МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, к.т.н., доцент

_____
_____2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____А.Л. Шестаков
_____ 2017 г.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНОГО СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–12.04.01.2017.072. ВКР

Руководитель проекта, к.т.н., доцент
_____ Д.А. Кацай
_____2017 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-274
_____М.В. Грызлов
_____2017 г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент
_____А.А. Лысова
_____2017 г.

Челябинск 2017

АННОТАЦИЯ

Грызлов М.В., Разработка модели погрешностей трехкомпонентного силоизмерительного стенда. – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ; 2017, 110 с. 45 ил., 2 прил., библиогр. список – 80 наим.

В выпускной квалификационной работе рассматривается анализ проблемы и исследование возможности коррекции исполнительной системы. Проведен информационный поиск в патентных изданиях и на рынке продукции. Выявлены достоинства и недостатки каждого устройства.

Выбран прототип, у которого проанализированы погрешности, возникающие при измерении. Написаны уравнения движения платформы как твердого тела, подчиненного связями, и воздействие режущего инструмента как импульсного усилия. Для силоизмерительного стенда написан код, измеряющего силу резания и момент резания в режиме реального времени.

Программное обеспечение написано на языке Delphi 7. Пояснительная записка выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 7
1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК ПО ТЕМЕ РАБОТЫ 9
1.1 Анализ технического задания 9
1.2 Патентные издания 11
1.2.1 Устройство для измерения составляющих силы резания 11
1.1.2 Многокомпонентный датчик силы резания 13
1.3 Существующие модели 16
1.3.1 Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600 16
1.3.2 Трехкомпонентный динамометр 9257В 18
1.3.3 Стенд для исследования сил резания фрезерного агрегата 20
2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ 23
2.2 Измерения с помощью тензодатчиков 32
2.3 Составляющие погрешности измерения 32
2.4 Уравнения модели 33
2.5 Погрешности усилителей 42
2.5.1 Идеальная передаточная характеристика АЦП 44
2.5.2 Аддитивная погрешность АЦП 46
2.5.3 Мультипликативная погрешность АЦП 47
3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ УСТРАНЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ 49
3.1 Создание блок-схемы алгоритма 49
3.2 Программное обеспечение для стенда 52
3.3 Фильтрация сигнала 59
3.4 Особенности платы PCI-1710 67
3.4.1 Смешанные несимметричные или дифференциальные аналоговые входы платы 67
3.4.2 Встроенная память FIFO (First In First Out) 67
3.4.3 Встроенный программируемый счетчик 67

3.4.4 Специальный экранированный кабель для шумоподавления..... 68
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА 69
4.1 Подключение к плате PCI-1710 69
4.2 Уравнения движения платформы как твердого тела, подчиненного связями, и воздействие режущего инструмента как импульсного усиления . 70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 81
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 82
ПРИЛОЖЕНИЯ..... 92
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Код программы на языке Delphi 7 с комментариями 93
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Сборочный чертеж..... 112

ВВЕДЕНИЕ

Обработка фрезерованием является одним из распространенных способов формообразования. Поэтому данный процесс является объектом постоянного изучения [16] и оптимизации. При наблюдении за режущим инструментом фрезерного станка измерение силы резания дает возможность судить о процессе резания и о состоянии инструмента. Сила резания, которая возникает при механической обработке деталей, является важным параметром, определяющим качество детали, производительность режущего инструмента и его стойкость, долговечность станка, что в совокупности характеризует технико-экономические показатели изделия и эффективность технологического процесса. Поэтому обработка фрезерованием является **актуальной темой** при эксплуатации высокотехнологичного оборудования с числовым программным управлением (сокр. ЧПУ) [32].

Объектом исследования является стенд для исследования сил резания фрезерного агрегата.

Научная проблема состоит в том, величина силы резания определяется непосредственным ее измерением с помощью динамометром, либо теоретическим расчетом. В первом случае возникает ряд трудностей, которые обуславливаются большим количеством факторов, поэтому величина силы резания рассчитывается по упрощенным формулам. Возникающая погрешность при измерении силы резания в большинстве случаев не имеет практического значения.

Целью данной работы является исследование модели силы резания, минимизирующие погрешности измерений.

На пути к достижению поставленной цели необходимо решить ряд **задач**:

1) провести информационный поиск по данной теме;

2) разработать математическую модель объекта, проанализировать параметры и провести синтез;

3) разработать программное обеспечение, способное регистрировать силы резания в режиме реального времени;

4) исследовать объект в экспериментальных условиях, провести анализ полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем: разработан способ алгоритмического уменьшения погрешности стенда.

1 ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОИСК ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1.1 Анализ технического задания

Среди различных методов силоизмерения большинство отдает предпочтение измерениям с применением тензометрических датчиков. Тензометрические датчики используются как чувствительные измерительные элементы в электронных весах, силоизмерительных установках, дозирующих весовых системах, испытательном оборудовании, системах контроля силовых нагрузок и во многом другом.

Любой измерительный элемент имеет ряд достоинств и недостатков.

Достоинства тензометрических датчиков:

1) точность измерения. Это основное достоинство тензодатчиков. Распространенными тензометрическими датчиками являются датчики С3 класса;

2) могут применяться для измерения динамических и статических напряжений, не искажая, при этом, полученные данные. Поэтому при использовании устройств в транспортных средствах или экстремальных условиях работы это очень удобно;

3) разнообразие конструкций (мостовой, шайбовый, S-образный, одноточечный);

4) надежность материала. Изготавливают тензометрические датчики из нержавеющей стали, алюминия, что обеспечивают данному оборудованию долгий срок службы;

5) компактность. Небольшие размеры тензометрических датчиков позволяют использовать такие датчики практически в любых измерительных устройствах.

Но, у тензометрических датчиков есть и ряд **недостатков**:

1) Чувствительность к перепадам температуры. Требуется производить опыты только при двух ключевых моментах для наиболее точного измерения:

- температура должна быть комнатной (20…25 градусов по Цельсию);
- влажность не должна превышать 30%.

2) Цена. Так как тензометрические датчики изготавливают из нержавеющей стали, многие из которых имеют класс защиты IP68 (полная защита от пыли и защита при полном и длительном погружении в воду на глубину не более 1 метра), цена данного тензометрического датчика будет высокой. Еще возрастание цены зависит от повышения класса точности тензометрического датчика.

Измерение веса проводится различными устройствами: механическими или электронными весами. К весам и динамометрам предъявляются следующие требования:

1) малое взаимное влияние компонент моментов и сил;

2) должен иметь упругий элемент высокую сигнальную деформацию при большом запасе прочности, отсутствии гистерезиса и нелинейности. Изготавливаются упругие элементы из высокопрочных легированных сталей (например, из стали 30ХГСА с термообработкой);

3) к изменению температуры малая чувствительность.

Принцип действия весов или динамометров основан на преобразовании механического усилия, возникающего при воздействии нагрузки на тензометрический датчик, в электрический сигнал, а затем этот сигнал преобразуется в цифровой сигнал. Под действием нагрузки балка тензодатчика деформируется, на которой закреплены тензометрические резисторы (далее тензорезисторы). Сопротивление тензорезисторов изменяется пропорционально деформации самого тензорезистора. Аналого-цифровой преобразователь (далее АЦП) преобразует в последовательность импульсов выходное напряжение датчика. Встроенный микрокомпьютер от АЦП принимает сигнал, обрабатывает его и производит операции согласно некоторому заданному алгоритму, отображая результаты взвешивания или измерения силы на индикаторе.

1.2 Патентные издания

1.2.1 Устройство для измерения составляющих силы резания

Патент РФ № 2397856 от 27.08.2010. Технической задачей [10], на решение которой направлено заявленное изобретение, является повышение независимости и достоверности определения составляющих сил резания.

Указанная задача решается тем, что в устройстве (Рисунок 1.1) для определения составляющей силы резания, включающем основание, закрепленные неподвижными стойками с датчиками, которые воспринимают ортогональные проекции силы резания, а также пластину для крепления заготовки, согласно изобретению стойки, содержащие дополнительные направляющие с узлами трения качения, с одной степенью свободы. Помимо этого, пластина для крепления заготовки имеет механизм поджима. Помимо этого, механизм поджима выполнен в виде упругого элемента – пружины.

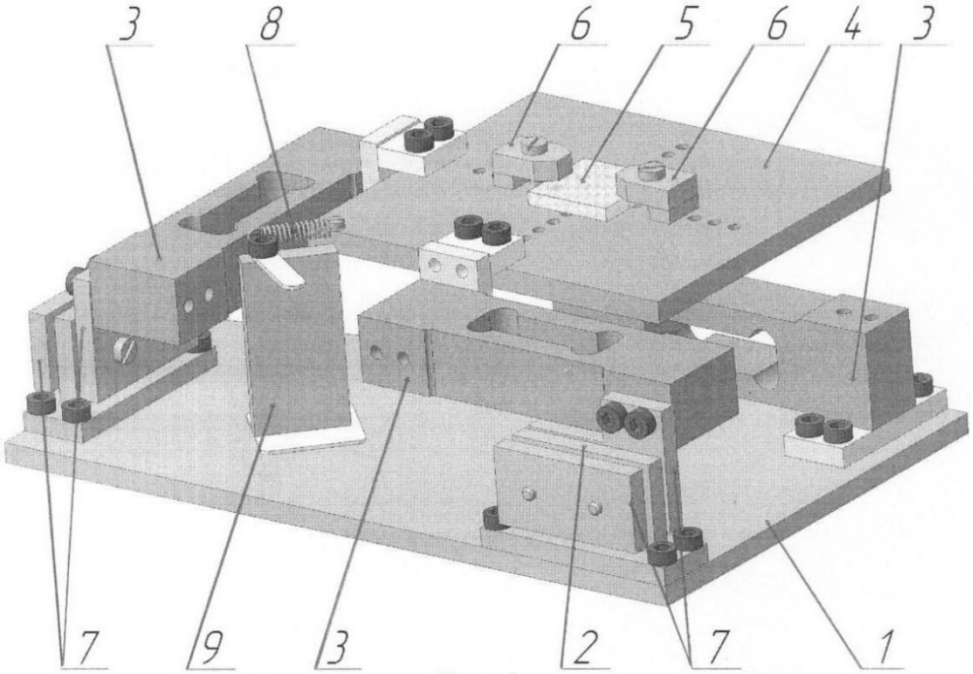


Рисунок 1.1 – Общий вид устройства

Устройство (Рисунок 1.2) с целью измерения составляющей сил резания состоит из основания 1, на котором закреплены неподвижные стойки 2 с датчиками 3, к примеру, тензометрическими. Прикреплена пластина 4 к

датчикам 3 для установки заготовки 5 с прихватом 6. Неподвижные стойки 2 содержат дополнительные направляющие 7 с узлами трения качения, с одной степенью свободы. Пластина 4 имеет механизм поджима, коротая выполнена в виде упругого элемента, в данном случае, пружины 8, которая связана вертикальной стойкой 9 с основанием 1.

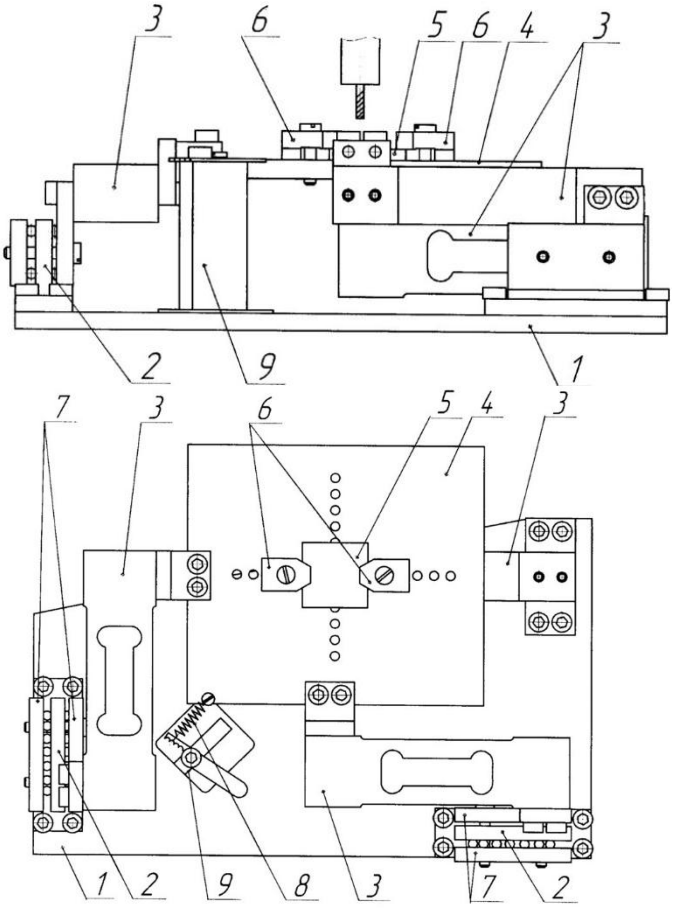


Рисунок 1.2 – Вид слева и вид сверху устройства

Устройство работает следующим образом.

Обрабатывающий инструмент (фреза) надвигают на заготовку 5. При резании возникает сила, направленная от инструмента к заготовке 5. Составляющие силы резания независимо измеряют устройством в трех ортогональных направлениях при помощи трех соответствующих датчиков 3. Посредством дополнительных направляющих 7 с узлами трения качения, при измерении силы резания, достигают независимости определения величин, составляющих силы резания. При этом датчики 3 имеют одну степень свободы – перемещение в направлении, перпендикулярном измеряемому

усилию. Благодаря этому ортогональные составляющие силы резания заготовки 5 передаются только на соответствующие датчики 3 (заготовку предварительно прикрепляют к пластине 4).

Достоинства устройства:

- использование направляющей, позволяющая обеспечить достоверность определения сил резания;
- простота изготовления.

Недостатки устройства:

- не учтены погрешности тензометрических датчиков;
- погрешность выставления направляющих строго горизонтально или вертикально;
- цена устройства.

1.1.2 Многокомпонентный датчик силы резания

Патент №2455121 от 10.07.2012. Задачей, на решение которой направлено предлагаемое техническое решение, является повышение точности измерения, упрощение конструкции и технологии изготовления, уменьшение габаритов многокомпонентного датчика силы резания и использование датчика для измерения силовых параметров при применении модульной инструментальной оснастки (Рисунок 1.3).

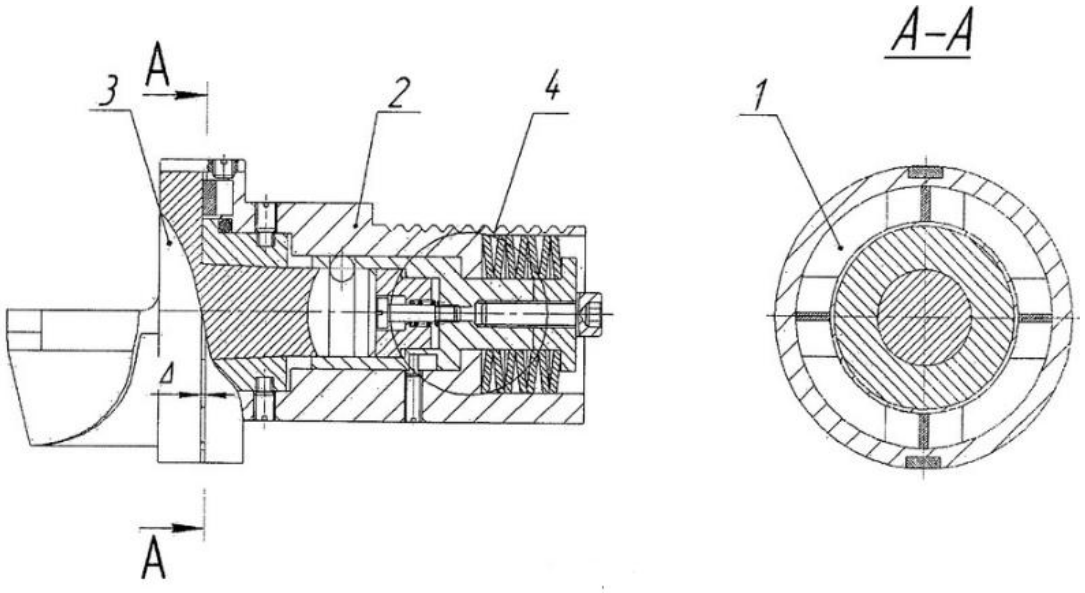


Рисунок 1.3 – Многокомпонентный датчик силы резания

Многокомпонентный датчик силы резания содержит упругий элемент 1, установленный в плоскости разъема модульной инструментальной оснастки [6] и находящийся в пазу корпуса 2, и представляющий собой кольцо, на половине высоты которого выполнены симметрично относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной вертикальной оси кольца, четыре независимые плоские балки, которые воспринимают от действия вектора силовой нагрузки деформацию. Узлы ввода силы размещены в середине балок, нижняя сторона кольца опирается на четыре выступа, которые являются силоопорными элементами балок, а на противоположных сторонах каждой балки размещены тензорезисторы, которые соединены в мостовые цепи гальванически независимые. Корпус 2 модульной инструментальной оснастки, который закреплен в гнезде револьверной головки токарного станка, с выполненным на торце пазом для размещения упругого элемента. Инструментальный модуль 3, который осуществляет процесс резания. Зажимной узел 4, который обеспечивает закрепление инструментального модуля относительно корпуса 2.

Конструкция работает следующим образом:

Когда закрепляется сменный инструментальный модуль 3 происходит начальное деформирование упругого элемента 1 из-за того, что толщина упругого элемента h больше глубины паза, в котором он находится, в то время как деформирование упругого элемента 1 ограничивается только усилием закрепления инструментального модуля 3. Таким образом, обеспечивается необходимая жесткость модульной инструментальной оснастки и происходит требуемая первоначальная деформация упругого элемента 1. При точении на режущий элемент инструментального модуля 3 действует сила резания. В это время деформация инструментального модуля 3 через узлы ввода упругого элемента 1, которые соприкасаются с торцом инструментального модуля 3, передается на плоские балки упругого элемента 1 за счет имеющегося зазора между торцами инструментального модуля 3 и корпуса 2. Тензорезисторы, которые наклеены на плоские балки

упругого элемента 1, изменяют свое сопротивление пропорционально деформации плоских балок, которая, в свою очередь, пропорциональна приложенной нагрузке, из-за чего на выходах мостовых цепей возникают электрические сигналы, которые пропорциональны составляющим силы резания.

Вычисления сил резания вычисляются по формулам:

$P_x = \frac{\sum_{i=1}^{4} P_i}{4}$ – осевая составляющая силы резания;

$P_y = \frac{P_1 + P_3}{4}$ – радиальная составляющая силы резания;

$P_z = \frac{P_2 + P_4}{4}$ – тангенциальная составляющая силы резания;

$P_0 = \sqrt{{P_y}^2 + {P_z}^2}$ – поперечная составляющая силы резания;

$\alpha = arctg\left(\frac{P_x}{P_0}\right)$ – угол наклона результирующей силы резания к плоскости разъема;

$\beta = arctg\left(\frac{P_y}{P_z}\right)$ – угол между поперечной результирующей составляющей силы резания и осью Y.

Достоинства датчика:

1) простота конструкции;

2) малые габариты, что позволяет применять в автоматизированных системах;

3) возможность использования разной формой и геометрией режущей части.

К недостаткам можно отнести:

1) не учтена погрешность датчиков (идеальная модель);

2) цена устройства.

1.3 Существующие модели

1.3.1 Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600

Обобщенная структурная схема установки измерения составляющих силы резания показана на рисунке 1.4. В качестве первичного датчика регистрации сил резания используется динамометр модели УДМ-600. Измерительная установка состоит из следующих основных блоков: блока балансировочных и согласующих сопротивлений (БСС), 16 канального усилителя напряжения (УН) модели ЛА-УН16, устройства сбора данных (УСД) модели NI USB-6009, персонального компьютера. Основные блоки измерительной установки сведены в блок усиления и преобразования сигналов (УПС) с расположением в отдельном помехозащищенном корпусе.

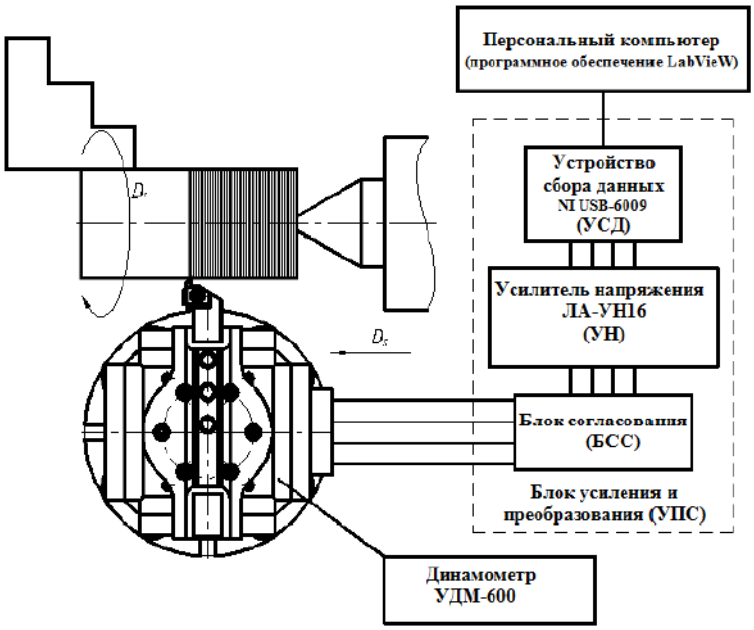


Рисунок 1.4 – Структурная схема установки измерения составляющих силы резания

Процесс измерения и регистрации составляющих силы резания состоит из следующих основных этапов. Составляющие силы резания, возникающие в процессе механической обработки, первоначально регистрируются

динамометром модели УДМ-600, который является первичным датчиком измерения.

По конструкции и принципу действия динамометр модели УДМ-600 способен одновременно измерять составляющие силы резания Px, Py, Pz и крутящий момент Mкр на операциях точения, сверления, фрезерования. На операциях точения измеряются взаимоперпендикулярные составляющие силы резания Px, Py, Pz (Рисунок 1.5), для сверления измеряется крутящий момент Mкр и осевая сила Pос (см. Рисунок 1.5).

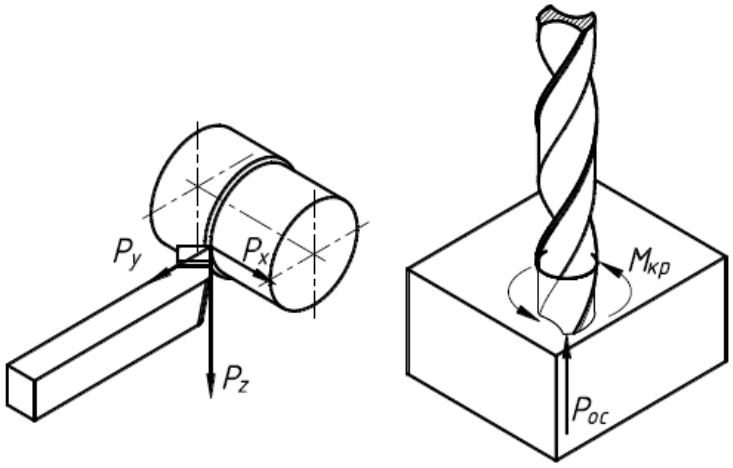


Рисунок 1.5 – Распределение составляющих силы резания на операции точения и сверления

Основной частью динамометра [79] является центральная квадратная опора, расположенная на упругих измерительных опорах (Рисунок 1.6).

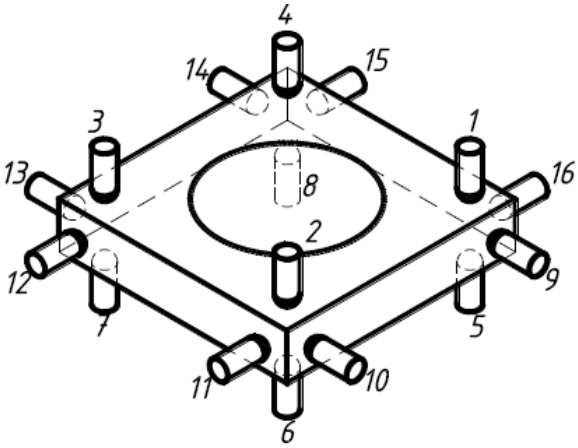


Рисунок 1.6 – Схема размещения измерительных опор в динамометре УДМ-600

Каждая опора при приложении к ней силы деформируется в направлении своей оси. Вдоль оси каждой опоры наклеены проволочные тензорезисторы с базой равной 10 мм и сопротивлением равным 100 Ом. Вертикально расположенные опоры участвуют в измерении силы резания Pz, горизонтально расположенные опоры участвуют в измерении сил Px, Py, и крутящего момента Мкр.

1.3.2 Трехкомпонентный динамометр 9257B

Трехкомпонентный динамометр 9257B позволяет производить измерение трех ортогональных составляющих действующей силы. Данный динамометр предназначен для измерения сил резания при фрезеровании, шлифовании, точении и иных операций механической обработки. Также может быть использован для оценки сил при других технических исследованиях, в таких как для динамических испытаний технологического оборудования.

Два параметра, которые позволяют проводить более точные измерения не только при операциях (чистовых), но и при использовании инструментов малого размера:

- высокая чувствительность;
- откалиброванные диапазоны компонентов динамометра.

В таблице 1 представлены краткие характеристики динамометра 9257B.

Таблица 1 – Технические характеристики динамометра 9257B

Параметр	**Обозначение**	**Размерность**	**Значение**
Диапазон значений сил, приложенных к верхней поверхности (макс. 25 мм выше уровня поверхности)	F_x, F_y, F_z	кН	-5…5
Порог чувствительности		Н	<0.01
Собственная частота (при установке на фланцах)	f_n (x,y)	кГц	≈2,3
	f_n (z)	кГц	≈3,5

Окончание таблицы 1

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Перекрестные помехи		%	≤±2
Чувствительность	F_x, F_y	пК/Н	≈-7,5
	F_z	пК/Н	≈-3,7
Температурный коэффициент чувствительности		%/ ^oC	-0,02
Собственная частота	f_n (x,y,z)	кГц	≈3,5
Вес		кг.	7,3
Размеры		ДхШхВ (140х280х60)	

Схема трехкомпонентного динамометра показана на рисунке 1.7.

