

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени АБУ РАЙХАНА БЕРУНИ**

На правах рукописи
УДК

МИРХАИТОВА БИСЁРА АРЗУЕВНА

**ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА**

Специальность: 5А310902 - «Метрология, стандартизация
и управление качеством»

ДИ С С Е Р Т А Ц И Я

на соискание академической степени
магистра технических наук

Работа рассмотрена
и допускается к защите

Зав. каф. «МСС»
проф. Матякубова П.М.

Научный руководитель
доц. Рахмонов А.Т.

Ташкент 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА И ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР	
1.1. Зерно, как объект контроля измерения влажности	
1.2. Измерения влажности зерна при приемке и промышленной переработке	
1.3. Методы и приборы контроля влажности зерна и зерновых культур	
Выводы	
ГЛАВА 2. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК И СВОЙСТВ ЗЕРНА В ДИАПАЗОНЕ ВЧ ЭНЕРГИИ	
2.1. Вывод функции преобразования измерения влажности	
2.2. Влияние форм связи влаги в материале на погрешность преобразования влажности	
2.3. Влияние температуры влажного материала на погрешность преобразования	
2.4. Влияние плотности влажного материала на погрешность преобразования	
Выводы	
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДО- ВАНИЕ ВЧ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА	
3.1. Разработка устройства и преобразователь для измерения влажности зерна	
3.2. Определение метрологических характеристик устройства для измерения влажности зерна	
3.2.1. Исследование градуировочных зависимостей прибора	
3.2.2. Изучение влияния температуры материала на результат измерения влажности	
3.2.3. Исследование влияния места произрастания зерна на результат измерения	
3.2. Метрологические характеристики ВЧ устройство	
Выводы	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ	
ЛИТЕРАТУРА	

Введение

Актуальность темы. С приобретением независимости остро стал вопрос обеспечения зерном Республики Узбекистан. Этой актуальной проблеме уделяется большое внимание правительством и лично Президентом Республики Узбекистан.

В последние годы в данной области достигнуты существенные результаты: увеличился объем посева, сбор урожая доведен до более 6,2 млн. тонн в 2007 г. против 900 тыс. тонн в 1991 г.

На многих комбинатах по переработке зерна имеются современные технологические линии. При технологической переработке зерна, начиная с его хранения, влажность является одним из основных показателей эффективности технологической переработки.

До настоящего времени во многих зерноприемных хранилищах и зерноперерабатывающих предприятиях контроль влажности зерна и продуктов его переработки осуществляется методом сушки, за исключением тех немногочисленных случаев, где применяется зарубежная техника. Такое состояние делает задачу контроля влажности зерна и зернопродуктов особо актуальной и злободневной.

Развитие средств измерения влажности должно идти по пути широкого использования современной микроэлектронной базы. Микропроцессоры (МП) открывают новые возможности для совершенствования измерительных приборов. Они позволяют упрощать аналоговые части приборов, уменьшать неисключенные погрешности за счет использования автоматической коррекции по эталонным сигналам и мерам физических величин, исключать дополнительные погрешности от влияния условий измерения и колебаний параметров окружающей среды.

Цель работы. Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование ВЧ методов и приборов контроля влажности сыпучих (зерна и продуктов его переработки) материалов и разработка прибора на этой основе.

В диссертационной работе решались следующие конкретные задачи исследования:

- Анализ современного состояния методов и приборов измерения влажности твердых и сыпучих материалов;
- исследование электрофизических характеристик зерна в зависимости от его влажности;
- разработка математической модели процесса электромагнитного взаимодействия ВЧ - волны и влажного зерна;
- исследование влияния информативных и мешающих факторов на результаты измерения влажности;
- разработка и исследование ВЧ - устройство для измерения влажности зерна;

- определение основных метрологических характеристик высокочастотного прибора для измерения влажности зерна и зерновых продуктов.

Методика исследований. В работе использовались отдельные положения теории диэлектриков и электродинамики, методы математического моделирования, теории вероятностей, статистические методы регрессионного и дисперсионного анализов, планирование экстремальных экспериментов.

Научная новизна результатов диссертации заключается в исследовании и разработке ВЧ - прибора на основе изменения резонансного напряжения в колебательном контуре и измерения влажности. Определены влияния различных параметров на результат измерения влажности высокочастотным методом. Исследованы градировочные зависимости и определены метрологические параметры измерительного преобразователя влажности зерна.

