

УДК 681.2

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ, РЕГИСТРАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОЦИФРОВКИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ****С.Н. АБРАМЕНКО, В.С. АНИСИМОВ, К.В. КОРБА**  
(Полоцкий государственный университет)

*Предложена система для измерения и регистрации процессов, протекающих при высокоскоростной обработке материалов, с последующей оцифровкой полученных экспериментальных данных и их передачей в специализированное программное обеспечение. Сформулированы технические требования к подобным системам, обоснован выбор структурных элементов. Предложен виртуальный прибор, на котором реализован модуль сбора данных, базирующийся на трех структурах: одной Timed Loop, отвечающей за синхронный сбор данных, и двух While Loop, одна из которых отвечает за нормализацию данных и видимость элементов графиков, вторая – за запись данных в файл.*

**Ключевые слова:** программно-аппаратный комплекс, контроллер, преобразователь.

**Введение.** Необходимость снижения себестоимости производимой продукции для сохранения конкурентоспособных позиций на рынке требует повышения производительности и качества выпускаемой продукции. Для выполнения этих установок в области процессов механической обработки происходит последовательное смещение в сторону высокоскоростных процессов обработки.

Исходя из этого, производителями оборудования и инструментальной оснастки было предложено достаточно много решений для процессов высокоскоростной обработки (ВСО). В частности, были разработаны мощные мотор-шпиндели, позволяющие работать продолжительное время на скоростях вращения до  $10^5$  с<sup>-1</sup> и обеспечивающие малый уровень радиального биения и высокую механическую жесткость. Стали использоваться инструментальные оправки с возможностью устранения дисбаланса, были усовершенствованы системы автоматизированной технологической подготовки (САМ), что дало возможность назначать и рассчитывать сложные пространственные траектории движения инструмента при постоянной нагрузке на инструмент в процессе резания, а системы ЧПУ приобрели достаточную производительность, быстроедействие и объем памяти для обеспечения непрерывной обработки на высоких скоростях.

Появилось экспериментальное измерительное оборудование, как например, высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с достаточным разрешением, а также соответствующие первичные преобразователи (ПП), что позволяет получать данные о процессе резания в реальном времени. Разработанное современное прикладное программное обеспечение дает возможность производить обработку и регистрацию данных для последующей обработки и анализа в масштабе реального времени.

Однако, несмотря на наличие в настоящее время высокоскоростных АЦП и ПП, пригодных для построения систем измерения и регистрации процессов, протекающих при механической обработке, существует очень мало комплексных коммерческих систем такого типа. Фактически все сводится к системам, производимым фирмой Kistler (Швейцария). Эти системы обладают великолепными эксплуатационными характеристиками, но имеют очень высокую стоимость (порядка нескольких десятков тысяч евро).

Целью данной работы являлась разработка и создание системы для измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, с возможностью последующей обработки полученных экспериментальных данных.

В общем случае системы такого типа состоят из следующих функциональных узлов:

- первичного преобразователя, содержащего от одного до шести элементов преобразования сила–измеряемая величина (3 компоненты силы и 3 компоненты крутящего момента);
- измерительного усилителя-преобразователя;
- системы обработки, индикации и регистрации данных, полученных в процессе измерения.

В качестве первичного преобразователя был использован динамометр УДМ-600, обеспечивающий измерение трех компонентов силы резания и одного крутящего момента. Данный динамометр предназначен для измерения сил резания при различных видах механической обработки. Он может одновременно измерять три ортогональные силы  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , а также крутящий момент  $M_{кр}$ . Максимальная нагрузка на ось составляет 6 кН. Заявленная полоса пропускания составляет 0–500 Гц.