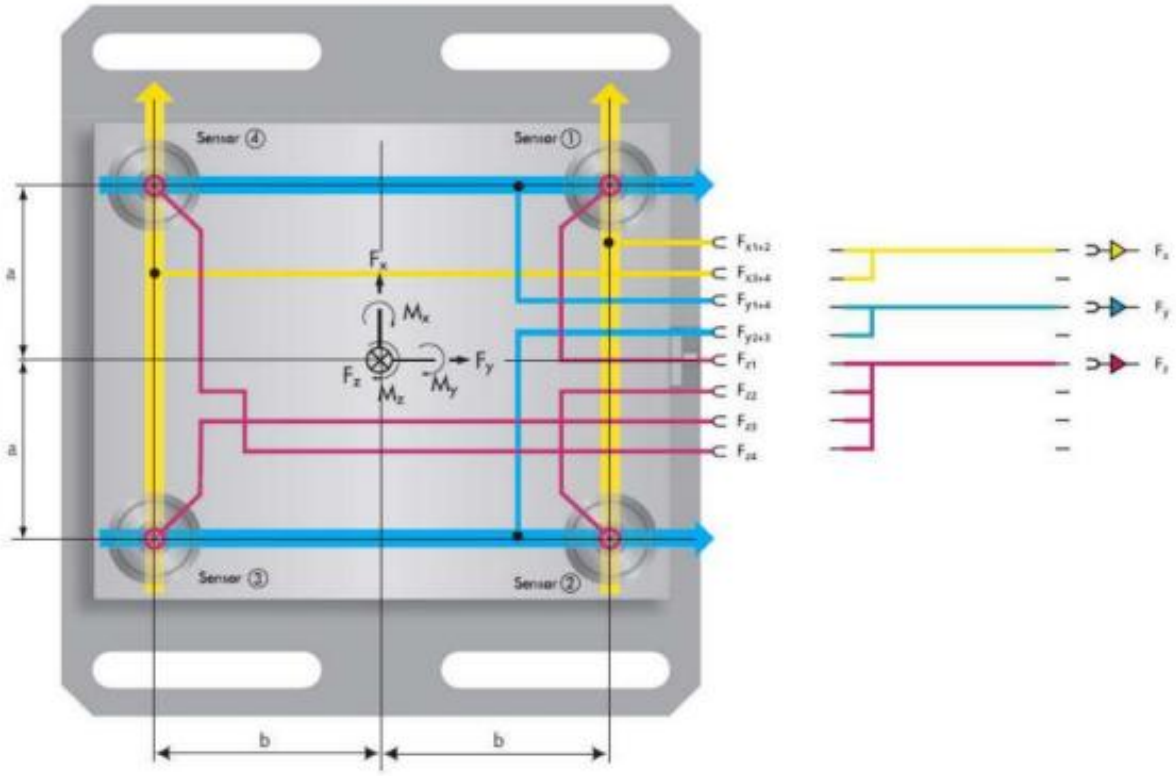


Рисунок 1.7 – Схема трехкомпонентного динамометра

Результирующая сила, действующая на динамометр [72] пропорциональна алгебраической сумме соответствующих компонент отдельных сил, которые образуются в результате параллельного расположения, что отражено на рисунке 1.7. Таким образом, динамометр является многокомпонентным датчиком силы, независящим от точки ее приложения.

Силы резания рассчитываются по следующим формулам:

$$F_x = F_{x1+2} + F_{x3+4}, \quad (1.1)$$

$$F_y = F_{y1+4} + F_{y2+3}, \quad (1.2)$$

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}. \quad (1.3)$$

Преимущества данного динамометра:

- большой диапазон измерения;
- большой срок службы;
- простота в эксплуатации (измерение «по нажатию кнопки»);
- невосприимчивость к воздействию температуры;
- стойкость к коррозии.

Но есть и ряд недостатков:

- невозможность измерения крупногабаритных изделий;

1.3.3 Стенд для исследования сил резания фрезерного агрегата

Показания, которые снимались в момент измерения, имели погрешность в десятки грамм. В другое время как, при максимальных значениях сил резания в десятки килограмм относительная погрешность составляла десятые доли процента.

Данный стенд состоит из:

- платформы;
- тензометрических датчиков;
- усилителей;

- сферических опорных элементов;
- упругих элементов;
- корпуса.

На рисунке 1.8 показан стенд в сборе.

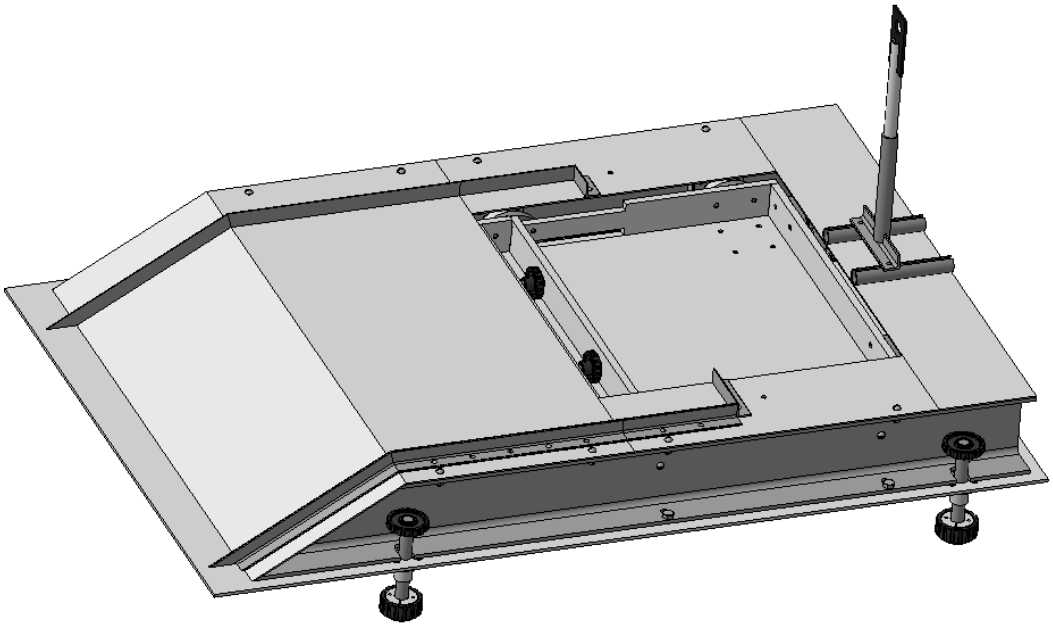


Рисунок 1.8 – Стенд в сборе

Тензометрические датчики собраны в группы по 4 датчика. Тензометрические датчики $ТД_1$, $ТД_2$, $ТД_3$, $ТД_4$ подключены к усилителю $У_1$. Данная группа образует 4-точечную схему измерения вертикального усилия резания. Тензометрические датчики $ТД_5$, $ТД_6$, $ТД_7$, $ТД_8$ подключены к усилителю $У_2$. Данная группа образует 4-точечную схему измерения продольного усилия резания. Тензометрические датчики $ТД_9$, $ТД_{10}$, $ТД_{11}$, $ТД_{12}$ подключены к усилителю $У_3$. Данная группа образует 4-точечную схему измерения поперечного усилия резания.

Принцип действия стенда состоит в следующем: на платформу действует усилие, сигналы тензометрических датчиков через усилители подаются на входы аналогово-цифрового преобразователя (далее АЦП), который подключен к компьютеру, через USB-порт. В компьютере данные обрабатываются и на экран монитор выводятся в виде таблиц и графиков, которые содержат значения сил резания.

Помимо измерения усиления резания на данном стенде можно измерить момент силы, относительно вертикальной оси z. Для этого группы тензометрических датчиков $ТД_5$ и $ТД_6$, $ТД_7$ и $ТД_8$, $ТД_9$, и $ТД_{10}$, $ТД_{11}$, и $ТД_{12}$ подсоединены к усилителям $У_2$, $У_3$, $У_4$, $У_5$ соответственно. Данные группы тензометрических датчиков образуют схему измерения момента реакции взаимодействия режущего элемента с обрабатываемым материалом относительно вертикальной оси z. Усилители $У_3$ и $У_5$ подключаются ко входу АЦП с инвертированием сигналов. Данный метод позволяет вычесть из суммарного сигнала синфазные и постоянные составляющие опорных реакций R_5,..,R_{12} и получить суммарное окружное значение, по которому можно вычислить момент.

Выделим ряд достоинств у данного стенда:

- возможность измерение крупногабаритных изделий;
- большой срок службы;
- универсальность (возможность измерения в нескольких координатах);
- хорошая точность.

Помимо достоинств существуют у данного стенда ряд недостатков:

- вес стенда (все компоненты стенда изготовлены из металла);
- цена;
- погрешность (так как в стенде присутствует 12 тензометрических датчиков и у каждого из них существует погрешность, в момент измерения у каждого из 12 тензометрических датчиков накапливается мультипликативная погрешность).

Выводы по разделу 1:

Проведен информационный поиск по теме выпускной квалификационной работы в патентном издании и на рынке продукции. У каждого устройства выявлены недостатки и достоинства. В качестве прототипа взят стенд для исследования сил резания фрезерного агрегата.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ

Модели объектов разделяются на два больших класса: абстрактные (математические) и материальные (физические). Из числа физических моделей наибольшее распространение приобрели аналоговые модели. С развитием математики наиболее обширное применение получили математические модели. По существу, вся математика создана для составления и исследования моделей объектов или процессов.

Создание математической модели преследует две главные цели:

- дать формализованное описание процесса функционирования системы и структуры для однозначности их понимания;
- попытаться представить процедуру функционирования в виде, допускающем аналитическое исследование системы.

Единой методики построения математических моделей не существует. Это обусловлено большим разнообразием классов систем:

- динамические и статические;
- программное или структурное управление;
- переменная и постоянная структура;
- сменное (гибкое) или постоянное (жесткое) программное управление.

По характеру внутренних состояний и входных воздействий системы подразделяются:

- дискретные и непрерывные;
- нелинейные и линейные;
- нестационарные и стационарные;
- стохастические и детерминированные.

Построение модели, которые отражают статику системы (структуру связей и состав компонентов) не вызывает больших затруднений. Для динамической системы статику необходимо дополнить описанием работы системы.

2.1 Математическое описание

В основе работы тензорезистивных преобразователей лежит свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление при малых механических деформациях под действием приложенной силы. Конструктивно большинство тензорезисторов (рисунок 2.1) выпускается в виде проводников, которые жестко связаны с пленочной основой или бумажной. Проводник представляет собой так называемую решетку из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки диаметром 0,02-0,05 миллиметров, к концам которой сваркой или пайкой присоединяются выводные медные проводники. Сверху проводники закрываются пленкой или бумагой, или покрываются лаком. После наклеивания подложки тензорезистора на поверхность деформация этой поверхности передается проводниками и приводит к изменению их сопротивления.

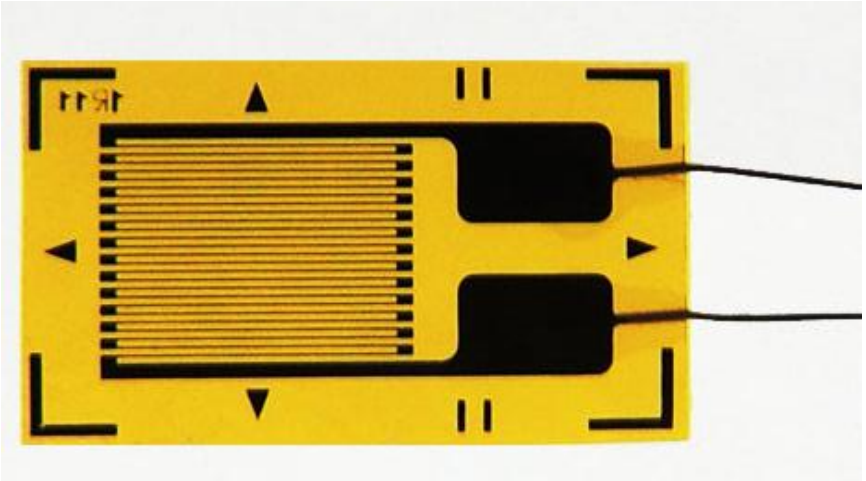


Рисунок 2.1 – Тензорезистор

Как видно на рисунке 2.1 тензорезистор состоит из основы, на которую нанесен проводящий слой, образующий змейку, на “поворотах” толщина проводника увеличена для снижения чувствительности на растяжение перпендикулярной основной оси. Основная ось проходит вдоль линий направления змейки (на рисунке по горизонтали) и растяжение датчика вдоль этого направления вызывает максимальное изменение сопротивления датчика. Сверху датчик покрыт слоем прозрачного ламината, который защищает резистивный слой от повреждений. На датчике также нанесены метки, указывающие направление осей, упрощающих его установку, обычно проходят через центр датчика под углами 90° ± 45° относительно основной оси чувствительности. При построении системы контроля нагрузки на различные механические конструкции обычно применяется несколько тензодатчиков или системы датчиков, оси которых пересекаются под различными углами, либо идут параллельно, поэтому для упрощения монтажа обычно используют датчики, имеющие несколько тензорезистивных элементов и уже расположенных под определенным углом.

Известно, что под действием силы или системы сил на металлический предмет он начинает деформироваться, причем до точки предела текучести материала деформация носит упругий характер и подчиняется закону Гука. Это означает, что при снятии силы предмет принимает исходные размеры, а величина напряжения равна линейной деформации умноженной на модуль Юнга. Формулы для расчета напряжения и деформации приведены ниже:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \tag{2.1}$$

$$\sigma = \frac{F}{S}, \tag{2.2}$$

$$\delta = E * \varepsilon, \tag{2.3}$$

где ε – линейная деформация,

E – модуль Юнга,

σ – напряжение,

F – сила приведшая к деформации,

S – площадь поперечного сечения, на который эта сила действует,

L – исходная длина,

ΔL – изменение длины под действием силы.

Существует также понятия продольной и поперечной деформации.

Продольная деформация – это деформация тела вдоль линии действия силы. Поперечная – деформация тела относительно оси, перпендикулярной направлению действия силы. Их отношения называются коэффициентом Пуассона:

$$\upsilon = \left|\frac{\varepsilon_{\text{поп}}}{\varepsilon_{\text{продол}}}\right|. \tag{2.4}$$

Для тензорезисторных датчиков основная формула выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta R}{R} = K * \varepsilon, \tag{2.5}$$

где ΔR – изменение сопротивления тензодатчика вызванное деформацией ε,

K – коэффициент тензочувствительности датчика (табличная величина),

R – исходное сопротивление.

Если подробнее расписать это выражение, то получим:

$$\Delta R = \frac{R \cdot K \cdot F}{S \cdot E}. \tag{2.6}$$

Из формулы вытекает, что изменение сопротивления тензодатчика, установленного на металлическую балку, поперечного сечения S, прямо

пропорционально площади поперечного сечения балки и модулю Юнга. Измерив изменение сопротивления тензодатчика, можно рассчитать нагрузку на рассматриваемую балку, зная ее поперечное сечение и свойство материала из которого она изготовлена. Эта формула верна только для случаев растяжения/сжатия.

Для ситуации изгиба весь процесс выглядит несколько иначе, поскольку деформация рассчитывается сложнее. Нужно учитывать форму поперечного сечения балки и расстояние от места приложения силы к центру тензодатчика. Деформация в этом случае может быть рассчитана следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{M}{Z \cdot E}, \tag{2.7}$$

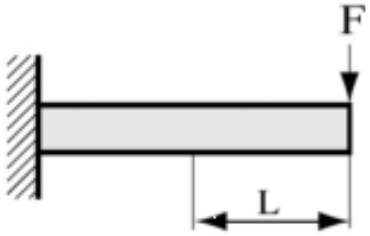
где M – момент силы,

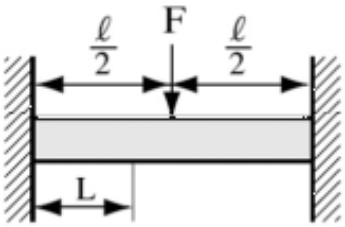
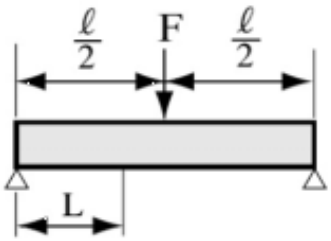
Z – момент сопротивления сечения.

Для различных вариантов размещения тензодатчика и местоположения точки приложения силы рассчитывается различными способами.

Рассмотрим расчет момента силы для различных вариантов положения балки и тензометрического датчика (Таблица 2) и расчет момента сопротивления сечения для различной конфигурации сечения (Таблица 3).

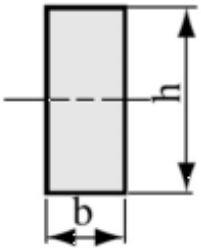
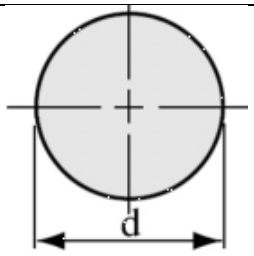
Таблица 2. – Расчет момента силы для различных вариантов положения балки и тензодатчика

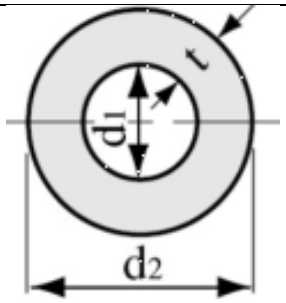
Схема приложения силы	**Формулы вычисления**
	$M = F \cdot L$

	$L = \frac{l}{2}; M = W \cdot \frac{l}{8}$
	$L = \frac{l}{2}; M = W \cdot \frac{l}{4}$

Для мониторинга крутящего момента используются тензодатчики, расположенные на балке под углом 45° относительно оси вращения рисунок 2. Используется один, два или четыре датчика.

Таблица 3. – Расчет момента сопротивления сечения для различной конфигурации сечения

Поперечное сечение	**Формула расчета**
	$M = b \cdot \frac{h^2}{6}$
	$M = \pi \cdot \frac{d^3}{32}$

	$M = \pi \cdot \frac{(d_2^4 - d_1^4)}{32 \cdot d_2}$

При установке двух датчиков их оси располагаются под углом 90° относительно друг друга и под углом 45° и -45° относительно оси вращения. При этом один из датчиков испытывает деформацию сжатия, другой – растяжения. При использовании четырех тензорезисторов они располагаются “крестиком”.

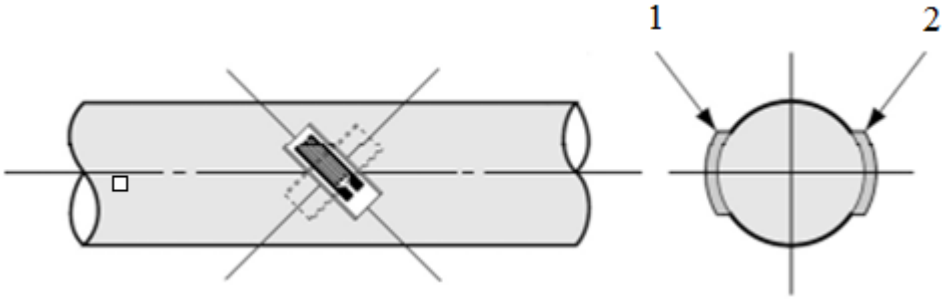


Рисунок 2.2 – Расположение тензодатчика на балке под углом 45°:
1 – деформация растяжения; 2 – деформация сжатия.

Вращающее усилие может быть рассчитано следующим образом:

$$T = \frac{\varepsilon \cdot Z_p \cdot E}{1 + \upsilon}, \tag{2.8}$$

где υ – коэффициент Пуассона,

T – вращающий момент,

E – модуль Юнга,

Z_p – угловое сопротивление сечения.

Для цельного цилиндрического стержня:

$$Z_p = \pi \cdot \frac{d^3}{16}, \tag{2.9}$$

Для цилиндрической полой трубы с внешним диаметром d_2 и внутренним:

$$Z_p = \pi \cdot \frac{(d_2^4 - d_1^4)}{32 * d_2}. \tag{2.10}$$

Поскольку ΔR очень малая величина по сравнению с R, то измерение ее производят, включив датчик в схему моста Уитстона:

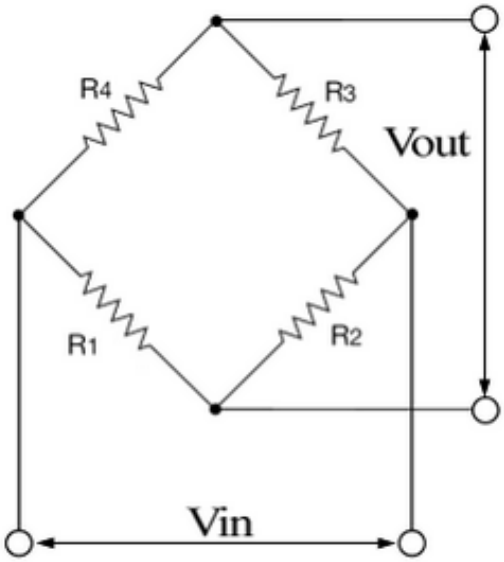


Рисунок 2.3 – Мостовая схема

Принцип измерения основан на взаимной компенсации сопротивлений двух звеньев, одно из которых включает измеряемое сопротивление. В качестве индикатора обычно используется чувствительный гальванометр, показания которого в момент равновесия моста должны быть равны нулю. На схеме R_1, R_2, R_3, R_4 – плечи моста. R_3 представляет собой неизвестное сопротивление; R_1, R_2 и R_4 – известные сопротивления, причём значение R_2 может регулироваться. Если отношение сопротивлений (R_2/R_1) равно отношению сопротивлений другого (R_3/R_4), то ток между ними не будет

протекать, так как будет равна нулю между двумя средними точками разность потенциалов. Сопротивление R_2 регулируется до получения равновесия, а направление протекания тока показывает, в какую сторону нужно регулировать R_2.

С помощью гальванометра можно установить с большой точностью момент равновесия, и если сопротивления R_1, R_2 и R_4 имеют маленькую погрешность, то R3 может быть измерено очень точно, ведь даже небольшие изменения Rx вызывают заметное нарушение баланса всего моста. Когда мост сбалансирован:

$$R_3 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_1}. \tag{2.11}$$

Если известны значения всех четырёх сопротивлений, а также напряжение (Vin), то напряжение на плечах моста можно найти, используя формулы делителя напряжения, а затем вычесть их друг из друга, чтобы найти Vout:

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_4 + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot V_{in} = \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_4 + R_3)(R_1 + R_2)} \cdot V_{in}. \tag{2.12}$$

Если тензорезистор (R_3) будет иметь сопротивление $R + \Delta R$, а остальные резисторы равны R, то имеем:

$$V_{out} = \frac{(R + \Delta R)R - RR}{(R + R + \Delta R)(R + R)} \cdot V_{in} = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} \cdot V_{in}, \tag{2.13}$$

так как ΔR очень малая величина по сравнению с R, то напряжение на выходе будет равно:

$$V_{out} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot V_{in} = \frac{1}{4} \cdot K \cdot E \cdot \varepsilon. \quad (2.14)$$

2.2 Измерения с помощью тензодатчиков

Измерения с помощью тензодатчиков требуют регистрации очень малых изменений сопротивления. К примеру, относительное изменение сопротивления, которое вызывается относительным растяжением 0,0005 при тензорезистивном коэффициенте, который равен 2, составит 0,1%, что для тензодатчика сопротивлением 120 Ом эквивалентно сопротивлению всего лишь 0,12 Ом. Для того, чтобы скомпенсировать температурную погрешность и измерять столь малое изменение сопротивления, тензометрические датчики практически всегда используют в мостовой схеме (мост Уитстона, рисунок 2.3), которые подключена к источнику тока или напряжения (источнику питания моста). Общепринятого стандарта для питания моста не существует. Типовыми являются напряжения 10 В и 3 В. Ток через тензодатчик обычно составляет от 2 до 30 мА для датчиков с сопротивлением от 120 Ом до 1 кОм. Напряжение питания моста должно быть по возможности большим, чтобы увеличить отношение сигнала к шуму, и в то же время достаточно малым, чтобы минимизировать погрешность, которая вызывается саморазогревом датчика. Особые требования предъявляются к стабильности напряжения питания моста и точности, если не используется шестипроводная схема подключения датчика (см. раздел «Влияние сопротивления соединительных проводов»). Для того, чтобы проверить правильность калибровки измерительной схемы используют резистор с известным (калиброванным) значением сопротивления, шунтирующий тензодатчиком. Показания измерительной системы должны соответствовать расчётному значению для этого сопротивления.

2.3 Составляющие погрешности измерения

При использовании тензорезисторов [33] большинство источников погрешностей аналогичны тем, что возникают при использовании терморезисторов. Основными компонентами погрешностей тензорезистора являются следующие:

- случайная погрешность, которая вызывается технологическим разбросом сопротивлений тензорезисторов;
- температурная погрешность, которая вызывается разогревом датчика протекающим током;
- погрешность, которая связана с разностью температурных коэффициентов расширения материала объекта и тензорезистора, на который наклеен тензорезистор;

- систематическая погрешность, которая вызывается термоэлектрическим эффектом;
- погрешность метода (схемы измерения) сопротивления, которая зависит от точности измерения их сопротивления и длины проводов;
- "ползучесть" сопротивления длительно нагруженного тензорезистора;
- сопротивление контактов;
- внешние наводки;
- погрешность измерительного модуля ввода.

В предлагаемом устройстве стенда обрабатываемый материал, с помощью платформы, устанавливается на тензометрических датчиках. В датчиках суммарные реакции уравновешивают воздействие режущих элементов. Предлагаемая конструкция является универсальной по отношению к применяемому инструменту.

2.4 Уравнения модели

Условия равновесия платформы в векторной форме имеют вид (2.15) и (2.16):

$$\sum_{i=1}^{12} R_i = F + P, \quad (2.15)$$

$$\sum_{i=1}^{12} M(R_i) = M(F + P). \quad (2.16)$$

На рисунке 2.5, а показана схема реакций в тензометрических датчиках, которая возникает при воздействии на платформу силы **F** и веса **P**.

На рисунке 2.5, б показана схема реакций в тензометрическом стенде при развороте платформы на угол α, который обусловлен упругими деформациями датчиков. Все реакции $\boldsymbol{R_i}, (i = 1,..,12)$ благодаря сферической форме кинематических пар в зоне контактов датчиков с платформой сохраняют свои направления относительно координатных осей x, y и z.

