

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ НА БАЗЕ ДИНАМОМЕТРОВ СЕРИИ УДМ

В.Б. Самойлов

samoylov.v@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Выполнен анализ существующих систем измерения сил при механической обработке деталей на металлорежущих станках, рассмотрены варианты применения в качестве измерительных преобразователей как специализированных готовых решений, так и динамометрических головок серии УДМ. Показаны недостатки известных схемотехнических решений по модернизации этих динамометров, связанные с необходимостью применения разнородных комплектов усилительной и преобразующей аппаратуры. Предложены низкобюджетные решения, позволяющие повысить точность и достоверность измерений, осуществить управление и запись результатов измерений в современной программной среде с использованием виртуальных приборов. Реализованы аппаратно-программные способы обработки измерительной информации, сопровождающие в режиме реального времени экспериментальные исследования. Созданные универсальные масштабируемые системы измерения моментов и сил резания применены как при проведении научно-исследовательских работ, так и в учебном процессе университета

Ключевые слова

Модернизация, динамометр, силы резания, виртуальный прибор

Поступила 22.03.2018

© Автор(ы), 2019

Работа выполнена по программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», мероприятие: 1.2.1. Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук, направление «Создание и обработка композиционных керамических материалов», проект «Повышение эффективности механической и абразивной обработки деталей из композиционных керамических материалов»

Введение. В последнее десятилетие наблюдается увеличение интенсивности режимов резания в механообработке, связанное с повышением производительности труда, снижением затрат, воздействием на окружающую

щую среду. Несмотря на широкое применение математических методов расчетов явлений в зоне резания, актуальны задачи натурального эксперимента, необходимые для точного понимания процессов, анализа и оптимизации алгоритмов технологии обработки. Измерения сил резания позволяют определить физико-механические характеристики материалов и их пригодность к обработке резанием, проанализировать механизм износа режущего инструмента, дать информацию для определения размеров конструкций и компонентов станков. Особенно актуально измерение сил резания в связи с постоянно возрастающим использованием труднообрабатываемых материалов, требующим управления процессом резания, детального анализа и применения экспертных знаний для эффективного и воспроизводимого производственного процесса. Настоящая работа посвящена вопросу создания универсального масштабируемого решения для реализации таких задач на основе применения динамометров-датчиков серии УДМ с использованием унифицированной вторичной аппаратуры и технологий виртуальных приборов.

В работе [1] подробно изложены основы классификации приборов для измерения составляющих сил резания, рассмотрены конструкции, построенные на разных физических принципах, дан их подробный сравнительный анализ, освещены вопросы эксплуатации динамометров. Методический подход автора к освещению темы до сих пор не потерял актуальность и может быть применим для современной оценки состояния вопроса.

В настоящее время есть четыре направления решения задач, связанных с измерением сил резания, — применение высокобюджетных специализированных комплексов, как правило, импортных [2–7]; попытки разработок самостоятельных программно-аппаратных решений, включая оригинальные чувствительные элементы [8–10]; использование стандартных силоизмерительных первичных преобразователей и вторичной аппаратуры [11, 12]; модернизация широко известных разработок, выпущенных в XX в. [13–15]. В этих случаях необходима замена тензоусилителя с дополнительным согласующим блоком, применение отдельного АЦП и соответствующего ПО. Такие самодельные универсальные устройства позволяют получить результаты с погрешностью ~ 30 % [15].

Постановка задачи. В настоящей работе рассмотрены варианты применения такого распространенного динамометра, как УДМ конструкции ВНИИ [15] для решения задач измерения сил резания путем глубокой модернизации аппаратной части комплекта. Прибор выпускается в трех моделях с различными максимальными нагрузками на верти-

кальные и горизонтальные опоры: УДМ-100, УДМ-600 и УДМ-1200, схемы соединения тензорезисторов и их номиналы одинаковы. Это позволило построить унифицированную систему вторичной аппаратуры и ПО, где в качестве первичных преобразователей использованы динамометры-датчики УДМ, снабженные выходным разъемом 2РТ32У8НШЗ (рис. 1).

