

УДК 664.9.022

Разработка весоконтрольного модуля для мехатронного комплекса порционирования пищевых продуктов

Д-р техн. наук Фатыхов Ю.А., канд. техн. наук Агеев О.В.

Калининградский государственный технический университет

г. Калининград, Советский проспект, д. 1

Показана актуальность применения современного мехатронного пищевого оборудования в рыбной отрасли. Обоснована необходимость разработки весоконтрольного модуля для порционирующего мехатронного комплекса. Рассмотрена структура и основные компоненты весоконтрольного модуля. Обоснован выбор тензометрических датчиков для построения весоконтрольного модуля. Приведено математическое описание силоизмерительного тензометрического датчика. Разработано цифровое измерительно-управляющее устройство на основе микроЭВМ. Выбраны и проанализированы методы цифровой фильтрации сигналов тензодатчиков. Приведены общий вид и принцип работы весоконтрольного модуля.

Ключевые слова: мехатроника, мехатронный комплекс, весоконтрольный модуль, тензометрия, тензодатчик, микроЭВМ, взвешивание, ресурсосбережение, цифровая обработка, цифровой фильтр.

Development of module for weight measurement for food portioning mechatronical complex

D.Sc. J.A. Fatykhov, Ph.D. O.V. Ageev

Kaliningrad state technical university

Kaliningrad, Sovetsky Avenue, 1

The urgency of the application of modern mechatronical food equipment in the fishing industry is described. The necessity of developing a module for weight measurement for food portioning mechatronical complex is considered. The structure of module for weight measurement is shown. The choice of load cell for development of module for weight measurement. The mathematical description of the force measuring load cell is considered. Developed by digital measuring and control device based microcomputer. Selected and analyzed by the methods of digital filtering of signal load cell. Shows a general view and working principle of module for weight measurement.

Key words: food portioning, weight measurement, mathematic model, mechatronics, load cell, microcomputer, digital filter, resource saving.

В настоящее время на пищевых производствах требуется рациональное использование сырья на основе ресурсосберегающих технологий. Эффективное решение этой задачи предполагает автоматическое измерение параметров сырья и учёт готовой продукции современными методами. Измерение осуществляется средствами,

сопряжёнными с технологическим оборудованием, а его результаты используются для непосредственного воздействия на технологический процесс с целью обеспечения заданного качества продукции. Это позволяет осуществлять управление или регулирование производственного процесса, высвобождая операторов от ручного выполнения этих функций [1].

Одновременно, в области технологического оборудования для пищевых производств происходит очередная смена поколений. Это связано с тем, что достижения мехатроники позволяют создать принципиально новые технологические машины с признаками робототехнических систем. Совершенствование техники пищевой инженерии привело к разработке нового класса технических систем – мехатронных комплексов с интеллектуальными управляющими системами.

Такое оборудование является мехатронной техникой, состоящей из следующих концептуально связанных блоков: модуля для отсекаания голов у рыбы и резки хвостов; модуля потрошения и зачистки; разделочно-филетировочного модуля; порционирующего модуля; видеосканирующего модуля с устройством технического зрения; весоконтрольного модуля; управляющей микроЭВМ; программного обеспечения для распознавания образа рыбы и филе, расчета параметров и принятия решений; цифрового привода для перемещения и настройки режущих рабочих органов; конвейерного оборудования для перемещения филе и порций [2].

В большинстве технологических процессов при обработке рыбы и морепродуктов должно проводиться взвешивание и дозирование продуктов. Весоизмерительная техника должна являться составной частью оборудования, встраиваться в автоматизированные линии, снабжаться различными приспособлениями и наряду с измерением массы выполнять другие технологические функции.

Выполнение ряда технологических операций, таких как порционирование филе на кусочки заданного веса, дозирование пищевых компонентов, предполагает наличие весоконтрольной техники. Кроме того, методы и средства измерения веса применимы для автоматизации учёта при приёме сырья, для сортирования рыбы, активного контроля качества готовой продукции. От правильного выбора принципа работы и конструкции весоизмерительных приборов зависит возможность рационального использования сырья, а также внедрение на предприятии автоматизированного учёта выпуска готовой продукции.

Внедрение и использование на рыбоперерабатывающих производствах автоматизированной системы учёта и контроля позволяет количественно оценивать производство в любой момент времени, проводить анализ технологических потерь. Также обеспечивается косвенная оценка качества выпускаемой продукции за счёт сокращения потерь сырья при обработке путем активного контроля за работой технологического оборудования, входящего в состав линий.

Наряду с этим, наличие весоконтрольных средств в мехатронном оборудовании создает основу для реализации адаптивного управления при изменении условий внешней среды, существенно расширяет универсальность и приспособляемость пищевого оборудования, позволяет выполнять автоматическую перенастройку на различные виды сырья и готовой продукции. Это содействует интеграции мехатронного пищевого оборудования в гибкие производственные системы (ГПС), и далее - в безлюдные технологические потоки. Представляется, что весоконтрольные средства являются неотъемлемой составной частью универсальной мехатронной платформы для построения пищевых производств будущего [3].

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются десятки наименований весоконтрольной техники. Однако в пищевой и рыбной промышленности зачастую используются весовые устройства общепромышленного назначения, которые по своим показателям не всегда соответствуют условиям пищевых производств. Недостатком таких устройств является их невысокая устойчивость к воздействию перепадов температур, контакту с водой и солью. Кроме того, не всегда возможна работа весовых устройств общепромышленного назначения в судовых условиях с необходимой точностью измерений.

Многие модели весоконтрольных устройств по своим техническим показателям не обеспечивают поточности производства в технологических линиях. Модели весов с рычажно-гиревыми и квадрантными уравновешивающими элементами не обладают приемлемой точностью измерений, особенно в судовых условиях.

Следует учитывать, что при создании новых типов весоконтрольных устройств должна повышаться степень автоматизации и точность приборов, уменьшаться масса и габариты. Должен применяться принцип агрегатирования весовых устройств с технологическим оборудованием, что является необходимым условием для работы технологических линий в автоматическом режиме. Должны широко применяться быстродействующие датчики, а системы автоматического управления процессом взвешивания строиться на основе мехатроники, микроЭВМ и микропроцессоров [3].

Все вышеизложенное обуславливает актуальность задачи разработки современных мехатронных средств, предназначенных для эффективного измерения весовых характеристик сырья и готовой продукции. Эффективность разрабатываемого весоконтрольного модуля характеризуется видом получаемой информации, точностью и скоростью работы, а также доступностью технической реализации.

В общем случае в состав весоконтрольного модуля мехатронного комплекса включены следующие основные устройства:

- конвейер на основе электропривода с цифровым частотным управлением;
- грузоприемное устройство;
- силовпередающее устройство;

- тензорезисторный датчик силы;
- цифровое измерительно-управляющее устройство на основе микроЭВМ;
- периферийное оборудование (индикаторы, выносные табло, принтеры, сетевые коммутаторы);
- исполнительное устройство для сортирования сырья или дозирования продукции.

