



СРЕДСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

*О.В.Колмогоров, С.С.Донченко, Д.В.Прохоров,
Б.А.Акулин, Н.М.Юстус,
Всероссийский научно-исследовательский инсти-
тут физико-технических и радиотехнических
измерений, Менделеево*

Создание, испытания и эксплуатация волоконно-оптических систем связи и передачи информации (ВОСП), систем мониторинга на основе волоконно-оптических датчиков невозможны без проведения измерений их характеристик с помощью соответствующих средств измерений. В статье приведены требования нормативных документов по обеспечению единства измерений, рассмотрены методы и аппаратура, применяемые при поверке и калибровке средств измерений параметров ВОСП и волоконно-оптических датчиков.

Волоконно-оптические системы связи и передачи информации играют важную роль в обеспечении потребностей современного общества в услугах связи, в обеспечении потребностей промышленности, транспорта и специальных потребителей в оперативной передаче данных [1]. Специализированные волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) используются при решении задач частотно-временного обеспечения для передачи сигналов эталонной частоты и синхронизации шкал времени [2-4], при разработке и испытаниях радиоэлектронных систем для уменьшения влияния электромагнитных помех путем использования модуляции оптического излучения радиочастотным сигналом. Кроме того, волоконно-оптические линии связи используются в системах охраны и мониторинга состояния технических объектов и сооружений [1].

Создание, испытания и эксплуатация ВОСП невозможны без проведения измерений их характеристик и использования соответствующих средств измерений, в частности оптических реф-

INSTRUMENTS FOR METROLOGICAL SUPPORT OF OPTICAL TIME DOMAIN REFLECTOMETERS AND FIBER OPTIC SENSORS

*O.V.Kolmogorov, S.S.Donchenko, D.V.Prokhorov,
B.A.Akulin, N.M.Yustus,
Russian Research Institute of Physical-Technical and
Radiotechnical Measurements, Mendeleyevo*

Development, testing and operation of fiber optic communication and information transmission systems (FOTS), monitoring systems based on fiber optic sensors are not possible without measurement of their characteristics by using the appropriate measuring instruments. The article presents requirements of regulatory documents ensuring the uniformity of measurements, discusses methods and means used for the check and calibration of instruments of measurement of FOTS parameters and fiber optic sensors.

Fiber optic communication and information transmission systems play significant role in meeting the demands of modern society with respect to communication services, in meeting the demands of industry, transport and special consumers with respect to operational data transmission [1]. Specializes fiber optic communication lines (FOCL) are used for the solution of tasks of frequency-time support for the transmission of signals with reference frequency and synchronization of time scales [2-4], during the development and testing of radio electronic systems for the reduction of impact of electromagnetic interference at the expense of use of optical radiation modulation by radio-frequency signal. In addition, the fiber optic communication lines are used in the systems intended for security and monitoring of state of technical objects and structures [1].

Development, testing and operation of FOCL are not possible without measurements of their characteristics and use of the appropriate measuring instruments, in particular, optical time domain reflectometers. Monitoring systems based on fiber optic communication lines equipped with fiber optic sensors have measuring functions proceeding from their intended purpose.

лектометров. Системы мониторинга на основе волоконно-оптических линий связи, оснащенные волоконно-оптическими датчиками, уже исходя из своего назначения обладают измерительными функциями.

Оптические рефлектометры представляют собой средства измерений длины световода, времени распространения сигнала в световоде, и распределенного ослабления. Волоконно-оптические датчики (ВОД) – это первичные преобразователи измеряемой физической величины (температуры, давления, перемещения, ускорения и др.), используемые в комплексе с аппаратурой, обеспечивающей регистрацию и обработку сигнала с ВОД с последующим вычислением значения измеряемой величины. В соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений" [5], средства измерений, применяемые в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, подлежат утверждению типа и периодической поверке. К сфере применения ВОД относятся такие объекты, как нефте- и газопроводы, атомные электростанции, здания, сооружения и др. [1], что придает особую важность обеспечению точности и достоверности результатов измерений, проводимых с помощью ВОД.

При создании и эксплуатации волоконно-оптических линий связи, как и систем на основе ВОД, возникает потребность измерений таких величин, как длина оптического кабеля, мощность оптического излучения, ослабление, спектральные характеристики оптического излучения, временные параметры модулированного оптического излучения. Кроме того, при градуировке и поверке ВОД необходимо проводить измерения регистрируемой датчиком величины с помощью соответствующих высокоточных средств измерений и эталонов.

