

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.14 (06)

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПОРОГОВЫЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2012 г. В. Д. Гавричев, аспирант; А. Л. Дмитриев, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: g.vasilisc@rambler.ru

Описаны принцип действия и конструкция волоконно-оптического порогового датчика температуры, не чувствительного к влиянию сильных электрического и магнитного полей и предназначенного для использования в контрольно-измерительной аппаратуре систем электроэнергетики. В основу действия датчика положено изменение светорассеяния органических материалов вблизи температурной точки фазового перехода жидкость–твердое тело. Приведены результаты расчетов оптического пропускания и экспериментальной разработки датчика.

Ключевые слова: температура, оптическое волокно, рассеяние света, фазовый переход.

Коды OCIS: 060.2370, 120.4640, 280.6780

Поступила в редакцию 07.12.2011

Введение

Современная силовая электроэнергетика (атомные, тепловые, гидро- электростанции, распределители электрической мощности, трансформаторные подстанции) предъявляет высокие требования к техническим и эксплуатационным характеристикам используемой контрольно-измерительной аппаратуры, которая должна работать в условиях сильных электромагнитных помех, химически агрессивных сред, вибраций и других сторонних воздействий [1, 2]. Особое значение для успешного развития силовой электроэнергетики приобретает создание недорогих при массовом производстве, надежных в работе измерителей и датчиков температуры [2, 3]. Нередко такие приборы должны выполнять функции логических устройств, формирующих выходной аварийный сигнал при превышении измеряемой температуры объекта (рабочий элемент аппаратуры, газ, охлаждающая жидкость и др.) некоторого заданного порогового значения. Порог срабатывания такого датчика темпера-

туры устанавливается соответствующей регулировкой электронного усилителя, включенного в цепь термодатчика. При этом действие мощных электрического и магнитного полей (обуславливающих токи Фуко, электро- и магнитострикцию материалов) как на термодатчик, так и на сервисную электронную аппаратуру, вносит существенные помехи и уменьшает точность и показатели надежности датчика. Эти недостатки устраняются в предлагаемом волоконно-оптическом пороговом датчике температуры (ВОПДТ), выполненном из чисто диэлектрических (не содержащих металлических или полупроводниковых компонент) материалов, работа которого основана на изменении светорассеяния ряда органических сред вблизи точки фазового перехода жидкость–твердое тело.

Принцип действия датчика

Чувствительный элемент ВОПДТ выполнен в виде миниатюрной кюветы из кварцевого стекла, содержащей рабочее вещество и рас-

Температуры плавления органических материалов, применяемых в ВОПДТ

Материал	Температура плавления, °С
парафин	50–60
анестезин	92
нафталин	80
трибезиламин	95
бензотриазол	98

положенной между входным и выходным торцами подводимых многомодовых волоконных световодов. При температуре вещества, превышающей температуру плавления, кювета прозрачна и оптические потери в датчике определяются взаимным расположением и размерами световодов и кюветы. В таблице приведены температуры плавления (фазовых переходов жидкость–твердое тело) нескольких органических соединений, пригодных к использованию в ВОПДТ [4]. При кристаллизации рабочего вещества вследствие интенсивного рассеяния света в порошкообразной неоднородной среде оптические потери в термодатчике резко возрастают. В результате один оптический элемент выполняет функции как чувствительного к изменению температуры, так и логического устройства термодатчика [5]. Полезной особенностью рассматриваемого датчика является и то, что в нем не требуется использование дорогостоящих коллиматоров (микролинз либо градианов) для преобразования оптических сигналов, и подводимые волоконные световоды непосредственно стыкуются с цилиндрической миниатюрной кюветой, которая в прозрачном состоянии выполняет функцию двояковыпуклой цилиндрической линзы.

