

ТРЕХОСЕВОЙ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ДАТЧИК СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СИЛ РЕЗАНИЯ И ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

Д. А. Довгяло¹, К. В. Корба², С. Н. Абраменко³

¹ К. т. н., доцент, заведующий кафедрой энергетики и электроники
УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: d.dovgialo@psu.by

² М. т. н., УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой»,
Новополоцк, Беларусь, e-mail: korba79@mail.ru

³ Старший преподаватель кафедры энергетики и электроники
УО «Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой», Новополоцк, Беларусь, e-mail: s.abramenko@psu.by

Реферат

Разработана конструкция трехкомпонентного силоизмерительного датчика для исследования процессов, протекающих при высокоскоростной обработке (ВСО) конструкционных материалов на станках фрезерной группы. Из опыта эксплуатации системы измерения и регистрации сил резания на базе датчика УДМ-600 сформулированы технические требования к конструкции спроектированного датчика. Произведен обоснованный анализ и выбор материалов, а также комплектующих датчика. Изготовлен опытный образец датчика, проведены его испытания на станке AG-400.

Ключевые слова: измерение сил резания, датчик, высокоскоростная обработка, тензорезистор.

THREE-AXIS FORCE MEASURING SENSOR OF THE SYSTEM FOR MONITORING CUTTING FORCES AND PROCESSES OCCURRING DURING HIGH-SPEED PROCESSING

D. A. Dauhiala, K. V. Korba, S. N. Abramenska

Abstract

The design of a three-component force measuring sensor has been developed to study the processes occurring during high-speed processing of structural materials on milling machines. From the experience of operating a system for measuring and registering cutting forces based on the UDM-600 sensor, technical requirements for the design of the designed sensor are formulated. A reasonable analysis and selection of materials, as well as sensor components, was made. A prototype of the sensor was made, its tests were carried out on the AG-400 machine.

Keywords: measurement of cutting forces, sensor, high-speed processing, strain gauge.

Введение

Определение технических характеристик процессов механической обработки изделий из металлов и сплавов относится к важной производственной задаче. Правильно подобранный инструмент и режимы обработки подобных изделий позволяет повысить производительность производственного процесса и сохранить целостность режущих инструментов. Наиболее опасным режимом обработки является автоколебательный режим с увеличивающейся амплитудой вибрации режущего инструмента или обрабатываемого изделия. Поэтому целью данной работы является разработка конструкции трехкомпонентного силоизмерительного датчика для исследования процессов, протекающих при высокоскоростной обработке, моделирование конструкции и испытания макетного образца на станке AG-400.

Проектирование силоизмерительного датчика

По результатам эксплуатации системы измерения сил резания, принцип работы которой описан в [1], обнаружен ряд недостатков, связанных с конструктивными особенностями динамометра-датчика УДМ-600, а именно:

1. низкая чувствительность датчика, в силу использования проводочных тензорезисторов на бумажной основе, которая с течением времени (данные датчики производились в 60–70-х годах) только ухудшилась;
2. узкая полоса пропускания 0–500 Гц [11], что недостаточно для исследования процессов, протекающих при ВСО;
3. большая монтажная высота, проблематичность закрепления исследуемого образца, что сильно ограничивает размер исследуемого образца и выбор станочного оборудования для проведения исследования (речь идет о вертикально фрезерных обрабатывающих центрах (ОЦ) с мотор-шпинделем, ограничения диктуются рабочем полем станка вдоль оси Z и системой смены инструмента);

4. низкая чувствительность в необходимом диапазоне измерения 0–1 кН. Ряд экспериментов, проведенных на УДМ-600, с использованием фрезы $\varnothing 40$ мм, с числом режущих кромок $Z = 3$, на материале Д16Т при глубине резания 2–4 мм с подачей 0,1 мм/зуб сила резания составляла до 0,5 кН. При ВСО обработке используется, как правило, мелкоразмерный инструмент (1–12 мм) с малой глубиной резания.

