

О.К. ГУСЕВ, докт. техн. наук, профессор,
К.Л. ТЯВЛОВСКИЙ, канд. физ.- мат. наук, доцент,
А.К. ТЯВЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент,
Р.И. ВОРОБЕЙ, канд. техн. наук, доцент,
А.И. СВИСТУН, канд. техн. наук, доцент,
Л.И. ШАДУРСКАЯ, канд. физ.-мат. наук, доцент,
Н.В. ЯРЖЕМБИЦКАЯ, мл. научн. сотрудник
(Белорусский национальный
технический университет)

Калибровка волоконно-оптических сенсоров с использованием двухбарьерных фотодетекторов

Рассмотрены вопросы применения двухбарьерных фотодетекторов в схемах калибровки волоконно-оптических сенсоров непосредственно в процессе измерения. Предложены схемы калибровки с использованием широкополосного и двухволнового источников оптического излучения. Рассмотрена модель составляющих погрешности волоконно-оптического сенсора. Применение двухбарьерного фотодетектора в схеме калибровки сенсора позволяет существенно уменьшить погрешность измерений измерительных приборов, использующих волоконно-оптические чувствительные элементы.

Ключевые слова: двухбарьерный фотодетектор, волоконно-оптические сенсоры, калибровка сенсора, погрешность измерений.

**O.K. GUSEV, K.L. TYAVLOVSKY,
A.K. TYAVLOVSKY, R.I. VOROBAY,
A.I. SVISTUN, L.I. SHADURSKAYA,
N.V. YARZHEMBITSKAYA**

Calibration of fiber-optical sensors by means of double-barrier photodetectors

Problems of utilization of the double-barrier photodetectors in fiber-optical sensors calibration schemes directly in the measurement procedure are discussed. Calibration schemes that use wideband and two-wavelength are proposed. The model of components of fiber-optical sensor uncertainty is discussed. Using the double-barrier photodetector in the sensor calibration scheme allows to reduce sufficiently the measurement uncertainty of measuring instruments that use fiber-optical sensing elements.

Key words: double-barrier photodetector, optical emission sources, sensor calibration, measurement uncertainty of measuring instruments.

Расширение функциональности и повышение точности измерительных приборов во многом обусловлено применением оптико-электронных и, в частности, оптических волоконных чувствительных элементов [1...3], а также фотодетекторов с расширенными функциональными возможностями [2]. В настоящее время оптические волоконные сенсоры применяются практически во всех отраслях техники. Их применение в производственных процессах связано с такими преимуществами, как:

- безопасность эксплуатации, ввиду электрической изоляции и малой мощности оптического излучения;

- нечувствительность к электромагнитным помехам и возмущениям, отсутствие генерируемых электромагнитных помех, способных влиять на другие цепи;
- химическая инертность;
- отсутствие движущихся механических элементов;
- малый вес и размеры;
- устойчивость и надежность, определяющие малые эксплуатационные затраты;
- широкая полоса рабочих частот.

Дополнительные преимущества обеспечивает возможность интегрирования в одну систему оптического волоконного сенсора и волоконно-оптической линии связи [3, 4]. При этом преимущества оптических линий связи будут справедливы и для всей измерительной системы в целом.

В общем случае сигнал на выходе волоконно-оптического сенсора является сигналом со случайными нефиксированными параметрами различной физической природы, изменяющимися в некотором диапазоне значений. Большинство волоконно-оптических сенсоров для определения значения измеряемой величины используют изменение плотности мощности оптического излучения. Следовательно, для реализации измерений с малой погрешностью необходимо высокоточное измерение интенсивности оптического излучения, попадающего на фотодетектор. Однако величина выходного сигнала фотодетектора оптического волоконного чувствительного элемента, кроме воздействия измеряемой физической величины, может изменяться и по другим причинам [1]:

1. Интенсивность излучения источника света изменяется в зависимости от температуры и срока службы. Например, галогенные лампы имеют срок службы около одного года при постоянной работе, но он значительно уменьшается, если лампу включают время от времени или она подвергается вибрации. На интенсивность существенно влияет старение нити накаливания и напряжение питания, изменение оптических свойств баллона лампы. Светодиоды имеют значительный срок службы, но интенсивность их оптического излучения существенно зависит от температуры и изменяется в процессе эксплуатации вследствие деградиационных процессов. Кроме того, изменение напряжения питания приводит к изменению спектрального распределения интенсивности излучения. Это влияет не только на измерение интенсивности, но и на точность сравнительных измерений отношений цветов. К тому же, ослабление в волокне зависит от используемой длины волны, так изменение длины волны на 1 нм может привести к изменению интенсивности на стороне приемника излучения на 0,2...0,5 %.

