

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.234.573 + 681.5.08

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОРАЗРЫВА

С. В. Сердюков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: ss3032@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассматривается измерительно-регистрирующая аппаратура для лабораторных исследований гидроразрыва в условиях, имитирующих горное давление. Дано обоснование выбора наблюдаемых величин, частот дискретизации, периодичности наблюдений. Приведены блок-диаграммы программного кода в среде LabView, обеспечивающего синхронный сбор многоточечных замеров деформации, давления разрыва, акустической и сейсмической эмиссий, расхода рабочей жидкости и др. Даны рекомендации по выбору оборудования, датчиков, использованию разработки при создании измерительных комплексов и средств мониторинга геодинамических процессов.

Геомеханика, гидроразрыв, лабораторные исследования, оборудование, измерительная аппаратура на платформе LabView, сбор данных, деформация, давление разрыва, сейсмическая и акустическая эмиссии

DOI: 10.15372/FTPRPI202206019

Основная задача физического моделирования в геомеханике — изучение реакции напряженно-деформированного состояния среды на контролируемое воздействие. В состав наблюдаемых явлений могут дополнительно входить фильтрация флюидов, распределение температуры и порового давления, сейсмическая, акустическая и электромагнитная эмиссии, распространение и поглощение упругих колебаний и многое другое. Одни из них относятся к медленно протекающим процессам (тепловые, фильтрационные), другие — к быстрым (волновые), третьи — также к быстрым, но контроль над ними осуществляется с использованием интегральных характеристик (эмиссионные процессы). Это приводит к различиям в требованиях к частотам дискретизации измеряемых параметров, что значительно усложняет структуру регистрирующей аппаратуры.

Моделирование слабо изученных процессов, особенно однократных с разрушением материала, целесообразно проводить с некоторой избыточностью чувствительности, частотного и динамического диапазонов измерительных каналов. В противном случае увеличивается риск

невосполнимой потери полезной информации. В ходе экспериментов требования к регистрирующей аппаратуре могут уточняться, нередко возникает необходимость ее адаптации к новому уровню понимания исследуемых задач. Меняется система наблюдений, набор контролируемых физических величин, количество каналов и т. д. Данные изменения возможны, если измерительная аппаратура обладает открытой архитектурой.

Одно из мощных средств построения аппаратно-программных комплексов с требуемыми свойствами — программная платформа LabView (NI, США), аккумулирующая в себе большое число схематических решений, алгоритмов обмена данными между устройствами, обработки и анализа замеров [1]. В ее основе лежит графический язык программирования с поддержкой выполнения кода в режиме потока данных с наглядной демонстрацией последовательности операций. Это удобно для экспериментаторов, использующих при моделировании процессов блок-схемы и диаграммы состояний.

В настоящей статье рассмотрен опыт создания измерительной аппаратуры на платформе LabView для лабораторного изучения гидроразрыва в условиях, имитирующих натурные [2]. Приводятся структура, комплектующее оборудование, блок-диаграммы и описания программного кода, достаточные для тиражирования разработки сторонними исследователями, использования отдельных решений при создании измерительных комплексов различного назначения.

СТРУКТУРА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Первый шаг разработки измерительно-регистрирующей аппаратуры — привязка проекта к изучаемым физическим процессам, в том числе выбор наблюдаемых величин, оценка диапазонов их амплитудных значений и частот. Такая необходимость возникает при подборе датчиков, преобразующих результаты наблюдений в выходные электрические сигналы, определении частот дискретизации в цифровой форме предоставления информации, обосновании периодичности наблюдений.

Контроль гидроразрыва включает обязательные замеры расхода рабочей жидкости и ее давления. С началом разрушения среды закачку, как правило, прекращают, ограничивая размеры образующейся трещины и препятствуя ее выходу на поверхность модели. В этом случае регистрация расхода необходима до начала разрыва — во время нагнетания жидкости, осуществляемого обычно в квазистатическом режиме, например с помощью ручного гидравлического пресса. Напротив, давление рабочей жидкости фиксируется и в ходе распространения трещины, когда оно быстро падает. Длительность спада определяется разницей давлений разрыва P_C и запираания P_S трещины, скоростью ее развития, упругим объемом (жесткостью) гидросистемы. В экспериментах, имитирующих натурные условия подземной разработки твердых полезных ископаемых, разница $P_C - P_S$ достигает 10–15 МПа, редко больше. Превышение верхнего предела может иметь место в монолитных материалах, таких как оргстекло, которые иногда используют для визуального наблюдения трещинообразования. Данным материалам свойственны значительное сопротивление разрыву и более высокие скорости распространения трещин, чем в породах, состоящих из разделенных между собой минеральных зерен и пустот [3].