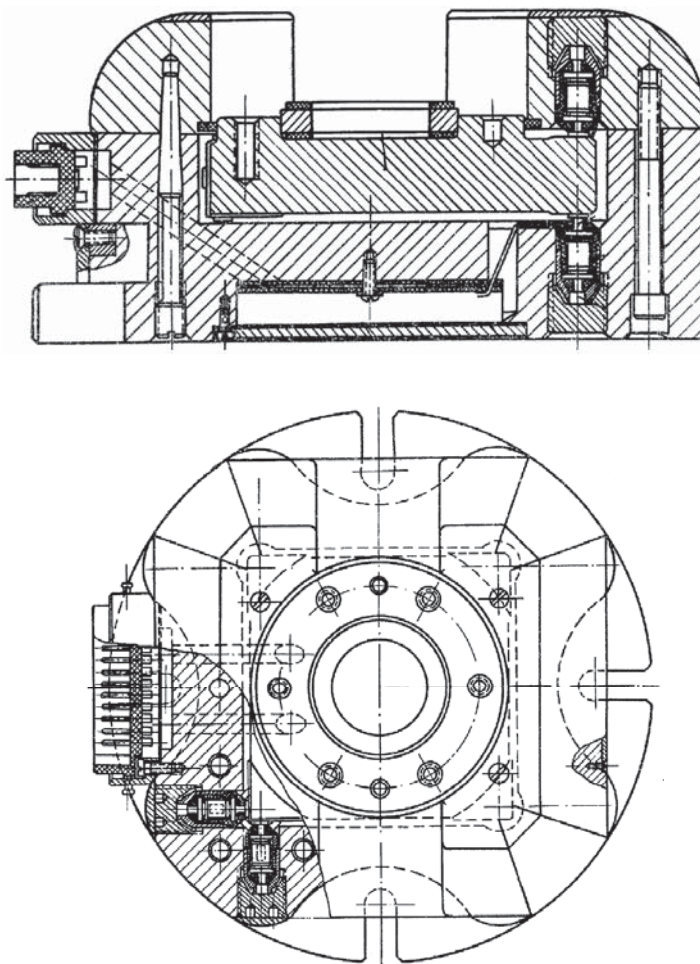


Рис. 1. Общий вид динамометра-датчика УДМ конструкции ВНИИ [15]

Для повышения точности измерений, возможности масштабирования решений и существенного снижения стоимости предложено программно-аппаратную часть выполнить на базе решений от компании National Instruments, используя один специализированный модуль, работающий в комплекте с универсальными интерфейсными блоками.

Исходные данные, варианты решения. За основу комплекта взят модуль NI-9237 [16], устанавливаемый в контейнеры с одним слотом и интерфейсами USB/Ethernet/WiFi [17] или в шасси NI cDAQ-9174 [18], если необходимо задействовать одновременно до четырех измерительных модулей под разные задачи измерения. Измерения проводились в программной среде приложений NI SignalExpress [19], которая максимально эффективно ис

пользует концепцию виртуальных приборов, позволяя интерактивно, в реальном времени проводить измерения, не прибегая к программированию. Эта среда может использоваться для сбора, генерации, анализа, сравнения, загрузки и сохранения сигналов. Также было применено программное обеспечение LabVIEW 2017.

Модуль NI-9237 представляет собой 4-канальный мостовой/полумостовой модуль аналогового ввода, специально предназначенный для работы с тензорезисторами. Каждый канал имеет независимый 24-разрядный дельта-сигма (с аналоговой предварительной фильтрацией) АЦП и входной усилитель, что позволяет одновременно оцифровывать сигналы со всех четырех каналов. Поскольку длина линий связи динамометра и модуля может составлять несколько метров, такая схема подключения позволяет компенсировать ошибки усиления на линиях питания, вызванные их сопротивлением. Модуль позволяет выбрать напряжения питания 2,5; 3,3; 5 или 10 В.

В NI-9237 используется сочетание аналоговой и цифровой фильтрации, что обеспечивает точное представление сигналов в полосе, а также надежное подавление внеполосных сигналов. Фильтры осуществляют распознавание сигналов с учетом рабочего диапазона частот сигнала. Рассматриваются три основных типа полосы: сквозная, полоса режекции и свободная от зеркальных частот. Модуль NI-9237 отображает сигналы внутри полосы пропускания, характеризуемой главным образом равномерностью внутри полосы и фазовой нелинейностью. Все сигналы, присутствующие в полосе, свободной от зеркальных частот, представляют собой правильно восстановленные сигналы или сигналы, корректно отфильтрованные с помощью полосовых фильтров.

Сигналы, расположенные в пределах полосы пропускания, имеют частотно-зависимый коэффициент усиления или ослабления. Небольшое изменение коэффициента усиления относительно частоты называется неравномерностью внутри полосы пропускания. Цифровые фильтры NI-9237 подстраивают частотный диапазон полосы пропускания под заданную частоту передачи данных. Таким образом, коэффициент усиления или ослабления на отдельно взятой частоте зависит от частоты передачи данных.

Фильтр значительно ослабляет все сигналы выше частоты среза. Основное назначение фильтра — исключить эффект подмены частот. Таким образом, частота среза фильтра прецизионно меняется пропорционально изменению частоты передачи данных. Полоса, свободная от зеркальных частот, в NI-9237 определяется способностью фильтра подавлять частоты выше заградительной частоты и равняется разности частоты передачи данных и заградительной частоты.

