

УДК 622.363.2

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Басалай Г.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Рассматриваются программно-технические средства измерения сил резания массива горной породы с точки зрения анализа реакций породы на резец. Приводятся методика и результаты калибровки динамометра УДМ-600, установленного на стенде, при различных углах приложения силы на режущей кромке зубка.

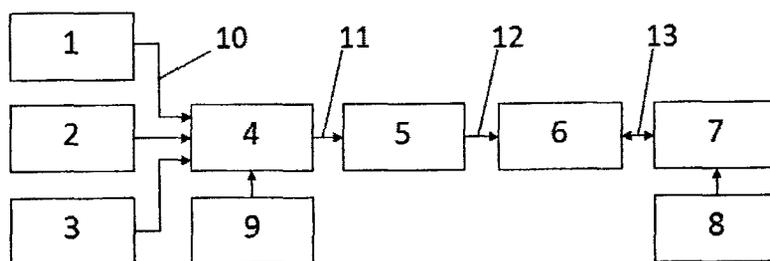
Ключевые слова: *резец, сила резания, датчик, программа, динамометр, стенд, горная порода.*

Введение

Эффективность работы проходческих и очистных комбайнов в значительной степени зависит от оптимальных режимов фрезерования массива горной породы зубками исполнительных органов. Исследованиям взаимодействия породоразрушающих элементов с горными породами посвящено большое число научных работ. В преобладающем большинстве работ экспериментальные измерения нагрузок на режущей кромке сводятся к регистрации только силы сопротивления резанию, направленной по вектору перемещения зубка. Однако более объективная оценка процесса резания горной породы одиночным резцом может быть дана при регистрации всех трех составляющих силы резания, а также пространственного положения вектора этой силы. Для решения этой задачи разработан специальный стенд с использованием современных программно-технических средств.

Исследование и его результаты

На рисунке 1 приведена структурная схема системы для измерения сил резания калийной руды одиночным резцом и последующей обработки результатов экспериментов.



- 1 – динамометр УДМ-600; 2 – датчик перемещения потенциометрический;
 3 – датчик измерения силы СТ-4 50 кН; 4 – блок коммутации; 5 – тензоусилитель АТ1.1;
 6 – USB-адаптер; 7 – персональный компьютер; 8 – программное обеспечение *PowerGraph*;
 9 – блок питания постоянного тока, $U = 12$ В; 10 – кабель соединительный УДМ;
 11 – кабель соединительный блока коммутации с тензоусилителем АТ1.1;
 12 – кабель сигнальный АТ1-40; 13 – кабель USB

Рисунок 1. – Структурная схема системы измерения сил резания

Аналоговые измерительные сигналы от датчика 2 перемещения, датчика 3 измерения силы и динамометра 1 через блок коммутации 4 передаются на вход усилителя 5.

Усилитель АТ1.1 предназначен для усиления, преобразования в цифровой код и передачи на компьютер сигналов от различных датчиков. Усилитель АТ1.1 имеет модульную конструкцию и содержит следующие модули: усилитель-преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, схему управления. К усилителю может быть подключено до четырех тензорезисторных мостовых (полумостовых) и четырех потенциометрических схем. Своими выходами усилитель соединяется с USB-адаптером коаксиальным радиочастотным сигнальным кабелем. USB-адаптер преобразует цифровой код, полученный от усилителей преобразователей, в формат интерфейса USB 2.0.

Управление усилителем осуществляется программой «*PowerGraph 3.3 Professional*», которая позволяет в реальном времени наблюдать за процессом резания на экране компьютера, а по окончании эксперимента – записать на жесткий диск результаты измерений и настройки по каждому измерительному каналу [1].

Поиск в сети интернет средств измерений показал, что при современном изобилии различных датчиков силы номенклатура многокомпонентных динамометров, обеспечивающих измерение составляющих силы резания, крайне ограничена. Это объясняется тем, что подобные измерения проводятся при проведении научно-исследовательских работ, а промышленность не заинтересована в выпуске продукции узкоцелевого назначения. Из ограниченного числа многокомпонентных динамометров можно отметить динамометр модели 9257В Kistler (Швейцария) [2] и динамометр М30-3-6к (ООО «Гилком», Минск) [3]. Они имеют высокую стоимость и узкоспециализированное программное обеспечение. Последнее затрудняет использовать при работе с ними датчики других измеряемых величин.