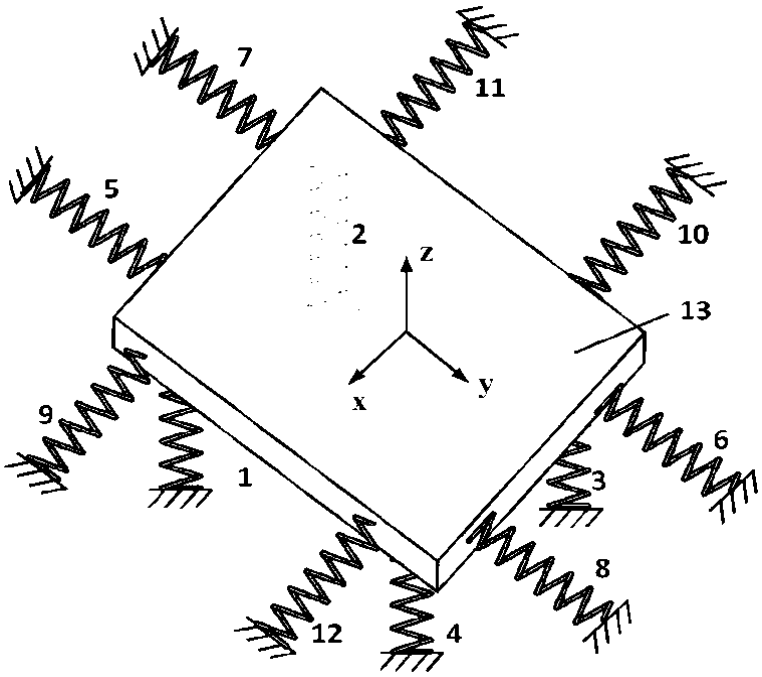


Рисунок 2.4 – Кинематическая схема 3-х компонентного стенда

Уравнения измерений получаются из уравнения (2.15) путем проектирования векторов на соответствующие оси:

$$\sum_{i=1}^{4} R_{iz} = F_z + P, \quad (2.17)$$

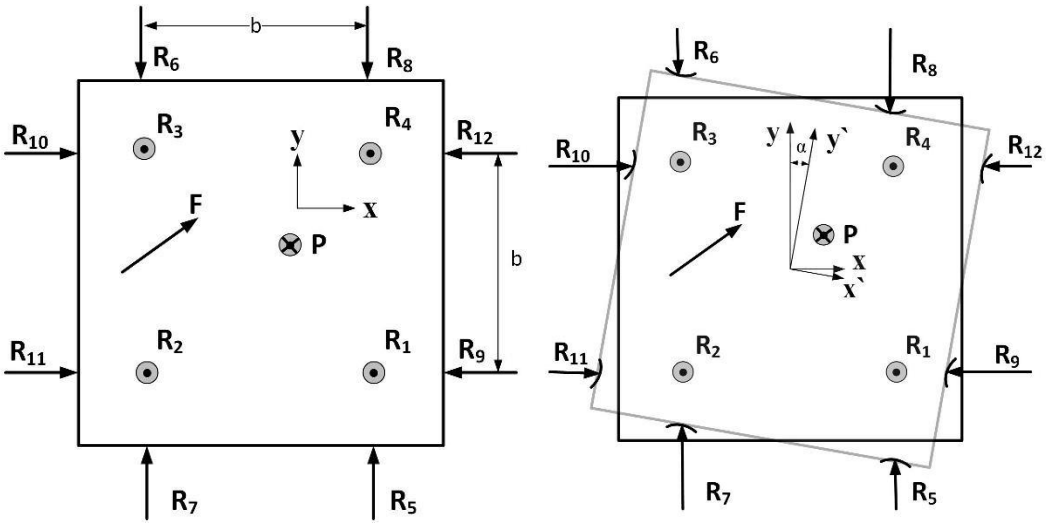
$$\sum_{i=5}^{8} R_{iy} = F_y + 4 \cdot F_0, \quad (2.18)$$

$$\sum_{i=9}^{12} R_{ix} = F_x + 4 \cdot F_0, \quad (2.19)$$

где в уравнения (2.18) и (2.19) подставлены значения предварительной нагрузки датчиков от упругих элементов F_0 – силы, создаваемой упругими элементами, вместо нулевых проекций силы тяжести P.

В уравнениях (2.17) – (2.19) имеются нулевые проекции реакций, которые обусловлены не только расположением основания стенда в плоскости горизонта, но и сферической формой опор:

$$R_{ix} = 0, R_{iy} = 0, \text{для } i = 1,..,4;$$
$$R_{ix} = 0, R_{iz} = 0, \text{для } i = 5,..,8;$$
$$R_{iy} = 0, R_{iz} = 0, \text{для } i = 9,..,12.$$



а) *б)*

Рисунок 2.5 – Схема реакций в стенде

Находим выражение для составляющих силы резания из уравнений (2.17) – (2.19) по схеме, изображенной на рисунке 2.5, а:

$$F_z = \sum_{i=1}^{4} R_{iz} - P, \quad (2.20)$$
$$F_y = \sum_{i=5}^{8} R_{iy} - 4 \cdot F_0, \quad (2.21)$$
$$F_x = \sum_{i=9}^{12} R_{ix} - 4 \cdot F_0. \quad (2.22)$$

Уравнения для оценки момента реакции и силы относительно оси z по схеме на рисунке 2.5, б, будут иметь следующий вид:

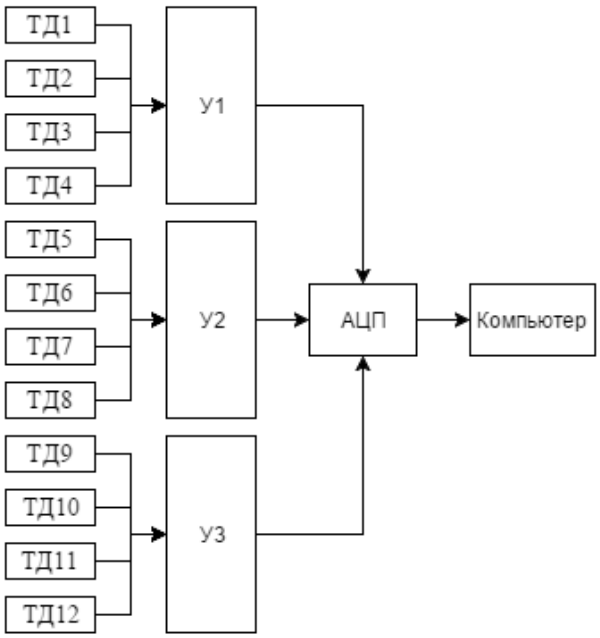
$$F_z = \sum_{i=1}^{4} R_{iz} - P, \quad (2.23)$$

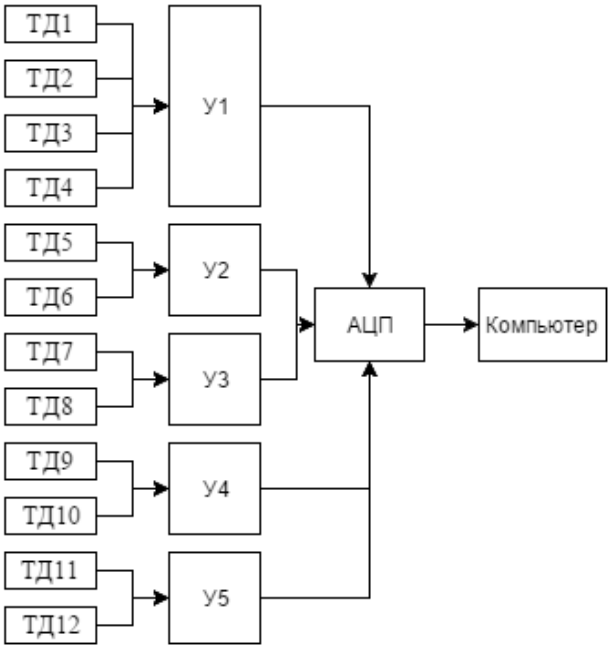
$$M_z = \left[R_{5y} + R_{6y} + R_{11x} + R_{12x} - (R_{7y} + R_{8y} + R_{9x} + R_{10x})\right] \cdot b/2, \quad (2.24)$$

где b – расстояние между датчиками, которое показано на рисунке 2.5, а.

Силы F_0 не вошли в уравнение (2.23) из-за вычитания сигналов с датчиков.

Справедливы уравнения (2.20) – (2.24) в том случае, если платформа стенда выставлена в плоскости горизонта.





а) *б)*

Рисунок 2.6 – Структурные схемы электрической части стендов:
а) – для измерения трех компонент сил; *б)* – для измерения момента и вертикальной компоненты силы

Применяя способы теории точности, возможно найти отыскать допуски на характеристики элементов измерительного прибора, соблюдение которых обеспечивало бы и без регулировки получение их с погрешностями, которые меньше допустимых пределов. Но в многочисленных вариантах данные

допуски становятся до такой степени незначительны, что изготовление прибора с установленными границами допускаемых погрешностей становится технологически невозможным. Выйти из положения двумя путями возможно: для начала, ввести в его конструкцию дополнительные регулировочные узлы и увеличить допуски на параметры некоторых элементов приборов, которые способны компенсировать воздействие отклонений данных параметров от их номинальных значений, а затем, реализовать особую градуировку измерительного прибора.

В измерительном приборе в большинстве случаев можно предусмотреть или найти такие элементы, вариация параметров которых более значительно влияет на его систематической погрешности, главным образом погрешности схемы, мультипликативной и аддитивной погрешностях.

В общем случае должны быть предусмотрены два регулировочных узла в конструкции измерительного прибора, такие как регулировка чувствительности и регулировка нуля. Регулировкой нуля уменьшают влияние аддитивной погрешности, которая для каждой точки шкалы постоянна, а регулировкой чувствительности уменьшают мультипликативные погрешности, которые меняются с изменением измеряемой величины линейно. При правильной регулировке чувствительности и нуля уменьшается влияние погрешности схемы прибора. Помимо того, часть приборов снабжаются устройствами с целью регулировки погрешности схемы.

Мультипликативная погрешность возникает в том случае, если изменяется коэффициент усиления или ослабляется входной сигнал (к примеру, изменяется температура окружающей среды, или вследствие старения элементов), из-за изменения значений, которые воспроизводятся мерами, которые встроены в измерительные приборы, из-за изменений жесткости пружин, которые создают в электромеханических приборах противодействующий момент.

Существуют два принципиально разных метода увеличения точностных характеристик любого прибора и стенда в частности:

Первый метод – это предотвращение факторов появления ошибок или минимизация их воздействия на точностные характеристики, которые приводят в конечном счете к приближению реальной выходной характеристики прибора к идеальной.

Второй метод – это алгоритмический, возмещение ошибок прибора при известном характере воздействия разных факторов на его точностные характеристики.

Первый метод обеспечивается, как правило, программно-аппаратно-конструктивными решениями.

Второй метод на основе известных зависимостей (обычно – математической модели погрешностей прибора) дает возможность осуществить алгоритмическую компенсацию остаточных погрешностей, которые при реализации первого метода не минимизированы.

Приведенные методы имеют конкретные (экономические, вычислительные, физические) ограничения на реализацию. К примеру, применение системы термостабилизации с целью уменьшения воздействия температурных погрешностей влечет за собой значительные конструктивные изменения прибора и использование добавочных электронных модулей и блоков.

Из приведенной информации можно сделать следующий вывод. В процессе возникновения усилий тензометрическими датчиками выполняется измерение проекций сил резания; при этом имеет место влияние погрешности, обусловленной конструкцией датчика и влиянием на него различных условий;

При этом из вида уравнений (2.15) – (2.24) можно сделать вывод о линейности физических процессов в стенде. Ошибки измерения [36] компонент R_{ix}, R_{iy}, R_{iz} можно считать некоррелированными, а их характер аддитивным.

В этом случае функцию преобразования при измерении усилия R_{ix} можно представить следующим образом [4,5]:

$$R_{iz}^{*} = R_{iz0}^{*} + K * R_{iz}, \qquad (2.25)$$

где R_{iz0}^{*} – реакция смещения нуля;

R_{iz} – фактическая реакция в тензодатчике;

Коэффициент К вычисляется по формуле:

$$K = K_0 \cdot (1 + \delta_i). \qquad (2.26)$$

Сила реакции относительно оси z:

$$\sum_{i=1}^{4} R_{iz}^{*} = \sum_{i=1}^{4} R_{iz0}^{*} + K_0 \sum_{i=1}^{4} (1 + \delta_i) R_{iz} = \sum_{i=1}^{4} R_{iz0}^{*} + K_0 \sum_{i=1}^{4} R_{iz} + K_0 \sum_{i=1}^{4} \delta_i \cdot R_{iz}$$

$$\Delta R_z = \sum_{i=1}^{4} R_{iz}^{*} - K_0 \sum_{i=1}^{4} R_{iz} = \sum_{i=1}^{4} (R_{iz0}^{*} - K_0 \cdot \delta_i \cdot R_{iz}) = \Delta R_{z0} - K_0 \cdot \bar{\delta} \cdot R_z,$$

где $\Delta R_z = \sum_{i=1}^{4} R_{iz0}^{*}$ – аддитивная составляющая;

$\bar{\delta} = \dfrac{\sum_{i=1}^{4} \delta_i \cdot R_{iz}}{4 \cdot R_z}$ – средневзвешенная величина;

$R_z = \sum_{i=1}^{4} R_{iz}$ – фактическая сила резания в проекции на ось z.

Составим подобные уравнения на осях y и x:

$$R_{iy}^{*} = R_{iy0}^{*} + K \cdot R_{iy}, \qquad (2.27)$$

где R_{iy0}^{*} – реакция смещения нуля;

R_{iy} – фактическая реакция в тензодатчике.

Коэффициент К вычисляется по формуле:

$$K = K_0 \cdot (1 + \delta_i). \qquad (2.28)$$

Сила реакции относительно оси y:

$$\sum_{i=5}^{8} R_{iy}^* = \sum_{i=5}^{8} R_{iy0}^* + K_0 \sum_{i=5}^{8} (1 + \delta_i) R_{iy} = \sum_{i=5}^{8} R_{iy0}^* + K_0 \sum_{i=5}^{8} R_{iy} + K_0 \sum_{i=5}^{8} \delta_i \cdot R_{iy}$$

$$\Delta R_y = \sum_{i=1}^{8} R_{iy}^* - K_0 \sum_{i=1}^{8} R_{iy} = \sum_{i=1}^{8} (R_{iy0}^* - K_0 \cdot \delta_i \cdot R_{iy}) = \Delta R_{y0} - K_0 \cdot \bar{\delta} \cdot R_y,$$

где $\Delta R_y = \sum_{i=5}^{8} R_{iy0}^*$ – аддитивная составляющая;

$\bar{\delta} = \dfrac{\sum_{i=5}^{8} \delta_i \cdot R_{iy}}{4 \cdot R_y}$ – средневзвешенная величина;

$R_y = \sum_{i=5}^{8} R_{iy}$ – фактическая сила резания в проекции на ось y.

Сила реакции относительно оси x:

$$R_{ix}^* = R_{ix0}^* + K \cdot R_{ix}, \qquad (2.29)$$

где R_{ix0}^* – реакция смещения нуля;

R_{ix} – фактическая реакция в тензодатчике.

Коэффициент K вычисляется по формуле:

$$K = K_0 * (1 + \delta_i). \qquad (2.30)$$

$$\sum_{i=9}^{12} R_{ix}^* = \sum_{i=9}^{12} R_{ix0}^* + K_0 \sum_{i=9}^{12} (1 + \delta_i) R_{ix} = \sum_{i=9}^{12} R_{ix0}^* + K_0 \sum_{i=9}^{12} R_{ix} + K_0 \sum_{i=9}^{12} \delta_i \cdot R_{ix}$$

$$\Delta R_x = \sum_{i=9}^{12} R_{ix}^* - K_0 \sum_{i=9}^{12} R_{ix} = \sum_{i=9}^{12} (R_{ix0}^* - K_0 \cdot \delta_i \cdot R_{ix}) = \Delta R_{x0} - K_0 \cdot \bar{\delta} \cdot R_x,$$

где $\Delta R_x = \sum_{i=9}^{12} R_{ix0}^*$ – аддитивная составляющая;

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=9}^{12} \delta_i \cdot R_{ix}}{4 \cdot R_x} - \text{ средневзвешенная величина;}$$

$$R_x = \sum_{i=9}^{12} R_{ix} - \text{фактическая сила резания в проекции на ось x.}$$

2.5 Погрешности усилителей

Изменение температуры значительно влияет на тензодатчик из-за теплового расширения материала, которое изменяет сопротивление, поэтому изменение сопротивления может быть ошибочно детектировано как часть измерения напряжения. При включении тензодатчиков в конфигурации моста Уитстона изменение температуры можно легко скомпенсировать. В такой конфигурации температура будет одинаково влиять на все плечи моста, что сводит к нулю изменение сопротивления, обеспечивая автокомпенсацию влияния температуры.

Однако конфигурация тензодатчиков в виде моста Уитстона имеет главный недостаток – смещение нуля. Это происходит, когда один из датчиков установлен не надлежащим образом или деформирован. Этот недостаток преодолевается с помощью шунтирующего резистора для балансировки моста. Однако балансировка моста в полевых условиях нецелесообразна, т.к. датчики деформируются также при их износе в процессе эксплуатации.

Как правило, для измерения выхода с тензодатчиков используются сигма-дельта АЦП и фильтры нижних частот (ФНЧ). В некоторых сигма-дельта АЦП предусмотрена возможность усиления сигнала в самом сигма-дельта модуляторе. С этим связано еще одно дополнительное преимущество. Поскольку мы увеличиваем коэффициент усиления модулятора АЦП, полоса пропускания АЦП уменьшается. Это не является проблемой при измерениях сигналов с датчиков, т.к. их рабочая частота намного меньше. Однако уменьшение полосы пропускания может стать преимуществом, т.к. оно действует как ФНЧ и не позволяет помехам воздействовать на систему.

АЦП или аналого-цифровой преобразователь – один из наиболее значимых электронных компонентов в тестовом и измерительном оборудовании. АЦП изменяет напряжение (аналоговый сигнал) в код, над которым программное обеспечение и микропроцессор осуществляет конкретные воздействия. В том числе если будет производиться работа только с цифровыми сигналами, то скорее всего будет использоваться АЦП в составе осциллографа, для того чтобы выяснить их аналоговые характеристики.

Имеется ряд ключевых видов архитектуры АЦП, несмотря на то, что в пределах каждого вида имеется кроме того большое число вариантов. Разнообразные виды измерительного оборудования используют разные виды аналого-цифрового преобразователей. К примеру, в цифровом осциллографе применяется достаточно высокая частота дискретизации, но при этом высокое разрешение не требуется. В цифровых мультиметрах необходимо большее разрешение, однако возможно пожертвовать быстродействием измерения. Системы сбора данных общего назначения по разрешающей способности и скорости дискретизации обычно занимают место между цифровыми мультиметрами и осциллографами. В оборудовании данного типа применяется АЦП последовательного приближения или сигма-дельта АЦП. Имеются кроме этого параллельные АЦП с целью приложений, которые требуют скоростной обработки аналоговых сигналов, и интегрирующие АЦП с высокими разрешением и помехоподавлением.

Рассмотрим некоторые метрологические характеристики АЦП-преобразователей.

LSB (least significant bit) (младший значащий бит) – это наименьшее значение напряжения, которое может быть измерено АЦП. Находится по формуле [12,13]:

$$1LSB = \frac{U_{on}}{2^N}, \tag{2.31}$$

где U_{on} – значения источника опорного напряжения (ИОН);

N – разрядность АЦП.

2.5.1 Идеальная передаточная характеристика АЦП

Передаточная характеристика аналого-цифрового преобразователя – это функция зависимости кода на выходе аналого-цифрового преобразователя от напряжения на его входе. Такого рода график представляет собой кусочно-линейную функцию из 2^N "ступеней", где N – это разрядность аналого-цифрового преобразователя. Любой горизонтальный отрезок данной функции соответствует одному из значений выходного кода аналого-цифрового преобразователя (рисунок 2.7). Идеальная передаточная характеристика будет представлять собой прямую линию, которая проходит через начало координат, если соединить начала этих горизонтальных отрезков линиями (на границах перехода от одного значения кода к другому).

Идеальную передаточную характеристику иллюстрирует рисунок 2.7 для трех разрядного АЦП на границах перехода кода с контрольными точками. Выходной код принимает минимальное значение (000b) при значении входного сигнала от 0 до 1/8 полной шкалы (наибольшего значения кода этого аналого-цифрового преобразователя). Кроме этого необходимо выделить, что АЦП дойдет до значения кода полной шкалы (111b) при 7/8 полной шкалы, а никак не при значении полной шкалы.

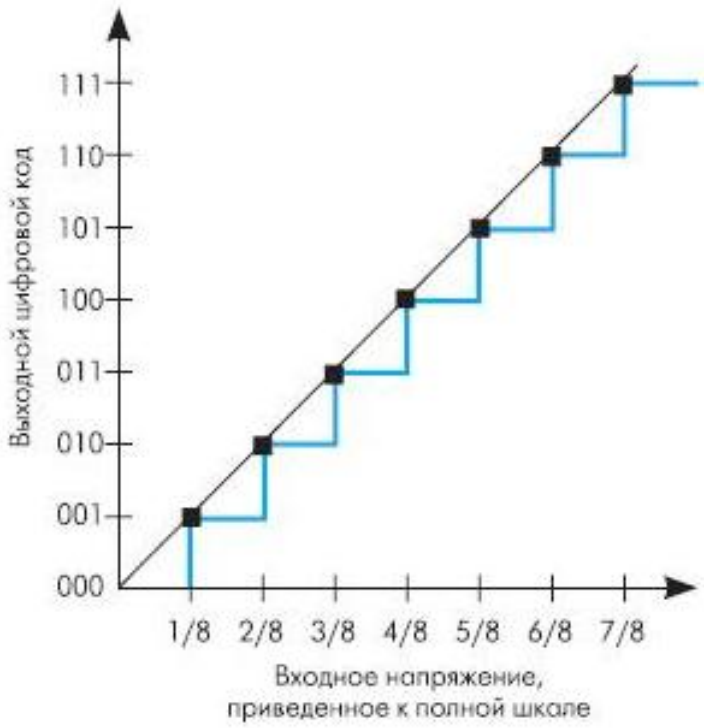


Рисунок 2.7 – Идеальная передаточная характеристика 3-разрядного АЦП

Таким образом на выходе переход в максимальное значение происходит при значении, меньшем на наименьший значащий разряд (LSB), чем входное напряжение полной шкалы, а не при напряжении полной шкалы. Передаточная характеристика со смещением -1/2 LSB может быть реализована. Это достигается за счет того, что смещение передаточной характеристики влево, что, в свою очередь, из диапазона -1... 0 LSB в диапазон -1/2 ... +1/2 LSB смещает погрешность квантования.

По причине технологического разброса параметров при изготовлении интегральных микросхем реальные АЦП не имеют идеальной передаточной характеристики. Отклонения от идеальной передаточной характеристики приводятся в технической документации и определяют статическую погрешность АЦП.

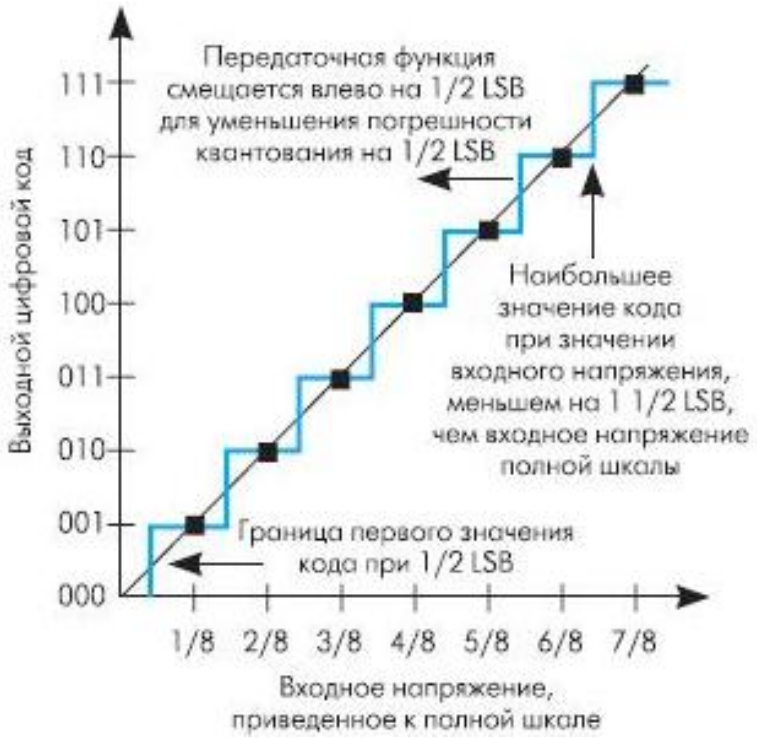


Рисунок 2.5 – Передаточная характеристика 3-х разрядного АЦП со смещением на -1/2 LSB

2.5.2 Аддитивная погрешность АЦП

Идеальная передаточная характеристика АЦП пересекает начало координат, в то время как происходит при достижении значения 1 LSB первый переход кода. Аддитивная погрешность (или по-другому погрешность смещения) может быть определена в виде смещения всей передаточной характеристики вправо или влево относительно оси входного напряжения, как это показано на рисунке 2.9. Следовательно, намеренно включено смещение 1/2 LSB в определение аддитивной погрешности АЦП.

Рисунок 2.9 – Аддитивная погрешность АЦП

2.5.3 Мультипликативная погрешность АЦП

Мультипликативная погрешность или по-другому погрешность полной шкалы – это разность между реальной и идеальной передаточными характеристиками, в точке максимального выходного значения, в том случае если смещение отсутствует (нулевая аддитивная погрешность). Это проявляется как изменение наклона передаточной функции, показанной на рисунке 2.10.

Из приведенной информации можно сделать вывод о следующих стадиях преобразования измеряемых величин:

1) в процессе возникновения усилий тензометрическими датчиками выполняется измерение проекций сил резания; при этом имеет место влияние погрешности, обусловленной конструкцией датчика и влиянием на него различных условий;

2) при усилении измерительного сигнала на него могут влиять погрешности, обусловленные физическими процессами в схеме усилителя, при этом могут иметь место как случайные, так и систематические ошибки.

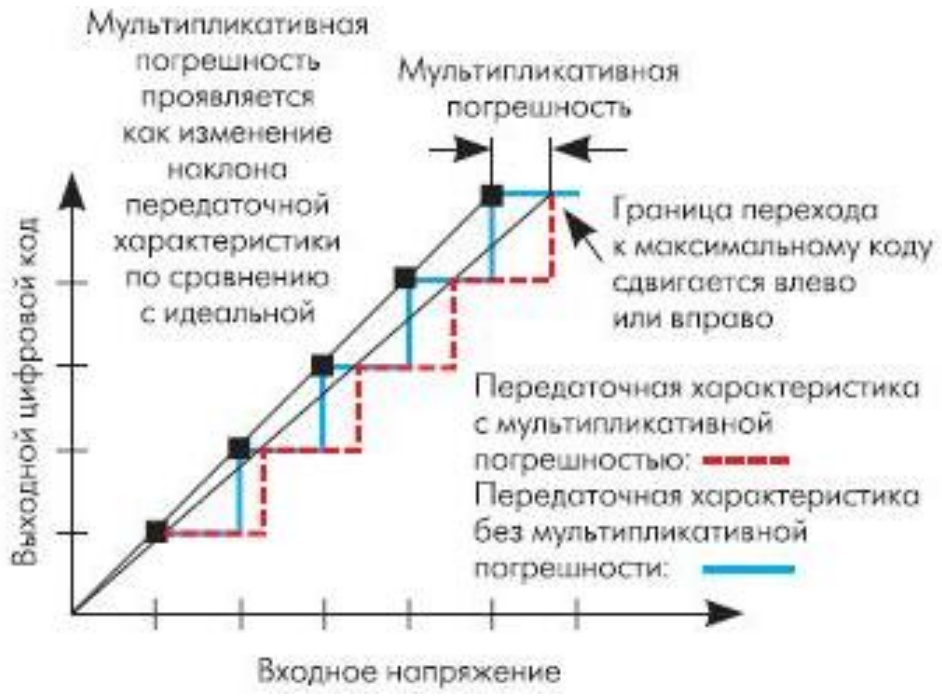


Рисунок 2.11 – Мультипликативная погрешность АЦП

Выводы по разделу 2

Рассмотрена математическая модель измерения тензометрического датчика. Описана математическая модель погрешности силоизмерительного стенда. Проанализированы погрешности аналого-цифрового преобразователя.