Модуль NI-9237 имеет встроенный эталон времени с частотой сигнала 12,8 МГц, однако модуль также может принимать внешний сигнал синхронизации или формировать собственный эталонный сигнал. Частота передачи данных находится внутри соответствующего диапазона частот передачи данных. При использовании внутреннего источника эталонной частоты 12,8 МГц в результате можно получить следующие частоты передачи данных: 50; 25; 16,67; 1,613 кГц; полный диапазон усиления ± 25 мВ/В или 2,9802 нВ/В на мл. знач. бит; точность 0,05 % при температуре 25 °С (± 5 °С).

Шасси NI cDAQ-9174 [18] представляет собой 4-слотовое USB-шасси, предназначенное для работы с модулями ввода/вывода C Series. Шасси cDAQ-9174 позволяет измерять широкий набор аналоговых и цифровых сигналов ввода/вывода и датчиков с помощью интерфейса Hi-Speed USB 2.0. Система cDAQ состоит из трех частей: модулей ввода/вывода C Series, интерфейса модулей cDAQ и USB-STC2. Эти компоненты осуществляют оцифровку сигналов, цифроаналоговое преобразование для генерации аналоговых выходных сигналов, измеряют и контролируют цифровые сигналы ввода/вывода, а также обеспечивают преобразование сигнала. Модули ввода/вывода C Series позволяют выполнять «горячую» замену и автоматически детектируются шасси cDAQ-9174. Доступ к каналам ввода/вывода осуществляется с помощью программного драйвера NI-DAQmx. Интерфейс модулей cDAQ управляет передачей данных между USB-STC2 и модулями C Series I/O. Интерфейс также управляет автоматическим обнаружением, маршрутизацией сигналов и синхронизацией.

Первый вариант модернизации системы предусматривает установку модуля NI-9237 в 4-слотовое шасси NI cDAQ-9174, которое в составе системы позволяет еще параллельно, например, измерять температуру с помощью термопар (до 12 каналов), задействовать до четырех вибродатчиков и т. д. На рис. 2 показан общий вид системы измерения сил резания на основе динамометра-датчика УДМ с установленным столиком. На столе закрепляется заготовка для обработки фрезерованием или сверлением. Кабели для питания динамометра-датчика и съема измерительной информации помещаются в специальные защитные металлорукава, предохраняющие от стружки и СОЖ.

Кабели подключаются к модулю с помощью разъемов RJ50, обеспечивая измерение трех составляющих силы резания и крутящего момента в горизонтальной плоскости. Возможна установка на динамометр-датчик державки резца, используемой для изучения сил резания при токарных работах. Дополнительно герметизированы места ввода кабелей в разъем датчика и обеспечено их надежное механическое крепление.

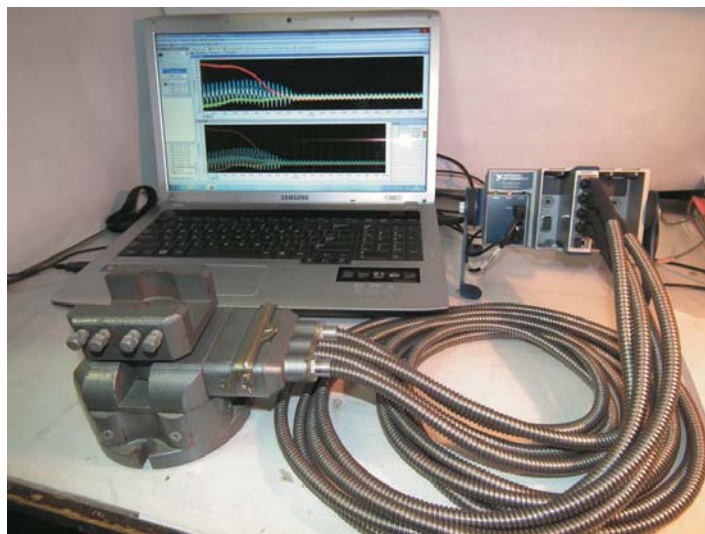


Рис. 2. Система измерения сил резания с модулем 9237 и шасси 9174

Существенно снизить стоимость возможно с применением шасси на один слот с интерфейсами USB, Ethernet или WiFi. В последнем случае отпадает необходимость в проводной связи системы с ноутбуком, что создает дополнительные удобства эксплуатации. Однако, как и в первом варианте, необходимо наличие напряжения питания 220 В. На рис. 3 показана система с модулем NI-9237, установленным в шасси NI WLS/ENET-9163.