Для достижения требуемой точности измерений перечисленных характеристик необходимо обеспечить прослеживаемость используемых средств измерений к государственным эталонам соответствующих единиц величин. Прослеживаемость – свойство эталона единицы величины или средства измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с государственным первичным эталоном соответствующей единицы величины посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений [5].

Порядок передачи единиц физических величин от эталонов к средствам измерений параметров

Optical time domain reflectometers represent the measuring instruments with respect to light guide length, time of signal propagation in light guide and distributed attenuation. Fiber optic sensors (FOS) represent the primary transformers of measured physical parameter (temperature, pressure, displacement, acceleration etc.) used in combination with the equipment, which provides recording and procession of signal from FOS with the further calculation of the value of measured parameter. In accordance with the Federal Law No. 102-FZ "On Uniformity of Measurements" [5], the measuring instruments applied in the area of state regulation of measurement uniformity are subject to approval of type and periodic checks. Such objects as oil and gas pipelines, nuclear power plants, buildings, structures etc. [1] refer to the scope of FOS application; it gives critical importance to the issue of provision of accuracy and reliability of results of the measurements performed by FOS.

When developing and operating the fiber optic communication lines based on FOS, the necessity to measure such parameters as length of optical cable, power of optical radiation, attenuation, spectral characteristics of optical radiation, time characteristics of modulated optical radiation occurs. Besides, during the graduation and check of FOS it is necessary to perform measurements of the parameters recorded by sensor using the relevant high-accuracy measuring devices and standards.

In order to reach the required accuracy of measurements of listed characteristics it is required to ensure the traceability of used measuring instruments with respect to state standards of the relevant units. Traceability is the property of unit standard or measuring instrument, which consists in documented establishment of their connection with the state primary standard of the relevant unit by comparison of unit standards, check and calibration of measuring instruments [5].

Procedure of transfer of physical units from standards to measuring instruments with respect of FOTS parameters, in particular, to fiber optic time domain reflectometers, is established by GOST 8.585-2013 [6]. The fragment of graphic part of this measurement chart, which determines the transfer of measurement units to optical time domain reflectometers, is given in Fig. 1.

The complexes of instruments, which include optical generators, reels of optic fiber and auxiliary equipment, are used in the capacity of industrial standard of the units of length, time of signal propagation in light guide and distributed attenuation. Optical generators form the repeating optical pulses with standardized

ВОСП, в частности к волоконно-оптическим рефлектометрам, устанавливается ГОСТ 8.585-2013 [6]. Фрагмент графической части данной поверочной схемы, определяющий передачу единиц величин к оптическим рефлектометрам, приведен на рис.1.

