

УДК 681.586.5

Н. А. Матюшечкин¹, Ю. Г. Белов², А. А. Болонина², Д. М. Кочеганов², Т. Х. Абузьяров²**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ СИСТЕМ
ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**НПП «Полет» (Н. Новгород)¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приводится описание конструкции и технологические характеристики волоконно-оптического датчика температуры релейного типа. Модуляция светового потока в датчике осуществляется в точке фазового перехода поликристаллического высокомолекулярного органического вещества – янтарного ангидрида. Данный тип датчика может найти применение в системах тепловой защиты электрических машин и аппаратов в зонах действия мощных электромагнитных полей.

Ключевые слова: датчик температуры, оптическое волокно, тепловая защита, электрические машины и аппараты.

Введение

Обеспечение нормального теплового режима работы – важное условие для долговременного и надежного функционирования электрических машин и аппаратов. Тепловые перегрузки приводят к ухудшению эксплуатационных свойств конструкционных материалов и покрытий, в частности, к ускоренному старению электрической изоляции токоведущих частей, выходу из строя электролитических конденсаторов, разрушению и заклиниванию подшипников, что может привести к возникновению аварийных ситуаций. Для организации тепловой защиты создаются системы с непосредственным контролем температуры при помощи встраиваемых датчиков. Как правило, для этих целей используются термодатчики на базе термисторов и термопар. Недостатком датчиков данных типов является наличие токоведущих частей, что накладывает ограничения на их применение в обмотках высоковольтных электрических машин и аппаратов в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки, обусловленной работой мощных электроприводов, радиолокационной техники, установок индукционного нагрева и т.п. Волоконно-оптические датчики температуры не подвержены воздействию электромагнитных полей благодаря использованию в качестве каналов передачи сигнала оптических волокон, являющихся диэлектрическими волноводами.

По принципу действия волоконно-оптические датчики можно разделить на две группы [1-3]. К первой относятся датчики, в которых регистрируемое возмущение, в том числе температура, воздействует непосредственно на оптическое волокно. Наиболее известны датчики с фазовой модуляцией излучения и поляризационные датчики. Ко второй группе относятся датчики с внешней модуляцией излучения, при этом модулятор располагается непосредственно в волоконно-оптической линии. В качестве модуляторов могут использоваться химические индикаторы, флуоресцирующие вещества, волоконные брэгговские решетки и другие объекты, свойства которых меняются под воздействием регистрируемого возмущения.

В волоконно-оптических датчиках с фазовой модуляцией фиксируется изменение фазы проходящего по волокну излучения под воздействием регистрируемого возмущения. Измерение величины сдвига фазы излучения осуществляется с помощью интерферометра. Преимуществом датчиков данного типа является высокая чувствительность, недостатком – сложная конструкция самого датчика и приемника сигнала, а также относительно большие габариты из-за необходимости использования в измерительном плече датчика длинного измерительного волокна [1].

В поляризационных волоконно-оптических датчиках регистрируется поворот плоскости

поляризации проходящего по оптическому волокну излучения под воздействием регистрируемого возмущения. Недостатки датчика данного типа те же, что и у фазовых датчиков [1].

В волоконно-оптических датчиках с модуляцией длины волны излучения могут применяться такие эффекты, как эффект Доплера, наблюдаемый при облучении световым пучком, выходящим из торца оптического волокна, движущихся частиц. Величина сдвига длины волны излучения (сдвига Доплера) может быть определена при помощи спектрального анализа отраженного частицами излучения. Недостатки датчиков данного типа аналогичны двум предыдущим [2].

В волоконно-оптических датчиках с амплитудной модуляцией регистрируется изменение мощности светового потока под действием внешнего возмущения. Преимущества датчиков данного типа – простота и надежность конструкций датчика и приемного элемента [3], что является критичным в выбранной сфере применения.

Принцип работы датчика

Для решения задачи аварийного отключения аппаратуры в условиях действия мощных электромагнитных полей разработан волоконно-оптический датчик температуры с амплитудной модуляцией, обладающий преобразовательной характеристикой релейного типа. Функциональная схема такого датчика представлена на рис. 1.