2. На оптические компоненты схемы могут воздействовать различные внешние факторы, например, механические. Чрезмерный изгиб оптических волокон в процессе монтажа может повлиять на распределение мод в волокне и вызвать утечку оптического излучения. Ослабление в оптических соединительных элементах при механических воздействиях дополнительно может изменяться на $\pm 0,2$ дБ. Это приводит к вариации общего пропускания оптической схемы до 5 %.

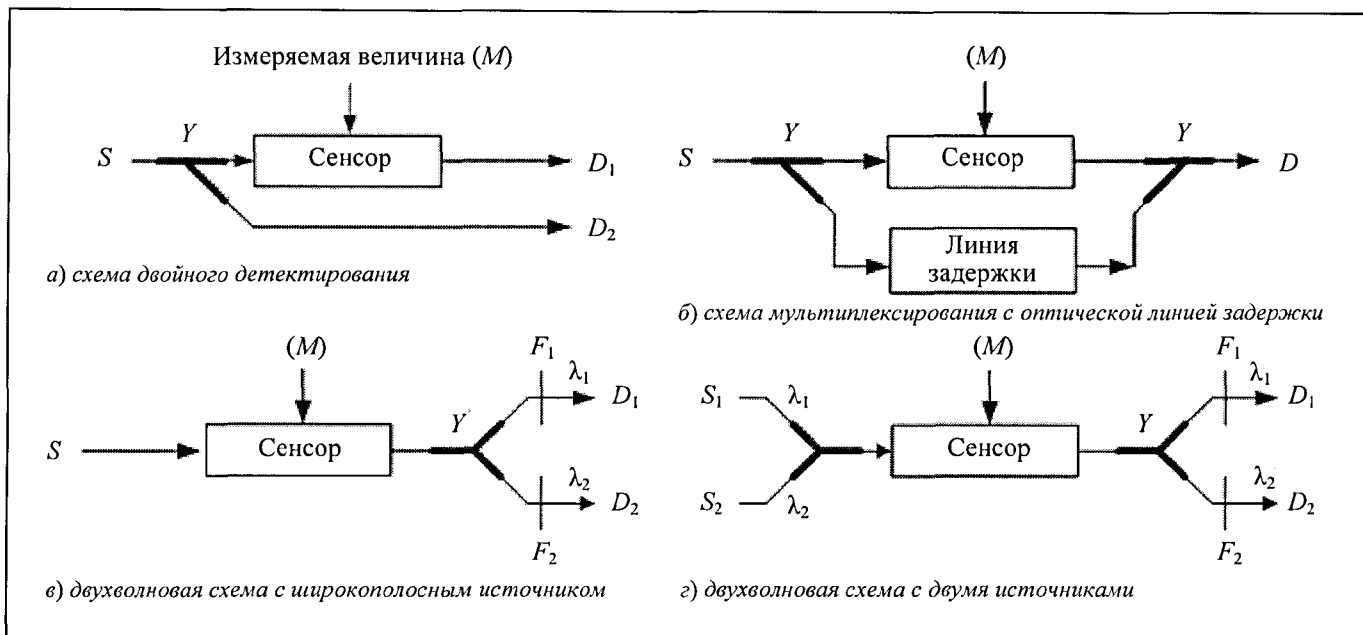


Рис. 1 Схемы калибровки волоконно-оптических сенсоров

3. Чувствительность приемника и интенсивность излучения источника света характеризуются большими технологическими разбросами, меняются вследствие температурных факторов, а также зависят и от длины волны.

