

На правах рукописи

Афонин Вячеслав Сергеевич

**Разработка прибора контроля влажности зерновой
продукции на основе многоэлектродных емкостных
преобразователей**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2007

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тищенко Андрей Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Якунин Алексей Григорьевич

кандидат физ. - мат. наук, доцент
Иордан Владимир Иванович

Ведущая организация:

ФНПЦ «Алтай», г. Бийск

Защита диссертации состоится 14 ноября 2007 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.004.06 Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова по адресу:
656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

Автореферат разослан 12 октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., профессор

Пронин С.П.

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность проблемы.

В технологическом процессе переработки зерна в муку одним из основных факторов, влияющим на качественные и количественные показатели, является влажность зерна перед помолотом. Изменение влажности зерна на 0,1% от оптимального значения уменьшает выход муки высшего сорта на 0,8%, первого – 0,5%, второго 1%, что приводит к потере дохода: например, мельница производительностью 100т/сутки терпит убыток в 1 400 000 руб. в год. Поэтому владельцы мельниц заинтересованы в оптимизации процесса переработки зерна с помощью современной техники. Для подготовки зерна к помолу проводится гидротермическая обработка зерна (ГТО), где необходимо измерить влажность зерновой массы и добавить рассчитанное количество воды для получения определенной влажности зерна. По этой причине идет непрерывное развитие технических средств контроля влажности зерна в технологической линии мельниц. Таким образом, создание поточного прибора контроля влажности зерновой продукции является актуальной задачей.

На рынке поточных влагомеров преобладают изделия западных стран, такие как Vibronet(Германия), Asvatron AYFA(Швейцария) и другие. Однако, многие подобные приборы имеют существенный недостаток – снижение точности контроля за счет повышения систематической составляющей погрешности, которое происходит из-за высокой засоряемости датчика вследствие размещения электродов непосредственно в зерновом потоке. Для устранения систематической составляющей погрешности контроля периодически останавливают технологический процесс и производят чистку датчика влажности.

Для создания высокоточного прибора контроля влажности крайне важным является вопрос выбора датчика, его принципов действия, конструкции.

Существует множество методов и средств измерения влажности сыпучего вещества: оптических, СВЧ, кондуктометрических, методов ядерного магнитного резонанса и других. Емкостной метод привлекает к себе внимание относительной простотой реализуемости, малыми габаритами, низкой стоимостью в сочетании с высокими метрологическими характеристиками, широкими возможностями совершенствования. Однако, данный метод имеет ряд недостатков, связанных с влиянием на результат измерения факторов, таких как тангенс угла потерь, плотность, температура и др. Таким образом, при

реализации метода возникает задача устранения или сведения к минимуму погрешностей, связанных с влиянием указанных факторов. Задача может быть решена за счет применения многоэлектродных емкостных первичных преобразователей (ЕПП), у которых электроды крепятся на стенки трубы самотека и не препятствуют зерновому потоку.

Целью работы является разработка поточного прибора контроля влажности зерновой продукции на основе многоэлектродных емкостных преобразователей, обеспечивающих устранение систематической погрешности, вызываемой засоряемостью датчика.

Основные задачи исследования:

1. Формирование набора требований к прибору контроля влажности зерновой продукции, работающего в технологической линии переработки зерна.
2. Исследование основных характеристик емкостных первичных преобразователей, основанных на 2-х, 3-х и 4-х электродных (конденсаторах) системах, и их пригодности для измерения влажности сыпучих продуктов.
3. Разработка метода измерения влажности зерновой массы, функционально связанной с проводимостью ЕПП, содержащего контролируемое вещество.
4. Определение функциональной зависимости характеристик емкостного преобразователя, содержащего контролируемое вещество, от влажности этого вещества.
5. Разработка методов калибровки прибора контроля влажности зерновой продукции в технологической линии переработки зерна.

Научная новизна выполненных исследований и заключается в следующем:

1. Предложена конструкция емкостного преобразователя, обладающая метрологическими преимуществами по сравнению с существующими аналогами.
2. Предложен новый метод уравнивания двухплечевого моста, основанный на учете сдвига фаз между опорным и измерительным сигналами с помощью управляемого фазовращателя.
3. Предложена и аналитически исследована модель, основанная на электрической схеме замещения, учитывающая электрическую связь контролируемого вещества с общей точкой измерительной цепи.

Методика исследований.

При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, которые могли способствовать решению поставленных задач. Теоретические исследования проводились путем построения модели, основанной на электрической схеме замещения, допускающей аналитическое и численное решение. На всех этапах работы производилось сопоставление теоретических и экспериментальных результатов.

Практическая ценность.

Емкостные приборы контроля, построенные на базе многоэлектродных емкостных первичных преобразователей и разработанного метода измерения проводимости датчика, основанного на учете сдвига фаз между опорным и измерительным сигналами, позволяют проводить контроль влажности зерновой продукции в технологической линии переработки зерна с погрешностью 0,5 % по абсолютной величина в диапазоне 10 - 20% влажности.