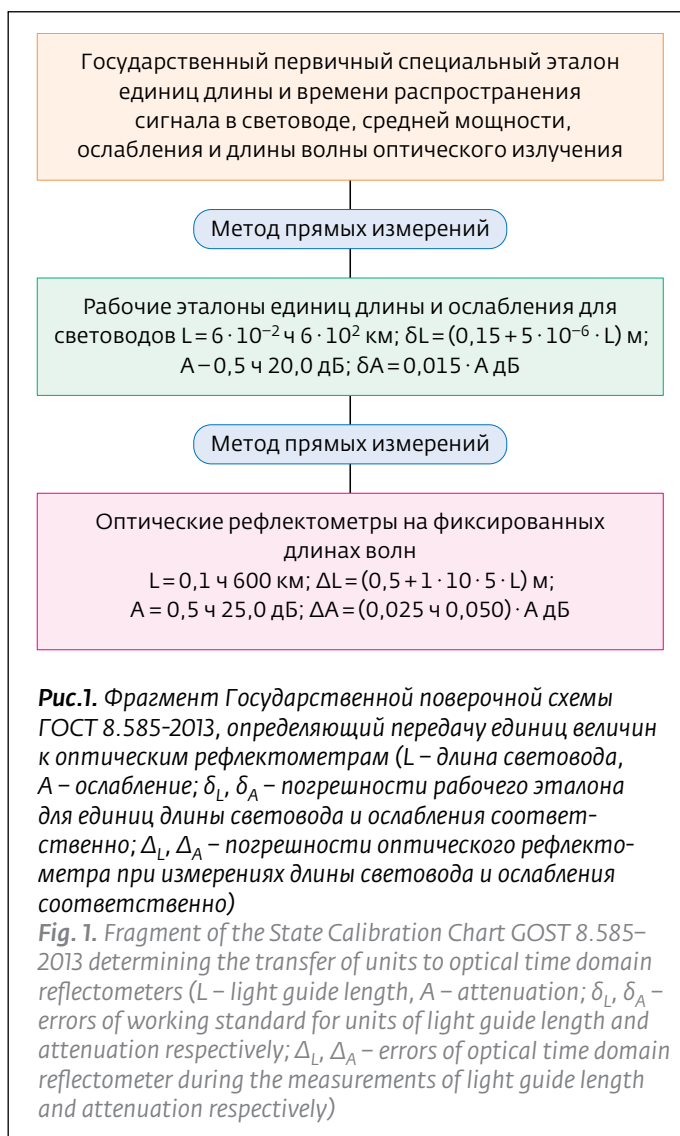
В качестве рабочих эталонов единиц длины, времени распространения сигнала в световоде и распределенного ослабления используются комплексы аппаратуры, включающие оптические генераторы, катушки оптического волокна и вспомогательное оборудование. Оптические генераторы формируют повторяющиеся оптические импульсы с нормированными интервалами времени между ними, которые соответствуют заданной длине оптического кабеля. Эти импульсы подаются в качестве эталонного сигнала на вход рефлектометра с целью определения его погрешности при измерениях длины световода. Для проверки погрешности оптического рефлектометра при измерениях ослабления используется нормирование амплитуды импульсов, поступающих с оптического генератора.

Рабочие эталоны единиц средней мощности и ослабления строятся на основе высокоточных измерителей оптической мощности и стабилизированных источников излучения на фиксированных длинах волн. При поверке средств измерений (СИ) средней мощности и ослабления проводится сравнение поверяемого СИ с эталонным измерителем оптической мощности.

Рабочие эталоны единицы длины волны строятся на основе источников излучения и кювет с газами, у которых спектр пропускания оптического излучения содержит ряд пиков поглощения с нормируемой длиной волны. При поверке оптических спектроанализаторов проводятся измерения длин волн пиков поглощения поверяемыми СИ и сравнение результатов измерений длин волн с паспортными значениями.

Основными нормативными документами, регламентирующими методики поверки средств измерений характеристик ВОСП, являются:

- ГОСТ Р 8.720-2010. ГСИ. Измерители оптической мощности, источники оптического излучения, измерители обратных потерь и тестеры оптические малогабаритные в ВОСП. Методика поверки;
- Рекомендация по метрологии Р 50.2.069-2009. ГСИ. Спектроанализаторы оптические в ВОСП. Методика поверки;
- Рекомендация по метрологии Р 50.2.070-2009. "ГСИ. Атенюаторы в ВОСП. Методика поверки";



time intervals between them, which correspond to the set length of optical cable. These pulses are supplied in the capacity of reference signal at the entry of reflectometer in order to determine its error during the measurements of light guide length. In order to verify the error of optical time domain reflectometer during the attenuation measurements the standardization of amplitude of pulses, which come from the optical generator, is used.

Working standards of the measurement units of average power and attenuation are made on the basis of high-accuracy meters of optical power and stabilized radiation sources at the fixed wavelengths. When verifying the measuring instruments (MI) of average power and attenuation the comparison of checked MI with standard meter of optical power is performed.

Working standards of the measurement unity of wavelength are made on the basis of radiation sources



- Рекомендация по метрологии Р 50.2.071-2009. "ГСИ. Рефлектометры оптические. Методика поверки".