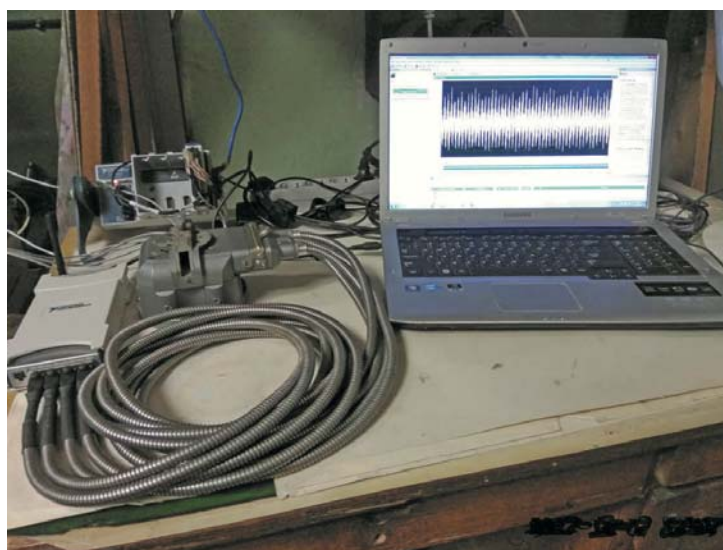


Рис. 3. Система измерения сил резания с модулем 9237 и шасси 9163

Практическая реализация и результаты. На рис. 4 показана схема подключения динамометров-датчиков моделей УДМ по полумостовой схеме как для измерения трех составляющих сил резания, так и крутящего момента в горизонтальной плоскости.

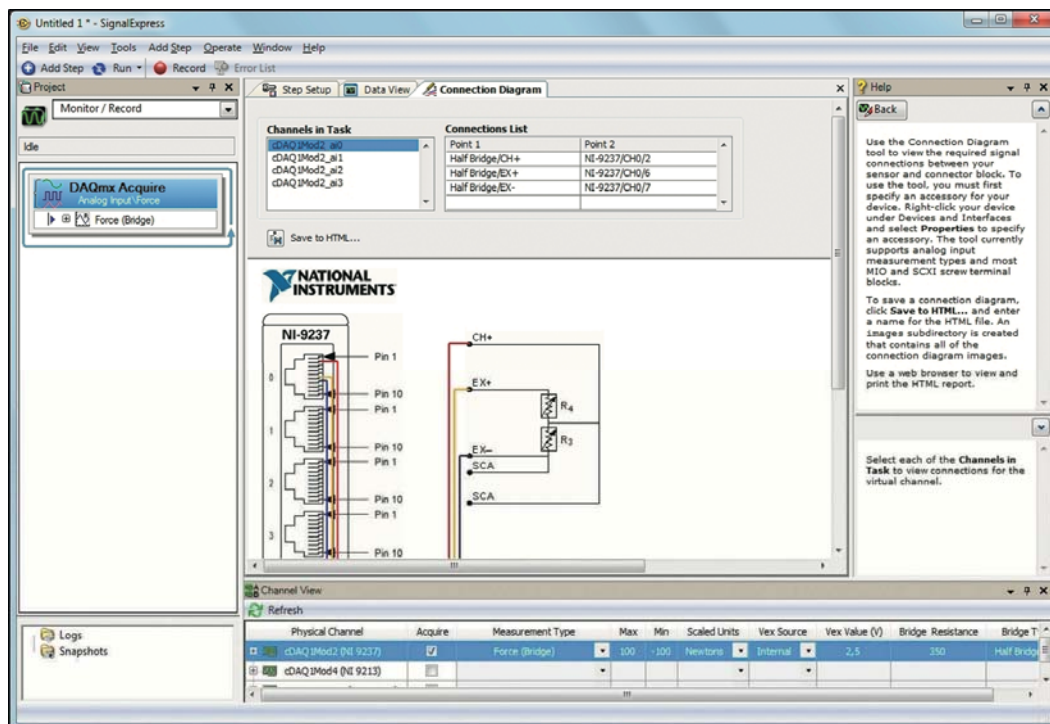


Рис. 4. Подключения тензорезисторов по полумостовой схеме

На рис. 5 приведены программные настройки измерительных каналов модуля, которые позволяют выставить значения напряжения питания тензорезисторов, выбрав предварительно схему включения, пределы измерений и значения шунтирующих резисторов, избегая при этом применения дополнительных усилителей, блоков питания и шунтов, что существенно снижает стоимость, повышая при этом эксплуатационные свойства системы измерения сил и крутящего момента.

Собственный сигнал шума после прогрева системы в течение 10 мин при этом не превышает долей процента, что позволяет сделать вывод о правильном выборе аппаратно-программного обеспечения как цепи питания тензорезисторов, так и цепи измерений.

Тарировка системы в целом проводилась по стандартной методике [15]. При этом учитывали, что при массе установленных на динамометре инструменте или заготовки до 5 кг можно исследовать мгновенные значения сил резания в диапазоне частот от 0 до 500 Гц с погрешностью не более 10 %. Нагружение осуществлялось статическим способом образцовым динамометром модели ДОСМ-3-1У с шагом до 1 кН с одновременной фиксацией результатов замеров с помощью виртуального прибора (рис. 6).