Существенный вклад в упрощение реализации и повышение эффективности разработки весоконтрольного модуля внесло появление доступных электронных тензометрических датчиков, построенных на основе тензорезисторов и упругих элементов, обладающих низким энергопотреблением, высокой надежностью и большим сроком службы, а также повышение доступности быстродействующих аналого-цифровых преобразователей и интегральных усилителей сигналов (тензостанций).

К достоинствам электронных тензометрических датчиков отнесены [4,5,6]:

- простота измерительного преобразователя деформации в электрический сигнал - тензорезистора;
- возможность проведения измерений в широком диапазоне температур при самотермокомпенсации или автоматической схемной компенсации;
- малые габариты тензорезистора, обеспечивающие возможность измерения в труднодоступных местах;
- практическая безинерционность тензорезистора, вследствие чего амплитудно-частотно-фазовая характеристика измерительного преобразователя фактически определяется лишь свойствами упругого элемента;
- высокая стабильность измерительных свойств;
- возможность измерения деформаций при различных размерах базы, начиная с десятых долей миллиметра;
- возможность дистанционных измерений в большом количестве точек;
- возможность измерений при самых различных внешних условиях (влажность, давление), неблагоприятных для других измерительных средств;
- сравнительно невысокая стоимость.

Вместе с тем, тензорезисторам свойственны и некоторые недостатки [4,5,6]:

- невозможность индивидуальной градуировки;
- относительно невысокая чувствительность;
- относительно низкий абсолютный уровень выходных сигналов.

Как известно, взвешиванием называется измерение массы тела с использованием гравитационных сил, действующих на это тело. Сила, с которой тело, находящееся под действием силы тяжести, в свою очередь действует на неподвижный подвес или основание, называется массой тела. Таким образом, измеряемой механической величиной является сила, которая воздействует на упругий элемент тензометрического

датчика, вызывая его деформацию в пределах диапазона измерений, пропорциональную силе.

Процесс измерения возможно разбить на несколько этапов. Первоначально происходит преобразование измеряемого усилия в поле механических напряжений в теле упругого элемента. Затем в соответствии с законом Гука напряжения преобразуются в поле деформаций поверхности, после чего чувствительный элемент тензорезистора преобразует совокупность деформаций в изменение электрического сопротивления. Далее мостовая электрическая схема, в которую включен тензорезистор, преобразует изменение сопротивления в изменение коэффициента передачи моста по напряжению.

Конструктивно тензорезистор представляет собой чувствительный элемент из тензочувствительного материала (проволока, фольга), закрепленный с помощью связующего (клея, цемента) на упругом элементе (исследуемой детали). Для присоединения чувствительного элемента в электрическую цепь тензорезистор имеет выводные проводники. Современные конструкции тензорезисторов для удобства установки имеют подложку, расположенную между чувствительным и упругим элементами тензодатчика. Фольговые тензорезисторы имеют лучшую теплоотдачу, допускают большие токи питания, более технологичны в изготовлении по сравнению с проволочными тензорезисторами.

Деформация ε упругого элемента (исследуемой конструкции), переданная с помощью связующего чувствительному элементу, приводит к изменению его электрического сопротивления, функционально зависящего от деформации вдоль главной оси тензорезистора, начального сопротивления R , коэффициентов передачи деформации $K_{пер}$ и её преобразования $K_{пр}$ [4,5,6]:

$$\Delta R_{\varepsilon} = f(R, \varepsilon, K_{пер}, K_{пр}). \quad 1)$$

В тензорезисторе, установленном на упругом элементе, протекает ряд процессов, приводящих к изменению его сопротивления и зависящих от свойств конструктивных элементов тензорезистора и условий эксперимента. В связи с этим, тензорезистор имеет комплекс метрологических характеристик, каждая из которых отражает одно из свойств тензорезистора.

Метрологические характеристики тензорезистора, входящие в комплекс, разделены на следующие группы, связанные с параметрами:

– с измеряемой деформацией вдоль главной оси тензорезистора, такие как чувствительность K и функция преобразования информации $\xi(\varepsilon)$ при нормальной температуре;

- с чувствительностью тензорезистора к деформации, перпендикулярной главной оси тензорезистора, – поперечная чувствительность K_{\perp} ;
- с измеряемой деформацией и временем её воздействия – ползучесть Π и механический гистерезис Γ ;
- с влиянием температуры (функция влияния температуры на чувствительность Φ_t , температурная характеристика сопротивления ξ_t , ползучесть при максимальной температуре $\Pi_{t_{\max}}$) и времени (дрейф выходного сигнала D_t).

Функция преобразования деформаций имеет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{1}{K\Phi_t} \left[\xi - \sum_1^n \pm \xi_i \right], \quad 2)$$

где ε – измеряемая деформация; ξ – измеряемый сигнал тензорезистора, зависящий от измеряемой деформации и действия неинформативных параметров; ξ_i – значения выходных сигналов от характеристик ползучести, гистерезиса, температурной характеристики сопротивления, дрейфа, вносимые в формулу в виде детерминированных поправок, число и знак которых зависят от конкретных влияющих величин и схемы измерения деформаций.

Преобразование измеряемой деформации в изменение электрического сопротивления происходит в чувствительном элементе тензорезистора вследствие наличия тензорезистивного эффекта в проводниковых и полупроводниковых материалах. Электрическое сопротивление тела изменяется при деформации как за счёт изменения его геометрических размеров, так и за счёт изменения удельного сопротивления материала. В случае одноосного напряжения (например, растяжения) относительное изменение сопротивления $\Delta R/R$ элемента длиной l с удельным сопротивлением ρ и коэффициентом Пуассона μ определяется следующим выражением:

$$\Delta R/R = (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho}, \quad 3)$$

В выражении (3) первый член суммы определяет изменение геометрии тела, а второй – изменение удельного электрического сопротивления. Приращение сопротивления за счёт изменения удельного сопротивления зависит от свойств и структуры материала, причем в ряде случаев может в несколько десятков и сотен раз превышать приращение за счёт геометрии.

Для измерения массы сырья и продукции в весоконтрольном модуле мехатронного комплекса выбран способ тензометрирования, основанный на измерении деформации изгибного упругого элемента, воспринимающего исследуемую силу тяжести. При этом

материал воспринимающего упругого элемента должен в диапазоне измерения силы работать в пределах пропорциональности, чтобы деформация была линейно связана с определяемой силой. Рабочее сечение воспринимающего упругого элемента должно быть таким, чтобы напряжение в нем при максимальной измеряемой силе составляли не менее 0,05-0,06 ГПа (для стали), поскольку при меньших напряжениях чувствительность этого способа измерений сил недостаточна.

