РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ РАМАНОВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ВОЛС-ВЛ

*Е.В.Белянко, М.С.Зюзин, ЧП "Оптиксффт";
В.И.Бобров, М.Л.Гринштейн, ЗАО "Институт
информационных технологий", Минск, Беларусь;
О.И.Богданова, А.В.Орешкин,
ОАО "Союзтехэнерго", Москва*

Контроль температуры многих протяженных объектов в большинстве случаев проводят, измеряя температуру оптического волокна (ОВ), проложенного вдоль этих объектов. Разработан оптический рефлектометр, определяющий распределение температуры вдоль ОВ по характеристикам рамановского и рэлеевского рассеяния зондирующего импульсного сигнала. Обработка сигналов рассеяния учитывает зависимость затухания ОВ от длины волны и количества мест соединений ОВ, из которых состоит ВОЛС. Проведенные измерения показали сложный, неравномерный характер нагрева ОВ при проведении плавки гололеда и подтвердили необходимость контроля температуры вдоль всей длины ОВ.

При проведении плавки гололеда на ВОЛС воздушных линий электропередачи для предотвращения перегрева оптического волокна (ОВ) необходимо контролировать температуру. Для этой цели был разработан оптический рефлектометр, определяющий распределение температуры вдоль ОВ по характеристикам рамановского и рэлеевского рассеяния зондирующего импульсного сигнала. Обработка сигналов рассеяния учитывает зависимость затухания ОВ от длины волны и наличие мест соединения ОВ, из которых состоит ВОЛС. Система распределенного контроля температуры установлена на нескольких ВОЛС-ВЛ, находящихся в районах, где возможно образование гололеда на оптическом кабеле. Проведенные измерения показали сложный, неравномерный характер нагрева ОВ

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF RAMAN OTDR FOR SYSTEM OF OPTICAL FIBERS DISTRIBUTED TEMPERATURE CONTROL OF OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

*E.V.Belianko, M.S.Ziuzin,
Private Enterprise "Optixsoft";
V.I.Bobrov, M.L.Grinstein,
CJSC "Institute of Information Technologies", Minsk,
Belarus;
O.I.Bogdanova, A.V.Oreshkin,
OJSC "Soyuztekhnenergo", Moscow*

In many cases, temperature control of extended objects is performed by the measurement of temperature of optical fiber (OF) laid along or inside of these objects. The optical time domain reflectometer, which determines the temperature distribution along OF by the measurement of characteristics of Raman and Rayleigh, is developed. Processing of scattering signals takes into account the wavelength dependence of OF attenuation and availability of OF junctions, which fiber optic communication line (FOCL) consists of. The Raman OTDRs were used for temperature control of optical power ground wire (OPGW) during ice melting. Performed measurements showed complex, inhomogeneous character of OF heating during ice melting and proved the necessity of temperature control along the whole OF length.

When performing ice melting at FOCL of overhead power transmission lines, the temperature control is needed in order to avoid OF overheating. For this purpose, the optical time domain reflectometer, which determines the temperature distribution along OF by the measurement of the characteristics of Raman and Rayleigh scattering is developed. Processing of scattering signals takes into account the wavelength dependence of OF attenuation and availability of OF junctions, which FOCL consists of. The system of distributed temperature control is installed at several FOCL

при проведении плавки гололеда и подтвердили необходимость контроля температуры вдоль всей длины ОВ. В то же время именно такой контроль позволяет эффективно управлять процессом плавки гололеда. В период времени, когда не проводится плавка гололеда, система работает в режиме непрерывного мониторинга основных физических параметров ОВ.

В настоящее время контроль температуры многих протяженных объектов – тоннелей, шахт, трубопроводов, кабельных линий – часто осуществляется путем измерения температуры оптического волокна (ОВ), проложенного вдоль или внутри этих объектов. При этом температура ОВ служит индикатором для определения других физических характеристик или состояния объектов: утечек из трубопроводов, замыкания в силовых кабелях и т.д. В зависимости от требуемого диапазона измерения температур используются либо стандартные телекоммуникационные, либо специализированные ОВ. Само кварцевое ОВ выдерживает высокие температуры, но полимерное покрытие стандартных ОВ нельзя нагревать выше 85–100 °С, поскольку оно начинает деградировать, что в свою очередь может вызвать увеличение затухания ОВ.

Однако есть ситуации, при которых требуется контроль температуры самого ОВ, например плавка гололеда – удаление обледенения оптического кабеля путем нагрева его электрическим током. В волоконно-оптических линиях связи на воздушных линиях электропередачи (ВОЛС-ВЛ) часто используется оптический кабель в грозозащитном тросе (ОКГТ). В ряде климатических районов возможно образование гололеда на таком кабеле. Одним из способов снятия льда является пропускание по ОКГТ электрического тока, что приводит к его нагреву и сбрасыванию льда. В ходе этого процесса ОВ также нагревается, и необходимо не допускать увеличения его температуры выше указанных значений.