Результаты калибровки системы показывают линейность во всем диапазоне измеряемых сил, что говорит о хорошем состоянии механической и электрической частей конкретного динамометра-датчика (рис. 7).

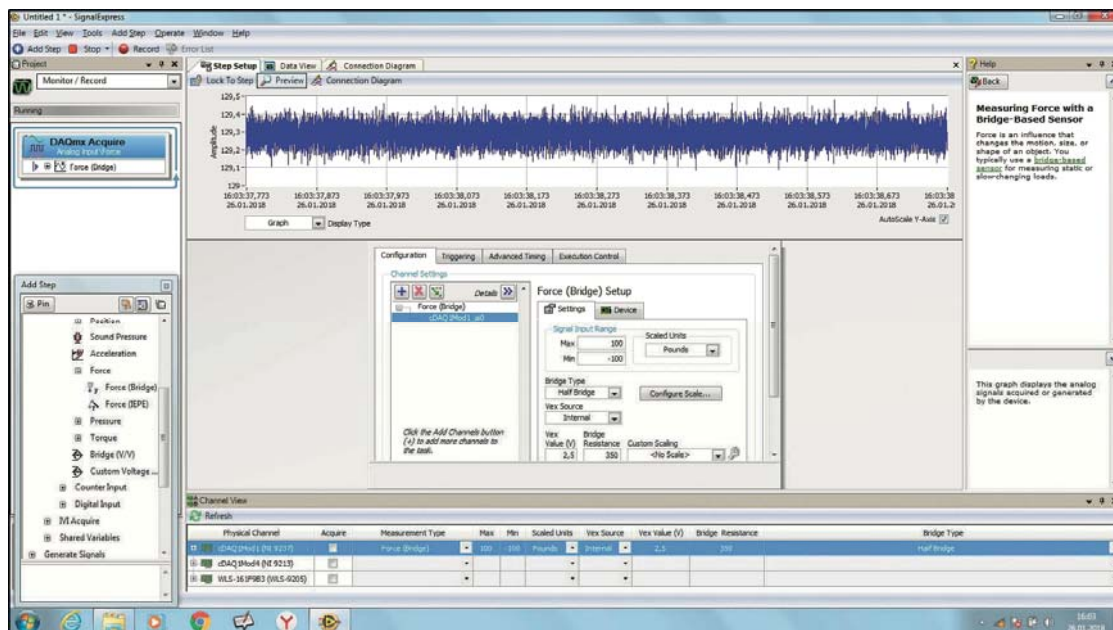


Рис. 5. Инициализация измерительной системы

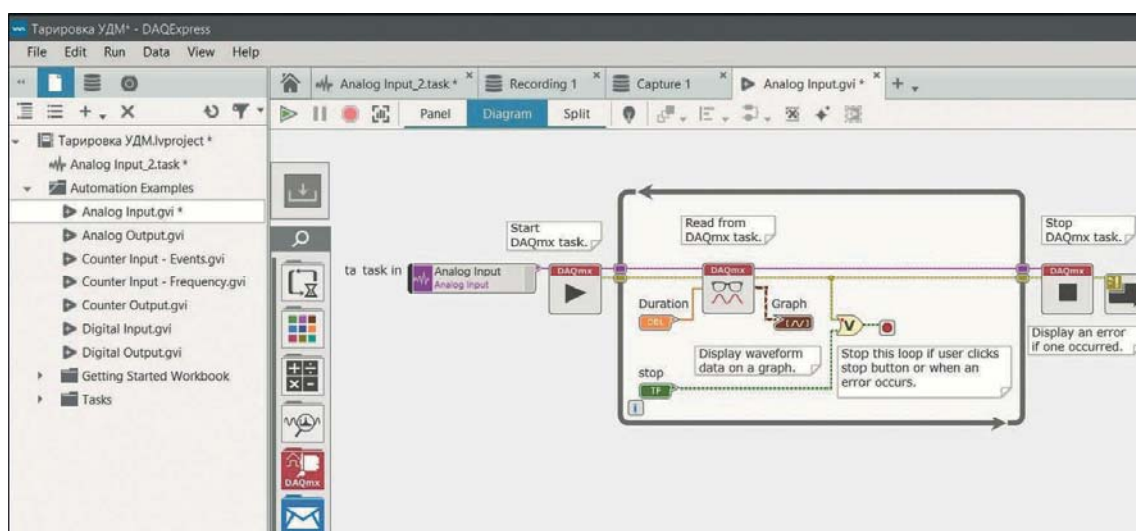


Рис. 6. Виртуальный прибор в среде DAQExpress

С учетом коэффициента усиления автоматически осуществляется пересчет измеренных значений с АЦП в величину составляющей силы резания. В случае нелинейности этой характеристики в среде LabVIEW возможно создание индивидуальной табличной или аналитической зависимости, что существенно повышает точность измерений в онлайн режиме. Показанные на рис. 7 суммарные стандартные погрешности (выделены красным) не превышают 2 %, что позволяет сделать вывод о пригодности предлагаемого программно-аппаратного решения для задач измерения сил с помощью динамометра-датчика серии УДМ.