Расчет оптического пропускания датчика

Конструктивно кювету ВОПДТ удобно выполнить в виде тонкостенной капиллярной трубки, ось которой расположена перпендикулярно оптическим осям входного и выходного волоконных световодов. Расчет оптических потерь и хода лучей света в кювете и световодах, при их заданных взаимном расположении и размерах, выполнен с использованием программы “ZEMAX”. На рис. 1 показан при-

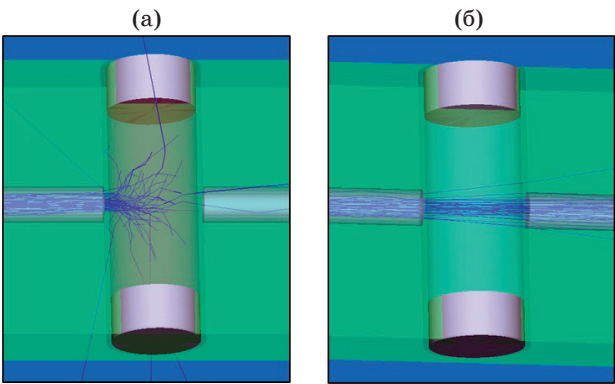


Рис. 1. Распространение лучей света в кювете ВОПДТ. а – рассеяние света (температура датчика ниже пороговой), б – пропускание света (температура датчика выше пороговой).

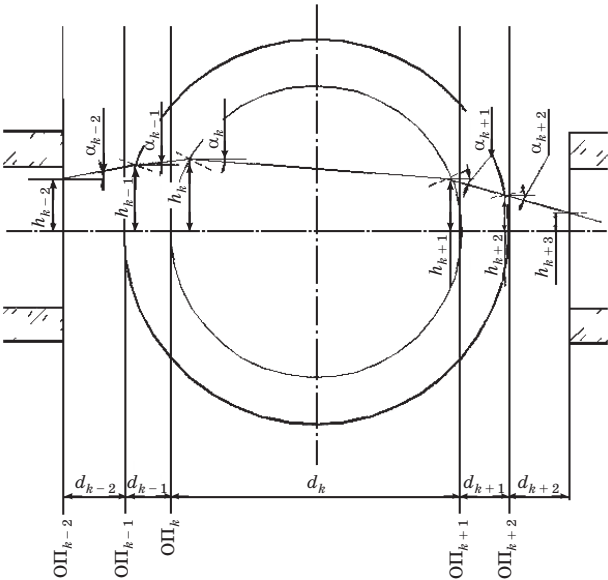


Рис. 2. Прохождение луча в пороговом датчике температуры при прозрачной кювете.

мер такого компьютерного расчета хода лучей в оптоволокне и в кювете ВОПДТ [6].

Для расчета оптического пропускания кюветы использовался алгоритм анализа прохождения “нулевых лучей” через несколько поверхностей раздела в геометрическом приближении, в предположении точной центровки световодов и кюветы (рис. 2), при этом здесь различаются три этапа. Первый – перенос точки вдоль луча на расстояние d_{k-1} от входного световода до поверхности кюветы по формуле (1) (изменяется только линейная координата h)

$$h_k = h_{k-1} - \alpha_{k-1} d_{k-1}. \quad (1)$$

Второй этап – преломление луча на k -поверхности (при этом изменяется угловая координата α)

$$\alpha_k = \mu_k \alpha_{k-1} + p_k h_k (1 - \mu_k), \quad (2)$$

где $\mu_k = n_k / n_{k+1}$, $p_k = 1/r_k$.

Формулы (1), (2) образуют алгоритм расчета прохождения нулевого луча через одну поверхность с кривизной p , относительным показателем преломления μ , расстоянием от предыдущей поверхности d . Такая рекуррентная запись позволяет организовать циклический процесс расчета хода луча в системе световод–кювета–световод. Перед началом расчета необходимо определить координаты луча на начальной поверхности, предшествующей первой поверхности системы (стенки кюветы) и расположенной на расстоянии d от нее (входные координаты луча), а затем организовать циклическое использование рекуррентных формул (1), (2), перебирая в качестве кривизны p , относительного показателя μ и расстояния d соответствующие значения для всех поверхностей систе-

мы. На рис. 3 показан алгоритм расчета хода нулевого луча из бесконечности с входными координатами $h = 1$, $\alpha = 0$, $d = 0$.