Практическая ценность. Результаты исследования будут использованы для разработки ТЗ на изготовление автоматического измерителя влажности зерна и зерновых культур и могут быть успешно использованы для измерения влажности продуктов агропромышленного комплекса и смежных отраслей промышленности (химической, пищевой, по переработке промстройматериалов и т.д.). Кроме того, разработка и результаты работы представляют интерес для учебного процесса ВУЗов технических и технологических направлений.

Апробация работы.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы из наименований. Она содержит страниц машинописного текста, проиллюстрированного рисунками, ... таблицами.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА И ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

1.1. Зерно, как объект контроля измерения влажности

Для рациональной организации и оптимального ведения технологических процессов необходимо знать свойства сырья и определяющие факторы. Поэтому рассмотрим особенности зерна как объекта исследования. По научным представлениям [2, 3], при оценке зерна как сырья для переработки в муку, крупу и комбикорма необходимо основываться на следующих положениях:

- зерно - сложное составное тело вследствие органического соединения в единое целое резко разнородных тканей эндоспермы, зародыша и оболочек;
- зерно - анизотропное тело, поскольку существенно различаются структура и химический состав не только между анатомическими частями, но и в пределах каждой из них;
- зерно - полимерное тело, анатомические части которого построены из полимеров (белков, углеводов и липидов);
- зерно - биологически активное образование - живой организм, располагающий биологической системой, управляющему воздействию которой подчиняются все протекающие в зерне процессы.

Присутствие в зерновой массе различных компонентов придает ей специфические свойства, которые необходимо учитывать при обработке и хранении [4]. Все свойства зерновой массы можно разделить на две группы: физиологические и физические.

Физические свойства. Зерновая масса обладает следующими свойствами: сыпучестью, самосортированием, скважистостью, а также сорбционными, теплофизическими, массообменными и электрофизическими характеристиками. Важное значение имеет геометрическая характеристика зерна, его плотность, состояние поверхности, гигроскопичность, сыпучесть.

Абсолютная влажность зерна $W(\%)$ - это отношение массы влаги m_v к массе сухого материала m_c :

$$W = \frac{m_v}{m_c} 100 .$$

Различают относительную и абсолютную влажность зерна. Относительная влажность $W_{отн}(\%)$ представляет собой отношение массы влаги, содержащейся в зерне m_v , к массе воды и сухого вещества (m_v+m_c). Ее определяют по формуле:

$$W_{отн} = \frac{m_v}{m_v + m_c} 100 . \quad (1.2)$$

Влажность зерна при хранении и обработке постоянно изменяется, поэтому ее следует контролировать для принятия своевременных и надлежащих мер по предотвращению неблагоприятных явлений [1,2].

Как известно, правильный выбор рабочей частоты измерительного преобразователя влажности для каждого конкретного материала является

одним из определяющих факторов в достижении наивысших метрологических характеристик разрабатываемого влагомера.

Впервые основные свойства молекулы воды, представленные в виде диполя, вращающегося во внешнем переменном поле, достаточно раскрыты в работе [3]. Исследуя диэлектрические свойства полярных сред, Дебай, воспользовавшись законом Стокса, рассчитал время релаксации молекулы воды (сфера радиуса a) τ_0 под действием переменного электрического поля в среде с вязкостью η :

$$\tau_0 = \frac{0,4\pi a^3 \eta}{kT}.$$

В основе большинства типов измерительных преобразователей влажности лежат исследования диэлектрических свойств материала в широком частотном и температурном диапазонах.

Влажное зерно является весьма сложным диэлектриком, которому присущи все виды поляризации. В работе [5] на основе анализа экспериментальных данных рассмотрены факторы, обуславливающие потери в гетерогенных влагосодержащих системах.