Известно, что динамика разрушения зависит от характера и интенсивности иницирующего воздействия. К примеру, при статическом нагружении оргстекла формируются медленные трещины со скоростью развития V_F менее 1 см/с [4–6], а при ударном воздействии на гранит бойком,двигающимся со скоростью ~ 1 м/с, — на три порядка быстрее ($V_F \sim 11$ м/с) [3].

Динамика трещин гидроразрыва изучена мало. Чтобы ее оценить, выполнены несколько циклов разрушения цементного куба с ребром 420 мм. Расстояние от инициатора разрыва до внешней поверхности модели около 200 мм, сжатие материала 3.2–5.1 МПа. На рис. 1 показан график изменения давления рабочей жидкости во времени $P(t)$. Верхний предел шкалы измерений 25 МПа, время отклика датчика менее 5 мс [7], частота дискретизации f_d сигналов 1 кГц.

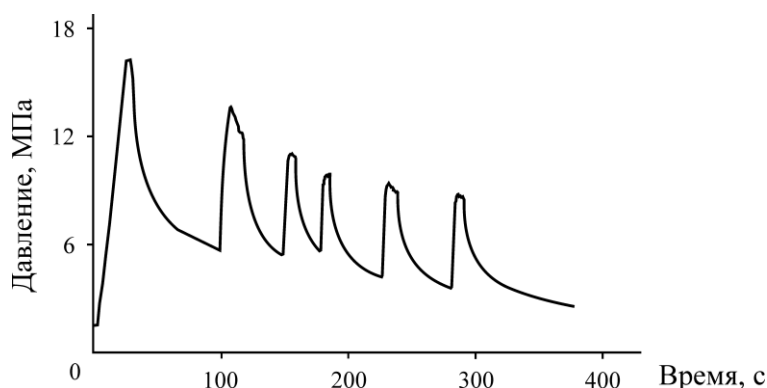


Рис. 1. Изменение давления рабочей жидкости в процессе гидроразрыва цементного блока в условиях, имитирующих горное давление

В процессе образования трещины происходит ее быстрое заполнение жидкостью за счет упругого объема, накопленного в нагнетательной гидросистеме. Максимальная скорость потока V_L оценивается по формуле для струи, истекающей через малое отверстие из сосуда под давлением $V_L = \sqrt{2P_C / \rho}$, ρ — плотность жидкости. Для $P_C = 10$ МПа и воды получаем $V_L \sim 140$ м/с — много больше приведенных значений V_F в оргстекле и граните. В первом приближении можно считать, что трещина полностью заполнена жидкостью. Тогда участок резкого падения давления в гидросистеме соответствует периоду роста трещины. Последующий более плавный спад обусловлен другими факторами, в частности утечками рабочей жидкости в окружающий материал и через поверхность модели. По результатам анализа скорости снижения давления dP/dt установлено, что длительность развития трещины в первых двух циклах гидроразрыва составила 2.0–2.2 с, в третьем-четвертом — ~ 1.6 с и в пятом-шестом циклах — ~ 1 с (рис. 1). Уменьшение значения dP/dt от цикла к циклу происходит из-за увеличения размеров трещины, снижения P_C и упругого объема гидросистемы. В каждом последующем цикле приращение размеров разрыва уменьшается и так вплоть до выхода на поверхность модели в конце эксперимента. С учетом того, что к этому моменту трещина в своем развитии проходит 20 см, ее скорость оценивается в 2.1–2.2 см/с. Это значение выше, чем при гидростатическом нагружении оргстекла, что может быть связано с импульсным характером воздействия со стороны гидросистемы. По всей видимости, это имеет значение, несмотря на малый объем (массу) впрыска жидкости и, соответственно, низкую кинетическую энергию импульса.

При инициировании разрыва высоким давлением, значительно большим, чем P_C , скорость развития трещины должна заметно возрасти. Об этом свидетельствуют данные по разрушению горных пород ударом бойка, увеличение скорости движения которого с 350 до 1200 м/с поднимает V_F в 2.0–3.4 раза [8]. Если предположить аналогичное изменение V_L , то при разрыве в импульсном режиме давлением 100 МПа скорость развития трещины гидроразрыва в том же

материале, что и в эксперименте, может возрасти до 4.2–7.5 см/с, а в более монолитных средах — еще в 1.4–1.5 раза [8, 9], приблизительно до 10 см/с. При таких скоростях продолжительность трещинообразования в рассматриваемой модели уменьшится до 125–250 мс, а при повышении жесткости гидравлической системы будет еще ниже. Для детальной регистрации лабораторных гидроразрывов понадобится частота наблюдений f_m 0.4–0.8 кГц. В аппаратуре, представленной в настоящей работе, ее значение доведено до 1 кГц. Этого достаточно, чтобы замеры, выполненные в промежутке времени 1 мс, считать одномоментными.