В СССР серийно выпускались динамометры типа УДМ-100, УДМ-600 и УДМ-1200 конструкции ВНИИинструмент. Динамометры УДМ по данным поиска в сети интернет и сейчас используются при проведении НИР и ОКР в различных НИИ и ВУЗах [4, 5].

Заявленная в руководстве по эксплуатации динамометра относительная погрешность составляет не более $\pm 10\%$, что является вполне приемлемым для измерения сил резания горной породы. Она может быть уменьшена выполнением качественной градуировки динамометра непосредственно на месте измерений. Как показано в работе [3], дополнительная погрешность от последующего преобразования аналоговых сигналов динамометра в цифровую форму значительно меньше погрешности динамометра. Кроме того, конструкция динамометра и его измерительной схемы позволяет создавать без особых затрат современные измерительные системы с применением компьютерных технологий.

Эти факторы послужили обоснованием для использования измерения сил резания калийной руды динамометра УДМ-600. Основное достоинство – его доступность. Динамометр УДМ способен одновременно воспринимать три составляющие силы резания P_x , P_y и P_z по трем взаимно перпендикулярным осям Ox , Oy и Oz , соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскостях [4]. Максимальные значения измеряемых сил равны: $P_x = 3$ кН, $P_y = 3$ кН и $P_z = 6$ кН. Динамометр измеряет также крутящий момент $M_{кр}$, действующий в горизонтальной плоскости.

Работа динамометра основана на регистрации изменений значений сопротивлений тензометрических датчиков, вызванных действием измеряемой силы. Внутри динамометра расположена державка, выполненная в виде квадратной пластины с круглым фланцем для крепления к ней сменных приспособлений (рисунок 2). На ней закрепляются резцедержатель с резцом. Державка установлена на шестнадцати упругодеформируемых опорах. Конструкция опор такова, что жесткость опоры вдоль ее оси

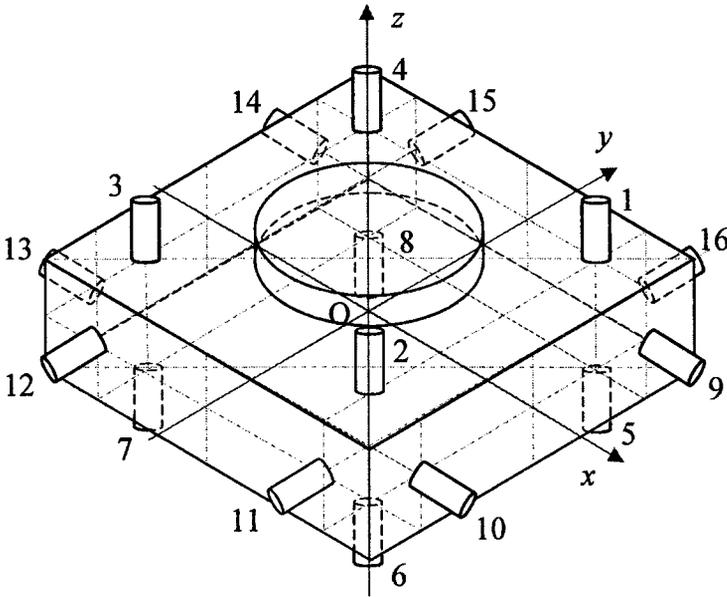


Рисунок 2. – Схема расположения тензодатчиков (1-16) в динамометре УДМ-600

примерно в 100 раз меньше жесткости в поперечном направлении. К каждой опоре вдоль ее оси приклеен проволочный тензорезистор с номинальным сопротивлением 100 Ом.

Вертикально расположенные опоры участвуют в измерении силы P_z , горизонтально расположенные опоры участвуют в измерении сил P_x, P_y [5].

Тензорезисторы динамометра УДМ подключаются к плате постоянных сопротивлений, установленных в блоке коммутации, и образуют мостовые схемы измерений (рисунок 3).