3 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ УСТРАНЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

3.1 Создание блок-схемы алгоритма

Перед составлением программного обеспечения необходимо составить блок-схему. Единая система программной документации (ЕСПД), действующая на территории Российской Федерации, частью которой является стандарт – ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов программ, данных и систем» [33].

Первоначальным этапом является опрос датчиков. Для этого необходимо произвести проверку – все ли тензометрические датчики доступны. Если доступны все датчики, то необходимо собрать информацию с тензометрических датчиков и обработать собранную информацию по определенному алгоритму. После сбора информации необходимо вывести сообщение о необходимости повторного сбора информации. Если повторный сбор информации не требуется, то выходим из программы, а ели требуется, то снова производим проверку тензодатчиков. Если часть тензодатчиков недоступна, то необходимо либо снова провести проверку тензодатчиков, либо попытаться собрать и обработать информацию с доступных тензодатчиков. Если доступных тензодатчиков достаточно для анализа, то собираем и обрабатываем информацию по определенному алгоритму. Если доступных тензодатчиков недостаточно, то выводим сообщение об ошибке. После вывода ошибки либо снова производим проверку тензодатчиков, либо выходим из программы.

Помимо словесного способа описания алгоритма рассмотрим и графический способ описания алгоритма снятия данных со стенда. Для этого составим блок-схему.

Блок-схема в общем виде представлена на рисунках 3.1 и 3.2. Изучив чертежи стенда для исследования сил резания фрезерного агрегата можно заметить, что используется 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

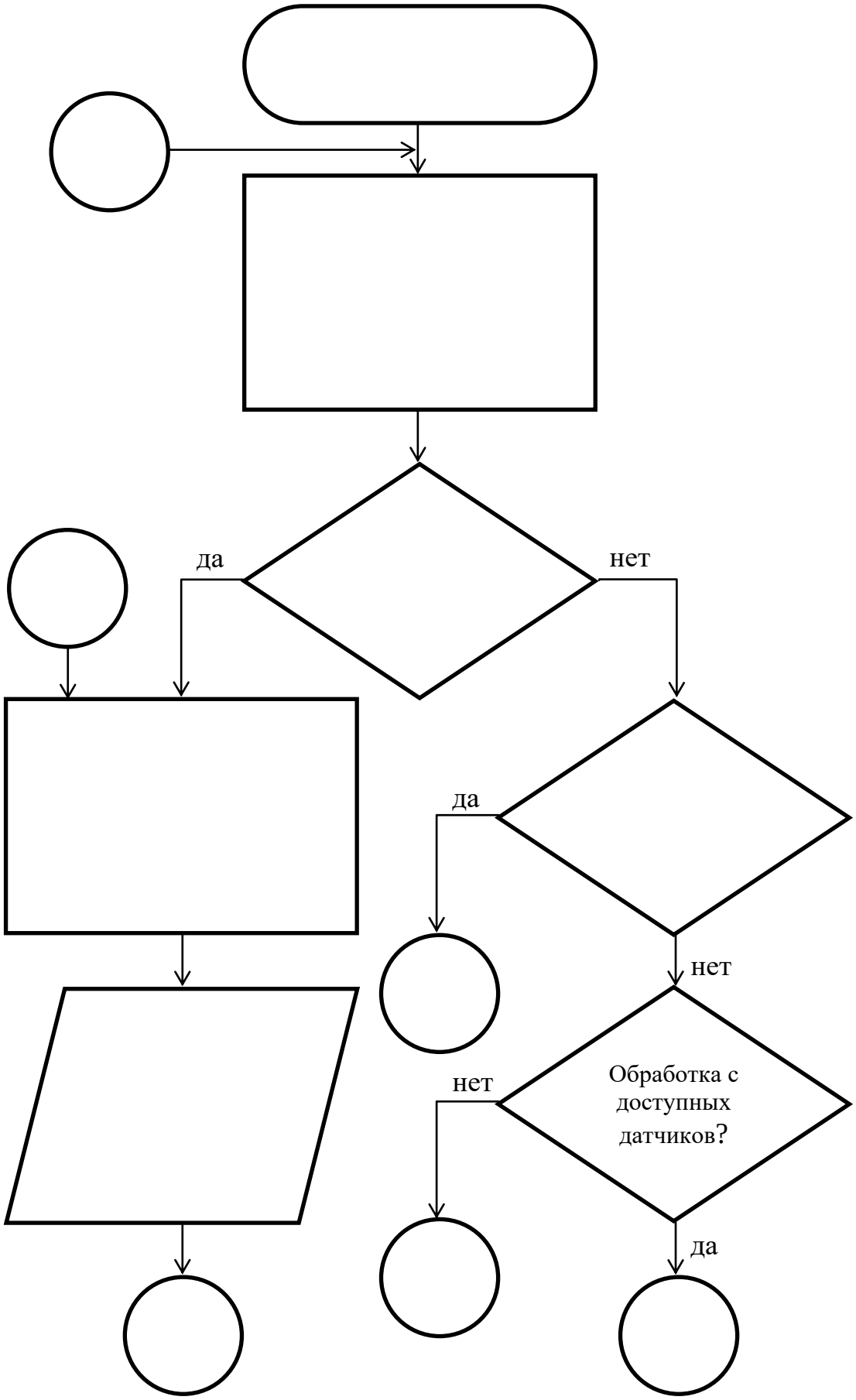
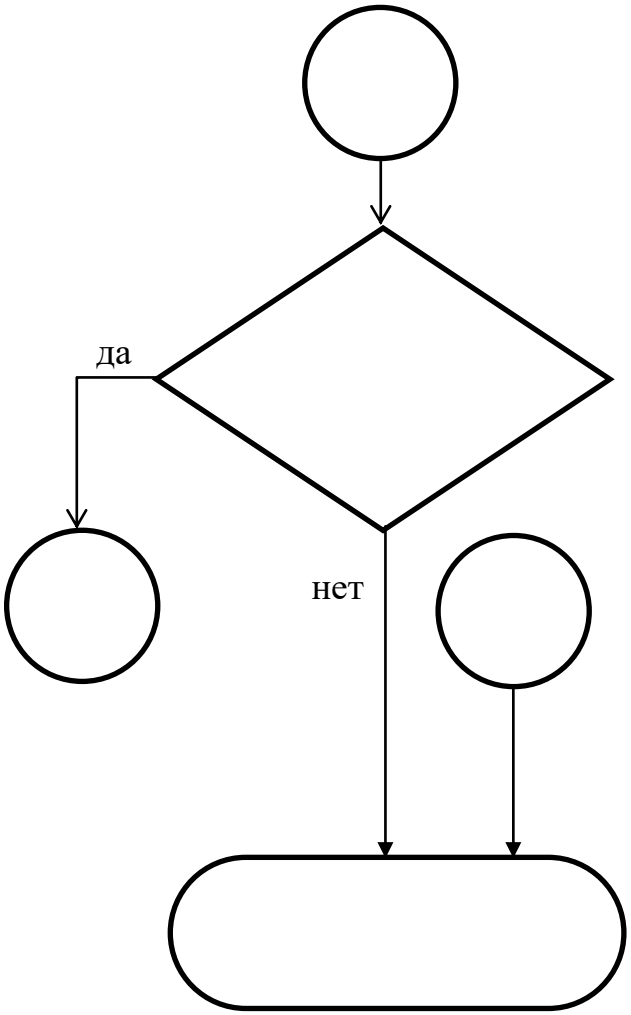

да
нет
да
нет
Обработка с доступных датчиков?
нет
да

Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма обработки информации с тензодатчиков



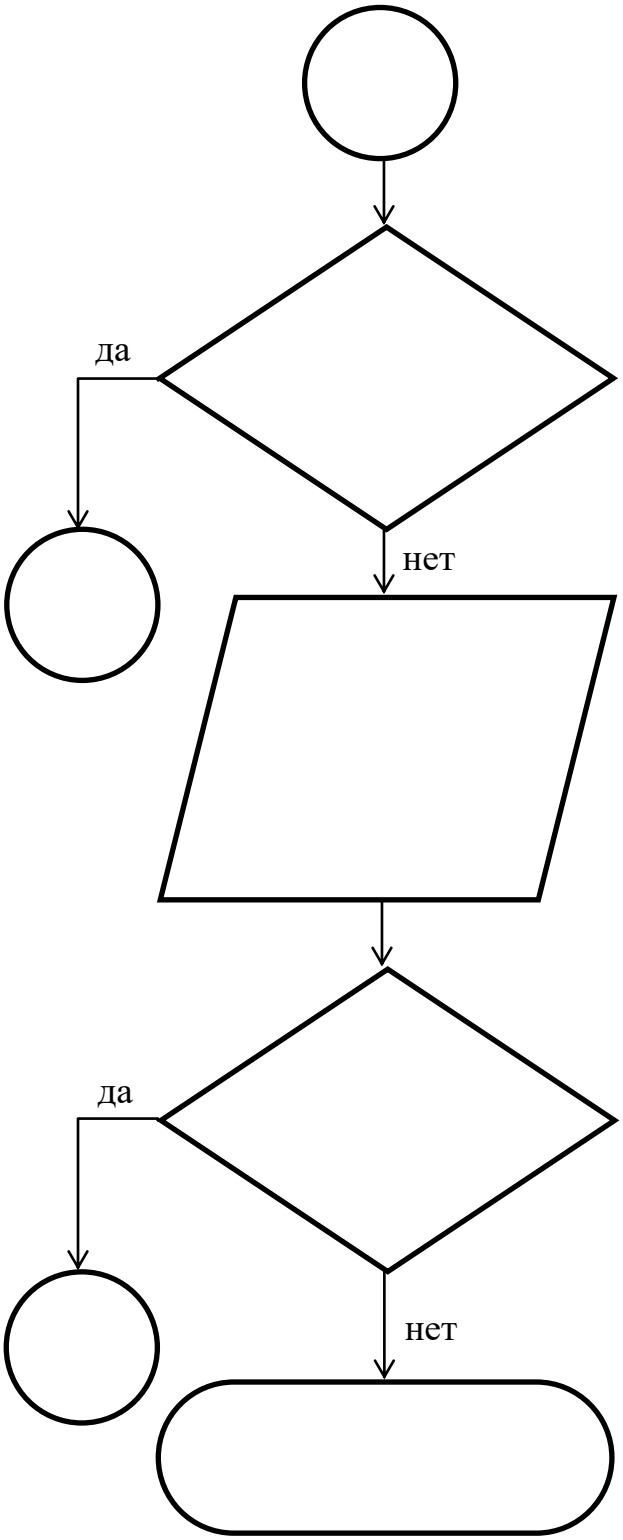


Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритма обработки информации с тензодатчиков

А также в стенде применяются цилиндрические тензометрические датчики Мерадат К-18М в количестве 12 штук, технические характеристики которого приведены в таблице 4.

Технические характеристики тензодатчика Мерадат К-18М:

Рабочий коэффициент передачи (РКП)…….....2,0±0,003 (мВ/В)

Наибольший предел измерения (НПИ)…….....…..0,05 / 0,1 / 0,2 / 0,5 / 1 / 2 / 3 (т)

Нулевой коэффициент передачи (НКП)… ……..……..……..±1 (% от РКП)

Комбинированная погрешность……..……..……....±0,05 (% от РКП)

Выходное сопротивление……...400±10 (Ом)

Входное сопротивление…….….352±2 (Ом)

Рекомендуемое напряжение питания……..…….....5-12 В

Степень защиты по ГОСТ 14254……..……...……..IP68

Разрушающая перегрузка……..……...……..200 (% от НПИ)

Допустимая перегрузка……..……...…….150 (% от НПИ)

3.2 Программное обеспечение для стенда

Программа для измерения силы и момента резания написана на языке Delphi. Была выбрана данная среда ввиду стабильности, хорошей скорости и низких требований к аппаратному обеспечению. Но так как при попытке компиляции проекта наблюдалось зависание операционной среды Windows 10 было принято решение создать виртуальную машину с операционной средой Windows XP SP3.

В проекте присутствует:

- четыре окна вывода графиков сил резания (три окна) и момента резания (одно окно);
- кнопка «Опросить датчики»;
- кнопка «Результаты»;
- кнопка «Очистить;
- кнопка «Пауза/Продолжить»;
- галочка «ФВЧ»;
- кнопка выхода;
- кнопка настроек.

На рисунках 3.3 и 3.4 показаны окна измерения силы резания по оси x (аналогично выглядят окна сил резания по осям y и z) и момента резания по оси z до начала измерения.

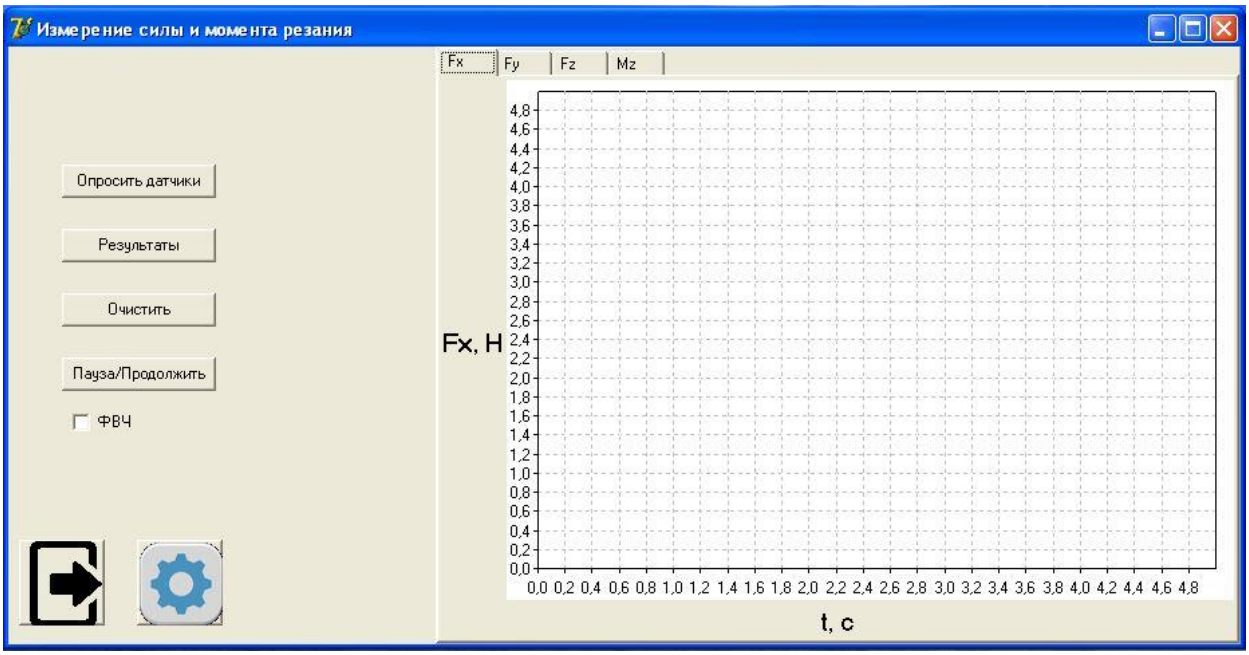


Рисунок 3.3 – Окно измерения силы резания по оси x

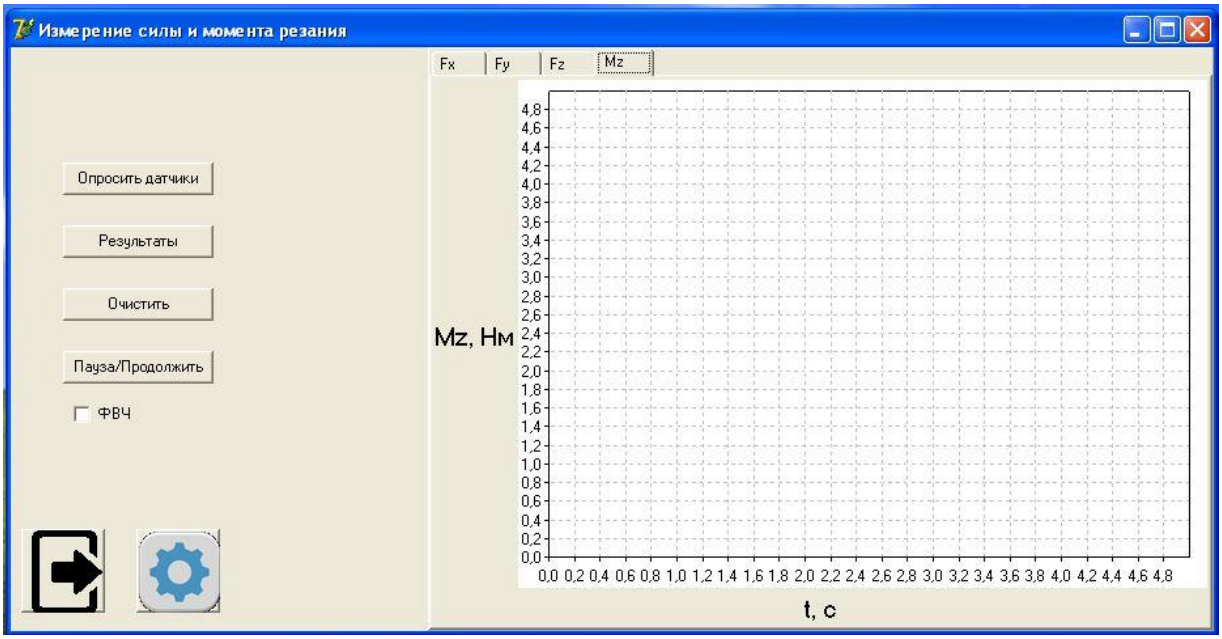


Рисунок 3.4 – Окно измерения момента резания по оси z

При нажатии на кнопку «Опросить датчики» появляется на окне проекта (см Рисунок 3.5) метка о доступности датчиков (доступен/недоступен).

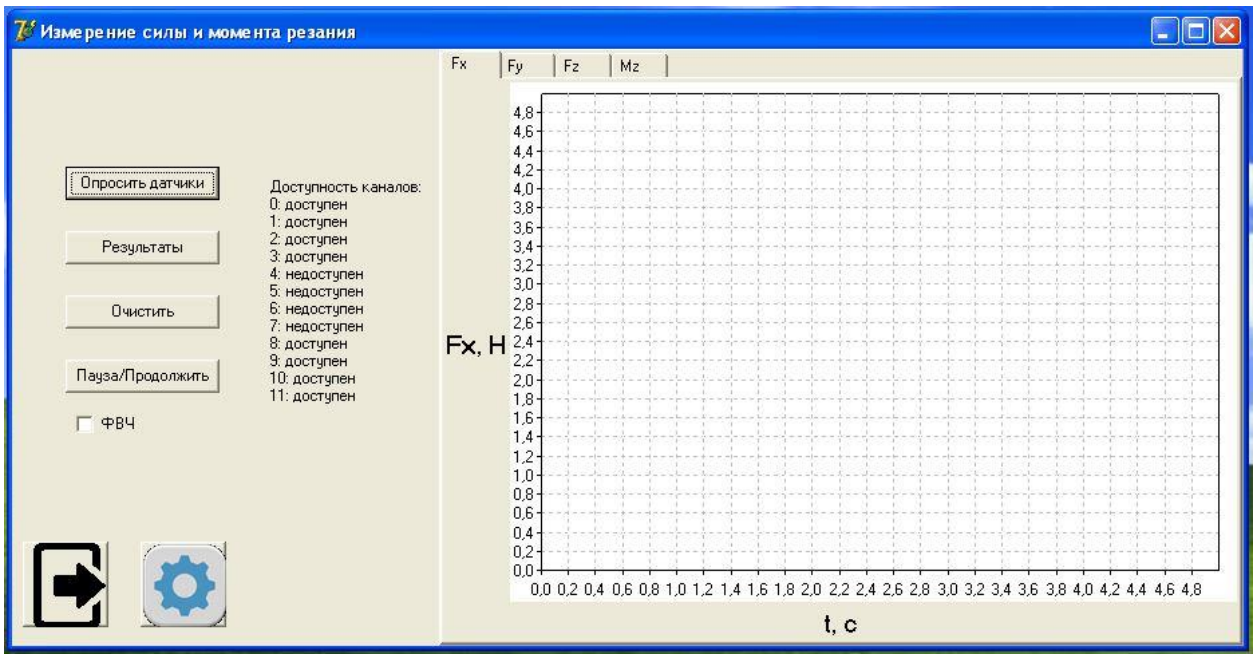


Рисунок 3.5 – Доступность тензодатчиков

Каналы 0…3 относятся к тензодатчикам, которые измеряют силу резания по оси x. Каналы 4…7 относятся к тензодатчикам, которые измеряют силу резания по оси y. Каналы 8…11 относятся к тензодатчикам, которые измеряют силу резания по оси z.

При нажатии на кнопку «Результаты» возможны два исхода:

- если все двенадцать тензодатчиков доступны, то начинается измерение. На каждом из четырех окон появляются графики измерения;
- если хотя бы один из двенадцати тензодатчиков недоступен, то всплывает окно, сообщающее о недоступности тензодатчиков (рисунок 3.6). Возможен выбор. Если нажать кнопку «Yes», то появится другое окно (рисунок 3.7), которое оповещает, что для измерения силы и момента тензодатчиков недостаточно, возможно ли вывести результат.

Если нажать на кнопку «No» на всплывающих окнах, то результат выводиться не будет до тех пор, пока не будет два раза нажата кнопка «Yes» или все тензодатчики не будут не будут доступны.

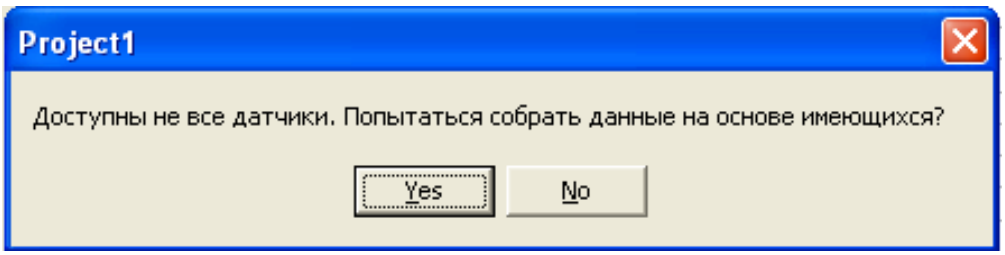


Рисунок 3.6 – Всплывающее окно, сообщающее о недоступности тензодатчиков

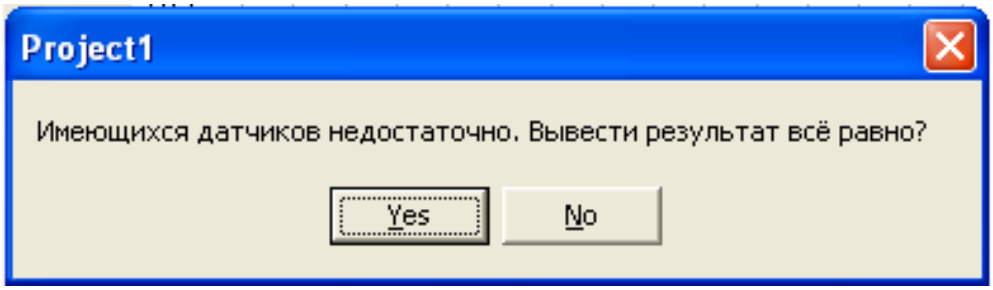


Рисунок 3.7 – Утверждение выполнения измерения силы и момента

Для измерения силы резания и момента резания необходимо использовать плату с аналоговыми входами. Для проверки работоспособности программы, написанной на языке Delphi, было использовано программное обеспечение Advantech Device Manager.

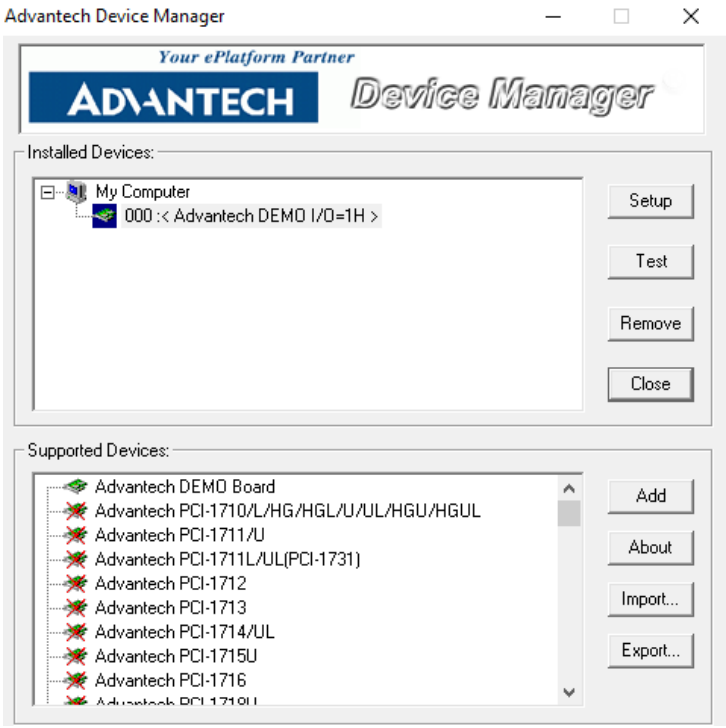


Рисунок 3.8 – Программное обеспечение Advantech Device Manager

Данная программа общается с аппаратурой Advantech не напрямую, а через драйвер этих плат, которые поставляются компанией Advantech вместе с платами. Реально, программа использует интерфейс Advantech Device Manager, позволяющее использовать программу “Alarm” со всеми платами, драйвера которых поддерживают данный интерфейс.

До начала измерения необходимо настроить параметры тензодатчиков и платформы. Для этого необходимо нажать на кнопку, которая показана на рисунке 3.9.

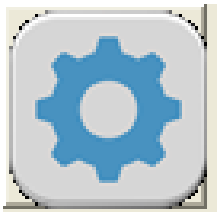


Рисунок 3.9 – Кнопка вывода окна настроек

При нажатии кнопки настройки появляется окно с настройками (рисунок 3.10).