Часть контролируемых физических величин меняется медленно, причем требуемый динамический диапазон измерения их значений (FS) не превышает 40–60 дБ. Они могут быть преобразованы в электрическое напряжение U , ток I или сопротивление R аналоговыми датчиками с верхней частотой полосы пропускания 100–500 Гц. К таким величинам относятся расход рабочей жидкости, давления в линиях гидросистемы трехосного нагружения модели, температура, сейсмическая эмиссия. Частоту дискретизации выходных сигналов датчиков целесообразно приравнять к частоте наблюдений. Это упрощает структуру измерительной аппаратуры, в минимальный набор устройств которой входят генератор импульсов синхронизации (СИ) частотой $f_m = 1$ кГц, многоканальный среднескоростной аналого-цифровой преобразователь (АЦП), блок устройств согласования (СУ) с выходными сигналами напряжения, тока, мостовых тензометрических датчиков и терморезисторов.

Вторую группу контролируемых величин составляют деформации и времена распространения ультразвуковых колебаний. Скорость продольных волн в модельных материалах достигает 3500–5000 м/с. Минимальное время прямого пробега из центра кубической модели с ребром 42 см до внешней поверхности составляет 40–60 мкс. Чтобы его измерить с относительной погрешностью 0.1 %, необходимо генерировать последовательность тактовых импульсов с частотой не менее 17 МГц. Искомый параметр будет пропорционален количеству таких импульсов за время пробега. Показания таймера накапливаются в буфере и, как другие наблюдаемые физические величины, считываются в регистратор с периодичностью в 1 мс. Техническим средством реализации процедуры служит счетчик импульсов, подключаемый к компьютеру управления сбором данных КОМ 1 через аппаратную шину. Помимо него требуются ультразвуковой излучатель, не менее одного акустического приемника с усилителем заряда и компараторы, управляющие пуском и остановкой таймера. Эти же счетчики, дооснащенные квадратурным декодером, используются и для преобразования выходных данных инкрементальных датчиков перемещения и угла поворота (энкодеров). Оптические энкодеры, применяемые в лабораторных стендах, обеспечивают высокоточные измерения линейных и угловых деформаций с дискретностью соответственно 0.1 мкм и 0.01° при скоростях перемещения до 1 м/с, вращения до 200 об./с и более. Менее чувствительный датчик того же типа может контролировать объем закачки рабочей жидкости гидравлическим прессом, что уменьшает разнообразие измерительных каналов, упрощает структуру аппаратуры.

В третью группу наблюдаемых явлений входит высокочастотная акустическая эмиссия (АЭ). Современные методы ее цифровой обработки, реализованные в пакете “Sound and Vibration” платформы LabView, предусматривают дискретизацию сигналов с частотой много большей выбранного значения $f_m = 1$ кГц. В рассматриваемой аппаратуре используются пассивные пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии, выходной сигнал которых поступает в быстродействующий АЦП через усилитель заряда (УЗ). Обработка полученных цифровых данных осуществляется в отдельном компьютере КОМ 2, выступающем в роли сопроцессора остальной части измерительного комплекса. В результате получают низкочастотные интегральные параметры акустической эмиссии, которые преобразуются обратно в аналоговую форму и вместе

с другими медленными сигналами подаются на входы многоканального среднескоростного аналого-цифрового преобразователя. Исходные цифровые формы высокочастотных сигналов остаются в памяти сопроцессора и используются для последующей обработки и анализа траектории развития трещины гидроразрыва методом акустической томографии. Это возможно при многоточечной системе акустических наблюдений.

Структура измерительной аппаратуры, объединяющая все три группы наблюдений, приведена на рис. 2.