ВОЛС-ВЛ имеют достаточно большую протяженность. Налепание льда на кабеле неравномерно по его длине из-за различия в условиях окружающей среды: температуры, влажности, скорости и направления ветра. Различаются также условия расположения ОВ относительно оболочки кабеля, от которой тепло передается к ОВ. Поэтому эффективный контроль состояния ОВ возможен только при непосредственном измерении его температуры и ее распределения вдоль ОКГТ. Какие-либо точечные датчики, установленные на внешней

with OPGW located in the regions where the ice formation on optical cable is possible. Performed measurements showed complex, inhomogeneous character of OF heating during ice melting and proved the necessity of temperature control along the whole length of OF. At the same time, such control allows controlling efficiently the process of ice melting. During the period when ice melting is not performed the system works in the mode of continuous monitoring of the main OF physical parameters.

At present, the temperature control of many extended objects (tunnels, mines, pipelines, cable links) is often performed by the measurement of the temperature of optical fiber (OF) laid along or inside these objects. OF temperature serves as the indicator for determination of other physical characteristics or state of objects: leakages from pipelines, short circuits in power cables etc. Depending on the required range of temperature measurement usual telecommunication or specialized OF are used. Quartz OF itself endures high temperatures, but its polymer coating cannot be heated up to the temperature higher than 85–100°C because it starts degrading and this situation, in turn, can cause the increase of OF attenuation.

However, there are situations when the temperature control of OF itself is required. In fiber optic communication lines at overhead power transmission lines (FOCL-OL) the optical power ground wire (OPGW) is often used. In a number of climatic regions the ice formation on such wires is possible. One of the methods of ice removal consists in transmission of electric current through OPGW, which results in its heating and ice removal. During this process OF is also heated, and it is required to avoid its temperature increase above the specified values.

FOCL-OL are quite long. Ice accretion on the cable is inhomogeneous along its length due to the difference of environmental conditions: temperature, humidity, wind velocity and direction. The conditions of OF arrangement relative to cable sheath, from which the heat is transferred to OF, are different too. Therefore, the efficient control of OF state is possible only in case of direct measurement of its temperature distribution along OPGW. Any point sensors installed on the outer surface of cable cannot be the source of reliable data of the whole OF temperature.

поверхности кабеля, не могут служить источником достоверных данных о температуре всего ОВ.

МЕТОД РАМАНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОВ

Измерение температуры ОВ обычно основывается на анализе характеристик бриллюэновского или рамановского рассеяния. Каждый из методов имеет свои достоинства; в каждом случае для реализации метода необходимо преодолеть определенные технические сложности.

При распространении оптического излучения по ОВ рассеянный сигнал состоит из различных компонентов:

- компонентов с той же длиной волны, что и падающее излучение – рэлеевское рассеяние;
- компонентов с другими длинами волн – рамановское и бриллюэновское рассеяние, спектры которых, в свою очередь, содержат не одну, а две линии; спектральная линия, с большей длиной волны, чем рэлеевская, называется стоксовой, а линия с меньшей длиной волны – антистоксовой.

Параметром, по которому определяют температуру ОВ при регистрации бриллюэновского рассеяния, является изменение частоты его компонент. Однако на эту частоту влияет также и механическое натяжение ОВ, причем чувствительность к нему значительно выше, чем к изменению температуры. При образовании гололеда на оптическое волокно воздействуют оба фактора и разделить их влияние крайне затруднительно, если вообще вероятно выполнить это разделение в условиях реальных ВОЛС-ВЛ.

Возможность измерения температуры ОВ по характеристикам рамановского рассеяния основана на соотношении между интенсивностями антистоксовой и стоксовой компонент [1]:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 \cdot \exp \left[-\frac{h\nu}{kT} \right], \quad (1)$$

где I_{AS} и I_S – интенсивность антистоксовой и стоксовой компонент;

λ_{AS} и λ_S – длина волны антистоксовой и стоксовой компонент;

ν – разность волновых чисел падающего излучения и стоксовой (антистоксовой) компоненты;

T – абсолютная температура ОВ;

h – постоянная Планка;

METHOD OF RAMAN REFLECTOMETRY FOR OPTICAL FIBER TEMPERATURE MEASUREMENT

OF temperature measurement is usually based on the analysis of characteristics of Brillouin or Raman scattering. Each of these methods has its advantages; in every case, it is required to overcome certain technical difficulties for the method implementation.

During the propagation of optical radiation along OF the scattered signal consists of:

- Components with the same wavelength as the wavelength of incident radiation – Rayleigh scattering;
- Components with different wavelengths – Raman and Brillouin scattering, the spectrums of which, in turn, contain not one but two lines; the spectral lines with larger wavelength in comparison with Rayleigh wavelength is called Stokes line, and line with smaller wavelength is called anti-Stokes line.