Таблица 1.1. Физико-механические свойства зерновых культур [4]

Культура	Размеры, мм			Плотность, г/см ³	Масса 1000 зерен, г	Натура, г/л	Объем- ная масса, кг/дм ³	Коэфф. внут- ренного трения	Сква- жис- тость, %	Коэффициент внешнего трения		
	Длина	ширина	толщина							по дереву	по стали	по бетону
Пшеница	4,8÷8,0	1,6÷4,0	1,5÷3,3	1,2÷1,5	20÷40	730÷840	0,76	0,47	54,0	0,40	0,37	0,40
Рожь	5,0÷10,0	1,4÷3,6	1,2÷3,5	1,2÷1,5	13÷32	680÷750	0,73	0,49	38,0	0,40	0,37	0,42
Овес	8,0÷18,6	1,4÷4,0	1,0÷4,0	1,2÷1,4	20÷42	400÷450	0,45	0,51	68,0	0,45	0,37	0,45
Ячмень	7,0÷14,6	2,0÷5,0	1,2÷4,5	1,2÷1,4	31÷51	580÷700	0,65	0,51	47,4	0,40	0,37	0,43
Рис	5,0÷7,0	2,5÷2,8	2,0÷2,5	1,19÷1,26	19,0	440÷550	0,52	0,51	49÷54	0,44	0,34	0,43
Гречиха	4,2÷6,2	2,8÷3,7	2,4÷3,4	0,85÷1,25	21,0	560÷650	0,72	0,52	55,5	0,44	0,37	0,42
Кукуруза	5,5÷13,5	5,0÷11,5	2,5÷8,0	1,35	286,0	680÷820	0,73	0,53	35÷55	0,35	0,37	0,42
Горох	4,0÷8,8	4,0÷9,0	3,0÷9,0	1,40	135,0	750÷800	0,83	0,55		0,32	0,37	0,30
Просо	1,8÷3,2	1,5÷2,0	1,5÷1,7	1,1÷1,2	7,0	680÷730	0,85	0,52	30÷50	0,40	0,34	0,34

Из этих данных видно, что в области радиочастот имеет место наложение многих эффектов (присутствуют все виды поляризации)

Как следует из выражения Дебая, для τ_0 , критические частоты, соответствующие максимальному поглощению энергии в воде при нормальной температуре, лежат в сантиметровом диапазоне.

Таким образом, можно отметить, что диэлектрические свойства воды изучены достаточно хорошо и протабулированы в широком температурном и частотном диапазонах.

1.2. Измерения влажности зерна при приемке и промышленной переработке

1.3. Методы и приборы контроля влажности зерна

Известно большое количество методов определения влажности, теоретических основ, классификации (рис.1.2), описания которых даны в отечественной и зарубежной литературе [9, 10, 11]. Методы измерения принято разделять на прямые и косвенные. В прямых методах материал разделяют на сухое вещество и влагу, а в косвенных - измеряют определенную величину, функционально связанную с влажностью материала: массу, плотность, электропроводность, диэлектрическую проницаемость, теплопроводность, угол естественного откоса, поглощение, отражение различных длин волн и т.д.

Прямые методы измерения влажности зерновых культур. Из числа прямых методов наиболее распространены различные модификации метода высушивания (термогравиметрический), химические (метод Фишера) и дистилляционные.

Рассмотрим методы и средства, получившие практическое применение при определении влажности зерновых культур.

Методы, в основе которых лежат измерения потери массы образца после его

нагревания при атмосферном или пониженном давлении, массы конденсированной воды, выделившейся из нагретого образца, либо массы воды, адсорбированной высушивающим агентом, являются наиболее известным и широко применяемыми в качестве основных как в СНГ, так и за рубежом.