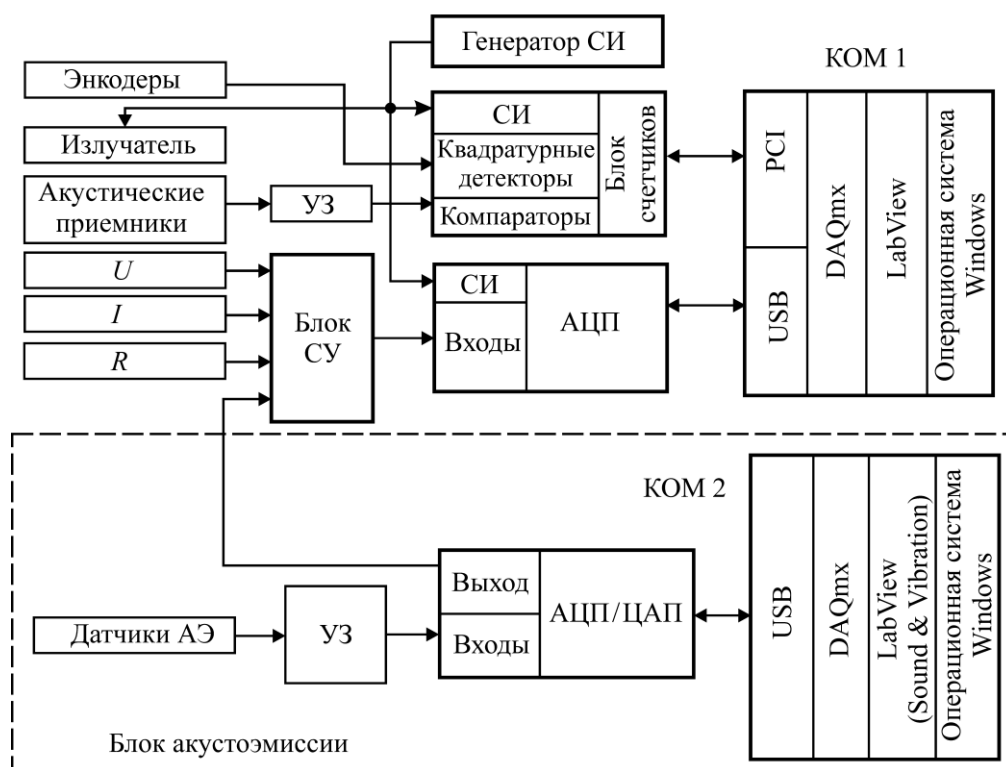


Рис. 2. Блок-схема измерительной аппаратуры для лабораторных исследований гидроразрыва: КОМ 1 — компьютер управления сбором данных; КОМ 2 — компьютер обработки сигналов акустической эмиссии

ОБОРУДОВАНИЕ

При комплектации аппаратуры предпочтение отдано оборудованию компании National Instruments (США), совместимому с 32-разрядной операционной системой Windows. Оно отвечает техническим требованиям лабораторных исследований гидроразрыва, поддерживается драйвером управления измерительной системы DAQmx платформы LabView и доступно по цене (на вторичном рынке).

Измерительные счетчики и генератор импульсов синхронизации реализованы на основе модуля NI PCI-6602, предназначенного для подсчета событий, измерения периодов времени, длительности и частоты импульсов, генерации их последовательности, выполнения замеров энкодерами. Модуль (плата) установлен в слот аппаратной шины PCI компьютера КОМ1 (рис. 2) и содержит восемь 32-разрядных счетчиков/таймеров, тактовый генератор с частотой до 80 МГц, буферную память, квадратурные детекторы. Может одновременно выполнять до трех быстрых передач в память компьютера, минуя центральный процессор (режим DMA). Для подключения датчиков служит клеммная коробка SCB-68, соединенная с платой кабелем SH68-68.

Согласование и коммутация сигналов аналоговых датчиков выполнены в системе SCXI, используемой как внешний интерфейс для ввода – вывода сигналов и модульных приборов. В разработанной аппаратуре используется шасси SCXI-1000, в которое установлены модуль 16-битного USB устройства ввода – вывода (АЦП) SCXI-1600 с частотой преобразования $2 \cdot 10^5$ выборок/с и согласующие устройства. В их состав входят один-два четырехканальных инструментальных усилителя SCXI-1121 и восьмиканальный модуль программируемых 8-полюсных фильтров нижних частот Баттерворта SCXI-1143 со 100-кратным усилением входных сигналов. Подключение датчиков к модульным приборам осуществляется через съемные терминальные блоки, что обеспечивает простоту модернизации аппаратуры. В базовой комплектации один из инструментальных усилителей оснащен терминальным блоком SCXI-1338 (задействованы нечетные входы) для подключения датчиков с выходным интерфейсом токовая петля, остальные согласующие устройства — терминальными блоками SCXI-1304/5 для работы с датчиками-источниками электрического напряжения (рис. 3).

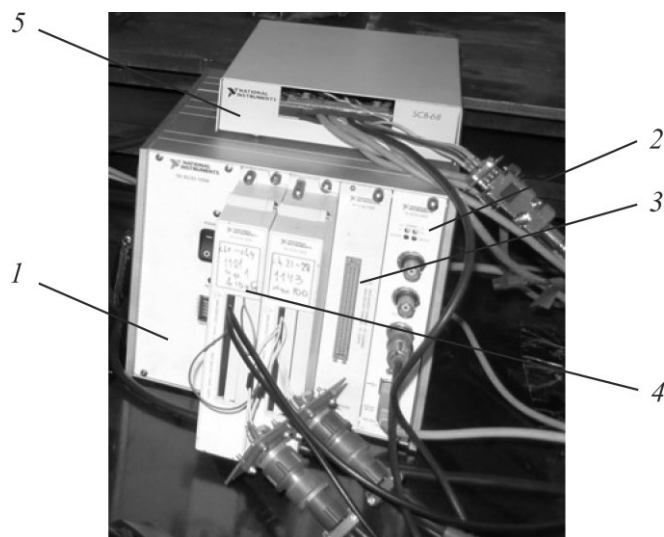


Рис. 3. Составные части измерительной аппаратуры: 1 — шасси SCXI-1000; 2 — АЦП; 3 — модульные приборы; 4 — терминальные блоки; 5 — клеммная коробка SCB-68