Parameter of Brillouin scattering, on the basis of which OF temperature is determined, is its components frequency variation. However, the mechanical OF tension also has impact on this frequency; moreover, the sensitivity to it is significantly greater than in relation to temperature variation. In case of ice formation, both factors have impact, and it is very difficult to distinguish their influence, if not possible to perform this differentiation under the conditions of actual FOCL-OL.

Ability to measure the temperature of OF by the characteristics of Raman scattering is based on the ration between the intensities of anti-Stokes and Stokes components [1]:

$$\frac{I_{AS}}{I_S} = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 \cdot \exp \left[-\frac{h\nu}{kT} \right], \quad (1)$$

where I_{AS} and I_S – intensity of anti-Stokes and Stokes components;

λ_{AS} and λ_S – wavelength of anti-Stokes and Stokes components;

ν – difference of wave numbers of incident radiation and Stokes (anti-Stokes) component;

T – OF absolute temperature;

h – Planck's constant;

k – Boltzmann's constant;

c – light speed in vacuum.

The expression (1) shows that the ratio between the intensities of components of Raman scattering

k – постоянная Больцмана;

c – скорость света в вакууме.

Выражение (1) показывает, что при увеличении температуры ОВ отношение интенсивностей компонент рамановского рассеяния увеличивается; происходит это прежде всего из-за роста антистоксовой компоненты. Для стандартных одномодовых ОВ и диапазона длин волн, используемого в волоконно-оптической связи, изменение отношения I_{AC}/I_C составляет примерно 0,8%/К.

Одним из самых распространенных методов диагностики состояния ОВ является метод импульсной рефлектометрии: в ОВ вводится зондирующий оптический импульс, регистрируется непрерывный сигнал обратного рассеяния и анализируется зависимость его интенсивности от времени. Как было указано выше, в спектре этого сигнала всегда есть рэлеевская компонента (ее параметры не зависят от температуры ОВ) и компоненты рамановского рассеяния. Для определения температуры ОВ необходимо выделить их из общего сигнала.

Таким образом, для решения задачи контроля температуры ОВ ВОЛС-ВЛ был выбран метод рамановской импульсной рефлектометрии.

АНАЛИЗАТОР ТЕМПЕРАТУРЫ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ АТР-111

Вследствие больших длин ВОЛС-ВЛ для проведения измерений целесообразно использовать длины волн в диапазоне 1550–1625 нм, на которых затухание ОВ минимально. Но тогда длина волны стоксовой компоненты становится больше 1650 нм, потери в ОВ значительно возрастают, чувствительность приемной аппаратуры падает, и регистрация компоненты возможна только на коротких расстояниях. Вследствие этого для измерения температуры ОВ может использоваться только антистоксова компонента [1] в соответствии с выражением

$$I_{AC} \sim \left[\exp \left[\frac{h\nu}{kT} \right] - 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

Величина I_{AC} зависит не только от температуры ОВ, но и от обычного затухания, поэтому необходимо разделить их влияние. Это можно сделать, если измерить сигналы рэлеевского рассеяния на длинах волн зондирующего импульса и антистоксовой компоненты [2]. Изменение их интенсивности определяется только обычным затуханием ОВ, что дает возможность выделить

increases with OF temperature growth; it occurs mainly due to the growth of anti-Stokes component. For the standard single-mode OF and wavelength range used in fiber optic communications I_{AS}/I_S change is approximately 0.8%/K.

One of the most common methods of OF state diagnostics is optical pulse domain reflectometry: probing optical pulse is introduced into OF, continuous signal of backward scattering is recorded and dependence of its intensity on time is analyzed. As it was mentioned above, Rayleigh and Raman components are always present in the backscattering signal spectrum. Power of Rayleigh scattering does not depend on OF temperature. In order to determine the temperature of OF, it is required to separate these spectral components.

Thus, in order to solve the task of temperature control of FOCL-OL OF the method of Raman pulse reflectometry was selected.

DISTRIBUTED TEMPERATURE SENSOR ATP-111

As a result of large FOCL-OL lengths, it is reasonable to use for measurements the wavelengths range of 1550–1625 nm, at which OF attenuation is minimal. But then the wavelength of Stokes component becomes larger than 1650 nm, and losses in OF significantly increase, the sensitivity of receiving equipment decreases, and component recording is possible only at short distances. As a result, in order to measure OF temperature, only anti-Stokes component [1] can be used in accordance with the expression:

$$I_{AS} \sim \left[\exp \left[\frac{h\nu}{kT} \right] - 1 \right]^{-1}. \quad (2)$$

The value I_{AS} depends not only on OF temperature but also on the common attenuation, and therefore it is necessary to distinguish their impact. It can be done if the signals of Rayleigh scattering at the wavelengths of probing pulse and anti-Stokes component will be measured [2]. Alteration of their intensity is determined only by of common OF attenuation, and this fact grants the opportunity to distinguish from anti-Stokes signal the contribution, which is made by the temperature variation.

