

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.586.54:621.395

## АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

© 2012 г. А. А. Ветров, канд. техн. наук; Т. Д. Коцюбинский; А. Н. Сергушичев, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

E-mail: a\_vetrov@mail.ru

Рассмотрен волоконно-оптический датчик на основе торцевого интерферометра. Отмечена важность стабилизации рабочей точки интерферометра в оптимальном положении для надежной работы датчика. Разработаны алгоритмы формирования сигнала рассогласования реального положения рабочей точки от оптимального и стабилизации ее в оптимальном положении. Предложена аппаратная реализация адаптивной системы управления режимом работы интерферометра и приведены результаты ее экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* волоконно-оптический датчик, торцевой интерферометр, рабочая точка, адаптивная система управления.

Коды OCIS: 060.2370, 120.5475

Поступила в редакцию 11.04.2011

### Введение

Прогресс в использовании оптических волокон в области телекоммуникации привел к появлению высококачественной и доступной компонентной базы для создания, в том числе, волоконно-оптических датчиков (ВОД) различных физических величин. Это в немалой степени способствовало их успешному развитию и внедрению. Из существующих схем построения ВОД большой интерес представляют датчики, использующие интерференционную систему съема информации, что позволяет достичь высокой чувствительности и точности [1]. Технологии сегодняшнего дня открыли возможность создания миниатюрных, недорогих и, при этом, высокоточных интерферометров на основе волоконно-оптических компонентов, которые сильно отличаются от классических интерферометров, – сложных громоздких приборов, требующих прецизионной механики и оптики [2].

В то же время у интерферометрических ВОД существует серьезная проблема, не решив

которую невозможно создать работающую систему. Она заключается в нестабильности положения рабочей точки на характеристике преобразования интерферометра [1], что может приводить как к значительным искажениям полезного сигнала, так и к его полному отсутствию. В качестве пути решения этой проблемы можно предложить дублирование измерительных каналов с различным положением рабочих точек [3, 4] либо управление длиной волны излучения лазера [5]. Поскольку увеличение количества измерительных каналов негативно сказывается на габаритах чувствительного элемента, для создания миниатюрных датчиков необходима система, осуществляющая управление рабочей точкой с помощью изменения длины волны лазера.

Данная статья посвящена разработке программно-аппаратного комплекса (оптико-электронного блока), осуществляющего выбор и стабилизацию рабочей точки торцевого интерферометра Фабри–Перо в оптимальном положении. Такой интерферометр с адаптивным управлением представляет собой основу для

построения высокочувствительных ВОД различных физических величин, в частности, оптического микрофона.

### Управление положением рабочей точки интерферометра

Схема построения ВОД на основе торцевого интерферометра Фабри–Перо приведена на рис. 1.

Датчик включает одночастотный полупроводниковый лазер Л с термоэлементом Пельтье для регулировки его температуры, волоконно-оптический X-разветвитель Р с четырьмя плечами, фотоприемник ФП<sub>1</sub> для формирования выходного сигнала датчика и чувствительный элемент ЧЭ, который содержит подвижное зеркало, перемещающееся под действием измеряемой физической величины. В волоконно-оптическом датчике давления (в частности, микрофоне) в качестве зеркала выступает мембрана, в датчике вибраций – инерционная масса и пр. В отличие от схемы, представленной в работе [6], в схему дополнительно включен фотоприемник ФП<sub>2</sub> для контроля выходной оптической мощности лазера.

Принцип действия датчика состоит в следующем. По одномодовому волокну от лазерного источника распространяется оптическое излучение мощностью  $P_0$ . Достигнув торца волокна в чувствительном элементе, излучение частично от него отражается, а частично выходит в открытое пространство, отражается от зеркала и часть его возвращается обратно в волокно, интерферируя с волной, отраженной от торца. В общем случае в интерференции принимают участие оптические волны, формируемые за счет нескольких переотражений между торцом оптоволокна и зеркалом. Однако при достаточно большом расстоянии  $l$  между ними

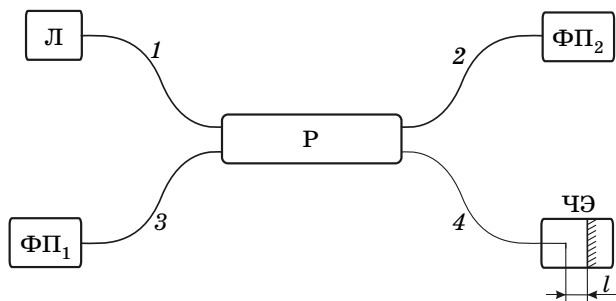


Рис. 1. Схема построения волоконно-оптического интерферометрического датчика.

