УДК 620.9:62-93

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОДОЛЬНОМ ПРОФИЛЕ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРОЕННЫХ ВОЛОКНО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Арифов[1] А.М., Бекиров[2] Э.А.

Физико-технический институт
ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского»,
295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4.
[1]arifov.alim@inbox.ru, [2]bekirov.e.a@cfuv.ru.

Аннотация: в работе предложена методика измерения температуры в продольном профиле кабельных линий, находящихся под рабочим напряжением и нагрузкой с использованием встроенных оптоволоконных линий. Данная методика позволяет предупредить развитие аварийного дефекта и с высокой точностью, в режиме реального времени «онлайн», фиксировать температуру и расстояние до места нагрева в контролируемом сечении.
Предмет исследования: зависимость параметров оптического волокна, встроенного в электрический кабель, от изменения температуры на всем протяжении контролируемого сечения кабельной линии.
Материалы и методы: в работе в первые проведены исследования, зависимости параметров оптоволоконной линии кабеля, интегрированного в кабельную линию, а также локальное изменение температуры на участке кабельной линии, путем расчётов с использованием разницы во времени между моментом времени получения отраженного импульса и моментом излучения лазерного импульса в оптическое волокно.
Результаты: разработана методика, а также проведен математический анализ, подтверждающий получение результирующих данных комбинаторного рассеяния, для последующего вывода температурных параметров с помощью интегрированного в кабельную линию оптического волокна. Контроль температуры определяется по оптическому рассеянию в отраженных сигналах.
Выводы: контроль температуры по оптическому рассеянию в отраженных сигналах, применим к измерению температурного режима в профиле кабельной линии, что в свою очередь позволит оптимизировать загрузку кабельной линии, рационально учитывать реальные климатические условия и локальные особенности пролегания всех участков кабельной линии, а также преждевременно выявлять дефекты.
Ключевые слова: оптическое волокно; кабельная линия; антистокс; стокс.

ВВЕДЕНИЕ

По имеющейся статистике в среднем длительность отключений электроэнергии составляет от 70 до 100 часов в год. По средним подсчетам, на каждые 100 км кабельных линий электрических сетей ежегодно регистрируются до 26 отключений. Типичными причинами данных отключений является следующее:

- Механические повреждения силового кабеля при производстве строительных работ в зоне трасс кабельных линий и проявлениях геологических факторов на территории, по которой проходит линия;
- Неудовлетворительное качество изготовления концевых и соединительных муфт кабельной линии, в которые возможно попадание влаги;
- Коррозия защитных оболочек силового кабеля под воздействием геохимических, гидрологических факторов.
- Систематические и длительные перегрузки кабельных линий;
- Количество коротких замыканий в электрической сети, сопровождающихся протеканием по кабельным линиям токов превышающих длительно допустимые токи нагрузки, вызывающие повышенный нагрев и ускоренный износ изоляции;
- Высокие уровни перенапряжений при дуговых и металлических замыканиях в кабельной сети;
- Наличие на участках электрической сети повышенных уровней коммутационных перенапряжений, создаваемых выключателями и приводящих к электрическому пробою изоляции элементов кабельных линий.
- Нарушения технологии прокладки кабелей (механические напряжения, недопустимые изгибы, механические повреждения при прокладке;
- Длительная работа участков кабельной сети с однофазными металлическими и, особенно, с дуговыми замыканиями, однофазными замыканиями (далее - ОЗЗ) на землю, приводящая к переходу 033 в двойные и тройные замыкания на землю, а также к междуфазным коротким замыканиям (КЗ);
- Температура окружающей среды и влияние сезонных колебаний температуры;
- Тепловое влияние кабелей, проложенных в одной траншее.

Как показывает многолетняя практика эксплуатации кабельных линий в электроэнергетике, 90% всех перечисленных повреждений сопровождается выделением тепла и соответственно длительным или кратковременным нагревом поврежденных участков.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Система температурного мониторинга конструктивно состоит из двух основных элементов - оптического волокна, проложенного вдоль кабельной линии, являющегося распределенным датчиком температуры и измерительного прибора со средствами обработки и анализа первичной информации. Лазерные импульсы с определенной частотой заводятся в оптоволоконную линию

длиной, состоящую из одномодового волокна, в каждой точке на всем протяжении оптоволоконного кабеля происходит комбинационное рассеяние света и регистрируется время прибытия обратно-рассеянного излучения, что позволяет определить место, где конкретно произошло рассеяние. Комбинационно рассеянный свет, проходя через спектральный фильтр в обратном направлении разделяется на стоксовую и анти - стоксовую компоненты и перенаправляется на два высокочувствительных фотодиода, данные с которых поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и далее на персональный компьютер, где эти сигналы обрабатываются и вычисляется температура.