As a result of the analysis of potential variants of construction of Raman OTDR, the device – distributed temperature sensor ATP-111 was developed; the structure chart of this

из антистоксового сигнала вклад, который вносит именно изменение температуры.

В результате анализа возможных вариантов построения рамановского рефлектометра был разработан прибор – анализатор температуры рефлектометрический ATP-III, структурная схема которого показана на рис. 1, а внешний вид на рис. 2. В качестве источника зондирующего импульса используется лазерный диод (ЛД) с длиной волны 1625 нм. Его излучение вводится в измеряемое ОВ через блок объединения и разделения оптических сигналов, содержащий пассивные оптические компоненты – мультиплексоры и циркуляторы. Импульс с длиной волны 1625 нм при распространении по ОВ порождает сигнал обратного рэлеевского рассеяния с такой же длиной волны и антистоксову компоненту рамановского рассеяния, центральная длина волны которой находится около 1520 нм. Эти сигналы возвращаются к началу ОВ, отделяются друг от друга в блоке объединения и разделения оптических сигналов и поступают в двухканальное приемное устройство. Каждый канал состоит из фотодиода (ФД), усилителя (У) и АЦП.

Еще один сигнал, измеряемый прибором, – рэлеевское рассеяние на длине волны антистоксовой компоненты рамановского рассеяния. Для его измерения используется ЛД с номинальной длиной волны 1550 нм. При изготовлении прибора ATP-III из партии ЛД выбирается такой, длина волны которого ближе всего к 1520 нм;

device is shown in Fig. 1 and its appearance is given in Fig. 2. The laser diode (LD) with the wavelength of 1625 nm is used as a of probing pulse source. Its radiation is introduced into the measured OF through the unit for optical signal integration and separation containing the passive optical components – multiplexors and circulators. Upon the propagation in OF the pulse with the wavelength of 1625 nm generates Rayleigh backscattering signal scattering with the same wavelength and anti-Stokes component of Raman scattering, the central wavelength of which is about 1520 nm. These signals go back to OF, they separate from each other in the unit for optical signal integration and separation and get into two-channel receiver. Each channel consists of photodiode (PD), amplifier (A) and analog-to-digital converter (ADC).

дополнительная ее подстройка проводится регулировкой тока и температуры лазера.

В приборе АТР-111 сигналы обратного рассеяния проходят также через опорное оптическое волокно ОВ-Т, которое находится в теплоизолированном кожухе; его температура измеряется встроенным электронным датчиком. Взаимное расположение уровней сигналов от этого ОВ и показания датчика используются для привязки результатов измерения к шкале температуры.

Формирователь импульсов, показанный на рис.1, управляет работой ЛД и, как и в обычном оптическом рефлектометре, позволяет проводить измерения при достаточно широком наборе длительностей импульса – от 8 нс до 10 мкс.

Процессор прибора и персональный компьютер осуществляют управление и обработку сигналов.

На рис.3 представлены рефлектограммы ОВ, получаемые при измерении. Здесь обозначены:

- "1625 нм" – рефлектограмма рэлеевского рассеяния при длине волны зондирующего импульса 1625 нм;
- "1550 нм" – рефлектограмма рэлеевского рассеяния при номинальной длине волны зондирующего импульса 1550 нм;
- "АС" – рефлектограмма антистоксовой компоненты рамановского рассеяния.

Первый участок каждой рефлектограммы (левее отметки 0 км) – это сигнал от внутреннего ОВ-Т, остальная часть – сигналы измеряемого ОВ.

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ ОВ

Как известно, мощность сигнала обратного рэлеевского рассеяния в каждой точке ОВ прямо пропорциональна мощности зондирующего импульса в этой точке, коэффициенту обратного рассеяния и длительности импульса [3]. Мощность сигнала, пришедшего к входу ОВ, определяется следующим выражением:

$$P_{\text{расс,р}}(L) = P_{\text{имп}} \cdot B_p \cdot e^{-2\alpha_{\text{имп}} \cdot L} \cdot \tau_{\text{имп}}, \quad (3)$$

Рис.3. Рефлектограммы, измеряемые прибором АТР-111 для определения температуры ОВ

Fig. 3. Reflectograms measured by the ATP-111 for the OF temperature determination

One more signal measured by the device is Rayleigh scattering at the wavelength of anti-Stokes component of Raman scattering. For this purpose, LD with the nominal wavelength of 1550 nm is used. When making the device ATP-111 such LD is selected from the batch, the wavelength of which is the closest to 1520 nm; its additional adjustment is performed on the basis of regulation of laser current and temperature.

