

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ХАБАРШЫСЫ

Физика-математикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА

Физико-математическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3536

№ 2 (2021)
Павлодар

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА**

Физико-математическая серия

выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ KZ95VPY00029553

выдано

Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области физики, математики,
механики и информатики

Подписной индекс – 76135

<https://doi.org/10.48081/ABRA8758>

Бас редакторы – главный редактор

Тлеукенов С. К.

доктор ф.-м.н., профессор

Заместитель главного редактора

Кумеков С. Е., *к.ф.-м.н., доцент*

Ответственный секретарь

Талипов О. М., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Оспанов К. Н.,

д.ф.-м.н., профессор

Кутербеков К. А.,

д.ф.-м.н., профессор

Ибраев Н. Х.,

д.ф.-м.н.

Ткаченко И. М.,

д.ф.-м.н., профессор (Испания)

Демкин В. П.,

д.ф.-м.н., профессор (Россия)

Qadir Abdul

доктор PhD, профессор (Пакистан)

Lobiyal D. K.

доктор PhD, профессор (Индия)

Лапчик М. П.

д.пед.н., профессор (Россия)

Шокубаева З. Ж.,

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

***Б. Саинова, Э. К. Темырканова**

Алматынський университет энергетикi и связи имени Г. Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ: ПОЛУЧЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В статье рассмотрены принципы построения современных волоконно-оптических датчиков (ВОД) и возможность их применения в различных областях промышленного производства. Подробно рассмотрена современная элементная база оптоэлектроники, а также базовые алгоритмы последетекторной обработки сигналов, применяемые в ВОД. В работе приводятся описания конструкций волоконно-оптических датчиков, нашедших практическое применение в промышленности. Рассмотрены перспективные направления волоконно-оптической сенсорики.

Ключевые слова: типы волоконно-оптических датчиков и принцип их работ, датчик, оптоволоконный, температура.

Введение

В связи с быстрым развитием автоматизированных систем контроля и управления во всех областях промышленности возрастает потребность в датчиках физических величин – температуры, давления, ускорения, перемещения, тока. Помимо высоких метрологических характеристик, датчики должны обладать большой надежностью, стабильностью, помехоустойчивостью, долговечностью и простотой интегрирования в микроконтроллерные системы управления. Особенно это относится к таким отраслям, как металлургия, теплотехника, энергетика, медицинская техника и высокоточные системы вооружений. Перечисленным требованиям в максимальной степени удовлетворяют волоконно-оптические датчики (ВОД).

До недавнего времени развитие волоконно-оптических датчиков сдерживалось, в основном, двумя факторами. Во-первых, не было дешевых оптоэлектронных компонентов – маломощных лазерных диодов, высокочувствительных р-і-п-фотодиодов и пассивных волоконно-оптических элементов. Во-вторых, из-за нелинейности оптического сигнала относительно

измеряемой величины требуются специальные алгоритмы обработки сигнала (усреднение, нелинейная обработка, интегральные преобразования), а значит – нужен процессор обработки сигнала с высокой производительностью. В чем же преимущество применения волоконно-оптических датчиков по сравнению с традиционными полупроводниковыми датчиками в интегральном исполнении? Проведем анализ по отраслям промышленности.

Типы волоконно-оптических датчиков и принцип их работы: Прежде чем переходить к рассмотрению волоконно-оптических датчиков, рассмотрим функционирование оптического волокна. Современное оптическое волокно состоит из сердцевины, по которой распространяется свет, и оболочки. Снаружи она закрыта полимерной пленкой. Сердцевина представляет собой нить из пластика или стекла с определенными добавками (как правило, германий) для повышения коэффициента преломления. Коэффициент преломления сердцевины n_1 примерно на $0,01 \dots 0,02$ превышает коэффициент преломления оболочки n_2 . Благодаря этому луч света, направленный в сердцевину, распространяется по ней, многократно отражаясь от границы раздела «сердцевина-оболочка».

Важнейшей характеристикой оптоволокна является числовая апертура NA – максимально возможный угол, с каким свет, введенный в волокно, может распространяться в нем. Числовая апертура определяется коэффициентами преломлений сердечника и оболочки и выражается как:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta},$$

где $\Delta = (n_1/n_2) - 1$.