В целях метрологического обеспечения специализированных ВОЛС в ФГУП "ВНИИФТРИ" создан комплекс аппаратуры контроля характеристик оптического излучения, в состав которого входит измерительная аппаратура РЭСМ-ВС и РЭДВ, аттестованная в качестве рабочих эталонов, средства измерений временных характеристик оптического излучения (осциллограф с широкополосным оптико-электронным преобразователем), оптический анализатор спектра. Для повышения точности определения задержки между оптическими импульсами при калибровке оптических рефлектометров по шкале длины в данной аппаратуре используется комплексирование оптического генератора с цифровым запоминающим осциллографом, выполняющим измерения интервалов времени с субнаносекундной точностью. Предложенный комплекс аппаратуры позволяет решать основные задачи по контролю характеристик ВОЛС и средств измерений их параметров, в том числе оптических рефлектометров. Основные метрологические характеристики комплекса

and cuvettes with gases, in which the transmission spectrum of optical radiation contains a number of absorption peaks with standardized wavelength. When verifying the optical spectrum analyzers, the measurements of wavelengths of absorption peaks by verified MI and comparison of wavelength measurement results with certified values are performed.

The main regulatory documents, which regulate the methods of verification of measuring instruments of FOTS characteristics, are:

- GOST R 8.720-2010. "State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Optical power meters, sources of optical radiation, meters of inverse losses and optical small testers in FOTS. Methods of verification";
- Recommendation in metrology R 50.2.069-2009. "State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Optical spectrum analyzers in FOTS. Methods of verification";
- Recommendation in metrology R 50.2.070-2009. "State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Attenuators in FOTS. Methods of verification";
- Recommendation in metrology R 50.2.071-2009. "State System for Ensuring the Uniformity of

Основные метрологические характеристики комплекса аппаратуры контроля характеристик оптического излучения
Main metrological characteristics of instrument complex for control of optical radiation characteristics

Метрологическая характеристика Metrological characteristic	Значение Value
Диапазон измерений средней мощности оптического излучения, Вт Range of measurements of average power of optical radiation, W	От 10^{-10} до $2 \cdot 10^{-3}$ from 10^{-10} to $2 \cdot 10^{-3}$
Границы относительной погрешности измерений средней мощности оптического излучения на длинах волн калибровки (при доверительной вероятности 0,95), % Bounds of relative error of measurements of average power of optical radiation at the wavelengths of calibration (at confidence probability of 0.95), %	$\pm 2,5$
Диапазон установки значений времени распространения сигнала в световоде, с Range of setting of the values of time of signal propagation in light guide, s	От $6 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ from $6 \cdot 10^{-7}$ to $6 \cdot 10^{-3}$
Границы абсолютной погрешности установки значений времени распространения сигнала в световоде t (при доверительной вероятности 0,95), с Bounds of absolute error of setting of the values of time of signal propagation in light guide t (at confidence probability of 0.95), s	$\pm (1,5 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-6} \cdot t)$
Диапазон значений длины световода, м Range of values of light guide length, m	От 60 до $6 \cdot 10^5$ from 60 to $6 \cdot 10^5$
Границы абсолютной погрешности установки значений длины световода (при доверительной вероятности 0,95) Bounds of absolute error of setting of the values of light guide length (at confidence probability of 0.95)	$\pm (0,15 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ м, где L – значение длины, м. $\pm (0,15 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot L)$ m, where L – length value, m
Границы относительной погрешности длин волн линий поглощения при доверительной вероятности 0,95 (в спектральных диапазонах от 1260 до 1340 нм и от 1530 до 1630 нм) Bounds of relative error of absorption line wavelengths at confidence probability of 0.95 (within spectral ranges from 1260 to 1340 nm and from 1530 to 1630 nm)	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$

аппаратуры контроля параметров оптического излучения приведены в таблице. Комплекс позволяет проводить испытания в целях утверждения типа, поверку и калибровку СИ характеристик ВОСП: оптических рефлектометров, измерителей мощности оптического излучения, оптических тестеров, источников оптического излучения, оптических аттенуаторов, оптических анализаторов спектра, анализаторов цифровых линий связи. С помощью комплекса возможно также проведение высокоточных измерений характеристик ВОЛС: средней мощности и ослабления оптического излучения, длины световода, спектральных и временных характеристик оптического излучения.

Метрологическое обеспечение ВОД и измерительных систем на их основе охватывает более широкий, по сравнению с ВОСП, ряд задач, касающихся не только характеристик оптического излучения, переносящего сигналы внутри системы, но и измеряемых датчиками физических величин, характеризующих состояние контролируемого системой объекта (температуры, давления, вибрации и др.). Причем обеспечение требуемой точности и достоверности измерений именно этих, входных по отношению к системе, величин, является первоочередной задачей, для решения которой необходимо использовать эталоны единиц измеряемых системой величин.