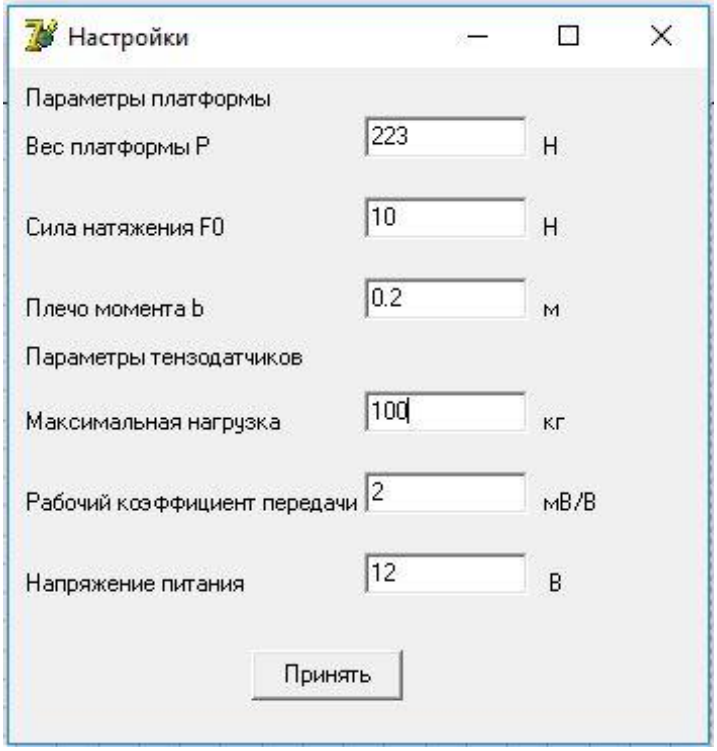


Рисунок 3.10 – Окно настроек

В программе изначально забиты параметры, которые показаны на рисунке 3.10.

```
//Инициализация параметров датчиков и платформы.
  F0 := 10; //Сила натяжения тензодатчиков, Н.
  P := 223; //Вес платформы, Н.
  b := 0.2; //Плечо момента резания, м.
  maxWeight := 100; //Максимальный вес, на который рассчитан тензодатчик, кг.
  OS := 2; //РКП, рабочий коэффициент передачи датчика, мВ/В.
  inputVoltage := 12; //Напряжение питания датчика, В.
```

Вес платформы взят со сборочного чертежа (приложение Б), плечо момента также взято со сборочного чертежа, это расстояние между тензодатчиками по центрам. Параметры тензодатчиков взяты из паспортных данных, которые представлены в таблице 4. Максимальная нагрузка – это тот максимальный вес, с которым давит резец на платформу силоизмерительного стенда.

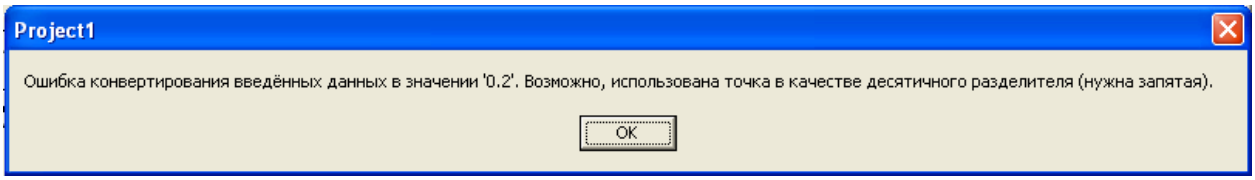


Рисунок 3.11 – Ошибка конвертирования введенных данных

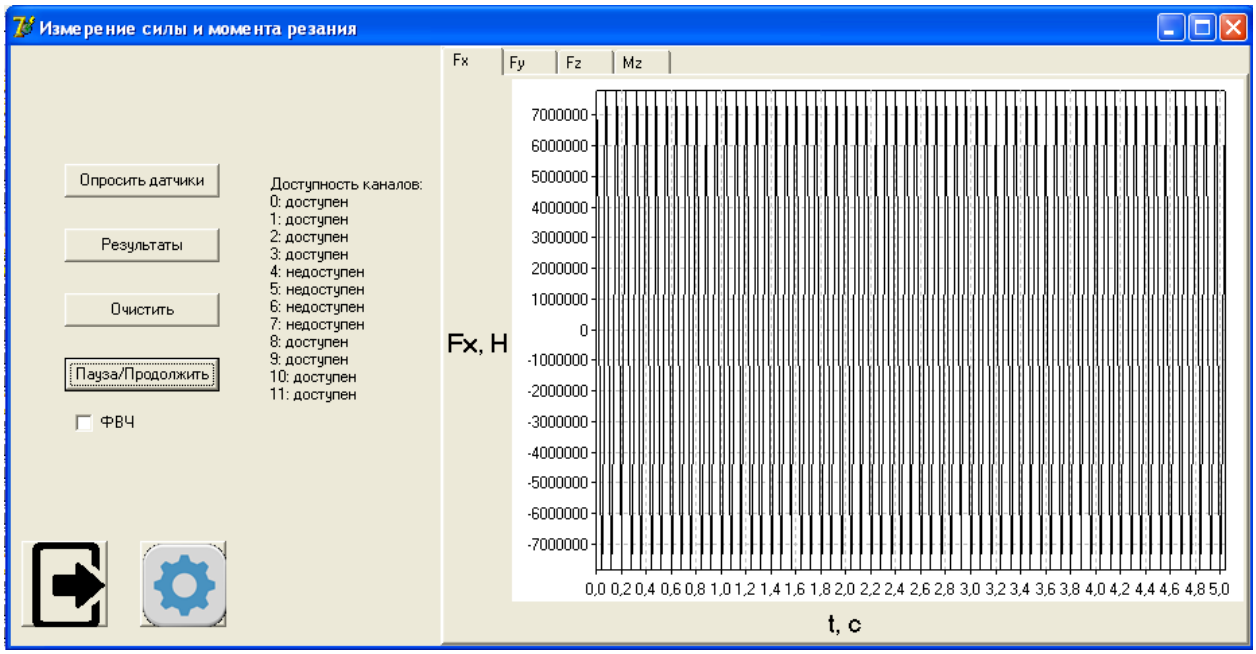


Рисунок 3.12 – Измерение силы резания по оси x

Также было продумана защита от ошибки. Если во введенных данных есть рациональное число, то разделяться целая часть с дробной должна через запятую. Если разделено число точкой, то программа выдаст ошибку (рисунок 3.11).

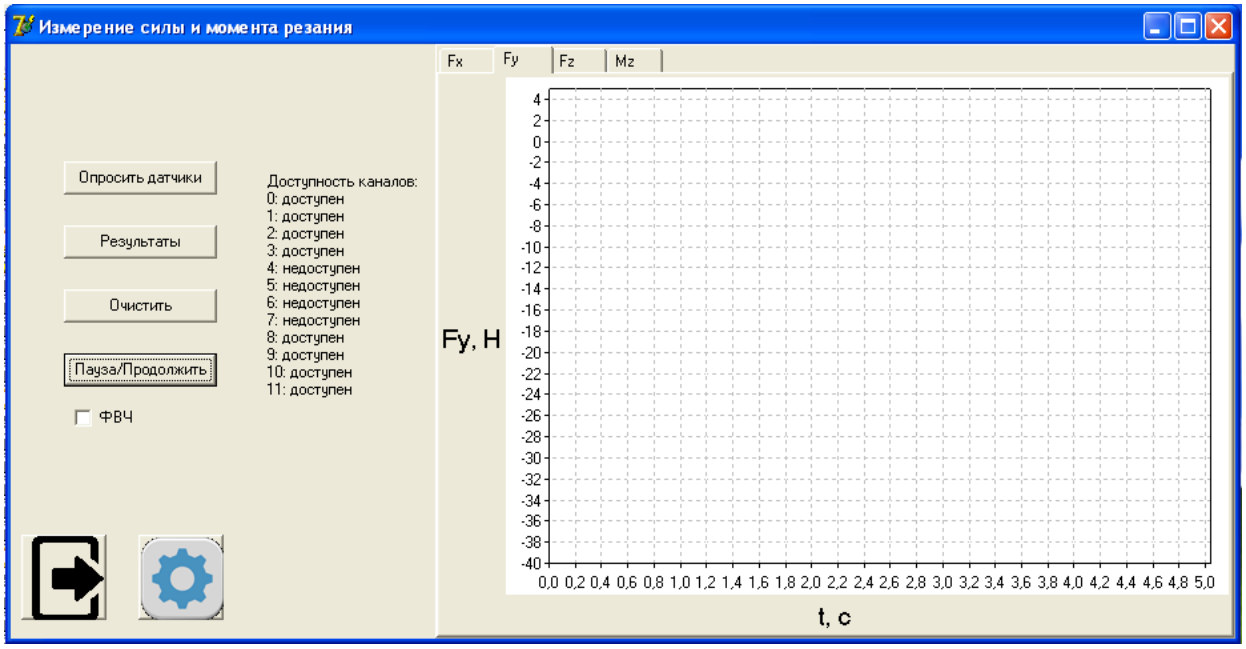


Рисунок 3.13 – Измерение силы резания по оси y

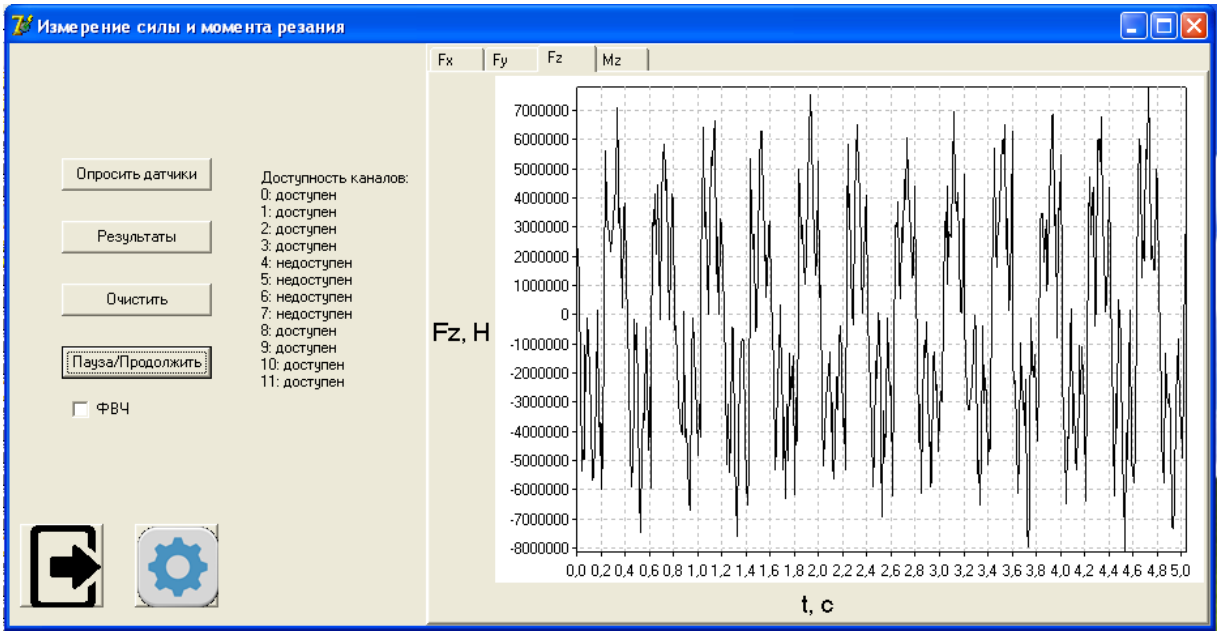


Рисунок 3.14 – Измерение силы резания по оси z

Так как на рисунке 3.13 можно увидеть, что недоступны каналы 4…7, которые относятся к измерению силы резания по оси y, то графики функции

выводиться не будут. Графики измерения силы резания показаны на рисунках 3.12 и 3.14. График измерения момента резания показан на рисунке 3.15.

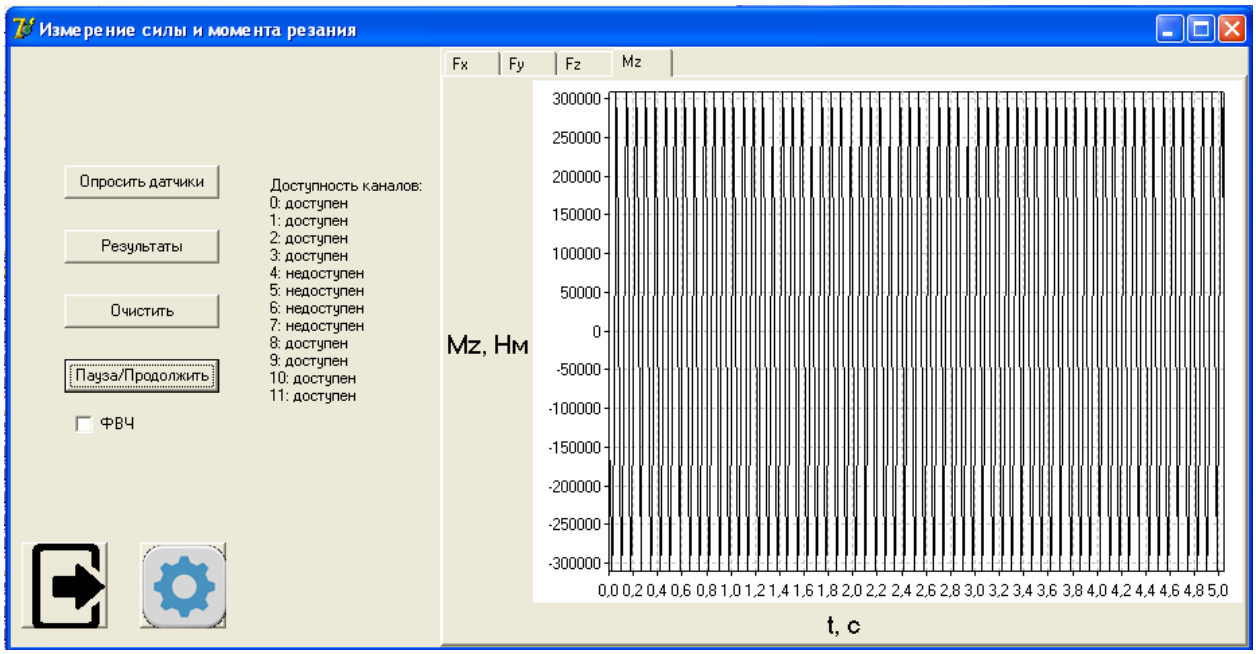


Рисунок 3.15 – Измерение момента резания

Так как на рисунках 3.12, 3.13, 3.15 можно наблюдать зашумленный сигнал, то необходимо ввести фильтр.

3.3 Фильтрация сигнала

Цифровые фильтры делятся на два вида, а именно:

- с конечной импульсной характеристикой;
- с бесконечной импульсной характеристикой.

Для данной задачи подходит фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр).

Как видно на рисунке 3.12 фильтр пропускает нижние частоты, а остальные пытается подавить, или, в крайнем случае, ослабить. Отклонения в полосе подавления и полосе пропускания выбираются в зависимости от входного сигнала, однако могут накладываться определенные ограничения, если использовать различные весовые функции.

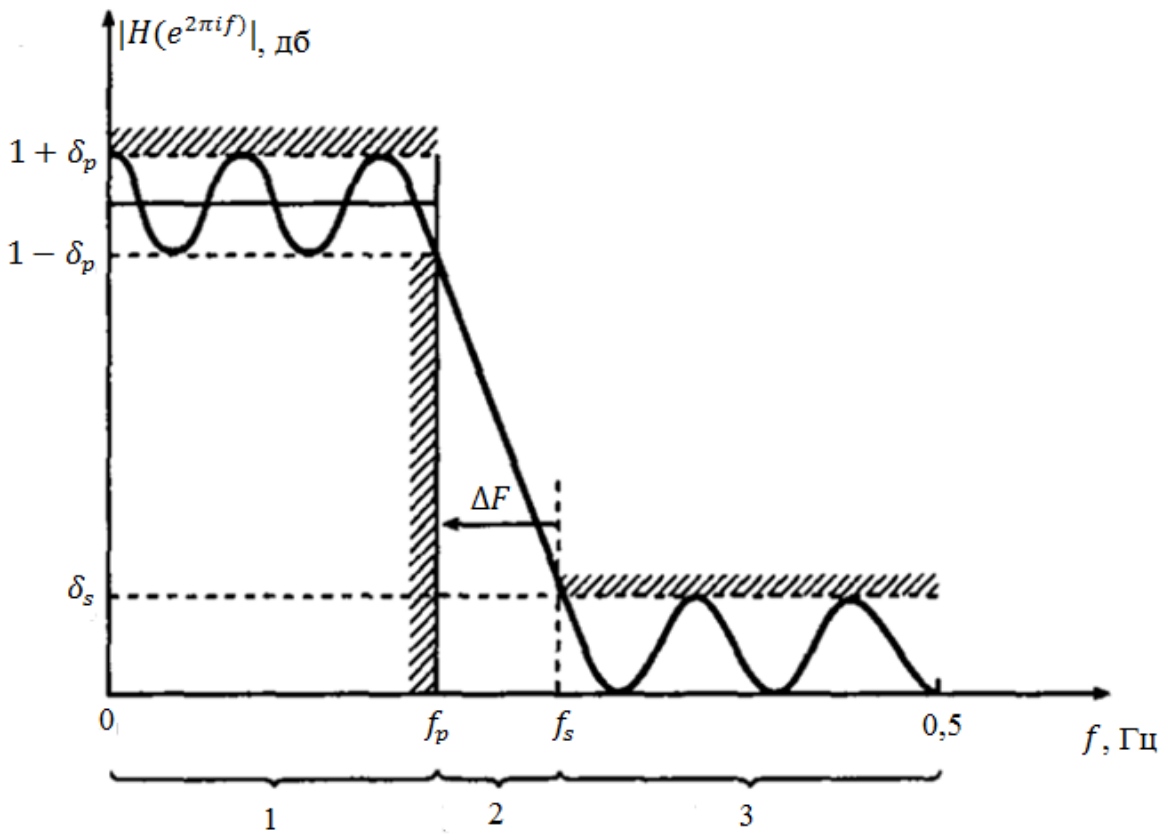


Рисунок 3.16 – Пример фильтра:

1 – полоса пропускания; 2 – полоса перехода; 3 полоса подавления.

Работа фильтра состоит в следующем: фильтр получает значения, преобразует их с помощью коэффициентов и выдает выходную последовательность. f

Формула фильтра:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \big(h_k(n) * x(n-k)\big), \tag{3.1}$$

где: $h_k(n)$ – коэффициенты фильтра;

$x(n-k)$ – входная характеристика.

Параметры фильтра:

Естественно для разных фильтров [14] нужны разные коэффициенты, и для этого нужно определиться с параметрами фильтра, это обычно сначала делается теоретически (а потом изучаем АЧХ реальных измерений.

По амплитудно-частотным характеристикам определяются с идеальной частотной характеристикой. Частотный коэффициент передачи и импульсная характеристика линейной стационарной системы связаны между собой преобразованием Фурье. Поэтому можно определить импульсную характеристику по формуле 3.2:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{\pi} H_D(w) * e^{iwn} dw, \qquad (3.2)$$

где $H_D(w)$ – идеальная характеристика;

w – частота.

Фильтры делятся на фильтры нижних и верхних частот [31]. Амплитудно-частотные характеристики показаны на рисунках 3.17 и 3.18.

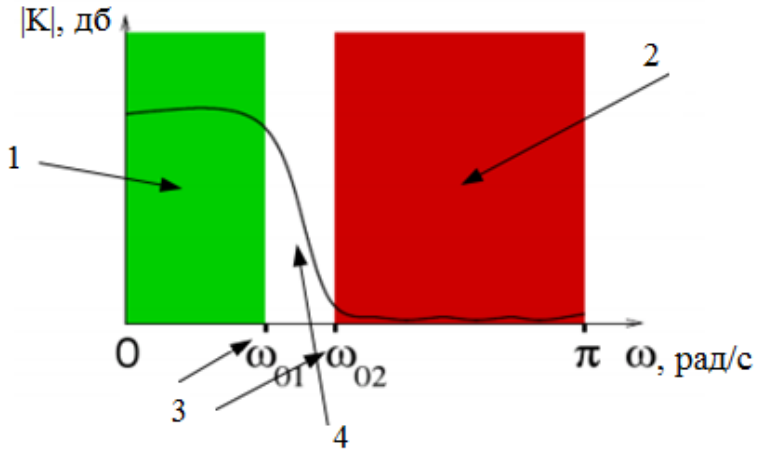


Рисунок 3.17 – АЧХ фильтра нижних частот:

1 – полоса подавления; 2 – полоса пропускания; 3 – частоты среза;

4 – переходная полоса

Формула выглядит следующим образом для фильтра нижних частот (идеальный фильтр):

$$h_d(n) = 2 * w_c * \frac{\sin(n * w_c)}{w_c * n} \text{ для } n \neq 0, \qquad (3.3)$$

$$h_d(n) = 2 * w_c \text{ для } n = 0.$$

Используем идеальный фильтр. Идеальный фильтр определяется некоторыми факторами:

- отсутствует переходная полоса (деление только на полосу подавления и полосу пропускания);
- если спектр входного сигнала целиком укладывается в полосу пропускания, то данный сигнал не искажается;
- если спектр входного сигнала целиком укладывается в полосу подавления, то данный сигнал подавляется целиком.

Импульсная характеристика идеального фильтра нижних частот представлена на рисунке 3.19.

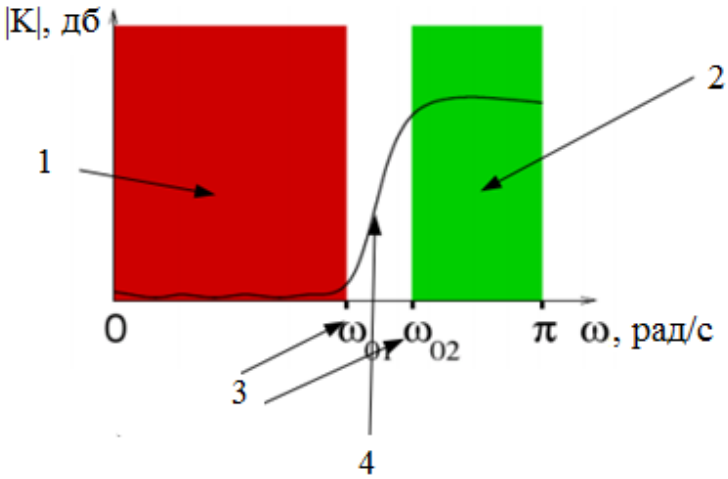


Рисунок 3.18 – АЧХ фильтра верхних частот:

1 – полоса подавления; 2 – полоса пропускания; 3 – частоты среза;

4 – переходная полоса

Весовая функция «реальной» импульсной характеристики:

$$\mathrm{w}(n) = 0.42 - 0.5 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 * \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right), \qquad (3.4)$$

где $N -$ длина фильтра, количество точек, на основе которых производится расчёт очередного отфильтрованного значения.

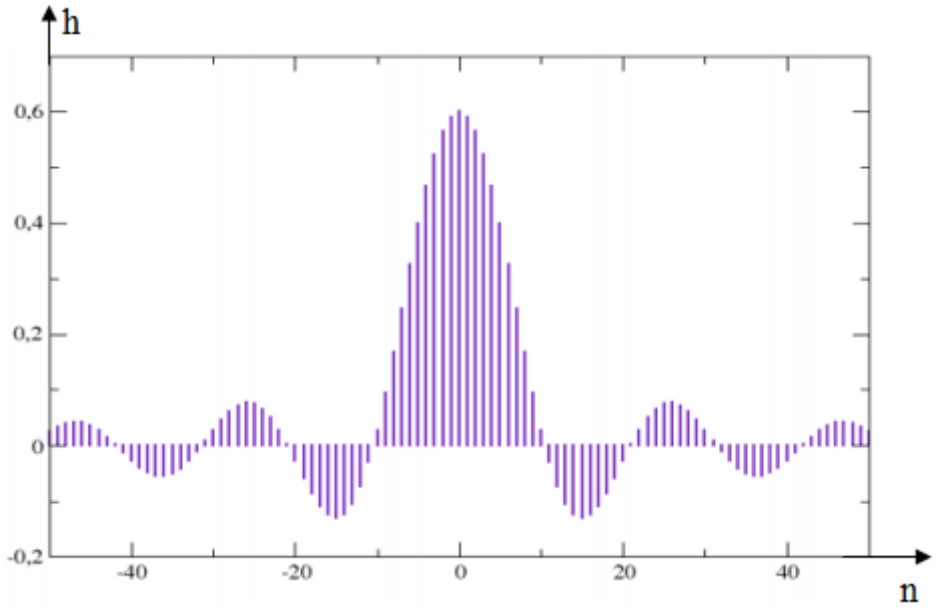


Рисунок 3.19 – Импульсная характеристика идеального фильтра нижних частот

Для получения математической модели фильтра необходимо перемножить весовую функцию и идеальную импульсную характеристику.

На языке Delphi составим исходный код фильтра:

```
function Filter(inArr: DoubleArray): DoubleArray;
const
N = 20; //Длина фильтра.
var
i: integer;
j: integer;

Fd: double; //Частота дискретизации входных данных.
Fs: double; //Частота среза.
Fx: double; //Частота подавления.
H: array [0..N - 1] of double; //"Реальная" импульсная характеристика.
Hid: array [0..N - 1] of double; //Идеальная импульсная характеристика.
W: array [0..N - 1] of double; //Весовая функция.
Fc: double;
sum: double;
begin
  SetLength(Result, Length(inArr));

  Fd := 1 / Form1.ResultTimer.Interval * 1000;
  Fs := 2;
  Fx := 5;
  Fc := (Fs + Fx) / 2 / Fd;

  for i := 0 to N - 1 do
  begin
```

```
    if i = 0 then Hid[i] := 2 * PI * Fc
    else  Hid[i] := Sin(2 * PI * Fc * i) / PI / i;
    W[i] := 0.42 - 0.5 * cos(2 * PI * i / (N - 1)) + 0.08 * cos(4 * PI * i / (N - 1));
    H[i] := Hid[i] * W[i];
  end;

  sum := 0;
  for i := 0 to N - 1 do sum := sum + H[i];
  for i := 0 to N - 1 do H[i] := H[i] / sum;
  for i := 0 to Length(inArr) - 1 do
  begin
    Result[i] := 0;
    for j := 0 to N - 2 do
    begin
      if i - j > 0 then Result[i] := Result[i] + H[j] * inArr[i - j];
    end;
  end;
end;
```

Полный текст кода в приложении А. Коэффициенты Fd, Fs, Fx в коде представлены в герцах.

Поставим «галочку» в поле программы «ФВЧ» и получим силы и момент резания с учетом отфильтрованного сигнала. Сигналы, полученные на выходе, показаны на рисунках 3.20, 3.21, 3.22.