Эффективность работы тензодатчика в весоконтрольном модуле мехатронного комплекса в значительной мере определяется правильным выбором конструкции силоприёмного узла. От этого зависит чувствительность тензодатчика к механическим помехам в силовом входе упругого элемента. Нежелательные помехи создаются системой механических влияющих величин, а точнее – поперечными по отношению к измеряемому усилию силами, изгибающими и крутящими моментами, вызывающие в упругом элементе поля паразитных напряжений и деформаций, влияющих на коэффициент передачи тензодатчика.

Для весоконтрольного модуля мехатронного комплекса выбран одноточечный тензодатчик, включающий изгибной упругий элемент в виде одиночной консольной балки с прямоугольным сечением, условная схема которого приведена на рис. 1. На балке с одной стороны в направлении продольной оси наклеены активные тензорезисторы, покрытые защитным слоем полимерного эластичного материала.

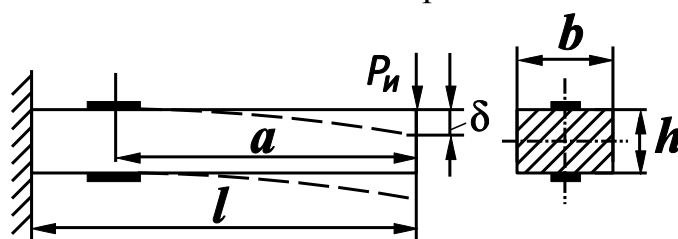


Рис. 1. Изгибной упругий элемент тензодатчика

К преимуществам упругого элемента в виде одиночной консольно-защемленной балки отнесены: простота расчёта и изготовления, небольшие габаритные размеры; удобство встраивания в весоконтрольный модуль. К недостаткам таких упругих элементов отнесены: нелинейность характеристики преобразования, связанную с уменьшением плеча измеряемой силы из-за прогиба балки при нагружении; слабую помехозащищённость балки от механических воздействий и крутящих моментов, перпендикулярных продольной оси; наличие нескомпенсированного реактивного момента в заделке балки.

Коэффициент преобразования для упругого элемента (рис. 1) определяется следующим выражением [4,5,6]:

$$K_{nc} = 6 \cdot 10^3 \frac{na}{bh^2 \cdot E}, \quad 4)$$

где n – число активных плеч моста, установленных на преобразователе; E – модуль упругости, ГПа.

Деформация (прогиб) упругого элемента (рис. 1) определяется следующим выражением:

$$\delta = \frac{4 l^3 P}{10^3 bh^3 E}, \quad 5)$$

где P – сила, Н; E – модуль упругости, ГПа.

В консольной балке равного сечения деформации по длине тензорезистора непостоянны, величина средней деформации тензорезистора зависит от точности его расположения относительно заделки или приложения силы. Для достижения равномерности напряжённого состояния в балке и устранения поперечных сил и моментов, вызывающие её деформацию, в балке выполнены концентраторы напряжений в виде круглых отверстий. В такой балке возрастает момент сопротивления изгибу по продольной оси, повышается жесткость и чувствительность.

Размещение тензорезисторов на упругих элементах тензорезисторных преобразователей должно обеспечивать получение максимального выходного сигнала и компенсацию механических помех. Активные тензорезисторы размещаются в местах наибольших напряжений, симметрично относительно оси чувствительного элемента. Не рекомендуется размещать тензорезисторы в зонах краевых эффектов, например, у мест заделки изгибаемых упругих элементов, хотя там имеют место максимальные деформации.

В качестве основной измерительной схемы включения тензорезисторов в весоконтрольном модуле выбрана мостовая схема. При этом эффективность компенсации паразитных деформаций зависит от того, насколько близки по абсолютной величине исключаемые деформации, воспринимаемые взаимокompенсирующими тензорезисторами. Эффективность температурной компенсации зависит от того, насколько точно удастся обеспечить равенство температурных деформаций, воспринимаемых активными и компенсационными тензорезисторами. Следует отметить, что совершенствуются и стали доступными самотермокомпенсированные тензорезисторы.

Вследствие технологического несовершенства при механической обработке упругого элемента, неточности ориентации тензорезисторов при наклейке и заливке защитным полимером, разброса значений их чувствительности и сопротивлений, перекосов при сборке и юстировке тензодатчика полной компенсации не происходит.

В связи с вышеизложенным, целесообразной признана схема тензометрического моста с тензорезистором в каждом плече (рис. 2). Такое включение тензорезисторов используется для термокомпенсации и исключения паразитных деформаций упругого элемента [4, 5, 6].

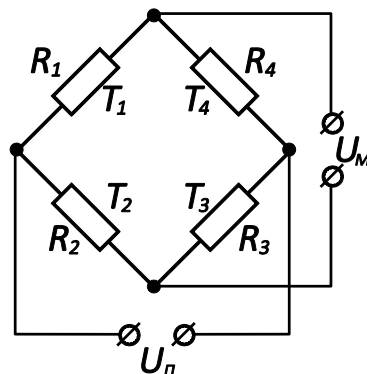


Рис. 2. Схема тензометрического моста

Поскольку чувствительный элемент тензодатчика в виде консольной балки испытывает деформацию изгиба, рассмотрены три следующих варианта включения тензорезисторов [4, 5, 6].

Вариант 1. Один активный и один компенсационный тензорезисторы. При измерении деформации изгиба возможно использовать один активный тензорезистор, расположив его с одной стороны балки (рис. 3). Активный T_1 и компенсационный T_2 тензорезисторы включены по схеме, приведенной на рис. 2. Выходное напряжение моста приближенно определяется при этом следующим выражением:

$$U_M \approx \frac{U_{\Pi} \Delta R}{4R}, \tag{6}$$

где U_{Π} – напряжение питания моста; ΔR – изменение сопротивления активного тензорезистора при деформировании балки; R – сопротивление каждого тензорезистора.

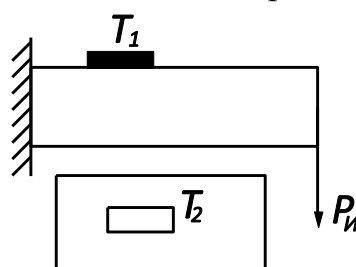


Рис. 3. Схема установки активного и один компенсационного тензорезисторов

Вариант 2. Два активных тензорезистора. При измерении деформации изгиба тензорезисторы размещаются с двух сторон балки один против другого (рис. 4).