На погрешность измерения влияют и ряд других факторов, причем, в различных сочетаниях. Наличие совокупности некоррелированно изменяющихся дестабилизирующих факторов приводит к значительному увеличению погрешности измерений. Причем введения мер по стабилизации режимов функционирования излучателя и приемника недостаточно для снижения погрешности измерения. Следовательно, для достижения высоких метрологических характеристик волоконно-оптических сенсоров необходимо использовать процедуру сравнения или калибровки (эталонирования) непосредственно в процессе измерения, чтобы избежать постоянной калибровки сенсора. Для минимизации перечисленных ошибок разработан ряд методов [1, 3]. При этом системы калибровки в процессе измерения используют какой-либо вид измерения отношений (рис. 1). На рис. 1 приняты следующие обозначения: S – источник оптического излучения, M – измеряемая величина, D – фотодетектор, F – оптические фильтры, Y – оптические разветвители. Это означает, что схема калибровки использует либо два источника оптического излучения, либо два фотодетектора, либо измерения производятся с мультиплексированием по длине волны излучения или по времени.

Отметим, что схема мультиплексирования (рис. 1,б) требует использования импульсного источника излучения с длительностью импульса менее времени задержки в линии и применения быстродействующего фотодетектора. Более сложная схема калибровки оптического моста приведена на рис. 2. В этой схеме, по аналогии с электрическим мостом, ряд погрешностей компенсируется, но она также требует применения фотоприемников с идентичными характеристиками и обеспечения режи-

ма попеременной работы источников света S_1 и S_2 . Введение в любую схему калибровки дополнительных оптических элементов также предъявляет повышенные требования к стабильности их параметров.

Видно, что существующие системы требуют применения либо двух фотоприемников, либо двух источников оптического излучения, что предъявляет дополнительные требования к идентичности их параметров, неизменности их характеристик, усложняет оптическую схему. Погрешность калибровки в первую очередь определяется идентичностью и временной стабильностью параметров фотодетекторов $D_1...D_2$, поэтому целесообразно в качестве фотодетекторов использовать элементы интегрального многоэлементного фотоприемника [1]. Введение дополнительных оптических элементов,

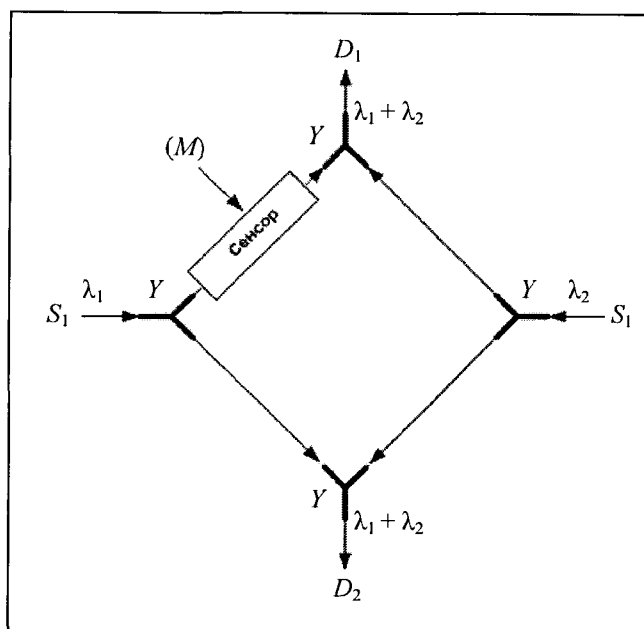


Рис. 2 – Схема калибровки с использованием оптического моста

Y – разветвителей и оптических фильтров, снижает интенсивность оптического излучения на стороне приемника и приводит либо к сужению диапазона измерения, либо к увеличению погрешности измерений [3]. Усложнение оптической схемы и увеличение числа фотодетекторов также увеличивает габариты и стоимость датчиков.

При анализе схем калибровки волоконно-оптических сенсоров будем считать, что быстродействие фотодетекторов намного превышает скорость изменения входного воздействия, т.е. измерения являются статическими. Такое допущение является оправданным для большинства практических применений и необходимым, поскольку несоблюдение данного требования практически исключает использование эталонирования. Математическая модель формирования результата измерения [5] в этом случае выглядит следующим образом:

$$M^*(t) = m_x(t) + M_f(t) + M_h(t), \quad (1)$$

где $m_x(t) = (1 + \Delta k)M(t)$ – мультипликативная составляющая результата измерения;

Δk – мультипликативная составляющая погрешности средства измерений;

$M(t)$ – истинное значение измеряемой величины;

$M_f(t)$ – аддитивная составляющая результата измерения, обусловленная обобщенным возмущающим воздействием, действующим на входе средства измерений;

$M_h(t)$ – аддитивная составляющая результата измерения, обусловленная обобщенным возмущающим воздействием, действующим на выходе средства измерений.