(для стандартного одномодового оптоволокна  $l > 400$  мкм) результирующая мода формируется за счет интерференции только двух оптических составляющих – отраженной от торца и первого отражения от мембраны [6].

В этом случае мощность  $P_{\text{ФП}_1}$  возвратной результирующей оптической моды на фотоприемнике ФП<sub>1</sub> в плече 3 разветвителя

$$P_{\text{ФП}_1}(l, \lambda) = P_1 + P_2 + 2(\sqrt{P_1 P_2}) \cos(4\pi l/\lambda), \quad (1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – мощности на фотоприемнике оптических излучений, отраженных от торца оптоволокна и от мембраны соответственно,  $\lambda$  – длина волны излучения.

Как показано в работе [6], наилучший контраст интерференционной картины и наибольшее отношение сигнал/шум в таком оптическом микрофоне достигается при равенстве мощностей интерферирующих составляющих  $P_1 = P_2$ . При этих условиях соотношение (1) примет вид

$$P_{\text{ФП}_1}(l, \lambda) = 2P_1[1 + \cos(4\pi l/\lambda)] = 2P_0 K_{\text{oc1}} [1 + \cos(4\pi l/\lambda)], \quad (2)$$

где  $K_{\text{oc1}}$  – коэффициент пропускания оптической схемы, который зависит от типа разветвителя и отражения от торца оптоволокна.

Тогда характеристику преобразования линейного перемещения зеркала в выходное напряжение ВОД можно представить соотношением

$$U_{\text{вых}}(l, \lambda) = P_{\text{ФП}_1}(l, \lambda) K_{\text{ФП}_1} = 2P_0 K_{\text{oc1}} K_{\text{ФП}_1} [1 + \cos(4\pi l/\lambda)], \quad (3)$$

где  $K_{\text{ФП}_1}$  – коэффициент преобразования оптической мощности в напряжение на выходе фотоприемника ФП<sub>1</sub>.

Учитывая, что чувствительность  $\delta U_{\text{вых}}(l, \lambda)$  ВОД к малым перемещениям мембраны  $\delta l$  с точностью до постоянного множителя определяется как

$$\delta U_{\text{вых}}(l, \lambda) \sim \frac{\partial U_{\text{вых}}(l, \lambda)}{\partial l} \delta l, \quad (4)$$

для достижения ее максимального значения необходимо выполнение условия

$$\frac{\partial U_{\text{вых}}(l, \lambda)}{\partial l} = \max, \quad (5)$$

которое, как нетрудно заметить из выражения (3), обеспечивается при  $\sin(4\pi l_0/\lambda) = 1$ , т. е. при оптимальных расстояниях от торца оптоволокна до мембраны, определяемых из условия

$$l_0(n) = \lambda/8(1 + 4n), \quad (6)$$

где  $n$  – целое число. Далее для определенности любое из совокупности этих расстояний будем называть оптимальным положением рабочей точки интерферометра.

Из практики применения интерферометрических устройств известно, что в результате воздействия различных паразитных внешних факторов рабочая точка смещается из оптимального положения  $l_0$ , в связи с чем возникает необходимость ее автоматической подстройки.

### Постановка задачи

Из соотношения (6) видно, что при использовании существующей зависимости  $l_0(\lambda)$  задача подстройки рабочей точки в оптимальное положение может быть решена, в частности, за счет перестройки длины волны  $\lambda$  излучения полупроводникового лазера путем изменения его рабочей температуры.

Оценим необходимый диапазон изменения температуры для подстройки рабочей точки. Для этого сначала определим диапазон перестройки длины волны  $\Delta\lambda$  от некоторого фиксированного значения  $\lambda_0$ , необходимый для возврата рабочей точки в оптимальное положение в случае ее ухода из положения  $l_0$  на расстояние  $\Delta l$ . Это можно сделать из соотношения (6), приняв во внимание, что при расстояниях  $l_0$  и  $l_0 + \Delta l$  оптимальное положение рабочей точки должно быть одинаковым

$$\frac{l_0}{\lambda_0} = \frac{l_0 + \Delta l}{\lambda_0 + \Delta\lambda}. \quad (7)$$

Для полупроводниковых одночастотных лазеров с длиной волны излучения  $\lambda_0 = 1,55$  мкм известна зависимость [5]

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \beta T, \quad (8)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны при  $T = 0$  °С,  $\beta$  – температурный коэффициент ( $\beta \approx 0,1$  нм/°С),  $T$  – температура, °С.