Если угол ввода луча света в сердечник меньше NA , то он испытывает полное внутреннее отражение и распространяется только в нем (луч 1 на рис. 1). При нарушении этого условия часть вводимого излучения преломляется и уходит в оболочку, а часть – отражается внутрь сердечника (луч 2).



Рисунок 1 – Распространение света в волоконном световоде

С числовой апертурой связана нормированная частота. Она определяет, сколько мод (упрощенно – оптических лучей под разными углами) может

распространяться в данном волокне. Нормированная частота F вычисляется по следующей формуле:

$$F = (2\pi/\lambda) \cdot a \cdot NA,$$

где a – диаметр сердечника;

λ – длина световой волны.

Для оптических волокон существует граничное значение F_c . Для рассмотренного оптического волокна со ступенчатым изменением показателя преломления $F_c = 2,045$. Если рассчитанное значение F превышает эту величину, то распространяется множество мод и волокно называется многомодовым. В противном случае распространяется одна мода и волокно является одномодовым. Многомодовые оптические волокна технологичны, легко соединяются с источниками и детекторами излучения, а также с другими волокнами. Недостаток многомодового волокна – нарушение когерентности источника, поэтому оно может быть использовано для передачи информации только об интенсивности оптического сигнала. В одномодовых волокнах может использоваться поляризация и фаза когерентного источника, например, полупроводникового лазера, и на его основе возможно построение датчиков с волокном в качестве чувствительного элемента. Основной недостаток одномодового волокна – высокая чувствительность к внешним механическим воздействиям и относительная сложность сопряжения с другими оптическими компонентами. Внешний диаметр многомодовых и одномодовых волокон одинаков и равен 125 мкм. Диаметр сердцевины у многомодового волокна – 50 мкм при $\Delta \approx 1\%$, а у одномодового – 10 мкм при $\Delta \approx 0,3\%$. Более подробно физические основы волоконной оптики изложены в [1].

Волоконно-оптические датчики можно разделить на две группы: датчики с волокном в качестве линии передачи и с одномодовым волокном в качестве чувствительного элемента. Наиболее отработаны в теоретическом и технологическом отношении и постепенно осваиваются в промышленном производстве волоконно-оптические датчики первого типа. Их можно условно поделить на датчики с оптическим преобразователем и датчики с оптическим зондом.

Датчики с оптическим преобразователем представляют собой систему, которая содержит оптический элемент, чувствительный к воздействию измеряемой физической величины, излучатель и приемник. Оптический элемент (преобразователь) помещен между торцами передающего и приемного многомодового волокна. В качестве излучателя обычно используют маломощный светодиод, а в качестве детектора света – р-і-n-фотодиод. Эти полупроводниковые элементы должны быть электро- и термостабильными.

В датчиках с оптическим зондом зондирующий световой луч, отраженный или рассеянный объектом измерения, поступает в приемную

оптическую систему, состоящую из объектива и волокна, выходной торец которого связан с p-i-n-фотодетектором. В датчиках этого типа могут быть использованы многомодовые или одномодовые оптические кабели, а также волоконно-оптические жгуты. В качестве источника света в зависимости от вида измеряемой величины (интенсивность, поляризация, фаза) используются светодиоды или лазеры. Волоконно-оптические датчики на этом принципе отличаются высокой чувствительностью и могут быть использованы для бесконтактных измерений.

Материалы и методы

Принцип работы датчика основан на эффекте флюоресценции. На внешний торец оптического волокна нанесено флюоресцентное вещество (см. рис. 2). Вторичное излучение, возникающее под воздействием зондирующего оптического луча ультрафиолетового диапазона, принимается этим же волокном. Для одной из составляющих флюоресцентного излучения ($\lambda_1 = 510$ нм) характерна сильная зависимость от температуры измеряемой среды, а для другой ($\lambda_2 = 630$ нм) – очень слабая.

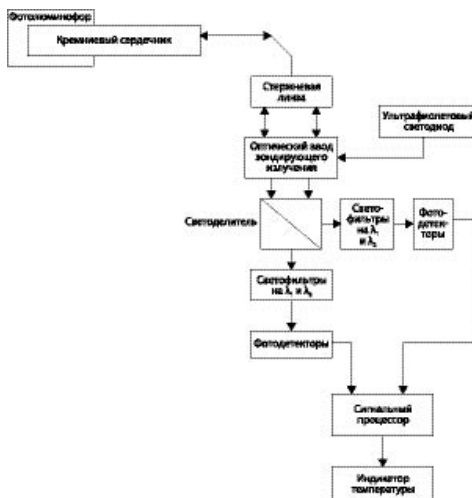


Рисунок 2 – Датчик температуры

Температурный сигнал вычисляется как отношение соответствующих интенсивностей на λ_1 и λ_2 по методу двух длин волн. В качестве зондирующего источника используется ультрафиолетовый светодиод с $\lambda = 300 \dots 400$ нм.

