

Д. т. н. В. Т. КОНДРАТОВ, В. В. РЕДЬКО

Украина, г. Киев, Институт кибернетики им. В. М. Глушкова,  
Киевский нац. ун-т технологий и дизайна  
E-mail: blist2002@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
27.11 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ  
(ДонНУ, г. Донецк)

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ МЕТОД ИЗБЫТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ: ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ

*Предложена конструкция информативно-избыточного волоконно-оптического датчика давления, который обеспечивает автоматическую коррекцию составляющих систематической погрешности результата измерений.*

При проектировании систем контроля и управления технологическими процессами металлургических, газовых и нефтеперерабатывающих предприятий на первый план выступает проблема высокоточного измерения давления жидкостей и газов. В этой связи актуальной задачей является разработка оптико-электронных методов избыточных измерений (МИИ) и информативно-избыточных волоконно-оптических датчиков давления (ВОДД).

Известно [1], что МИИ обеспечивают автоматическую коррекцию целого ряда составляющих систематической погрешности результата измерений. Например, в работах [2, 3] показана возможность автоматической коррекции составляющих систематической погрешности результата измерений, обусловленных такими факторами как:

- нелинейность функции преобразования ВОДД;
- нелинейность функции преобразования приемника оптического излучения (ПОИ);
- температурная и долговременная нестабильность характеристик источника оптического излучения (ИОИ) и ПОИ;
- технологический разброс параметров ИОИ и ПОИ.

Однако до настоящего времени не была решена задача автоматической коррекции составляющих систематической погрешности измерения, обусловленных изменением геометрических и физических параметров чувствительного элемента ВОДД (например, мембраны). Решению данной науч-

но-технической задачи посвящена настоящая работа. Целью работы является разработка:

- оптико-электронного метода избыточных измерений давления, обеспечивающего автоматическую коррекцию составляющих систематической погрешности результата измерений;
- технического решения цифрового измерителя давления, реализующего оптико-электронный метод избыточных измерений;
- конструкции информативно-избыточного ВОДД с улучшенными метрологическими характеристиками.

### Конструктивные особенности информативно-избыточного ВОДД и его функция преобразования

В описываемом ниже цифровом измерителе давления используется модифицированный рефлексометрический ВОДД [4] с тремя оптическими каналами, конструкция которого приведена на рис. 1. Особенностью предложенной конструкции является то, что она обеспечивает получение информативной избыточности — дополнительной информации