Исходя из экспериментальных данных, полученных при эксплуатации измерительной системы, описанной в [1], принято решение разработать и изготовить трехосевой датчик силы для исследования процессов ВСО с улучшенными техническими характеристиками. Основными техническими требованиями к разрабатываемому датчику являются:

1. измерение сил резания вдоль трех ортогональных осей X, Y и Z.
2. Диапазон измеряемых нагрузок 0–1,5 кН для каждой оси.
3. Возможность присоединения оснастки на базе универсально сборных приспособлений с пазом 8 мм (УСП-8) или другой оснастки для закрепления образцов исследуемого материала или деталей.
4. Монтажная высота в пределах 70 мм. Это обусловлено особенностями планируемого эксперимента и используемого оборудования.
5. Для параллельного измерения сил резания и вибрационных процессов, протекающих при ВСО, желательно наличие встроенного трехосевого акселерометра, оси чувствительности которого совпадают с осями измерения сил резания.
6. Низкая стоимость производства и доступность компонентов.
7. Полумостовая схема подключения чувствительных элементов в каналах датчика, что обеспечивает, с одной стороны, достаточную чувствительность, большую, чем у четверть мостовой схемы включения чувствительных элементов, однако, в отличие от мостовой схемы подключения, позволяет легко компенсировать возникший дисбаланс полумоста, образовавшийся в результате нагружения датчика устанавливаемой оснасткой и исследуемым образцом.

8. Датчик должен быть платформенного типа, т. е. чувствительные элементы значительно разнесены в пространстве, что в свою очередь позволяет в значительной степени компенсировать погрешности измерения, вызванные перемещением инструмента в пределах исследуемого объекта, закрепленного на датчике.

Выбор сделан в пользу тензорезистивной датчиковой системы, что позволяет обеспечить совместимость предлагаемой системы контроля сил резания со схемой обработки сигналов, разработанной для работы с датчиком УДМ-600. Альтернативным вариантом мог быть датчик, пьезоэлектрические чувствительные элементы используемые в датчиках фирмы «Kistler» [13]. Но этот подход крайне сложен и трудоемок, в силу сложности изготовления чувствительных элементов из пьезокерамики, а также очень сложной системой кондиционирования сигналов таких датчиков. Для практической реализации выбрана полумостовая схема включения тензорезисторов, которые образуют чувствительный элемент датчика для каждой отдельной оси.

В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к механической конструкции датчика (монтажная высота в пределах 70 мм, совместимость с системой универсально-сборных приспособлений УСП-8, конструктивное исполнение в виде платформы), разработана 3d-модель чувствительного элемента датчика – рисунок 1.

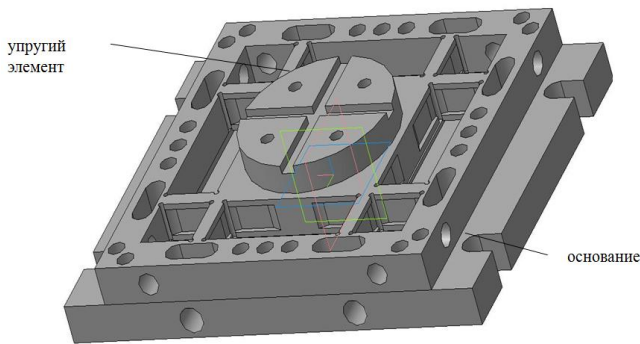


Рисунок 1 – Модель упругого элемента датчика и основания

В данной конструкции центральная платформа с монтажным фланцем для технологической оснастки УСП-8 обрешена восемью балками H-образного сечения, которые представляют собой упругие элементы канала датчика, отвечающего за измерение силы, направленной вдоль оси Z. Концы этих балок упираются в центр упругих элементов, представляющих собой защемленную с двух концов балку, образованную стенкой кармана, выполненного в основании упругого элемента датчика. Две пары подобных упругих элементов, расположенных на противоположных сторонах основания датчика, отвечают за измерение сил вдоль осей X и Y соответственно. Выбор конструкции был обусловлен рекомендациями данными в [14, 2, 3].

При анализе конструкционных материалов, используемых для упругих чувствительных элементов датчиков, необходимо принять во внимание следующие обстоятельства. Согласно [2] и [3] к основным свойствам материалов упругих элементов относятся: малое несовершенство упругости, высокая релаксационная стойкость, стабильность упругих свойств во времени и переменных внешних условиях, большая зона упругих деформаций.