Диапазон измерения температур подобного датчика $-50 \dots 200^\circ\text{C}$; точность – $0,1^\circ\text{C}$; время отклика – около 0,5 с. Зависимость отношения интенсивностей λ_1 и λ_2 от температуры показана на рисунке 3.

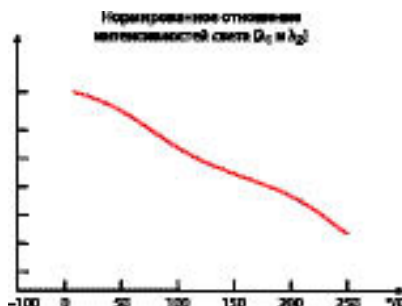


Рисунок 3 – Передаточная характеристика датчика температуры

2. Градуировка

Зависимость напряжения на входе АЦП от температуры датчика имеет линейный характер. Нелинейность выбранного датчика согласно спецификации составляет $0,3\text{--}1,5^\circ\text{C}$ в интервале температур от -40 до $+100^\circ\text{C}$, т.е. $0,21\text{--}1,07\%$, где первое значение соответствует типичной нелинейности, а второе – максимально возможной. Значит ошибка измерения изменения температуры на 1°C , вызванная нелинейностью, может максимально составить $0,0107^\circ\text{C}$. Переходя к напряжениям можно сказать, что даже в случае максимальной нелинейности, для учета ее необходимо иметь возможность разрешать напряжения отличающиеся на $0,1\text{ мВ}$. Предполагая, что эта характеристика не будет существенно влиять на точность прибора в целом, воспользуемся линейной моделью. Для описания ее необходимо определить два коэффициента, т.е. провести измерения при помощи эталонного термометра для двух точек и зафиксировать соответствующие значения выходного напряжения. В качестве одной из точек выбирается, как правило, точка плавления льда – температура льда, находящегося в динамическом равновесии со своей жидкостью. При отсутствии примесей эта температура 0°C . Вторая точка может быть выбрана произвольно. При этом к точности измерения температуры и выходного напряжения термо датчика в этих точках предъявляются повышенные требования. Обойти эту проблему можно проводя измерения не в двух, а в большем количестве точек. По результатам измерений строится линейная зависимость, коэффициенты которой рассчитываются по методу наименьших квадратов. Таким образом, удастся избежать субъективных ошибок при измерении и проводить градуировку, не имея эталонного измерительного

прибора с существенно меньшей ценой деления. Последовательность точек для расчета линейных коэффициентов может быть получена при измерении температуры датчика в некотором процессе, при условии, что образцовый термометр обладает той же инерционностью, что и исследуемый датчик. Об инерционности последнего будем говорить отдельно. При решении нашей задачи в качестве образцовых были использованы ртутные стеклянные лабораторные термометры с ценой деления $0,1^{\circ}\text{C}$.

Результаты и обсуждение

Для проведения эксперимента датчик температуры был включен в состав блока контроля измерительного комплекса ПИКА-19. Блок контроля представляет собой непосредственно датчик, подключенный к аналого-цифровому преобразователю (MX7705), работающему под управлением микроконтроллера (ATMega-8) и простую систему индикации, позволяющую отслеживать полученные данные и сигнализировать при выходе этих данных за установленные рамки. Сигнал с блока контроля может быть, при необходимости, передан непосредственно измерительному преобразователю, одним из назначений которого является связь с компьютером для визуализации информации в режиме реального времени. Реализация такой связи подразумевает создание последовательного протокола передачи данных. Для этого используется модуль MMusb232RL на базе микросхемы FT232R и программа-драйвер, позволяющая приводить данные к нужным единицам измерений. Подробную информацию по работе с модулем можно найти в статье [4]. Передаваемые данные имеют формат, определяемый АЦП, т.е. шестнадцатиразрядные значения (в двоичной системе). Каждое шестнадцать битное число разбивают на две восьми битных посылки и под управлением микроконтроллера передают последовательно, обеспечивая стандартную скорость передачи 9600 бит/с. При проведении экспериментов вместо измерительного преобразователя для передачи данных использовался непосредственно микроконтроллер блока контроля.