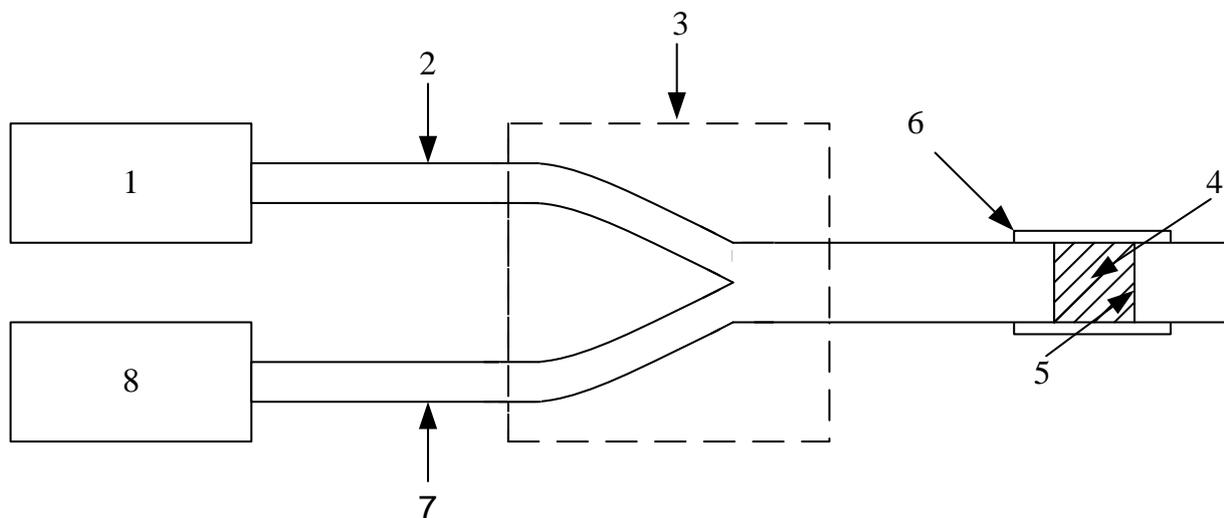


Рис. 1. Функциональная схема волоконно-оптического датчика температуры:

- 1 – источник излучения; 2 – подводящее излучение оптическое волокно;
 3 – направленный разветвитель; 4 – рабочее вещество; 5 – зеркало; 6 – корпус датчика;
 7 – отводящее излучение оптическое волокно; 8 – приемник излучения

Принцип работы устройства заключается в следующем. Корпус датчика помещается в среду, температуру которой требуется контролировать. Световой поток от источника излучения 1 распространяется по оптическому волокну 2 и с помощью разветвителя 3 направляется на рабочее вещество 4. Затем излучение отражается от зеркала 5 и с помощью разветвителя 3 направляется в оптическое волокно 7, которое подводит этот световой поток к приемнику излучения 8. В корпусе датчика между оптическим волокном и зеркалом образуется зазор, который заполняется поликристаллическим рабочим веществом 4, изменяющим фазовое состояние при температуре, равной необходимой пороговой температуре срабатывания датчика. При температуре среды ниже пороговой температуры срабатывания датчика рабочее вещество 4 находится в твердом состоянии и интенсивно рассеивает излучение. Приемник излучения 8 регистрирует минимальный уровень входного сигнала. При температуре среды больше или равной пороговой срабатывания датчика у рабочего вещества 4 происходит фа-

зовый переход первого рода, в результате чего его светопропускная способность возрастает и уровень входного сигнала, регистрируемого приемником излучения δ , увеличивается.

Фазовый переход рабочего вещества происходит в узком диапазоне температур (около 1°C в окрестности $t_{\text{ср}}^0$), благодаря чему преобразовательная характеристика датчика имеет релейный вид: ступень с явно выраженным высоким и низким уровнем выходного сигнала (рис. 2), что позволяет без труда зарегистрировать достижение заданной точки срабатывания датчика.