Подставим правую часть выражения (8) в соотношение (7), учтя, что  $\Delta\lambda = \beta T$ . Тогда необходимый диапазон изменения температуры для подстройки рабочей точки можно найти из условия

$$\Delta T = \frac{\lambda_0}{\beta l_0} \Delta l. \quad (9)$$

Определим диапазон изменения температуры, необходимый для того, чтобы напряже-

ние на выходе интерферометра, определяемое выражением (3), совершило одно полное колебание. Очевидно, что такое изменение выходного напряжения происходит при перестройке расстояния на половину длины волны излучения, т. е.  $\Delta l = \lambda_0/2$ . Подставив это значение в выражение (9), получим

$$\Delta T = \lambda_0^2 / (2\beta l_0). \quad (10)$$

Отсюда следует, что с увеличением расстояния  $l_0$  между торцом оптоволокна и зеркалом требования к необходимому диапазону изменения температуры снижаются. В частности, для  $\lambda_0 = 1,55$  мкм при расстоянии  $l_0 = 100$  мкм требуемый температурный диапазон  $\Delta T = 120$  °С, а при расстоянии  $l_0 = 400$  мкм (оптимальном для торцевого интерферометра) –  $\Delta T = 30$  °С.

Таким образом, при правильном проектировании чувствительного элемента ( $l \geq 400$  мкм) с изменением температуры лазера в диапазоне  $\Delta T = 30$  °С всегда будут наблюдаться  $U_{\text{вых max}}$  и  $U_{\text{вых min}}$  независимо от начального значения выходного напряжения.

Следует заметить, что кроме длины волны излучения от температуры зависит также и мощность лазера  $P_0$ , а следовательно, и  $U_{\text{вых max}}$ . В этом случае зависимость выходного напряжения интерферометра от температуры  $U_{\text{вых}}(T)$  будет иметь вид, представленный на рис. 2, где показаны три разных случая, отличающиеся начальным значением  $U_{\text{вых}}$ .

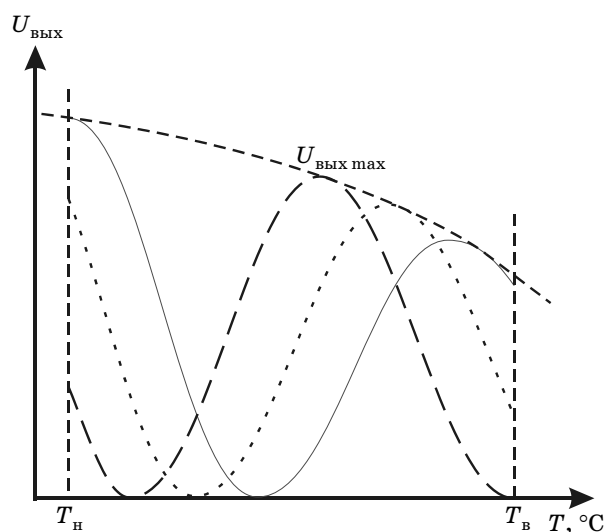


Рис. 2. Выходная характеристика интерферометра.  $T_H$  и  $T_B$  – нижняя и верхняя границы температурного диапазона.

Проанализируем фазу  $\varphi = 4\pi l/\lambda$ , входящую в выражение (3) для  $U_{\text{вых}}$

$$\varphi = 4\pi l/(\lambda_0 + \beta T), \quad (11)$$

для чего воспользуемся малостью  $\beta T$  по сравнению с  $\lambda_0$ .

$$\begin{aligned} \varphi = 4\pi l/(\lambda_0 + \beta T) &= 4\pi l \left[ \frac{\lambda_0 - \beta T}{(\lambda_0 + \beta T)(\lambda_0 - \beta T)} \right] = \\ &= \frac{4\pi l(\lambda_0 - \beta T)}{\lambda_0^2 - (\beta T)^2} \cong 4\pi l \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{\beta T}{\lambda_0^2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Пренебрегая начальной фазой  $\varphi_0 = 4\pi l/\lambda_0$  и знаком при  $\beta T$  ( $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$ ), получим

$$\varphi = 4\pi l\beta T/\lambda_0^2. \quad (13)$$

Таким образом, фаза характеристики  $U_{\text{вых}}$  линейно зависит от температуры, следовательно, зависимость выходного напряжения от температуры представляет собой косинусоиду, что и подтверждается экспериментом.