Соответственно, погрешность результата измерения, определяемая как разность истинного значения измеряемой величины $M(t)$ и результата измерений $M^*(t)$, может быть описана выражением

$$\Delta M(t) = \Delta k \cdot M(t) + M_f(t) + M_h(t). \quad (2)$$

Для оценки погрешности эталонирования рассмотрим, какие составляющие формируют обобщенные возмущающие воздействия на входе и выходе средства измерений в схеме двойного детектирования (рис. 1,а). Модель погрешности волоконно-оптического сенсора для этого случая показана на рис. 3, где ΔS – погрешность, вносимая изменением плотности мощности источника света; $\Delta \lambda$ – погрешность, вносимая изменением

длины волны источника света; ΔT – погрешность, вносимая отклонением температуры и других внешних факторов от номинальных значений; ΔS_{D1} и ΔS_{D2} – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по плотности мощности; $\Delta \lambda_{D1}$ и $\Delta \lambda_{D2}$ – погрешности калибровки первого и второго фотоприемников по длине волны; ΔP_{D1} и ΔP_{D2} – погрешности, вносимые преобразователями сигналов первого и второго фотоприемников в электрический сигнал; Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности первого и второго фотоприемников.

На рис. 3 представлена модель составляющих погрешности волоконно-оптического сенсора в схеме двойного детектирования.

Для верхней (калибровочной) ветви модели $M = 0$, соответственно, выражение (1) имеет вид:

$$M_1^* = \Delta S * \Delta \lambda * \Delta T + \Delta S_{D1} * \Delta \lambda_{D1} * \Delta P_{D1}, \quad (3)$$

где * – символ объединения погрешностей. Для независимых погрешностей объединение определяется как корень квадратный из суммы квадратов их относительных величин.

Для нижней ветви аналогичное выражение принимает следующий вид:

$$M_2^* = (1 + \Delta k_2)M + \Delta S * \Delta \lambda * \Delta T + \Delta S_{D2} * \Delta \lambda_{D2} * \Delta P_{D2} \quad (4)$$

Соответственно, модель выходного разностного (эталонированного) сигнала с учетом (3) и (4) описывается как

$$M^* = (1 + \Delta k_2)M + \Delta S_{D2} * \Delta \lambda_{D2} * \Delta P_{D2} - \Delta S_{D1} * \Delta \lambda_{D1} * \Delta P_{D1} \quad (5)$$

При оценке погрешности волоконно-оптического сенсора в схеме двойного детектирования следует учесть, что величины ΔS_{D1} , ΔS_{D2} , $\Delta \lambda_{D1}$, $\Delta \lambda_{D2}$, ΔP_{D1} и ΔP_{D2} являются независимыми случайными величинами, а их объединения подчиняются нормальному закону распределения вероятностей [5]. Следовательно, знак “минус” математической модели погрешности должен быть заменен символом объединения (разность случайных величин есть случайная величина). Математическая модель погрешности при этом принимает вид

$$\Delta M = \Delta k_2 M + (\Delta S_{D2} * \Delta \lambda_{D2} * \Delta P_{D2}) * (\Delta S_{D1} * \Delta \lambda_{D1} * \Delta P_{D1}) \quad (6)$$