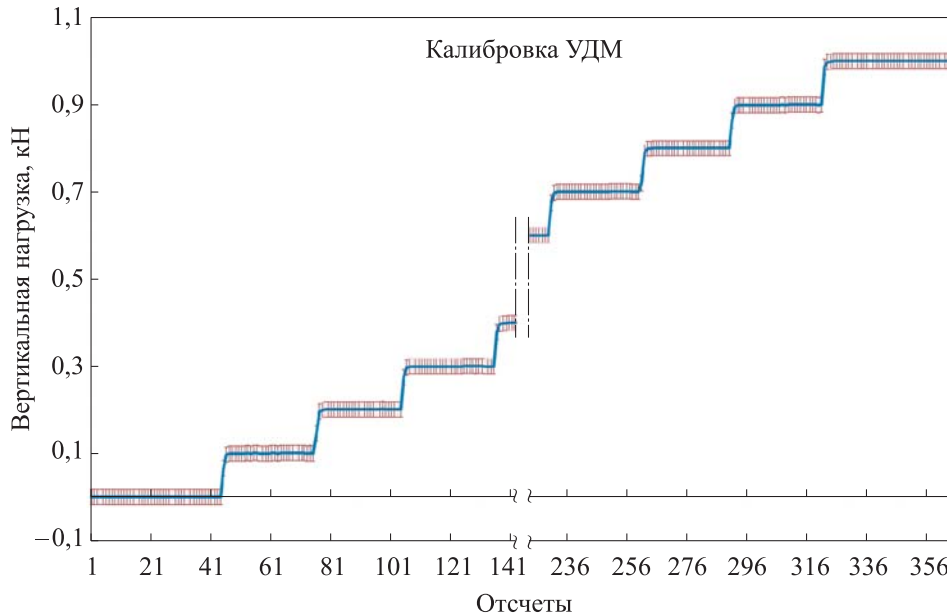


Рис. 7. Калибровка системы на основе динамометра-датчика УДМ-100

При использовании модуля NI-9237 с различной вторичной интерфейсной аппаратурой не выявлено существенного различия в результатах измерений, что позволяет рекомендовать предлагаемые три варианта для практического применения. На рис. 8 приведен фрагмент результатов измерений, проведенных в рамках НИР.

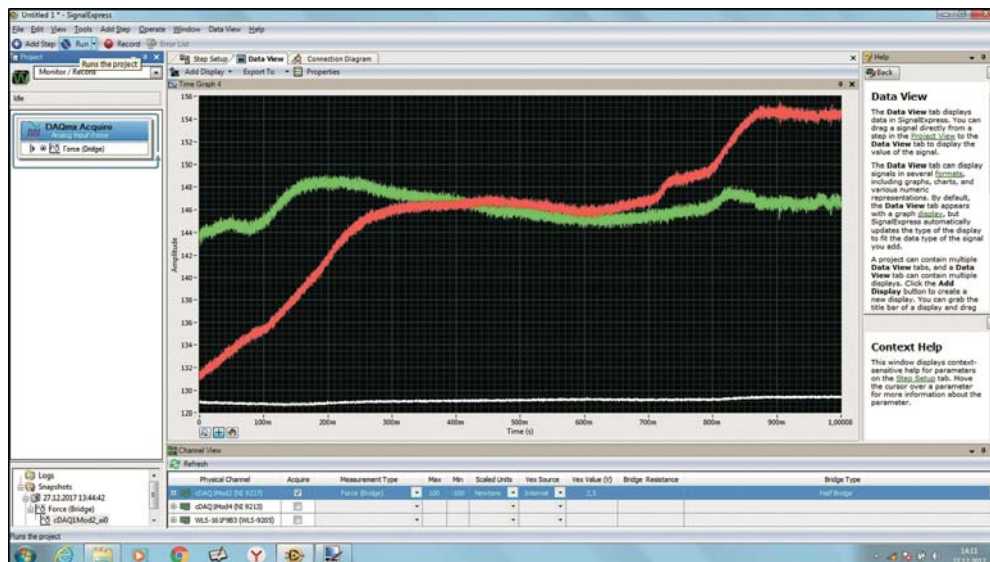


Рис. 8. Фрагмент записи сил резания в среде NI SignalExpress

Динамические свойства динамометра-датчика существенно зависят от массы устанавливаемого приспособления для закрепления заготовки или режущего инструмента. В настоящее время проводятся работы для обеспечения возможности динамической калибровки измерительной системы.