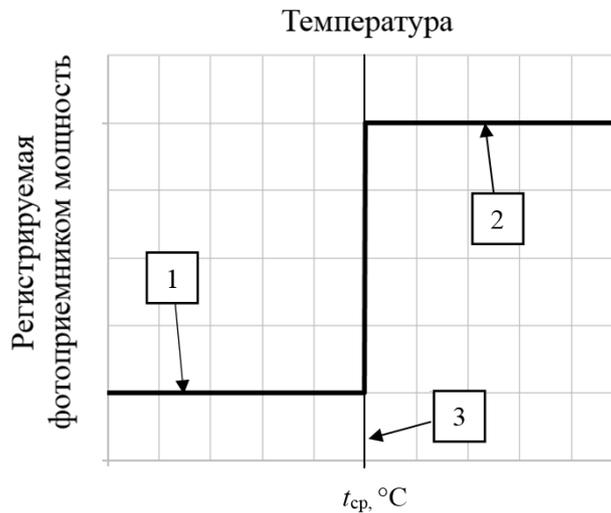


Рис. 2. Качественный вид преобразовательной характеристики датчика релейного типа:

- 1 – сигнал датчика низкого уровня; 2 – сигнал датчика высокого уровня;
3 – температура фазового перехода рабочего вещества (температура срабатывания датчика)

Применение рабочих веществ с различными значениями температуры плавления позволяет создать датчик с требуемой температурой срабатывания. В качестве примера в табл. 1 приводятся ряд поликристаллических веществ, температура плавления которых позволяет использовать их в датчиках для тепловой защиты токоведущих частей с классами нагревостойкости электроизоляционных материалов $Y, A, E, B, F, H, 200, 220, 250$.

Таблица 1

Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов и соответствующие им по температуре плавления виды рабочих веществ

№ п/п	Класс нагревостойкости электроизоляционных материалов	Температура, характеризующая нагревостойкость материалов данного класса, $^\circ\text{C}$	Рабочее вещество	Температура плавления рабочего вещества, $^\circ\text{C}$
1	Y	90	1,4 –дибромбензол [4]	87,5
2	A	105	Гидрокоричная кислота [4]	101,5
3	E	120	Янтарный ангидрид [4]	119,6
4	B	130	Карбамид [5]	129-134
5	F	155	пара-Нитроанилин [4]	149
6	H	180	α – Камфора [4]	178,4
7	200	200	Лактоза [6]	200
8	220	220	Антрацен [4]	216
9	250	250	Глицин [4]	247,2

Описание разработанной конструкции датчика

С использованием описанного принципа был изготовлен экспериментальный образец датчика, конструкция которого показана на рис. 3.

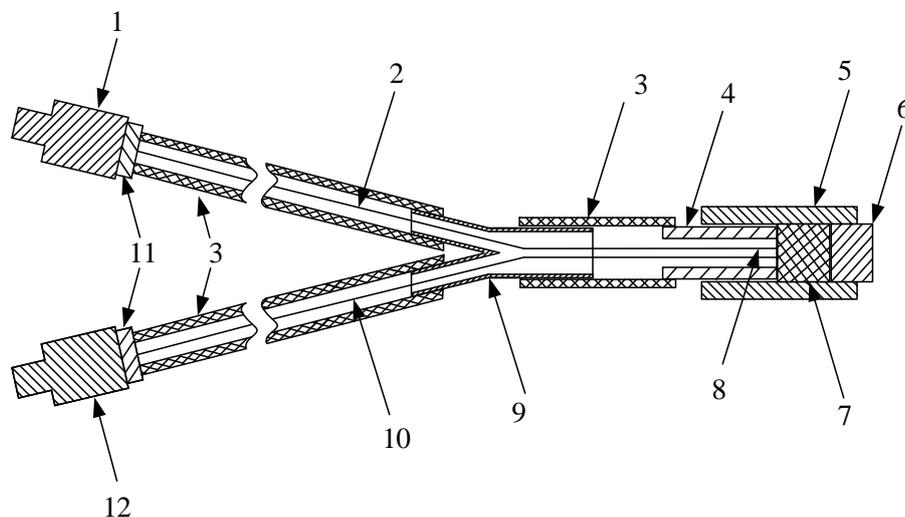


Рис. 3. Конструкция экспериментального образца волоконно-оптического датчика температуры:

1 – наконечник оптического соединителя, подключаемый к источнику излучения; 2 – оптическое волокно, подводящее излучение; 3 – оболочка оптического кабеля; 4 – корпус гексагональной упаковки волокон; 5 – корпус датчика; 6 – зеркало; 7 – рабочее вещество; 8 – гексагональная упаковка семи оптических волокон; 9 – арматура для закрепления оптического кабеля; 10 – оптические волокна, отводящие излучение; 11 – втулка для закрепления оболочки оптического кабеля; 12 – наконечник оптического соединителя, подключаемый к приемнику излучения

Герметичная конструкция корпуса датчика позволяет использовать любые рабочие вещества без риска утечки. В образце в качестве рабочего вещества используется янтарный ангидрид с температурой плавления 119,6°C. Для уменьшения потерь в рассматриваемом датчике при прохождении излучения в прямом и обратном направлениях применена упаковка гексагональной формы из семи оптических волокон (рис. 4). Центральное волокно используется для подведения излучения в корпус датчика, шесть периферийных волокон – для отвода излучения. Внешний вид датчика показан на рис. 5.