Разработанный емкостной преобразователь подвержен засорению в меньшей степени, так как не имеет электродов, размещенных внутри зернового потока.

Предложенные приборы контроля влажности могут быть использованы не только для зерновой продукции, но и в случае предварительной настройки и калибровки, для аналогичных сыпучих веществ, таких как песок, грунт и др.

Реализация научно-технических результатов.

В результате проведенных исследований были разработаны и введены в эксплуатацию несколько приборов контроля влажности зерновой продукции, работающие в лабораторных условиях и в технологическом процессе на зерноперерабатывающих предприятиях г.Бийска и г. Барнаула.

На защиту выносятся:

1. Метод уравнивания двухплечего моста, основанный на учете сдвига фаз между опорным и измерительным сигналами, с помощью управляемого фазовращателя
2. Модель, основанная на электрической схеме замещения, учитывающая электрическую связь контролируемого вещества с общей точкой измерительной цепи.

3. Конструкция емкостного преобразователя, включающая в себя основную и дополнительный потенциальные электроды, измерительный и охранный электроды.

Публикации.

По материалам выполненных в диссертации исследований опубликовано 9 печатных работ, из них 1 патент на изобретение и 8 статей.

Апробация работы.

Материалы работы обсуждались на следующих конференциях: восьмая научно-практическая конференция «Современные проблемы техники и технологии пищевых производств» - г.Барнаул, 2005; 7-ая научно-техническая конференция «Измерение, контроль, информатизация» - г.Барнаул, 2006; Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» - Н. Новгород, 2006; 2-ая научно-практическая конференция «Виртуальные и интеллектуальные системы» - Барнаул, 2006.

Личный вклад.

Автору принадлежат основные научные результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 40 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 112 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована ее актуальность, сформулированы цели, задачи и методы исследования, научная и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе приведена общая характеристика проблемы, произведен выбор направления исследований и намечены пути решения основных задач.

Приведены основные характеристики зерна (как сырьевого продукта), контролируемые и измеряемые на зерноперерабатывающих предприятиях. Показана необходимость и важность ГТО зерновой массы перед

помолом. Описан технологический процесс переработки зерна с применением ГТО и существующие приборы поточного типа, организующие автоматическое увлажнение зерна в потоке (например, Vibronet). Описаны методы и средства лабораторных измерений влажности, их достоинства и недостатки.

Приведена классификация видов связи влаги с твердым материалом, предложенная П.А. Ребиндером, основанная на энергии, необходимой для ее разрушения и удаления влаги из материала. Адсорбционная, осмотическая и капиллярно связанная вода по своим свойствам не отличается от не связанной, и может быть удалена с помощью высушивания.

Стандартом не определены единицы измерения влажности материалов. На практике и в научно-технической литературе, чаще всего используют такие величины, как влагосодержание u и влажность вещества W . Обе величины являются относительными и выражаются в безразмерных единицах.

$$u = \frac{P - P_0}{P_0} \cdot 100, \quad (1)$$

$$W = \frac{P - P_0}{P} \cdot 100, \quad (2)$$

где P – вес влажного тела; P_0 – вес абсолютно сухого тела.

Приведен обзор современных методов и средств измерения влажности твердого вещества. Методы разделяются на прямые и косвенные. В основе всех прямых измерений лежит прямой термогравиметрический метод, основанный на измерении веса образца исследуемого материала до его высушивания различными средствами и методами, и после сушки. Прямые методы измерения влажности твердых материалов имеют высокую точность измерения, применяются в качестве стандартизированных методов определяемых ГОСТ. Однако, такие методы имеют ряд недостатков:

- требуется большое количество поверенных приборов и устройств, (лабораторные весы, мельница, секундомер, часы с сигнальным устройством, электроконтактный термометр);
- большие временные затраты на проведение анализа;
- требуются лабораторные условия, невозможно проведение анализов в поле, на производственных участках, станциях отгрузки;
- измеряется влажность не всей массы вещества, а только отдельно взятой пробы, и по ее результату судят о влажности всей партии;

- данный способ является разрушающим, то есть после определения влажности образца его выбрасывают.

В косвенных методах оценка влажности твердых материалов производится по изменению различных его свойств. Приведены основные характеристики косвенных методов, показаны достоинства и недостатки.

В технологическом процессе из перечисленных методов способны применяться следующие: радиоактивный; метод ядерного магнитного резонанса; кондуктометрический; емкостной; СВЧ. Радиоактивный и кондуктометрический методы не обладают высокой точностью измерения. Вдобавок радиоактивный метод требует сложного, дорогого и потенциально опасного оборудования.

На практике поточные влагомеры обычно используют либо емкостной, либо СВЧ датчики. СВЧ устройство сложнее и дороже.

Емкостной метод вследствие высокой чувствительности широко использован в областях измерений микроперемещений и измерении других неэлектрических величин. Преимуществом данного метода является простота и сравнительно невысокая стоимость как измерительной схемы, так и самого емкостного датчика. Емкостной метод обладает достаточно высокой точностью измерения. В конце главы сформулированы выводы по результатам рассмотрения проблемы, а также сформулированы задачи исследования.

