

## УСТАНОВКА ДЛЯ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

*К.А. Герман, Б.В. Боровский*

Рассматривается задача создания системы высокоточного измерения и регистрации деформаций при нагружении горных пород.

*Ключевые слова:* разрушение; экспериментальная установка.

Лабораторное физическое моделирование является неотъемлемой частью исследований процессов, происходящих в глубинах земной коры. В силу подобия деформационных процессов на разных масштабных уровнях, в лабораторных условиях можно создать модель поведения геологической среды, основываясь на результатах экспериментов, проводимых на образцах горных пород. Сжатие образца позволяет воспроизвести условия, в которых горные породы находятся в глубинах земной коры.

Для численного анализа процесса, происходящего в горной породе, используются различные методы – тензометрия, пьезодатчики, статическое и динамическое зондирование, ультразвуковые и звуковые *методы и т.д.* Однако указанные методы либо не позволяют производить измерения в полевых условиях, либо требуют достаточно большого количества измерительной и регистрирующей аппаратуры.

В рамках предлагаемого подхода открывается возможность упростить проведение натуральных испытаний и по существу сформировать систему измерения деформаций и нагрузки, которая

будет максимально отражать все особенности деформирования горных пород.

Компонентами разрабатываемой системы являются:

- индуктивные датчики линейного смещения LVDT ;
- блок преобразования и усиления сигналов датчиков LVDT (6-канальная тензостанция);
- регистратор аналоговых сигналов ЛА-И24USB, осуществляющий взаимодействие блока преобразования и усиления с персональным компьютером через USB порт;
- персональный компьютер с соответствующим программным обеспечением.

Испытания проводили с использованием рычажного пресса, обеспечивающего нагрузку до 35 т и бесшумные условия проведения эксперимента. В качестве датчиков, регистрирующих деформацию (продольную и поперечную) и нагрузку, применяли линейные дифференциальные трансформаторы LVDT, **предназначенные** для измерения линейных перемещений. Действие таких датчиков основано на явлении электромагнитной индукции. Были использо-



Рис.1. Испытательная машина.

ваны датчики LVDT фирмы Lucas Shaevitz двух типов – MHR 010 и MHR 050, обладающих диапазонами регистрируемых линейных перемещений –  $\pm 0,10'' \approx \pm 2,54$  мм и  $\pm 0,05'' \approx \pm 1,27$  мм соответственно [1, 2]. Такой набор аппаратуры для регистрации деформаций и нагрузок, однако, не обеспечивал требуемой точности и стабильности измерений.

Поэтому возникла необходимость разработки новой системы преобразования, усиления и регистрации сигналов, получаемых с датчиков деформации и нагрузки. Величина нагрузки при этом определялась косвенным образом с использованием специальной конструкции, размещаемой в нижней опоре испытательной установки. Принцип её работы основан на измерении прогиба жесткой упругой мембраны, возникающего под действием приложенной механической силы.

Исследуемый образец был помещен между мембраной динамометра и верхней опорой. Индуктивная катушка датчика располагалась в нижней опоре испытательной конструкции. Сердечник датчика был жестко связан с мембраной. Когда мембрана прогибалась под действием нагрузки, изменялось положение сердечника внутри датчика. Соответственно изменялось

дифференциальное электрическое напряжение, снимаемое с вторичных обмоток индуктивного трансформатора датчика. Деформация определялась непосредственно величиной смещения сердечника внутри датчика. Измерения продольной деформации осуществлял датчик, расположенный между верхним и нижним пуансонами установки. Для получения данных поперечных деформаций было изготовлено специальное приспособление, охватывающее образец по всему периметру так, что при его деформации сердечники в датчиках могли смещаться. Определение параметров отдельных узлов осуществлялось по шести каналам блоками преобразования, каждый из которых идентичен по своей структуре. Структура одного из этих каналов представлена на рис. 2.