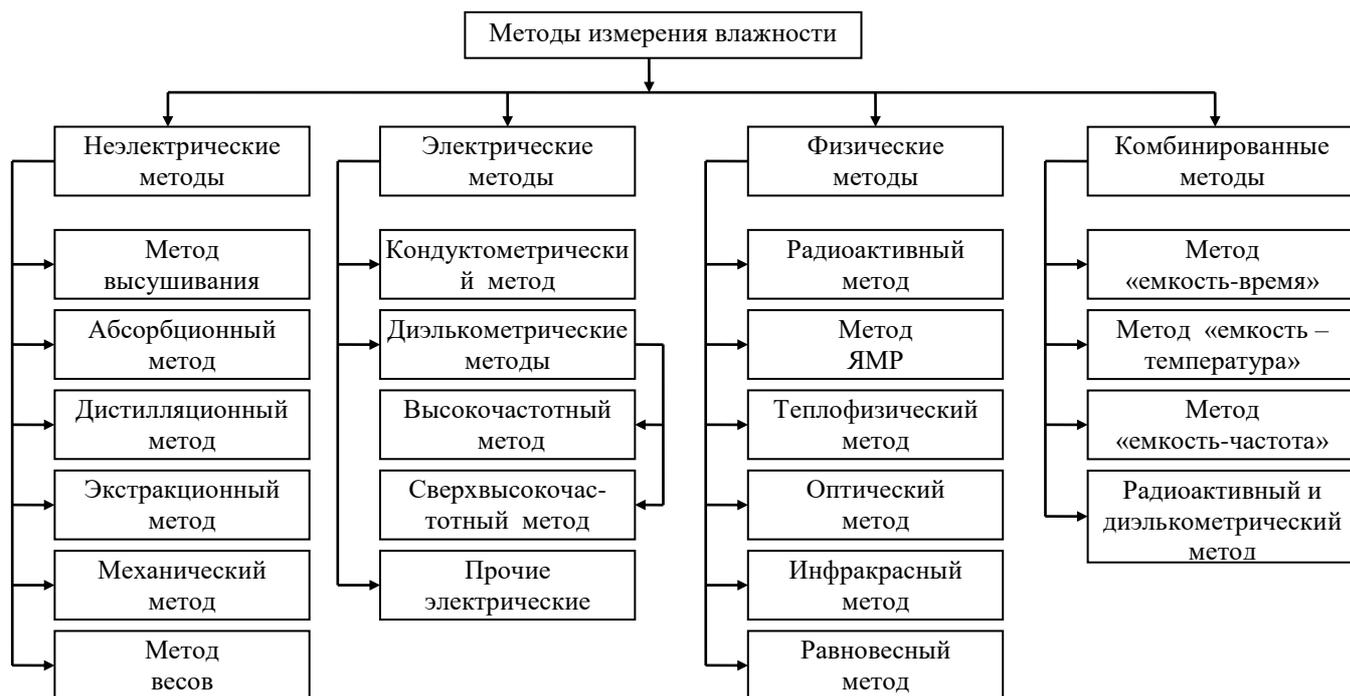


Рис.1.2. Классификация методов измерения влажности

В работе [17] приведен перечень двадцати семи официальных методов, принятых в разных странах и технических обществах для определения влажности зерна, хлебных злаков и зерновых продуктов, из которых четырнадцать приходится на воздушно-тепловые и шесть - на вакуумно-тепловые методы.

Результаты определения влажности методом сушки в вакууме или кондиционированным воздухом более точны, чем при сушке в воздушном шкафу. Во многих странах вакуумно-тепловой метод сушки принят в качестве образцового.

Основные отличительные особенности методов - различие в продолжительности и температуре высушивания.

Практически все методы, используемые в официальных стандартах США при определении влажности зерна, являются воздушно-тепловыми. Для зерна (кроме кукурузы и фасоли) в США широко используют метод воздушно-тепловой сушки при температуре $(130 \pm 1)^\circ\text{C}$ в течение 1 ч. Если первоначальное содержание влаги в зерне превышает 16%, а для сои и риса зерна - соответственно, 10 и 13%, то используют двухступенчатую сушку: взвешенную пробу неразмолотого зерна предварительно подсушивают до содержания влаги менее указанных величин [13].

Расчет влажности при двухступенчатой методике выполняют по формуле [13, 18, 19]:

$$W = \frac{\left(\frac{\Delta m M_{II}}{m} + \Delta M \right) \cdot 100}{M_{II}}, \quad (1.1)$$

где M_{II} - масса исходной пробы, использованной для подсушивания;

M_{II} - масса пробы после подсушивания;

$\Delta M = (M_{II} - M_{II})$ - потеря влаги в результате подсушивания;

m - масса навески, используемой на ступени окончательного высушивания при температуре 130° С;

Δm - потеря влаги в результате высушивания.

Сходимость определения влажности не должна превышать 0,2%.

Из формулы (1.1) видно, что точность методов высушивания зависит от погрешностей определения массы исследуемого материала до и после сушки. Поэтому для получения достоверных результатов используют оборудование, обеспечивающее требуемую точность взвешивания. Кроме того, сводят к минимуму потерю влаги на промежуточных этапах анализа: при доставке, хранении, измельчении и охлаждении образцов. Исследованию методов сушки и их погрешностей посвящены многие работы в отечественной и зарубежной литературе [20, 21 и др.].

В Англии, Франции и ряде других стран в качестве основного применяется метод воздушно - тепловой сушки при температуре 130 °С в течение 2 ч. [21].