Порядок экспериментального определения метрологических характеристик ВОД поясняет обобщенная схема, представленная на рис.2. На схеме приведены следующие основные элементы: ВОД с аппаратурой регистрации сигналов, оборудование для воспроизведения воздействующих величин (например, термокамера, вибростенд и т.д.) и эталонная аппаратура (эталонный датчик с аппаратурой регистрации). При градуировке ВОД воспроизводимая оборудованием величина (температура, давление, ускорение и др.) воздействует одновременно на ВОД и эталонный датчик, размещенные в камере (на стенде), сигналы с датчиков поступают на соответствующую аппаратуру регистрации, где фиксируются измеренные значения воздействующей на исследуемый ВОД величины и её действительные значения, определяемые с помощью эталонного датчика. Это позволяет определить значения коэффициентов преобразования датчиков и оценить их погрешность.

Для проведения испытаний в целях утверждения типа и поверки различных групп волоконно-оптических датчиков и систем на их

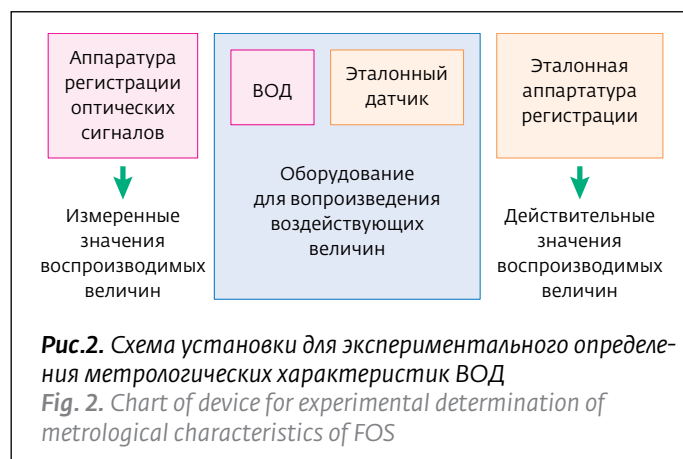


Рис.2. Схема установки для экспериментального определения метрологических характеристик ВОД

Fig. 2. Chart of device for experimental determination of metrological characteristics of FOS

Measurements. Optical time domain reflectometers. Methods of verification".

For the purpose of metrological support of the specialized FOCL, at the Federal State Unitary Enterprise "VNIIFTRI" the complex of equipment intended for the control of optical radiation characteristics is developed; this complex consists of measuring instruments RESM-VS and REDV certified in the capacity of working standards, measuring instruments with respect to time characteristics of optical radiation (oscilloscope with broad-band optic-electronic transformer), optical spectrum analyzer. In order to enhance the accuracy of delay between the optical pulses during the calibration of optical time domain reflectometers by the length scale, in these instruments complexing of optical generator with digital memory oscilloscope, which performs the measurements of time intervals with sub-nanosecond accuracy. This instrument complex allows solving the main tasks in control of FOCL characteristics and instruments for measurements of their parameters, including the optical time domain reflectometers. The main metrological characteristics of the instrument complex for the control of optical radiation characteristics are given in table. This instrument complex allows testing for the purposes of approval of type, verification and calibration of MI of FOTS characteristics: optical time domain reflectometers, meters of optical radiation power, optical testers, sources of optical radiation, optical attenuators, optical spectrum analyzers, analyzers of digital communication lines; also it allows performing high-accuracy measurements of FOCL characteristics: average power and attenuation of optical radiation, light guide length, spectral and time characteristics of optical radiation.

Metrological support of FOS and measuring systems based on them covers greater number of tasks in comparison with FOTS, which concerns not only



основе могут быть использованы возможности ФГУП "ВНИИФТРИ" по проведению высокоточных измерений температуры, давления, перемещений, параметров вибрации, и оснащение соответствующими эталонами, к которым относятся: Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне от 0,3 до 273,16 К, Государственный вторичный эталон единицы давления в диапазоне от 0,02 до 1600 МПа, рабочие эталоны единицы температуры, рабочий эталон единиц относительной влажности газов и температуры в диапазонах от 5 до 95% и от 5 до 60 °С, рабочие эталоны единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела, а также эталоны других физических величин.