Для устранения температурной зависимости амплитуды  $U_{\text{вых max}}$  введем безразмерную функцию положения рабочей точки интерферометра, приведенную к входной оптической мощности  $\eta = U_{\text{вых}}/U_{\text{ФП}_2}$  (далее – приведенная функция положения), где  $U_{\text{ФП}_2}$  – напряжение на фотоприемнике ФП<sub>2</sub>, измеряющем мощность излучения лазера. Это напряжение определяется как

$$U_{\text{ФП}_2} = P_0 K_{\text{ос}2} K_{\text{ФП}_2}, \quad (14)$$

где  $K_{\text{ос}2}$  – коэффициент ослабления оптического тракта до ФП<sub>2</sub>,  $K_{\text{ФП}_2}$  – коэффициент преобразования оптической мощности в выходное напряжение ФП<sub>2</sub>.

Определим приведенную функцию положения  $\eta(T)$  с учетом выражений (3), (13) и (14) следующим образом

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{2P_0 K_{\text{ос}} K_{\text{ФП}_1}}{P_0 K_{\text{ос}2} K_{\text{ФП}_2}} \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi l\beta T}{\lambda_0^2} \right) \right] = \\ &= \frac{2K_{\text{ос}} K_{\text{ФП}_1}}{K_{\text{ос}2} K_{\text{ФП}_2}} \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi l\beta T}{\lambda_0^2} \right) \right] = \\ &= C \left[ 1 + \cos \left( \frac{4\pi l\beta T}{\lambda_0^2} \right) \right], \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$C = \frac{2K_{\text{ос}} K_{\text{ФП}_1}}{K_{\text{ос}2} K_{\text{ФП}_2}}. \quad (16)$$

Как видно из соотношений (15) и (16), амплитуда приведенной функции положения не зависит от мощности лазера  $P_0$ , а следовательно, и от температуры. После преобразования  $U_{\text{вых}}$  и  $U_{\text{ФП}_2}$  в цифровую форму эта функция может быть легко вычислена микропроцессором.

### Алгоритм работы устройства

На рис. 3 представлена нормированная зависимость  $\eta/\eta_{\text{max}}$  от температуры лазера для типичного образца чувствительного элемента (вид приведенной функции положения зависит от расстояния между торцом волокна и мембраной).

Оптимальное положение рабочей точки ВОД –  $\eta_{\text{рт}} = \eta_{\text{max}}/2 = C/2$  (см. рис. 3). При таком ее положении нелинейные искажения в выходном сигнале минимальны, а чувствительность и динамический диапазон датчика максимальны.

На основании описанной выше математической модели был разработан управляющий алгоритм, целью работы которого является определение оптимальной рабочей точки на приведенной функции положения (т. е. нахождение оптимальной температуры лазерного модуля и, в конечном счете, длины волны лазерного излучения) и удержание выбранного положения при изменяющихся внешних возмущающих воздействиях.

Алгоритм состоит из трех основных частей: выбор оптимального положения рабочей точки

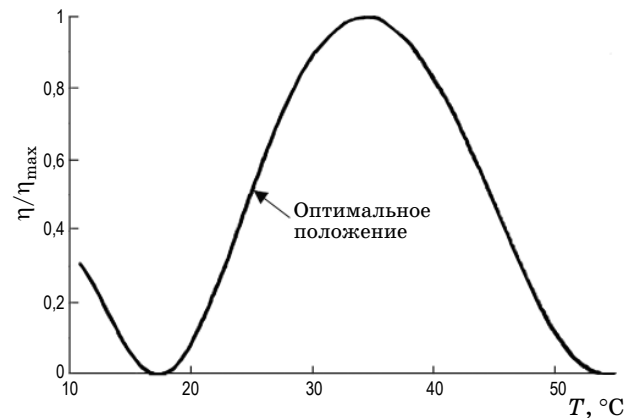


Рис. 3. Нормированная функция положения рабочей точки, приведенная к входной оптической мощности.

(калибровка), удержание выбранного положения с помощью управления температурой (длинной волны излучения) лазерного модуля и проверка критерия необходимости перекалибровки системы. Основные функциональные узлы алгоритма отражены на рис. 4.

При калибровке с помощью элемента Пельтье происходит охлаждение лазерного модуля. Затем, когда приращения температуры становятся меньше определенного критического значения ( $T_1 - T_2 < \delta T$ ), направление тока на элементе Пельтье меняется на противоположное и начинается нагрев лазерного модуля. При

этом фиксируются максимальное и минимальное значения приведенной функции положения  $\eta_{\max}$  и  $\eta_{\min}$ , а также температуры в этих точках  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$ . Здесь  $T_1$  и  $T_2$  – температуры в начале и конце итерации цикла охлаждения соответственно. Когда температура лазерного модуля достигает заданного предельного значения ( $T_{\text{предел}}$ ), нагрев прекращается. Таким образом, результатом калибровки являются следующие данные:  $\eta_{\max}$ ,  $\eta_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ .

На следующем этапе с помощью программно реализованного пропорционально-интеграль-

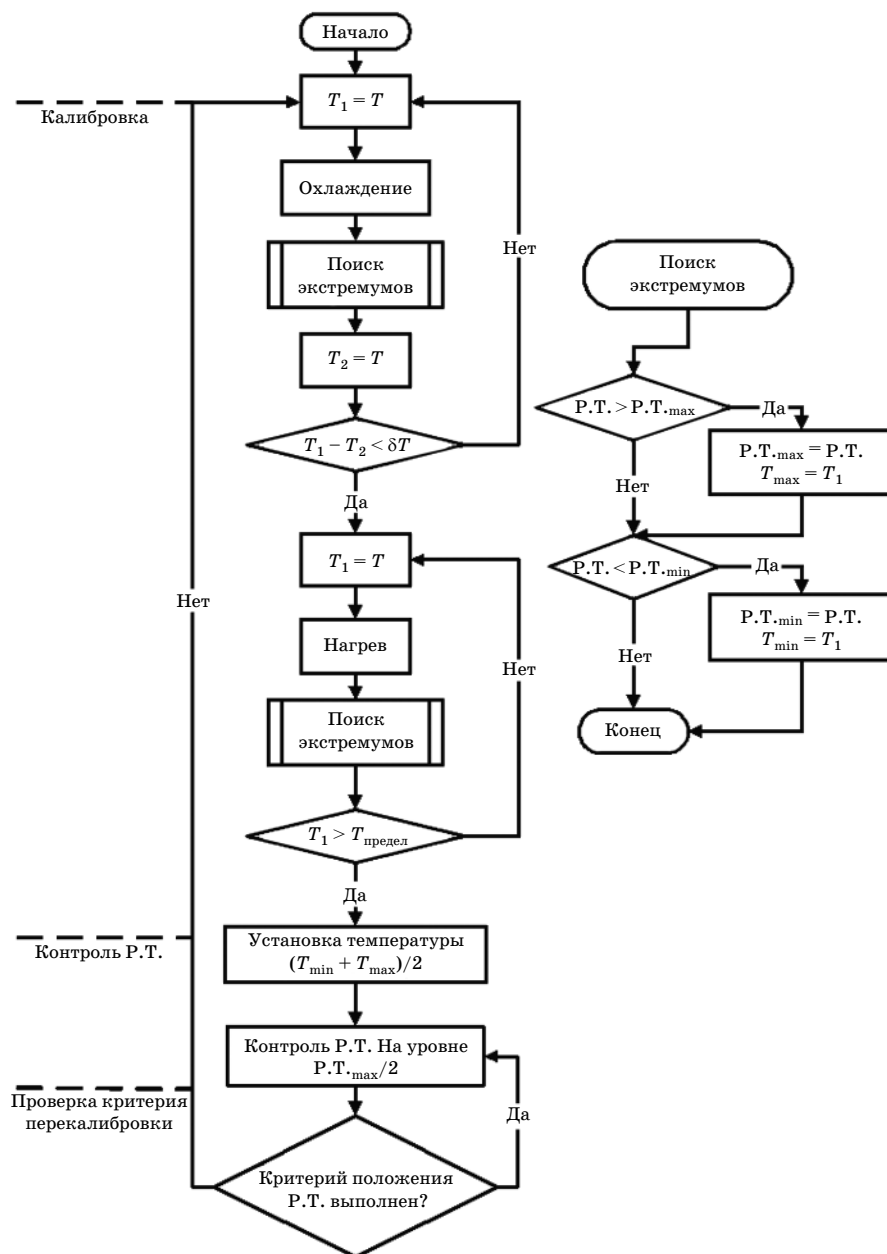


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления.

но-дифференциального регулятора происходят установка и контроль выбранного положения рабочей точки. Первоначально устанавливается температура лазерного модуля на уровне  $T_{cp} = (T_{min} + T_{max})/2$ . После этого стабилизируется положение рабочей точки на уровне  $\eta_{пт} = \eta_{max}/2 = C/2$ .

Стабилизирующий сигнал в цепи обратной связи представляет собой значение тока на элементе Пельтье

$$i(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (17)$$

где  $e(t)$  – рассогласование

$$e(t) = \eta_{max}/2 - \eta(t). \quad (18)$$

Тогда стабилизирующий сигнал в дискретной форме рассчитывается как

$$I(n) = K_p E(n) + K_i \Delta t \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_d}{\Delta t} [E(n) - E(n-1)], \quad (19)$$

где  $\Delta t$  – интервал дискретизации,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно.