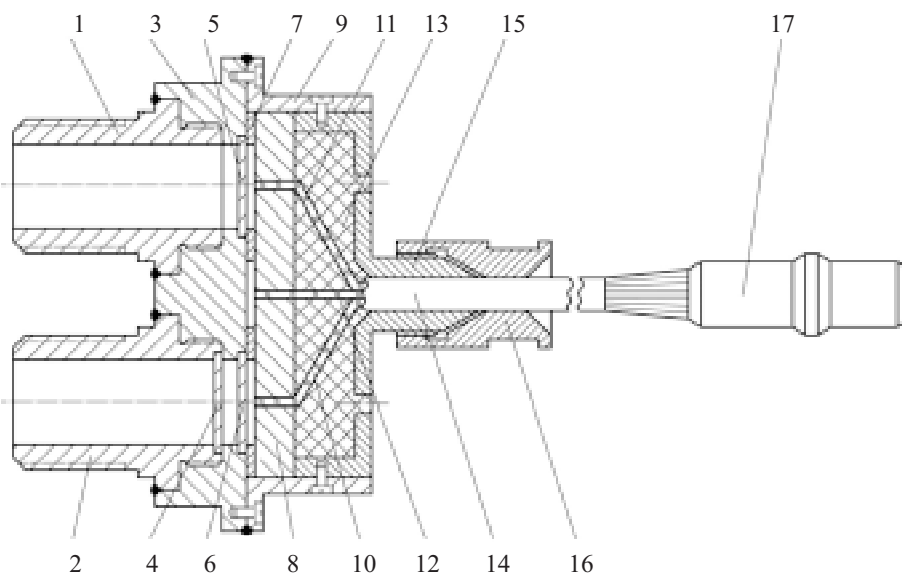


Рис. 1. Конструкция информативно-избыточного ВОДД:  
1, 2 — штуцера; 3 — каркас; 4—6 — мембраны; 7 — прокладка; 8 — функциональный держатель; 9 — корпус; 10—12 — подводяще-отводящие волоконные световоды; 13 — герметик; 14 — волоконно-оптический кабель; 15 — наконечник с технологическими отверстиями; 16 — фиксатор; 17 — разъемный световодный соединитель типа «розетка»

о параметрах как самого ВОДД, так и других элементов измерительного канала измерителя давления. К их числу относятся:

1) расстояние  $d_0$  между центром отражающей поверхности мембраны и торцом подводяще-отводящего волоконного световода (ПОВС) при отсутствии прогиба мембраны;

2) коэффициент преобразования давления в прогиб мембраны;

3) мощность потока оптического излучения, формируемого источником;

4) неинформативные потери мощности потока оптического излучения при его передаче от источника на ВОДД и от ВОДД на приемник;

6) токовая чувствительность и темновой ток приемника оптического излучения.

Получение информативной избыточности обеспечивается за счет введения в информативно-избыточный ВОДД трех оптических каналов. Это позволяет сформировать три потока оптического излучения, мощности которых модулируются разными по значению давлениями.

Первый поток оптического излучения по ПОВС 12 подается на центральную часть каркаса 3, которая отполирована до зеркальной чистоты. Таким образом, мощность этого потока модулируется давлением  $p_0$ , которое по значению равно давлению в полости, заключенной между каркасом и функциональным держателем 8.

Второй поток оптического излучения по ПОВС 11 подается на зеркальную поверхность мембраны 5. Его мощность модулируется давлением  $p_x$ , значение которого неизвестно.

Третий поток оптического излучения по ПОВС 10 подается на зеркальную поверхность мембраны 6. Поскольку давление в полости между мембранами 4 и 6 устанавливается равным давлению  $p_0$ , мощность третьего потока оптического излучения модулируется давлением  $p_\Sigma$ , равным сумме давлений  $p_x$  и  $p_0$ .

Следует отметить, что в большинстве рефлексометрических ВОДД для подвода и отвода потока оптического излучения используются разные волоконные световоды (ВС) [5]. Это приводит к возникновению дополнительных оптических потерь, обусловленных попаданием части отраженного потока оптического излучения в пространство между сердцевинами приемных ВС. Например, установлено, что при использовании в ВОДД волоконно-оптического жгута, состоящего из одного подводящего и шести отводящих ВС (радиус сердцевины 100 мкм, радиус оболочки 250 мкм, апертурный угол  $12^\circ$ ), и полной засветке торцов отводящих ВС дополнительные оптические потери могут составить до 70% от мощности отраженного потока оптического излучения.

В предлагаемой конструкции ВОДД эти дополнительные оптические потери существенно уменьшены за счет использования одних и тех же ПОВС как для подвода, так и для отвода потока оптического излучения.

Важнейшей метрологической характеристикой любого ВОДД является функция преобразования,

вид которой в значительной степени определяется особенностями конструктивного исполнения оптического канала. В работе [2] показано, что функция преобразования ВОДД с оптическим каналом, выполненным в виде ПОВС, имеет линейный участок, который описывается следующим уравнением величин:

$$\Phi_M = \Phi_0 \frac{r_c - d_i \operatorname{tg} \Theta_{NA}}{k_2 r_c} = \Phi_0 \frac{r_c - [d_0 - S_{\text{дп}}(p_x - p_0)] \operatorname{tg} \Theta_{NA}}{k_2 r_c},$$