Акустоэмиссионные сигналы оцифровывают быстродействующим многоканальным 16-битным устройством ввода – вывода (АЦП / ЦАП) E-502 (L-Card, Россия) с частотой преобразования $2 \cdot 10^6$ выборок/с. Устройство содержит 16 дифференциальных входов и двухканальный ЦАП (16 бит/1 МГц). Контроль акустической эмиссии в аппаратуре осуществляется двумя датчиками. При акустической томографии гидроразрыва количество приемников увеличивают.

Базовая версия аппаратуры укомплектована:

- датчиками давления РПД-И на максимальное рабочее давление 25(60) МПа с токовым выходом 4–20 мА, временем отклика менее 5 мс, класс точности 0.5 (РОСМА, Россия) или их аналогами;

- геофонами GS-One с собственной частотой 10 Гц и чувствительностью 85 В/м/с (GEOSPACE Technologies, США);

- инкрементальными линейными энкодерами типа MSO (MEGATRON Elektronik GmbH, ФРГ) с дискретностью 1 мкм или ЛИР (СКБ ИС, Россия) с дискретностью 0.1 мкм и ходом штока 10 мм (например, ЛИР-15-10) или другими датчиками с близкими параметрами;

— пьезокерамическими акселерометрами KD-91 с резонансной частотой 50 кГц и коэффициентом передачи 0.5 мВ/м·с²;

— энкодером (цифровой линейкой) YE-100 с дискретностью 0.2 мм и ходом 100 мм, предназначенным для контроля заправки рабочей жидкости ручным гидравлическим прессом с дискретностью 0.1 мл.

ПРОГРАММНЫЙ КОД

Рассмотрим часть программного кода аппаратуры, локализованную в компьютере КОМ1 (рис. 2), оснащенном следующим базовым программным обеспечением: 32-разрядная операционная система (ОС) Windows 7SP1 с обновлениями, среда разработки и платформа для выполнения программ на графическом языке “G” фирмы National Instruments (США) LabView 18 с дополнительными пакетами ASPT, CDSim, FPGA, RealTime, VIA, NISV, драйвер управления измерительной системой NI DAQmx 18, библиотека для подключения внешних устройств NI VISA 18. На рис. 4 показано окно “Measurements & Automation Explorer” драйвера DAQmx, отображающее состав измерительной системы. Отметка о подключении приборов PCI-6602, SCXI-1600 должна быть также и во вкладке “NI Data Acquisition Devices” диспетчера устройств ОС. Это обязательное условие корректной работы аппаратуры.