Во второй главе проводится анализ развития емкостных первичных преобразователей: от классической двухэлектродной системы к многоэлектродным конструкциям. Приведены недостатки емкостного преобразователя коаксиального типа и преимущества использования дополнительных охранных электродов в многоэлектродных конструкциях.

Преимущества 3-х электродных конденсаторов: устранение паразитного импеданса между рабочими электродами датчика, обеспечение более высокой точности, сравнительная простота электродных устройств, значительное уменьшение влияния поверхностной проводимости образца на результаты измерений. Конструкция ЕПП, основанная на конденсаторе с перекрестной емкостью, позволяет улучшить метрологические параметры прибора контроля влажности зерновой продукции за счет своих электростатических особенностей. Конденсаторы с перекрестной емкостью известны в области метрологии как высокостабильные емкостные элементы и используются в качестве образцовых мер малой емкости.

Емкость перекрестного конденсатора на единицу его длины рассчитывается по формуле:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \frac{\ln 2}{\pi}, \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды между электродами;
 ε_0 – диэлектрическая постоянная.

Из выражения (3) видно, что изменение габаритов электродов перекрестного конденсатора, вследствие температурного расширения, его емкость не изменится, поскольку эти параметры не входят в это выражение.

Упрощенная схема прибора контроля влажности зерновой продукции представлена на рисунке 1. Влагомер состоит из генератора, ЕПП и измерителя тока. Более пристального внимания заслуживает конструкция емкостного датчика, так как она является элементом, функционально связанным с влажностью зерна. Электрическая схема замещения емкостного датчика с контролируемым веществом представлена на рисунке 2.

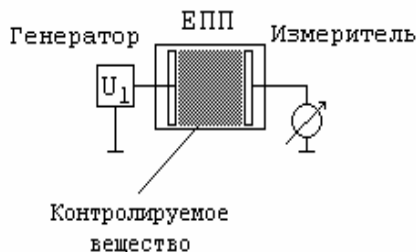


Рисунок 1 – Функциональная схема прибора контроля влажности зерновой продукции

На рисунке 2а введены обозначения: $C_{из}$, $R_{из}$ – емкость и сопротивление перехода между электродами и контролируемым веществом, $C_в$, $R_в$ – емкость и сопротивление элементарного объема контролируемого вещества. Рисунок 2б отражает ту же эквивалентную схему, где элементарные участки C_i , R_i представлены в виде комплексного сопротивления, что в дальнейшем упростит рассмотрение погрешностей ЕПП. В технологической линии возникает погрешность, обусловленная электрической связью контролируемого вещества с общей точкой измерительной цепи.

На рисунке 2в эта связь показана в виде комплексного сопротивления Z_k . Величина этого сопротивления зависит как от свойств контролируемого вещества (химического состава, наличия солей), его влажности, степени уплотнения, так и от конструкции ЕПП, расположения элементов технологического оборудования относительно электродов датчика.

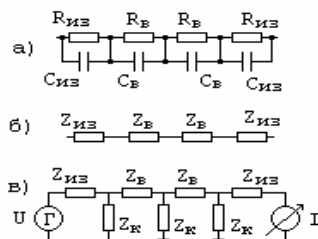


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения емкостного преобразователя с контролируемым веществом

Устранить влияние комплексного сопротивления Z_k в реальных конструкциях в процессе установки оборудования не удастся. Однако для снижения погрешности, обусловленной указанным влиянием, был разработан вариант емкостного датчика, обеспечивающего минимальное изменение Z_k в процессе работы прибора. В основу разработки положен способ, обеспечивающий «бесконтактное зануление» контролируемого вещества в рабочей зоне ЕПП. Сущность способа поясняется рисунком 3, где показан вариант влагомера с бесконтактным занулением контролируемого вещества. Особенностью данного влагомера является наличие в генераторе дополнительного инверсного выхода и дополнительного потенциального электрода в ЕПП, подключенного к инверсному выходу генератора. В результате на дополнительный потенциальный электрод подается тот же сигнал, что и на потенциальный, но сдвинутый по фазе на 180° .

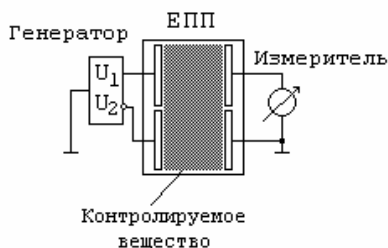


Рисунок 3 – Функциональная схема влагомера с "бесконтактным занулением" контролируемого вещества

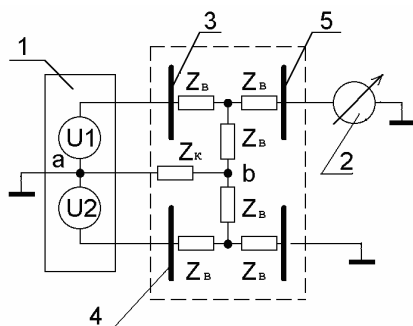
При внесении в ЕПП контролируемого вещества величина измеряемого тока I , протекающего от генератора 1 к измерителю тока 2, определяется следующим выражением:

$$I = \frac{U}{2Z_{\text{с}} + \frac{Z_{\text{с}}}{Z_{\text{к}} + Z_{\text{с}}}}, \quad (4)$$

где U – напряжение на основном выходе генератора;

$Z_{\text{в}}$ – комплексное сопротивление элементарного объема контролируемого вещества;

$Z_{\text{к}}$ – комплексное сопротивление контакта контролируемого вещества с общей точкой измерительной цепи.