После анализа доступных компонентов систем для обработки и регистрации сигналов выбор был сделан в пользу оборудования фирмы National instruments (NI). Так, в качестве измерительного усилителя-

преобразователя применялся модуль С-серии NI-9237, позволяющий производить синхронную обработку сигналов тензометрических датчиков. Скорость оцифровки составляет 50 кГц при разрешении 24 бит. Данный модуль предназначен для работы в составе модульных измерительных систем серии с DAQ и систем с RIO. Отличительной особенностью модуля является возможность работать как с полномостовыми, так и полу-/четверть мостовыми тензорезистивными датчиками. Существует возможность проводить программно-аппаратную калибровку измерительной системы на базе данного модуля. В нем имеется адаптивный фильтр нижних частот (ФНЧ), изменяющий свою полосу пропускания в зависимости от скорости оцифровки сигнала. Эти функциональные возможности значительно упрощают построение измерительных систем на базе данного модуля, т.к. обеспечивают простое подключение первичных преобразователей, особенно полу- и четвертьмостовой конфигурации, простую и быструю калибровку измерительной системы, а также первичную фильтрацию измеряемого сигнала от помех.

Система обработки, индикации и регистрации данных состоит из следующих компонентов:

- шасси сбора данных типа NI cDAQ-9172, в одном из слотов которого смонтирован модуль NI-9237. Шасси имеет 8 слотов для модулей С-серии, что позволяет создавать достаточно сложные и гибкие тестовые системы, т.к. номенклатура модулей С-серии достаточно широка и включает в себя различные модули аналоговых и цифровых входов/выходов, интерфейсные и специализированные модули [2]. Данное шасси имеет интерфейс USB 2.0 для обмена данными с управляющим контроллером и обеспечивает питание смонтированных модулей [3];

- в качестве управляющего контроллера используется система на базе шасси National Instruments PXI-1042 с установленным контроллером NI PXI-8106. Шасси PXI-1042 предназначено для построения сложных тестовых систем на базе модульных приборов формата PXI. В данном шасси может быть размещено до 8 модулей формата PXI. Шасси обеспечивает обмен данными между установленными модулями и управляющим контроллером верхнего уровня, а также тактовую синхронизацию модулей либо от встроенного источника опорной частоты 10 МГц, либо от внешнего источника в случае работы в качестве ведомого устройства в сложной системе. В случае работы в качестве ведущего устройства работает в качестве источника опорной частоты для синхронизации ведомых устройств [4];

- контроллер NI PXI-8106 представляет собой специализированный встроенный компьютер на базе процессора Intel Core 2 Duo под управлением операционной системы Windows Vista Business. В качестве среды разработки применяется программное обеспечение NI LabView Full Development System. Для взаимодействия среды разработки, прикладного программного обеспечения и аппаратных средств выступает драйвер устройств NI Measurement and Automation Explorer [5–7];

- в качестве накопителя используется USB-flash диск объемом 32 Гб. Применение внешнего накопителя обусловлено удобством эксплуатации, т.к. не занимает место на встроенном в контроллер винчестере и упрощается перенос результатов экспериментов на другие компьютеры для дальнейшей обработки и анализа.

Структурная схема системы приведена на рисунке 1. Внешний вид компонентов системы представлен на рисунке 2.

Проведенный анализ измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, позволил сформулировать следующие требования к проектируемой системе:

- количество измерительных каналов: 3, для каждого из компонентов силы резания;
- тип используемого первичного преобразователя: УДМ-600, или аналогичный по функциям;
- предел измерения сил (определяется используемым первичным преобразователем):  $\pm 6000$  Н;
- отображение измеренных значений сил для каждого канала;
- возможность отображения изменения сил во времени в виде осциллограммы;
- возможность регистрации полученных данных на цифровой носитель.