где  $\Phi_0$  — поток оптического излучения, испускаемый из торца ПОВС в направлении зеркальной поверхности;  
 $r_c, \Theta_{NA}$  — радиус и апертурный угол сердцевины ПОВС;  
 $d_i$  — текущее расстояние между центром отражающей поверхности мембраны и торцом ПОВС;  
 $d_0$  — начальное расстояние;  
 $k_2 = 2$ ;  
 $S_{\text{дп}}$  — коэффициент преобразования давления в прогиб мембраны,  $\{S_{\text{дп}}\} = \{3\{R_M\}^4(1 - \mu_M^2)\} / \{16\{E_M\}\{h_M\}^3\}$ ;  
 $\{R_M\}, \{h_M\}$  — значения радиуса и толщины мембраны;  
 $\mu_M$  — коэффициент Пуассона материала мембраны;  
 $\{E_M\}$  — значение модуля Юнга материала мембраны.

Функция преобразования ВОДД сохраняет линейный характер до тех пор, пока выполняется следующее условие [2]:

$$0,5 \{r_c\} / \operatorname{tg} \{\Theta_{NA}\} < \{d_i\} < \{r_c\} / \operatorname{tg} \{\Theta_{NA}\}.$$

Исходя из данного условия установлено, что для ВОДД, в котором используются ПОВС с радиусом сердцевины 100 мкм и апертурным углом  $12^\circ$ , оптимальное значение начального расстояния  $d_0$  равно 470 мкм. При этом максимальный прогиб центров мембран не должен превышать 235 мкм.

#### Работа цифрового измерителя давления

Функциональная схема цифрового измерителя давления, реализующего метод избыточных измерений давления и температуры, приведена на рис. 2. Особенностью устройства является наличие двух измерительных каналов. Один из них используется для измерения давления, а другой — для измерения температуры среды, окружающей приемник оптического излучения.

Коротко остановимся на некоторых допущениях, принятых при реализации метода избыточных измерений в измерителе давления. Для преобразования мощностей модулированных потоков оптического излучения в напряжения используется приемник излучения 6, основой которого является полупроводниковый фотодиод. Функция преобразования данного фотодиода описывается известным уравнением [4]

$$U_\phi = \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{S_I}{I_s} \Phi_M + k_1 \right),$$

где  $k$  — постоянная Больцмана ( $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  
 $T_x$  — абсолютная температура среды, в которой находится фотодиод;  
 $q$  — заряд электрона ( $q=1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл);  
 $S_I, I_s$  — токовая чувствительность и темновой ток фотодиода;  
 $k_1 = 1$ .