- 1 – генератор;
- 2 – измеритель тока;
- 3 – потенциальный электрод;
- 4 – дополнительный потенциальный электрод;
- 5 – измерительный электрод.

Рисунок 4 – Эквивалентная электрическая схема емкостного преобразователя с контролируемым веществом с использованием «бесконтактного зануления»

Изменение электрофизических параметров контролируемого вещества, в частности его диэлектрической проницаемости, приводит к изменению комплексного сопротивления $Z_{\text{в}}$, что будет зафиксировано измерителем тока 2. Однако из формулы (4) видно, что измеряемый ток определяется не только величиной комплексного сопротивления $Z_{\text{к}}$, но и величиной комплексного сопротивления контакта контролируемого вещества с общей точкой измерительной цепи $Z_{\text{к}}$, т.е. величиной сопротивления между точками «а» и «b».

При наличии дополнительного потенциального электрода, подключенного к инверсному выходу генератора, в рабочей области емкостного

первичного преобразователя существует область нулевого потенциала под действием двух противофазных напряжений. Поскольку потенциалы общей точки и контролируемой массы вещества - точки «а» и «б», - находящегося в области нулевого потенциала, будут равны, то ток через сопротивление контакта Z_k протекать не будет при любом значении этого сопротивления.

Сформулированы требования к измерительной схеме прибора контроля влажности зерновой продукции. Проведена классификация измерительных схем измерения параметров ЕПП

На основе теории трансформаторных измерительных мостов была разработана функциональная схема измерительной цепи, отвечающая предъявляемым требованиям.

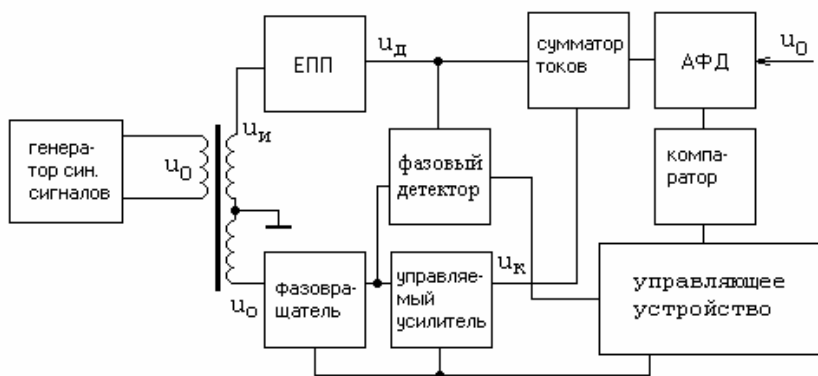


Рисунок 5 – Функциональная схема измерительной цепи прибора контроля влажности зерновой продукции

Сигнал с генератора, имеющий вид $u_0 = U_0 \sin \omega t$, подается на первичную обмотку трансформаторного моста. На вторичных обмотках возникают сигналы:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= U_0 k \cdot \sin \omega t, \\ u_o &= U_0 k \cdot \sin(\omega t + 180^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где u_i и u_o – сигналы с вторичных обмоток измерительного и компенсационного плеч; k – коэффициент трансформации.

Вторичные обмотки трансформатора включены встречно, поэтому выходные сигналы будут иметь разность фаз в 180° .

Измерительное плечо трансформаторного измерительного моста нагружено на ЕПП. Упрощенная схема замещения ЕПП с контролируемым веществом состоит из активного и реактивного сопротивлений, включенных параллельно. Таким образом емкостной датчик с зерновой массой для измерительной схемы представляет собой комплексное сопротивление Z_d . Ток, протекающий через датчик, равен:

$$i_o = I_o \sin(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Здесь амплитуда сигнала I_d и угол смещения φ являются функциями от активного и реактивного сопротивлений датчика.

Токи измерительного и компенсационного плеч складываются в сумматоре токов. Для равновесия моста необходимо, чтобы алгебраическая сумма токов равнялась нулю, т.е. $i_k + i_d = 0$. Для выполнения такого условия, компенсационное плечо должно иметь вид:

$$i_k = I_k \sin(\omega t + \psi + 180^\circ). \quad (7)$$

Для правильной работы мостовой схемы необходимо не только выполнение равенства токов $I_d = I_k$, но так же важным условием является разница фаз этих токов в 180° . Для реализации данного условия компенсационное плечо содержит фазовращатель. Фазовращатель настраивают так, чтобы фазовый сдвиг компенсационного сигнала ψ был равен фазовому сдвигу измерительного сигнала φ . Управляемый усилитель служит для управления амплитудным значением компенсационного сигнала I_o . С помощью управляемого коэффициента k_y , меняется амплитуда сигнала по следующему закону:

$$I_k = I_o \cdot k_y. \quad (8)$$

Таким образом, условие равновесия моста запишется:

$$\frac{U_u}{Z_o} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_o k_y \sin(\omega t + \psi + 180^\circ). \quad (9)$$

В правой части уравнения (9) переменными являются комплексное сопротивление датчика Z_d и угол сдвига фазы φ , а в левой части коэффициент усиления k_y и угол ψ , подбирая которые, можно добиться равновесия моста.