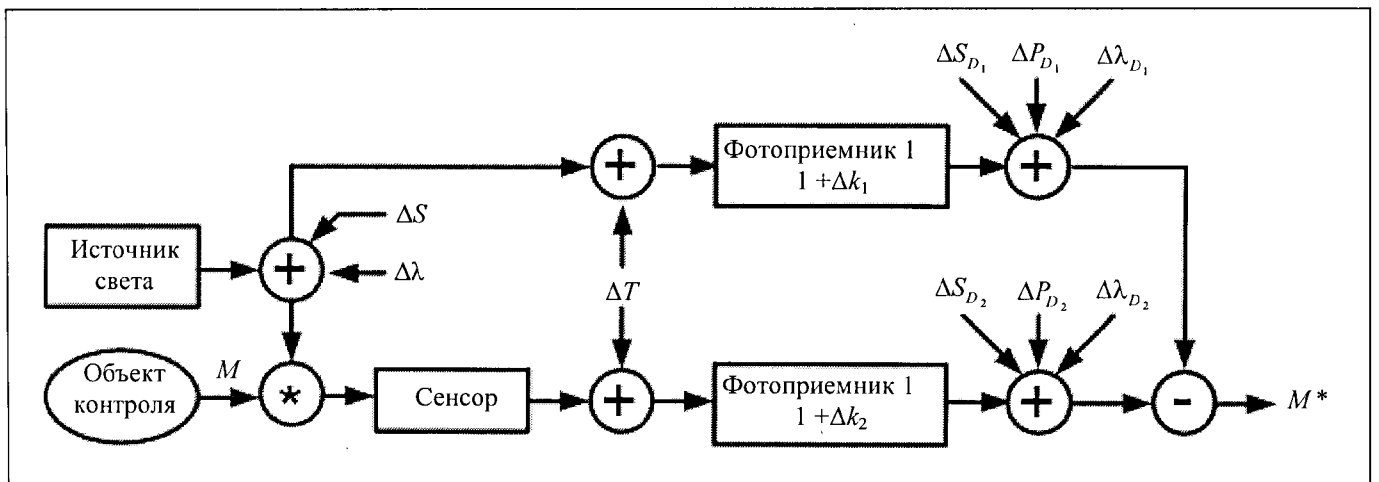


Рис. 3. Модель составляющих погрешности волоконно-оптического сенсора в схеме двойного детектирования

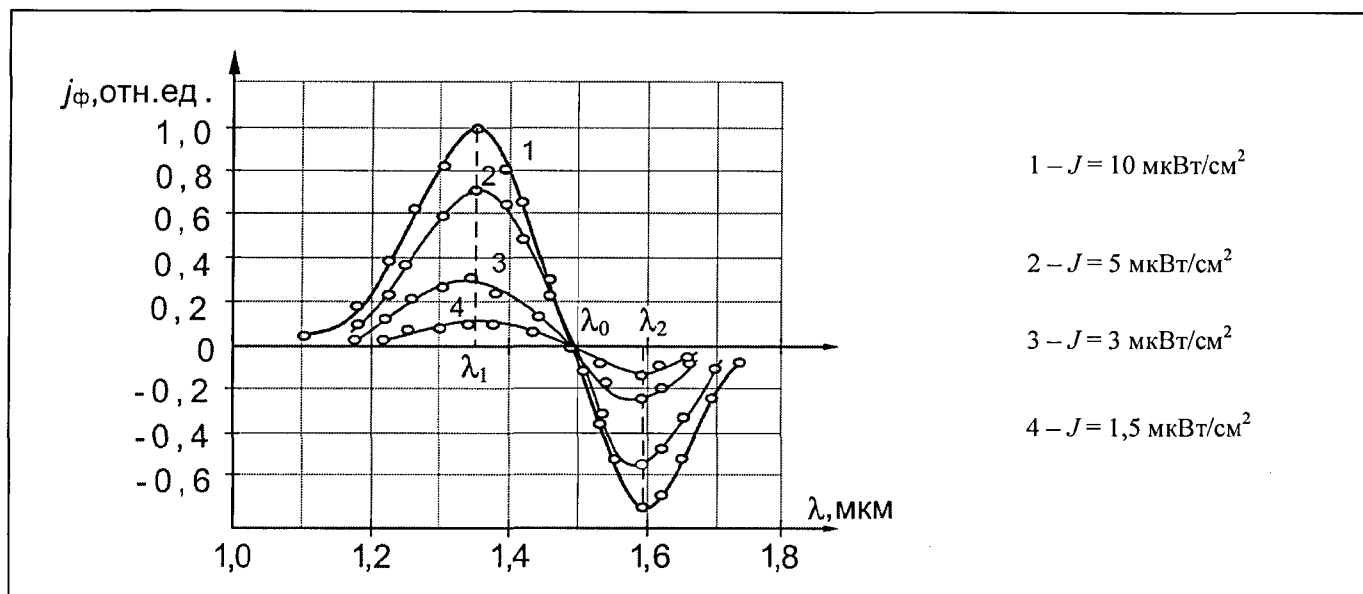


Рис. 4. Спектральные характеристики фототока короткого замыкания одноэлементного двухбарьерного фотодетектора на основе Ni-nGe(Cu)-Ni

Из (6) следует, что схема двойного детектирования обеспечивает компенсацию возмущающих воздействий, действующих на входе средства измерений, но при этом вносит дополнительные составляющие в аддитивную погрешность результата измерения, обусловленную обобщенным возмущающим воздействием, действующим на выходе средства измерений, а также оставляет неизменной мультипликативную составляющую погрешности. Схемы с двумя источниками и схемы мультиплексирования с оптической линией задержки аналогичным образом увеличивают аддитивную погрешность результата измерения, обусловленную обобщенным возмущающим воздействием, действующим на входе средства измерений.