Программа передачи данных может функционировать в двух режимах: непрерывном и по управляющему сигналу. Использование непрерывного режима позволяет получать результаты измерений с интервалом в одну секунду. При необходимости этот интервал может быть программно уменьшен или увеличен. Алгоритм работы с данными подробно рассмотрен в работе [5].

Непрерывный режим дает возможность построить временные зависимости установления температуры датчика при различных внешних процессах. Например, график, представленный на рис. 4 соответствует процессу изменения температуры датчика, взятого при температуре 24°C при включении питания, т.е. выходу на рабочий режим. Температура окружающей среды при этом не изменяется.

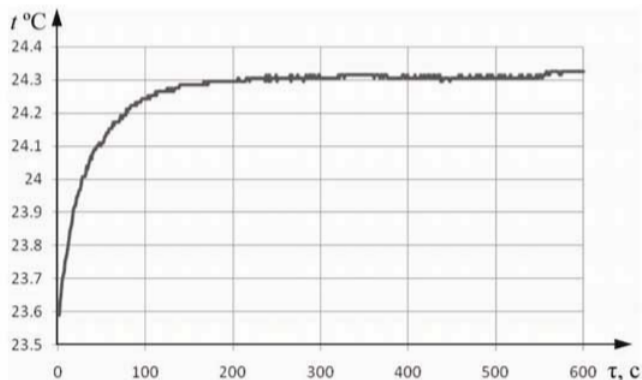


Рисунок 4 – Зависимость значения температуры датчика от времени при выходе на рабочий режим

Из графика видно, что время выхода датчика на рабочий режим составляет порядка 200 секунд. Изменение его температуры связано с выделением тепла при протекании тока, согласно закону Джоуля-Ленца. Уменьшить эффект можно увеличением величины токоограничивающего сопротивления, что приведет к меньшей стабильности показаний датчика.

На рис. 5 представлены графики зависимости от времени температуры термодатчика для двух случаев; охлаждения и нагревания. Один график соответствует показаниям датчика, взятого при начальной температуре 23 °C и помещенного в термостат объемом 1,5 л с водой при температуре 0 °C, второй – обратному изменению температуры. Вода содержит лед при температуре плавления, медленно перемешивается, таким образом можно считать, что ее температура поддерживается постоянной. Температура окружающей среды также не успевает измениться за время эксперимента.

Надо отметить, что процесс установления температуры, происходящий при непосредственном контакте датчика с жидкостью, обладает существенно меньшей инерционностью, чем при измерениях в воздухе.

Считая инерционность основным недостатком рассматриваемого полупроводникового датчика можно предложить использовать результаты математического моделирования для получения априорной оценки предельного значения, которого достигнет температура по окончании переходного процесса.

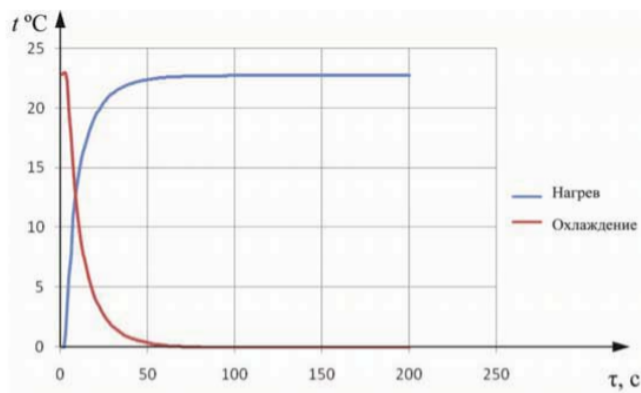
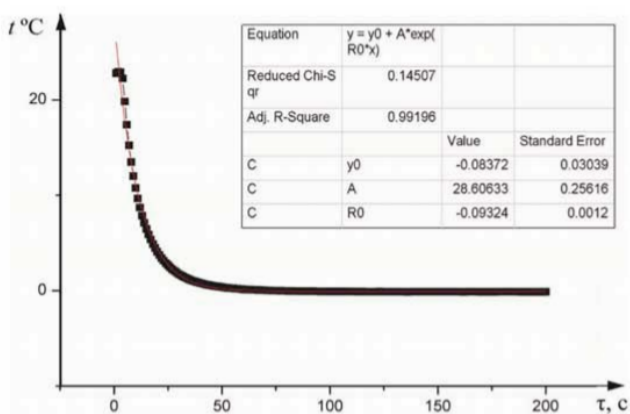
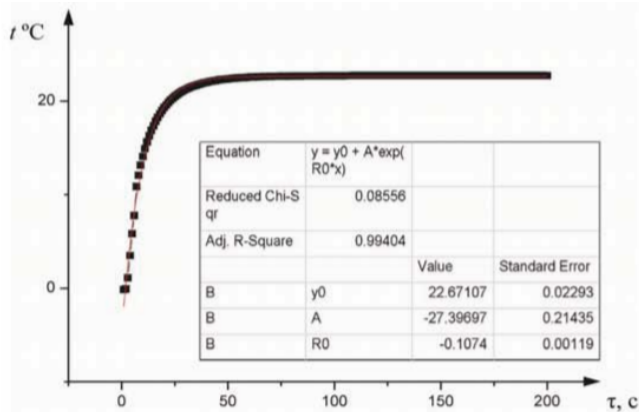