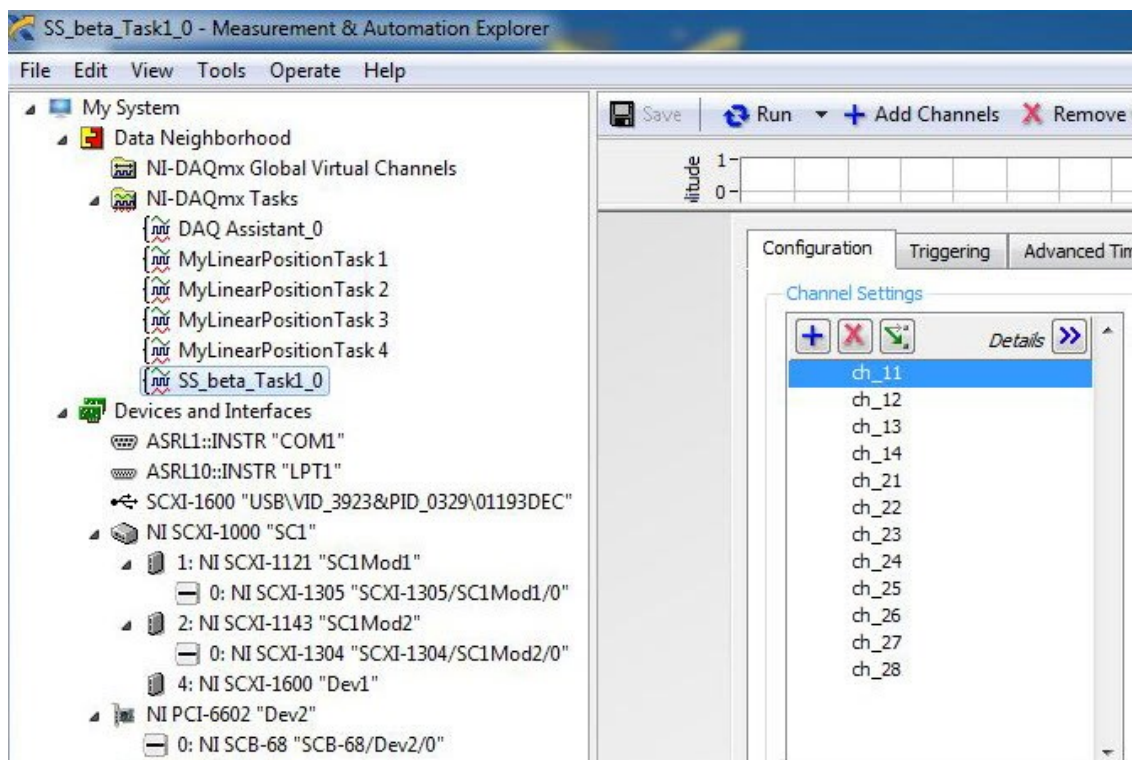


Рис. 4. Окно “Measurements & Automation Explorer” драйвера DAQmx, показывающее состав измерительной аппаратуры

На рис. 5 представлена часть программного кода, относящаяся к работе модуля PCI-6602. Цифрой 1 обозначен генератор непрерывной последовательности прямоугольных импульсов синхронизации, управляющих опросом измерительных каналов. Генератор реализован на счетчике ctr7 платы. Частота наблюдений (“sample rate”) выбирается оператором. В режиме DMA доступны частоты до 13 кГц, иначе — 2.5 кГц. Импульсы положительные со скважностью 0.5

без начальной задержки. Выходной сигнал генератора (“clock output”) выведен на контакт 16 (PFI_8 (OUT7)) клеммной коробки SCB-68 (относительно общей шины GND). Подача синхроимпульсов в измерительные счетчики осуществляется через внутренний селектор модуля PCI-6602 и не требует проводных соединений. Цикл “While Loop” в программном коде един для генератора импульсов синхронизации, измерительных счетчиков и аналоговых каналов.

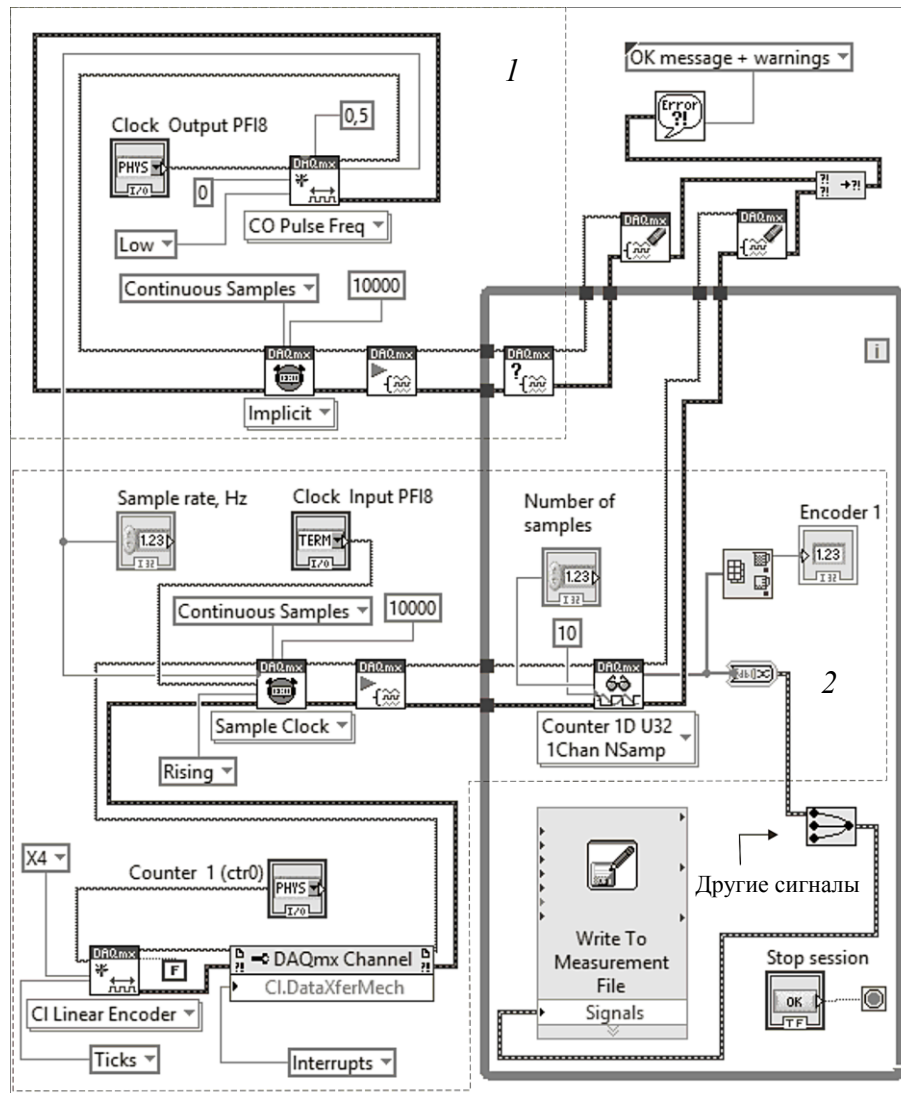


Рис. 5. Блок-диаграмма программного кода генерации синхрои́мпульсов (1) и управления работой измерительных счетчиков (2) платы PCI-6602