Исследуемый в данной работе метод измерения температуры вдоль оптического волокна основан на эффекте комбинационного рассеяния света (или эффекте Рамана), открытого еще в конце 1920-х годов независимо друг от друга индийским физиком Раманом и советскими физиками Ландсбергом и Мандельштамом. Согласно существующей теории комбинационного рассеяния света, этот процесс сопровождается заметным изменением частоты рассеиваемого спектра, если источник испускает монохроматический свет, то в спектре рассеянного излучения обнаруживаются дополнительные линии, число и расположение которых тесно связано с молекулярным строением вещества. При комбинационном рассеивании преобразование первичного светового потока сопровождается переходом рассеивающих молекул на другие колебательные и вращательные уровни энергии, причем частоты новых линий в спектре рассеяния являются комбинациями частоты падающего света и частот колебательно-вращательных переходов рассеивающих молекул. Если молекула вещества перешла из основного состояния в возбужденное, в спектре комбинационного рассеяния проявляются линии имеющие значительно большую длину волны по сравнению с источником света, такой процесс называется стоксом. Возможен также и обратный процесс, когда молекула в результате комбинационного рассеяния переходит из возбужденного в основное состояние, называемое антистокс. Таким образом, если в оптоволокно входит лазерный импульс с несущей частотой ν_0, то в спектре обратно рассеянного света будет наблюдаться центральный пик на несмещенной частоте ν_0 и два дополнительных пика, смещенных на частоту ν: $\nu_{\text{с}} = \nu_0 - \nu$ (стокс) и $\nu_{\text{а}} = \nu_0 + \nu$ (анти-стокс).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Методика измерения температуры с использованием оптического волокна

1. Расчет скорости света в волоконно-оптических линиях

Методика измерения температуры построена на эффекте комбинационного рассеяния света. Основным элементом для температурного мониторинга кабельной линии предусмотрено оптическое волокно. Оптоволокно – диэлектрический волновод, который проводит электромагнитные волны оптического диапазона. Он состоит из сердцевины, оболочки и защитного внешнего слоя. Оболочка в качестве отражающего слоя способствует удержанию светового сигнала в сердцевине. Оптические волокна изготовляются из легированного кварцевого стекла, которое состоит из двуокиси кремния (SiO2) с аморфной твердой структурой. В оптическое волокно лазером периодически излучаются диагностические импульсы, а при помощи измерительного прибора регистрируется обратный отраженный поток света. Локальная температура на каждом конкретном участке кабельной линии рассчитывается с использованием разницы во времени между моментом времени получения отраженного от каждого участка импульса и моментом излучения лазерного импульса в оптическое волокно. Зная скорость распространения света в измерительном оптоволокне, можно с высокой точностью рассчитать место, которому соответствует спектр отраженного оптического сигнала.

Световой импульс запускается лазерным излучателем и имеет длину волны в инфракрасном диапазоне диапазоне от 800 до1600 нм, за пределами видимого спектра. Когда свет поступает в волокно, он немного замедляется. Степень его замедления связана с показателем преломления стекла в волокне. Скорость света в волокне (V) связана со скоростью света в вакууме и с показателем преломления волокна определяется по следующей формуле (1) [1,2,3]:

$$V = \frac{c}{n} = \frac{(3*10^8)}{1.5} = 2 * 10^8 \text{m/s}, \qquad (1)$$

где V - скорость света в стекловолокне; с - скорость распространения света в вакууме; n - относительный показатель преломления стекла.

Если стекловолокно имеет больший показатель преломления чем окружающая среда, то свет внутри волокна будет захвачен и вынужден распространяться по волокну. Это происходит тогда, когда угол падения между световым лучом внутри волокна и его границей с окружающей средой меньше некоторого критического значения. Это принцип «полного внутреннего отражения», основанный на законе Снеллиуса [14].

2. Расчет длины импульса в волоконно-оптической линии

Импульс лазерного излучения в нашем случае имеет продолжительность не более 10 нс. Когда этот импульс входит в волокно, считается, что оно «запущено». Длина светового импульса в волокне, длительностью 10 нс при условии, что показатель преломления волокна является равным 1.5 и определяется путем умножения скорости света в волокне с/n на длительность импульса 10 нс. Соответственно длина светового импульса в

стекловолокне определяется формулой (2) [1,2,3,14]:

$$\lambda = \frac{c}{n} * t = \frac{(3*10^8)}{1.5} * (10 * 10^{-8}) = 2\text{m}, \quad (2)$$

где c - скорость распространения света в вакууме; n - относительный показатель преломления стекла; t -время длительности импульса.