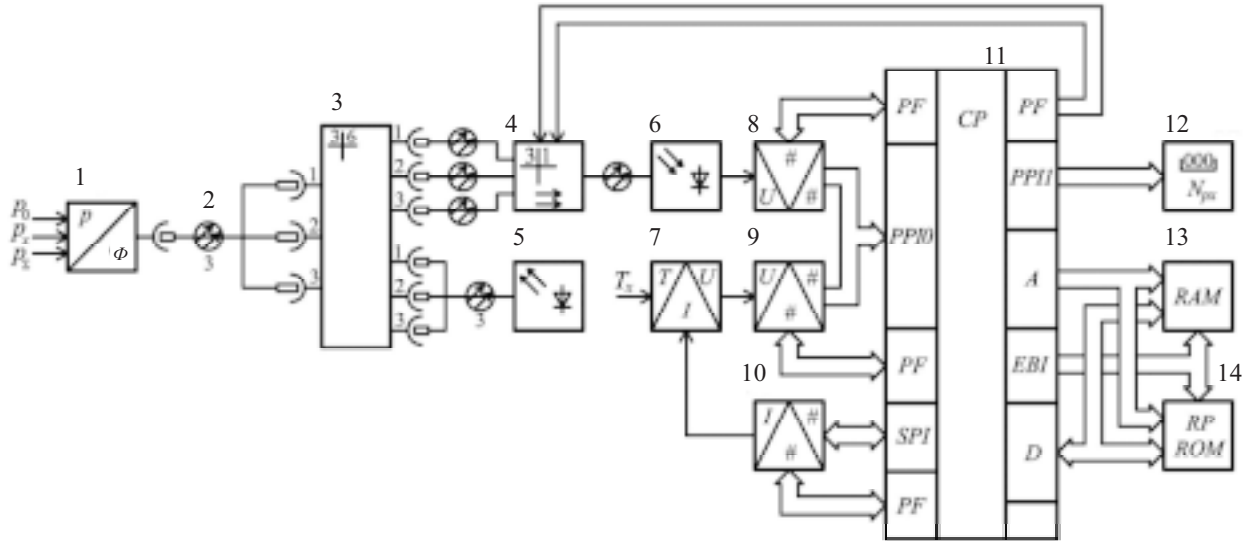


Рис. 2. Функциональная схема цифрового измерителя давления:

1 — информативно-избыточный ВОДД; 2 — волоконно-оптический кабель; 3 — световодный разветвитель; 4 — световодный коммутатор; 5 — источник оптического излучения; 6 — приемник излучения; 7 — полупроводниковый датчик температуры; 8, 9 — преобразователи «напряжение — код»; 10 — преобразователь «код — ток»; 11 — мультипроцессор; 12 — жидкокристаллический дисплей; 13 — оперативное запоминающее устройство (ОЗУ); 14 — перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ); SPI — последовательный периферийный интерфейс; PP10, PP11 — параллельные периферийные интерфейсы; A — шина адреса; D — шина данных; EBI — интерфейс внешней шины; PF — программируемые флаги

Если мощность потока оптического излучения  $\Phi_M$  устанавливается такой, что выполняется неравенство  $\{S_L\} \{ \Phi_M \} / \{ I_s \} \gg 1$ , то функция преобразования фотоэлемента может быть представлена в следующем виде:

$$U_\phi = \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{S_L \Phi_M}{I_s} \right).$$

Для измерения абсолютной температуры  $T_x$  среды, в которой находится приемник излучения 6, в измеритель давления дополнительно введен полупроводниковый датчик температуры 7 (термодиод). Его функция преобразования описывается известным уравнением величин [6, с. 12]

$$U_T = \frac{kT_x}{q} \ln \left[ \frac{I_T}{I_0} \exp \left( \frac{qU_k}{kT_x} \right) + k_1 \right],$$

где  $U_T$  — падение напряжения на  $p-n$ -переходе;  
 $I_T$  — ток через  $p-n$ -переход;  
 $I_0$  — ток насыщения при  $T_x \rightarrow \infty$ ;  
 $U_k$  — контактная разность потенциалов на границе раздела областей с проводимостями  $n$ - и  $p$ -типа.

При условии что  $\{I_T\} \exp[\{q\} \{U_k\} / (\{k\} \{T_x\})] \gg \{I_0\}$  функция преобразования термодиода может быть описана следующим уравнением величин:

$$U_T = U_k - \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{I_0}{I_T} \right).$$

Сущность работы цифрового измерителя давления состоит в следующем. После включения питания программа работы измерителя загружается из ППЗУ 14 через мультипроцессор 11 в ОЗУ 13. В соответствии с данной программой все функциональные блоки измерителя давления устанавливаются в исходное положение. Входные регистры чисел ЖК-

дисплея 12 и преобразователя «код — ток» 10 обнуляются. В результате ЖК-дисплей отображает нули.

Источник излучения 5 включается сразу же после включения питания устройства. На его выходе формируется поток оптического излучения  $\Phi_0$ , который вводится в торцы трех волоконных световодов и таким образом разделяется на три равные по мощности потока оптического излучения  $\Phi_{01}$ ,  $\Phi_{02}$  и  $\Phi_{03}$  ( $\{\Phi_{01}\} = \{\Phi_{02}\} = \{\Phi_{03}\}$ ). Данные потоки по ВС, через световодный разветвитель 3 и волоконно-оптический кабель 2 поступают на вход ВОДД 1.