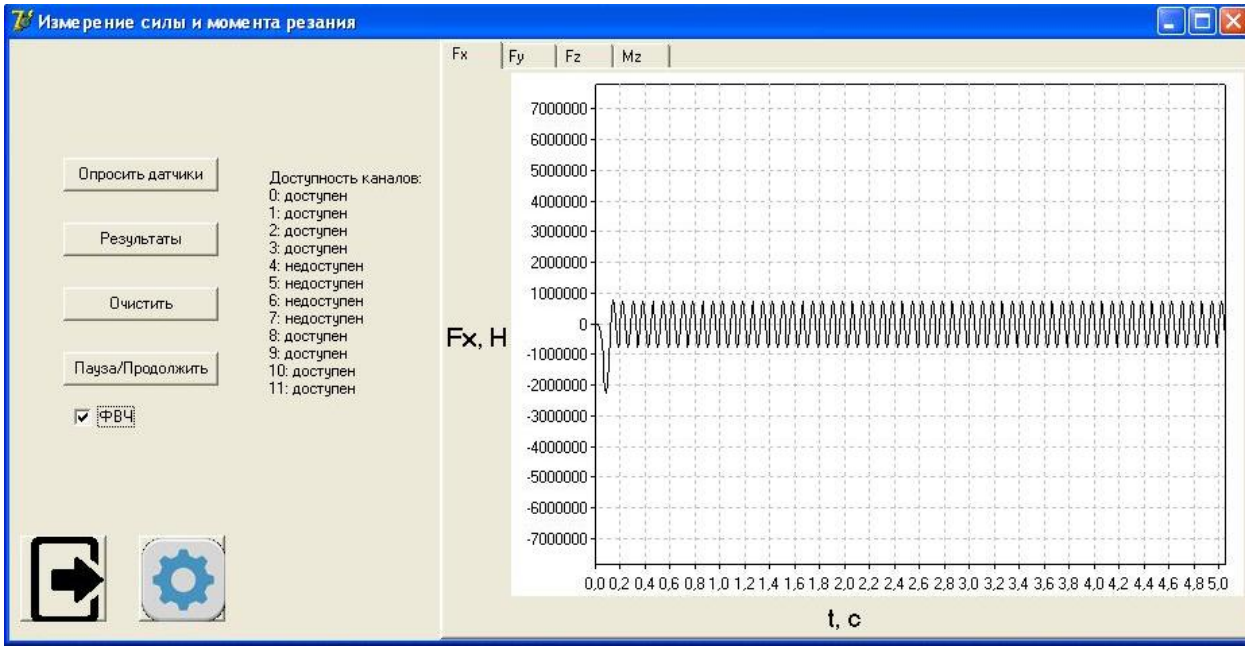


Рисунок 3.20 – Измерение фильтрованного сигнала силы резания по оси x

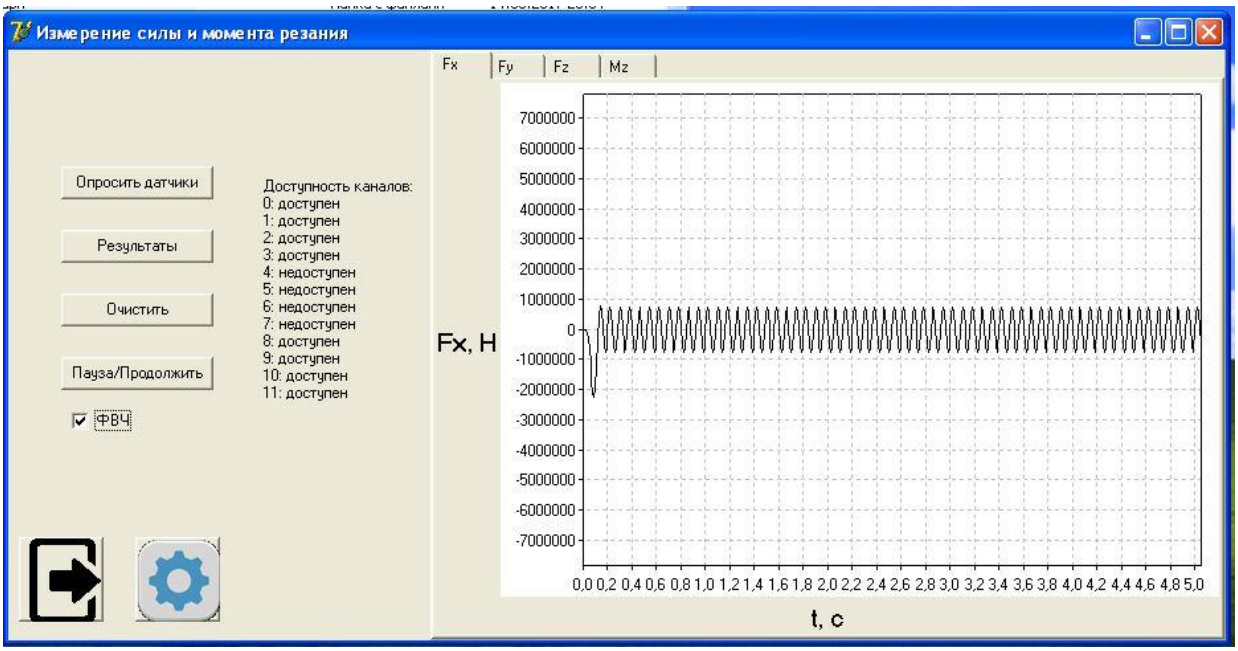


Рисунок 3.22 – Измерение фильтрованного сигнала силы резания по оси *z*

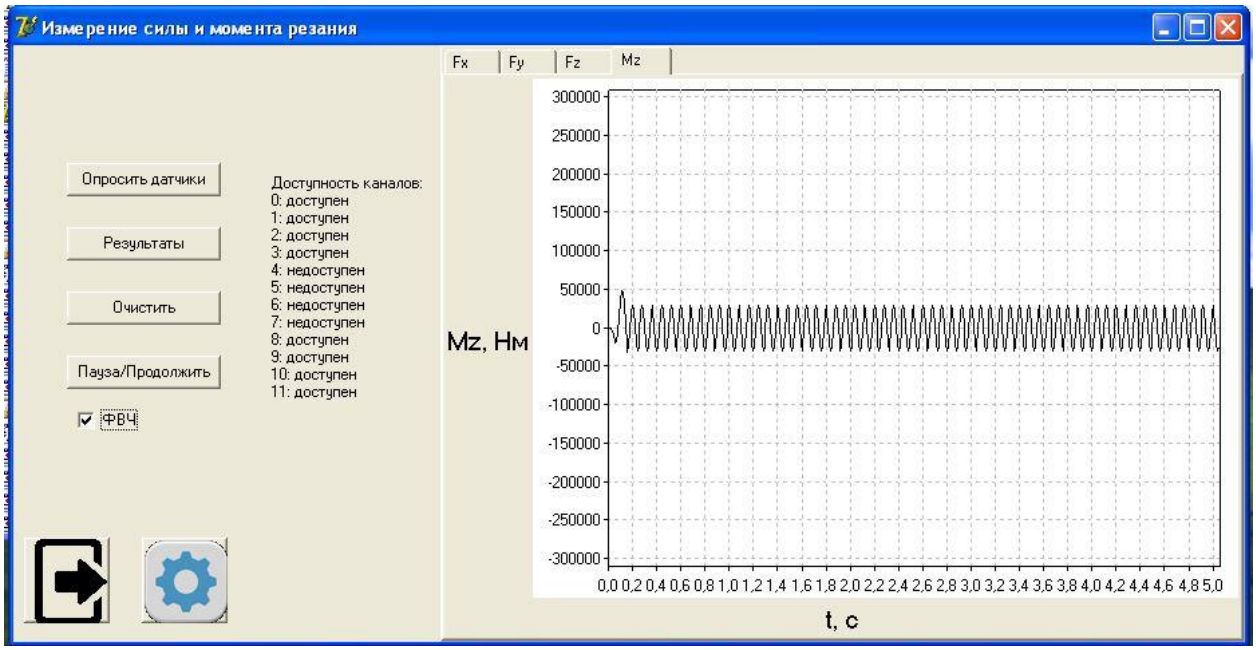


Рисунок 3.23 – Измерение фильтрованного сигнала момента резания

Чтобы детально посмотреть измерение в определенный промежуток времени можно использовать кнопку «Пауза/Продолжить». При нажатии на данную кнопку во время измерения сил и момента резания прекращается сбор информации. И в любом окне можно детально посмотреть силу, с которой «виртуальное» тело давит на датчик. При втором нажатии на кнопку продолжается измерение.

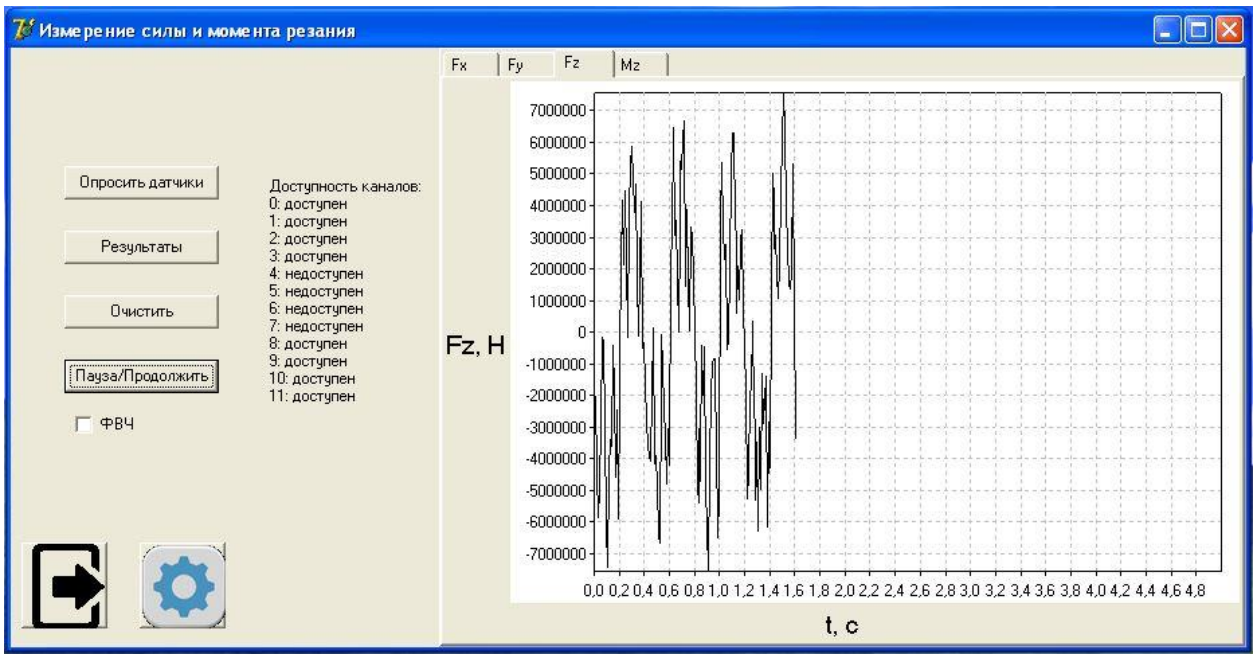


Рисунок 3.24 – Остановка измерения силы резания

После сбора данных с платы закрыть программу можно двумя способами:

1) нажать в верхнем правом углу на «крестик»;
2) нажать на кнопку «Выход», которая показана на рисунке 3.25.

Рисунок 3.25 – Кнопка выхода из программы

Исходя из того, что каждый тензометрический датчик подключается к отдельному аналоговому входу АЦП, то необходимо выбрать плату, у которой имеется не менее двенадцати аналоговых входов. Для этого используем реальную плату сбора данных PCI-1710.

Характеристика платы PCI-1710:

- 16 цифровых входов и 16 цифровых выходов (TTL).
- 8 дифференциальных или 16 потенциальных аналоговых входов.
- Автоматическое сканирование каналов.
- АЦП 12 бит, 100 кГц.

- Буфер FIFO на 4К отсчётов.
- канала ЦАП, 12 бит.
- Поканально программируемое усиление (1, 2, 4, 8).
- Программируемая схема запуска.

3.4 Особенности платы PCI-1710

3.4.1 Смешанные несимметричные или дифференциальные аналоговые входы платы

PCI-1710 / 1710HG имеет автоматическую схему сканирования канала / усиления. Встроенная память SRAM хранит различные значения коэффициента усиления и конфигурации для каждого канала. Это позволяет выполнять многоканальную высокоскоростную выборку (до 100 кГц) с разным коэффициентом усиления для каждого канала и позволяет свободно комбинировать несимметричные и дифференциальные входы.

3.4.2 Встроенная память FIFO (First In First Out)

PCI-1710/1710 / 1710HG / 1710HGL имеет встроенный буфер FIFO, который может хранить до 4 K A / D выборок. PCI-1710 / 1710HG генерирует прерывание, когда FIFO наполовину заполнен. Эта функция обеспечивает непрерывную высокоскоростную передачу данных и более предсказуемую производительность в системах Windows.

3.4.3 Встроенный программируемый счетчик

PCI-1710/1710 / 1710HG / 1710HGL предоставляет программируемый счетчик для генерации триггера Pacer для аналого-цифрового преобразования. Счетчик-чип – это 82C54 или его эквивалент, который включает три 16-разрядных счетчика на такте 10 МГц. Один счетчик используется как счетчик событий для подсчета событий, поступающих от входных каналов. Два других соединены каскадом, чтобы создать 32-разрядный таймер для запуска триггера.

3.4.4 Специальный экранированный кабель для шумоподавления

Экранированный кабель PCL-10168 специально разработан для PCI-1710 / 1710HG для снижения шума в аналоговых сигнальных линиях. Его провода - все витые пары, а аналоговые линии и цифровые линии экранированы отдельно, обеспечивая минимальное перекрестное общение между сигналами и отличную защиту от электромагнитных и электромагнитных помех.

Выводы по разделу 3

Разработан алгоритм обработки сигналов для измерения сил и момента резания в режиме реального времени. Проанализированы фильтры нижних и верхних частот. Использован фильтр верхних частот для подавления шумов во время измерения сил и момента резания. Разработано программное обеспечение на языке Delphi с учетом фильтрации.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА

4.1 Подключение к плате PCI-1710

Для проверки программного обеспечения на реальной плате необходимо в первую очередь установить драйвер. Схема установки драйвера показана на рисунке 4.1.

Рисунок 4.1 – Схема установки драйвера

После того, как карта правильно установлена в вашей системе, можно настроить свое устройство с помощью программы Advantech Device Manager, которая сама уже установлена в системе во время настройки драйвера. Полная процедура установки устройства должна включать в себя настройку

устройства, настройку и тестирование. Установка драйвера показана на рисунке 4.2.

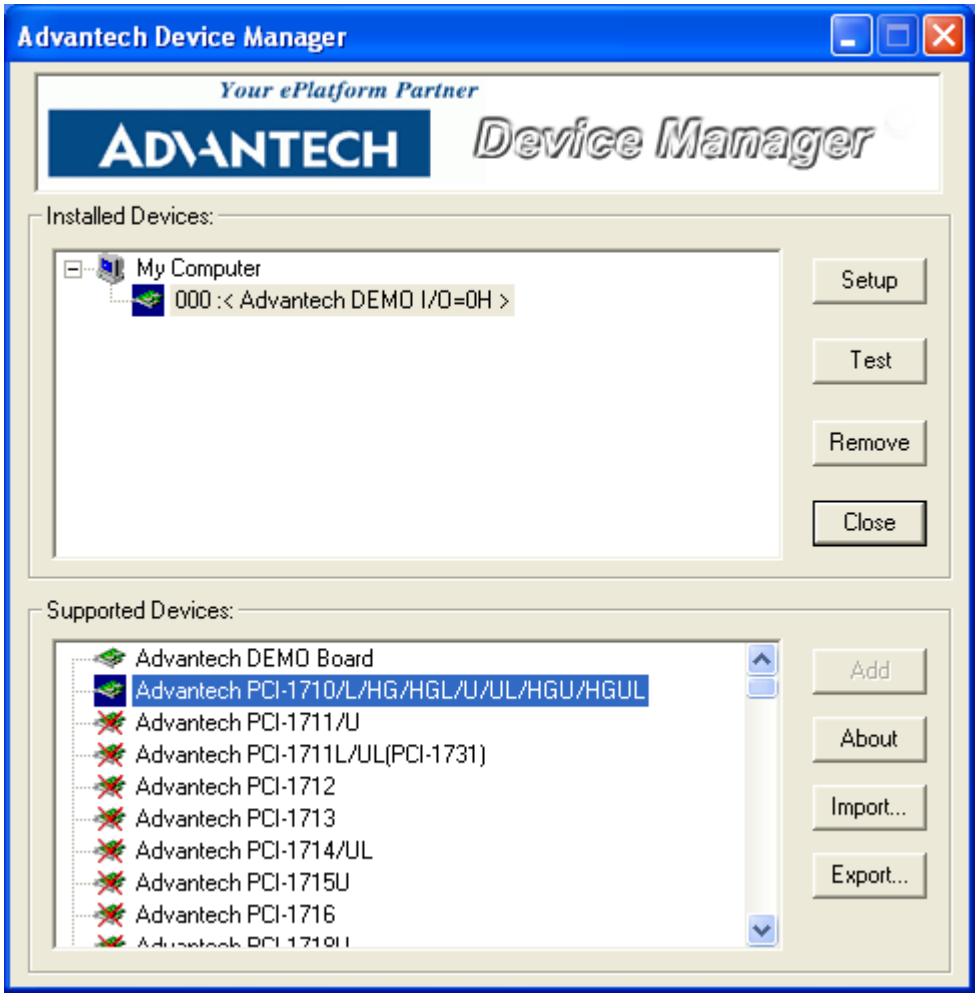


Рисунок 4.2 – Установленный драйвер для платы PCI-1710

После установки драйвера и подключения стенда к реальной плате PCI-1710 можно заметить, что не работает кнопка «Add». Поэтому проверить написанный код не получится. Вместо этого напишем уравнения движения платформы как твердого тела.

4.2 Уравнения движения платформы как твердого тела, подчиненного связями, и воздействие режущего инструмента как импульсного усиления

Найдем уравнения движения платформы и период колебаний платформы, если в начальный момент приложена сила F.

Направим оси x и y параллельно основанию платформы, а ось z перпендикулярно основанию платформы, взяв начало отсчета в положении равновесия платформы, как показано на рисунке 4.3.

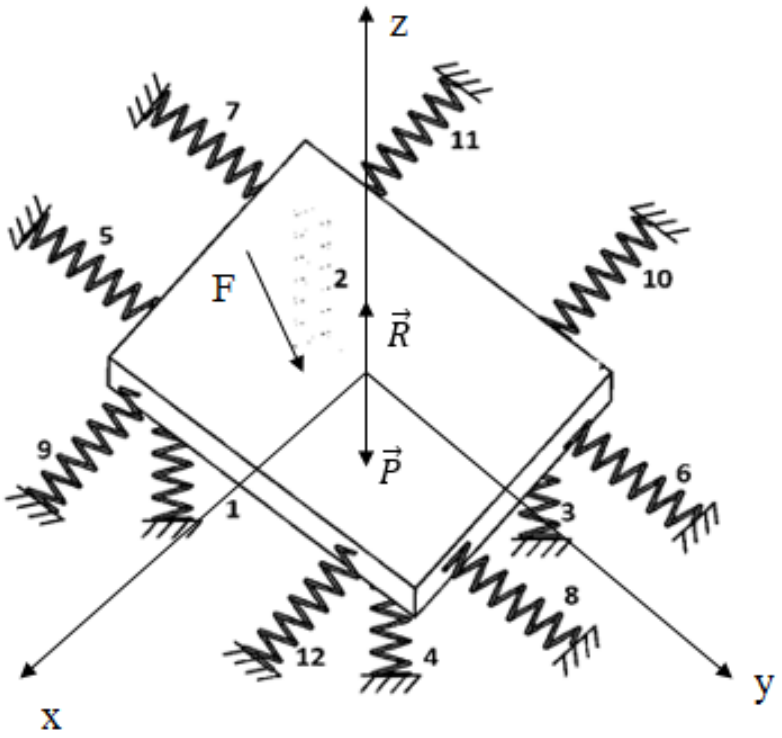


Рисунок 4.3 – Схема расположения сил

Изобразим платформу в промежуточном положении, смещенным по отношению к началу отсчета. При этом упругие элементы сжимаются на x, y, z. Рассмотрим все силы на соответствующих осях [13].

Для оси x:

Упругие элементы 9 и 12 сжимаются на x_9 и x_{12}, соответственно, и их упругие силы направлены в положительную сторону оси. Одновременно упругие элементы 10 и 11 растягиваются на x_{10} и x_{11}, следовательно, их упругие силы также направлены в положительную сторону оси, то есть:

$$F_{9x} = -c_9 x_9;$$

$$F_{10x} = -c_{10} x_{10};$$

$$F_{11x} = -c_{11} x_{11};$$

$$F_{12x} = -c_{12} x_{12}.$$

Кроме четырех сил также приложен вес платформы P и нормальная сила реакции гладкой поверхности платформы.

Запишем дифференциальное уравнение движения платформы в проекции на ось x. В данном случае получим:

$$\frac{P}{g}\ddot{x} = F_{9x} + F_{10x} + F_{11x} + F_{12x},$$

или

$$\frac{P}{g}\ddot{x} = -c_9x_9 - c_{10}x_{10} - c_{11}x_{11} - c_{12}x_{12}. \qquad (4.1)$$

Как следует из дифференциального уравнения, 4 упругих элемента можно заменить эквивалентным упругим элементом, коэффициент упругости которого равен сумме коэффициентов упругости четырех данных упругих элементов, то есть:

$$\mathrm{c} = c_9 + c_{10} + c_{11} + c_{12.}$$

А так как коэффициент упругости каждого упругого элемента одинаков ($c_9 = c_{10} = c_{11} = c_{12.}$), то дифференциальное уравнение будет иметь вид:

$$\ddot{x} + k^2 \sum_{i=9}^{12} x_i = 0, \qquad (4.2)$$

где $k^2 = \frac{4*c*g}{P}$.

Составим характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (4.2):

$$\lambda^2 + k^2 = 0,$$

откуда

$$\lambda_{1,2} = \pm ki.$$

Следовательно, решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$\sum_{i=9}^{12} x_i = C_1 \cos(kt) + C_2 \sin(kt). \tag{4.3}$$

Для определения постоянных интегрирования C_1 и C_2 вычислим:

$$\sum_{i=9}^{12} \dot{x}_i = -C_1\, k * \sin(kt) + C_2\, k * \cos(kt) \tag{4.4}$$

Подставив в уравнение (3) $t = 0, x_i = x_{0i}$, а в уравнение (4) $t = 0, \dot{x}_i = \dot{x_{0i}}$, получим:

$$C_1 = \sum x_0,$$

$$C_2 = \frac{\sum \dot{x}_0}{k}.$$

Тогда уравнение (4.3) принимает вид:

$$\sum_{i=9}^{12} x_i = \sum x_0, \cos(kt) + \frac{\sum \dot{x}_0}{k} \sin(kt). \tag{4.5}$$

Положим:

$$\sum x_0, = a * \sin(\alpha),$$

$$\frac{\sum \dot{x}_0}{k} = a * \cos(\alpha), \tag{4.6}$$

где $a, \alpha = const$.

Тогда уравнение (4.5) колебаний платформы можно представить так:

$$x = a * \sin(kt + \alpha), \tag{4.7}$$

$$x = \sum_{i=9}^{12} x_i$$

Амплитуда колебаний a и начальная фаза колебаний α из системы уравнений (4.6):

$$a = \sqrt{\sum x_0^2 + \frac{\sum \dot{x}_0^2}{k^2}}, \tag{4.8}$$

$$tg\ (\alpha) = \frac{k * \sum x_0}{\sum \dot{x}_0}. \tag{4.9}$$

откуда

$$\alpha = arctg\left(\frac{k * \sum x_0}{\sum \dot{x}_0}\right).$$

Тогда закон колебаний платформы по оси x дается формулой:

$$x = \sqrt{\sum x_0^2 + \frac{\sum \dot{x}_0^2}{k^2}} * \sin\left(\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}} * t + arctg\left(\frac{k * \sum x_0}{\sum \dot{x}_0}\right)\right).$$

Причем период колебаний:

$$T_x = \frac{2 * \pi}{k} = \frac{2 * \pi}{\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}}} = \frac{2 * \pi * \sqrt{P}}{\sqrt{4 * c * g}} = \frac{\pi * \sqrt{P}}{\sqrt{c * g}}.$$

Для оси y:

Упругие элементы 6 и 8 сжимаются на x_6 и x_8, соответственно, и их упругие силы направлены в положительную сторону оси. Одновременно

упругие элементы 5 и 7 растягиваются на x_5 и x_7, следовательно, их упругие силы также направлены в положительную сторону оси, то есть:

$$F_{5y} = -c_5 y_5;$$
$$F_{6y} = -c_6 y_6;$$
$$F_{7y} = -c_7 y_7;$$
$$F_{8y} = -c_8 y_8.$$

Кроме четырех сил к грузу приложен вес платформы P и нормальная сила реакции гладкой поверхности платформы.

Запишем дифференциальное уравнение движения платформы в проекции на ось y. В данном случае получим:

$$\frac{P}{g}\ddot{y} = F_{5y} + F_{6y} + F_{7y} + F_{8y},$$

или

$$\frac{P}{g}\ddot{y} = -c_5 y_5 - c_6 y_6 - c_7 y_7 - c_8 y_8. \qquad (4.10)$$

Как следует из дифференциального уравнения, 4 упругих элемента можно заменить эквивалентным упругим элементом, коэффициент упругости которого равен сумме коэффициентов упругости четырех данных упругих элементов, то есть:

$$\mathrm{c} = c_5 + c_6 + c_7 + c_{8.}$$

А так как коэффициент упругости каждого упругого элемента одинаков ($c_5 = c_6 = c_7 = c_{8.}$), то дифференциальное уравнение будет иметь вид:

$$\ddot{y} + k^2 \sum_{i=5}^{8} y_i = 0, \qquad (4.11)$$

где $k^2 = \frac{4*c*g}{P}$.

Составим характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (4.11):

$$\lambda^2 + k^2 = 0,$$

откуда

$$\lambda_{1,2} = \pm ki.$$

Следовательно, решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$\sum_{i=5}^{8} y_i = C_3 \cos(kt) + C_4 \sin(kt). \qquad (4.12)$$

Для определения постоянных интегрирования C_3 и C_4 вычислим:

$$\sum_{i=5}^{8} \dot{y}_i = -C_3\, k * \sin(kt) + C_4\, k * \cos(kt) \qquad (4.13)$$

Подставив в уравнение (4.11) $t = 0$, $\sum y = \sum y_0$, а в уравнение (4) $t = 0$, $\sum \dot{y} = \sum \dot{y}_0$, получим:

$$C_3 = \sum y_0,$$

$$C_4 = \frac{\sum \dot{y}_0}{k}.$$

Тогда уравнение (4.12) принимает вид:

$$\sum_{i=5}^{8} y_i = \sum y_0 \cos(kt) + \frac{\sum \dot{y}_0}{k} \sin(kt). \tag{4.14}$$

Положим:

$$\sum y_0 = b * \sin(\beta),$$

$$\frac{\sum \dot{y}_0}{k} = b * \cos(\beta), \tag{4.15}$$

где $b, \beta = const$.