In the ATP-111, the backscattering signals also pass through the reference optical fiber OF-T, which is located in heat-insulated casing; its temperature is measured by built-in electronic sensor. The mutual disposition of signal levels from this OF and sensor reading are used for binding of measurement results to temperature scale.

The pulse former shown in Fig. 1 controls the operation of LD, and in the same manner as in usual OTDR it allows performing measurements at quite broad set of pulse durations – from 8 ns to 10 μs.

Device processor and personal computer perform the its control and signals processing.

OF reflectograms obtained during the measurements are shown in Fig. 3. There are following designations:

- "1625 нм" – reflectogram of Rayleigh scattering at the wavelength of probing pulse of 1625 nm;
- "1550 нм" – reflectogram of Rayleigh scattering at the nominal wavelength of probing pulse of 1550 nm;

где $P_{\text{расс, р}}(L)$ – мощность сигнала обратного рэлеевского рассеяния, пришедшего к входу ОВ от точки, находящейся на расстоянии L от начала ОВ;

$P_{\text{имп}}$ – мощность зондирующего оптического импульса на входе ОВ;

$B_{\text{р}}$ – коэффициент обратного рэлеевского рассеяния, определяющий, какая часть мощности падающего импульса рассеивается и направляется назад к входу ОВ;

$\tau_{\text{имп}}$ – длительность зондирующего оптического импульса;

$a_{\text{имп}}$ – коэффициент затухания зондирующего излучения; при рассмотрении рэлеевского рассеяния предполагается, что его значение одинаково для прямого и обратного сигналов.

Для обработки сигнала антистоксовой компоненты рамановского рассеяния использована аналогичная модель:

$$P_{\text{расс, АС}}(L) = P_{\text{имп}} \cdot B_{\text{АС}}(T(L)) \cdot e^{-(a_{\text{имп}} + a_{\text{АС}})L} \cdot \tau_{\text{имп}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{расс, АС}}(L)$ – мощность сигнала антистоксовой компоненты, пришедшего к входу ОВ от точки, находящейся на расстоянии L от начала ОВ;

$B_{\text{АС}}(T(L))$ – коэффициент обратного рассеяния, определяющий, какая часть мощности падающего импульса преобразуется в антистоксову компоненту рамановского рассеяния и направляется назад к входу ОВ; его величина меняется с изменением температуры волокна T ;

$a_{\text{АС}}$ – коэффициент затухания антистоксовой компоненты.

Параметры выражения (4) определяются из результатов измерения соответствующих рефлектограмм. Регистрируя антистоксову компоненту, прибор определяет сумму коэффициентов $a_{\text{имп}} + a_{\text{АС}}$. По рэлеевскому рассеянию на каждой из двух длин волн измеряется коэффициент $a_{\text{имп}}$ и независимая от температуры составляющая коэффициента $a_{\text{АС}}$. Температура ОВ определяется по отклонению измеренного антистоксового сигнала от значений, рассчитанных с учетом только рэлеевских коэффициентов.

В результате обработки рефлектограмм, показанных на рис. 3, строится график температуры ОВ (рис. 4). На нем, в частности, температура внутреннего ОВ-Т (участок до отметки 0 км) составляет 18 °С, а внешнего 26 °С.

- "AS" – reflectogram of anti-Stokes component of Raman scattering.

The first section of each reflectogram (to the left from the mark 0 km) is the signal from internal OF-T, and the remaining part – signals of measured OF.

SIGNAL PROCESSING UPON OF TEMPERATURE MEASUREMENT

As it is well-known, the power of Rayleigh backscattering signal in each OF point is in direct proportion to the power of probing pulse in this point, backscattering coefficient and pulse duration [3]. Power of the signal, which comes to OF input, is determined on the basis of the following expression:

$$P_{\text{bs, r}}(L) = P_{\text{pulse}} \cdot B_{\text{р}} \cdot e^{-2a_{\text{pulse}}L} \cdot \tau_{\text{pulse}}, \quad (3)$$

where $P_{\text{bs, r}}(L)$ – power of the signal of backward Rayleigh scattering, which was supplied to OF entry from the point located at the distance L from OF beginning;

P_{pulse} – power of probing optical pulse at OF input;

$B_{\text{р}}$ – backscattering coefficient, which determines which part of the power of incident pulse is scattered and directed backwards to OF input;

τ_{pulse} – duration of probing optical pulse;

a_{pulse} – attenuation coefficient of probing radiation; when considering Rayleigh scattering it is assumed that its value is identical for forward and backward signals.