Система управления непрерывно подстраивает коэффициент усиления k_y и сдвиг фазы ψ в цепи обработки сигнала, причем подстройка коэффициентов ведется независимо друг от друга.

В третьей главе приведены конструкции ЕПП и их характеристики, полученные экспериментальным путем.

Основным элементом конструкции емкостного датчика является измерительный стакан, встраиваемый в зернопровод, через который прохо-

дит измеряемый поток зерна. На его поверхность с наружной стороны крепятся электроды, согласно рисунку 6. Оптимальная толщина стенок находится в пределах от 2 до 4 мм, что удовлетворяет требованиям к чувствительности и прочности ЕПП. Высота стакана 150 мм, диаметры входного и выходного отверстия выбираются в соответствии производительности линии.

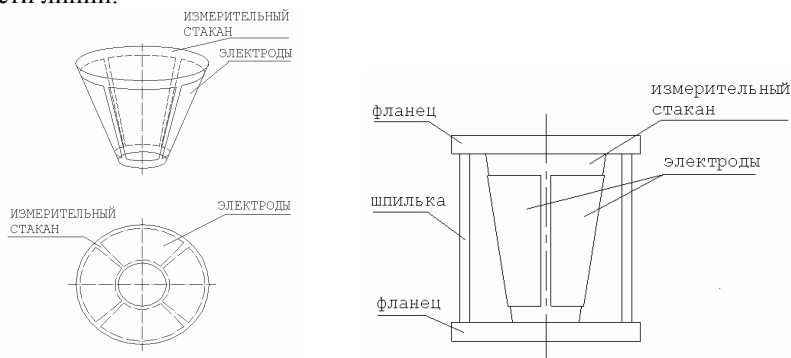


Рисунок 6 – Измерительный стакан с электродами и конструкция ЕПП, встраиваемая в зернопровод

Крепление ЕПП к зернопроводу осуществляется при помощи нижнего и верхнего фланцев, которые в свою очередь крепятся к фланцам зернопровода болтами. Между фланцами размещается измерительный стакан с электродами, стянутый с помощью шпилек.

Конструкция ЕПП проста и технологична в изготовлении, что отражается на стоимости прибора и расходах на ремонтные и профилактические услуги.

Материал измерительного стакана следует выбирать из следующих соображений: диэлектрическая проницаемость и потери диэлектрика должны быть небольшими с тем, чтобы паразитный импеданс преобразователя был мал; малая способность к адсорбции различных веществ и стойкость к химическому воздействию; высокая прочность к истиранию. В той или иной степени предъявляемым требованиям удовлетворяют такие материалы, как стекло, кварц, ситалл, керамика, стеклопластики.

Толщина диэлектрического слоя выбирается из соображений прочности и надежности. Также толщина диэлектрика влияет на чувствительность датчика, при больших значениях толщины метрологические характеристики влагомера ухудшаются. Наличие диэлектрического слоя между электродами и контролируемым веществом позволяет исключить короткое замыкание электродов через токопроводящие элементы зерновой мас-

сы (мусор, металлическая стружка и др.). В результате величина активных потерь станет меньше, однако исключить их полностью не удастся.

За основу конструкции 4-х электродного емкостного преобразователя была взята конструкция кольцевого ЕПП. Такой датчик конструктивно выполнен из набора металлических колец и колец, выполненных из диэлектрика.

Выполненный из набора колец измерительный конденсатор зажимают между верхним и нижним фланцами 5 и стягивают шпильками 6. Конструкция ЕПП проста и технологична в изготовлении, что отражается на стоимости прибора и расходах на ремонтные и профилактические работы.

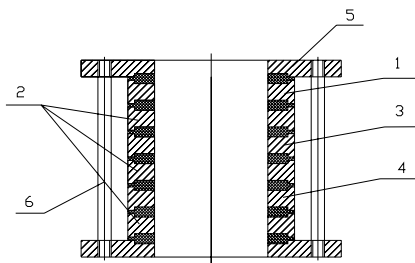


Рисунок 7 – Сечение 4-х электродного емкостного преобразователя (обозначения в тексте)

Токопроводящее кольцо 1 подключается к инверсному выходу генератора, кольцо 3 подключается к основному выходу генератора. Кольцо 4 подключается к измерителю тока. Токопроводящие кольца 2 подключаются к общей точке.