Следует отдельно отметить, что поскольку приведенная функция положения не монотонна (рис. 2), то знак (полярность) управляющего сигнала зависит от знака производной того участка, на котором располагается выбранная рабочая точка. Поэтому для определения знака производной в требуемой точке  $\left. \frac{d(\eta)}{dT} \right|_{T_{cp}}$  сравниваются значения  $T_{min}$  и  $T_{max}$ . Если  $T_{min} < T_{max}$ , то производная положительна и знак управляющего сигнала не инвертируется, если нет – производная отрицательна и знак управляющего сигнала инвертируется. Данная особенность позволяет алгоритму не зависеть от конструктивных отличий конкретного первичного преобразователя и элементов оптической схемы. Таким образом, система, построенная на основе такого алгоритма, является универсальной и способной работать с любым интерференционным волоконно-оптическим датчиком.

Последним этапом работы алгоритма является проверка критерия необходимости перекалибровки системы. Она введена для тех случаев, когда вследствие изменяющихся внешних воздействий рабочая точка смещается на участок с противоположным знаком произво-

дой. Также возможна ситуация, когда рабочая точка в процессе автоматической регулировки выбирается такой, при которой температура лазерного модуля выходит за пределы допустимого диапазона. В случае обнаружения необходимости перекалибровки происходит выбор новой оптимальной рабочей точки, и процесс стабилизации корректирует новые начальные значения. Это позволяет системе адаптивно реагировать на переменные внешние воздействия, следовательно, дает возможность эксплуатировать такой микрофон в реальных условиях при изменяющихся воздействиях окружающей среды.

Алгоритм калибровки выглядит следующим образом:

1. Охлаждение до минимальной температуры, затем нагрев до  $T_{предел}$ . В процессе фиксируются

$\eta_{max} = U_{вых max}/U_{ФП2}$  при  $T_{max}$  – локальный максимум,

$\eta_{min} = U_{вых min}/U_{ФП2}$  при  $T_{min}$  – локальный минимум.

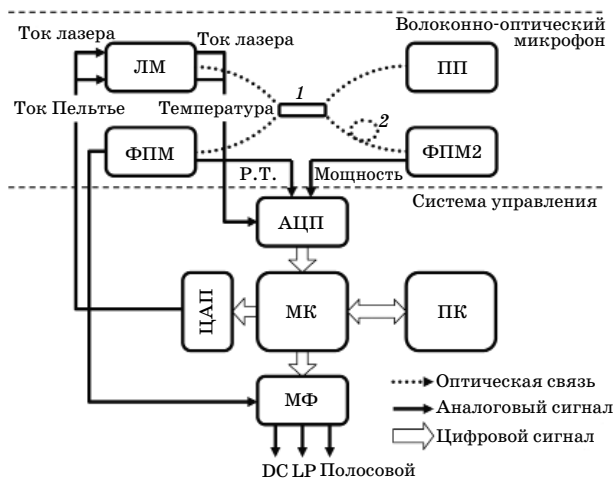
2. Температура выставляется в точку  $T_{cp} = (T_{max} + T_{min})/2$ . В зависимости от соотношения  $T_{max}$  и  $T_{min}$  определяется знак сигнала ошибки.

3. Определяется положение рабочей точки  $\eta_{пт} = \eta_{max}/2 = C/2$  (см. формулу 15).

4. Проводится автоматическое регулирование температуры до достижения  $\eta = \eta_{пт}$ .

## Структурная схема устройства

Структурная схема волоконно-оптического микрофона (ВОМ), построенного на основе торцевого интерферометра Фабри–Перо, и системы управления его параметрами показаны на рис. 5. ВОМ состоит из лазерного модуля, включающего в себя источник когерентного излучения, терморезистор и элемент Пельтье для управления температурой лазера, волоконно-оптического разветвителя X-типа и вынесенного за пределы корпуса первичного преобразователя (ПП). К разветвителю подключается фотоприемный модуль, представляющий собой фотодиод со схемой усиления для регистрации полезного сигнала, и фотоприемный модуль 2 (ФПМ 2), использующийся для измерения мощности излучения лазера. Следует отдельно отметить, что несмотря на наличие в лазерном модуле (тип LDIH-DFB-1550-10P в корпусе DIL 14) встроенного фотодиода, для измерения мощности лазерного из-



**Рис. 5.** Структурная схема волоконно-оптического микрофона. ЛМ – лазерный модуль, ПП – первичный преобразователь, ФПМ – фотоприемный модуль, АЦП и ЦАП – аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи соответственно, МК – микроконтроллер, ПК – персональный компьютер, МФ – модуль фильтров. 1 – волоконно-оптический разветвитель, 2 – оптический аттенуатор.