Рисунок 5 – Зависимость значения температуры датчика от времени при охлаждении до 0 градусов

Полученные зависимости изменения температуры позволяют использовать экспоненциальную аппроксимацию и оценить постоянную времени для каждого процесса. На рис. 4 показаны результаты аппроксимации, проведенной с использованием пакета программ для численного анализа данных Origin фирмы OriginLab Corporation.



а) Охлаждение



б) Нагревание

Рисунок 6 – Аналитические зависимости, полученные по экспериментальным данным для охлаждения и нагрева характеризуют масштаб изменений температуры и постоянную времени датчика при данных условиях. Внесение изменений в алгоритм расчета температуры с использованием рассчитанных коэффициентов должно лечь в основу следующего этапа разработки

Выводы

Основной целью моделирования было определение возможности использования данного датчика для контроля температуры вечномёрзлых грунтов. Для сравнения рассматривалось существующее оборудование, эксплуатируемое в этой области, прибор для измерения температуры грунтов МГЛ-5М. В качестве датчика температуры в этом приборе применяется терморезистор СТЗ-19. Точность измерения температуры при помощи МГЛ-5М в диапазоне от +3 до -3°C составляет $\pm 0,1^\circ\text{C}$, в диапазоне $\pm(3-10)$ – $\pm 0,2^\circ\text{C}$, и в диапазоне $\pm(10-20)$ – $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

На основании проведенных экспериментов можно сказать, что исследуемый датчик позволяет получить высокую точность относительных измерений. Как основной недостаток датчика следует отметить инерционность, которую необходимо учитывать при проектировании аппаратуры с использованием исследуемых датчиков.

Список использованных источников

- 1 **Виглер, Г.** Датчики. Устройство и применение [Текст]. – М. : Мир, 1989. – 200 с.
- 2 **Пушкарев, М.** Популярныe контактные технологии термометрии [Текст] // Компоненты и технологии. – №2. – 2006.
- 3 **Штаргот, Д. (Joseph Shtargot), Мирза, С. (Sohail Mirza).** Современные термопары и УД-А ЦП высокого разрешения обеспечивают прецизионное измерение температуры [Текст] // Компоненты и технологии. – №1. – 2012.
- 4 **Захаров, А.** Некоторые проблемы применения FT232RL [Текст]. [Электронный ресурс]. – <http://andrewl955.ucoz.ru/publ/tekhnika>.
- 5 **Бирюкова, О. В., Корецкая, И. В.** Организация работы с внешней памятью при проведении измерений изменяющихся во времени физических величин [Текст] // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2016. – № 1. – С. 10–15.
- 6 **Гауер, Д.** «Оптическая связь», Гл. 1–2 [Текст] // М. : «Радио и связь», 1988.
- 7 **Окиси, Т. и др.** «Волоконно-оптические датчики» / пер. с японского [Текст] // Энергоатомиздат, 1990.
- 8 **Фейнман, Р., Лейтон, Р., Сендс, М.** «Фейнмановские лекции по физике» [Текст]. Т. 3. – «Едиториал УРСС», 2004.