Третий этап – расчет оптического коэффициента пропускания системы, равного отношению числа лучей, прошедших через систему и направляемых в выходной световод, к общему числу лучей, выходящих из входного световода. Расстояние между световодами и кюветой (d_1 и d_5) лежит в пределах от 0 до 3 мм, d_2 и d_4 равны 0,2 мм, $d_3 = 1,6$ мм, внешний радиус кюветы $r = 1$ мм, внутренний радиус кюветы $r = 0,8$ мм. Предполагается, что световоды и кювета точно центрированы. Световые лучи на входе и выходе рассматриваемых световодов находятся в пределах числовой апертуры используемого многомодового оптоволокну, равной 0,36. Данный алгоритм предусматривает расчет хода лучей в N аксиальных (проходящих через оптическую ось) плоскостях падения.

Расчеты оптических потерь в датчике показывают, что минимальные потери на пропускание ВОПД достигаются при прямом контакте плоских торцов подводимых световодов и поверхности кюветы, одновременно выполняющей роль фокусирующей цилиндрической линзы. При этом внешний диаметр микрокюветы может в несколько раз превышать диаметр сердцевины оптоволокну, и минимальные практически достижимые оптические потери в датчике составляют 1–3 дБ. На рис. 4 показаны результаты расчета коэффициентов про-

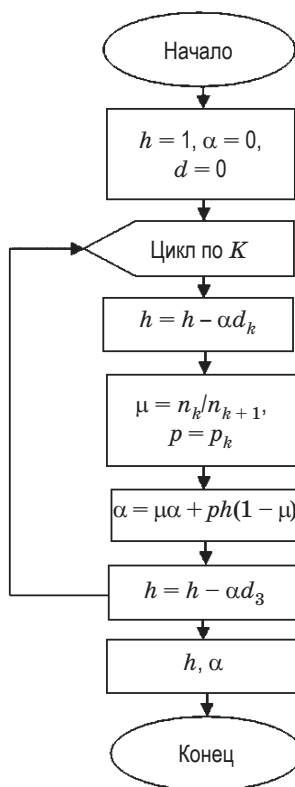


Рис. 3. Алгоритм расчета прохождения луча через систему световод–кювета–световод.



Рис. 4. Коэффициент пропускания оптической системы ВОПД с различными диаметрами d сердцевины световодов и D кюветы. 1 – $d = 400$ мкм, $D = 1,3$ мм, 2 – $d = 400$ мкм, $D = 2$ мм, 3 – $d = 200$ мкм, $D = 1,3$ мм, 4 – $d = 200$ мкм, $D = 2$ мм.

пускания оптической системы ВОПДТ с различными диаметрами сердцевины световодов и кюветы.

Эксперимент

В опытном экземпляре ВОПДТ [6] использовалось отечественное оптическое волокно с полимерным защитным покрытием, с наружным диаметром в пределах 400–600 мкм и диаметрами сердцевины 200 и 400 мкм. Герметическая стеклянная кювета диаметром 2 мм и подводимое оптоволокно укладывались в направляющие пазы тонкой текстолитовой пластины и фиксировались эпоксидным клеем. В качестве рабочего материала ВОПДТ использовался анестезин, температура плавления которого 92 °С. Внешний вид ВОПДТ показан на рис. 5.

Экспериментальная зависимость мощности оптического сигнала на выходе ВОПД от температуры датчика приведена на рис. 6. Длина волны излучения полупроводниковых светодиода либо лазера, вводимого в оптоволокно, достаточно произвольна и может выбираться, например, как в видимой (0,68 мкм), так и в инфракрасной (0,85 мкм) областях спектра.

Температура срабатывания датчика при повторных контрольных измерениях воспроизводилась с точностью не хуже 0,5 °С. Инерционность ВОПДТ существенно связана с массой микрокюветы, размерами и тепловыми характеристиками материалов основания конструкции (текстолит и термостойкий эпоксидный клей). Для представленного варианта ВОПДТ время отклика датчика при изменении температуры среды составляет несколько единиц секунд и в перспективе может быть сокращено при миниатюризации его общей конструкции.