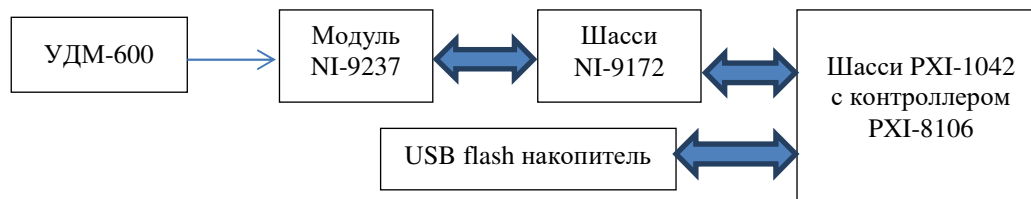
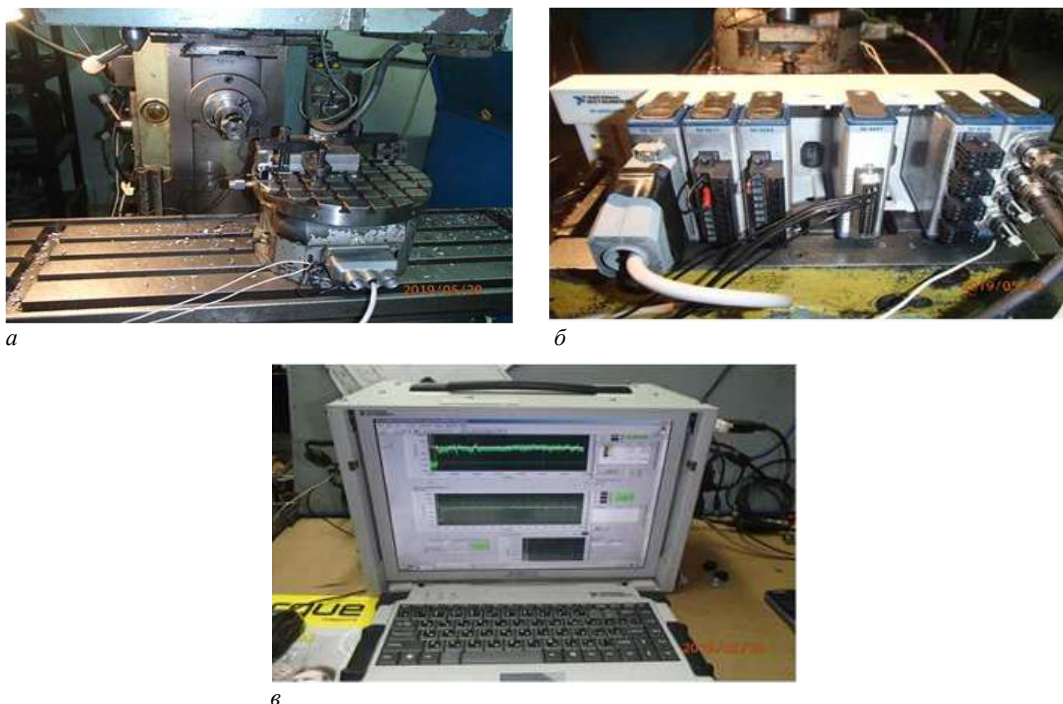


Рисунок 1. – Структурная схема системы обработки, индикации и регистрации данных



**а** – динамометр УДМ600, смонтированный на станке;  
**б** – шасси NI cDAQ-9172 с установленными и подключенными модулями, **в** – шасси PXI-1042

**Рисунок 2. – Компоненты системы**

Исходя из технических характеристик динамометра УДМ-600, а именно рабочего частотного диапазона 0–500 Гц, согласно теореме Котельникова, при  $F_c = 500$  Гц минимально достаточный период дискретизации составляет

$$T_d = \frac{1}{2 F_c} = \frac{1}{2 \cdot 500} = 0,001 \text{ с},$$

что соответствует частоте оцифровки 1000 Гц. Для повышения точности обработки сигнала частота оцифровки была выбрана 25 кГц. Дальнейшее повышение частоты оцифровки нецелесообразно, т.к. приводит к сильной нагрузке канала передачи данных между NI cDAQ-9172 и NI PXI-8106. И как показали натурные эксперименты, скорость передачи данных резко падает при наличии вблизи таких источников электромагнитных помех, как работающие мощные электродвигатели, частотные преобразователи и сервосистемы, что характерно для современных станков ЧПУ. В результате серии экспериментов выбор был сделан в пользу частоты оцифровки 25 кГц: на этой частоте система стабильна, оцифрованный сигнал имел приемлемое качество и оставалась возможность увеличения частоты оцифровки или добавления каналов обработки аналоговых или цифровых данных.

Система работает следующим образом. Динамометр УДМ-600 является тензорезистивным датчиком, выполненным по полумостовой схеме. Схема подключения изображена на рисунке 3 [1].