Основными конструкционными материалами, используемыми для изготовления упругих элементов, являются конструкционные и легированные стали, бронзы, алюминиевые и титановые сплавы – таблица 1.

Анализ показывает, что лучшими материалами являются стали типа ШХ15 и 36НХТЮ. Однако для конструкции упругого элемента датчика с массивной центральной платформой для получения приемлемых частотных характеристик и высокой собственной частоты выбор был сделан в пользу сплава Д16Т. Использование данного материала за счет малой его плотности позволило уменьшить массу центральной платформы в 2,8 раза (по сравнению со сталью), что, в свою очередь, позволяет повысить собственную частоту. Важными преимуществами Д16Т по сравнению с легированными сталями, являются хорошая обрабатываемость материала и отсутствие сложного процесса термообработки для получения и стабилизации необходимых механических характеристик.

Таблица 1 – Свойства материалов, используемых для изготовления чувствительных упругих элементов

Материал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_{10} , %	E, ГПа	$\alpha_E \cdot 10^{-6}$, 1/°C	$\alpha_1 \cdot 10^{-6}$, 1/°C	ρ , мг/м ³
Сталь 30ХГСА	1100	850	-	198	-	11,0	-
Сталь 35ХГСА	1650	1400	10	-	-	-	-
Сталь ШХ 15	2200	1700	15	210	-	12,0	7,8
Сталь 36НХТЮ	1150	750	14	180	-0,30	28,8	7,8
Сталь 42НХТЮ	-	-	-	180-190	-	9,5-10,0	-
Сталь 44НХТЮ	1200	800	20	180-195	-	8,0-9,0	-
Сталь 40ХНМ	2500-2500	2300-2500	3-5	200-220	-	12-15	-
Н41ХТА (нихром)	1400	1250	-	180	-0,02	8,0	7,9
БрБ2	1260	1400	9,0	129	-0,24	15,8	8,23
АМn3 (Al-Mg)	350	160	15	70	-1,07	24,0	2,64
Д16Т	400	280	10	72	-0,69	22,7	2,78
ВТ6(С)	1000	900	10	120	-0,36	8,4	4,43
ВТ9	1200	1030	9	118	-0,45	8,3	4,51
ВТ-15	1300-1500	1200-1400	3-4,5	110	-	-	-

При выборе типов и номиналов чувствительных элементов – тензорезисторов – следует принимать во внимание технические требования как по электрическим, так и механическим параметрам.

С точки зрения электрических характеристик наиболее важными являются:

- номинальное сопротивление тензорезисторов, из которых состоит канал датчика;
- суммарное сопротивление тензорезисторов в плече полумоста не должно превышать допустимое сопротивление плеча для модуля NI9237 фирмы National Instruments, используемого в измерительном комплексе, описанном в [1].

Согласно технической документации на данный модуль [4], рекомендованное сопротивление плеча полумоста составляет до 1кОм.

Схема включения тензорезисторов в датчике изображена на рисунке 2.

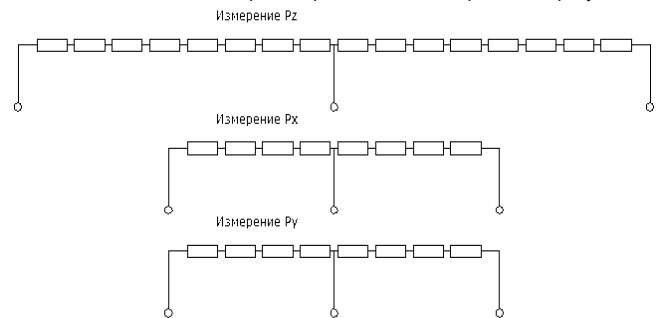


Рисунок 2 – Схема включения тензорезисторов в датчике

Плечо полумоста для измерения силы вдоль оси Z состоит из восьми тензорезисторов, включенных последовательно, что необходимо для улучшения чувствительности силоизмерительной системы датчика вдоль оси Z. Для осей X и Y каждое плечо состоит из четырех тензорезисторов. Поэтому максимальное сопротивление одиночного тензорезистора составит: $R = 1000 \text{ Ом} / 8 = 125 \text{ Ом}$.