Первичная обмотка датчика возбуждается переменным напряжением синусоидальной формы с частотой 25 кГц и амплитудой 3 В, вырабатываемым схемой преобразования. Частота возбуждения первичной обмотки определяет время, задающееся резистором и конденсатором. На выводах вторичной обмотки возникает индуцированное напряжение, амплитуда которого зависит от расположения магнитного сердечника

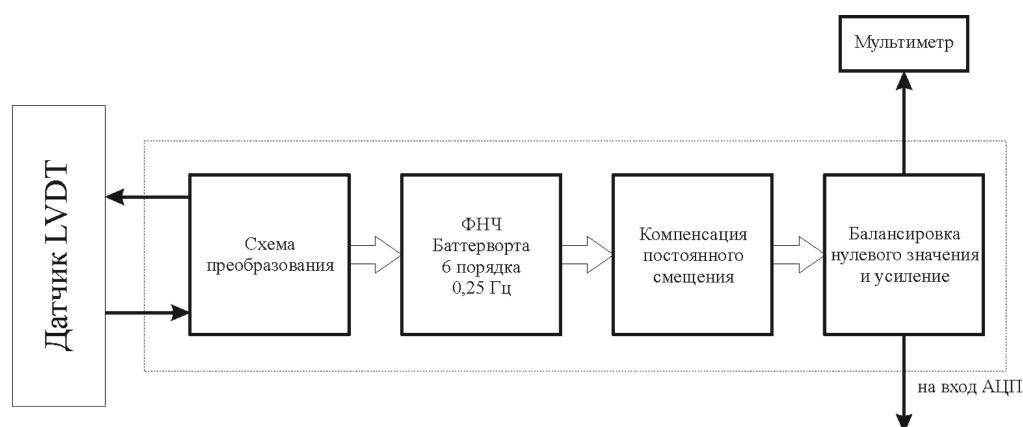


Рис. 2. Структура измерительного канала блока преобразования и усиления сигналов датчиков LVDT.

внутри обмоток. Это напряжение подается на схему преобразования, где посредством специальной микросхемы [3] происходит его демодуляция (двухполупериодное выпрямление). Выпрямленное напряжение поступает на следующий узел схемы, представленный ФНЧ Баттерворта 6-го порядка с частотой среза 0,25 Гц, созданный по схеме МОС [4, 5]. Частота среза выбрана согласно теореме Котельникова из расчета того, что частота дискретизации составляет 1 Гц.

Так как сигнал на выходе микросхемы преобразования имеет постоянное смещение +5В (половина опорного напряжения), то необходимо это напряжение смещения компенсировать. После фильтра сигнал инвертируется, и смещение становится равным (-5В). Для компенсации -5В после фильтрации сигнал поступает на вход сумматора, где складывается с постоянным стабильным напряжением, поступающим от источника стабильного напряжения.

Если сердечник датчика находится в центре катушки, то выходное напряжение равно нулю. Соответственно, напряжение на выходе изменяется в обе стороны от нуля в зависимости от смещения датчика относительно центра. Для удобства измерения диапазон выходных напряжений смещается на половину шкалы, чтобы крайнее положение сердечника соответствовало нулевому значению напряжения на выходе. В системе предусмотрена балансировка нуля для каждого из каналов, так как сердечник может быть несколько смещен относительно края катушки. Выходной каскад представлен микросхемой AD845JN для согласования с низкоомной нагрузкой, кроме того, данный каскад выполняет функцию усилителя с коэффициентами усиления

22 и 1,95 раза для измерения нагрузки и деформации соответственно. Каждый из каналов имеет один выход для соединения с системой регистрации и второй выход для визуального контроля с помощью мультиметра. Для визуального контроля на передней панели установлен переключатель, позволяющий выбрать нужный канал для контроля.