Мощность потока оптического излучения  $\Phi_{01}$  модулируется давлением  $p_0$ , равным давлению в первой полости ВОДД 1. Для этого поток оптического излучения  $\Phi_{01}$  (см. рис. 1) по световоду 12 направляется на неподвижную часть каркаса 3. Отражаясь от нее, часть потока оптического излучения возвращается в подводяще-отводящий световод 12. В результате на выходе последнего образуется первый модулированный по мощности поток оптического излучения  $\Phi_{m1}$ :

$$\Phi_{m1} = \Phi_{01} (r_c - d_0 \operatorname{tg} \Theta_{NA}) / k_2 r_c. \quad (1)$$

Мощность потока оптического излучения  $\Phi_{02}$  модулируется неизвестным по значению давлением  $p_x$ . Это осуществляется путем подачи потока оптического излучения  $\Phi_{02}$  по световоду 11 (см. рис. 1) на зеркальную поверхность мембраны 5. Часть отраженного от нее потока оптического излучения возвращается в световод 11. В результате на выходе последнего образуется второй модулированный по мощности поток оптического излучения  $\Phi_{m2}$ :

$$\Phi_{m2} = \Phi_{02} \frac{r_c - [d_0 - S_{\text{дп}} (p_x - p_0)] \operatorname{tg} \Theta_{NA}}{k_2 r_c}. \quad (2)$$

Одновременно с модуляцией мощностей потоков оптического излучения  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  модулируется мощность потока оптического излучения  $\Phi_{03}$  давлением  $p_{\Sigma}$ , значение которого равно сумме значений давлений  $p_0$  и  $p_x$ . Для этого поток оптического излучения  $\Phi_{03}$  по световоду 10 (см. рис. 1) направляется на зеркальную поверхность мембраны 6. После отражения от нее часть потока оптического излучения возвращается в световод 10. В результате на его выходе образуется третий модулированный по мощности поток оптического излучения  $\Phi_{м3}$ :

$$\Phi_{м3} = \Phi_{03} \frac{r_c - (d_0 - S_{дп} p_x) \operatorname{tg} \Theta_{НА}}{k_2 r_c}. \quad (3)$$

Полученные на выходе ВОДД 1 (рис. 2) потоки оптического излучения  $\Phi_{м1}$  (1),  $\Phi_{м2}$  (2) и  $\Phi_{м3}$  (3) через световодный коммутатор 4, управляемый мультипроцессором 11, поочередно подаются на вход приемника излучения 6. В результате на выходе последнего в соответствующие моменты времени появляются следующие напряжения:

$$U_{\Phi 1} = \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{S_I}{I_s} \Phi_{м1} \right); \quad (4)$$

$$U_{\Phi 2} = \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{S_I}{I_s} \Phi_{м2} \right); \quad (5)$$

$$U_{\Phi 3} = \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{S_I}{I_s} \Phi_{м3} \right). \quad (6)$$

Напряжения  $U_{\Phi 1}$  (4),  $U_{\Phi 2}$  (5) и  $U_{\Phi 3}$  (6) поочередно подаются на вход преобразователя «напряжение — код» (ПНК) 8 и с его помощью преобразуются в коды чисел

$$N_1 = \{S_{\text{ПНК}}\} \{U_{\Phi 1}\}; \quad (7)$$

$$N_2 = \{S_{\text{ПНК}}\} \{U_{\Phi 2}\}; \quad (8)$$

$$N_3 = \{S_{\text{ПНК}}\} \{U_{\Phi 3}\}, \quad (9)$$

где  $\{S_{\text{ПНК}}\}$  — значение коэффициента преобразования ПНК 8.