Заключение. Предложенные варианты модернизации динамометров УДМ конструкции ВНИИ показали соответствие заявленным требованиям по технико-экономическим показателям точности и стоимости, обеспечили универсальное масштабируемое низкобюджетное решение для задач измерения сил резания и крутящих моментов. Применение указанных программно-аппаратных разработок реализовано как при проведении НИР, так и в учебном процессе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Полетика М.Ф. Приборы для измерения сил резания. М., Машгиз, 1962.
- [2] Древаль А.Е., Васильев С.Г., Виноградов Д.В. и др. Контрольно-измерительный диагностический стенд для экспериментальных исследований в технологии механической обработки. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 12. DOI: 10.7463/1214.0749286
- [3] Утенков В.М., Быков П.А. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков. *Инженерный вестник*, 2012, № 10, с. 1–23.
- [4] Compact multi-component dynamometer up to 10 kN. *kistler.com: веб-сайт*. URL: <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa> (дата обращения: 20.09.2017).
- [5] Multi axis load cell — MC134 (6 axis). *dacell.com: веб-сайт*. URL: http://www.dacell.com/ru/ru_multiloadcells/show/view/cno/30/id/433 (дата обращения: 20.09.2017).
- [6] Многокомпонентные датчики. *gtm-gmbh.com: веб-сайт*. URL: <http://www.gtm-gmbh.com/ru/produksiya/mnogokomponentnyy-datchik.html> (дата обращения: 20.09.2017).
- [7] LFX-A compact 6-component force transducer with built-in amplifier. *kyowa-ei.com: веб-сайт*. URL: <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/lfx-a/index.html> (дата обращения: 20.10.2017).
- [8] Безъязычный В.Ф., Кордюков А.В., Тимофеев М.В. и др. Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2014, т. 2, № 1, с. 171–176.
- [9] Порватов А.Н. Разработка станочной динамометрической палеты с беспроводной передачей данных. *Станочный парк*, 2013, № 3, с. 29–30.
- [10] Туманов А.А. Двухкомпонентный динамометр для измерения составляющих силы резания при фрезеровании. *Тр. XVII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»*. Томск, 2015, с. 368–369.
- [11] Набилкин А.Ю., Кравченко С.А., Гилев Г.А. и др. Компьютерная система измерения сил резания. *Вестник СГТУ*, 2011, № 2, с. 248–252.
- [12] Давыдов В.М., Богачев А.П., Никитенко А.В. Устройство для измерения составляющих сил резания. Патент 2397856 РФ. Заявл. 18.03.2009, опубл. 27.08.2010.

- [13] Шуляк Я.И., Васильев С.Г. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600. *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*, 2016, № 1, с. 1–12.
- [14] Павлов И.О., Ушаков М.В., Воробьёв И.А. Система для измерения сил резания. Компоновка, тарирование и оценка погрешности. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2013, № 10, с. 159–168.
- [15] Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. М., ВНИИ, 1983.
- [16] NI-9237. *ni.com: веб-сайт*. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/c-series-strain-bridge-input-module?modelI=122190> (дата обращения: 20.11.2017).
- [17] NI-9237. *ni.com: веб-сайт*. URL: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209891> (дата обращения: 19.11.2017).
- [18] cDAQ-9174. *ni.com: веб-сайт*. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/compactdaq-chassis?modelId=125698> (дата обращения: 20.11.2017).
- [19] SignalExpress. Вводный курс. *training-labview.ru: веб-сайт*. URL: <http://training-labview.ru/templates/standard/opencore/scormsigEXSPRESS/mobile/index.html> (дата обращения: 20.09.2017).

Самойлов Владимир Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Самойлов В.Б. Модернизация системы для измерения сил резания на базе динамометров серии УДМ. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5, с. 91–103. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-91-103

MODERNIZATION OF THE SYSTEM FOR MEASURING CUTTING FORCES ON THE BASIS OF UDM DYNAMOMETER SERIES

V.B. Samoylov

samoylov.v@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the research was to analyze the existing systems for measuring forces during machining of parts on metal-cutting machine tools, and to consider the options for using both specialized ready-made solutions and dynamometer heads of the UDM series as measuring transducers. The study shows the drawbacks of the well-known general-circuit solutions for the modernization of these dynamometers, associated with the need to use heterogeneous sets of amplifying

Keywords

Modernization, dynamometer, cutting force, virtual instrument

and transforming equipment. We propose low-budget solutions to improve the accuracy and reliability of measurements, to control and record measurement results in a modern software environment using virtual instruments. As a result of the study, we implemented hardware and software methods for processing measurement information, accompanying experimental studies in real time. The universal scalable systems developed for measuring moments and cutting forces are used both during academic research work and educational process of the university