Блок преобразования и усиления входит в систему регистрации тензометрических параметров исследуемых образцов горных пород (рис. 3). Блок преобразования и усиления имеет следующие технические параметры:

Количество измерительных каналов 6

1. Полоса пропускания изм. каналов по уровню минус 3 дБ, Гц 0,25
2. Диапазон выходных напряжений, В  $\pm 2,5$
3. Диапазон измеряемых деформаций, мкм  $0 \div 2000$
4. Диапазон измеряемых усилий сжатия, т  $0 \div 60$
5. Коэффициент преобразования усилия сжатия (датчик MHR050), мВ/т 64,64
6. Коэффициент преобразования деформации (датчик MHR050), мВ/мкм 0,5034
7. Коэффициент преобразования деформации (датчик MHR010), мВ/мкм 0,9469
8. Напряжение питания от источника стабилизированного напряжения, В  $\pm 12$
9. Максимальный ток потребления (+12В), А 0,4
10. Максимальный ток потребления (-12В), А 0,3

Как показано на рисунке, преобразованный и усиленный сигнал поступает на АЦП регистратора ЛА-И24USB, откуда оцифрованные значения напряжения передаются на компьютер для обработки с помощью специального про-

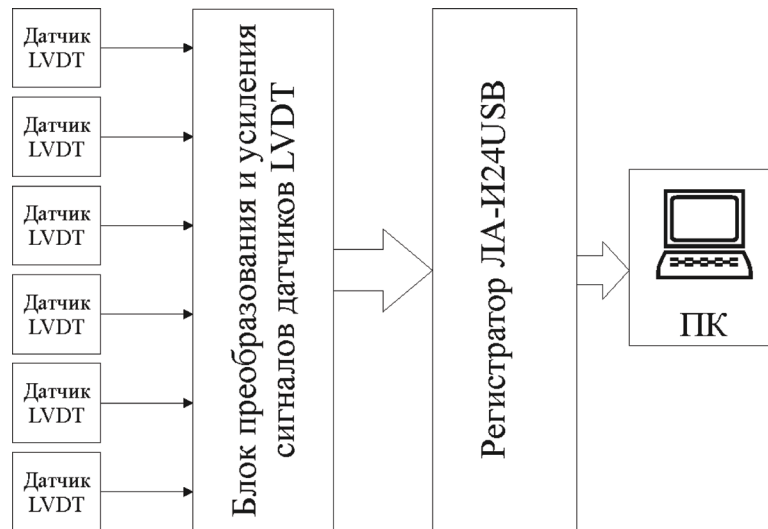


Рис. 3. Структурная схема регистрации тензометрических параметров образцов горных пород.

граммного обеспечения, поставляемого в комплекте с регистратором ЛА-И24USB.

Назначение внешнего устройства с USB портом ЛА-И24USB:

Построение переносных прецизионных измерительных систем на базе компьютера.

Пониженное энергопотребление и малые габариты в совокупности с высоким разрешением позволяют решать большинство задач мониторинга, контроля и диагностики. Данное устройство можно подсоединить к порту USB любого компьютера: Notebook, Portable, промышленного или обычного офисного, не открывая крышку корпуса и не думая об источнике питания.

Отличительные особенности внешнего устройства с USB портом ЛА-И24USB:

- АЦП 24 бит дельта-сигма типа.
- Синхронные каналы.
- Групповая гальваническая развязка каналов.
- Автоматическая калибровка 4-х синхронных каналов.
- Режим внешнего старта по каждому из 4-х АЦП.
- Легкость подключения к компьютеру.

Технические характеристики внешнего устройства с USB портом ЛА-И24USB

- Аналоговый вход.
- Количество аналоговых каналов 4 синхронных дифференциальных или 8 дифференциальных с мультиплексированием.
- Входной ток не более 500нА (при усилении = 1), не более 500пА (при усилении >1).

- Защита по напряжению  $\pm 3,3В$ .
- Тип АЦП Дельта-сигма.
- Количество бит в выходном регистре АЦП 24.
- Диапазон частот выборок 6,25...800 Гц.
- Время преобразования 1,25...160 мс.
- Коэффициенты усиления (на канал) 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64.
- Диапазоны входного сигнала  $\pm 2,5 В... \pm 39 мВ$ .
- Гальваническая развязка 200 В.
- Цифровой порт.
- Количество линий: 8 вывода и 8 ввода (с защёлкой).
- Общие характеристики.
- Шина интерфейса с ПЭВМ USB 2.0.
- Потребляемая мощность +5В – 500 мА.
- Габариты 140×115×35 мм.