Использование имеющейся в стране эталонной базы в целях метрологического обеспечения систем мониторинга на основе ВОД необходимо для выполнения требований нормативных документов по обеспечению единства измерений. Кроме того, использование высокоточных СИ и эталонов представляется целесообразным при разработке и исследованиях перспективных ВОД с улучшенными метрологическими характеристиками.

characteristics of optical radiation transmitting the signals inside the system but also physical parameters measured by sensors, which characterize the state of object controlled by the system (temperature, pressure, vibration etc.). And provision of required accuracy and reliability of measurements of these parameters, which are input in relation to the system, is the primary task, for the solution of which it is necessary to use unit standards of the parameters measured by the system.

Procedure of experimental determination of metrological characteristics of FOS is explained by the generalized chart given in Fig. 2. The following main elements are shown in chart: FOS with the instruments for signal record, equipment for reproduction of actuating quantities (for example, heat chamber, vibration bed etc.) and reference instrumentation (reference sensor with recording instruments). When calibrating FOS the quantity reproduced by equipment (temperature, pressure, acceleration etc.) influences simultaneously on FOS and reference sensor located in the chamber (at the test bench), signals from sensors get onto the relevant recording instruments where the measured values of the parameter influencing of tested FOS and its actual values, which are determined by reference sensor. It allows determining the values

ЛИТЕРАТУРА

1. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы /Под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. – М.: Техносфера, 2010.
2. Федорова Д.М., Балаев Р.И., Курчанов А.Ф., Троян В.И., Малимон А.Н. Передача эталонных радиочастот по волоконно-оптической линии с электронной компенсацией возмущений. – Измерительная техника, 2015, № 9, с. 34–37.
3. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени. – Измерительная техника, 2015, № 1, с. 14–17.
4. Садовников М.А., Сумерин В.В. Беззапронные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС. – Вестник ГЛОНАСС, 2012, № 3 (7), с. 39–42.
5. Федеральный закон от 26 июня 2008 года N 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений".
6. ГОСТ 8.585-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

of sensor conversion coefficients and evaluating their error.

In order to carry out the tests for the purpose of type approval and calibration of different groups of fiber optic sensors and systems based on them, the capabilities of FSUE "VNIIFTRI" with respect to high-accuracy measurements of temperature, pressure, movements, parameters of vibration and equipment with the relevant standards, in particular: state primary temperature standard within the range from 0.3 to 273.16 K, state secondary pressure standard within the range from 0.02 to 1600 MPa, working temperature standards, working standard of relative humidity of gases and temperature within the ranges from 5 to 95% and from 5 to 60 °C, working standards of length, speed and acceleration in case of oscillating motion of solid body and standards of other physical parameters.

Use of the standard base existing in country for the purposes of metrological support of monitoring systems based on FOS is necessary in order to meet the requirements of regulatory documents in ensuring the measurement uniformity. Besides, use of high-accuracy MI and standards is reasonable in case of development and studies of prospective FOS with improved metrological characteristics.

НОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Компания Rosendahl Nextrom сообщила об освоении производства автоматического двойного приемного устройства для намотки оптического волокна (ОВ) в процессе его производства. При вытяжке волокно наматывается на большие катушки на двойном приемном устройстве. Для установки и разгрузки тяжелых катушек используется специальная тележка. Катушки транспортируются к линии испытания волокна для проверки его на прочность. В устройстве внедрена новейшая технологическая система управления с использованием сервоприводов переменного тока и алгоритмом управления перемещением.

Стандартные катушки вмещают от 300 до 1500 км волокна. Скорость вращения приемных устройств достигает 3000 м/мин, в то время как скорость вытяжки волокна немного меньше. Боль-

шие катушки, вмещающие до 1500 км волокна, изготавливаются из алюминия, который является хорошей альтернативой пластмассе, обеспечивая необходимую точность и долговечность и не утяжеляя конструкцию. Тележка специальной конструкции помогает обеспечивать связь приемного узла башни вытяжки с линией тестирования волокна. Линия испытания волокна на прочность

состоит из отдающего устройства, зоны контроля волокна на прочность и узла приема. Волокно испытывается на прочность по всей длине на скорости до 3000 м/мин путем растяжения волокна в зоне контроля на 1%. Волокно наматывается на транспортные катушки по 25 или 50 км, которые затем упаковываются для отправки потребителю.

www.lastmile.su