С механической точки зрения требования к тензорезисторам сводятся в основном к выбору их геометрических размеров (в нашем случае это 8×20 мм), а также возможностью монтажа на упругом элементе датчика.

Лидерами в производстве тензорезисторов являются немецкая НВМ, японская KYOWA и украинская ВЕДА. Все производители предлагают для общепромышленного применения фольговые тензорезисторы на полиамидной основе с достаточно близкими техническими характеристиками, такими как ряд номинальных сопротивлений и коэффициент тензочувствительности S_{cp} , находящийся в диапазоне 1,9...2,3. В результате анализа каталогов продукции НВМ [5],

KYOWA [6] и ВЕДА [7] выбор сделан в пользу тензорезисторов ВЕДА марки 1ФКТК-10-100С-2 с номинальным сопротивлением 100 Ом, коэффициентом тензочувствительности S_{cp} 2,25 и длиной тензорешетки 10 мм.

Согласно п. 5 технических требований для исследования вибрационных процессов, протекающих при ВСО, желательна наличие в системе встроенного трехосевого акселерометра. При выборе акселерометра следует руководствоваться массогабаритными, электрическими и конструктивными требованиями.

По массогабаритным критериям целесообразно использовать акселерометр, обладающий наименьшими массогабаритными характеристиками (для снижения массы центральной платформы), с сохранением приемлемой осевой чувствительности.

Основными электрическими характеристиками являются осевая чувствительность (не ниже 1Пкл/г), собственная частота акселерометра (не менее 20 кГц).

С точки зрения механической конструкции акселерометра габаритные размеры не должны превышать 15×15×15 мм, кабель подключения должен отходить под прямым углом к оси крепежного элемента датчика, что упрощает его монтаж.

В результате анализа каталогов фирм производителей акселерометров [8,9] выбран датчик AP1021 производства фирмы «Глобалтест». Технические характеристики акселерометра AP1021 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики акселерометра AP1021

Параметр	Ось	Единицы измерения	Значение
Осевая чувствительность	X	Пкл/г*	2,41
	Y		2,52
	Z		2,38
Электрическая емкость	X	пФ	852
	Y		857
	Z		850
Сопротивление изоляции		МОм	>10000
Верхний уровень измеряемого ударного ускорения		g*	10000
Собственная частота закрепленного акселерометра		кГц	55
Относительная поперечная чувствительность	X	%	1,2
	Y		2,8
	Z		3,1
Масса (без кабеля)		г	5
Габариты		мм	9,6×9,6×16
Материал корпуса	Титановый сплав		

Так как проведение аналитического расчета жесткости упругого элемента датчика данной конфигурации (рисунок 1) является сложной задачей, проведен натурный эксперимент. Изготовлен тестовый образец, представляющий участок упругого элемента датчика, включающий в себя два упругих элемента:

- первый упругий элемент отвечает за измерение нагрузки вдоль оси Z. Он оснащен двумя тензорезисторами типа 1ФКТК-10-100С-2, включенными по полумостовой схеме измерения;
- второй упругий элемент отвечает за измерение усилия вдоль осей X или Y, в зависимости от его расположения. Тензорезистор 1ФКТК-10-100С-2, смонтированный на упругом элементе, включен по четверть мостовой схеме измерения с компенсационным сопротивлением для подключения к модулю NI9237.

В качестве связующего, обеспечивающего монтаж тензорезистора на упругий элемент, использовался циан-акрилатный клей Loctite 415, выбор которого был обусловлен его высокими механическими свойствами, такими как высокая адгезия, жесткость клеевого соединения, а также рекомендациями, даваемыми в [10].

Тестовый образец смонтирован на приспособлении (рисунок 3), обеспечивающим его надежное закрепление и позволяющем проводить механическое нагружение упругих элементов для определения передаточного отношения $dU_{вых}/dF$ элементов датчика.