Подключение динамометра к модулю NI-9237 выполнено по стандартной схеме подключения модуля для полумостовых тензорезистивных датчиков.

Наиболее важными компонентами программного обеспечения (фирмы National instruments) управления измерительной системой являются:

- драйвер устройств NI Measurement and Automation Explorer (NI MAX) для взаимодействия периферийных устройств со средой разработки;
- среда разработки LabView, основанная на технологии виртуальных приборов и обеспечивающая сбор и обработку данных с периферийных устройств посредством прикладных программ.

Калибровка измерительной системы, состоящей из динамометра УДМ-600 и модуля NI-9237, осуществлялась посредством драйвера устройств NI MAX при помощи эталонного динамометра. Процесс калибровки динамометра УДМ-600 для оси Z изображен на рисунке 4. Для оси X и Y были проведены аналогичные процедуры.

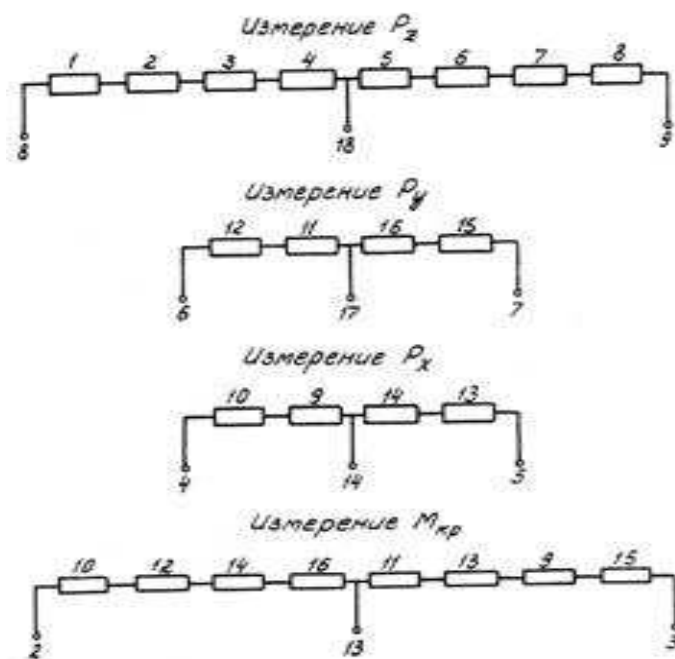


Рисунок 3. – Схема подключения динамометра УДМ-600



Рисунок 4. – Процесс калибровки оси Z

Посредством драйвера устройств было сформирована задача по синхронной выборке пакета данных. Пакет данных состоял из 1250 выборок для каждого из трех каналов с частотой оцифровки 25 кГц по запросу от прикладного программного обеспечения, состоящего из двух модулей:

- модуля сбора, первичной обработки и регистрации данных в виде измерительных файлов;
- модуля чтения и обработки данных из измерительных файлов.

В задачи модуля сбора данных входил сбор оцифрованных данных, получаемых от динамометра УДМ-600 и оцифрованных модулем NI-9237. Также данным модулем производится нормализация сигналов, первичная обработка полученных данных и регистрация их в виде файлов для дальнейшей обработки. Функция нормализации необходима, т.к. в силу конструктивных особенностей у динамометра УДМ-600 существует большой дрейф нуля при измерениях, что требует оперативной коррекции перед началом эксперимента.

В задачу модуля чтения и обработки данных из файлов входило чтение измерительных файлов, записанных в ходе экспериментов. Запись в измерительные файлы производится пакетами, состоящими

из массивов выборок размерностью  $3 \times 1250$ , поэтому для дальнейшей обработки необходимо произвести преобразование пакетов выборок в единый массив данных размерностью  $3 \times N$ , который может быть подвергнут дальнейшей обработке.

Передняя панель виртуального прибора модуля сбора данных показана на рисунке 5. На ней расположены две осциллограммы, на которых отображается два вида данных: измеренные мгновенные значения сил резания с частотой выборок 25 кГц, и дающие представления о быстропротекающих процессах при проведении эксперимента, и среднеквадратичные значения, полученные усреднением 1250 выборок, которые наглядно отображают динамику изменения сил резания в процессе эксперимента, – для этой осциллограммы имеется возможность управлять отображением отдельных компонент силы резания.