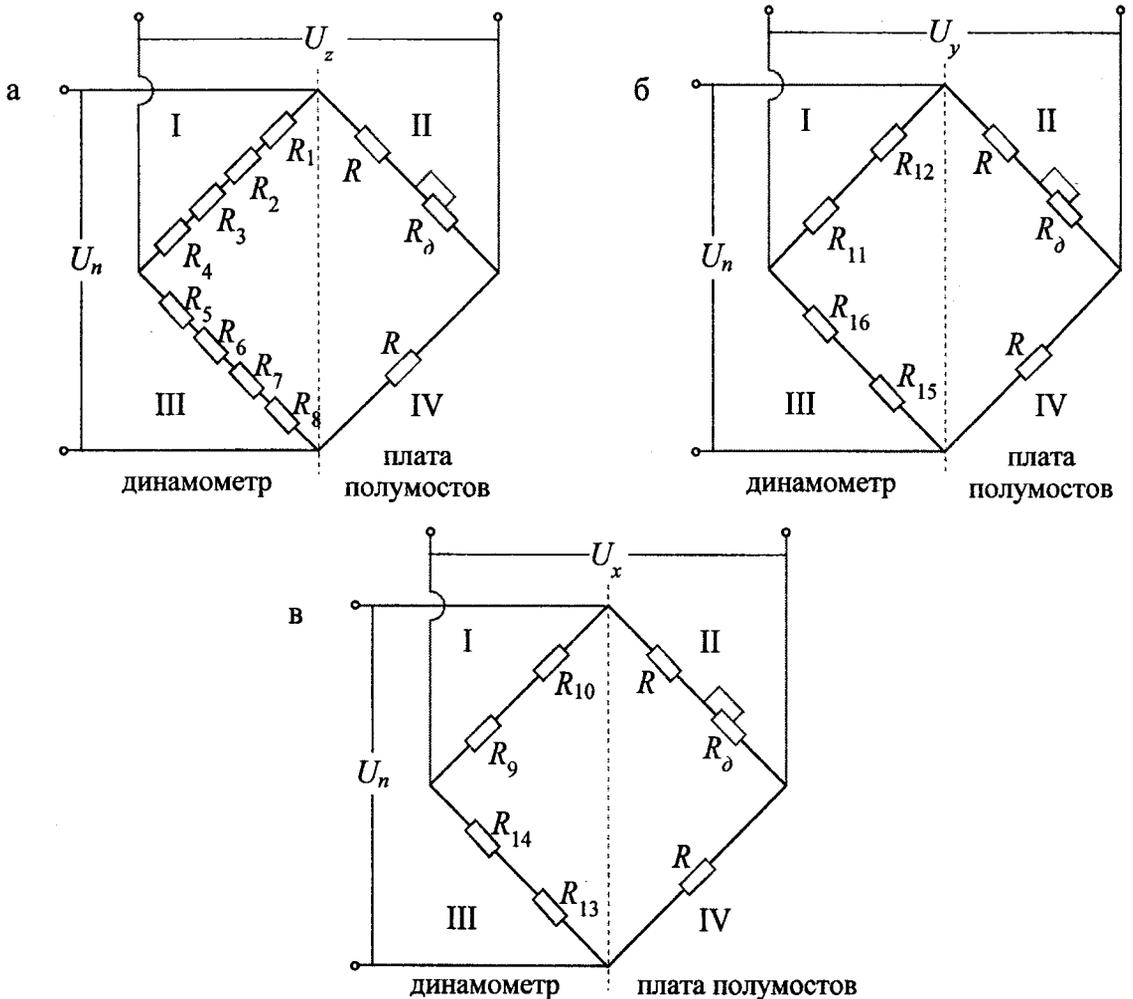


Рисунок 3. – Мостовые схемы измерения составляющих сил резания по трем ортогональным осям

На рисунке 3а показана мостовая схема соединения резисторов для измерения силы P_z , на рисунке 3б – схема для измерения P_y , на рисунке 3в – схема измерения P_x . Канал измерения крутящего момента в данной работе не используется. Плечи полумостов I и III образованы последовательным соединением тензорезисторов, расположенных в динамометре, плечи II и IV состоят из резисторов R и R_0 . Плечо II состоит из двух последовательно соединенных резисторов, один из которых – постоянный, а другой – подстроечный для предварительной регулировки мостовых схем. Таким образом, тензорезисторы, участвующие в измерениях, соединяются в измерительной части полумоста, а вторая часть полумоста состоит из стабильных резисторов, что в целом составляет мостовую схему. Резисторы R и R_0 расположены в блоке коммутации [5]. Номера тензорезисторов на рисунке 3 соответствуют номерам опор рисунка 2.

Динамометр УДМ-600 с резцедержателем и резцом устанавливается на подвижную платформу стенда с помощью дополнительного устройства, которое обеспечивает наклон резца под углом $\beta = 43^\circ$ к вертикали. Такое положение резца соответствует креплению породоразрушающих элементов на исполнительном органе проходческого комбайна.

