УДК 550.34 + 622.831

# ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ МИКРОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК С МИКРОПРОЦЕССОРОМ

© 2007 г. **А. К. Поташников**, канд. техн. наук; **И. В. Голубев**; **Р. В. Куликов**; **Е. В. Сысоев**; **Ю. В. Чугуй**, доктор техн. наук

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru

Представлены функционально законченный оптоэлектронный микрометрический позиционно-чувствительный датчик, результаты его испытаний и система сбора информации о деформациях в образцах горных пород и моделях блочных геосред при геомеханических экспериментах.

Коды OCIS: 060.4250, 230.0250.

*Поступила в редакцию 28.05.2007.*

## Введение

Изучение процессов деформации и разрушения требует проведения широкомасштабных лабораторных испытаний различных образцов и моделей объектов на стендовом оборудовании [1]. Условия стендовых экспериментов можно менять в широких пределах, что позволяет исследовать влияние вида напряженного состояния, скорости деформирования, а также изучать свойства и поведение пород и материалов при сложных нагружениях. Получаемый при этом объем измерительной информации необходимо обрабатывать как в ходе эксперимента, так и по его окончании. Для выполнения измерений на образцах и моделях различных объектов в КТИ НП СО РАН разработан опытный образец функционально законченного оптоэлектронного микрометрического позиционно-чувствительного датчика индикаторного типа с микропроцессорной обработкой сигналов и создана развиваемая система сбора данных, основанная на сетевых технологиях [2, 3].

## Принцип действия и конструкция микрометрического датчика МЭУ-25

Датчик положения создан на основе позиционно-чувствительного фотоприемника с зарядовой связью (ПЗС-линейки) и представляет собой функционально законченное интеллектуальное изделие. Общий вид датчика, габаритные и установочные размеры приведены на рис. 1а, а его функциональная схема на рис. 1б. В своем составе датчик имеет подвижный шток с закрепленным на нем источником света (светодиодом), ПЗС-линейку и контроллер КЛМ-1, обеспечивающий процесс измерения и передачи данных в компьютер.

Механическая конструкция датчика состоит из двух частей: корпуса и подвижного штока, имеющего возможность продольного перемещения по направляющей. Корпус датчика одновременно служит базовой направляющей для штока и обеспечивает размещение многофункционального контроллера КЛМ-1 и фотоприемника. Позиционно-чувствительный фотоприемник жестко закреплен в корпусе датчика.

В качестве регистрирующего устройства применен серийно изготавливаемый позиционно-чувстви-

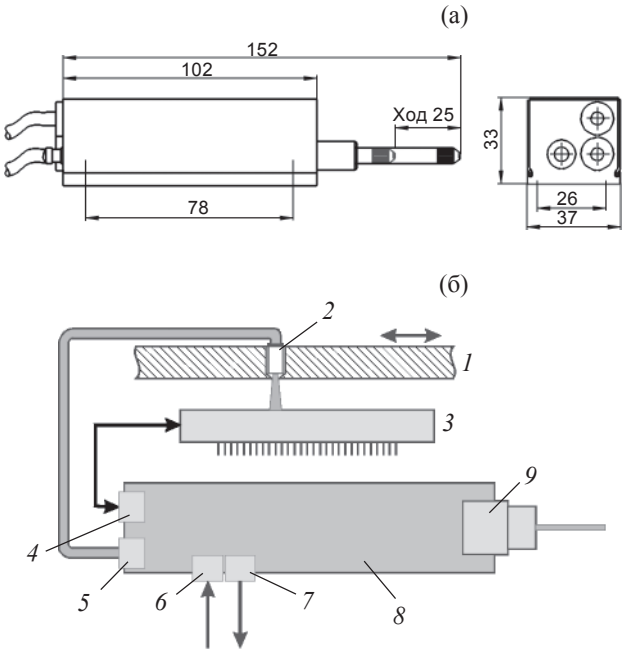



**Рис. 1.** Общий вид (а) и функциональная схема (б) датчика. *1* – подвижный шток, *2* – источник света, *3* – ПЗС-линейка, *4* – управление ПЗС-линейкой, *5* – управление источником света, *6* – вход синхронизации, *7* – выход синхронизации, *8* – контроллер КЛМ-1, *9* – выход USB.