Активные тензорезисторы включены по схеме, приведенной на рис. 2. Выходное напряжение моста приблизительно определяется при этом следующим выражением:

$$U_M \approx \frac{U_{II} \Delta R}{2R}, \quad 7)$$

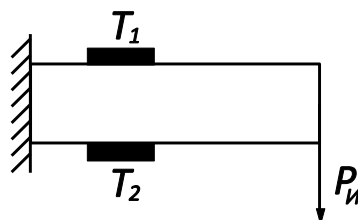


Рис. 4. Схема установки двух активных тензорезисторов

Вариант 3. Четыре активных тензорезистора. При измерении деформации изгиба тензорезисторы размещаются с одной стороны балки (рис. 5) и включаются по схеме, приведенной на рис. 2. В этом случае они выполняют роль как активных, так и компенсационных. Выходное напряжение моста приблизительно определяется при этом следующим выражением:

$$U_M \approx \frac{U_{II} \Delta R}{R}, \quad 8)$$

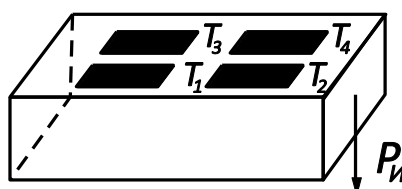


Рис. 5. Схема установки четырех активных тензорезисторов

В результате проведенного анализа выбран тензодатчик, в котором тензорезисторы установлены в соответствии с вышеуказанным третьим вариантом. Электрическая принципиальная схема тензометрического датчика силы приведена на рис. 6, где приняты следующие обозначения: $R_1 - R_4$ – тензорезисторы плеч моста; $R_{\delta}, R_{ЧВ}$ – резисторы регулировки начального коэффициента передачи и рабочего коэффициента передачи; R_{T1}, R_{T2} – резисторы регулировки температурного изменения начального коэффициента передачи и рабочего коэффициента передачи; R_B, R_{III} – резисторы регулировки выходного и входного сопротивления.

Получено формализованное описание электрических параметров указанного тензометрического датчика силы. В тензометрический мост (рис. 6) включены четыре тензорезистора и дополнительные резисторы, предназначенные для выполнения

различных регулировок. Предположим, что температурный коэффициент сопротивления (ТКС) R_{t1} и R_{t2} существенно больше ТКС других резисторов схемы.

Коэффициент передачи по напряжению мостовой схемы тензометрического датчика силы определяется следующим выражением [4,5,6]:

$$k = \left[\frac{1}{4} \left(\sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\psi R_i \pm \frac{R_\delta \pm R_{t1}}{R_0}}{R_0} \right) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\Delta R_i}{R_0} \right] \cdot \left[1 - \frac{R_{qB} + R_{t2}}{R_0} \right], \quad (9)$$

где $\Delta R_i = R_i S_i \delta_i$ – приращение сопротивления R_i плеч моста, вызванное деформацией δ_i ; S_i – тензочувствительность; ψR_i – отклонение сопротивления плеч моста от номинального значения R_0 . Знаки \pm в выражении (9) означают, что резисторы R_δ , R_{t1} определяются при регулировке моста.

Разложим выражение (9) на четыре следующих составляющих с различным физическим смыслом: начальный коэффициент передачи моста (НКП) при нормальных условиях k_0 и его температурное изменение $\Delta t[k_0]$; рабочий коэффициент передачи моста (РКП) при нормальных условиях Δk и его температурное изменение $\Delta t[\Delta k]$:

$$k = k_0 + \Delta t[k_0] + \Delta k + \Delta t[\Delta k], \quad (10)$$

$$k_0 = \frac{1}{4} \left[\sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\psi R_i \pm \frac{R_\delta \pm R_{0t1}}{R_0}}{R_0} \right] \cdot \left[1 - \frac{R_{qB} + R_{t2}}{R_0} \right], \quad (11)$$

$$\Delta t[k_0] = \frac{1}{4} \left[\left(\sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \beta_i \pm \frac{R_{0t1}}{R_0} \beta_{t1} \right) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\Delta R_i}{R_0} \right] \cdot \left[1 - \frac{R_{qB} + R_{t2}}{R_0} \right], \quad (12)$$

$$\Delta k = \Delta k_M \left[1 - \frac{R_{qB} + R_{t2}}{R_0} \right], \quad (13)$$

$$\Delta t[\Delta k] = \Delta k \left[a - \frac{R_{0t2}}{R_0 - R_{qB} - R_{0t2}} \right] \Delta t, \quad (14)$$

$$\Delta k_M = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} S_i \psi_i. \quad (15)$$

В выражениях (11) – (15) обозначены: Δk_M – рабочий коэффициент передачи моста при равных нулю значениях сопротивления регулировочных резисторов R_{qB} и R_{t2} ; Δt – отклонение фактической температуры тензометрического датчика силы от температуры при нормальных условиях; a – температурный коэффициент модуля Юнга для упругого

элемента изгиба; R_{0r1} , R_{0r2} – сопротивления соответствующих резисторов при нормальных условиях; β_i – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) соответствующего медного или никелевого резистора.

Входное и выходное сопротивления мостовой схемы (рис. 6) R_{BX} и $R_{ВЫХ}$ определяются следующими выражениями [4,5,6]:

$$R_{BX} = \frac{R_{III} (R_0 \pm \psi R_i + m R_0)}{R_{III} + R_0 \pm \psi R_i + m R_0}; \tag{16}$$

$$R_{ВЫХ} = R_0 \pm \psi R_i + R_B; \tag{17}$$

$$m = \frac{R_{ЧВ} + R_{t2}}{R_0}. \tag{18}$$

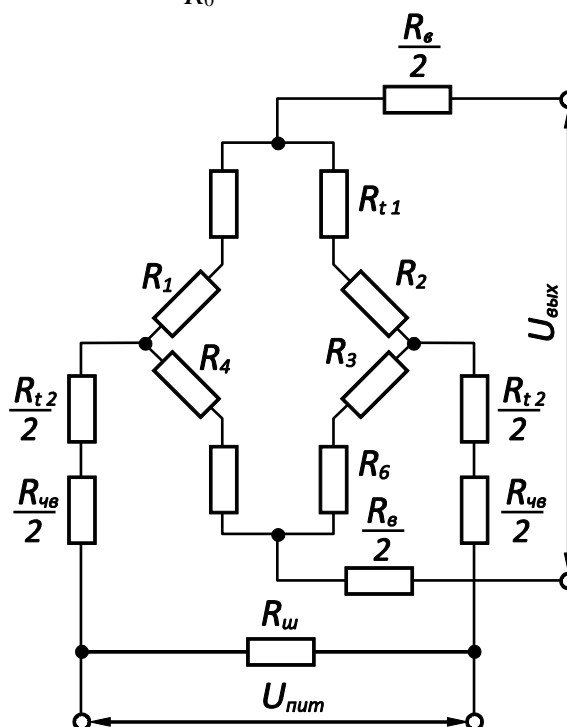


Рис. 6. Мостовая схема тензодатчика

Существенное влияние на эффективность работы весоконтрольного модуля оказывает вид и конструкция силопередающего устройства. Погрешностью силопередающего устройства считается неполная передача нагрузки и несоосное нагружение тензодатчика.

Неполная передача нагрузки обусловлена наложением дополнительных связей (сил трения, упругих деформаций) на вертикальные перемещения грузоприёмного устройства, а также наклонной установкой тензодатчика. Устранение такой погрешности возможно за счёт рациональности конструкции грузоприёмного устройства.