In order to process the signal of anti-Stokes component of Raman scattering the analogous model is used:

$$P_{\text{bs, AS}}(L) = P_{\text{pulse}} \cdot B_{\text{АС}}(T(L)) \cdot e^{-(a_{\text{pulse}} + a_{\text{АС}})L} \cdot \tau_{\text{pulse}}, \quad (4)$$

where $P_{\text{bs, AS}}(L)$ – power of signal of anti-Stokes component, which was supplied to OF entry from the point located at the distance L from OF beginning;

$B_{\text{АС}}(T(L))$ – coefficient of backward scattering, which determines which part of the power of incident pulse is transformed into anti-Stokes component of Raman scattering and directed backwards to OF entry; its value varies with the change of fiber temperature T ;

Рис. 4. График температуры ОВ
Fig.4. OF temperature graph

Реальная ВОЛС состоит из нескольких последовательно соединенных участков строительной длины. В точках соединения интенсивность зондирующего сигнала уменьшается, на рефлектограмме появляются неоднородности ("ступеньки"). Однако величина изменения сигнала обратного рассеяния зависит не только от затухания в соединении, но и от соотношения их

a_{AS} – coefficient of decay of anti-Stokes component.

Parameters of the expression (4) are determined on the basis of the measurement results of the relevant reflectograms. Recording anti-Stokes component the device determines the sum of coefficients $a_{pulse} + a_{AS}$. On the basis of Rayleigh scattering at each of two wavelengths the coefficient a_{pulse} and component of the coefficient a_{AS} , which does not depend on the temperature, are measured. OF temperature is determined in accordance with the deviation of measured anti-Stokes signal from the values

estimated taking into account only Rayleigh coefficients.

As a result of processing of reflectograms shown in Fig. 3, the OF temperature graph is plotted (Fig. 4). In particular, at this graph the temperature of internal OF-T (section to left of the mark 0 km) is 18 °C, and the temperature of external OF is 26 °C.

коэффициентов обратного рассеяния B_p [4]. Формулы (3) и (4) были обобщены для анализа сигналов таких линий.

На рис.5 представлены рефлектограммы линии, состоящей из двух ОВ разных типов – G.652 (волокно А) и G.655 (волокно Б) – и измеренной с двух сторон. Хотя можно считать, что затухание в соединении не зависит от направления измерения, но вызванные им "ступеньки" получаются разными из-за различных коэффициентов B_p . Можно показать, что действительное значение затухания в соединении равно среднему из значений, измеренных с каждой стороны. Конкретные значения коэффициентов обратного рассеяния B_p волокон, составляющих ВОЛС, практически никогда не известны, поэтому для паспортизации ВОЛС измерения проводят с двух сторон, и результаты усредняют.

Разные значения коэффициентов обратного рассеяния сказываются и на измерении температуры ОВ. На рис.6 показаны графики температуры линии А-Б, после того как оба ОВ в течение суток были выдержаны при одинаковой температуре. При измерении в направлении А→Б температура первого ОВ (ближнего к рефлектометру) на 3,7°C выше, чем температура второго. При измерении в обратном направлении ситуация противоположная. Усреднение результатов дает практически одинаковые значения температуры обоих ОВ.

Таким образом, и для получения правильных значений распределения температуры линии, состоящей из нескольких соединенных ОВ, необходимо проводить измерения с двух сторон. Однако в реальной ситуации контроля температуры ВОЛС-ВЛ это не представляется возможным, поэтому различие коэффициентов обратного рассеяния является источником дополнительной погрешности измерения температуры.

СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЛС-ВЛ

На основе анализатора температуры рефлектометрического АТР-111 была создана система распределенного контроля температуры (СРКТ)

Рис.5. Рефлектограммы соединения ОВ разных типов, измеренные с двух сторон
Fig. 5. Reflectograms of connections of different types of fiber measured from two sides

The actual FOCL consists of several sequentially connected sections with factory length. At splices the intensity of probing signal decreases, and inhomogeneities ("steps") occur on reflectogram. However, the value of variation of backscattering signal depends not only on the splice loss junction but also on the ratio between their backscattering coefficients B_R [4]. The formulas (3) and (4) were generalized for the purpose of analysis of such lines.

Reflectograms of the line, which consists of two different OF – G.652 (fiber A) and G.655 (fiber B) and is measured from two sides, are given in Fig. 5. Although, it can be believed that connection loss does not depend on measurement direction but the "steps" caused by it turn out to be different due to various coefficients B_R . It can be shown that the actual loss value is equal to the average of the values measured from each side. The specific values of backscattering coefficients B_R of the fibers, which form FOCL, are practically never known, and therefore for FOCL certification the measurements are performed from both sides and results are averaged.

Different values of the backscattering coefficients have impact on the OF temperature measurement as well. The graphs of temperature of line A-B after both OF holding at the same temperature within 24 hours are shown in Fig. 6. When measuring in the direction A→B, the temperature of the first OF (close to OTDR) is by 3.7°C higher than the temperature of the second OF. When measuring in the backward direction, the situation is opposite. Averaging

ВОЛС-ВЛ. Несколько таких систем установлены на сетях ВОЛС, находящихся в гололедоопасных районах. На рис.7 показана структура одной такой сети. Плавка гололеда может осуществляться на любой линии с помощью двух установок УПГ, находящихся в пунктах Б и Г. Контроль температуры длинных линий проводится приборами АТР-111 с двух сторон по разным ОВ. Прибор АТР-111 работает в комплекте с блоком управления (на рис.7 не показан), который может иметь встроенный оптический переключатель. Это позволяет измерять несколько ВОЛС одним прибором, как, например, организовано в пункте Б.