тельный фотоприемник ILX511 фирмы “SONY”, который содержит 2048 фоточувствительных элементов, расположенных с шагом $d = 14$ мкм и образующих линейку фотоприемников длиной 28 мм. От изделий аналогичного функционального назначения ILX511 отличается низким уровнем электрических шумов и малым разбросом чувствительности между отдельными элементами, что позволяет обеспечить высокие метрологические характеристики измерительных устройств на их основе.

Принцип работы датчика основан на определении относительного положения ПЗС-линейки и источника света, закрепленного на подвижном штоке. Светодиод создает на поверхности ПЗС-линейки световое пятно, которое перекрывает несколько элементов и при перемещении штока движется вдоль ПЗС-линейки. Источник света подключен к управляемому источнику напряжения платы контроллера, с помощью которого осуществляется его регулирование для получения оптимального уровня сигнала фотоприемника. Сигнал с ПЗС-линейки оцифровывается процессором AD9816 и с помощью программируемой логики передается в сигнальный процессор ADSP 2185M. Цифровой сигнальный процессор проводит предварительную обработку сигнала и определяет положение светового пятна относительно элементов ПЗС-линейки, которое взаимно однозначно соответствует положению штока относительно базовой части корпуса датчика. Используя калибровочную таблицу, полученное значение в относительных единицах переводится в микрометры.

Положение пятна $x$ относительно начала (середины) ПЗС-линейки (начала координат) определяется после предварительной фильтрации с помощью алгоритма, основанного на анализе распределения плотности энергии в световом пятне. Положение штока датчика (текущая координата) вычисляется в соответствии с выражением

$$x = \sum_{k=0}^{k=N-1} kU_k \Big/ \sum_{k=0}^{k=N-1} U_k, \qquad (1)$$

где $k$ – номер элемента ПЗС-линейки, $U_k$ – значение цифрового сигнала $k$-го элемента, $N$ – число фоточувствительных элементов фотоприемника.

Результаты измерений сохраняются в буферной памяти сигнального процессора и могут передаваться в персональный компьютер через порт USB. Микроконтроллер КЛМ-1 осуществляет связь датчика с компьютером по интерфейсу USB 1.1 (universal serial bus), обеспечивая управление датчиком и передачу результатов измерений. В микроконтроллере КЛМ-1 предусмотрен режим синхронных измерений, позволяющий ввести единую шкалу времени при использовании нескольких датчиков в составе сложной измерительной системы. В этом случае несколько датчиков, объединенных в сеть, проводят измерения одновременно по сигналу синхронизации. Источником сигнала могут быть как внешнее устройство синхронизации, так и один из контроллеров (мастер).

Благодаря высокой частоте опроса ПЗС-линейки существует возможность усреднять измерительные данные по времени и тем самым снижать случайную составляющую погрешности. Усреднение, например, по 10 измерениям позволяет получить разрешение менее 0,3 мкм, при этом частота измерений снижается до 100 Гц.

### Функциональная схема контроллера

Многофункциональный контроллер выполнен на основе программируемой логики и трех микропроцессоров AD9816, CY7664613 и сигнального процессора ADSP 2185M. Он обеспечивает прием и формирование сигналов фотоприемника, их оцифровку и обработку по заданному алгоритму, анализ результатов обработки и генерирование команд. Функциональная схема контроллера КЛМ-1 показана на рис. 2а, а его общий вид на рис. 2б. Далее определено назначение основных элементов КЛМ-1.