3. Расчет времени приема обратно рассеянного излучения в волоконно-оптической линии

Световой импульс, представляет собой движущийся датчик, перемещающийся по волоконной линии и передающий обратно информацию о температуре показан на рисунке 1:

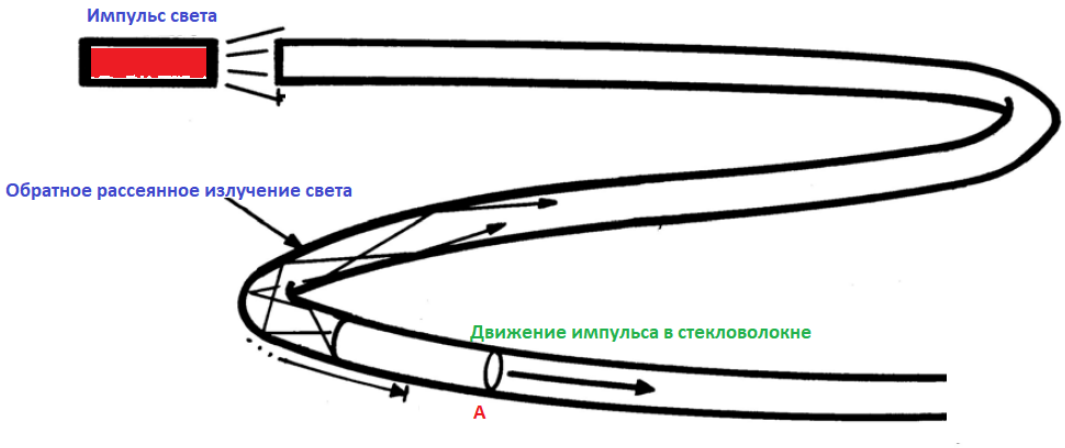


Рис. 1. Движение лазерного импульса в стекловолокне.
Fig. 1. The movement of a laser pulse in glass fiber.

Показатель преломления волокна в нашем случае имеет значение 1.5, он и определяет скорость распространения света в стекловолокне. Когда световой импульс проходит в некоторую точку вдоль волокна (A), обратно рассеянный свет должен вернуться по тому же пути, а общая длина пути для сигнала составит удвоенное значение пути 2A. Если скорость света в волокне равна V, то в некоторый момент времени можно получить сигнал обратно рассеянного света. Время получения обратно рассеянного света рассчитывается по формуле (3,):

$$\text{Тобр.} = \frac{2\text{A}}{V}, \quad (3)$$

где Тобр. – время обратно рассеянного света;

2A – пройденное расстояние в одну и обратную сторону;

V – скорость света в волокне.

Определим время обратно рассеянного света для достижения расстояния по длине волокна в один метр (ΔA = 1м) по формуле (4):

$$\text{Тобр.} = \frac{2\Delta\text{A}}{V} = \frac{2*1}{(2*10^8)} = 10^{-9} = 10\text{нс}, \quad (4)$$

где Тобр – время обратно рассеянного света;

2ΔA – пройденное расстояние обратно рассеянного света;

V – скорость света в волокне.

4. Расчет частоты повторения запусков световых сигналов в волоконно-оптической линии

Еще один фактор, который следует учитывать – это частота повторения запусков импульса. Рассмотрим оптоволоконную линию длиной 3000 м. В линии не может быть два световых импульсов одновременно. Если это произойдет, то сигналы обратного рассеяния будут смешаны, и результирующий спектр будет чрезвычайно трудно или невозможно проанализировать. Таким образом, свет должен дойти до конца волокна, а обратно рассеянный свет вернуться до следующего запуска. Минимальное время между запусками — это время прохождения импульса до конца волокна и обратно. Рассчитаем время между запусками импульсов для линии длиной 3000 м, с относительным показателем преломления n=1.5 по формуле (5):

$$T\text{сиг.} = \frac{2\text{A}}{V} = \frac{2*300}{(2*10^8)} = 3 * 10^{-5}\text{c}, \quad (5)$$

где Tсиг. – время между запусками сигналов; 2A - расстояние прохождения обратно рассеянного света; V - скорость света в волокне.

Это соответствует примерно 33 000 запусков в секунду. В реальных случаях скорость запуска может быть меньше, от 4000 до 10000 импульсов в секунду. Это необходимо для обеспечения необходимой обработки данных между запусками.

В системе требуется более одного импульса по причине того что, возвращаемые слабые и зашумленные сигналы имеют очень плохое отношение сигнал/шум, следовательно, для получения статистически значимых данных необходимо накладывать друг на друга множество

сигналов. Это может потребоваться для достижения определенной степени разрешения по температуре в 1℃. Для достижения более высокого разрешения по температуре потребуется больше запусков как показано в источниках[1,5]. В распределенной системе измерения температуры (далее – РСИТ) требуется увеличить длительность импульсов и обеспечить больше запусков сигналов для достижения лучшего температурного разрешения. Следовательно, разрешение системы РСИТ должно определяться длиной волокна, проложенной в кабельной линии и временем выборки сигналов. Как правило, разрешение системы увеличивается пропорционально √n, где n -количество выборок сигналов (мгновенных значений). Чтобы увеличить разрешение в два раза, потребуется получить в четыре раза больше выборок сигналов.