Тогда уравнение (4.14) колебаний платформы можно представить так:

$$y = b * \sin(kt + \beta). \tag{4.16}$$

$$y = \sum_{i=5}^{8} y_i.$$

Амплитуда колебаний b и начальная фаза колебаний β из системы уравнений (4.15):

$$b = \sqrt{\sum y_0^2 + \frac{\sum \dot{y}_0^2}{k^2}}, \tag{4.17}$$

$$tg\ (\beta) = \frac{k * \sum y_0}{\sum \dot{y}_0}. \tag{4.18}$$

откуда

$$\beta = arctg\left(\frac{k * \sum y_0}{\sum \dot{y}_0}\right).$$

Тогда закон колебаний платформы по оси y дается формулой:

$$y = \sqrt{\sum y_0^2 + \frac{\sum \dot{y}_0^2}{k^2}} * \sin\left(\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}} * t + arctg\left(\frac{k * \sum y_0}{\sum \dot{y}_0}\right)\right).$$

Причем период колебаний:

$$T_y = \frac{2 * \pi}{k} = \frac{2 * \pi}{\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}}} = \frac{2 * \pi * \sqrt{P}}{\sqrt{4 * c * g}} = \frac{\pi * \sqrt{P}}{\sqrt{c * g}}.$$

Для оси z:

Выбираем начало отсчета, направляем ось z и изображаем силы $P, R,$ и F в соответствии с составлением уравнения предыдущих осей.

Заменяем четыре параллельные упругие элементы эквивалентным упругим элементом. При смещении платформы вниз на расстояние z все четыре упругих элемента сжимаются на z, то есть:

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z.$$

При этом в упругих элементах возникают восстанавливающие силы $F_{z1}, F_{z2}, F_{z3}, F_{z4}$, сумма которых равна F, то есть:

$$F = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}.$$

Разделив последнее равенство почленно на $|z|$ и учитывая, что:

$$|z_1| = |z_2| = |z_3| = |z_4| = |z|,$$

Получим:

$$\frac{F}{|z|} = \frac{F_{z1}}{|z_1|} + \frac{F_{z2}}{|z_2|} + \frac{F_{z3}}{|z_3|} + \frac{F_{z4}}{|z_4|}.$$

Так как

$$\frac{F}{|z|} = c, \frac{F_{z1}}{|z_1|} = c_1, \frac{F_{z2}}{|z_2|} = c_2, \frac{F_{z3}}{|z_3|} = c_3, \frac{F_{z4}}{|z_4|} = c_4,$$

то окончательно получим:

$$z_1 + z_2 + z_3 + z_4 = z_{\text{общ}}. \tag{4.19}$$

Таким образом, при параллельном соединении упругих элементов коэффициент упругости эквивалентного упругого элемента равен сумме коэффициентов упругости данных элементов.

Последующий ход записи уравнений по оси z повторяет решение ход записи уравнений предыдущих осей.

Использовав формулу (4.19), запишем сразу окончательные результаты:

Амплитуда колебаний d и начальная фаза колебаний γ из системы уравнений (4.15):

$$d = \sqrt{\sum z_0^2 + \frac{\sum \dot{z}_0^2}{k^2}}, \tag{4.20}$$

$$tg\ (\gamma) = \frac{k * \sum z_0}{\sum \dot{z}_0}. \tag{4.21}$$

откуда

$$\gamma = arctg\left(\frac{k * \sum z_0}{\sum \dot{z}_0}\right). \tag{4.22}$$

Тогда закон колебаний платформы по оси y дается формулой:

$$z = \sqrt{\sum z_0^2 + \frac{\sum \dot{z}_0^2}{k^2}} * \sin\left(\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}} * t + arctg\left(\frac{k * \sum z_0}{\sum \dot{z}_0}\right)\right).$$

Причем период колебаний:

$$T_z = \frac{2 * \pi}{k} = \frac{2 * \pi}{\sqrt{\frac{4 * c * g}{P}}} = \frac{2 * \pi * \sqrt{P}}{\sqrt{4 * c * g}} = \frac{\pi * \sqrt{P}}{\sqrt{c * g}}.$$

Выводы по разделу 4

Проведена подготовка к проверке программного обеспечения для силоизмерительного стенда.

В связи с невозможностью проверки программного кода на реальной плате PCI-1710, были составлены уравнения движения платформы как твердого тела.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы получено следующее:

1) Проанализированы математические модели устройств, выбранных из двух источников: патентное издание и рынок продукции, а также выявлены недостатки и достоинства каждого устройства.

2) Описана математическая модель стенда для исследования сил резания фрезерного агрегата, выбранного в качестве прототипа.

3) Проанализированы основные виды погрешностей тензометрических датчиков и аналого-цифрового преобразователя.

4) Написано программное обеспечение на языке Delphi 7, регистрирующее силы резания и момент резания в режиме реального времени, с учетом фильтрации.

5) Описано движение платформы как твердого тела и воздействие режущего инструмента, как импульсного усилия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bezdek, J.C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. – New York: Plenum Press, 1981. – 256 p.

2. Cycle optimization in cam-lobe grinding for high productivity / P. Krajinik, R. Drazumeric, J. Badger, F. Hashimito // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 630. – P. 333–336. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.036.

3. Keller, A.V. On Integration in Quasi-Banach Spaces of Sequences / A.V. Keller, A.A. Zamyshlyaeva, M.A. Sagadeeva // Journal of Computational and Engineering Mathematics. – 2015. – V. 2, № 1. – P. 52–56.

4. Lee, C.W. Dynamic optimization of the grinding process in batch production / C.W. Lee // Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME. – 2009. – Vol. 131. – P. 61–66. DOI: 10.1115/1.3090880.

5. MacQueen, J.B. Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations // Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. – 1967. – Vol. 1. – P. 281-297.

6. Smirnov, V. Energy efficient trajectories of industrial machine tools with parallel kinematics / V. Smirnov, V. Plyusnin, G. Mirzaeva // ICIT 2013 – 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (Cape Town, South Africa, 25–28 February, 2013). – P. 1267–1272.

7. А.с. 1451561 СССР, М.Кл. G 01 L 1/16, 5/16. Трехкомпонентный динамометр / В.А. Кудинов, В.Е. Шматов, Г.Б. Светлаков, Е.А. Куимов – № 4210778/24-10; заявл. 18.03.87; опубл. 15.01.89; Бюл. №2.

8. А.с. 453594 СССР, М.Кл. G 01 L 1/04. Трехкомпонентный динамометр / В.И. Локай, Д.В. Пологих, М.П. Набатян, А.А. Тютерева. – № 178968/18-10; заявл. 29.05.72; опубл. 15.12.74; Бюл. №46.

9. А.с. 861960 СССР, М.Кл. G 01 G 3/12. Трехкомпонентные тензометрические весы / Р.Р. Бухменов, Н.И. Кочидыков – №28936101/18-10; заявл. 17.01.80; опубл. 07.09.81; Бюл. №33.

10. А.с. 861993 СССР, М.Кл. G 01 L 5/16. Трехкомпонентный динамометр для измерения составляющих сил резания / В.Б. Мездрогин, В.И. Петров, С.М. Колосков – № 2873274/18-10; заявл. 21.01.80; опубл. 07.09.81; Бюл. №33.

11. Александров, А.Г. Адаптивное управление на основе идентификации частотных характеристик / А.Г. Александров // Известия РАН. Серия «Теория и системы управления». – 1995. Вып. 2. С. 63–71.

12. Александров, А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / А.Г. Александров. – М.: Изд-во Высшая школа, 1989. – 263 с.

13. Бать, М. И. Теоретическая механика в примерах и задачах Т. 1: Статика и кинематика: учеб. пособие для вузов: в 3 т. / М. И. Бать, Г. Ю. Джанелидзе, А. С. Кельзон. – СПб. и др.: Лань, 2010 и предыдущие издания.

14. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2004. – 600с.

15. Блехман, И.И. О «вибрационной механике» и вибрационной технике / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

16. Бобров, В.Ф. Резание металлов самовращающимися резцами / В.Ф. Бобров, Д.Е. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1972. – 112 с.

17. Бурмистров, Е.В Фазовая характеристика силы резания и ее роль в возникновении и развитии автоколебаний при точении нежестких деталей двигателей летательных аппаратов / Е.В. Бурмистров, М.Н. Басыров, Р.Р. Гиниятуллин // Вестник СГАУ. 2008. № 3. – С. 36-43.

18. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики Т. 1: Статика и кинематика: учеб. пособие для вузов по техническим специальностям: в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – СПб. и др.: Лань, 2009 и предыдущие издания.

19. Ваганов, В.И. Влияние конструктивно-топологических особенностей интегральных тензопреобразователей на перегрев тензорезистров протекающим током / В.И. Ваганов, А.Б. Носкин,

М.В. Фролова / В кн.: Электронная измерительная техника / Под ред. А.Г. Филиппова. - М.: Атомиздат, 1980. – С. 17–22.

20. ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения и токов (с Изменением №1). – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 7 с.

21. ГОСТ 19.701–90. ЕСПД. Схемы алгоритмов и программ. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 3 с.

22. ГОСТ 30630.1.1-99 Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. – Минск: Стандартинформ, 2001. – 25 с.

23. ГОСТ Р 53442-2009. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Стандартинформ, 2010. – 45 с.

24. Граничин, О.Н. Введение в методы стохастической оптимизации и оценивания: учебное пособие / О.Н. Граничин. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2003. – 131 с.

25. Грановский, Г.И. Резание металлов: учеб. для вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.

26. Гребенюк, Е.И., Гребенюк, Н.А. Технические средства информатизации. – М.: Академия, 2012. – 352 с.

27. Гречишников, В. М. Метрологическое обеспечение разработки и испытания преобразователей информации [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / В.М. Гречишников; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (2,08 Мбайт). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

28. Грубый С.В., Зайцев А.М. Исследование концевых фрез при фрезеровании корпусных деталей из алюминиевых сплавов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 12. С. 31–54. DOI: 10.7463/1213.0634375.

29. Грубый С.В., Лапшин В.В. Анализ процесса, заточка и испытания резцов из нитрида бора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 9. С. 83–104. DOI: 10.7463/0913.0598355.

30. Гурин, В.Д. Исследование силовых параметров при фрезеровании концевыми фрезами для диагностирования их состояния / В.Д. Гурин, С.Н. Григорьев, С.В. Алешин, В.А Семенов // Вестник машиностроения. 2005. № 9. С. 19–22.

31. Дорф, Р.К. Современные системы управления / Р.К. Дорф, Р.Х. Бишоп; пер. с англ. Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 831 с.

32. Древаль, А.Е. Устройства диагностирования состояния режущего инструмента по динамическим показателям // Диагностика технологических процессов: матер. Семинара. / А.Е. Древаль, С.В. Андрушко, Н.И. Федотов. – М.: Знание, 1990. – С. 69–74.

33. Жуков, В.К. Теория погрешностей технических измерений: учебное пособие / В.К. Жуков; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 180 с.

34. Зельченко, В.Я. Нелинейная коррекция автоматических систем: учебное пособие / В.Я. Зельченко. – Л.: Изд-во Судостроение, 1981. – 167 с.

35. Зотов, А.В. Оценка износостойкости направляющих скольжения, подвергнутых плакированию / А.В. Зотов, О.И. Драчев // Металлообработка. – 2013. – № 3 (75). – С. 5–10.

36. Кацай, Д.А. Математическая модель автоматизированной системы управления мобильным агрегатом повышенной энергоэффективности // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 35 – 39.

37. Кацай, Д.А. Ротационное фрезерование асфальта / Д.А. Кацай, П.Г. Мазеин, С.Д. Сметанин // Процессы и оборудование металлургического

производства: межрегиональный сборник научных трудов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ". – 2009. – Вып. 8. – С. 61–66.

38. Ключников, А.В. Способ контроля качества функционирования стенда для определения характеристик асимметрии масс осесимметричных роторов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2010» в 2-х томах. / Под ред. проф. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2010. – Т. 2. – С. 12–14.

39. Ключников, А.В. Уточнённая математическая модель оценки и обеспечения параметров массо-инерционной асимметрии длинномерного роторного модуля» // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2012»: в 2-х томах / Под ред. проф. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2012. – Т. 1. – С. 224–227.

40. Комбалов, В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.

41. Лавровская, О.Б. Технические средства информатизации. Практикум. – М.: Академия, 2012. – 208 с.

42. Липцер, Р.Ш. Статистика случайных процессов (нелинейная фильтрация и смежные вопросы): учебное пособие / Р.Ш. Липцер, А.Н. Ширяев. – М.: Изд-во Наука., 1974. – 696 с.

43. Лобанов, Д.В. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 20–25.

44. Мальков О.В. Экспериментальное определение модели силы при резьбофрезеровании // Международная молодежная конференция «Инновации в машиностроении»: сб. трудов. / О.В. Мальков, И.М. Головко Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – С. 73-77.

45. Малькова, Л.Д., Чихарева, М.А. Исследование характеристик токарной обработки на основе получения и анализа многомерных

полиномиальных зависимостей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. С. 49-66. DOI: 10.7463/0813.0589299.

46. Методики экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки / под ред. Г.И. Грановского. М.: НИИМаш, 1982. – 160 с.

47. Метрология интеллектуальных измерительных систем / В.П. Шевчук, В.И. Капля, А.П. Желтоногов, Д.Н. Лясин: Монография / ВолгГТУ, Волгоград, 2005. - 210 с.

48. Мещерский, И.В. Задачи по теоретической механике: учеб. пособие для вузов по дисциплине "Теоретическая механика" / И.В. Мещерский; под ред. В.А. Пальмова, Д. Р. Меркина. – СПб. и др.: Лань, 2008. – 447 с и предыдущие издания.

49. Мирошник, И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами: учебное пособие / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л Фрадков. – СПб.: Изд-во Наука, 2000. – 549 с.

50. Моделирование влияния дефектов мембраны тензопреобразователя давления на его частотные характеристики / О.Ю. Бушуев, И.И. Григорьев, Е.С. Коровченко, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 74–81.

51. Николаенко, А.А. Моделирование сил резания при шлифовании с учетом характеристик круга // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов / ЮУрГУ – Челябинск, 2003. – С. 50–53, 154.

52. Николаенко, А.А. Определение радиальной составляющей силы резания при плоском глубинном шлифовании // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов / ЮУрГУ – Челябинск, 2003. - С. 53–55, 154.

53. Новоселов, Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с.

54. Осолотков, И. П. Теоретическая механика: установочные лекции для заочников / И. П. Осолотков, В. Г. Караваев, М. Г. Чернобривец. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2001. – 67 с.

55. Павлов, И.О., Ушаков, М.В., Воробьёв, И.А. Система для измерения сил резания. Компановка, тарирование и оценка погрешности // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 10 – С. 159–167.

56. Патент на полезную модель № 2082123, российская федерация, G01L5/16. Способ определения сил резания и устройство для его осуществления/ Н.М. Заикин – заявка № 93007356/28; заявл. 05.02.1993; опубл. 20.06.1997.

57. Патент на полезную модель № 96875, Российская Федерация, МПК Е 01Н 5/12. Устройство для разрушения ледяных и твердых образований на дорожных покрытиях/ Д.А. Кацай, И.А. Баранова – заявка № 2010113856/21; заявл. 08.04.2010; опубл. 20.08.2010.

58. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.

59. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с упругими деформациями технологической системы / П.П. Переверзев, А.В. Попова, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – Вып. 9. – С. 23–27.

60. Польдин, О.В. Применение методов теории оптимальной нелинейной фильтрации марковских случайных процессов для решения задач обработки нестационарных сигналов: автореферат

дис. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / О.В. Польдин. – Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2003. – 132 с.

61. Попов, А.Е. Использование двух параметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления / А.Е. Попов, А.В. Лазуков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2008. Вып. 7. – № 3. – С. 38–40.

62. Попов, Б.А. Приближение функций для технических приложений / Б.А. Попов, Г.С. Теслер. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 352 с.

63. Примеры решения задач по теоретической механике: учеб. пособие для студентов-заочников / В. Г. Караваев, И. П. Осолотков, Н. Н. Ведерников и др.– Челябинск: Издательство ЮУрГУ , 1999. – 84 с.

64. Рабочая программа, контрольные задания и методические указания по курсу «Теоретическая механика». – Ч.П. Кинематика: (Для студентов-заочников машиностроительных, транспортных и строительных специальностей) / сост. Н.Н. Ведерников, В.Г. Караваев, Е.А. Шнейдерман, М.П. Щевелева, А.П. Ярцева. – Челябинск: ЧГТУ, 1992. – 35 с.

65. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1977. – 537 с.

66. Смирнов, В.А. Кинетостатическое моделирование энергоэффективного управления оборудованием с параллельной кинематикой / В.А. Смирнов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 16. – № 29 (205). – С. 65–70.

67. СТО ЮУрГУ 04-2008. Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению \ составители: Т.И. Парубочая., Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л. В. Винокурова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

68. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики: учеб. для высш. техн. учеб. заведений / С. М. Тарг. – М.: Высшая школа, 2008 и предыдущие издания.

69. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по направлению подгот. бакалавров и магистров "Автоматизация и упр." / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2005. – 566 с.

70. Тихонов, В.И. Нелинейная фильтрация и квазикогенный прием сигналов6 учебное пособие / В.И. Тихонов, Н.К. Кульман. – М.: Изд-во Советское радио, 1975. – 704 с.

71. Тихонов, В.И. Статическая радиотехника: учебное пособие / В.И. Тихонов. – М.: Изд-во Радио и связь, 1982. – 624 с.

72. Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный вестник. Электронный научно- технический журнал. – 2012. – №10. – http://engbul.bmstu.ru/doc/492011.html (дата обращения 01.09.2013).

73. Утенков, В.М. Возможности использования динамометра Kistler для испытания металлорежущих станков / В.М. Утенков, П.А. Быков // Инженерный вестник. Электронный научно- технический журнал. – 2012. – №10. – http://engbul.bmstu.ru/doc/492011.html (дата обращения 01.09.2013).

74. Царев, А.М. Основные положения метода распределенного базирования и обеспечения точности базирования автоматически сменных узлов на рабочих позициях перекомпонуемых производственных систем / А.М. Царев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2011. – № 2. – С. 61–72.

75. Шевченко В.В., Ревенко И.В. Система диагностики работоспособности режущего инструмента при обработке деталей в условиях автоматизированного производства // Новый университет. Сер. Технические науки. 2012. № 1. С. 10-12.

76. Шестаков, А.Л. Алгоритмы выбора и обоснования моделей функций преобразования измерительных преобразователей давления / А.Л. Шестаков, А.П. Лапин, Е.А. Лапина // Вестник Южно-Уральского государственного

университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2009. №26. – С. 10–12.

77. Шестаков, А.Л. Задача оптимизации функций преобразования измерительных преобразователей / А.Л. Шестаков, А.П. Лапин, Е.А. Лапина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2010. №2. – С. 4–6.

78. Шишов. О.В. Современные технологии и технические средства информатизации. – М.: Инфра-М, 2012. – 464 с.

79. Шуляк, Я.И. Модернизация установки измерения сил резания на базе динамометра УДМ-600. Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. 2016; (1): 1-12.

80. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики: Статика. Кинематика: учебник для вузов по техн. специальностям/ А.А. Яблонский, В.М. Никифорова. – М.: КноРус, 2010 и предыдущие издания.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

Код программы на языке Delphi 7 с комментариями

```
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, OleCtrls, AdvAILib_TLB, AuxMath, ExtCtrls, ComCtrls,
  TeeProcs, TeEngine, Chart, Series, Unit2, Buttons, Menus, GraphMois, Math;

//////////////////////////////////////
//Описание пользовательских типов
//////////////////////////////////////

//Тип, представляющий массив векторов длиной 12 элементов.
//Применялся в предыдущих версиях программы, теперь не используется.
type VectorArray12 = array[0..11] of TVector;

//Тип, представляющий массив чисел с плавающей запятой длиной 12 элементов.
//Применяется в функциях опроса датчиков и обработки полученной информации.
type DoubleArray12 = array[0..11] of double;

//Тип, представляющий массив целых чисел динамической длины.
//Применяется в качестве массива номеров доступных датчиков в функции опроса.
type IntArray = array of integer;

//Тип, представляющий массив чисел с плавающей запятой динамической длины.
//Применяется в функции ФНЧ.
type DoubleArray = array of double;

//Тип перечисления, представляющий состояние датчиков.
//None - значение по умолчанию.
//AllAvailable - все датчики доступны.
//PartlyAvailable - часть датчиков недоступна (см. подробное пояснение в функции
опроса).
//Unavailable - все датчики недоступны.
//Последнее значение зарезервировано и в настоящий момент не используется.
type SensorState = (None, AllAvailable, PartlyAvailable, Unavailable);

//Тип, представляющий собой доступность датчика.
//IsAvailable - флаг, указывающий, доступен ли датчик.
//SensorNumber - порядковый номер датчика; нумерация ведётся в порядке, указанном в
описании.
type
  TSensorAvailability = record
  IsAvailable: boolean;
  SensorNumber: integer;
end;
```

```
//Тип, представляющий массив доступностей датчиков длиной 12 элементов.
type AvailabilityArray12 = array[0..11] of TSensorAvailability;

////////////////////////////////////
//Описание формы
////////////////////////////////////

//Тип, представляющий главную форму.
type
  TForm1 = class(TForm)
    AdvAI1: TAdvAI; //AI - analog input, компонент, реализующий взаимодействие с платой.
    ResultTimer: TTimer; //Таймер, с помощью которого производится вывод графиков.
    ChartPanel: TPanel; //Панель, на которой расположены графики.
    ChartPages: TPageControl; //Компонент, содержащий страницы графиков.
    FxSheet: TTabSheet; //Страница графика Fx.
    FySheet: TTabSheet; //Страница графика Fy.
    FzSheet: TTabSheet; //Страница графика Fz.
    MzSheet: TTabSheet; //Страница графика Mz.

    CheckButton: TButton; //Кнопка опроса датчиков.
    CheckCaption: TLabel; //Текстовое поле, в которое выводятся результаты опроса.
    ResultButton: TButton; //Кнопка вывода результатов на графики.
    ClearButton: TButton; //Кнопка очистки графиков.

    CheckTimer: TTimer; //Таймер, с помощью которого производится опрос датчиков.
    SettingsButton: TSpeedButton; //Кнопка, открывающая форму с настройками.

    FxGraph: TGraphMois; //График Fx.
    FyGraph: TGraphMois; //График Fy.
    FzGraph: TGraphMois; //График Fz.
    MzGraph: TGraphMois; //График Mz.
    ExitButton: TSpeedButton;
    FilterCheckBox: TCheckBox;
    PauseButton: TButton;
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel; //Кнопка выхода.

    ////////////////////////////////////
    //Обработчики событий элементов формы
    ////////////////////////////////////
    procedure FormCreate(Sender: TObject); //Обработчик события создания формы.
```

procedure CheckButtonClick(Sender: TObject); //Обработчик события нажатия кнопки опроса.

Продолжение приложения А

procedure CheckTimerTimer(Sender: TObject); //Обработчик события таймера опроса.
procedure ResultButtonClick(Sender: TObject); //Обработчик события нажатия кнопки результатов.
procedure ResultTimerTimer(Sender: TObject); //Обработчик события таймера результатов.
procedure ClearButtonClick(Sender: TObject); //Обработчик события нажатия кнопки очистки графиков.
procedure SettingsButtonClick(Sender: TObject); //Обработчик события нажатия кнопки настроек.
procedure ExitButtonClick(Sender: TObject); //Обработчик события нажатия кнопки выхода.

```
////////////////////////////////////
//Пользовательские методы формы
////////////////////////////////////

//Метод, вызывающийся по окончании опроса доступности датчиков.
//aIsOnlyChecked - флаг, показывающий, производится ли только опрос доступности датчиков,
//или также после будет получение и вывод результатов.
procedure OnCheckFinished(aIsOnlyChecked: boolean);

//Метод очистки графиков.
procedure ClearGraphs;

//Метод изображения массива точек на графике.
procedure DrawOn(graph: TGraphMois; arr: DoubleArray);

procedure FilterCheckBoxClick(Sender: TObject);
procedure PauseButtonClick(Sender: TObject);

private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

////////////////////////////////////
//Пользовательские функции
////////////////////////////////////

//Основная функция программы, здесь происходит пересчёт данных с датчиков в момент и силу резания.
//sensorValues - массив данных с датчиков в один момент времени.
//Возвращаемое значение - экзмепляр типа TCutting, содержащий вектора силы и момента (описание см. в AuxMath.pas).
function Calculate(sensorValues: DoubleArray12): TCutting;
```

```
  //Функция проверки доступности в один момент времени.
  //sensorValues - массив данных с датчиков в один момент времени.
```

Продолжение приложения А

```
//Возвращаемое значение - массив доступностей датчиков.
  function CheckSensors(sensorValues: DoubleArray12): AvailabilityArray12;

  //Функция, возвращающая доступность всех датчиков.
  //sensors - массив доступностей датчиков.
  //Возвращаемое значение - логическое, истина если все датчики доступны, ложь иначе.
  function IsAllAvailable(sensors: AvailabilityArray12): boolean;
  //Функция обработки данных с датчиков.
  //input - компонент типа TAdvAI, позволяющий работать с платой.
  //Возвращаемое значение - массив данных с датчиков.
  function ProcessSensors(input: TAdvAI): DoubleArray12;

  //Функция ФНЧ.
  //inArr - массив входных значений.
  //Возвращаемое значение - массив отфильтрованных значений.
  function Filter(inArr: DoubleArray): DoubleArray;

  procedure ClearSamples;

  ////////////////////////////////////////
  //Глобальные переменные
  ////////////////////////////////////////

  var
  Form1: TForm1; //Главная форма программы.

  P: double; //Вес платформы, Н.
  F0: double; //Сила натяжения тензодатчиков, Н.
  b: double; //Плечо момента резания, м.

  //Смещение нуля тензодатчика, мВ. Используется для определения доступности датчика
(алгоритм см. ниже).
  zeroEps: double;

  sensorAvailability: AvailabilityArray12; //Массив доступностей датчиков.
  checkingTime: cardinal; //Переменная времени, используемая при опросе доступности.

  workingTime: cardinal; //Переменная времени, используемая при выводе результатов.
  //Флаг, показывающий, выполняется ли только опрос доступности, или также будет сбор
результатов.
  isOnlyChecked: boolean;

  State: SensorState; //Состояние доступности датчиков.

  //Номера доступных датчиков, измеряющих вертикальную составляющую силы резания.
  zSensorIds: IntArray;
```

```
  //Номера недоступных датчиков, измеряющих вертикальную составляющую силы резания.
  zUnSensorIds: IntArray;
  sampleFx: DoubleArray; //Массив рассчитанных значений Fx.
```