- ПЗС-процессор AD 9612JS обеспечивает управление режимом работы линейки и преобразование аналогового сигнала фотоприемника в цифровую форму.
- Программируемая логика контроллера служит для преобразования выходных параллельных данных ПЗС-процессора в последовательные входные данные цифрового сигнального процессора. Кроме этого, с ее помощью выполняется преобразование формата данных микроконтроллера USB в формат данных цифрового сигнального процессора.
- Цифровой сигнальный процессор ADSP2185M реализует обработку по заданному алгоритму данных, поступающих из процессора AD 9612JS, анализ результатов обработки и определяет положение светового пятна на ПЗС-линейке.
- Микроконтроллер Cypress CY7664613-80NC является контроллером USB и отвечает за обмен данными между цифровым сигнальным процессором и компьютером через порт USB.

Кроме этого, контроллер КЛМ-1 содержит элементы управления входом и выходом цифрового канала синхронизации, с помощью которого осуществляется синхронный запуск измерения, и управляемый источник напряжения, к которому подключен источник света, формирующий световое пятно на элементах ПЗС-линейки.

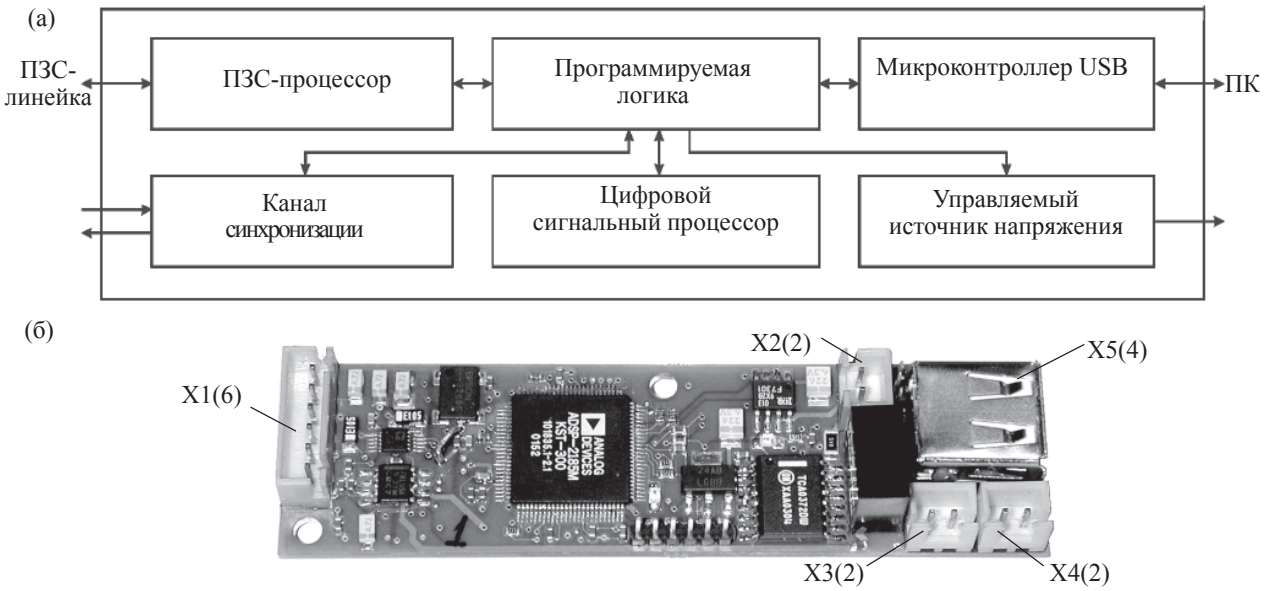



**Рис. 2.** Функциональная схема (а) и общий вид (б) контроллера КЛМ-1. X1(6) – разъем подключения ПЗС-линейки, X2(2) – разъем подключения источника света, X3(2) – вход синхронизации, X4(2) – выход синхронизации, X5(4) – USB-разъем.