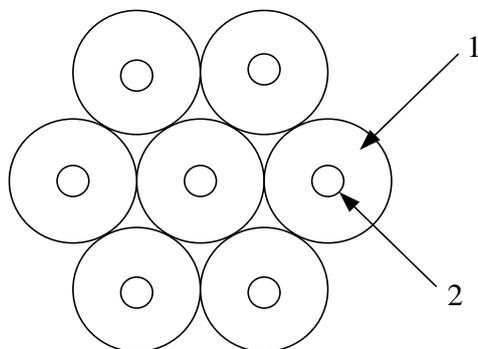


Рис. 4. Гексагональная упаковка семи оптических волокон:

1 – оболочка оптического волокна; 2 – сердцевина оптического волокна

Достоинством данного датчика температуры являются малые размеры, определяемые габаритами оптических узлов. При разработке конструкции экспериментально были выбраны оптимальные с точки зрения прочности и малых габаритов параметры корпуса.

Дальнейшее уменьшение размеров может привести к снижению механической прочности соединений, что является неприемлемым. На линейный размер датчика влияет величина зазора в корпусе для размещения рабочего вещества. Слишком большая величина зазора не только негативно влияет на компактность датчика, но и приводит к недопустимо большому увеличению потерь энергии в рабочем веществе датчика. Слишком малая величина зазора приводит к уменьшению перепада в преобразовательной характеристике датчика, что затрудняет фиксацию момента его срабатывания. К тому же усложняется технологический процесс изготовления датчика. Для обеспечения гарантированной регистрации момента срабатывания датчика необходимо иметь величину перепада на преобразовательной характеристике около 20 дБ.

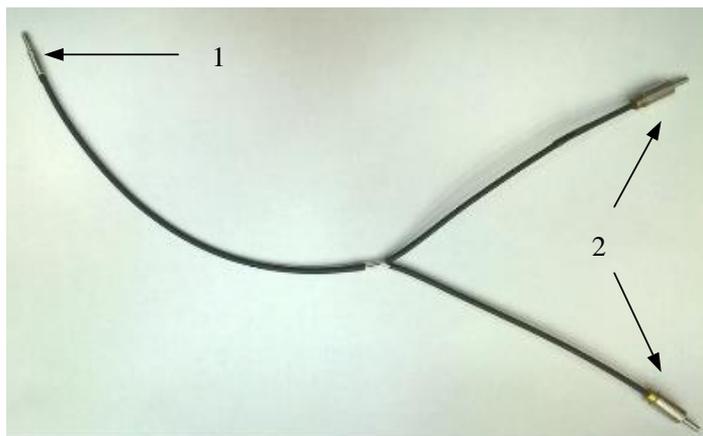


Рис. 5. Внешний вид датчика температуры:

1 – корпус датчика; 2 – наконечники оптических соединителей, подключаемые к приемнику и источнику излучения

Результаты экспериментального исследования датчика

Для определения требуемой величины зазора и снятия характеристик датчика использована установка (рис. 6).

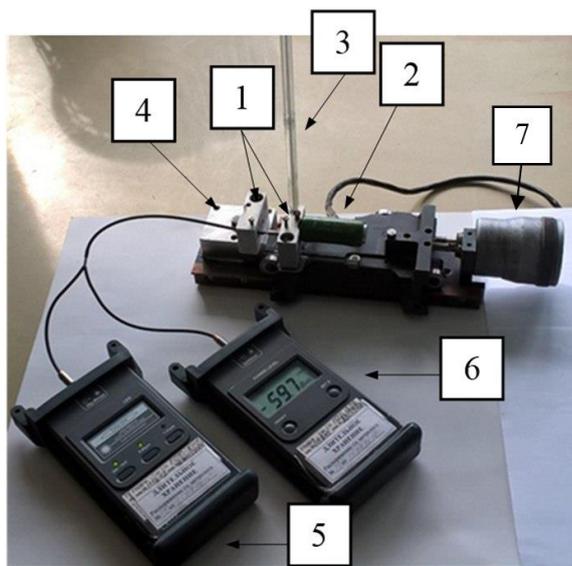


Рис. 6. Внешний вид установки для исследования работы датчика:

1 – алюминиевые пластины; 2 – электронагреватель; 3 – ртутный термометр;
4 – исследуемый датчик; 5 – источник излучения типа FOD-2115;
6 – приемник излучения; 7 – тиски с микрометрическим винтом

В результате проведения нескольких циклов нагрева и охлаждения датчика с различными величинами рабочего зазора была определена величина рабочего зазора, равная 2,8 мм, обеспечивающая перепад в преобразовательной характеристике датчика, равный 20 дБ.

Снятие преобразовательной характеристики, т.е. зависимости сигнала датчика от температуры, выполнялось следующим образом. Включался электронагреватель, прикрепленный к правой пластине. Ввиду высокой теплопроводности алюминия и достаточно больших размеров пластин фиксируемые показания термометра, закрепленного на пластине, соответствовали реальной температуре корпуса датчика. Одновременно с регистрацией температуры на фотоприемнике определялся уровень мощности на выходе датчика. При температуре ниже температуры плавления рабочее вещество находится в твердом состоянии и интенсивно рассеивает световой поток за счет своей поликристаллической структуры. При повышении температуры до температуры плавления рабочее вещество переходит в расплавленное состояние, и его прозрачность значительно возрастает. При этом происходит увеличение мощности, регистрируемой приемником излучения. Для обеспечения точности регистрации показаний приборов температура повышается постепенно, процесс нагрева установки от минимальной до максимальной температуры производится за время, равное 5 мин. При снятии преобразовательной характеристики датчика верхнее значение температуры доводится до 135°C, после чего электронагреватель отключается и снимается преобразовательная характеристика при остывании датчика. Охлаждение датчика проводится до температуры 100°C.

Измерение параметров датчика осуществляется при длинах волн излучения 0,85 и 1,31 мкм. Полученные преобразовательные характеристики датчика представлены на рис. 7 и рис. 8. Вертикальной линией отмечена температура начала процесса плавления янтарного ангидрида.

Как видно из рис. 7 и рис. 8, на длине волны 1,31 мкм несколько увеличивается перепад уровней преобразовательной характеристики датчика (до 22 дБ), что обусловлено уменьшением поглощательной способности рабочего вещества.

Процесс фазового перехода связан с поглощением или отдачей скрытой теплоты плавления/кристаллизации и, следовательно, обладает определенной инерционностью. Это обстоятельство проявляется в небольшом наклоне преобразовательной характеристики датчика в окрестности температуры срабатывания. Однако влияние данного фактора в разработанном датчике мало и не сказывается на его функциональных свойствах вследствие малой массы рабочего вещества и малой величины его теплоты плавления.