5. Анализ спектра обратного рассеяния

Оптические волокна состоят из кварцевого стекла, с твердотельной структурой [1,2,4]. Температурное воздействие приводит к вибрации в молекулярной решетке, свет который попал на термически возбужденные молекулы, приводит к взаимодействию между фотонами и электронами, сопровождающееся световым рассеянием (Романовское рассеяние). Затем возбужденная молекулярная решетка и молекулы испускают свет с длинами волн выше и ниже длины основной падающей волны. Основная волна обратного рассеяния соответствует длине запущенной волны и называется пиком или полосой Рэлея, этот сигнал является, самым сильным возвращенным сигналом[3]. Эти волны, связанные с колебаниями решетки, проявляются в виде бриллюэновских линий или пиков в спектре обратного рассеяния[2,6]. Линии Бриллюэна очень близки друг к другу и их трудно отделить от основной полосы Рэлея. Самые слабые из отраженных волн, возникающие в результате молекулярных и атомных колебаний, являются полосами комбинационного рассеяния. Спектр обратного рассеяния показан на рисунке 2.

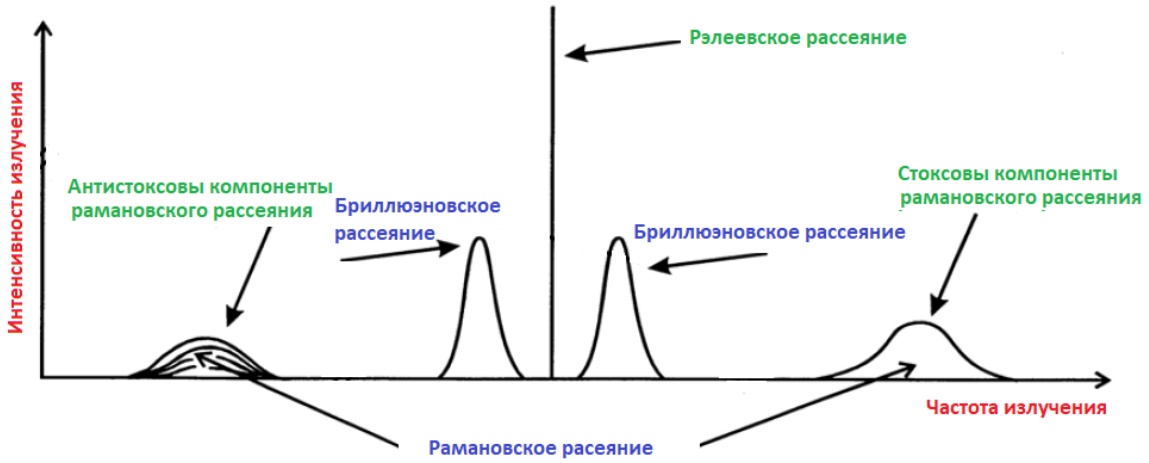


Рис. 2. Представлен спектр обратного рассеяния с полосами Рэлея, Бриллюэна и Рамана, а также стоксовыми и антистоксовыми полосами.

Fig. 2. The backscattering spectrum with Rayleigh, Brillouin and Raman bands, as well as Stokes and anti-Stokes bands is presented.

6. Расчет мощности рассеянного излучения

Сигнал комбинационного рассеяния — это сигнал, используемый для оценки температуры. Он достаточно устойчив и имеет уникальную температурную зависимость[9]. Его длина волны сдвинута от основного пика Рэлея, что позволяет отфильтровать доминирующие пики Рэлея и Бриллюэна. Сигнал комбинационного рассеяния состоит из так называемых «стоксовых» и «антистоксовых» полос. Полоса стокса на более высоких длинах волн стабильна и мало чувствительна к температуре, антистоксова полоса на более низких длинах волн, проявляет высокую чувствительность к температуре [7]. Чем выше энергия внутри полосы, тем выше температура, и наоборот. Отношение энергии или площади в антистоксовой полосе к стоксовой полосе, связано с температурой волоконно-оптической линии, а именно с точкой где возник сигнал. В устройстве РСИТ оптический импульс высокой мощности, генерируемый лазерным источником, вводится в тестируемое волокно и рассеиваемый свет разделяется на стокс (S) и антистокс (As), а затем обнаруживается двумя лавинными фотодетекторами. Мощность принимаемого света S и AS рассчитывается по следующим формулам(6,7) [6]:

$$Rs(z) = Rs(z)e^{-apz} * e^{-asz} * Po; \quad (6)$$

$$RAs(z) = Rs(z)e^{-apz} * e^{-asz} * Po,; \quad (7)$$

где Po – пиковая мощность опросного импульса;

$Rs(z)$ и $RAs(z)$ – коэффициенты отражения S и As;

apz и asz – коэффициенты затухания опросного импульса.

Предполагается, что коэффициенты затухания являются постоянными вдоль волокна. Коэффициенты отражения света S и As имеют разную зависимость которая выражается в следующем виде (8,9):

$$Rs(z) \propto \left(\frac{1}{\lambda s}\right)^4 = \frac{1}{1-exp[-h\Delta v/kT(z)]}; \quad (8)$$

$$RAs(z) \propto \left(\frac{1}{\lambda As}\right)^4 = \frac{1}{exp\left[\frac{h\Delta v}{kT(z)}\right]-1}, \quad (9)$$

где h – постоянная Планка;

k- постоянная Больцмана;

T(z)- температура в точке z;

Δv - изменение частоты комбинационного рассеяния;

λAs и λs –длины волн света.