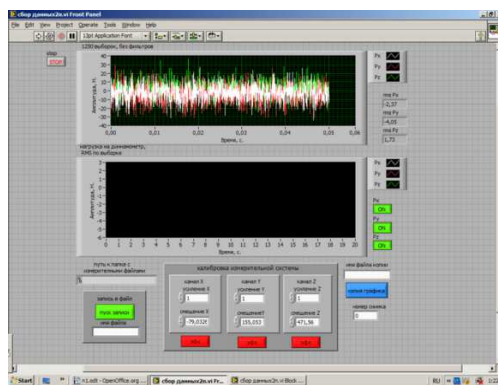


Рисунок 5. – Лицевая панель модуля сбора данных

Кроме того, на лицевой панели имеются элементы управления, позволяющие оперативную коррекцию нуля, коэффициента усиления для каждой компоненты силы резания, регистрации полученных данных в виде записи в измерительные файлы, а также получение копий графика среднеквадратичных значений в виде BMP-файлов. При записи данных о ходе эксперимента в измерительные файлы система автоматически генерирует три файла:

- измерительный файл с расширением \*.lvm, в котором регистрируются данные, полученные модулем NI-9237, подвергнутые только корректировке нуля и коэффициента усиления (нормализации);
- измерительный файл с именем типа rms-\*.lvm, который содержит данные, полученные в ходе эксперимента и подвергнутые усреднению (вычислению RMS для 1250 выборок);
- файл табличного формата с расширением \*.csv, содержащий данные, полученные в ходе эксперимента, подвергнутые усреднению и записанные в формате, доступном для чтения при помощи Microsoft Excel.

Сам виртуальный прибор, на котором реализован модуль сбора данных, базируется на трех структурах: одной Timed Loop, отвечающей за синхронный сбор данных, и двух While Loop, одна из которых отвечает за нормализацию данных и видимость элементов графиков, вторая – за запись данных в файл. Обмен блоками данных между структурами реализован при помощи уведомителей и локальных переменных.

**Заключение.** Предложенная система для измерения и регистрации процессов, протекающих при высокоскоростной обработке материалов, с последующей обработкой (оцифровкой) полученных экспериментальных данных, передачей данных в специализированное программное обеспечение, может служить в качестве измерительного инструмента на предприятиях машино- и приборостроительного профиля Республики Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ / ВНИИ ; под ред. А.Д. Мартынова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ВНИИ, 1969. – 21 с.
2. Модули CompactDAQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/compactdaq-modules-category#facet:&productBeginIndex:0&orderBy:&pageView:grid&pageSize:&>. – Дата доступа: 10.12.2020.
3. CDAQ-9172 CompactDAQ Chassis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/documentation/en/compactdaq-chassis/latest/cdaq-9172>. – Дата доступа: 15.12.2020.
4. NI PXI-1042 Series User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371088a.pdf>. – Дата доступа: 12.12.2020.

5. NI PXI-8106 User Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372096b.pdf>. – Дата доступа: 15.12.2021.
6. NI 9237, 4 AI,  $\pm 25$  mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf). – Дата доступа: 15.12.2021.
7. NI 9237 GETTING STARTED GUIDE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374186f.pdf> – Дата доступа: 15.12.2021.

Получена 30.11.2020

**SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX FOR MEASUREMENT, REGISTRATION  
AND FOLLOWING PROCESSING OF PROCESSES PROCESSING  
AT HIGH-SPEED MECHANICAL PROCESSING**

**S. ABRAMENKO, V. ANISIMOV, K. KORBA**

*The proposed system for measuring and recording the processes occurring during high-speed processing of materials with subsequent processing (digitization) of the obtained experimental data and their transfer to specialized software. Technical requirements for such systems are formulated, the choice of structural elements is justified. A virtual device is proposed that implements a data acquisition module based on three structures: one Timed Loop, which is responsible for synchronous data collection, and two While Loop, one of which is responsible for data normalization and the visibility of graph elements, and the second is for writing data to file.*

**Keywords:** software and hardware complex, controller, converter.