References

- 1 **Wigler, G.** Datchiki. Ustroystvo i primeneniye [Sensors. Device and application] [Text]. – Moscow : Mir, 1989. – 200 p.
- 2 **Pushkarev, M.** Populyarnyye kontaktnyye tekhnologii termometrii [Popular contact thermometry technologies] [Text]. In Komponenty i tekhnologii [Components and technologies]. – № 2. – 2006.
- 3 **Shtargot, J., Mirza, S.** Sovremennyye termopary i UD-A TSP vysokogo razresheniya obespechivayut pretsizionnoye izmereniye temperatury [Modern thermocouples and UD-A high-resolution CPUs provide precise temperature measurement] [Text]. In Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]. – No 12.
- 4 **Zakharov, A.** Nekotoryye problemy primeneniya FT232RL [Some problems of FT232RL application] [Text]. [Electronic resource]. – <http://andrewl955.ucoz.ru/publ/tekhnika>.
- 5 **Biryukova, O. V., Koretskaya, I. V.** Organizatsiya raboty s vneshney pamyat'yu pri provedenii izmereniy izmenyayushchikhsya vo vremeni fizicheskikh velichin [Organization of work with external memory during measurements of time-varying physical quantities] [Text]. In Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya

Торайғыров университетінің Хабаршысы, ISSN 2710-3536. Физика-математикалық сериясы. № 2. 2021
i obrabotki signalov [Systems of synchronization, formation and processing of signals]. – 2016. – No. 1. – P. 10–15.

6 **Gauyer, D.** Opticheskaya svyaz'. Gl. 1–2 [Optical communication. Ch. 1–2 [Text]. – Moscow : Radio i svyaz' [Radio and communication], 1988.

7 **Okosi, T. et al.** Volokonno-opticheskiye datchiki [Fiber Optic Sensors]. [Text] Transl. from Japanese. In Energoatomizdat, 1990.

8 **Feynman, R., Leighton, R., Sands, M.** Feynmanovskiye leksii po fizike. [Feynman Lectures on Physics] [Text]. V. 3. – «Editorial URSS», 2004.

Материал поступил в редакцию 15.06.21.

**Б. Саинова, Э. К. Темырканова*

Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика

және байланыс университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

Материал 15.06.21 баспаға түсті.

ТЕМПЕРАТУРА СЕНСОРЫ: СИГНАЛДЫ НАҚТЫ РЕЖИМІНДЕ ҚАБЫЛДАУ ЖӘНЕ ТҮРЛЕНДІРУ

Мақалада қазіргі заманғы талшықты-оптикалық датчиктерді (ТОД) құру принциптері және оларды өнеркәсіптік өндірістің әр түрлі салаларында қолдану мүмкіндігі туралы айтылады. Оптоэлектрониканың заманауи элементтік базасы, сондай-ақ талшықты оптияда қолданылатын детекторлардан кейінгі сигналдарды өңдеудің негізгі алгоритмдері егжей-тегжейлі қарастырылған. Мақалада өндірісте практикалық қолданыста болған талшықты-оптикалық датчиктердің конструкцияларының сипаттамалары келтірілген. Оптикалық-талшықты зондтаудың перспективалық бағыттары қарастырылған.

Кілтті сөздер: талшықты-оптикалық датчиктердің түрлері және олардың жұмыс режимі, сенсор, оптикалық талшық, температура.

**B. Sainova, E. K. Temyrkanova*

Almaty University of Power Engineering and

Telecommunications named after G. Daukeev,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Material received on 15.06.21.

TEMPERATURE SENSOR: RECEIVE AND CONVERT SIGNAL IN REAL TIME

The article discusses the principles of construction of modern fiber-optic sensors (FOS) and the possibility of their application in various areas of industrial production. The modern elemental base of optoelectronics, as well as basic algorithms for post-detector signal processing used in fiber optics, are considered in detail. The paper provides descriptions of the designs of fiber-optic sensors that have found practical application in industry. Perspective directions of fiber-optic sensing are considered.

Keywords: types of fiber optic sensors and how they work, sensor; fiber optic, temperature.

Теруге 15.06.2021 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2021 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

5,08 Mb RAM

Шартты баспа табағы 7,42. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген А. К. Байникова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3825

Сдано в набор 15.06.2021 г. Подписано в печать 28.06.2021 г.

Электронное издание

5,08 Mb RAM

Усл.печ.л. 7,42. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка А. К. Байникова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3825

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университеті» КЕ АҚ

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik.tou.edu.kz