7. Расчет и калибровка температурного профиля

В результате температурный профиль вдоль волокна можно описать отношением мощностей As и S по формуле (10):

$$R(z) = \frac{\text{P As (z)}}{\text{P s (z)}} = e^{-(a\text{As}-as)^z}\left(\frac{\lambda As}{\lambda s}\right)^4 exp[-\frac{\text{h}\Delta\text{v}}{kT(z)}], \quad (10)$$

В практике коэффициенты затухания света S и As всегда различны, в связи с чем требуется предварительная калибровка что бы свести к минимуму затухания в волокне [6]. Для предварительной калибровки температурный профиль можно представить в следующим виде (11):

$$R(z) = Rcal(z) * e^{(a\text{As}-as)^z}, \quad (11)$$

где $Rcal(z)$- температурный профиль после корректировки.

Далее для определения $R(z)$ представляем выражение в виде натурального логарифма (12):

$$ln[R(z)] = -(a\text{As} - as)\text{z} + ln[Rcal(z)]. \quad (12)$$

В данном случае предполагаем, что температура волокна является постоянной величиной, коэффициент затухания волокна$-(a\text{As} - as)$ можем определить из уравнения (12) с использованием метода аппроксимации кривой. После выполнения предварительной калибровки, профиль температуры $Rcal(z)$ рассчитывается из уравнения (6). Также следует отметить что мощность обратного комбинационного рассеяния на 50-60 дб ниже пиковой мощности инжектируемого импульса, что приводит к высокому соотношению сигнал/шум, в результате чего как говорилось ранее требуется большое количество итераций циклов запуска излучаемых световых сигналов определенного спектра.

Из выражения (10) можно сделать вывод, что интенсивность стоксовой рамановской компоненты не зависит от температуры, а антистоковая компонента наоборот, в значительной степени зависит от температуры и по соотношению интенсивности антистоксовой линии к стоксовой можно определить значение температуры. Данный подход позволяет избежать погрешности связанной с возможными флуктуациями мощности лазерного импульса[1,3,5].

Принцип действия системы РСИТ

Принцип работы предложенного устройства, блок-схема которого показана на рисунке 3 основан на приведенной выше методике. Устройство РСИТ содержит импульсный лазерный источник, способный запускать несколько импульсов лазерного излучения, длительность которых составляет от 10 нс и более. Эти лазерные импульсы направляются в оптоволоконную линию с помощью направленного излучателя. Оптоволоконная линия размещается в кабельной линии или в непосредственной близости с изоляцией кабеля (Рис. 4). При использовании одномодового оптического волокна может сохранять работоспособность на расстояниях более 10-12 км.

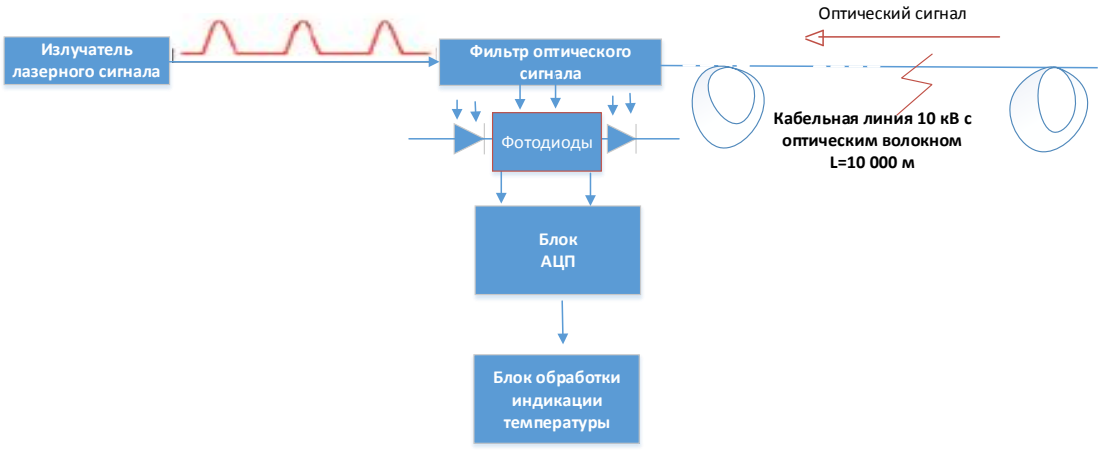


Рис. 3. Блок-схема распределенной системы измерения температуры в кабельных линиях 10 кВ.

Fig. 3. Block diagram of a distributed temperature measurement system in 10 kV cable lines.