лучения применялся фотодиод, не подвергавшийся воздействию термоэлемента Пельтье, что обеспечило стабильность показаний измерителя мощности. Кроме того, проходящее на ФПМ 2 излучение ослаблялось при помощи аттенуатора с целью минимизации влияния оптических переотражений от элементов узла измерения оптической мощности на полезный сигнал.

Основным элементом ПП является чувствительная мембрана, расположенная на некотором расстоянии от торца одномодового оптического волокна. При колебаниях мембраны изменяется фаза волны, отраженной от зеркальной поверхности мембраны. Волна, отраженная от мембраны, интерферирует с волной, отраженной от торца волокна. В результате интерференции результирующая волна, распространяющаяся в волокне 4 (рис. 1.) по направлению к фотодиоду, оказывается промодулирована по амплитуде и фазе в соответствии с колебаниями мембраны. Модуляция интенсивности отраженного сигнала детектируется фотодиодом, образуя в результате полезный электрический сигнал, пропорциональный смещениям мембраны.

Отличительная особенность волоконно-оптического микрофона, построенного по дан-

ной схеме, – низкие требования к длине когерентности лазерного излучения, так как разность оптических путей двух интерферирующих волн составляет менее 1 мм. Это позволяет использовать максимальную длину оптического кабеля от разветвителя до ПП, ограниченную только потерями в оптическом волокне (0,2–0,3 дБ/км).

Система управления ВОМ состоит из программируемого микроконтроллера (МК) на базе микросхемы ATmega32 фирмы ATMEL, реализующего алгоритм управления и интерфейс обмена данными с персональным компьютером, аналого-цифрового преобразователя с аналоговым мультиплексором на четыре канала, оцифровывающего и передающего в МК данные о токе лазерного диода и температуре лазерного модуля, мощности лазерного излучения с ФПМ 2 и постоянной составляющей сигнала с ФПМ (рабочая точка Р.Т.).

Кроме того, в состав управляющей системы входит цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), который выполняет две функции. Во-первых, управление током лазера. На ЦАП поступает цифровой сигнал с МК, задающий ток лазера в мА, затем, в результате цифро-аналогового преобразования на выходе ЦАП устанавливается напряжение определенного уровня. Далее, преобразователь “ток-напряжение” задает соответствующий ток лазера. Во-вторых, аналогичным образом происходит преобразование управляющего цифрового сигнала  $I(n)$  (см. формулу 18) в ток на элементе Пельтье.

Модуль фильтров позволяет подключить к выходу один из трех фильтров: DC (постоянная составляющая), LP (НЧ – фильтр, частота среза 200 Гц) и полосовые фильтры с частотами от 200 Гц до 6,3 кГц, 10 кГц и 20 кГц. Персональный компьютер используется опционально для отладки и контроля работы устройства.

## Результаты экспериментов

Для проверки работоспособности системы управления ВОМ проведен ряд экспериментов как в естественных, так и в искусственно изменяемых климатических условиях. В экспериментах использовались различные первичные преобразователи для учета влияния технологического разброса параметров.

На рис. 6 показаны временные зависимости положения рабочей точки (приведенная функция положения,  $\eta = U_{\text{вых}}/U_{\text{ФП}_2}$ , см. формулу (15)) и температуры лазерного модуля. Запись показаний проводилась в помещении при нормальных условиях и естественном колебании температуры в течение 70 ч.

Из рис. 6 видно, что приведенная функция положения стабилизирована на уровне  $\eta = 1,6$ , и естественные колебания окружающей температуры хорошо компенсируются изменениями температуры лазерного модуля и, соответственно, длины волн лазерного излучения.

Следующий эксперимент проводился в климатической камере, в которой в течение 80 мин и происходил нагрев камеры от температуры  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  до температуры  $10\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7). На графике показан процесс калибровки системы (первые 3 мин). После чего рабочая точка устанавливается в положение  $\eta = U_{\text{вых}}/U_{\text{ФП}_2} = 2$ , что равно половине от максимального значения  $\eta_{\text{max}} = 4$ .

Кроме того, через 41 мин после начала эксперимента произошла перекалибровка системы, в результате которой температура лазерного модуля, а следовательно, и длина волны лазерного излучения принимают значения, отличные от первоначально выбранных. При этом рабочая точка стабилизирована на уровне  $\eta = U_{\text{вых}}/U_{\text{ФП}_2} = 2$  на всем протяжении эксперимента, за исключением процесса перекалибровки системы.