Received 22.03.2018

© Author(s), 2019

The work is carried out under the program “Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia”, event: 1.2.1. Scientific studies are done by research teams under the guidance of doctors of science; the research area is “Creation and processing of composite ceramic materials”, the project is “Improving the efficiency of mechanical and abrasive machining of parts made of composite ceramic materials”

REFERENCES

- [1] Poletika M.F. Pribory dlya izmereniya sil rezaniya [Devices for measuring cutting forces]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962.
- [2] Dreval' A.E., Vasil'yev S.G., Vinogradov D.V., et al. Measuring diagnostic stand for experimental researches in technology machining. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 12 (in Russ.). DOI: 10.7463/1214.0749286
- [3] Utenkov V.M., Bykov P.A. Possibilities of using Kistler dynamometer for testing metal cutting machines. *Inzhenernyy vestnik*, 2012, no. 10, pp. 1–23 (in Russ.).
- [4] Compact multi-component dynamometer up to 10 kN. *kistler.com: website*. Available at: <https://www.kistler.com/en/product/type-9129aa> (accessed: 20.09.2017).
- [5] Multi axis load cell — MC134 (6 axis). *dacell.com: website*. Available at: http://www.dacell.com/ru/ru_multiloaddcells/show/view/cno/30/id/433 (accessed: 20.09.2017).
- [6] Mnogokomponentnye datchiki [Multicomponent sensors]. *gtm-gmbh.com: website* (in Russ.). Available at: <http://www.gtmgmbh.com/ru/produktsiya/mnogokomponentnyy-datchik.html> (accessed: 20.09.2017).
- [7] LFX-A compact 6-component force transducer with built-in amplifier. *kyowa-ei.com: website*. Available at: <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/lfx-a/index.html> (accessed: 20.10.2017).
- [8] Bez'yazychnyy V.F., Kordyukov A.V., Timofeev M.V., et al. Development of dynamometer system for measuring cutting forces when turning. *Izvestiya MGTU “MAMI”*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 171–176 (in Russ.).

- [9] Porvatov A.N. Development of machine chassis dynamometric with wireless data transmission. *Stanochnyy park*, 2013, no. 3, pp. 29–30 (in Russ.).
- [10] Tumanov A.A. [Two-component dynamometer for measuring cutting force components at milling process]. *Tr. XVII Mezhdunar. nauch-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Sovremennyye tekhnika i tekhnologii"* [Proc. XVII Int. Sc.-Pract. Conf. of students, post-graduates and young scientists "Modern technics and technology"]. Tomsk, 2015, pp. 368–369 (in Russ.).
- [11] Nabilkin A.Yu., Kravchenko S.A., Gilev G.A., et al. Computer system for measuring of cutting forces. *Vestnik SGTU* [Vestnik Saratov State Technical University], 2011, no. 2, pp. 248–252 (in Russ.).
- [12] Davydov V.M., Bogachev A.P., Nikitenko A.V. Ustroystvo dlya izmereniya sostavlyayushchikh sil rezaniya [Device for measuring cutting forces components]. Patent 2397856 RF. Appl. 18.03.2009, publ. 27.08.2010 (in Russ.).
- [13] Shulyak Ya.I., Vasil'yev S.G. A modernized UDM-600 dynamometer-based setup for the cutting force measurement. *Mashiny i ustanovki: proektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya* [Machines and Plants: Design and Exploiting], 2016, no. 1, pp. 1–12 (in Russ.).
- [14] Pavlov I.O., Ushakov M.V., Vorob'yev I.A. System for measurement of cutting forces line-up, taring and evaluation of the accuracy. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2013, no. 10, pp. 159–168 (in Russ.).
- [15] Rukovodstvo k universal'nomu dinamometru UDM konstruksii VNII [Manual for universal UDM dynamometer of VNII design]. Moscow, VNII Publ., 1983.
- [16] NI-9237. *Ni.com: website* (in Russ.). Available at: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/c-series-strain-bridge-input-module?modelId=122190> (accessed: 20.11.2017).
- [17] NI-9237. *Ni.com: website*. Available at: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209891> (accessed: 19.11.2017).
- [18] cDAQ-9174. *Ni.com: website*. Available at: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/compactdaq-chassis?modelId=125698> (accessed: 20.11.2017).
- [19] SignalExpress. Vvodnyy kurs [SignalExpress. Induction course]. *training-labview.ru: website* (in Russ.). Available at: <http://training-labview.ru/templates/standard/opencore/scormsigEXPRESS/mobile/index.html> (accessed: 20.09.2017).

Samoylov V.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Material Processing Technologies, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Samoylov V.B. Modernization of the system for measuring cutting forces on the basis of UDM dynamometer series. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 5, pp. 91–103 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2019-5-91-103