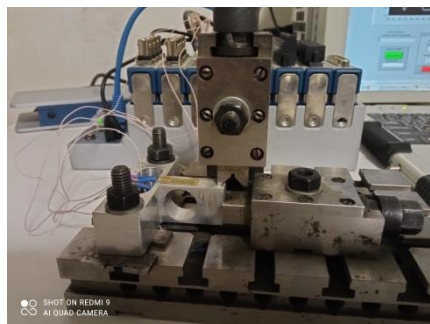
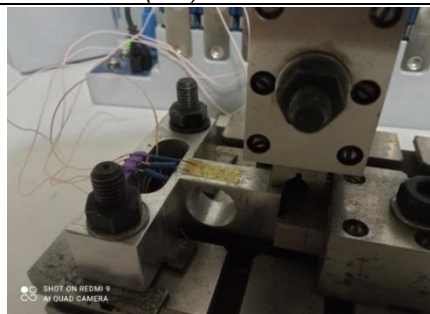


Рисунок 3 – Испытательный стенд с закрепленным образцом

Нагружение осуществлялось силой 1 кН. Так как тестовый образец представляет собой только участок датчика, соответствующий 1/4 измерительной системы для осей X и Y, и 1/8 измерительной системы для оси Z, то можно предполагать, что полноразмерный упругий элемент датчика будет обеспечивать измерение нагрузок в необходимом диапазоне 1,5кН как минимум с двукратным запасом. Напряжение питания измерительной цепи составляет 5 В. Питание и измерение выходного сигнала тензомостов реализовано посредством модуля NI9237, установленного в шасси NIcDAQ-9188, под управлением виртуального прибора, подготовленного в среде LabView.

В результате измерений получены следующие результаты: для элемента оси Z получена чувствительность порядка 850 мкВ/кН, для элемента осей X/Y чувствительность составила порядка 125 мкВ/кН. По результатам теста проведена корректировка конструкции и геометрических размеров упругого элемента, воспринимающего нагрузку вдоль оси Z.

Испытания макетного образца датчика

По результатам предварительных исследований изготовлен упругий элемент датчика из алюминиевого сплава Д16Т. Посредством циан-акрилатного клея на него смонтированы тензорезисторы 1ФКТК-10-100С-2, произведен монтаж электрических цепей проводом МГТФ-0,12. Акселерометр AP21 установлен в приемке, выполненным в основании центральной платформы. Внешний вид чувствительного элемента с тензорезисторами и акселерометром показан на рисунке 4 и 5. Датчик с установленной технологической оснасткой показан на рисунке 6.



Рисунок 4 – Чувствительный элемент датчика с тензорезисторами. Вид сверху

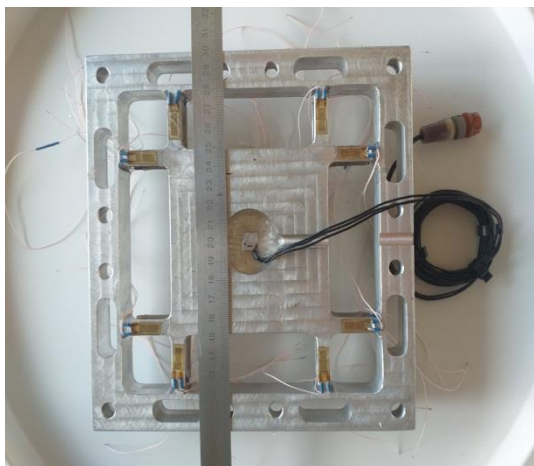


Рисунок 5 – Чувствительный элемент датчика с тензорезисторами и акселерометром. Вид снизу



Рисунок 6 – Датчик с технологической оснасткой

Для проверки работоспособности силоизмерительной части датчика проведен ряд экспериментов по измерению сил резания, возникающих при обработке алюминиевого сплава Д16Т, концевой фрезой диаметром 12 мм при глубине резания 1–3 мм, частоте вращения 1200^{-1} . Датчик с технологической оснасткой, смонтированный на станке AG400 в составе измерительного комплекса приведен на рисунке 7. Работа части датчика, отвечающая за регистрацию вибрационных процессов будет представлена в дальнейших исследованиях.



Рисунок 7 – Датчик с установленной оснасткой на станке AG400

На рисунке 8 приведена фотография лицевой панели виртуального прибора для просмотра, обработки и сохранения данных результатов экспериментов.