Программный код измерительного счетчика ctr0 показан в поле 2 на рис. 5 (аналогично для счетчиков ctr1 – ctr6). Если измерительных счетчиков больше трех, то значение атрибута “CI.DataXferMech” в узле “DAQmx Channel Node” (паллета “DAQmx-Data Acquisition”) устанавливается в состояние “interrupts” (в режиме “Change All to write”), иначе произойдет ошибка выполнения программы. Если счетчиков от одного до трех, этого можно не делать, поскольку по умолчанию задан режим DMA. Размер буфера — число отсчетов за цикл — общий для всех измерительных каналов. Индикация показаний счетчиков используется для визуального кон-

Приведенный вариант аппаратуры нацелен на работу с семью энкодерами, хотя для контроля трехосного сжатия модели и закачки жидкости гидравлическим прессом достаточно четырех. Дополнительные энкодеры предназначены для измерения деформации цилиндрической полости, расположенной внутри модели. Это связано с особенностями эксперимента, задача которого состояла в исследовании поведения гидроразрыва в окрестности горной выработки [10].

Разработанные решения и модульный состав аппаратуры позволяют легко ее модифицировать, в частности увеличивать число аналоговых каналов до 24, например за счет перехода на восьмиканальные изолированные усилители SCXI-1121. При необходимости можно устанавливать другие модульные приборы и терминальные блоки SCXI для работы с мостовыми тензодатчиками, термопарами, термисторами, ИЕПЕ акселерометрами, измерителями нагрузки, силы, момента. Если есть потребность дополнительного подключения к аппаратуре одного или нескольких удаленных цифровых датчиков, то в один из слотов PCI компьютера КОМ1 вставляют адаптер COM-RS485 типа Advantech PCI-1602 или его аналог. Подключение осуществляется с помощью двухпроводной линии связи, например по протоколу RS-485, используемому в промышленности при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами. На передающем конце линии должен присутствовать модуль преобразования выходных сигналов цифрового датчика в формат RS-485.

На рис. 7 приведен пример программного кода, разработанного для подключения абсолютных энкодеров производства компании СКБ ИС (Россия) с последовательным интерфейсом передачи данных SSI (формат выходных данных RS-422).