Результирующая сила резания прикладывается к режущей части резца под некоторым углом. Эта сила через резец и резцедержатель передается на державку, деформирует опоры и вызывает изменение сопротивлений тензорезисторов. Опоры также подвергаются деформации от действия моментов сил, приложенных к резцу. Изменение сопротивлений тензорезисторов приводит к появлению в измерительных диагоналях мостовых схем напряжений U_x , U_y , U_z , пропорциональных измеряемым силам P_x , P_y и P_z . При стабильном напряжении питания U_n мостовых схем напряжения U_z , U_x , U_y будут зависеть от величины результирующей силы резания и угла приложения ее. Эта зависимость определяется предварительной калибровкой динамометра.

Датчик перемещений (рисунок 4) предназначен для измерения перемещения подвижной платформы стенда с установленным на ней динамометром УДМ-600. В качестве чувствительного элемента датчика используется прецизионный многооборотный резистор сопротивлением 2 кОм, линейностью $\pm 0,1\%$, мощностью рассеяния 1 Вт, моментом трогания с места не более 2 мН·м, рабочим углом 7-200°. На вращающейся в подшипниках 4 оси 1 резистора имеется скользящий по спирали 3 контакт 2. Резистор включен по потенциометрической схеме. Выходное напряжение $U_{вых}$, снимаемое с подвижного контакта резистора, при стабильном напряжении питания $U_{пит}$ будет пропорционально сопротивлению R_x , зависящему от угла поворота, и, соответственно, линейному перемещению платформы [6].

Резистор установлен на металлической пластине, которая крепится к станине стенда. Дополнительно на пластине установлены горизонтально обводные ролики для исключения действия изгибающих усилий на ось резистора. Линейное перемещение подвижной платформы передается на шкив резистора нитью. Нить огибает левый ролик, далее наматывается на один оборот вокруг шкива и огибает правый ролик. Для обеспечения необходимого натяжения нити на ее свободный конец подвешивается груз. Таким образом, осуществляется преобразование линейного перемещения платформы во вращательное движение оси резистора.

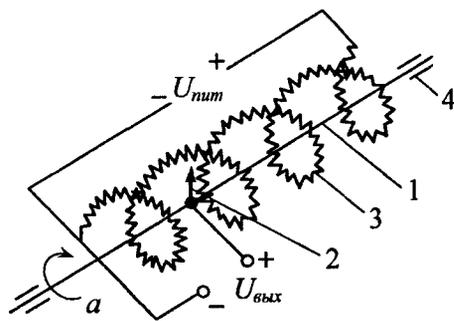


Рисунок 4. – Схема датчика перемещений

Методика калибровки датчика перемещений заключалась в измерении штангенциркулем линейного перемещения платформы и регистрации показаний на компьютере с помощью программы «*PowerGraph 3.3 Professional*». Калибровочная характеристика датчика перемещений имеет вид

$$L = 52,6 \cdot U_{\text{вых}}; \quad (1)$$

где L – перемещение подвижной платформы, мм;

52,6 – калибровочный коэффициент датчика перемещений при диаметре шкива на оси резистора 6 мм, мм/мВ;

$U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение датчика перемещений, мВ.

Датчик силоизмерительный тензометрический СТ4 закреплен непосредственно на штоке гидроцилиндра 6 и используется для контроля развиваемого усилия гидроцилиндром 6 при работе гидростанции 7 с целью предотвращения предельных усилий, которые могли бы привести к перегрузке динамометра УДМ-600 (рисунок 5). Номинальная нагрузка, измеряемая датчиком, имеет диапазон ± 5 кН; класс точности – 0,2.

Максимальная точность измерений сил резания горной породы с применением разработанных средств обеспечивается в результате тщательной калибровки динамометра УДМ-600. Калибровка выполняется в вертикальной плоскости XOZ , проходящей через ось резца (рисунок 5). Направление осей выбрано так, чтобы совпадали направления напряжений U_z и U_x , снимаемые с диагоналей мостовых схем.

Угломерный сектор 8 закрепляется в тисках 9, подвижная платформа устанавливается так, чтобы расстояния по вертикали и горизонтали от вершины резца 3 до окружности сектора 8 были равны. В этом положении подвижная платформа надежно фиксируется. Между винтом и резцом устанавливается динамометр ДОСМ-10 кН, который измеряет прикладываемую к резцу силу. Программа «*PowerGraph 3.3 Professional*» включается на регистрацию, вращением винта на резец прикладывается сила P как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения (рисунок 6).

Винт 11 с упорной скобой может перемещаться по окружности угломерного сектора 8, обеспечивая тем самым различные углы приложения силы P к резцу 3.