По команде с мультипроцессора 11 коды чисел  $N_1$  (7),  $N_2$  (8) и  $N_3$  (9) по шине данных поступают в ОЗУ 13 и запоминаются в нем.

Далее в соответствии с программой, загруженной в ОЗУ 13, по команде с мультипроцессора 11 во входной регистр числа преобразователя «код — ток» (ПКТ) 10 подается код числа  $N_{T1}$ . В результате через  $p$ - $n$ -переход термодиода 7 потечет ток  $I_{T1}$ . Значение этого тока выбирается на начальном участке вольт-амперной характеристики термодиода, что позволяет исключить дополнительный нагрев  $p$ - $n$ -перехода относительно температуры окружающей среды  $T_x$ .

Термочувствительное сопротивление  $p$ - $n$ -перехода преобразуется в напряжение

$$U_{T1} = U_k - \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{I_0}{I_{T1}} \right),$$

которое с помощью ПНК 9 преобразуется в код числа

$$N_4 = \{S_{\text{ПНК}}\} \{U_{T1}\}. \quad (10)$$

По команде с мультипроцессора 11 код числа  $N_4$  (10) по шине данных передается в ОЗУ 13, где и запоминается.

Затем в соответствии с программой, загруженной в ОЗУ 13, по команде с мультипроцессора 11 во входной регистр числа ПКТ 10 подается код числа  $N_{T2}$ . В результате через  $p$ - $n$ -переход термодиода 7 потечет ток  $I_{T2}$ . Его значение устанавливается на 5—10% больше, чем значение тока  $I_{T1}$ , т. е.  $\{I_{T2}\} = (0,05 \dots 0,1) \{I_{T1}\}$ , что практически не изменяет теплового состояния  $p$ - $n$ -перехода.

Термочувствительное сопротивление  $p$ - $n$ -перехода преобразуется в напряжение

$$U_{T2} = U_k - \frac{kT_x}{q} \ln \left( \frac{I_0}{I_{T2}} \right),$$

которое затем с помощью ПНК 9 преобразуется в код числа

$$N_5 = \{S_{\text{ПНК}}\} \{U_{T2}\}. \quad (11)$$

По команде с мультипроцессора 11 код числа  $N_5$  (11) через шину данных поступает в ОЗУ 13 и запоминается в нем.

Далее полученные результаты промежуточных измерений (7)—(11) обрабатываются в мультипроцессоре 11 в соответствии со следующим уравнением числовых значений:

$$N_{px} = \{p_0\} \frac{\left( \frac{\{I_{T2}\}}{\{I_{T1}\}} \right)^{\frac{N_3 - N_2}{N_5 - N_4}} - \left( \frac{\{I_{T2}\}}{\{I_{T1}\}} \right)^{\frac{N_1 - N_2}{N_5 - N_4}}}{\left( \frac{\{I_{T2}\}}{\{I_{T1}\}} \right)^{\frac{N_3 - N_2}{N_5 - N_4}} - 1}. \quad (12)$$

Полученный результат измерения давления отображается на ЖК-дисплее 12.

Анализ уравнения числовых значений (12) показал, что обработка результатов промежуточных измерений (7)—(11) указанным образом исключает влияние на результат измерения давления следующих составляющих систематической погрешности:

— погрешности от нелинейности функции преобразования ВОДД;

— погрешности от нелинейности функции преобразования приемника оптического излучения;

— погрешности от изменений геометрических параметров конструктивных элементов ВОДД (радиуса и толщины мембран, толщины прокладки), обусловленных изменением параметров окружающей среды и воздействием механических факторов;

— погрешности от изменения физических параметров чувствительных элементов ВОДД (в частности, от температурной нестабильности модуля Юнга материала мембран);

— погрешности от нестабильности ампер-ваттной характеристики источника оптического излучения;

— погрешности от нестабильности ватт-вольтной характеристики приемника оптического излучения;  
— погрешности от изменения светопропускания волоконно-оптического кабеля при его случайных изгибах.