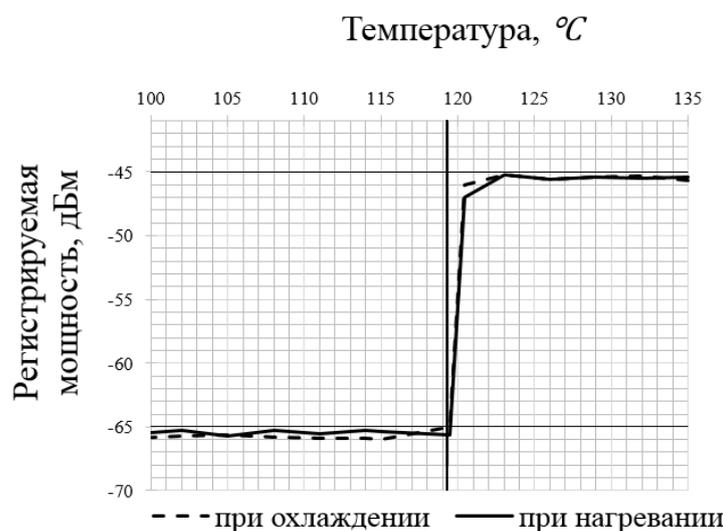


Рис. 7. Преобразовательная характеристика датчика при $\lambda=0,85$ мкм

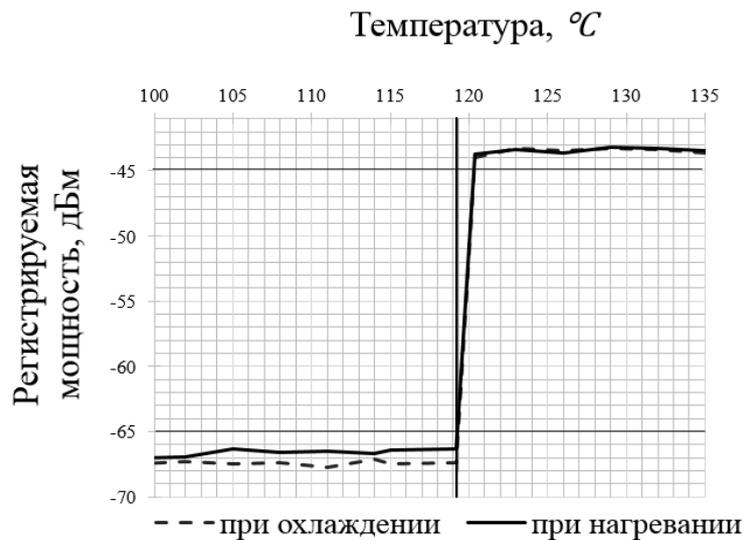


Рис. 8. Преобразовательная характеристика датчика при $\lambda=1,31$ мкм

Заключение

Изготовлен и исследован образец волоконно-оптического датчика температуры с преобразовательной характеристикой релейного вида, использование которого возможно при построении системы тепловой защиты электрических двигателей и аппаратов. В качестве рабочего вещества был применен янтарный ангидрид с температурой плавления $119,6^{\circ}\text{C}$, поэтому данный образец датчика может быть использован для организации тепловой защиты токоведущих частей с изоляционными материалами класса нагревостойкости *E*. Конструкция датчика универсальна и пригодна для использования различных поликристаллических органических веществ, что позволяет изготовить датчик с требуемой температурой срабатывания. Герметичный корпус исключает попадание рабочего вещества в окружающую среду.

Торцевой тип конструкции повышает удобство эксплуатации, обеспечивая возможность подведения и отведения излучения с одной стороны датчика. Используемая гексагональная упаковка из семи оптических волокон позволяет снизить потери энергии при прохождении излучения по сравнению с датчиком, в котором используется стандартный направленный разветвитель. Для получения перепада преобразовательной характеристики на уровне 20 дБ была установлена величина рабочего зазора датчика, равная 2,8 мм. Длина корпуса датчика равна 11 мм, диаметр 2,5 мм.

Фазовый переход в датчике происходит в пределах 1°C , положение точки фазового перехода стабильно и не зависит от срока эксплуатации, что позволяет сохранять параметры датчика на требуемом уровне.

Библиографический список

1. Бусурин, В. И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю.Р. Носов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Optical fiber sensors using wave length modulation and simplified spectral analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3735/17/12/035>
3. Зак, Е. А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е.А. Зак. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
4. Бабичев, А. П. Физические величины: справочник / А. П. Бабичев [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
5. Колесников, А. Л. Технический анализ сырья, полупродуктов и готовой продукции синтетических лекарственных препаратов / А. Л. Колесников. – М.: Медгиз, 1959. – 479 с.

- б. Демидов, А. Н. Введение в пиротехнику/ А.Н. Демидов. – М.: Гос. военное изд-во Наркомата обороны Союза ССР, 1939. – 100 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2018*

N. A. Matushechkin¹, Y. G. Belov², A. A. Bolonina², D. M. Kochegarov², T. H. Abuzyarov²

**OPTICAL FIBER TEMPERATURE SENSOR FOR OVERHEATING PROTECTION
OF ELECTRIC MOTORS AND ELECTRIC DEVICES**

JSC SIE «Polyot» (N. Novgorod) ¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev²

Object of probe: Optical fiber thermal cutoff sensor.

Purpose: Overheating protection of electric motors and electric devices under the influence of strong electromagnetic fields.

Results: The article shows results of developing and manufacturing of optical fiber thermal cutoff sensor, ready to use under the influence of strong electromagnetic fields due to the absence of conductive materials in the sensor design. The principle of operation based on melting process of working substance and change in its optical properties. Experiments shows stable and effective work of the designed sensor.

Key words: temperature sensor, optical fiber, overheating protection, electric motors and electric devices.