Несоосность нагружения тензодатчика вызывает значительные дополнительные погрешности в работу тензодатчика и искажает информацию об измеряемой величине. Причинами такой погрешности определены следующие факторы: деформация грузоприёмного устройства под нагрузкой и его тепловая деформация; наклонное положение оси симметрии тензодатчика (линии наибольшей чувствительности) относительно линии действия измеряемой силы; изменение положения оси симметрии тензодатчика при колебании окружающей температуры, ветрового напора, движения груза по конвейеру, смещения его центра тяжести.

Для выбранного тензодатчика изгиба требуется строго вертикальная передача нагрузки на упругий элемент. Несоосность нагружения характеризуется эксцентриситетом и действием поперечной силы, которая вносит основной вклад в погрешность передачи нагрузки. У тензодатчика возможно изменение плеча измеряемой силы, что приводит к уменьшению измеряемой деформации. Горизонтальная (поперечная) составляющая силы вызывает появление на силовом входе тензодатчика крутящих и изгибающих моментов, вследствие чего появляются паразитные деформации упругого элемента.

Поскольку при конструировании тензодатчика силы не удастся полностью устранить влияние паразитных компонентов измеряемой силы, то функции фильтра механических помех возлагаются на силопередающее устройство. Его назначение заключается в обеспечении следующих условий:

- равномерное распределение нагрузки между тензодатчиками силы, на которые опирается грузоприёмное устройство;
- осевое приложение нагрузки к тензодатчику при отклонениях грузоприёмного устройства;
- уменьшение воздействия на тензодатчик поперечных сил и моментов, возникающих в результате деформации грузоприёмного устройства или изменения положения груза;
- уменьшение воздействия ударных нагрузок.

В силопередающем устройстве точка приложения силы может находиться на силовоспринимающем выступе тензодатчика, либо нагрузка передается через силопередающий элемент – стержень, шток, сферическое тело, плиту. По принципу действия силопередающие устройства разделены на три следующих типа:

- устройства качающегося типа;
- устройства с опорами на телах качения;
- устройства с плоскопараллельным перемещением силопередающего элемента.

В результате проведенного анализа, для весоконтрольного модуля мехатронного комплекса выбрано устройство с плоскопараллельным перемещением силопередающего элемента.

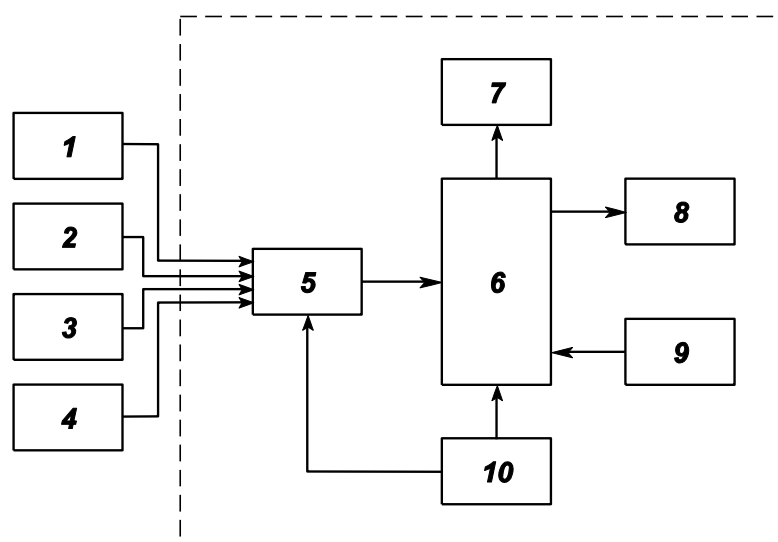
Цифровое измерительно-управляющее устройство (рис. 7) включает следующие основные блоки: предварительный усилитель-преобразователь, микроЭВМ, цифровое отсчётное устройство, дисплей, клавиатура, блок питания.

Назначение предварительного усилителя-преобразователя заключается в коммутации сигналов измерения и усилении выходного сигнала тензометрического датчика силы. Разработанный прибор построен на интегральной схеме быстродействующего операционного усилителя и допускает подключение до четырёх тензодатчиков силы.

Цифровое отсчётное устройство установлено над конвейером и предназначено для индикации измеренного веса и основных режимов работы. Устройство выполнено в виде цифрового табло с крупными цифрами на основе светодиодных индикаторов.

Специализированная микроЭВМ построена на основе микропроцессора Microchip PIC32MX795F512. Указанный 32-разрядный микропроцессор, выполненный в планарном 100-выводном корпусе TQFP, работает с частотой 80 МГц, имеет перезаписываемую постоянную память объёмом 512 кб и статическую оперативную память объёмом 128 кб. Микропроцессор содержит встроенный контроллер прямого доступа к памяти (ПДП). Как показал проведенный анализ, быстродействие выбранного микропроцессора обеспечивает работу весоконтрольного модуля в реальном масштабе времени, учитывая высокоскоростной обмен информацией со всеми периферийными устройствами и вышестоящей управляющей ЭВМ мехатронного комплекса порционирования пищевых продуктов.

Электропитание микроЭВМ обеспечивается внешним блоком питания с выходным напряжением 5В и встроенным литий-ионным полимерным аккумулятором. Внешний блок питания также обеспечивает работу предварительного усилителя-преобразователя и тензометрических датчиков силы. Для электропитания микроЭВМ и тензодатчиков выбрано постоянное напряжение, поскольку этот вид напряжения обладает рядом следующих преимуществ: простота поверки с помощью стандартных калибраторов; относительная простота реализации шестипроводной линии связи; относительная простота схемной реализации стабильного устройства питания; отсутствие необходимости компенсации реактивных составляющих линии связи.



1-4 – тензодатчики; 5 – предварительный усилитель-преобразователь; 6 – микроЭВМ; 7 – цифровое отсчётное устройство; 8 – дисплей оператора; 9 – клавиатура; 10 – блок питания.

Рис. 7. Структурная схема цифрового измерительно-управляющего устройства весоконтрольного модуля

В состав микроЭВМ включены следующие блоки:

- 10–разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- микропроцессор;
- внешнее запоминающее устройство (карта microSD);
- часы реального времени;
- блок масштабирования;
- блок формирования аналоговых и цифровых выходов;
- блок компенсации тарной нагрузки;
- блок допускового контроля;
- блок компенсации погрешностей;
- блок контроля нуля;
- блок контроля перегрузки;
- блок контроля работоспособности;
- блок управления периферийным оборудованием;
- блок автоматического регулирования массы дозы при весовом дозировании;

Блок масштабирования изменяет дискретность отсчёта АЦП (цену младшего разряда) путём умножения результата преобразования на один из постоянных коэффициентов (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, ... , 512).