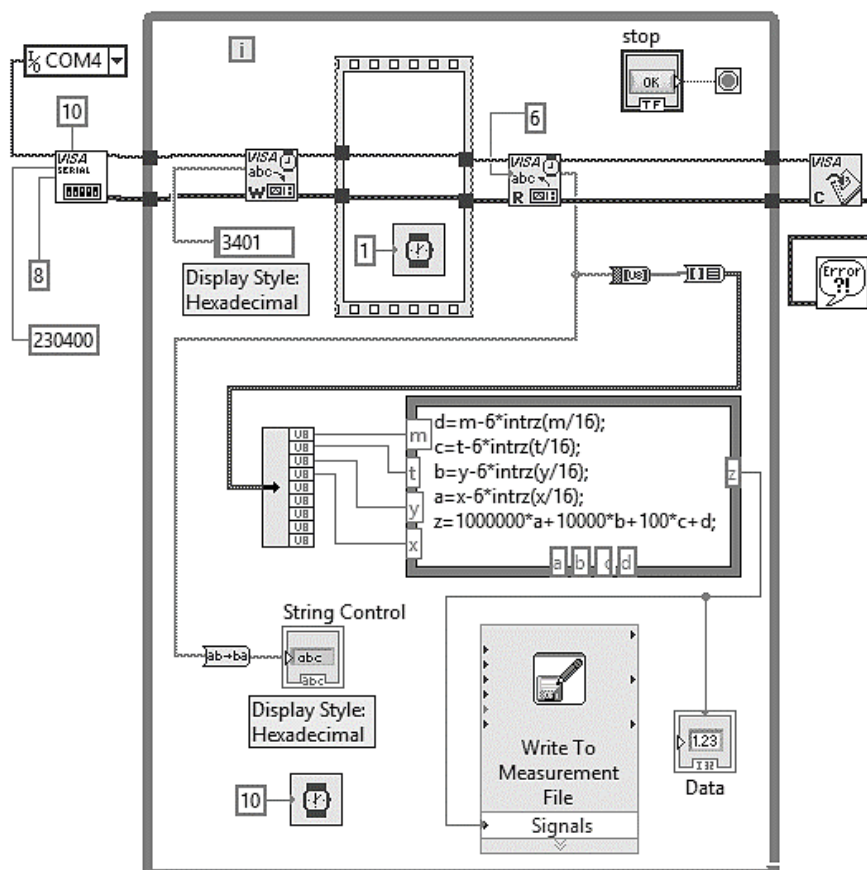


Рис. 7. Блок-диаграмма программного кода сбора показаний абсолютного углового энкодера ЛИР-ДА291А с частотой опроса 0.1 кГц

В рассматриваемом примере абсолютный угловой энкодер ЛИР-ДА219А подключен к линии связи через модуль интерфейса ЛИР-916 (СКБ ИС, Россия). Допускается последовательное соединение нескольких таких модулей (и датчиков), каждому из которых присваивается свой адрес (процедура программирования модуля описана в документации производителя). В коде на рис. 7 использован быстрый двоично-десятичный формат протокола обмена данными со скоростью передачи 230.4 Кбит/с. Команда запроса абсолютной координаты преобразователя имеет вид “3401” (в двоично-десятичной кодировке), где 01 — адрес модуля. Ответ состоит из 6 байтов: старт, стоп и 4 байта данных. Контроль входной посылки в блок-диаграмме осуществляется индикатором “String control”. Процедура декодирования задана набором формул, что связано с особенностями изделий компании СКБ ИС. При всех принятых мерах частота опроса датчика по результатам тестирования не превышает 0.3 – 0.4 кГц, что меньше частоты наблюдений в разработанной аппаратуре. Это допустимо, когда надо контролировать медленно протекающие деформационные процессы в реальных породных массивах. В лабораторных условиях в силу масштабного фактора скорость изменения наблюдаемых параметров выше. Для замеров угловых и линейных деформаций целесообразно применять инкрементальные датчики в комплексе с быстродействующими счетчиками, как это и сделано в разработанной аппаратуре. Решение, приведенное на рис. 7, может использоваться для периодического контроля квазистатических нагрузок, имитирующих горное давление в модели, и инерционных тепловых процессов.

ВЫВОДЫ

Разработанная измерительная аппаратура обеспечивает комплексные наблюдения деформационных, эмиссионных и других процессов, протекающих при лабораторных исследованиях гидроразрыва в условиях, имитирующих неоднородное трехосное напряженное состояние породного массива. Программные средства управления сбором данных реализованы в форме модульных виртуальных приборов на основе графической среды программирования LabView, что обеспечивает простоту модернизации аппаратур, ее адаптацию к особенностям решаемых задач исследования. Представленная разработка, ее отдельные технические решения могут быть использованы при создании измерительных комплексов и средств мониторинга геодинамических процессов различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евдокимов Ю. К., Линдваль В. Р., Щербаков Г. И. LabVIEW в научных исследованиях. — М.: ДМК пресс, 2012. — 400 с.
2. Сердюков С. В., Рыбалкин Л. А., Дробчик А. Н., Патутин А. В., Шилова Т. В. Лабораторный стенд для моделирования гидравлического разрыва массива трещиноватых пород // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 193–201.
3. Ле Тхань Бинь. Повышение износостойкости рабочего инструмента гидромолотов типа JCB средней серии при разрушении негабаритов в условиях карьеров района Бинь Динь (Социалистическая Республика Вьетнам): дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2018. — 150 с.
4. Ефимов В. П., Шер Е. Н. Определение динамической трещиностойкости органического стекла // ПМТФ. — 2001. — Т. 42. — № 5. — С. 217–225.
5. Алешин В. И., Аэро Э. Л., Кувшинский Е. Б., Славицкий И. А. Кинетика роста трещин в пластинах из оргстекла // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. — 1981. — № 2. — С. 70–79.

6. Вавакин А. С., Салганик Р. Л. Исследования трещиностойкости органического стекла // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. — 1971. — № 4. — С. 167–175.
7. ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. — 24 с.
8. Лагунов В. А., Мамбетов Ш. А. Скорость развития трещин в образцах горных пород // ПМТФ. — 1965. — № 6. — С. 96–99.
9. Вайсберг Л. А., Каменева Е. Е. Взаимосвязь структурных особенностей и физико-механических свойств горных пород // Горн. журн. — 2017. — № 9. — С. 53–58.
10. Сердюков С. В., Азаров А. В., Рыбалкин Л. А., Патутин А. В. О форме трещин гидроразрыва породного массива в окрестности цилиндрической полости // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 72–84.

Поступила в редакцию 10/IX 2022

После доработки 15/X 2022

Принята к публикации 24/XI 2022