Указанные недостатки традиционных методов частично или полностью могут быть устранены путем реализации разработанной нами процедуры многопараметрических измерений на основе односигнальной модели [6] с использованием двухбарьерных одноэлементных фотодетекторов [7]. Спектральная характеристика двухбарьерного фотодетектора приведена на рис. 4 при различных плотностях мощности излучения. Существенной особенностью двухбарьерных фотодетекторов является инверсия знака спектральной характеристики чувствительности приемника оптического излучения на

некоторой длине волны λ_0 (рис. 4), причем значение λ_0 для конкретного фотоприемника не зависит от интенсивности оптического излучения. Диапазон длин волн чувствительности двухбарьерного фотоприемника и значения длин волн λ_0 , λ_1 , λ_2 определяются технологией и материалом на основе которого изготавливается приемник [7, 8]. Положение характерных точек λ_0 , λ_1 , λ_2 на спектральной характеристике чувствительности может быть изменено регулировкой напряжения смещения фотодетектора. Указанные особенности двухбарьерных фотодетекторов позволяют в зависимости от схемы включения и режима их работы [7] производить измерения плотности мощности и длины волны оптического излучения [9] или, например, измерения отношений плотности мощности на двух длинах волн λ_1 и λ_2 , что позволяет использовать такие фотодетекторы в системах связи. Выбор значений длин волн λ_1 и λ_2 по разные стороны относительно положения λ_0 обеспечивает разнополярный сигнал фотоотклика на длинах волн λ_1 и λ_2 при измерениях на постоянном токе, или сигнал противоположных фаз при модуляции интенсивности оптического излучения, что облегчает дальнейшую обработку измерительного сигнала [10].

Использование двухбарьерного фотодетектора приводит к двум схемам калибровки (рис. 5) волоконно-

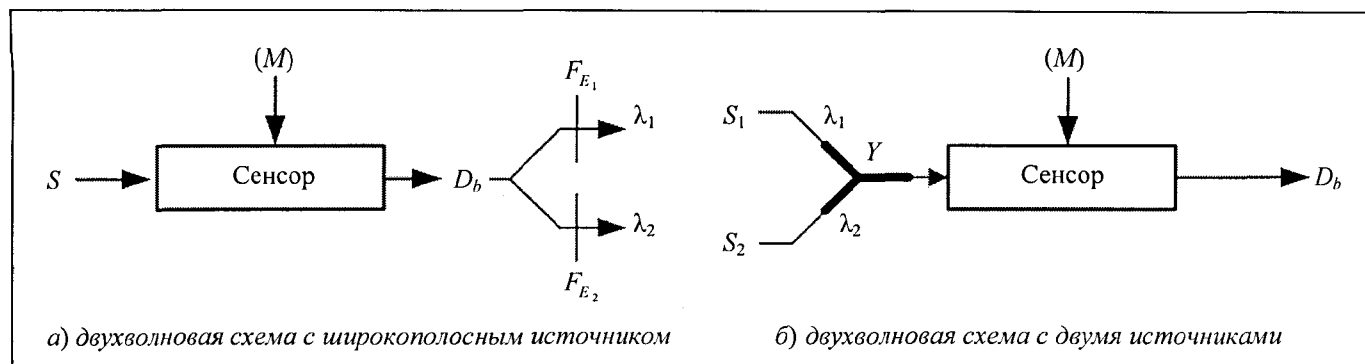


Рис. 5. Схемы калибровки волоконно-оптических сенсоров с использованием двухбарьерного фотоприемника

оптических сенсоров, основанных на традиционных двухволновых схемах калибровки (рис. 1в) и 1г)). Схема с широкополосным источником (рис. 5а)) использует один источник и один фотодетектор и не содержит каких-либо дополнительных оптических элементов. В схему рис. 5а) вводятся узлы электрических фильтров F_{E_1} и F_{E_2} , осуществляющих разделение электрических сигналов, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 . При этом, на одной из длин волн оптического излучения, например λ_1 , производится измерение величины параметра M , а на другой длине волны – λ_2 осуществляется калибровка волоконно-оптического сенсора. Излучение на длине волны λ_0 может использоваться для процедуры калибровки самого двухбарьерного фотодетектора и схем обработки сигналов фотодетектора. Использование в процедурах измерения и калибровки одних и тех же оптических элементов исключает влияние разброса параметров оптических элементов на погрешность измерения.