Блок формирования аналоговых и цифровых выходов предназначен для организации обмена информации с различными внешними устройствами. Блок включает интерфейсы USB, SPI, I²C, RS-232C, VGA, CAN, Ethernet, Audio, Composite Video, PS/2.

Также блок содержит 20 универсальных цифровых выходов, работа которых возможна в следующих режимах: релейном и транзисторном с открытым коллектором.

Блок компенсации тарной нагрузки расширяет функциональные возможности весоконтрольного модуля, что позволяет определять не только массу брутто, но и массу нетто взвешиваемых грузов. При этом компенсация тарной нагрузки выполняется по выбору оператора вручную или автоматически.

Блок допускового контроля позволяет автоматически контролировать соответствие измеряемого веса заданному полю допуска или её положение относительно контрольной границы.

Блок компенсации погрешностей осуществляет компенсацию аддитивной, мультипликативной и нелинейной составляющих погрешности измерения веса. Блок включает алгоритм автоматической установки нуля. Для настройки алгоритмов компенсации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности требуются образцовые грузы.

Блок контроля нуля контролирует положение нулевой точки весоконтрольного модуля относительно заранее заданных границ. Блок контроля перегрузки повышает эксплуатационную надёжность весоконтрольного модуля, обеспечивает работу световой и звуковой сигнализации при перегрузке. Блок контроля работоспособности выполняет проверку исправности отдельных устройств и весоконтрольного модуля в целом.

Блок управления периферийным оборудованием осуществляет обмен информацией с периферийными устройствами – принтером, дисплеем, клавиатурой, мышью, сетевым коммутатором.

Блок автоматического регулирования массы дозы включает алгоритмы статистического анализатора и регулятора, а также алгоритм управления исполнительным устройством. Указанный блок позволяет встраивать весоконтрольный модуль в технологические линии с автоматическим весовым дозированием. Наличие в указанном блоке алгоритмов статистического анализатора и эстиматора, а также установка весоконтрольных модулей в начале и конце технологической цепочки обеспечивают возможность адаптивного управления технологическими процессами пищевых производств.

Метрологические характеристики весоконтрольного модуля в значительной мере определены принципом работы и параметрами блока АЦП. В указанном блоке непрерывный измерительный сигнал с предварительного усилителя-преобразователя автоматически преобразуется в дискретную форму и подвергается цифровому кодированию.

В процессе аналого-цифрового преобразования в микроЭВМ выполняются три следующие операции: дискретизация, квантование, кодирование. Под дискретизацией понимается преобразование непрерывной во времени функции в функцию дискретного

аргумента, в результате чего непрерывная функция заменяется совокупностью мгновенных значений. Квантованием является дискретизация непрерывной функции по её значениям. При этом диапазон возможных изменений функции разбивается на несколько шагов квантования, которые могут быть как постоянными, так и переменными. Цифровое кодирование заключается в получении числового эквивалента квантованной величины в виде комбинации цифр (двоичные и двоично-десятичные коды).

При выборе типа АЦП для весоконтрольного модуля рассмотрены преобразователи последовательного приближения, интегрирующие и частотные. АЦП оценивались по критериям чувствительности, разрешающей способности и быстродействию.

Достоинствами АЦП последовательного приближения являются высокое быстродействие, малая динамическая погрешность, возможность непосредственного преобразования сигналов переменного тока. Недостатками таких АЦП являются невысокая помехостойкость, а также сложность обеспечения долговременной стабильности преобразования. Вместе с тем, помехостойкость может быть существенно улучшена за счёт аналоговой и цифровой фильтрации.

Достоинствами интегрирующих АЦП являются высокая чувствительность, линейность преобразований, помехостойкость, простота схемной реализации. Недостатками таких АЦП являются большая динамическая погрешность, невысокое быстродействие.

Применение частотных АЦП существенно ограничено зависимостью чувствительности и разрешающей способности от частоты внутреннего генератора. При увеличении частоты возникают дополнительные погрешности, и затрудняется обеспечение линейности преобразования.

С учётом вышеизложенного, в микроЭВМ весоконтрольного модуля использован 10-разрядный АЦП с входным мультиплексором. Базовыми элементами АЦП являются регистр последовательного приближения (РПП), компаратор, внутренний цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). В начале цикла преобразования все выходы РПП устанавливаются в логический "0", за исключением первого (старшего) разряда. На выходе внутреннего ЦАП, включённого в цепь обратной связи, формируется сигнал, значение которого равно половине входного диапазона АЦП. Выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе ЦАП и измеряемым входным напряжением [7, 8, 9].

АЦП выполняет преобразования в командном режиме. После подачи микропроцессором команды "начало преобразования" устройство выборки-хранения устанавливается в режим хранения, а все разряды регистра РПП сбрасываются в "0", кроме старшего значащего разряда, который устанавливается в "1". Выходной сигнал РПП подается на внутренний ЦАП обратной связи. Если выходной сигнал ЦАП больше,

чем аналоговый входной сигнал, то старший разряд РПП сбрасывается, иначе он остается установленным. Далее следующий старший значащий разряд устанавливается в логическую "1". Если сигнал на выходе ЦАП больше, чем аналоговый входной сигнал, старший разряд РПП сбрасывается, иначе бит остается установленным. Описанный процесс двоичного поиска поочередно повторяется для каждого разряда. Когда все разряды РПП, в соответствии с входным сигналом, будут установлены в логические "0" или "1", содержимое регистра последовательного приближения будет соответствовать значению аналогового входного сигнала, при этом преобразование завершится. Окончание преобразования индицируется для микропроцессора сигналами "конец преобразования", "данные выработаны" или "занят".

При работе весоконтрольного модуля в составе мехатронного комплекса существенное влияние на точность измерений оказывают помехи различных видов. К таким помехам отнесены внутренние, внешние негармонические помехи, помехи общего вида и помехи нормального вида. Как показывает практика, аддитивные помехи преобладают над мультипликативными.

Внутренние флуктуационные помехи обусловлены термо-ЭДС монтажных соединений, шумами электронных элементов и узлов, внутренними наводками от цепей переменного напряжения через паразитные связи на цепи постоянного тока. Внешними помехами являются сетевые негармонические помехи, возникающие из-за перепадов напряжения питающей электросети, а также помехи в линиях связи микроЭВМ и периферийного оборудования. Сильные помехи такого вида могут привести к нарушению работоспособности весоконтрольного модуля и повреждению электронных устройств.

Помехи общего вида обусловлены наводками на длинную линию связи – цепь, соединяющую тензодатчики, предварительный усилитель-преобразователь и микроЭВМ, и вызваны гармониками питающего сетевого напряжения, наводками от электрических и магнитных полей, паразитными колебаниями в тензометрическом мосте.