Международной организацией по стандартизации (ISO) и международным обществом по химии зерна (ICC) в качестве образцового принят метод сушки измельченного зерна над химически чистым фосфорным ангидридом (P_2O_5) при температуре (45...50)° С и давлении в пределах 10...20 мм рт.ст. до постоянного веса (не менее 150 ч сушки). Оптимальная для измельчения влажность зерна, рекомендуемая стандартом, составляет (9...15)%. Более сухое или более влажное зерно доводят до указанных предельных значений. Данный метод, часто называемый в литературе по имени французского ученого А. Guilbot, позволяет избежать химического изменения вещества и обеспечить удаление всей влаги, содержащейся в продукте. Разница между результатами двух определений влажности одного и того же образца не должна превышать 0,1% [13].

В СНГ методы с применением сушильных шкафов являются основными при определении влажности всех без исключения сельскохозяйственных материалов (кормов, зерна, хлопка и др.). Для зерна и продуктов его переработки официально приняты два метода определения влажности: воздушно-тепловой - ГОСТ 13586.5-85 (взамен ГОСТа 3040-55) и вакуумно-тепловой - ГОСТ 8.432-81. Согласно первому методу, образцы измельченного зерна высушивают в течение 60 минут при температуре 130 °С в сушильном шкафу СЭШ-3М. При содержании влаги в зерне более 18% влажность

определяют с предварительной подсушкой при температуре 105 °С в течение 30 мин. Относительная погрешность определения влажности этим способом не превышает 3%. Метод вакуумно-тепловой сушки (ГОСТ 8.432-81) предусматривает подсушивание неизмельченного зерна при температуре 105 °С и окончательное его обезвоживание при - 130 °С в течение 1 ч (для кукурузы 90 мин). Продолжительность подсушивания определяется видом продукции и уровнем ее влажности и может составлять 30, 40 и 50 мин. Метод реализуется с использованием образцовой вакуумно-тепловой установки УВТО.

Эта установка имеет следующие характеристики: диапазон измерения влажности – (5...45)%; предел допускаемого значения абсолютной погрешности $\pm 0,1\%$; погрешность регулирования заданной температуры ± 1 °С; абсолютное давление в сушильной камере не более 1330 Па. Измельчают зерно в бюксах со встроенными размалывающими устройствами, что существенно снижает методическую погрешность измерения влажности. В сушильной камере одновременно можно установить шесть бюксов. Масса навески принята равной 10 г. Значение определяют как среднее арифметическое влажности шести навесок при поверке и метрологической аттестации средств измерений и трех навесок при градуировке быстродействующих влагомеров. Расхождения между определениями влажности высушенных одновременно навесок при соблюдении требований методики не должны превышать $\pm 0,1\%$.

Результаты определения влажности с применением сушильных шкафов зависят от природы анализируемого материала, качества выделения и подготовки навески к измерениям, температуры, продолжительности и атмосферного давления, при котором происходила сушка. Влага из образца выделяется до тех пор, пока давление паров над ним превышает давление паров воды в окружающей среде.

Определение влажности разными методами с использованием сушильных шкафов не дает одинаковых результатов. Е. Jacobsen [26], определяя влажность зерна в сушильных шкафах двумя методами (при температуре 105° С и продолжительности сушки 3 ч - метод ЕВС; при температуре 130° С и продолжительности сушки 2 ч - метод ИСС), получил разницу для пшеницы 0,81, ржи - 1,12, ячменя - 0,72 и овса - примерно 2%. Он же отмечает значительное влияние на результаты измерений потерь влаги при размоле. Эта ошибка особенно обнаруживалась на овсе.

Для большинства биологических материалов трудно (или вообще невозможно) удалить всю влагу, используя нагрев, без выделения в то же время летучих веществ или разложения отдельных компонентов. Этим и объясняется сложность проблемы определения истинного содержания воды в таких материалах. Количество влаги, удерживаемой той или иной энергией связи, варьирует в зависимости от природы коллоидных материалов, что и является основной причиной многообразия методов воздушно-тепловой сушки. Строго определенный метод, позволяющий с достаточной точностью измерять влажность, охватывает небольшой перечень материалов с близкими свойствами. Следует отметить, что указанные методы требуют отбора пробы материала, длительного времени на каждое измерение, высокую

квалификацию персонала. Поэтому они, как правило, непригодны для автоматизации самого процесса измерения и регулирования технологических процессов зернозаготовительной промышленности.