При разработке предлагаемого блока было необходимо определить коэффициенты преобразования каналов для регистрации деформаций и нагрузок. Для определения коэффициентов преобразования (мВ/мкм и мВ/т) были проведены испытания разработанной системы совместно с используемыми датчиками MHR050 и MHR010. Коэффициент преобразования для датчика деформаций определялся непосредственно измерением выходного напряжения в зависимости от смещения сердечника внутри катушки. Для датчика, с помощью которого предполагалось определять нагрузку, указанный коэффициент определялся сопоставлением показаний манометра и вольтметра. Калибровка динамометра



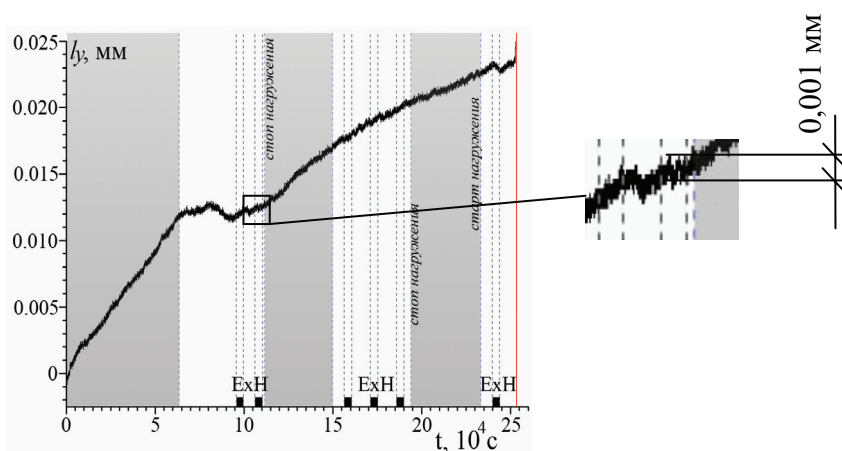


Рис. 4. Флуктуация данных.

проводилась на прессе УДИ в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред. Таким образом, были получены линейные зависимости со следующими коэффициенты преобразования: для датчиков MHR050:  $k=0,5034$  мВ/мкм, для MHR010:  $k=0,9469$  мВ/мкм, коэффициент преобразования напряжение/нагрузка определялся для датчика MHR050 (показания регистрировались цифровым мультиметром и системой регистрации SMART):  $k=64,64$  мВ/т. Была установлена точность измерений перемещений – 0,5 мкм (рис 4).

С помощью регистратора ЛА-И24USB данные в двоичном формате записывались в ОЗУ компьютера непрерывно в заданном промежутке времени. В тестовых экспериментах были опробованы периоды до 2 суток непрерывной записи. Стабильность питания обеспечивалась тем, что регистратор был подключен к энергонезависимому ноутбуку, что позволяло подстраховаться на случай выключения или сбоя в подаче электроэнергии. В любой момент установленного периода записи имеется возможность сохранения данных за уже отписанный промежуток времени.

В результате проведенных работ была сформирована система прецизионного измерения деформаций при нагружении и макроразрушении модельных образцов. Тестирование системы показало, что она полностью удовлетворяет задачам экспериментов.

#### Литература

1. Ramon Pallas-Areny, John G. Webster, Sensors and Signal Conditioning. John Wiley. New-York, 1991.
2. Dr. Ernest D. D. Schmidt. Linear Displacement – Linear Variable Differential Transformers – LVDTs. Schaevitz sensors.
3. Zahid Rahim. Using the NE5521 signal conditioner in multi-facetad applications, Philips semi-conductors, 1988.
4. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1988.