В процессе измерения с калибровкой производится анализ соотношений двух измерительных сигналов на разных длинах волн при использовании широкополосного или двухволнового источника оптического излучения. Определение параметров оптического излучения на разных длинах волн производится в одном и том же элементе приемника, что исключает влияние неидентичности характеристик фотодетекторов на погрешность измерений в схемах, приведенных на рис. 1. Процедура калибровки производится с разделением по времени. Периодичность проведения калибровки путем передачи по оптическому каналу волоконно-оптического сенсора калиброванного значения мощности оптического излучения на длине волны λ_2 определяется постоянной времени дрейфа сенсора и постоянной времени реакции сенсора на внешние факторы.

Модель погрешности волоконно-оптического сенсора при использовании схемы калибровки в процессе измерения с использованием двухбарьерного фотоприемника приведена на рис. 6, где ΔS – погрешность, вносимая изменением плотности мощности источника оптического излучения, $\Delta \lambda$ – погрешность, вносимая изменением длины волны источника света, ΔT – погрешность, вносимая отклонением температуры и других внешних факторов от номинальных значений, ΔS_D – погрешность калибровки фотоприемника по плотности мощности, $\Delta \lambda_D$ – погрешность калибровки фотодетектора по длине волны, ΔP_D – погрешность, вносимая

преобразователем сигнала фотодетектора в электрический сигнал. На рисунке представлены основные этапы преобразования измерительного сигнала и соответствующие им составляющие погрешности преобразования. Символом M^* обозначено измеренное значение контролируемого параметра.

В отличие от традиционных схем калибровки (рис. 1, 2) применение двухбарьерного фотодетектора приводит к тому, что оба измерительных канала реализуются в одних и тех же конструктивных элементах. Один и тот же волоконно-оптический сенсор и один и тот же объем полупроводниковой структуры двухбарьерного фотодетектора используется при формировании измерительных сигналов на длинах волн λ_1 и λ_2 . Математическое описание модели составляющих погрешности волоконно-оптического сенсора с двухбарьерным фотодетектором, имеет вид, подобный выражению (6):

$$\Delta M = (\Delta k_1 - \Delta k_2) M + (\Delta S_2 * \Delta \lambda_2 * \Delta P_2) - (\Delta S_1 * \Delta \lambda_1 * \Delta P_1), \quad (7)$$

где ΔS_1 , $\Delta \lambda_1$, ΔP_1 и ΔS_2 , $\Delta \lambda_2$, ΔP_2 – составляющие погрешности фотоприемника при измерениях на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно; Δk_1 и Δk_2 – мультипликативные составляющие погрешности средства измерений на этих же длинах волн. В данном случае перечисленные величины не являются независимыми, поскольку характеризуют один и тот же двухбарьерный фотодетектор. В случае если в этих погрешностях преобладает систематическая составляющая, их можно считать коррелированными с коэффициентом корреляции, стремящемся к единице, что позволяет заменить символ объединения символом арифметической разности. Тогда погрешность, оцениваемая математической моделью (7) при прочих равных условиях оказывается меньшей, чем погрешность, описанная моделью (6). Если же преобладающей является случайная составляющая, модель (7) переходит в модель (6) с тем, однако, отличием, что мультипликативные составляющие погрешности Δk_1 и Δk_2 характеризуют один и тот же фотоприемник и, следовательно, остаются коррелированными, что приводит к уменьшению первого слагаемого в математической модели погрешности.