Основной вклад в искажение измеряемого сигнала вносят помехи нормального вида, которые возникают во входной цепи измерительного устройства и являются аддитивными к полезному сигналу. В спектре таких помех преобладающими являются гармоники сетевой частоты. Уровень помех нормального вида снижается за счёт рационального конструирования грузоприёмного и силопередающего устройств, а также путём правильной прокладки и экранирования электрических кабелей.

Наряду с вышеизложенным, для снижения влияния помех нормального вида применяются следующие методы: противофазная компенсация помехи; помехостойкая дискретизация; аналоговая и цифровая фильтрация. При реализации помехостойкой дискретизации используются устройства фазовой автоматической подстройки частоты

(ФАПЧ) относительно частоты питающей сети, а также устройства весового интегрирования.

При разработке весоконтрольного модуля применены более доступные методы аналоговой и цифровой фильтрации. Аналоговым фильтром является звено, динамические характеристики которого описываются линейным дифференциальным уравнением. Преимуществом аналоговых фильтров является простота схемной реализации. Недостатком является большая длительность установления выходного сигнала. В измерительной цепи весоконтрольного модуля целесообразно использовать аналоговый фильтр нижних частот с регулировкой частоты среза АЧХ в пределах 0,1 – 5 Гц.

Цифровым рекурсивным фильтром (ЦФ) является устройство, реализующее линейную комбинацию равностоящих отсчётов $U_{BX(n-k)}$ входного сигнала $U_{BX}(t)$, а также вычисленных значений $U_{ВЫХ(n-k)}$ на выходе [7,8,9]:

$$U_{ВЫХ} = \sum_{k=0}^{\infty} s_k U_{BX(n-k)} + \sum_{k=0}^{\infty} u_k U_{ВЫХ(n-k)}, \quad (19)$$

где s_k, u_k – постоянные величины. При $u_k = 0$ фильтр является нерекурсивным.

Для устранения помех в весоконтрольном модуле предпочтение отдано цифровому фильтру, поскольку по сравнению с аналоговым фильтром он не имеет экспоненциальных спадов в ответ на единичный скачок входного сигнала и время установления у него существенно меньше. При цифровом усреднении сигнала существенно ослаблено влияние сетевых помех на основной частоте, а также её второй, третьей и всех нечётных гармоник высшего порядка. Четвертая и высшие четные гармоники не устраняются, но частично фильтруются.

В соответствии с рекомендациями [7,8,9], для подавления низкочастотных полосовых помех, вызванных колебаниями грузоприёмного устройства при взвешивании, выбран цифровой фильтр со следующей весовой функцией:

$$g(t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} s_k \cos \frac{k2\pi}{t_H} t, \quad (20)$$

где t_H – время интегрирования.

АЧХ весовой функции (20) имеет следующий вид [7,8]:

$$|W(m)| = \frac{\sin \pi n}{\pi n} \left[1 + \sum_{k=1}^{\infty} s_k \frac{m^2}{m^2 - n^2} \right], \quad (21)$$

где $m = \frac{\omega t_H}{2\pi}$ – время интегрирования; ω – частота входного сигнала.

Проведённый в [7,8,9] анализ показывает, что для эффективного подавления помех при $m \geq 2$ (при времени интегрирования, не меньшем, чем два периода помехи) возможно ограничиться первой гармоникой весовой функции:

$$g(t) = 1 + s_1 \cos \frac{2\pi}{t_0} t, \quad (22)$$

$$|W(m)| = \frac{\sin \pi m}{\pi m} \left[1 + s_1 \frac{m^2}{m^2 - 1} \right], \quad (23)$$

При этом подавление помех происходит преимущественно за два периода действия фильтра. Коэффициент подавления нормальных помех составляет приблизительно 43 дБ. Выходной сигнал цифрового фильтра при кусочной ступенчатой аппроксимации весовой функции определяется следующими выражениями [7,8,9]:

$$U_{ВЫХ} = \frac{1}{t_H} \sum_{i=1}^n h_i \int_{\Delta\tau(i-1)}^{\Delta\tau(i)} U_{ВХ} = (t) dt, \quad (24)$$

где i – номер шага аппроксимации; где $\Delta\tau = \frac{t_H}{n}$; n – число шагов аппроксимации.

С учётом вышеизложенного, применение микроЭВМ в весоконтрольном модуле мехатронного комплекса решает следующие задачи управления:

- коммутация каналов измерения;
- выбор диапазона измерения;
- масштабирование;
- управление циклом аналого-цифрового преобразования;
- цифровая фильтрация результатов измерений;
- автоматическая компенсация тарной нагрузки.

С целью улучшения метрологических характеристик весоконтрольного модуля микроЭВМ решает следующие задачи:

- периодическая автоматическая калибровка (компенсация аддитивной и мультипликативной погрешностей);
- автоматическая непрерывная компенсация аддитивной погрешности модуля;
- линеаризация характеристик тензодатчиков.

С целью повышения функциональной надёжности весоконтрольного модуля микроЭВМ решает следующие задачи:

- контроль перегрузки и недогрузки модуля;
- контроль нуля модуля;

- контроль успокоения грузоприёмного устройства;
- контроль функционирования электронных устройств модуля.

С целью обработки результатов измерений микроЭВМ решает следующие задачи:

- разбраковка взвешиваемых грузов на группы;
- суммирование результатов отдельных измерений;
- счёт последовательно взвешиваемых грузов;
- вычисление средних значений результатов в отдельных группах измерений.

С целью управления индикацией и регистрацией результатов измерений микроЭВМ решает следующие задачи:

- управление цифровым отсчётным устройством и выносными индикаторными табло;
- управление печатающими устройствами;
- управление дисплеем.

С целью решения задач весового дозирования микроЭВМ решает следующие задачи:

- хранение рецептов смесей;
- выбор последовательности дозирования отдельных компонентов в один весовой бункер;
- управление процессом дозирования по заданному алгоритму;
- управление группой дозаторов;
- суммирование доз компонентов для определения массы смеси;
- вычисление общей массы компонентов и смесей, обработанных за смену;
- вычисление ошибок дозы определённого компонента или смеси;
- учёт числа дозировок отдельных компонентов и смесей.

Разработанный весоконтрольный модуль мехатронного комплекса (рис. 8) предназначен для автоматического контроля веса сырья и готовой продукции. Модуль работает в непрерывном режиме, контролирует вес порций продукта и упаковок с готовым продуктом, а также выполняет отбраковку продукции, не соответствующей установленному весовому допуску. Для отображения технологических параметров установлен цветной дисплей. Скорость конвейера плавно регулируется с пульта управления. Модуль позволяет вести учёт готовой продукции как по весу, так и по количеству, при этом статистические данные выводятся на принтер и в локальную сеть. При подключении модуля к объёмному дозатору или набивочной машине имеется техническая возможность автоматически регулировать объём дозы продукта.