## Программное обеспечение

Программное обеспечение (ПО) контроллера КЛМ-1 поддерживает его работу в двух режимах – автономном и управляемом с персонального компьютера (ПК).

ПО верхнего уровня позволяет сохранять данные в памяти ПК, отображать результаты измерения на экране монитора, записывать (изменять) в ПЗУ контроллера алгоритм обработки сигнала фотоприемника и условия формирования прерываний. ПО нижнего уровня реализует обработку сигналов фотоприемника микропроцессорами.

Алгоритм обработки входного сигнала состоит из нескольких этапов и выполняется на двух микропроцессорах – ADSP и Cypress. В ADSP реализованы регистрация исходных данных, предварительная буферизация, фильтрация входного сигнала и анализ результатов измерения.

Микропроцессор Cypress обеспечивает управление контроллером от персонального компьютера, передачу накопленных данных в ПК и формирование прерываний.

## Технические и метрологические характеристики датчика

Погрешность измерения перемещения с помощью датчика определяется выражением

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3,$$

где $\Delta l_1$ – погрешность, вызванная неидеальностью механической системы перемещения источника света, $\Delta l_2$ – погрешность дискретизации, $\Delta l_3$ – погрешность, вызванная шумами. Из них принципиально неустранимыми являются составляющие $\Delta l_2$ и $\Delta l_3$, но их величина может быть существенно уменьшена методами обработки. Составляющую $\Delta l_1$ можно устранить (или свести к минимуму) с помощью калибровки, которая должна выполняться как первоначально на этапе метрологической аттестации, так и периодически по мере износа направляющей и штока.

Для оценки погрешности измерения датчика был проведен ряд экспериментов на метрологическом стенде, измерительная схема которого показана на рис. 3. Разработанный датчик (микрометр МЭУ 25) был установлен на неподвижном столе, шток датчика упирался в подвижную часть столика с микрометрической подвижкой. При смещении столика на

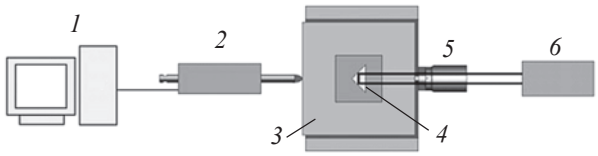



**Рис. 3.** Измерительная схема метрологического стенда для определения погрешности микрометрического позиционно-чувствительного датчика. *1* – компьютер, *2* – микрометрический датчик, *3* – прецизионный столик с микрометрической подвижкой, *4* – уголковый отражатель, *5* – микрометрический винт, *6* – лазерный измеритель перемещений.

заданную величину смещался шток микрометра. Смещение штока, измеренное датчиком, и перемещение столика фиксировались. Контроль перемещения подвижной части столика осуществлялся с помощью интерферометра ИПЛ-МПЗ, имеющего разрешение 0,1 мкм. Диапазон измерений перемещений составлял 25 мм.

Проверка повторяемости получаемых результатов осуществлялась путем проведения серии измерений, результаты которых в графическом виде приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что измеренное значение нелинейности перемещения штока составляет ± 3 мкм, а разброс в серии измерений - менее 1 мкм. Таким образом, учет усредненных характеристик повторяемости в качестве калибровочной кривой позволяет уменьшить погрешность измерения до ± 1 мкм.