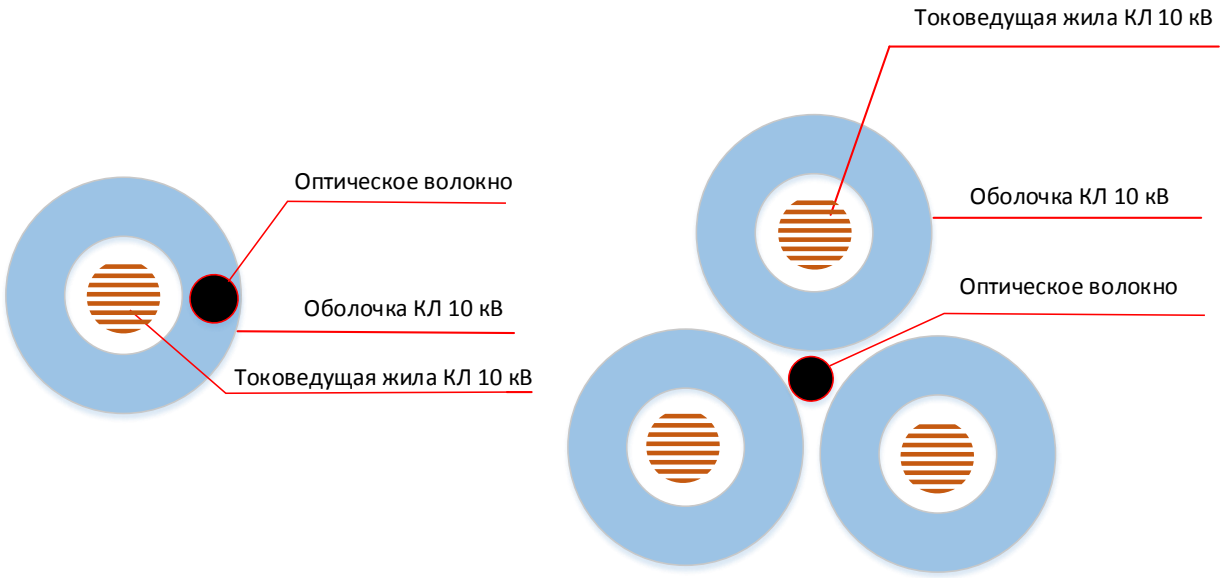


Рис. 4. Варианты размещения оптического волокна для измерения температуры кабельных линий 10 кВ.
Fig. 4. Optical fiber placement options for measuring the temperature of 10 kV cable lines.

Кабельная линия с оптическим волокном прокладывается в земле на определенную глубину, с известной постоянной температурой. Направленный световой импульс движется вдоль линии, как описано ранее, инициируя обратное рассеяние света в Рэлеевской, Бриллюэновской и Рамановской полосах светового спектра. Не весь свет, излучаемый при возбуждении атомной или молекулярной структуры, рассеивается обратно и попадает на фотоприемник прибора. Закон Снелла гласит, что есть определенный критический угол, выше которого свет не будет отражаться внутрь, а будет потерян (Рис. 5). Поскольку волокно цилиндрическое, входящие в волокно лучи образуют конус[7,11,12]. Все лучи, входящие в сердечник изнутри этого конуса, попадают на оболочку под углом больше критического, поэтому смогут благополучно распространяться вдоль волокна. Этот конус называют "конусом приема", затем обратно рассеянный свет попадает в фотоприемник прибора, где волны Рэлея и Бриллюэна, а также фоновый шум фильтруются для фокусировки на полосах комбинационного рассеяния. Как упоминалось ранее, промежуток времени в 10 нс, для захвата обратно рассеянного света соответствует 1-метровому сегменту оптоволоконной линии. Устройство РСИТ должно непрерывно циклически повторять этот процесс, чтобы получить статистически значимые данные температуры.

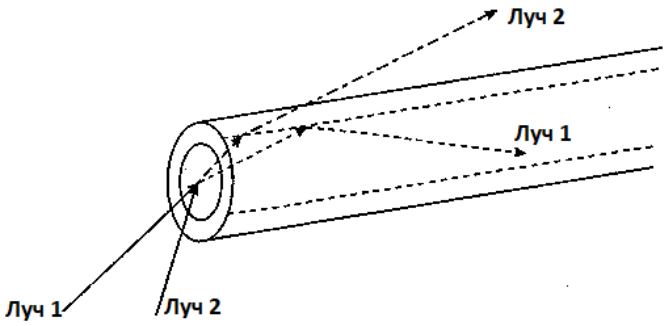


Рис. 5. Представлен лазерный импульс проникающий в оптическое волокно.
Fig. 5. A laser pulse penetrating an optical fiber is presented.

Когда зондирующий импульс сталкивается с отражающим объектом, часть энергии возвращается приемнику. Период между запуском зондирующего импульса и обнаружением отраженного сигнала позволяет определить расстояние до объекта (Рис 6). Амплитуда частично отраженного сигнала обусловлена расстоянием объекта от источника и детектора [5]. В распределенном датчике температуры зондирующий импульс представляет собой очень короткую вспышку лазерного излучения. После выхода из лазера свет проходит через оптическую муфту и попадает в чувствительное волокно.