Рисунок 8 – Лицевая панель виртуального прибора для работы с данными, полученными при работе программно-аппаратного комплекса

Анализ работы датчика в составе программно-аппаратного комплекса для измерения и регистрации процессов, протекающих при ВСО, показал хорошие технические результаты. Типовые данные, получаемые при измерении сил резания с использованием данного датчика, показаны на рисунке 9 – 12. На рисунке 9 отражено изменение средней силы резания во времени. Отчетливо видна неравномерность подачи во времени, обусловленная действием системы позиционирования станка AG400.

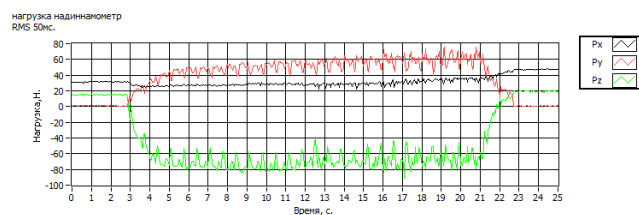


Рисунок 9 – График изменения сил резания во времени, при фрезеровании сплава Д16Т, усредненные значения, время интегрирования 50 мс

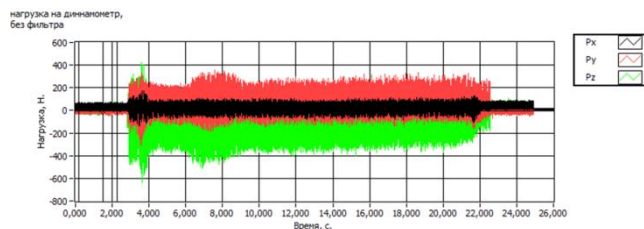


Рисунок 10 – График изменения сил резания во времени, без применения фильтрации, в течение всего эксперимента

На рисунке 11 изображено начало процесса резания. Отчетливо видно первое касание фрезой обрабатываемого образца, увеличение силы резания по мере врезания в материал образца, а также хорошо обнаруживается неравномерность сил резания, создаваемых отдельными режущими кромками фрезы (радиальное биение фрезы, либо ее неправильная заточка).

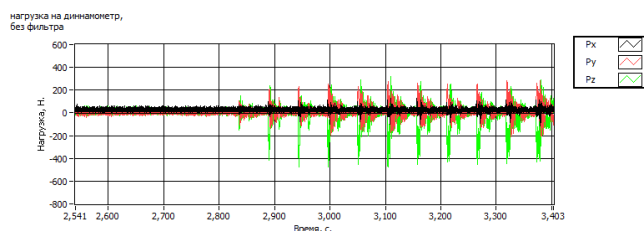


Рисунок 11 – График изменения сил резания во времени. Начало процесса резания

На рисунке 12 показано изменение сил резания во времени при установившемся процессе фрезерования. На данном графике тоже хорошо видна неравномерность сил резания вследствие биения фрезы либо ее неправильной заточки.

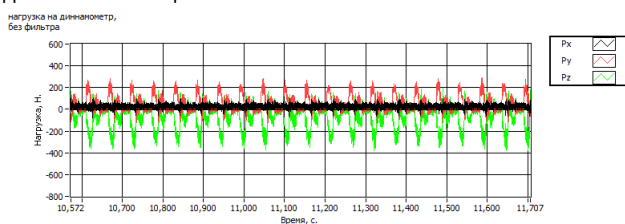


Рисунок 12 – График изменения сил резания о времени. Установившейся процесс резания

Заключение

Применение трехосевого силоизмерительного датчика в системе контроля сил резания и процессов, протекающих при ВСО, в составе программно-аппаратного комплекса для измерения, регистрации и последующей оцифровки данных позволяет детально изучить процессы, протекающие при ВСО. Это предоставляет возможность осуществлять качественную оптимизацию технологических процессов обработки деталей, особенно малогабаритных и тонкостенных, выявлять оптимальные траектории движения инструмента и режимы резания в привязке к конкретной детали. Потенциал, заложенный в датчике и программно-аппаратном комплексе, позволяет проводить детальное изучение процессов ВСО, силовых и вибрационных, развитие автоколебательных процессов в системе станок-приспособление-инструмент-деталь (система СПИД), осуществлять подавление развития автоколебательных процессов в системе СПИД на программном и аппаратном уровне, а также изучать поведение системы СПИД современных обрабатывающих центров и станков ЧПУ в лабораторных и производственных условиях.