По окончании операций калибровки из графиков считываются значения напряжений U_z , U_x , U_y и производится обработка результатов калибровки с применением электронных таблиц *Excel*. Калибровкой выявлена четкая зависимость отношения напряжений U_x к U_z при разных углах приложения силы относительно вертикальной оси (рисунок 7). Эта зависимость позволяет при проведении экспериментов по резанию горной породы определять угол действия силы резания P_p в каждый момент времени.

Калибровкой динамометра УДМ-600 установлены зависимости, которые применяются в последующем для вычисления по полученным экспериментальным данным значений результирующей силы резания калийной руды и угла между результирующей силой резания и вертикалью. В диапазоне углов от 0 до 90 градусов приложения силы на режущей кромке зубка зависимость имеет вид:

$$\alpha = -1,011 \cdot (dU_x/dU_z)^2 + 16,8 \cdot dU_x/dU_z + 43. \quad (2)$$

С учетом результатов предварительной серии экспериментов резания калийной руды и образцов из вмещающих горных пород одиночными зубками можно с большой достоверностью сократить диапазон возможных углов приложения силы P_p до значений $\alpha = 10 \dots 80$ град. Тогда окончательно можно использовать следующие зависимости:

$$\alpha = 16,5 \cdot dU_x/dU_z + 41,5; \quad (3)$$

$$P_p = K_{zp} \cdot U_z; \quad (4)$$

$$P_n = P_p \cos \alpha; \quad (5)$$

$$P_m = P_p \sin \alpha, \quad (6)$$

где α – угол между результирующей силой резания и вертикалью, град;

dU_x и dU_z – дифференциалы напряжений U_x и U_z ;

P_p – результирующая сила резания калийной руды, кН;

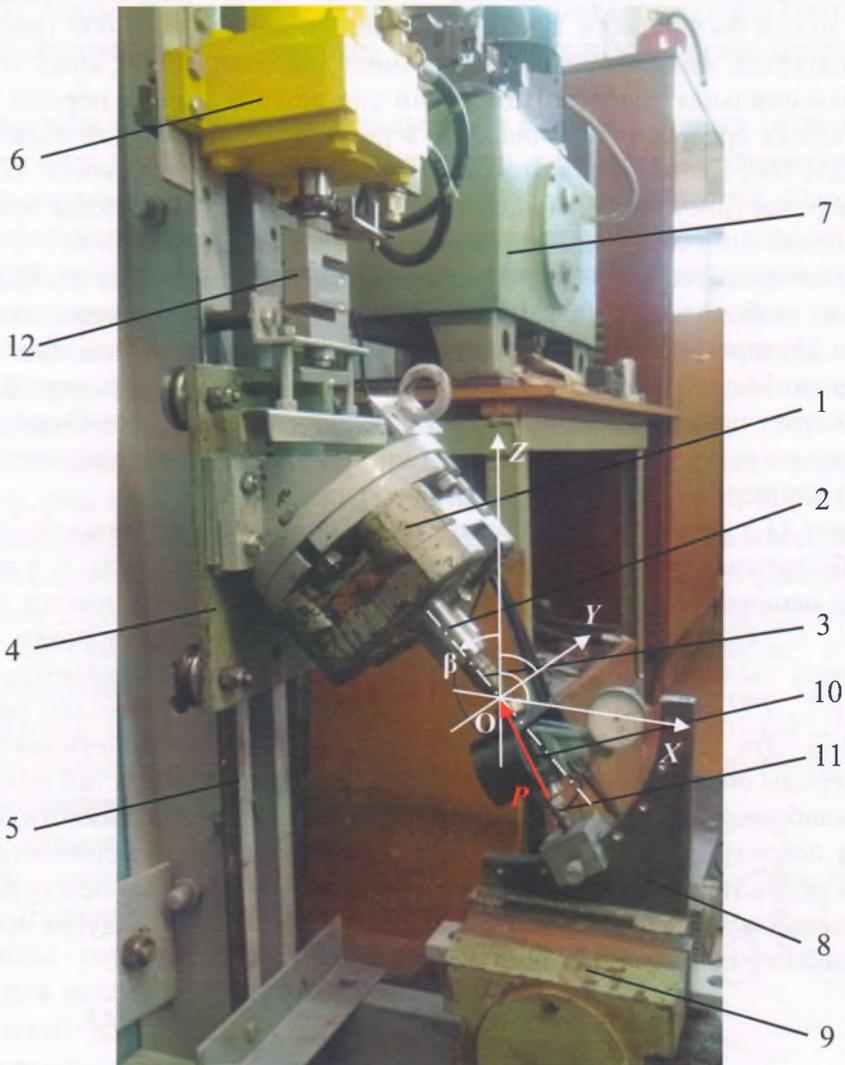
K_{zp} – калибровочный коэффициент вычисления силы резания, кН/мВ;

U_z – значение регистрируемого напряжения по соответствующему каналу измерения, мВ;

U_x – значение регистрируемого напряжения по соответствующему каналу измерения, мВ;

P_n – нормальная составляющая силы резания, кН;

P_m – вертикальная составляющая силы резания, кН.