Продолжение приложения А

```
  sampleFy: DoubleArray; //Массив рассчитанных значений Fy.
  sampleFz: DoubleArray; //Массив рассчитанных значений Fz.
  sampleMz: DoubleArray; //Массив рассчитанных значений Mz.
  sampleLength: integer; //Длина массивов.

  //Вспомогательные множества, означающие диапазоны номеров датчиков.
  zSet: set of 0..3;
  ySet: set of 4..7;
  xSet: set of 8..11;
//////////////////////////////////////
//Константы
//////////////////////////////////////
const
  SensorCount = 12; //Общее количество датчиков.


//////////////////////////////////////
//Реализация функций и методов
//////////////////////////////////////

implementation

{$R *.dfm}

//////////////////////////////////////
//Свободные функции
//////////////////////////////////////
//Основная функция программы, здесь происходит пересчёт данных с датчиков в момент и силу резания.
//sensorValues - массив данных с датчиков в один момент времени.
//Возвращаемое значение - экзмепляр типа TCutting, содержащий вектора силы и момента (описание см. в AuxMath.pas).
function Calculate(sensorValues: DoubleArray12): TCutting;
var
  force: TVector; //Сила резания.
  //Компоненты силы резания.
  fx: double;
  fy: double;
  fz: double;
  momentum: TVector; //Момент резания.
  //Компоненты момента. x-, y-компоненты рарезервированы и всегда равны нулю в этой версии.
  mx: double;
  my: double;
  mz: double;
begin
```

```
  //Расчёт значений компонентов силы резания. В массиве данных с датчика:
  //0 - 3: датчики, ориентированные вдоль оси z;
  //4 - 7: датчики, ориентированные вдоль оси y;
  //8 - 11: датчики, ориентированные вдоль оси x.
```

Продолжение приложения А

```
  fz := sensorValues[0] + sensorValues[1] + sensorValues[2] + sensorValues[3] - P;
  fy := sensorValues[4] + sensorValues[5] + sensorValues[6] + sensorValues[7] - 4 * F0;
  fx := sensorValues[8] + sensorValues[9] + sensorValues[10]  + sensorValues[11] - 4 * F0;
  force := TVector.Create(fx, fy, fz);

  //Расчёт значений компонентов момента резания.
  mx := 0;
  my := 0;
  mz := (sensorValues[4] + sensorValues[5] + sensorValues[10] + sensorValues[11] -
(sensorValues[6] + sensorValues[7] + sensorValues[8] + sensorValues[9])) * b / 2;
  momentum := TVector.Create(mx, my, mz);

  Result := TCutting.Create(force, momentum);
end;

//Функция проверки доступности в один момент времени.
//sensorValues - массив данных с датчиков в один момент времени.
//Возвращаемое значение - массив доступностей датчиков.
function CheckSensors(sensorValues: DoubleArray12): AvailabilityArray12;
var
i: integer;
begin
  //Проходим циклически по всем датчикам, проверяя их на доступность.
  //Датчик считается доступным _в данный момент времени_, если значение,
  //полученное с него, больше смещения нуля zeroEps.
  for i := 0 to Length(sensorValues) - 1 do
  begin
  Result[i].SensorNumber := i;
  Result[i].IsAvailable := Abs(sensorValues[i]) > zeroEps;
  end;
end;

//Функция, возвращающая доступность всех датчиков.
//sensors - массив доступностей датчиков.
//Возвращаемое значение - логическое, истина если все датчики доступны, ложь иначе.
function IsAllAvailable(sensors: AvailabilityArray12): boolean;
var
i: integer;
begin
  Result := false;
  //Проходим по всем доступностям датчиков.
  //Если хотя бы один недоступен, возвращаем ложь, иначе истину.
  for i := 0 to Length(sensors) do
  begin
    Result := Result and sensors[i].IsAvailable;
  end;
```

```
end;

//Функция обработки данных с датчиков.
//input - компонент типа TAdvAI, позволяющий работать с платой.
```

Продолжение приложения А

```
//Возвращаемое значение - массив данных с датчиков.
function ProcessSensors(input: TAdvAI): DoubleArray12;
var
i: integer;
begin
  //В цикле проходим по всем датчикам и формируем массив значений, снятых с них.
  //Такой опрос _не является_ одновременным опросом всех датчиков, хотя задержка
  //в получении данных с двух "соседних" датчиков весьма невелика.
  for i := 0 to SensorCount - 1 do
  begin
    input.ChannelNow := i;
    if i in zSet then
    begin
      //Здесь и далее повторение кода из-за особенности предыдущей версии:
      //изначально функция возвращала не массив чисел, а массив векторов.
      //Т. е. изначально было
      //Result[i] := TVector.Create(input.DataAnalog, 0, 0);
      //Result[i] := TVector.Create(0, input.DataAnalog, 0);
      //Result[i] := TVector.Create(0, 0, input.DataAnalog);
      //в разных ветвях алгоритма.
      Result[i] := VoltToForce(input.DataAnalog);
    end
    else if i in ySet then
    begin
      Result[i] := VoltToForce(input.DataAnalog);
    end
    else if i in xSet then
    begin
      Result[i] := VoltToForce(input.DataAnalog);
    end
    else
    begin
      Result[i] := 0;
    end;
  end;
end;

function Filter(inArr: DoubleArray): DoubleArray;
const
N = 20; //Длина фильтра.
var
i: integer;
j: integer;

Fd: double; //Частота дискретизации входных данных.
Fs: double; //Частота среза.
```

```
Fx: double; //Частота подавления.
H: array [0..N - 1] of double; //"Реальная" импульсная характеристика.
Hid: array [0..N - 1] of double; //Идеальная импульсная характеристика.
W: array [0..N - 1] of double; //Весовая функция.
```

Продолжение приложения А

```
Fc: double;
sum: double;
begin
  SetLength(Result, Length(inArr));

  Fd := 1 / Form1.ResultTimer.Interval * 1000;
  Fs := 2;
  Fx := 5;

  Fc := (Fs + Fx) / 2 / Fd;

  for i := 0 to N - 1 do
  begin
    if i = 0 then Hid[i] := 2 * PI * Fc
    else  Hid[i] := Sin(2 * PI * Fc * i) / PI / i;

    W[i] := 0.42 - 0.5 * cos(2 * PI * i / (N - 1)) + 0.08 * cos(4 * PI * i / (N - 1));
    H[i] := Hid[i] * W[i];
  end;

  sum := 0;
  for i := 0 to N - 1 do sum := sum + H[i];
  for i := 0 to N - 1 do H[i] := H[i] / sum;

  for i := 0 to Length(inArr) - 1 do
  begin
    Result[i] := 0;
    for j := 0 to N - 2 do
    begin
      if i - j > 0 then Result[i] := Result[i] + H[j] * inArr[i - j];
    end;
  end;
end;

procedure ClearSamples;
begin
  workingTime := 0;
  sampleFx := nil;
  sampleFy := nil;
  sampleFz := nil;
  sampleMz := nil;
  sampleLength := 0;
end;

//////////////////////////////////////
//Методы формы
```

```
//////////////////////////////////////

//Обработчик события создания формы. Этот метод вызывается в самом начале работы программы.
```

Продолжение приложения А

```
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
var i: integer;
begin
  //Инициализация множеств номеров датчиков.
  zSet := [0..3];
  ySet := [4..7];
  xSet := [8..11];

  //Инициализация номеров датчиков в массиве их доступностей.
  for i := 0 to SensorCount - 1 do
  begin
    sensorAvailability[i].SensorNumber := i;
  end;

  //Инициализация параметров датчиков и платформы.
  F0 := 10; //Сила натяжения тензодатчиков, Н.
  P := 10; //Вес платформы, Н.
  b := 0.5; //Плечо момента резания, м.
  maxWeight := 1000; //Максимальный вес, на который рассчитан тензодатчик, кг.
  OS := 2; //РКП, рабочий коэффициент передачи датчика, мВ/В.
  inputVoltage := 12; //Напряжение питания датчика, В.

  State := None; //Состояние доступности датчиков.

  sampleLength := 0; //Длина массивов значений силы и момента.

  Init; //Инициализация максимального выходного напряжения датчика (см. AuxMath.pas).
end;

//Обработчик события нажатия кнопки опроса.
procedure TForm1.CheckButtonClick(Sender: TObject);
begin
  CheckTimer.Enabled := true; //Запуск таймера опроса.
  isOnlyChecked := true; //Выставление флага, показывающего, что будет только опрос доступности, в истину.
end;

//Обработчик события таймера опроса.
procedure TForm1.CheckTimerTimer(Sender: TObject);
var
values: DoubleArray12; //Текущие значения, снятые с датчиков.
currAvailability: AvailabilityArray12; //Текущие доступности датчиков.
i: integer;
begin
  checkingTime := checkingTime + CheckTimer.Interval;
```

```
  //Проходим в цикле по всем датчикам и снимаем с них значения.
  for i := 0 to SensorCount - 1 do
  begin
    AdvAI1.ChannelNow := i;
```

Продолжение приложения А

```
  values[i] := AdvAI1.DataAnalog;
  end;

  //Получаем доступности датчиков в текущий момент времени.
  currAvailability := CheckSensors(values);
  //Далее для каждого датчика проверяем:
  //если в текущий момент датчик доступен, то и в целом он доступен.
  //Таким образом, датчик считается доступным, если хотя бы в один момент
  //времени опроса доступности он был доступен.
  //Наоборот, датчик считается недоступным, если он был недоступен
  //в каждый момент времени опроса доступности.
  for i := 0 to Length(currAvailability) - 1 do
  begin
    if currAvailability[i].IsAvailable then
    begin
      sensorAvailability[i].IsAvailable := currAvailability[i].IsAvailable;
    end;
  end;

  //По окончании проверки доступности вызываем метод OnCheckFinished,
  //специфированный флагом isOnlyChecked, показывающим, будет ли после
  //проверки сбор результатов.
  if checkingTime > 1000 then
  begin
    OnCheckFinished(isOnlyChecked);
  end;
end;

//Метод, вызывающийся по окончании опроса доступности датчиков.
//aIsOnlyChecked - флаг, показывающий, производится ли только опрос доступности
датчиков,
//или также после будет получение и вывод результатов.
procedure TForm1.OnCheckFinished(aIsOnlyChecked: boolean);
var
i: integer;
availableText: string; //Строка с текстом о доступности/недоступности датчиков.
buttonSelected: integer; //Вспомогательная переменная, используемая в диалоговых окнах.
isZAvailable: boolean; //Флаг, показывающий, доступны ли вертикальные датчики.
isOtherAvailable: boolean; //Флаг, показывающий, доступны ли остальные датчики.
begin
  //Останавливаем проверку доступности датчиков и сбрасываем время проверки.
  CheckTimer.Enabled := false;
  checkingTime := 0;
  //Если нужна была только проверка доступности, то выводим информацию о
доступности.
  if aIsOnlyChecked then
```

```
  begin
    CheckCaption.Caption := 'Доступность каналов: ' + #13#10;
    for i := 0 to Length(sensorAvailability) - 1 do
    begin
```

Продолжение приложения А

```
 if sensorAvailability[i].IsAvailable then availableText := 'доступен' else availableText := 'недоступен';
      CheckCaption.Caption := CheckCaption.Caption + IntToStr(sensorAvailability[i].SensorNumber) + ': ' + availableText + #13#10;
    end;
  end
  //Иначе, если нужен ещё вывод результатов, то начинаем дальнейшие проверки.
  else
  begin
    //Если доступны все датчики, то запускаем таймер результатов, начав этим вывод графиков.
    if IsAllAvailable(sensorAvailability) then
    begin
      ResultTimer.Enabled := true;
      State := AllAvailable;
    end
    //Иначе, если часть датчиков недоступна, начинаем диалог с пользователем.
    else
    begin
      buttonSelected := MessageDlg('Доступны не все датчики. Попытаться собрать данные на основе имеющихся?', mtCustom, [mbYes, mbNo], 0);
      if buttonSelected = mrNo then exit;
      //Если нужно выполнить попытку получить информацию на основе имеющихся датчиков, то...
      if buttonSelected = mrYes then
      begin
        isZAvailable := false;
        //...проверяем, доступны ли _какие-нибудь_ вертикальные датчики, и если доступны, то какие...
        for i := 0 to 3 do
        begin
          if sensorAvailability[i].IsAvailable then
          begin
            SetLength(zSensorIds, Length(zSensorIds) + 1);
            zSensorIds[Length(zSensorIds) - 1] := i;
          end
          else
          begin
            SetLength(zUnSensorIds, Length(zUnSensorIds) + 1);
            zUnSensorIds[Length(zUnSensorIds) - 1] := i;
          end;
          isZAvailable := isZAvailable or sensorAvailability[i].IsAvailable;
        end;
        //...проверяем, доступны ли _все_ остальные (не вертикальные) датчики.
        isOtherAvailable := true;
```

```
      for i := 4 to 100 do
      begin
        isOtherAvailable := isOtherAvailable and sensorAvailability[i].IsAvailable;
      end;
      //Если доступны некоторые из вертикальных датчиков и все из остальных,
```

Продолжение приложения А

```
    //то пытаемся произвести расчёт на основе имеющихся доступных датчиков.
      if isZAvailable and isOtherAvailable then
      begin
        State := PartlyAvailable;
        ResultTimer.Enabled := true;
      end
      //Если недоступны все вертикальные датчики или хотя бы один из остальных,
      //то сообщаем об этом пользователю и спрашиваем, нужно ли всё равно произвести
      //вывод информации.
      else
      begin
        buttonSelected := MessageDlg('Имеющихся датчиков недостаточно. Вывести
результат всё равно?', mtCustom, [mbYes, mbNo], 0);
        if buttonSelected = mrNo then exit;
        //Если всё равно нужно вывести график, то условно ставим состояние
        //доступности датчиков в AllAvailable и выводим (сигнал с недоступных датчиков
        //при этом берётся как есть, то есть, скорее всего, равен нулю или в
        //пределах дрейфа нуля).
        if buttonSelected = mrYes then
        begin
          State := AllAvailable;
          ResultTimer.Enabled := true;
        end;
      end;
    end;
  end;
 end;
end;

//Обработчик события нажатия кнопки результатов.
procedure TForm1.ResultButtonClick(Sender: TObject);
begin
  //Очистка графиков, запуск таймера проверки и выставление флага, показывающего,
  //что после проверки требуется сбор результатов.
  isOnlyChecked := false;
  CheckTimer.Enabled := true;
  ClearGraphs;
  ClearSamples;
end;

//Обработчик события таймера результатов.
procedure TForm1.ResultTimerTimer(Sender: TObject);
var
result1: TCutting; //Результат вычислений, хранящий силу и момент резания.
t: real; //Вспомогательная переменная, текущее время в секундах.
```

```
values: DoubleArray12; //Значения, снятые с датчиков.
//Среднее значений вертикальных датчиков. Используется для обработки вертикальных
//датчиков, если не каждый из них доступен.
average: double;
i: integer;
```

Продолжение приложения А

```
begin
  workingTime := workingTime + ResultTimer.Interval;
  t := workingTime / 1000;

  values := ProcessSensors(AdvAI1);
  average := 0;
  result1 := TCutting.Create;
  case State of
    //Если все датчики доступны, то формируем массив значений из данных их опроса.
    AllAvailable:
      result1 := Calculate(values);
    //Если часть вертикальных датчиков недоступна, то исходим из
    //предположения, что данные с вертикальных датчиков примерно равны
    //между собой. Рассчитываем среднее из данных с доступных датчиков
    //и присваиваем это значение вместо данных с недоступных датчиков.
    PartlyAvailable:
    begin
      for i := 0 to Length(zSensorIds) - 1 do
      begin
        average := average + values[zSensorIds[i]];
      end;
      average := average / Length(zSensorIds);
      for i := 0 to Length(zUnSensorIds) - 1 do
      begin
        values[zUnSensorIds[i]] := average;
      end;
      result1 := Calculate(values);
    end;
  end;

  Inc(sampleLength);
  SetLength(sampleFx, sampleLength);
  SetLength(sampleFy, sampleLength);
  SetLength(sampleFz, sampleLength);
  SetLength(sampleMz, sampleLength);
  sampleFx[sampleLength - 1] := result1.Force.X;
  sampleFy[sampleLength - 1] := result1.Force.Y;
  sampleFz[sampleLength - 1] := result1.Force.Z;
  sampleMz[sampleLength - 1] := result1.Momentum.Z;

  //Выводим графики на экран.
  FxGraph.Curves[0].AddPoint(t, result1.Force.X);
  FyGraph.Curves[0].AddPoint(t, result1.Force.Y);
  FzGraph.Curves[0].AddPoint(t, result1.Force.Z);
  MzGraph.Curves[0].AddPoint(t, result1.Momentum.Z);
```

```
end;

//Метод очистки графиков.
procedure TForm1.ClearGraphs;
begin
```

Продолжение приложения А

```
//Очищаем графики, останавливаем их вывод и сбрасываем время.
  FxGraph.Curves[0].ClearPoints;
  FyGraph.Curves[0].ClearPoints;
  FzGraph.Curves[0].ClearPoints;
  MzGraph.Curves[0].ClearPoints;
  ResultTimer.Enabled := false;
end;

//Обработчик события нажатия кнопки очистки графиков.
procedure TForm1.ClearButtonClick(Sender: TObject);
begin
  ClearGraphs;
  ClearSamples;
end;

procedure TForm1.DrawOn(graph: TGraphMois; arr: DoubleArray);
var
i: Cardinal;
begin
  if (arr <> nil) and (Length(arr) <> 0) then
  begin
    for i := 0 to Length(arr) - 1 do
    begin
      graph.Curves[0].AddPoint(i * ResultTimer.Interval / 1000, arr[i]);
    end;
  end;
end;

//Обработчик события нажатия кнопки настроек.
procedure TForm1.SettingsButtonClick(Sender: TObject);
begin
  //Показываем окно настроек.
  SettingsForm.ShowModal;
end;

//Обработчик события нажатия кнопки выхода.
procedure TForm1.ExitButtonClick(Sender: TObject);
begin
  Form1.Close;
end;

procedure TForm1.FilterCheckBoxClick(Sender: TObject);
var
FxNew: DoubleArray;
FyNew: DoubleArray;
```

```
FzNew: DoubleArray;
MzNew: DoubleArray;
begin
  ResultTimer.Enabled := false;
  ClearGraphs;
```

Продолжение приложения А

```
  if FilterCheckBox.Checked then
  begin
    FxNew := Filter(sampleFx);
    FyNew := Filter(sampleFy);
    FzNew := Filter(sampleFz);
    MzNew := Filter(sampleMz);

    DrawOn(FxGraph, FxNew);
    DrawOn(FyGraph, FyNew);
    DrawOn(FzGraph, FzNew);
    DrawOn(MzGraph, MzNew);
  end
  else
  begin
    DrawOn(FxGraph, sampleFx);
    DrawOn(FyGraph, sampleFy);
    DrawOn(FzGraph, sampleFz);
    DrawOn(MzGraph, sampleMz);
  end;
end;

procedure TForm1.PauseButtonClick(Sender: TObject);
begin
  if not ResultTimer.Enabled then
  begin
    ClearGraphs;
    DrawOn(FxGraph, sampleFx);
    DrawOn(FyGraph, sampleFy);
    DrawOn(FzGraph, sampleFz);
    DrawOn(MzGraph, sampleMz);
  end;
  ResultTimer.Enabled := not ResultTimer.Enabled;
end;

end.


//Модуль с формой настроек.
unit Unit2;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls;

//////////////////////////////////////
```

```
//Описание формы
//////////////////////////////////////
type
  TSettingsForm = class(TForm)
    PEdit: TEdit; //Поле ввода веса платформы.
```

Продолжение приложения А

```
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    F0Edit: TEdit; //Поле ввода силы натяжения тензодатчиков.
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    bEdit: TEdit; //Поле ввода плеча момента резания.
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    SettingsButton: TButton; //Кнопка подтверждения выбора.
    MaxWeightEdit: TEdit; //Поле ввода максимального веса, измеряемого тензодатчиком.
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    OSEdit: TEdit; //Поле ввода РКП (рабочего коэффициента передачи) тензодатчика.
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    InputVoltageEdit: TEdit; //Поле ввода напряжения питания датчика.
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;

    ////////////////////////////////////////
    //Обработчики событий элементов формы
    ////////////////////////////////////////

    //Обработчик события нажатия кнопки подтверждения выбора.
    procedure SettingsButtonClick(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

  ////////////////////////////////////////
  //Пользовательские функции
  ////////////////////////////////////////
  //Процедура преобразования строки в число (обёртка над стандартным TryStrToFloat
  //с окном оповещения, если преобразование невозможно).
  procedure TryConvert(str: string; var value: double);

////////////////////////////////////////
//Глобальные переменные
////////////////////////////////////////

var
```

```
  SettingsForm: TSettingsForm; //Форма настроек.

//////////////////////////////////////
//Реализация функций и методов
//////////////////////////////////////
```

Продолжение приложения А

```
implementation

uses Unit1, AuxMath;
{$R *.dfm}

procedure TSettingsForm.SettingsButtonClick(Sender: TObject);
begin
   TryConvert(PEdit.Text, P);
   TryConvert(F0Edit.Text, F0);
   TryConvert(bEdit.Text, b);
   TryConvert(MaxWeightEdit.Text, maxWeight);
   TryConvert(InputVoltageEdit.Text, inputVoltage);
   TryConvert(OSEdit.Text, OS);
   Init;
   SettingsForm.Close;
end;

procedure TryConvert(str: string; var value: double);
begin
  if not TryStrToFloat(str, value) then
  begin
    ShowMessage('Ошибка конвертирования введённых данных в значении ''' + str + ''''.
Возможно, использована точка в качестве десятичного разделителя (нужна запятая).');
  end;
end;

end.

unit AuxMath;

interface

  type
  TVector = class

  private
    fX: double;
    fY: double;
    fZ: double;
  public
    property X: double read fX write fX;
    property Y: double read fY;
    property Z: double read fZ;

    constructor Create; overload;
```

```
    constructor Create(aX: double; aY: double; aZ: double); overload;
  end;

  type
  TCutting = class
```

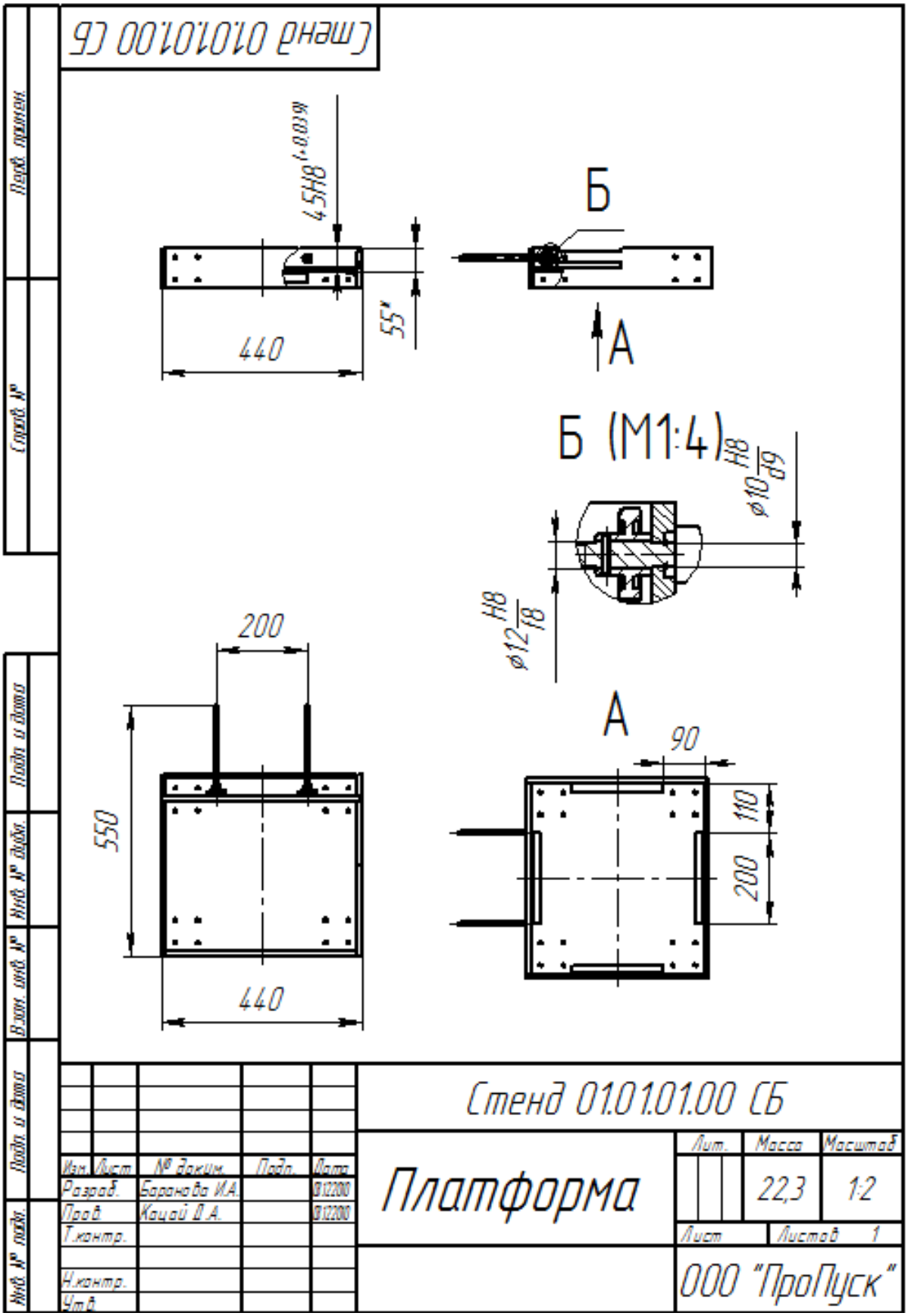
Продолжение приложения А

```
  private
    fForce: TVector;
    fMomentum: TVector;

  public
  property Force: TVector read fForce;
  property Momentum: TVector read fMomentum;

  constructor Create; overload;
  constructor Create(aForce: TVector; aMomentum: TVector); overload;

  destructor Destroy; override;

  end;

  function VoltToForce(voltage: double): real;
  procedure Init;

var
inputVoltage: double; //Напряжение питания.
OS: double; //Output sensitivity, рабочий коэффициент передачи.
maxWeight: double; //Номинальная максимальная нагрузка.
maxOutputVoltage: double; //Наибольшее напряжение сигнала с датчика.

const g = 9.8; //Ускорение свободного падения.

implementation

constructor TVector.Create;
begin
  inherited Create;
  fX := 0;
  fY := 0;
  fZ := 0;
end;

constructor TVector.Create(aX: double; aY, aZ: double);
begin
  inherited Create;
  self.fX := aX;
  self.fY := aY;
  self.fZ := aZ;
end;

constructor TCutting.Create;
```

```
begin
  inherited;
  with self do
  begin
    fForce := TVector.Create;
```

Окончание приложения А

```
 fMomentum := TVector.Create;
  end;
end;

constructor TCutting.Create(aForce: TVector; aMomentum: TVector);
begin
  inherited Create;
  with self do
  begin
    fForce := aForce;
    fMomentum := aMomentum;
  end;
end;

destructor TCutting.Destroy;
begin
  with self do
  begin
    fForce.Destroy;
    fMomentum.Destroy;
  end;
  inherited;
end;

function VoltToForce(voltage: double): real;
begin
  Result := voltage / maxOutputVoltage * maxWeight * g;
end;

procedure Init;
begin
  maxOutputVoltage := OS * inputVoltage / 1000; // 1000 - количество мВ в В (РКП в мВ/В).
end;

end.
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Сборочный чертеж