Проводились сравнение метрологических характеристик различных конструкций ЕПП. Одной из основных характеристик прибора является воспроизводимость показаний, то есть повторяемость результатов измерений одного и того же исследуемого материала одним и тем же ЕПП. Указанный параметр очень важен для влагомеров, т. к. характеризует его качество, но часто замалчивается производителями оборудования.

Протестированы конструкции емкостного датчика с 2-х, 3-х и 4-х электродными системами. В качестве 2-х электродного ЕПП использовался датчик коаксиального типа. 4-х электродный ЕПП исследовался в 2 режимах:

- при подключении дополнительного потенциального электрода к инверсному выходу генератора.
- без подключения дополнительного потенциального электрода к инверсному выходу генератора (электрод заземляют).

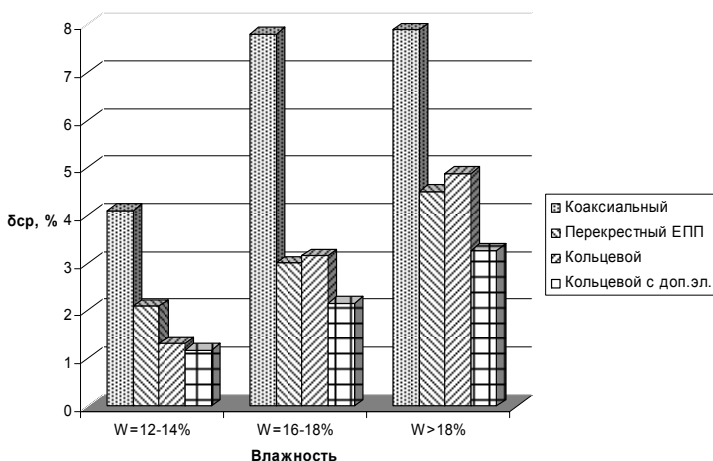


Рисунок 8 – Разброс показаний различных конструкций ЕПП в зависимости от влажности зерна

Сравнительный анализ конструкций показал, что классический вариант коаксиального типа ЕПП уступает разработанным конструкциям на основе 3-х и 4-х конденсаторов. Перекрестный ЕПП и конструкция кольцевой ЕПП отличаются друг от друга не слишком значительно, а кольцевой ЕПП с дополнительным потенциальным электродом является наиболее приемлемой конструкцией по проведенному эксперименту на воспроизводимость результатов.

Для оценки степени влияния насыпной плотности контролируемого вещества на метрологические характеристики различных конструкций ЕПП был проведен следующий эксперимент. Использовались ЕПП трех типов: коаксиальный, ЕПП на основе перекрестного конденсатора, и кольцевой ЕПП с дополнительным потенциальным электродом.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1. В колонках таблицы приведены показания прибора контроля влажности при обычной засыпки зерна, показания влагомера при искусственном уплотнении, разница между этими показаниями – абсолютная и в процентах. Результаты измерения приведены в относительных единицах, которые при необходимости пересчитывались в единицы влажности по градуировочной кривой.

Результаты эксперимента подтвердили зависимость точности измерения от конструкции ЕПП. При работе с сухим зерном (влажность менее 13%) изменение его плотности не оказывает заметного влияния на окон-

чательный результат. Для влагомеров зерна и зерновой продукции с влажностью менее 13% выбор конструкции ЕПП не имеет определяющего значения.

При влажности зерна более 18% его плотность оказывает существенное влияние на результат измерения. В простых 2-х электродных конструкциях влияние плотности превышает остальные виды погрешности в несколько раз. При использовании дополнительных электродов, влияние плотности уменьшается.

Таблица 1 – Экспериментальная зависимость показаний различных конструкций ЕПП от плотности контролируемого вещества

	Сухое зерно (W = 12 %)				Влажное зерно (W = 18 %)			
№	Показ. влагомера		Δ	γ, %	Показ. Влагомера		Δ	γ, %
	Обычная засыпка	Искусственное. уплотнение			Обычная засыпка	Искусственное Уплотнение		
Коаксиальный ЕПП								
1	90	98	8	0,75	740	1350	610	82
2	88	95	7	0,73	716	1440	724	100
3	90	100	10	1,1	735	1300	565	77
ЕПП на основе перекрестного конденсатора								
1	115	125	10	2,3	540	820	280	52
2	120	130	10	2,8	480	740	260	54
3	115	125	10	2,5	510	750	240	47
ЕПП с «бесконтактным занулением»								
1	115	120	5	2,7	400	478	78	20
2	120	130	10	5,5	400	495	95	24
3	115	124	9	5.1	390	470	80	21

Рассматривался вопрос учета и компенсации активной составляющей тока емкостного преобразователя. Разделение активной и реактивной составляющих прежде всего преследует цель повышение помехозащищенности. Считается, что у сыпучих материалов диэлектрическая проницаемость ϵ значительно менее чувствительна к колебаниям уплотнения, чем удельная проводимость δ . Возможно, метод отдельного измерения составляющих и не устраняет полностью влияние состава материала, он, однако, позволяет уменьшить это влияние. Для экспериментальной проверки в рамках данной работы разработана схема разделения активной и реактивной составляющих.