Управление всеми приборами АТР-111 и проведение измерений осуществляется с удаленного ПК рабочего места оператора по сети Ethernet.

За время эксплуатации систем контроля нескольких ВОЛС-ВЛ накоплено большое количество результатов измерения температуры ОВ, выполненных в различное время года и суток. Они свидетельствуют о сложном характере влияния окружающих условий на температуру ОВ в ОКГТ. Графики температуры одной из ВОЛС представлены на рис.8. Для удобства сравнения они сдвинуты по вертикали друг относительно друга. На нижнем графике показаны отметки мест расположения муфт, в которых соединены ОВ участков строительной длины.

График 3 построен по результатам измерений, полученных вечером 3-го января, т.е. в темное время суток, когда отсутствует неоднородность внешних условий из-за солнечного излучения. Температура ОВ практически одинакова вдоль всей линии. В то же время на других графиках появляются участки с отклонениями по температуре. Участок а-б находится между двумя соседними муфтами, поэтому отличие его температуры можно объяснить параметрами ОВ.

of the results gives practically identical values of the temperature of both OF.

Thus, in order to obtain the correct values of temperature distribution of the line consisting of several spliced OF it is necessary to perform the measurements from two sides. However, in actual practice of FOCL-OL temperature control it is impossible therefore the difference of coefficients of backward scattering is the source of additional error of temperature measurement.

SYSTEM OF DISTRIBUTED TEMPERATURE CONTROL AND MEASUREMENT RESULTS AT OPERATING FOCL-OL

On the basis of distributed temperature sensor АТР-111, the system of distributed temperature control (SDTC) of FOCL-OL was created. Several such systems were installed in ice-dangerous regions. The structure of one such network is shown in Fig.7. Ice melting can be performed at any line using two ice melting equipments located at the points B and D. The temperature control of long lines is performed by the АТР-111 from two sides in different OF. The АТР-111 operates together with control unit (it is not shown in Fig. 7), which can have built-in optical switch. It allows measuring several FOCL by one АТР-111 as, for example, is organized at the point B.

All АТР-111 control is performed from the remote PC of operator workplace through Ethernet network. For the period of several SDTC operation great number of OF temperature measurements results in different seasons and time of day have been accumulated. They indicate the complex character of influence of environmental conditions on the OF temperature in OPGW. The temperature graphs of one FOCL are given in Fig.8. For convenience of comparison they are shifted in vertical direction in relation to each other. The marks of the

С другой стороны, участок с-d представляет собой часть непрерывного отрезка ОКГТ; его свойства, возможно, связаны с географическим изменением направления ВОЛС и соответствующим изменением по отношению к направлению ветра и солнечным лучам.

В некоторых точках ВОЛС-ВЛ, для которых предусмотрена плавка гололеда, на внешней поверхности ОКГТ были установлены датчики системы контроля образования гололеда. Эти датчики измеряли в том числе и температуру кабеля. Когда измерения проводилось в темное время суток, с предположительно установившейся температурой волокна и кабеля, данные этих датчиков соответствовали показаниям приборов АТР-111 с отклонениями не более $\pm 2^\circ\text{C}$. В другое время суток или при проведении плавки гололеда различия были значительно больше. Это подтверждает предположение о том, что температура ОВ может значительно отличаться от температуры оболочки ОКГТ в случае нестационарных условий.

Изменения распределения температуры одного и того же ОВ при проведении плавки гололеда в ноябре 2014 года и в январе 2015 года можно проследить по рис.9 и 10. ОВ нагревается после включения УПГ и остывает после ее выключения. Момент выключения УПГ определялся оператором по показаниям датчиков обледенения. Графики нагрева и остывания сдвинуты друг относительно друга по вертикали для удобства сравнения. График 1 на обоих рисунках измерен перед началом плавки гололеда. Нумерация графиков соответствует последовательности их измерения.

Из рис.9 и 10 видно, что нагрев ОВ происходит крайне неравномерно по его длине. Есть участки сильного роста температуры, и есть участки, на которых она изменилась незначительно. Максимальные зафиксированные значения температуры составили 76°C и 37°C . Это связано с тем, что плавка гололеда в январе 2015 длилась значительно меньшее время. Сравнение графиков, на которых достигалась максимальная температура ОВ, показывает наличие совпадающих участков сильного

splice locations, at which OF factory lengths are connected, are shown in the lower graph.