1 – динамометр УДМ-600; 2 – резцедержатель; 3 – резец; 4 – подвижная платформа;
5 – направляющие; 6 – гидроцилиндр; 7 – гидростанция; 8 – угломерный сектор;
9 – тиски; 10 – динамометр ДОСМ-10 кН; 11 – винт с упорной скобой; 12 – датчик силы СТ4-50

Рисунок 5. – Общий вид стенда для измерения сил резания горной породы с элементами для калибровки динамометра

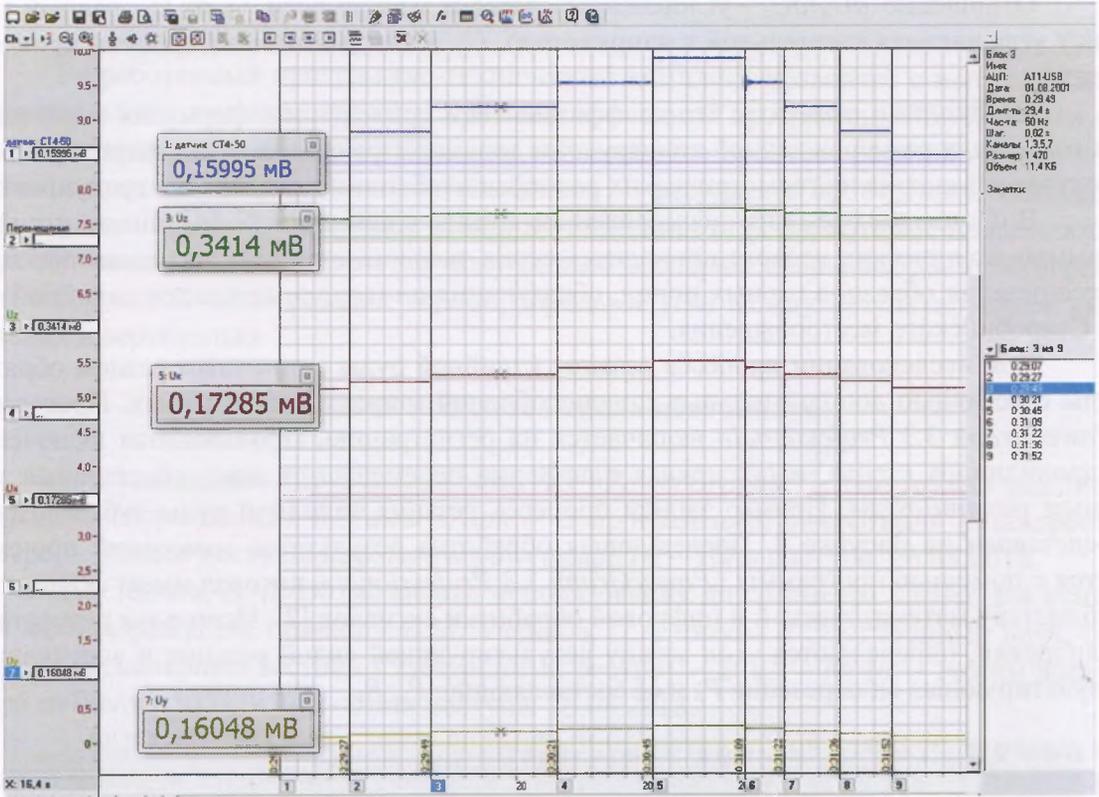


Рисунок 6. – График записи калибровки при нагружении силой P под углом 60°

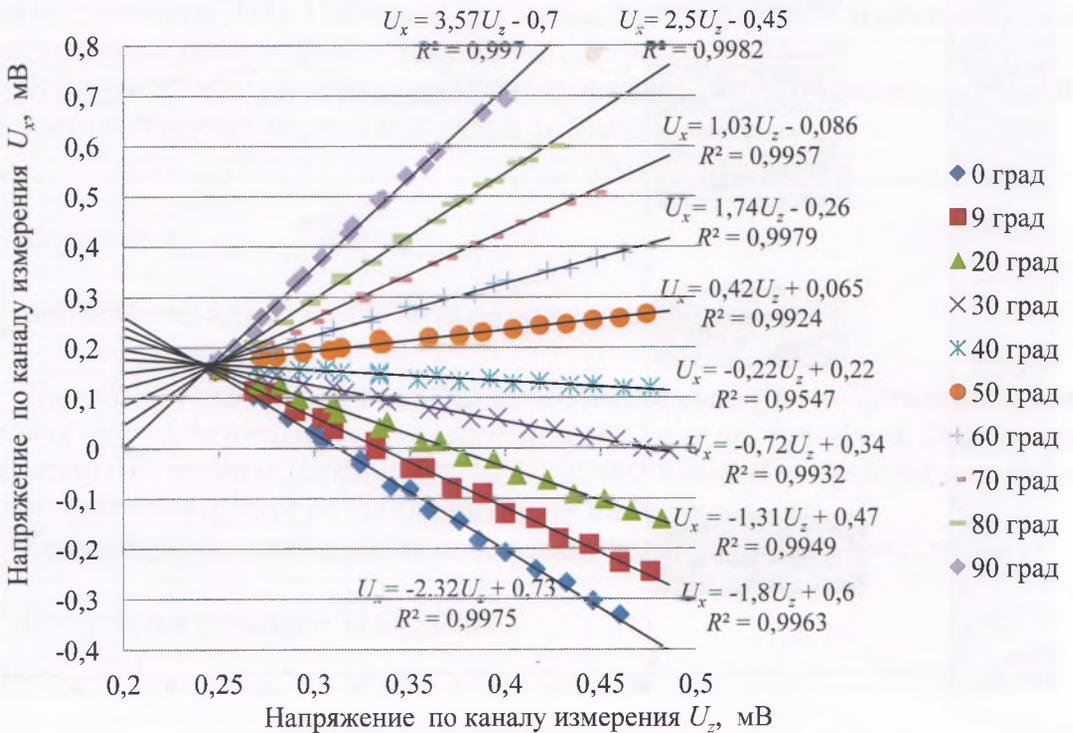


Рисунок 7. – Зависимость напряжения U_x от U_z при разных углах приложения силы

Отношение dU_x/dU_z – угловой коэффициент зависимости U_x от U_z , равный тангенсу угла наклона касательной к напряжению U_x в каждый момент времени процесса резания.

Необходимо отметить, что коэффициенты в приведенных формулах справедливы только для размеров данной конструкции динамометра с резцедержателем и резцом. В случае изменения их геометрических размеров необходимо повторение градуировки.

В настоящее время на представленном стенде с использованием описанных программно-технических средств проводится серия экспериментов по исследованию процесса резания образцов горных пород, образующих плодородные пласты калийной соли Старобинского месторождения.

При исследовании процесса резания калийной руды одиночным резцом образец руды с помощью дополнительных приспособлений закрепляется в тисках. Программа «PowerGraph 3.3 Professional» включается на регистрацию. Производится включение гидроцилиндра стенда, и подвижная платформа перемещается вниз, обеспечивая тем самым резание руды. Пример записи процесса резания калийной руды зубком Д6-20 представлен на рисунке 8. Последующая обработка результатов измерений производится с помощью программы «PowerGraph 3.3 Professional», которая имеет обширную библиотеку математической и цифровой обработки сигналов [2]. Используя результаты калибровки, определяются угол между результирующей силой резания и вертикалью, результирующая сила резания P_p и ее составляющие P_n , P_m .

