению измерения мощности в открытом пространстве было определено направление, связанное с измерением параметров оптического излучения, которое распространяется по материальным средам.

Распространение оптического излучения в материальной среде, а именно в оптических волокнах, характеризуется временем распространения и затуханием. Эти две величины являются основными параметрами, точность которых необходимо контролировать при поверке оптических рефлектометров.

Опираясь на оптическое волокно, как на основную среду, в которой распространяется излучение, предлагается расширить возможности метода [10], который разрабатывался, для прецизионного измерения времени

распространения оптического излучения в открытом пространстве и материальных средах. Физический принцип предлагаемого метода состоит в том, что распространение плоской электромагнитной волны по замкнутому оптическому пути (в открытом пространстве или материальной среде) может приводить к формированию прямоугольных оптических импульсов, длительность которых определяется только длиной замкнутого оптического пути.

Часть эталона, обеспечивающая измерение времени распространения оптического излучения в материальной среде, состоит из системы пространственного совмещения лазерных пучков 14; импульсного фотоприемного устройства 15 и частотомера 16.

Таким образом, выбранное техническое решение реализации измерения времени распространения оптического излучения в волокне, позволит с помощью изменения частоты следования оптических меандров, определить время распространения и длину оптического волокна.

ВЫВОДЫ

Внедрение результатов рассмотренных в данной работы, позволит создать современное метрологическое обеспечение широкого парка СИТ в данной области, которые используются, как в территориальных органах Госпотребстандарта Украины, так и в ведомственных метрологических службах. На сегодняшний момент номенклатура СИТ по видам составляет около 50, а по типам – около 500.

Выходных эталонов с требуемыми метрологическими характеристиками в Украине нет.

После усовершенствования своих метрологических характеристик, эталон будет находиться на уровне аналогичных эталонов России (ВНИИОФИ). Эталон будет полностью удовлетворять потребности Украины по обеспечению единства измерений в этой области измерений в стране на данном этапе и на ближайшую перспективу.

Литература:

1. Ю.П.Мачехин, А.И. Расчектаева. Метрологическое обеспечение оптических тестеров и ваттметров. Радиотехника, 2000. № 116. С. 149-152.
2. Yu.P. Machekhin, A.I. Raschektayeva. Metrology maintenance optic time-domain reflectometers. LFNМ'2001 3rd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Kharkov. 2001.
3. ДСТУ 3387:96 Державна повірочна схема для засобів вимірювань потужності слабких імпульсних світлових потоків випромінювання від $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Вт в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 1,6 мкм. –Київ: Держстандарт України, 1996. – 5 с.
4. В.С. Иванов, В.Е. Кравцов, С.В. Тихомиров. Состояние и проблемы обеспечения единства измерений в области волоконно-оптических систем передачи информации. Измерительная техника, 2005. № 11. С. 60-64.
5. **ГОСТ 8. -2004** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. –М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 12 с.
6. N.P. Fox. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes. Metrologia, 1995/96, №32. P. 535-543.
7. J.L. Gardner. Transmission trap detectors. Applied Optics, Vol. 33, No. 25/1. 1994. P. 5914-5918.

8. J.M. Palmer. Alternative Configurations for Trap Detectors. Metrologia. 1993. № 30. P. 327-333.
9. www.hamamatsu.com
10. Ю.П.Мачехин, А.И. Расчектаева. Метод точного измерения длины оптического волокна и его реализация. Украинский метрологический журнал, 2007. № 3. С. 149-152.
11. А.Г. Данелян, Ю.П. Мачехин. Новый метод практической реализации определения метра. Украинский метрологический журнал, 2001. № 1. С. 53-57.

СТАН И ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НА УКРАЇНІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЄДНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ В ГАЛУЗІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА И ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Мачехин Ю.П.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Тимофєєв Є.П., Расчектаєва А.І.

Національний науковий центр «Інститут метрології», м. Харків

Татьянко Д.М.

Інститут радіофізики та електроніки, м. Харків

Розглянуті стан и перспективи розвитку на Україні забезпечення єдності вимірювань в галузі вимірювань параметрів оптичного волокна и волоконно-оптичних систем. Запропоновано структурну схему Державного спеціального еталона одиниці потужності імпульсних світлових потоків випромінювання, який модернізується.

CONDITION AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT IN UKRAINE OF ASSURANCE OF UNIFORMITY OF MEASUREMENTS IN THE FIELD OF MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE OPTICAL FIBRE AND OPTICAL FIBRE SYSTEMS

Machekhin Yu.P.

Kharkov National university radioelectronics

Timofeev E.P., Raschektayeva A.I.

National scientific centre «Institute of metrology», Kharkov

Татьянко Д.М.

Institute radiophysics and electronics, Kharkov

Questions of condition and prospects of development in Ukraine of assurance of uniformity of measurements in the field of measurement of parameters of an optical fibre and optical fibre systems are considered. The block diagram of the modernized of the State Special Standard of a Power Unit of Weak Pulse Light Streams of Radiation is proposed.

Сведения об авторах: Мачехин Юрий Павлович, докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедры Физических основ электронной техники ХНУРЭ, пр. Ленина, 14, Харьков, 61166, Украина, тел. (+38 057) 702 1484, e-mail: yuri_m49@mail.ru

Тимофеев Евгений Петрович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Национальный научный центр «Институт метрологии», ул. Мироносицкая, 42, Харьков-2, Украина, тел.: ((+380 57) 704 9750.

Расчектаева Анжелика Ивановна, научный сотрудник, Национальный научный центр «Институт метрологии», ул. Мироносицкая, 42, Харьков-2, Украина, тел.: ((+38 057) 704 9783, e-mail: optolas@metrology.kharkov.ua

Татьянко Дмитрий Николаевич, ведущий инженер, Институт радиофизики и электроники, ул. Академика Проскуры 12, Харьков, Украина, тел.: ((+38 057) 720 3371, e-mail: optolas@metrology.kharkov.ua