Graph 3 is measured in the evening of the 3rd of January, in other words during hours of darkness, when the difference of environmental conditions due to solar radiation is absent. OF temperature is practically identical along the whole line. At the same time, at other graphs the sections with temperature deviations occur. The section a-b is located between two adjacent splices, and therefore the difference of its temperature can be explained by OF parameters. On the other hand, the section c-d represents the part of continuous section of OPGW; its properties are probably connected with geographical alteration of FOCL direction and relevant alteration in relation to wind direction and sun rays.

Рис.8. Температура ОВ ВОЛС-ВЛ, измеренная в разное время
Fig. 8. Temperature of the same OF measured at different times

и слабого нагрева. Это может свидетельствовать о схожих условиях образования гололеда в этих случаях.

Данные о распределении температуры вдоль ОВ при проведении плавки гололеда дают возможность службам, управляющим этим процессом, регулировать режим плавки с целью

в случае of unsteady conditions.

Variations of temperature distribution of the same OF during ice melting in November 2014 and January 2015 can be observed in Fig. 9 and 10. OF is heated after ice melting equipment is switched on and it is cooled after it is switched off. The moment of ice melting equipment switching off was determined

by the operator on the basis of reading of ice detectors. The graphs of heating and cooling are shifted in relation to each other in vertical direction for the convenience of comparison. Graph 1 in both figures is measured in the beginning of ice melting. Numeration of graphs corresponds to the measurement sequence.

It is seen from Fig. 9 and 10 that OF heating takes place in very irregular manner along its length. There are sections with great temperature growth, and there are sections, in which the temperature changed insignificantly. Maximum recorded values of temperature were 76 °C and 37 °C. It is

недопущения превышения заданных пороговых значений температуры ОВ. Использование информации о климатических условиях, в которых находятся различные участки ВОЛС-ВЛ, позволит лучше понять динамику изменения температуры ОВ и повысить эффективность этих действий.

Используемый принцип организации СРКТ (удаленное управление измерениями из единого центра, автоматический анализ полученных результатов) дает возможность осуществить ее интеграцию с другими частями системы плавки гололеда и автоматизировать указанные процессы.

Образование гололеда происходит в течение достаточно ограниченных временных интервалов и в определенное время года, поэтому в остальное время система распределенного контроля температуры используется как система мониторинга физического состояния ВОЛС. Приборы АТР-111 работают как обычные оптические рефлектометры, и в непрерывном автоматическом режиме проводятся измерения основных параметров линии: длина, полное затухание, расстояния до муфт, затухание участков и соединений ОВ. При возникновении повреждений и обры-

connected with the fact that ice melting in January 2015 lasted significantly less time. Comparison of the graphs, in which maximum OF temperature was reached, shows the presence of concurrent sections with intense and poor heating. It can indicate the similar conditions of ice formation in these cases.

Data of temperature distribution along OF during ice melting grant opportunity to the services which control this process, to regulate the melting mode in order to avoid exceeding the set temperature thresholds. Use of information concerning the climatic conditions, in which different sections of FOCL-OL are located, will make it possible to understand better the dynamics

Рис. 9. Распределение температуры ОВ при плавке гололеда – I
Fig. 9 OF temperature distribution during ice melting – I

Рис. 10. Распределение температуры ОВ при плавке гололеда – II
Fig. 10. OF temperature distribution during ice melting – II

вов на ВОЛС система выдает соответствующие сообщения диспетчерским службам. На сервере хранится статистика измерений, что позволяет отслеживать медленные деградации ОВ и планировать предупредительные мероприятия. Кроме автоматического мониторинга возможно удаленное управление в ручном режиме, например для паспортизации ВОЛС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bao X., Chen L.** Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. – Sensors, 2012, v.12, p.8601–8639.
2. **Suh K., Lee C.** Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor. – Optics Letters, 2008, v.33, №16, p.1845–1848.
3. **Григорьянц В.В., Чаморовский Ю.К.** Диагностика волоконных световодов и оптических кабелей методом обратного рассеяния. – Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. – М.: ВИНТИ, 1982, т.29, с.47–79.
4. **Листвин А.В., Листвин В.Н.** Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005.

of OF temperature variation and enhance the efficiency of these activities.

Used principle of SDTC organization (remote control of measurements from single center, automatic analysis of obtained results) grant opportunities to perform its integration with other parts of ice melting system and automate the specified processes.

Ice formation takes place within rather limited time intervals and in certain season, therefore in other time the system of distributed temperature control is used as monitoring system with respect to the physical state of FOCL. The ATP-111 operate as usual OTDR, and in continuous automatic mode are performed the measurements of main line parameters: length, complete attenuation, distances to splices, attenuation of OF sections and connections. In case of occurrence of damages and breaks of FOCL, the system sends relevant messages to dispatcher services. The measurement statistical data, which allows tracking the slow degradations of OF and planning preventive measures, is stored on the server. In addition to automatic monitoring, the remote control in manual mode is possible, for example, for FOCL certification.