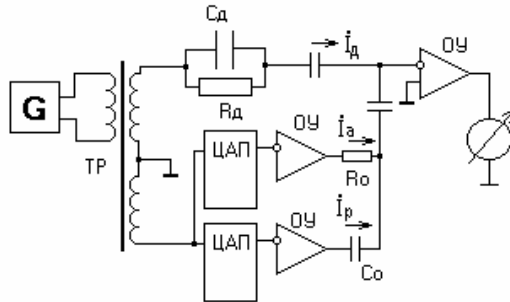


Рисунок 9 – Функциональная схема прибора контроля влажности с разделением активной и реактивной составляющих тока ЕПП

В качестве исследуемого материала использовали пшеницу влажностью 12% и 16%. Эксперимент проводился следующим образом: проба зерна с влажностью 12% засыпалась в емкостной первичный преобразователь и проводилось измерение. Данные измерения регистрировались в журнал. Затем для создания искусственного уплотнения, на исследуемое зерно на непродолжительное время ставилась гиря массой 3 кг., после чего проводились повторные измерения и регистрировались в журнал. Те же самые действия проводились с зерном с влажностью 16%. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальная зависимость изменения активной и реактивной составляющих от изменений плотности исследуемого материала

№	Сухое зерно (W=12%)						Влажное зерно (W=16%)					
	Не упл.		Уплот.		ΔK_a	ΔK_p	Не упл.		Уплот.		ΔK_a	ΔK_p
	K_a	K_p	K_a	K_p			K_a	K_p	K_a	K_p		
1	0	144	0	144	0	0	140	376	352	896	212	520
2	0	138	0	139	0	1	164	380	357	950	193	570
3	0	140	0	140	0	0	142	384	369	880	227	496

В таблице 2 приведены значения активной K_a и реактивной K_p составляющих комплексного тока (в отн.ед.), проходящего через емкостной датчик. Измерения проводились при обычной засыпке зерна без уплотнения, и при уплотнении зерна с помощью гири в 3 кг. ΔK_a и ΔK_p – разница в показаний прибора до и после уплотнения.

Датчик, заполненный сухим зерном, не имеет активной проводимости и представляет собой конденсатор с диэлектрической проницаемо-

стью зерна. При уплотнении пшеницы показания измерительной схемы не изменяются. Это можно связать с тем, что сухое зерно не деформируется в отличие от влажного, и его плотность меняется незначительно.

При повышении влажности возрастает активная составляющая тока через датчик. После уплотнения емкостная составляющая увеличилась на 238%, активная составляющая тока увеличилась на 251%. Это можно связать с тем, что при уплотнении улучшается контакт между зернами, и уменьшается электрическая проводимость. Емкость датчика увеличивается за счет деформации зерен пшеницы вследствие приложения силы. При деформации зерна пшеницы коэффициент заполнения емкостного датчика увеличился, это увеличивает диэлектрическую проницаемость среды между электродами измерительного конденсатора.

Видно, что при большом коэффициенте заполнения диэлектриком объема датчика, даже незначительные его колебания приводят к весоному изменению емкости датчика, что и подтверждается практическими результатами.

Для зерна с влажностью менее 13-14% нет большого смысла в разделении активной и реактивной составляющих, т. к. активная составляющая при минимальной влажности почти полностью отсутствует. При более влажном зерне или зерновой продукции разделение активной и реактивной составляющих имеет смысл для частичного устранения влияния состава и температуры. Однако влияние плотности на результаты измерения нельзя устранить, исключая активную составляющую, т.к. сама емкость является измеряемым параметром.

В четвертой главе приводятся характеристики прибора контроля влажности зерновой продукции «Поток», состоящего из электронного блока (рисунок 10) и емкостного датчика, встраиваемого в линию подачи зерна самотеком.



Рисунок 10 – Общий вид электронного блока влагомера «Поток»

Электронный блок содержит в себе плату питания, плату индикации, на которой размещен жидкокристаллический экран, и кнопки для организации пользовательского интерфейса, сама измерительная плата, сетевой интерфейс и контактные гнезда для подключения ЕПП.

Емкостной датчик подключается к электродному блоку с помощью экранированного кабеля длиной не более 2 метров, т.к. такой кабель вносит дополнительную паразитную емкость. То есть электродный блок должен располагаться недалеко от ЕПП, встроенного в технологическую ветвь. Электродный блок снабжен сетевым интерфейсом для трансляции данных измерения в персональный компьютер, где они подвергаются соответствующей математической обработке.

Прибор обеспечивает максимальное количество пользовательских функций, при этом имеет минимальные габариты при низкой цене. Влагомер позволяет измерять влажность пшеницы от 10% до 20%. Он предназначен для использования в технологическом процессе, диапазон рабочих температур от 10 до 30 °С. Прибор построен на базе микропроцессора ATmega8535, выполнен в противоударном и электрически защищенном корпусе.

Следует отметить, что до начала эксплуатации влагомера его необходимо настроить и откалибровать, для чего в программе предусмотрены специальные функции. Калибровка влагомера должна происходить в условиях его эксплуатации.