Проведенные эксперименты показывают возможность применения интерферометрических ВОД с разработанной адаптивной системой управления в условиях переменных случайных внешних воздействий на первичный преобразователь (изменяющиеся атмосферное давление и температура окружающей среды). Полученные результаты испытаний лабораторного макета дают основания полагать, что разработанная система будет обладать хорошими эксплуатационными характеристиками с точки зрения стабильности при работе в реальных условиях.

### Заключение

Экспериментальные исследования разработанной системы управления интерферометром показали возможность ее применения в реальных условиях. Она осуществляет адаптивную настройку и стабилизацию па-

раметров микрофона при изменяющихся паразитных воздействиях. Применение такой системы позволяет создавать миниатюрные первичные преобразователи со стабилизированными параметрами и избавляет от необходимости дублирования измерительных каналов, следовательно, сокращается количество электронных и оптических компонентов в системе, снижаются ее размеры и стоимость.

Следует отдельно отметить универсальность созданной системы управления интерферометром. То есть, стабилизирующую систему можно применять не только для управления и стабилизации параметров рассматриваемого в работе волоконно-оптического микрофона, но и для любого другого интерферометра.

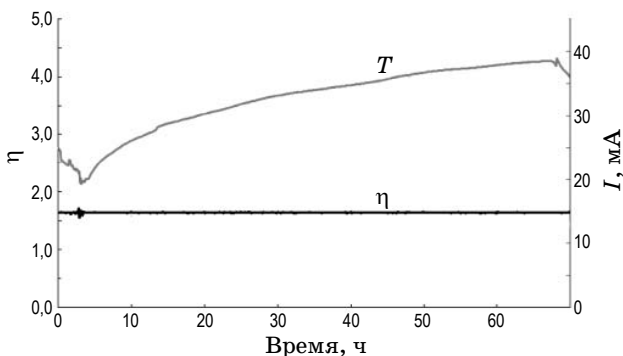


Рис. 6. Стабилизация приведенной функции положения в лабораторных условиях за длительный промежуток времени.

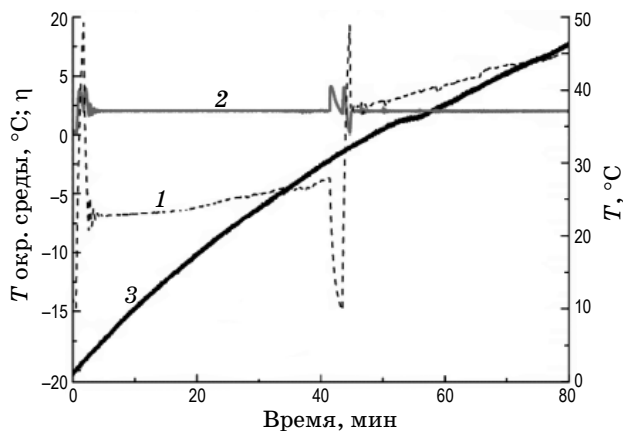


Рис. 7. Стабилизация приведенной функции положения в процессе испытаний датчика в климатической камере. 1 —  $T$ ,  $^\circ\text{C}$ , 2 —  $\eta$ , 3 — температура окружающей среды.

\* \* \* \* \*



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н.* Волоконно-оптический торцевой интерферометр – универсальный элемент построения датчиков смещения. *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 1. С. 3–6.
  2. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н.* Волоконно-оптический микроинтерферометр как основа построения высокочувствительных сенсоров. Сб. докладов VI Междунар. конф. “Квантовая электроника-2006”. Минск, Белоруссия, 2006. С. 117.
  3. *Ветров А.А., Ильков В.К., Комиссаров С.С., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н., Шириов А.А.* Волоконно-оптическая сенсорная система. Патент России № 2 305 253. 2007.
  4. *Ветров А.А., Ильков В.К., Комиссаров С.С., Корляков А.В., Лучинин В.В., Сергушичев А.Н., Шириов А.А.* Оптический микрофон и способ изготовления его звукочувствительной мембраны. Патент России № 2 365 064. 2009.
  5. *Ветров А.А., Данилов Д.А., Есипов С.С., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н.* Сравнение температурных и электрических методов управления длиной волны излучения полупроводниковых лазеров. *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 8. С. 90–96.
  6. *Ветров А.А., Комиссаров С.С., Сергушичев А.Н., Туркин М.В., Шириов А.А.* Анализ и оптимизация параметров интерференционного волоконно-оптического микрофона. *Оптический журнал*. 2011. Т. 78. № 6. С. 31–38.
-