Исходя из задач диссертационной работы, основное внимание уделим косвенным экспрессным методам измерения влажности материалов, так как на их основе создаются влагомеры, пригодные для непосредственного автоматического измерения и регулирования процесса, что и является актуальной задачей для зернозаготовительной промышленности.

Косвенные методы измерения влажности. Содержание влаги - один из важнейших факторов, определяющих физико-механические свойства материалов, что и лежит в основе многочисленных косвенных методов ее определения. В косвенных методах измеряются величины, функционально связанные с влажностью материала. Они являются основой современных влагометрических устройств. В зависимости от измеряемого свойства М.А. Берлинер [8] предложил косвенные методы разделить на две большие группы - электрические и неэлектрические. В основу первых положено прямое измерение электрических параметров материала; у вторых измеряемая физическая величина не является электрической. Однако и она на определенном этапе измерения, как правило, преобразуется в электрический сигнал. При рассмотрении косвенных методов исходим из того, что прибор должен быть экспрессным, автоматическим, бесконтактным, обеспечивать требуемую точность и быть применимым для нескольких типов однородных материалов.

Неэлектрические методы измерения влажности базируются на механических, акустических, тепловых, оптических свойствах материала. Сюда же следует отнести методы, использующие взаимодействие различных видов электромагнитных колебаний и ядерных излучений с исследуемым веществом.

Акустический метод. Поиски свойств, наиболее жестко связанных с влажностью, ведутся постоянно. Интересно в этом плане исследование G.C. Zoerb [24], который изучал на пшенице зависимость всех выше-перечисленных свойств, а также уровень звука при ударе зерна от влажности. Акустические методы основаны на зависимости скорости распространения звуковых колебаний от влажности материала. Обоснование диапазона рабочих звуковых частот (20...50 КГц), типа и конструкции акустических преобразователей дано в работе [42].

Механический метод. Более однозначную зависимость от влажности имеет величина разрушения зерна при ударе. Эта зависимость и положена в основу механического влагомера, описываемого в работе [13]. Испытания прибора в диапазоне влажности от 9,8 до 17,4% показали, что зависимость между количеством разрушенных зерен (N) и их влажностью (W) линейная. Для одной серии опытов эта зависимость имела вид:

$$N = -5,03W + 105,03 \quad (1.2)$$

В среднем изменению влажности на 1% соответствуют 5,37% дробленного зерна.

Стандартная ошибка прибора составила $\pm 0,37\%$. Не было обнаружено

разницы в показаниях прибора между двумя сортами пшеницы.

В радиометрических методах используются взаимодействия различных видов излучений и рассеяния нейтронов во влажном материале. Для определения влажности и плотности почв, грунтов, торфа нашли применение гамма- и нейтронные методы. К достоинствам этих влагомеров относятся неразрушающий контроль, независимость измерений от температуры, высокая чувствительность и быстроедействие [24, 25]. Необходимость защиты персонала от вредного воздействия излучения является существенным недостатком метода.

Метод ядерного магнитного резонанса - один из наиболее эффективных методов исследования твердых и жидких веществ. Он основан на использовании магнетизма атомных ядер анализируемого образца, поэтому получаемая информация исходит из самых глубин материи и позволяет судить о структуре вещества. Определение содержания воды данным методом связано с регистрацией протонного резонанса.

Традиционный и более точный метод определения содержания влаги в зоне - печная сушка - требует для своей реализации значительных затрат времени и средств; метод инфракрасной спектроскопии - большого количества разнообразных калибровочных кривых. Коммерческие кондуктометрические и диэлькометрические влагомеры имеют большую погрешность измерения при высоких уровнях влажности; в ряде случаев для проведения анализа необходимо предварительное измельчение образцов. От всех этих недостатков свободен метод ЯМР.

Анализатор Newport 4000 фирмы Oxford Analytical Instruments (Великобритания), реализующий метод ЯМР на ядрах - протонах, легко решает проблемы, возникающие при использовании других методов [26]. Прибор определяет влажность зерновых продуктов в диапазоне 10÷30 % с погрешностью $\pm 0,3$ % и воспроизводимостью $\pm 0,1$ % абсолютного значения влажности. Разделение сигналов лабильных протонов жидкой фазы (воды) и твердой (жира или масла, содержащихся в любом виде зерна) осуществляет электронный фильтр. Время измерения 30 с. Многофункциональное программное обеспечение автоматически выполняют калибровку прибора по эталонам и передачу параметров на хранение во внешнюю память, взвешивание образца на электронных встроенных весах и выбор оптимальных условий проведения анализа, обработку результатов анализа и вывод данных на печать или ЭВМ, самодиагностику работы прибора.