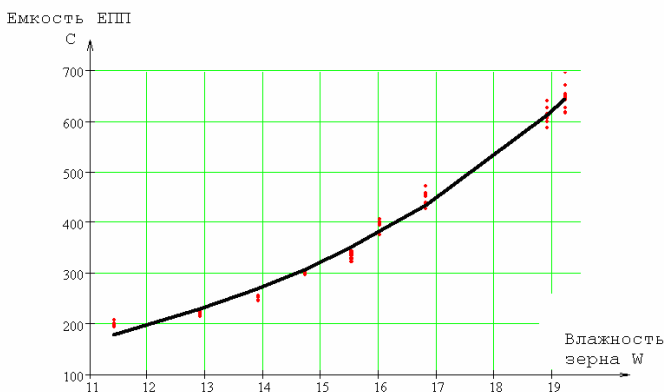


Рисунок 11 – Зависимость емкости ЕПП, выраженной в относительных единицах, от влажности W зерновой массы (в процентах)

Определена функциональная зависимость емкости датчика, выраженной в относительных единицах, от влажности контролируемого веще-

ства (Рисунок 11). Была разработана методика, в соответствии с которой экспериментально находились точечные значения этой зависимости. Для аппроксимации использовался метод наименьших квадратов. Была использована зависимость:

$$W(c) = \frac{\ln c - b}{a} = \frac{\ln c - 3,325}{0,164}. \quad (10)$$

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложении вынесены протоколы испытаний на зерноперерабатывающих предприятиях, акты внедрения разработанных поточных приборов контроля влажности зерновой продукции и положительное решение о выдаче патента РФ.

Основные результаты работы:

1. Разработаны поточные приборы контроля влажности зерновой продукции. Влажность зерновой массы определяется с погрешностью 0,5% по абсолютной величине в диапазоне 10 – 20% влажности, что не уступает характеристикам зарубежных влагомеров. Устранена систематическая составляющая погрешности, связанная с засорением датчика в процессе эксплуатации.
2. Разработана модель емкостного преобразователя на основе электрической схемы замещения, учитывающей электрическую связь вещества с общей точкой измерительной цепи.
3. Разработаны конструкции 3-х и 4-х электродных ЕПП. Выполнено сравнение характеристик различных конструкций емкостных преобразователей и показано преимущество 4-х электродных ЕПП.
4. Разработан метод измерения проводимости ЕПП с зерновой массой, функционально связанной с влажностью, учитывающий сдвиг фазы измерительного сигнала.
5. Разработан алгоритм микроконтроллерного блока управления обеспечивающий функции уравнивания измерительного моста и калибровки прибора.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Дизелькометрический влагомер зерновой продукции в потоке / А. И. Тищенко, В. С. Афонин, В. К. Федотов и др. //Современные проблемы тех-

- ники и технологии пищевых производств: сб. докл. 8-й науч.-практ. конф.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2005. – С. 110-114.
2. Выбор метода измерения влажности зерна и зерновой продукции / А. И. Тищенко, В. С. Афонин, В. К. Федотов и др. // Измерение, контроль, информатизация: материалы 7-й науч.-техн. конф.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 12-16.
3. Датчик наличия вещества в бункере пропаривателя / А. И. Тищенко, В. С. Афонин, В. К. Федотов и др. // Измерение, контроль, информатизация: материалы 7-й науч.-техн. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – С. 59-61.
4. Высокочастотный емкостной датчик влажности зерна / А. И. Тищенко, В. С. Афонин, В. К. Федотов и др. // ВЕСТНИК Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова: Приложение к журналу «Ползуновский альманах». - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – №2. – С. 95-97.
5. Афонин В. С. Проблемы калибровки измерительного прибора контроля влажности зерновой продукции / В. С. Афонин, А. И. Тищенко // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: материалы всерос. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 2006. – С. 2-3.
6. Афонин В. С. Измерение влажности зерна емкостным методом: Результаты эксперимента // Ползуновский альманах. – Барнаул, 2006. – №4. – С. 18-21.
7. Тищенко А. И. Прибор для определения влажности образцов лессовых грунтов в основаниях реконструируемых зданий / А. И. Тищенко, И. А. Корнеев, В. С. Афонин // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2007. – №1/2. – С. 58-60.
8. Заявка 036649 Российская Федерация, G01N 27/22 (2006/01) Диэлькометрический влагомер / В. В. Ключников, В. С. Афонин, В. К. Федотов; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. - №2005132719/28; заявл. 24.10.2005. опубл. 08.06.2007.
9. Тищенко А. И. Анализ влияния плотности зернового потока на точность измерения влажности зерна и зерновой продукции / А. И. Тищенко, В. С. Афонин, В. К. Федотов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – №11. – С.57-59.

Подписано в печать 10.10.2007. Формат 60×84 1/16.

Печать – ризография. Усл.п.л. 1,28.

Тираж 100 экз. Заказ 2007 -

Отпечатано в типографии АлтГТУ им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.