Список цитированных источников

1. Программно-аппаратный комплекс для измерения, регистрации и последующей оцифровки процессов, протекающих при высокоскоростной механической обработке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/26808>
2. Антоновец, И. В. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учебное пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенко. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с.
3. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов / Л. Е. Андреева. – Москва: Mashgiz 1962.–456 с.
4. NI 9237, 4 AI, ± 25 mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Electronic resours]. – Mode of access: http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf.
5. Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.hbm.com/en/0014/strain-gauges/?product_type_no=HBM%20Strain%20Gauges:%20First%20Choice%20for%20Strain%20Measurements.
6. Products, Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/index.html.
7. Тензорезисторы Каталог[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://veda.com.ua/catalogue/tenzorezistory>.
8. Каталог акселерометров фирмы ENDEVCO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buy.endevco.com/accelerometer>.
9. Датчиковая измерительная аппаратура. Каталог продукции фирмы «Глобалтест» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://globaltest.ru/catalogpdf/catalog_Global_Test_ru.pdf.
10. Клокова, Н. П. Тензорезисторы. Теория, методики расчета, разработки / Н. П. Клокова. – Москва: Машиностроение. – 1990г. – 224 с.
11. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. Москва, 1983.– 21 с.
12. Тихонов, А. И. Упругие элементы датчиков механических величин: учебное пособие / А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков, Е. А. Мокров. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. –120 с.
13. Датчики силы для измерения сил резания фирмы «Кистлер» https://www.kistler.com/ru/products/components/force-sensors/?pfv_metrics=metric&pfv_force_applications=cutting_force.
14. Осадчий, Е. П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.

References

1. Programmno-apparatnyj kompleks dlya izmereniya, registracii i posleduyushchej ocifrovki processov, protekayushchih pri vysokoskorostnoj mekhanicheskoj obrabotke [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://elib.psu.by/handle/123456789/26808>
2. Antonovec, I. V. Metody rascheta i modelirovaniya uprugih elementov: uchebnoe posobie / I. V. Antonec, A. P. Tereshenok. – Ul'yanovsk : UIGTU, 2013. – 121 s.
3. Andreeva L. E. Uprugie elementy priborov / L. E. Andreeva. – Moskva: Mashgiz 1962.–456 s.
4. NI 9237, 4 AI, ± 25 mV/V, 24 Bit, 50 kS/s/ch Simultaneous, Bridge Completion [Electronic resours]. – Mode of access: http://www.ni.com/pdf/manuals/374186a_02.pdf.
5. Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.hbm.com/en/0014/strain-gauges/?product_type_no=HBM%20Strain%20Gauges:%20First%20Choice%20for%20Strain%20Measurements.
6. Products, Strain Gauges [Electronic resours]. – Mode of access: https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/index.html.
7. Tenzorezistory Katalog[Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://veda.com.ua/catalogue/tenzorezistory>.
8. Katalog akselerometrov firmy ENDEVCO [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://buy.endevco.com/accelerometer>.
9. Datchikovaya izmeritel'naya apparatura. Katalog produkcii firmy «Globaltest» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: https://globaltest.ru/catalogpdf/catalog_Global_Test_ru.pdf.
10. Klokova, N. P. Tenzorezistory. Teoriya, metodiki rascheta, razrabotki / N. P. Klokova. – Moskva: Ma-shinostroenie. – 1990g. – 224 s.
11. Rukovodstvo k universal'nomu dinamometru UDM konstrukcii VNII. Moskva, 1983.– 21 s.
12. Tihonov, A. I. Uprugie elementy datchikov mekhanicheskikh velichin: uchebnoe posobie / A. I. Tihonov, V. A. Tihonenkov, E. A.Mokrov. – Ul'yanovsk: UIGTU, 1998. –120 s.
13. Datchiki sily dlya izmereniya sil rezaniya firmy «Kistler» https://www.kistler.com/ru/products/components/force-sensors/?pfv_metrics=metric&pfv_force_applications=cutting_force.
14. Osadchij, E. P. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin / E. P. Osadchij. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 480 s.

Материал поступил 14.02.2023, одобрен 06.03.2023, принят к публикации 09.03.2023