Следует отметить, что исключение составляющих систематической погрешности измерения давления, обусловленных воздействием температуры на приемник излучения, достигается благодаря реализации метода избыточных измерений температуры. Отметим, что на результат измерения температуры и, следовательно, на результат измерения давления не влияют погрешность от нелинейности функции преобразования термодиода и погрешность от нестабильности его вольт-амперной характеристики.

### Выводы

Решена задача автоматической коррекции целого ряда составляющих систематической погрешности измерения давления, в том числе составляющих, обусловленных изменением геометрических и физических параметров чувствительного элемента волоконно-оптического датчика давления.

Установлено, что для получения точного значения давления требуется выполнить высокоточное измерение температуры окружающей среды, в которой находится приемник оптического излучения. Для этого в цифровой измеритель давления дополнительно введен канал измерения температуры (измерение выполняется в соответствии с методом избыточных измерений температуры) и введена температурная поправка в уравнение избыточных измерений давления.

Особенностью цифрового измерителя давления, реализующего метод избыточных измерений, явля-

ется использование информативно-избыточного датчика давления с тремя оптическими каналами, выполненными в виде подводяще-отводящих волоконных световодов. Такой волоконно-оптический датчик давления обеспечивает получение информативной избыточности — дополнительной информации о параметрах как самого датчика, так и других элементов канала измерения давления.

В целом все это позволяет получить результат измерения давления с погрешностью не хуже 0,1% в диапазоне измеряемых давлений 0—10,0 МПа.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кондратов В. Т. Теория избыточных измерений // Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.— 2005.— № 1.— С. 7—24.
2. Кондратов В. Т., Редько В. В. Цифровий вимірвач абсолютного тиску зі структурно-надлишковим волоконно-оптичним сенсором // Там же.— С. 25—33.
3. Кондратов В. Т., Редько В. В. Информативно-избыточный волоконно-оптический сенсор давления // Тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики и экономики». Кн. «Приборостроение».— Сочи.— 2006.— С. 91—104.
4. Кондратов В. Т., Редько В. В. Цифровой измеритель давления на базе информативно-избыточного волоконно-оптического датчика // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы автоматизации и управления в технических системах».— Пенза.— 2007.— С. 90—96.
5. Бадеева Е. А., Гориш А. В., Котов А. Н. и др. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом.— М.: МГУЛ, 2004.
6. Абидов М. А. Статические характеристики диодных структур.— М.: Радио и связь, 1989.

### ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



3-я Международная научно-техническая конференция  
**«СЕНСОРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА  
 И МИКРОСИСТЕМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**  
 (с выставкой разработок  
 и промышленных образцов сенсоров)  
 Украина, Одесса, 2—7 июня 2008 г.



#### Научные направления конференции:

- ✦ Физические, химические и другие явления, на основе которых могут быть созданы сенсоры.
- ✦ Проектирование и математическое моделирование сенсоров.
- ✦ Сенсоры физических величин.
- ✦ Химические сенсоры.
- ✦ Биосенсоры.
- ✦ Радиационные, оптические и оптоэлектронные сенсоры.
- ✦ Акустоэлектронные сенсоры.
- ✦ Наносенсоры (физика, материалы, технология).
- ✦ Сенсоры и информационные системы.
- ✦ Материалы для сенсоров.
- ✦ Технологические проблемы сенсорики.
- ✦ Микросистемные технологии (MST).
- ✦ Деградация, метрология и аттестация сенсоров.

#### Место проведения:

Одесский национальный университет  
 имени И. И. Мечникова.  
 г. Одесса, ул. Дворянская, 2

#### Реквизиты для связи:

Тел./Факс: 38 (048)-723-34-61,  
 Тел.: 38 (048)-726-63-56  
 E-mail: semst-3@onu.edu.ua,  
 ndl\_lepikh@onu.edu.ua  
 Лепих Ярослав Ильич