Таким образом, составляющие погрешности волоконно-оптического сенсора, вызванные неидентичностью характеристик фотодетекторов исключаются. Исключаются также погрешности, связанные с градиентом распределения внешних факторов, например, температуры между чувствительными элементами фотодетектора. В двухбарьерном фотодетекторе измерение параметров оптического излучения на различных длинах

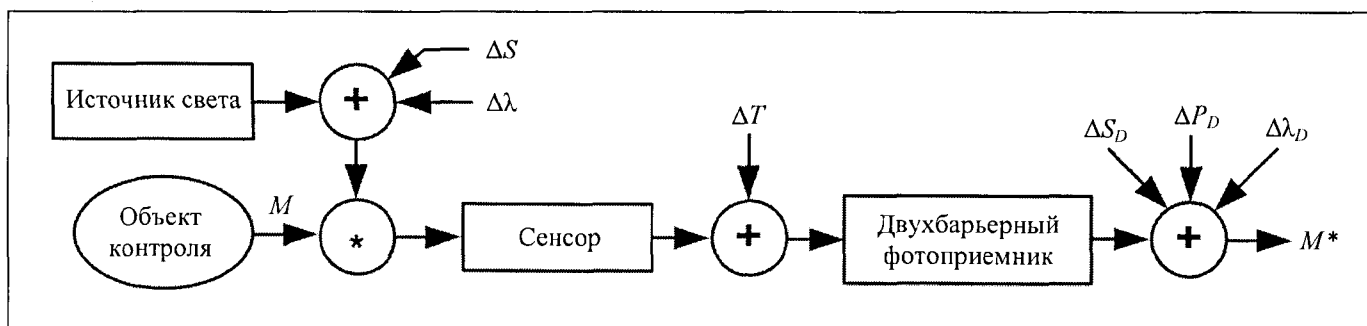


Рис. 6. Модель составляющих погрешности волоконно-оптического сенсора с двухбарьерным фотодетектором

волн производится в одном и том же физическом объеме чувствительного элемента. При выборе пары источник оптического излучения – фотодетектор для обеспечения максимального динамического диапазона преобразователя и минимальной погрешности измерения необходимо подобрать их параметры так, чтобы значения длин волн излучения источника света были как можно ближе к экстремумам спектральной характеристики (рис. 4) двухбарьерного фотодетектора.

Выводы

Двухбарьерные фотодетекторы характеризуются рядом свойств, позволяющих эффективно использовать их в измерительных схемах, где с применением одного чувствительного элемента требуется одновременно определять несколько параметров оптического излучения, например, длину волны и мощность оптического излучения.

Применение двухбарьерных фотодетекторов в схемах калибровки волоконно-оптических сенсоров приводит к упрощению оптической схемы измерения за счет применения одного фотодетектора вместо двух.

Схемы калибровки волоконно-оптических сенсоров с двухбарьерным фотодетектором позволяют исключить ряд погрешностей, связанных с неидентичностью отдельных фотодетекторов и различных оптических измерительных каналов, существенно уменьшить другие составляющие погрешности измерения.

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

E-mail: nilpt@tut.by

Список литературы

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007.

2. Воробей Р.И., Гусев О.К., Киреенко В.П., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Яржембицкий В.Б. Фотозлектрические нуль-детекторы для систем передачи данных // Датчики и системы. – 2006. – № 7.
3. Окоси Т. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Гауэр Дк. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989.
5. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. М.: Высш. шк., 2002.
6. Гусев О.К., Свистун А.И. Моделирование средств измерений параметров объектов с неопределенными состояниями // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 5.
7. Яржембицкий В.Б., Шадурская Л.И., Свистун А.И. Функциональные возможности и базисные структуры фотозлектрических нуль-детекторов // Вестник БНТУ. 2003. № 6.
8. Яржембицкий В.Б., Свистун А.И., Яржембицкая Н.В. Математическое моделирование характеристик координатных парафазных фотоприемников // Вестник БНТУ. 2004. № 2.
9. Устройство для измерения длины волны: пат. 9512 Респ. Беларусь, МПК7 G 01 J 9/00 / В.Б. Яржембицкий, О.К. Гусев, А.И. Свистун, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская; заявитель БНТУ. № а 20050298, заявл. 29.03.05; опубл. 30.08.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007.
10. Устройство передачи информации по оптическому каналу связи: пат. 9372 Респ. Беларусь, МПК7 Н 04 В 10/04, Н 04 В 10/06 / В.Б. Яржембицкий, О.К. Гусев, А.И. Свистун, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская; заявитель БНТУ. – № а 20041260; заявл. 30.12.04; опубл. 30.06.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007.