Прочие технические характеристики датчика приведены ниже:

– интерфейс USB 1.1,

– темп измерений до 1000 в секунду,

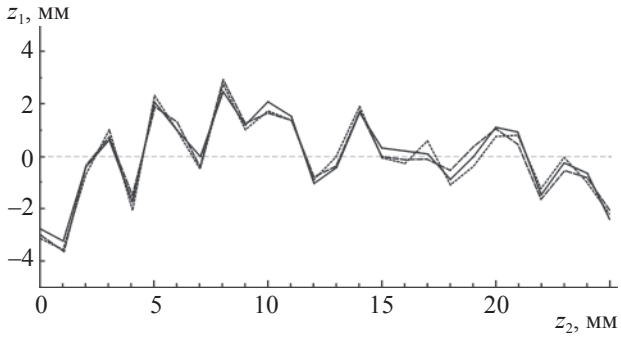



**Рис. 4.** Графики погрешности микрометрического датчика.

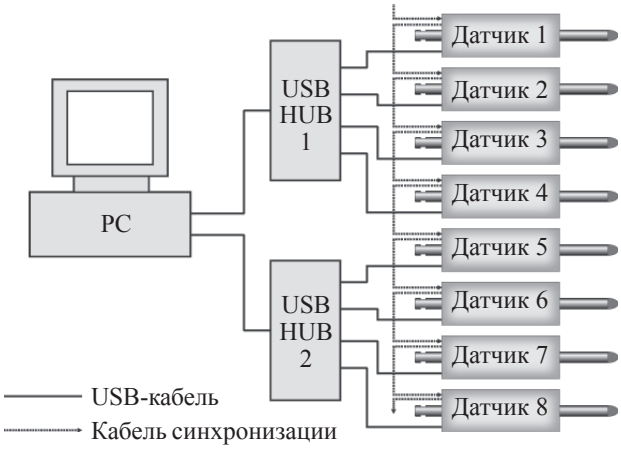



**Рис. 5.** Функциональная схема многоканальной системы измерений перемещений и деформаций.

– питание + 5 В через USB,

– режим синхронной работы нескольких датчиков,

– размеры: 102 (с учетом штока 152)×33×36 мм.

На основе датчиков МЭУ-25 и сетевых технологий создана 8-канальная система регистрации перемещений, предназначенная для измерения деформаций в образцах породы при экспериментах на стендовом оборудовании. В состав системы (рис. 5) входит восемь функционально законченных датчиков положения, объединенных в измерительную группу с помощью коммутаторов. В случае необходимости количество датчиков может наращиваться до 256. Режим измерений в реальном времени обеспечен архитектурой системы, в частности, наличием каналов синхронизации датчиков.

При создании аппаратуры учитывалось получение больших объемов измерительных данных, требующих значительных затрат времени на их обработку как в процессе, так и по окончании эксперимента. Для повышения достоверности информации, оперативности ее получения и представления в форме, удобной для визуального контроля и анализа, разработана автоматизированная система сбора и обработки данных, которая одновременно позволяет решать задачи управления экспериментом в реальном времени.

## Заключение

1. Создан функционально законченный интеллектуальный позиционно-чувствительный датчик микрометрического типа на основе линейки фоточувствительных элементов.

2. Проведены испытания микрометрического датчика с целью определения его точностных характеристик. Показано, что его погрешность не превышает 3 мкм, а с учетом калибровочной характеристики, полученной на основе усредненных кривых повторяемости, погрешность датчика может быть снижена до ± 1 мкм.

3. Разработанные датчики легко объединяются в сеть, что позволяет быстро создавать многоканальные измерительные системы контроля процессов деформации, подвижек, геометрических характеристик различных объектов.

*ЛИТЕРАТУРА*

1. *Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И.* Волны маятникового типа. Часть I: Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1996. № 3. С. 3–8.

2. *Опарин В.Н., Чугуй Ю.В. Жигалкин В.М., Поташников А.К., Юшкин В.Ф., Сысоев Е.В., Степнов Л.М., Куликов Р.В., Голубев И.В.* Устройства непрерывного

контроля параметров деформационно-волновых процессов в массивах горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 4. С. 108–117.

3. *Chugui Yu.V., Plotnikov S.V., Potashnikov A.K., Verkhogliad A.G.* Novel optical measuring systems and laser technologies for science and industry // Proc. SPIE. 2006. V. 6280. Part 1. P. 628003–1–628003–10.