Заключение

Волоконно-оптические пороговые датчики температуры описанного типа предназначены для применения в системах контроля состояния и мониторинга мощных силовых трансформаторов, линий электропередач, сверхвысокочастотных трактов. При использовании ВОПДТ для контроля температуры элементов сложных функциональных устройств аппаратуры энергоснабжения излучение от полупроводникового источника (лазера или светодиода) разветвляется в многоканальном де-

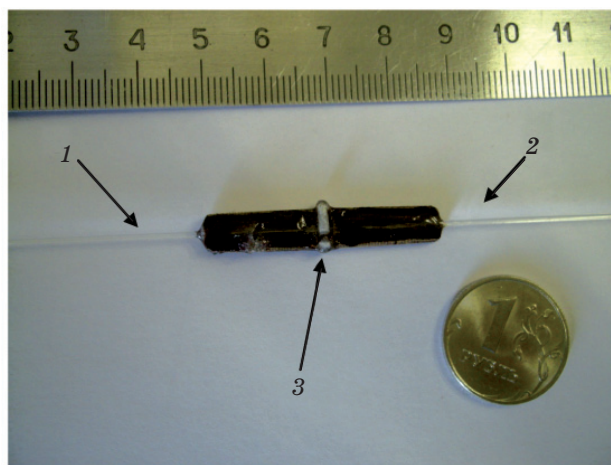


Рис. 5. Внешний вид волоконно-оптического датчика температуры. 1, 2 – входной и выходной световоды, 3 – кювета с чувствительным элементом.

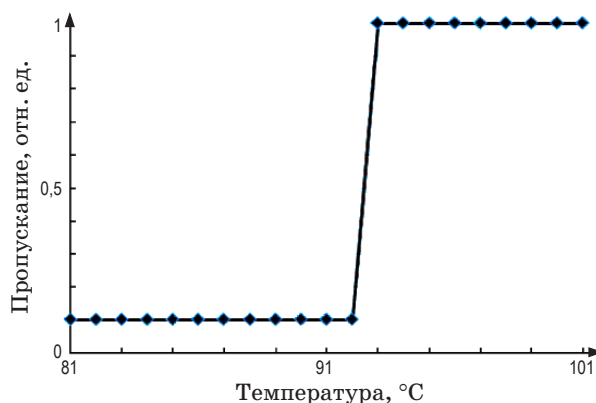


Рис. 6. Экспериментальная зависимость выходного оптического пропускания датчика от температуры кюветы, заполненной анестезином.

мультиплексоре и посредством многомодовых волоконных световодов направляется в сеть термодатчиков. Оптические сигналы на выходе датчиков подаются на фотодиоды, выходные электрические сигналы которых отображаются на индикаторном устройстве. При использовании в качестве источника света сравнительно мощного (единицы мВт) излучателя видимого диапазона спектра и при небольшой (например, десятки метров) длине подводимого к датчику кварцевого (либо полимерного) оптоволокна возможно упрощенное построение системы отображения информации – без фотоприемников и индикаторных излучателей. При

этом на табло системы отображения информации непосредственно выводятся торцы выходных световодов ВОПДТ, сигналы на выходе которых прямо характеризуют состояние температуры датчиков.

Основные достоинства описанного порогового датчика температуры – практическая

нечувствительность к воздействию сильных электрического и магнитного полей, вибраций, изменений давления и влажности окружающей среды, простота принципа действия, конструкции и, соответственно, высокая надежность в работе и малая стоимость изделия.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2006. 592 с.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Удд. Э. Волоконно-оптические датчики. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
4. Дулицкая Р.А., Фельдман Р.И. Практикум по физической и коллоидной химии. М.: Высшая школа, 1978. 296 с.
5. Акмаров К.А., Дмитриев А.Л., Анохин Ю.А., Таджибаев А.И. Волоконно-оптический пороговый датчик температуры для мониторинга состояния электрических силовых установок // Промышленная энергетика. 2011. № 1. С. 10–12.
6. Гавричев В.Д. Волоконно-оптический пороговый датчик температуры // Магистр. дис. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 90 с.