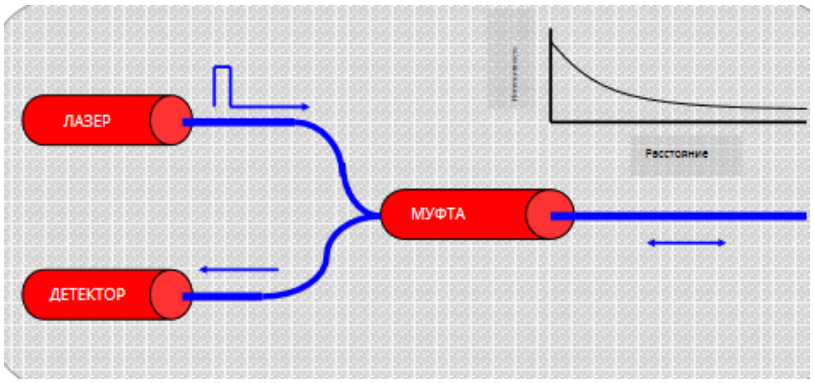


Рис. 6. Представлен путь движения лазерного импульса из оптического волокна в детектор.
Fig. 6. The path of the laser pulse from the optical fiber to the detector is presented.

Когда световой импульс проходит по чувствительному волокну, он затухает. (Один из способов представить это затухание — представить волокно в виде стеклянного окна толщиной в несколько километров). В процессе затухания зондирующий импульс относительно слабо взаимодействует с молекулами стеклянного волокна. Взаимодействие приводит к тому, что световая энергия рассеивается молекулами — часть этого рассеянного света возвращается обратно к пусковому концу волокна. Таким образом, в то время как большая часть световой энергии передается в прямом направлении по волокну, очень небольшая ее часть передается обратно, где она направляется на детектор света. Измеряя интенсивность некоторого отраженного света, который зависит от температуры, а также время его прихода, система рассчитывает и выводит температурный профиль вдоль чувствительного волокна. В нашей системе предполагается оптическое стекловолокно стандартного качества связи. Сердцевина содержится в оболочке из стекла/акрилата, при этом диаметр так называемого «голого» волокна составляет 250 микрон. Дополнительные покрытия и оболочки обеспечивают прочные, водонепроницаемые свойства. На сегодняшний день необходимость применения волоконно-оптического распределенного измерения температуры связано с массовой эксплуатацией кабельных линий расположенных в слоях грунта на разных глубинах.

Установка внешнего оптоволоконного кабеля для измерения температуры на новых подземных линиях электропередачи довольно проста. Оптическое волокно протягивается в траншею после прокладки силового кабеля и привязывается к наружной изолирующей части, приблизительно через каждый метр кабельными стяжками. Если силовой кабель должен быть протянут через длинные каналы, сенсорный кабель можно альтернативно прикрепить с помощью спирально наложенной гибкой полихлорвиниловой ленты.

На подстанции оптоволоконный кабель заканчивается внутри распределительного устройства, а к началу волокна присоединяется патч-корд с оптическим разъемом для подключения к устройству РСИТ. Сращивание оптических волокон не является трудоемким процессом, но требует наличие специального сварочного оборудования. На втором удаленном конце волокна все, что необходимо для герметизации конца кабеля, это водонепроницаемый термоусадочный чехол. На подстанциях с радиальными линиями электропередачи имеет смысл рассмотреть возможность мультиплексирования одного устройства РСИТ по нескольким кабельным линиям, или использовать оптико-механический переключатель.

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрена предложенная методика распределенной системы измерения температуры по всей длине высоковольтной кабельной линии, проложенной в земле с применением оптического волокна с целью непрерывного онлайн-мониторинга технического состояния кабельных линий. Предлагаемый метод обладает достаточно высокой помехоустойчивостью к электрическим и электромагнитнытным помехам, высокой чувствительностью и высокой точностью, что подтверждается математическим и теоретическим анализом. Рабочие характеристики могут быть дополнительно улучшены за счет использования волокна с более высоким двойным лучепреломлением. Помимо кабельных линий данный метод применим для осуществления распределенного температурного контроля силовых трансформаторов, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, воздушных линий электропередачи, а также другого оборудования подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peck, David, and Seebacher, Peter, “Distributed Temperature Sensingusing Fibre-Optics (DTS Systems)”, 2000 Electricity Engineers’Association Annual Conference, Auckland, New Zealand, 16-17 June,2000.

2. Nicholls, Paul, “Monitoring for hot spots and leaks using fiber-optic technology”, Hydrocarbon Processing, Novemeber, 2001.

3. www.yamatoprotec.co.ja, website, January 2003.

4. Laurence, Oliver, “FIBER OPTIC SENSORS Bring New Capabilities To Well Bore Monitoring”, The American Oil & Gas Reporter, September, 2001.

5. Starskey, Steve, “Sensa putting fiber optics to good use: well monitoring in Alaska”, Petroleum News Alaska, February 17, 2002.

6. X. Bao and L. Chen, “Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors,” Sensors 12(7), 8601–8639 (2012).

7. Andersson E, Öhberg P. Quantum Information and Coherence. Cham: Springer International Publishing; 2014.

8. Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2008.