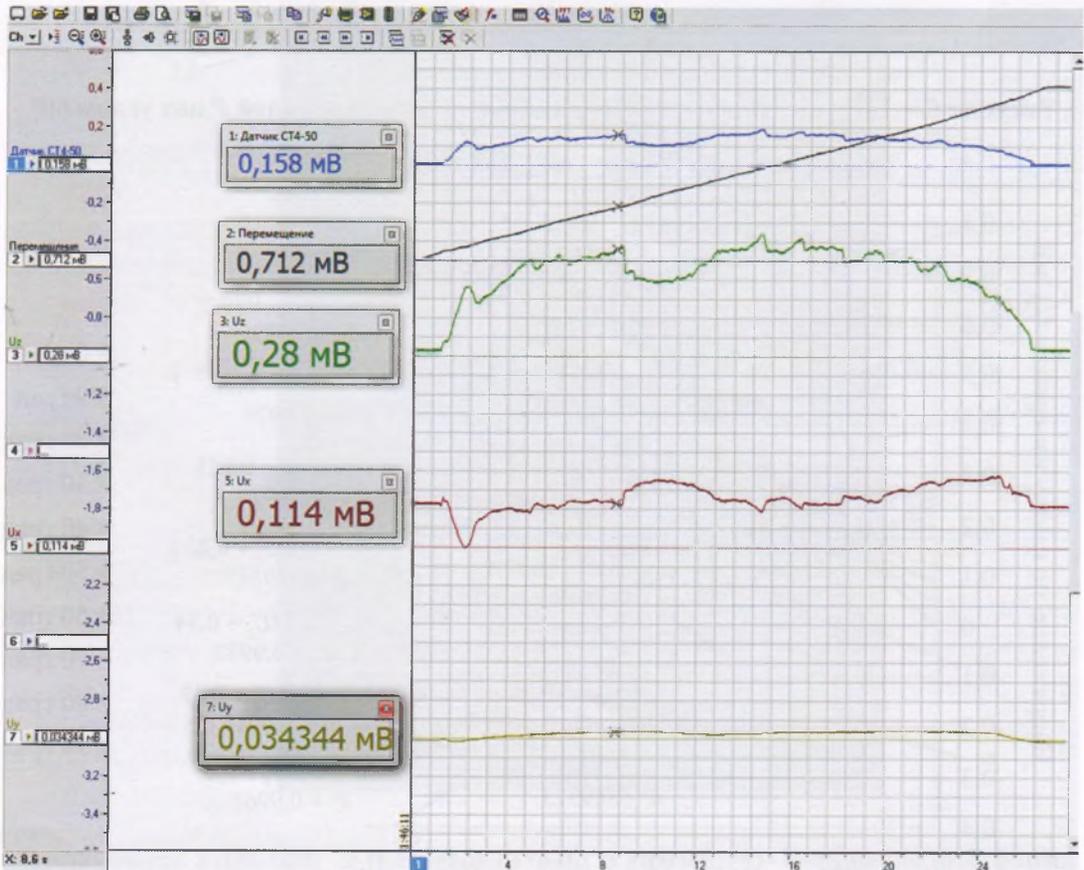


Рисунок 8. – Пример записи процесса резания калийной руды

Заключение

Разработанный программно-технический комплекс позволяет с использованием универсального динамометра типа УДМ и современной программы «*PowerGraph*» проводить полноценные экспериментальные исследования процесса резания горных пород зубками проходческих и очистных комбайнов. В результате проведенной калибровки динамометра УДМ-600 получены основные зависимости (1-6), которые применяются в последующем для вычисления по полученным экспериментальным данным значений результирующей силы резания горной породы и угла между результирующей силой резания и вертикалью.

Список использованных источников

1. Функциональные возможности ПО «*PowerGraph*»: 1. Поддержка различных устройств сбора данных // *PowerGraph* – О программе «*PowerGraph*» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.powergraph.ru>. – Дата доступа: 26.08.2018.
2. Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // *Электронный науч.-техн. журнал Инженерный вестник* [Электронный ресурс]. – 2012. – № 10. – Режим доступа: engsi.ru/file/out/505929.pdf. – Дата доступа: 26.08.2018.
3. ООО «ТИЛКОМ» – производитель тензометрической техники: датчиков крутящего момента, силоизмерительных и многокомпонентных датчиков // Тилком. Тензометрическая техника, тензодатчики, датчики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.tilkom.com. – Дата доступа: 26.08.2018.
4. Павлов, И.О. Система для измерения сил резания. Компонировка, тарирование и оценка погрешности / И.О. Павлов, М.В. Ушаков, И.А. Воробьев // *Известия Тульского государственного ун-та*. – 2013. – Вып. 10 – С. 159-168.
5. Руководство к универсальному динамометру УДМ-600 конструкции ВНИИ. – М.: Всесоюзный научно-исследовательский ин-т, 1983. – 22 с.

Basalai R.A.

Software and hardware for measuring rock cutting forces

The software and hardware tools for measuring the cutting forces of rock mass from the point of view of the analysis of rock reactions to the cutter are considered. The technique and results of calibration of the dynamometer UDM-600, installed on the stand, at different angles of application of force on the cutting edge of the tooth.

Keywords: cutter, cutting force, sensor, program, dynamometer, stand, rock.

Поступила в редакцию 27.08.2018 г.