Весоконтрольный модуль (рис. 8) состоит из следующих основных элементов: корпуса 1; несущей балки 2; подающего конвейера 3; электродвигателя 4; весового конвейера 5; тензодатчика 6; силопередающего устройства 7; оптического датчика 8; предварительного усилителя-преобразователя 9; разгрузочного конвейера 10;

клавиатуры 11; дисплея 12; сигнальной лампы 13; блока частотного управления электроприводом 14; микроЭВМ 15; блока питания 16; блока интерфейсов 17; регулируемых опор 18.

Весоконтрольный модуль работает следующим образом. Сырье или упаковка с готовым продуктом 19 поступает через подающий конвейер 3 на весовой конвейер 5. Конвейеры 3, 5, 10 имеют лотки для предотвращения падения груза. Во время движения продукта 19 по весовой ленте микроЭВМ 15 измеряет при помощи тензодатчика 6 и предварительного усилителя-преобразователя 9 мгновенные значения веса. При проходе продукта 19 через оптический датчик 8 в конце весового конвейера 5 цикл взвешивания завершается. Измеренные значения веса обрабатываются микроЭВМ 15 с целью получения и индикации веса продукта на дисплее 12. Электродвигатели конвейеров управляются при помощи блока частотного управления 14. При помощи блока интерфейсов 17 микроЭВМ 15 передает информацию на исполнительные устройства и в локальную сеть. Наличие электропривода с частотным управлением и микроЭВМ позволяет реализовать как динамический, так и статический режимы взвешивания.

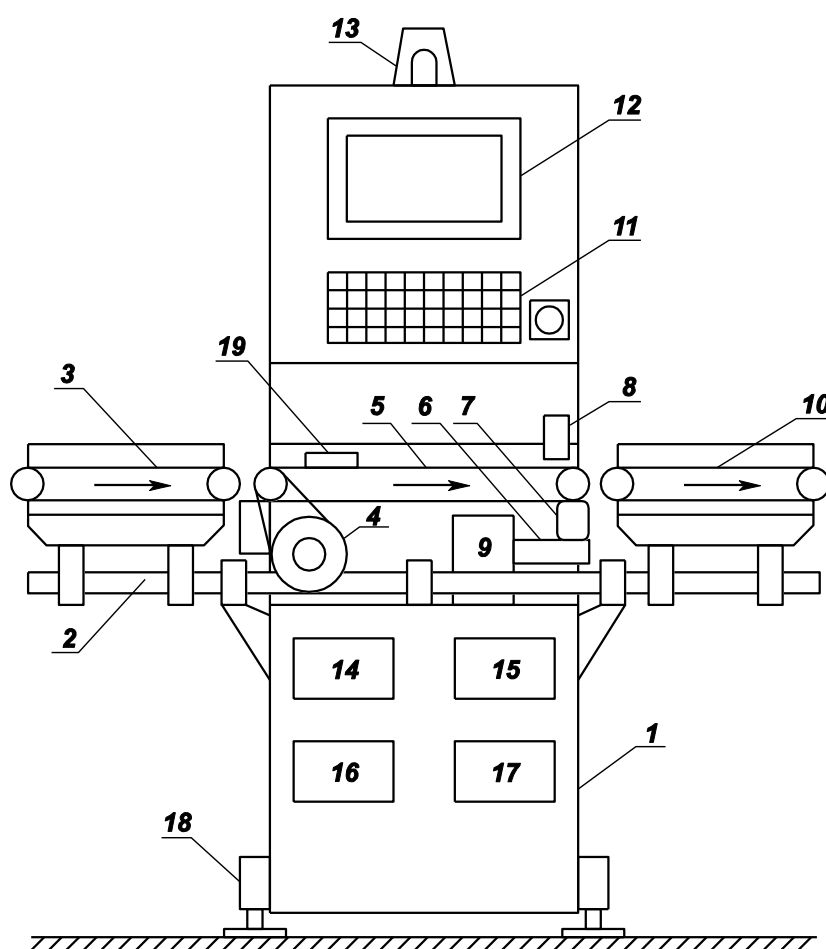


Рис. 8. Общий вид весоконтрольного модуля

Список литературы

1. Фатыхов Ю.А. Мехатроника в оборудовании для разделывания и филетирования рыбы. Ресурсосберегающее адаптивное управление процессом производства рыбного филе на основе мехатроники: монография / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Саарбрюкен: Изд-во LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 264 с.
2. Фатыхов Ю.А. Разработка мехатронного манипулятора для укладки консервной тары / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев, А.З. Мацонко, К.В. Бабарыкин // Рыбное хозяйство. – М., 2013. – № 2. – С. 111-113.
3. Фатыхов Ю.А. Мехатроника в рыбообработочном оборудовании: монография / Ю.А. Фатыхов, О.В. Агеев. – Калининград, ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008. – 279 с.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден. – М: Техносфера, 2006. – 592 с.
5. Макаров Р.А. Тензометрия в машиностроении / Р.А. Макаров, Л.Б. Ренский. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
6. Совлуков А.С. Датчики: справочное пособие / А.С. Совлуков [и др.] – М.: Техносфера, 2012. – 624 с.
7. Смит С. Цифровая обработка сигналов / С. Смит. – М.: Додэка XXI, 2008. – 720 с.
8. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing / R.G. Lyons – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 984 с.
9. Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications/ J.G. Proakis, D.G. Manolakis – New Jersey: Prentice Hall, 2006. – 1004 с.

References

1. Fatyhov Ju.A. Mechatronics in the equipment for a razdelyvaniye and a filetirovaniye of fish. Resource-saving adaptive management of process of production of fish fillet on the basis of mechatronics: monograph / Ju.A. Fatyhov, O.V. Ageev. – Saarbrjuken: Izd-vo LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 264 p.

2. Fatyhov Ju.A. Development of the mekhatronny manipulator for laying of canning container / Ju.A. Fatyhov, O.V. Ageev, A.Z. Maconko, K.V. Babarykin // Rybnoe hozjajstvo. – M., 2013. – № 2. – p. 111-113.

3. Fatyhov Ju.A. Mechatronics in the ryborazdelochny equipment: monograph / Ju.A. Fatyhov, O.V. Ageev. – Kaliningrad, FGOU VPO “KGTU”, 2008. – 279 p.

4. Frajden Dzh. Modern sensors. Reference book / Dzh. Frajden. – М: Tehnosfera, 2006. – 592 p.
5. Makarov R.A. Tenzometriya in mechanical engineering / R.A. Makarov, L.B. Renskij. – М.: Mashinostroenie, 1975. – 288 p.
6. Sovlukov A.S. Sensors: handbook / A.S. Sovlukov [i dr.] – М.: Tehnosfera, 2012. – 624 p.
7. Smit S. Digital processing of signals / S. Smit. – М.: Dodjeka XXI, 2008. – 720 p.
8. Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing / R.G. Lyons – New Jersey: Prentice Hall, 2010. – 984 p.
9. Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications/ J.G. Proakis, D.G. Manolakis – New Jersey: Prentice Hall, 2006. – 1004 p.