9. Greenbaum E, Drexler W, Fujimoto JG. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008.

10. Soller BJ, Gifford DK, Wolfe MS, Froggatt ME, Yu MH, Wysocki PF. Measurement of localized heating in fiber optic components with millimeter spatial resolution. In: Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference, OFC 2006: Anaheim, California, 5 - 10 March 2006, Anaheim, CA, USA, 3/5/2006 - 3/10/2006.

11. LUNA Technologies. Optical Distributed Sensor Interrogator Model ODiSI-B: User´s Guide ODiSI-B. 5th ed. Blacksburg, VA 24060; 2017.

12. Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single- mode fiber. Appl. Phys. Lett. 1981;39(9):693–5.

13. Soller B J, Wolfe M Froggatt M E. Polarization Resolved Measurement of Rayleigh Backscatter in Fiber-optic Components. In: Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference, OFC 2006: Anaheim, California, 5 - 10 March 2006, Anaheim, CA, USA, 3/5/2006 - 3/10/2006.

14. Фризюк К.С., Маркина Д.И., Общая физика. Оптика. – СПб: Университет ИТМО, 2020.

REFERENCES

1. Peck, David, and Seebacher, Peter, “Distributed Temperature Sensingusing Fibre-Optics (DTS Systems)”, 2000 Electricity Engineers’Association Annual Conference, Auckland, New Zealand, 16-17 June,2000.

2. Nicholls, Paul, “Monitoring for hot spots and leaks using fiber-optic technology”, Hydrocarbon Processing, Novemeber, 2001.

3. www.yamatoprotec.co.ja, website, January 2003.

4. Laurence, Oliver, “FIBER OPTIC SENSORS Bring New Capabilities To Well Bore Monitoring”, The American Oil & Gas Reporter, September, 2001.

5. Starskey, Steve, “Sensa putting fiber optics to good use: well monitoring in Alaska”, Petroleum News Alaska, February 17, 2002.

6. X. Bao and L. Chen, “Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors,” Sensors 12(7), 8601–8639 (2012).

7. Andersson E, Öhberg P. Quantum Information and Coherence. Cham: Springer International Publishing; 2014.

8. Mandel L, Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 2008.

9. Greenbaum E, Drexler W, Fujimoto JG. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2008.

10. Soller BJ, Gifford DK, Wolfe MS, Froggatt ME, Yu MH, Wysocki PF. Measurement of localized heating in fiber optic components with millimeter spatial resolution. In: Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference, OFC 2006: Anaheim, California, 5 - 10 March 2006, Anaheim, CA, USA, 3/5/2006 - 3/10/2006.

11. LUNA Technologies. Optical Distributed Sensor Interrogator Model ODiSI-B: User´s Guide ODiSI-B. 5th ed. Blacksburg, VA 24060; 2017.

12. Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single- mode fiber. Appl. Phys. Lett. 1981;39(9):693–5.

13. Soller B J, Wolfe M Froggatt M E. Polarization Resolved Measurement of Rayleigh Backscatter in Fiber-optic Components. In: Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference, OFC 2006: Anaheim, California, 5 - 10 March 2006, Anaheim, CA, USA, 3/5/2006 - 3/10/2006.

14. Frizyuk K. S. and Markina D. I., General Physics. Optics. - St. Petersburg: ITMO University, 2020.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MEASURING TEMPERATURE IN THE LONGITUDINAL PROFILE OF A CABLE LINE USING BUILT-IN FIBER-OPTICAL LINES

Arifov [1]A.M., Bekirov [2]E.A.

Physics and Technology Institute,
V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
295007, Republic of Crimea, Simferopol, p. Vernadsky, 4.
[1]arifov.alim@inbox.ru, [2]bekirov.e.a@cfuv.ru.

Abstract: the paper proposes a method for measuring temperature in the longitudinal profile of a cable line using built-in fiber optic lines in cable lines under operating voltage and load, which makes it possible to prevent the development of an emergency defect and to control the temperature and distance to the place of heating of the controlled section with high accuracy in real time. In the work on the proposed method, an algorithm for testing was developed.
Subject: the dependence of the parameters of the optical fiber embedded in the cable, arising under the influence of temperature changes, for each specific section or throughout the controlled section of the cable line.
Materials and methods: In the work, for the first time, studies were carried out on the dependence of the parameters of the fiber-optic line of the cable integrated into the cable line, as well as the local temperature change in the section of the cable line, by calculations using the time difference between the moment of receipt of the reflected pulse and the moment of emission of the laser pulse into the optical fiber.
Results: an algorithm was developed, as well as a mathematical analysis was carried out, confirming the receipt of the resulting combinatorial scattering data, for the subsequent output of temperature parameters using an optical fiber integrated into the cable line. Temperature control is determined by optical scattering in the reflected signals.
Conclusions: temperature control by optical scattering in reflected signals is applicable to measuring the temperature regime in the cable line profile, which in turn will allow optimizing the load of the cable line, rationally taking into account real climatic conditions and local features of the laying of all sections of the cable line, as well as detecting defects prematurely.
Key words: optical fiber; cable line; anti-stokes; stokes.