Наряду с преимуществами метода, применение их для контроля влажности зерна неэффективно, потому что они очень сложны при техническом исполнении, дороги и требуют специального высококвалифицированного обслуживания. Перспективная область применения этих влагомеров - лабораторные измерения для научных исследований, а также поверка влагомеров.

Теплофизические методы определения содержания влаги пока не получили широкого практического применения. Их основными недостатками длительное время были низкая точность и малое быстроедействие. Однако

теоретические и экспериментальные исследования, выполненные в последние годы, показали, что недостатки могут быть в значительной мере устранены, а для ряда материалов (например сложные химические удобрения) к более перспективным отнесен термовакuumный способ измерения влажности. Сущность его заключается в следующем. В герметизированный объем помещают тонкий, равномерный по толщине слой материала и подвергают его вакуумированию. Происходит интенсивное испарение влаги из образца, что вызывает понижение температуры. По мере уменьшения количества воды в образце интенсивность испарения снижается, а температура материала в результате теплообмена с окружающей средой начинает повышаться. Суммарное действие данных факторов приводит к тому, что изменение температуры имеет экстремум, величина которого пропорциональна начальной влажности образца. Измеряемым параметром является значение максимального изменения температуры.

Оптический метод. Действие оптических влагомеров основано на избирательном поглощении влагой ИК (инфракрасного) - излучения определенной длины волны, отраженной от поверхности контролируемого объекта, либо прошедшего через этот материал [27, 28]. Влагомеры в большинстве случаев построены по двухволновой схеме и основаны на зависимости оптической плотности исследуемого материала от влагосодержания. Однако зерновые продукты являются дисперсными, рассеивающимися системами и возможность применения к ним анализаторов, основанных на однозначной зависимости оптической плотности от влагосодержания, требует экспериментальной поверки.

В Республике Узбекистан ИК-влагомеры продуктов сельскохозяйственного производства пока не выпускаются. В странах СНГ и дальнего зарубежья производство таких средств постоянно растет. Ведущие фирмы-изготовители ИК-влагомеров - Tecator (Швеция), Infrared Engineering (Великобритания), Technicon (США), Neotek Instruments (США), Falling Number (Швеция).

НПО «Агроприбор» (Россия) выпускает экспрессный инфракрасный анализатор зерна «Спектран - 1». Анализатор работает на принципе спектроскопии диффузного отражения в ближней инфракрасной области спектра $1,5 \div 2,5$ мкм. Он применяется для определения качества зерна и продуктов переработки [29].

Фирма Falling Number (Швеция) выпускает системы «NIR inframatic 8100» и «NIR inframatic 8120» для экспрессного определения содержания белка, влаги и масла в зерне и пищевых продуктах [30]. Работа системы основана на измерении величины отражения световых волн в ближней инфракрасной области. Прибор состоит из оптической системы, микропроцессора, системы цифрового вывода и самоконтролирующего математического обеспечения, с помощью которого осуществляется управление функциями анализатора и обработка результатов.

Фирмой Neotek Instruments (США) разработан специальный анализатор AQG, действие которого основано на получении спектров состава семян в

близкой ИК-области, позволяющий определять содержание масла, влаги и белка в семенах.

Оптические методы измерения влажности применимы для широкого набора веществ и материалов - как жидких, газообразных, так и твердых. Достоинством оптических методов является то, что их показания мало зависят от температуры. Характерными особенностями оптических методов являются высокие избирательность, чувствительность, точность и воспроизводимость [46]. Основными недостатками оптических методов являются большое количество разнообразных калибровочных кривых и увеличение погрешности измерения влажности в пыльных местах, так как при переработке зерна выделяется много пыли.

Во влагометрии твердых и жидких веществ наиболее часто применяют электрофизические методы.

Электрические методы измерения влажности основаны на зависимости электрических свойств материала от влагосодержания [8]. Они получили большое распространение благодаря удобству преобразования влажности в электрический сигнал, возможности реализации с помощью несложной электронной аппаратуры, осуществлению непрерывных и неразрушающих измерений, высокому быстродействию. Во влагометрии можно использовать любые электрические параметры материала.

Во влагометрии наиболее распространение получили методы, основанные на зависимости сопротивления, диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости, а также комплексов этих величин от влажности материала.

Электрические методы измерения влажности можно классифицировать как по электрическому параметру, так и по диапазону частот, в котором производятся измерения. Оба эти признака связаны между собой, так как от используемого диапазона частот зависит конструкция датчика и преобладающее влияние на результат измерения того или иного электрического параметра.

Кондуктометрический метод. В области низких частот (вплоть до постоянного тока) используется зависимость удельного сопротивления материалов от их влажности [8]. Этот метод применяется для контроля влажности древесины, бетонной смеси, зерна и др. На приборостроительных заводах России, Украины, Эстонии и Латвии, а также в странах дальнего зарубежья выпускаются кондуктометрические влагомеры для различных материалов. Основным недостатком этого метода является большое влияние мешающих факторов на результат измерения.

Высокочастотный метод. В средне- и коротковолновом (0.3÷30 МГц) диапазоне частот используется зависимость диэлектрических характеристик от влажности материала [31, 32]. По этому методу измеряется электрическая емкость первичного преобразователя, заполненного исследуемым материалом, являющаяся функцией диэлектрической проницаемости, и, соответственно, влажности контролируемого материала. Диэлектрический метод измерения благодаря высокой чувствительности в широком диапазоне влажности,

получению информации о влажности в виде электрического сигнала, возможности реализации метода компактными и недорогими приборами для дискретных и непрерывных измерений является наиболее распространенным. Поэтому высокочастотные методы измерения влажности нашли широкое распространение в промышленности [33]. Из числа высокочастотных приборов можно перечислить ВЗК-2, ПВЗ-10, ВЗПК-1, ЦВЗ-3, "Колос" и другие. В приложениях 1.2 и 1.3 приведены, соответственно, технические характеристики поточных и лабораторных влагомеров. Основной парк экспресс - влагомеров зарубежных фирм составляют диэлькометрические высокочастотные приборы. В [13, 26, 30] приведены технические характеристики некоторых диэлькометрических влагомеров зарубежных фирм. К недостаткам высокочастотных влагомеров относятся: ограниченная масса контролируемой пробы, влияние переменной концентрации солей в воде, зависимость диэлектрических характеристик материалов от их плотности и температуры. Поэтому измерения влажности указанными методами следует проводить при постоянной плотности и температуре материалов или вводить в результат измерений поправки.

Сверхвысоко-частотные (СВЧ) - методы измерения влажности. Эти методы основаны на зависимости диэлектрических параметров материалов от их влажности при измерении этих параметров в диапазоне СВЧ [9, 10].

За рубежом особое внимание уделяют развитию СВЧ- влагометрии. Они применяются для контроля влагосодержания зерновых, пищевых продуктов, текстильных материалов, табака, хлопка и различных других продуктов по величине затухания СВЧ волны.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Проведен анализ физических свойств зерна и условий измерения его влажности;
2. На основе проведенных исследований определены основные требования при измерения влажности зерна:
диапазон измерения (% -8÷22);
допустимая погрешность измерения (%-0,8);
диапазон изменения температуры (°С- 10÷50).
3. Проведен анализ современного состояния методов и приборов контроля влажности зерна.
4. Определены основные недостатки существующих приборов и возможные пути их устранения.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА И ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

2.1. Теоретические основы высокочастотного диэлькометрического метода измерения влажности

На основе вышеприведенного анализа существующих методов и приборов контроля влажности зерна и зерновых культур было выявлено, что наиболее перспективными и эффективными являются косвенные методы контроля опухлости. К преимуществам данной группы относятся простота технологического процесса, отсутствие механической поврежденности зерна, возможность использования в качестве обрабатывающего агента местного сырья зерна.

Для построения приборов для определения влажности зерна и зерновых культур, основанных на диэлькометрическом методе, необходимо знание зависимостей диэлектрических свойств исследуемого материала от влажности, частоты электрического тока, температуры и плотности материала, распределения влаги в его объеме и других [14]. Диэлектрические свойства материала можно описать комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ^* или связанными с ней двумя параметрами – ее вещественной и мнимой составляющими ϵ' и ϵ'' , диэлектрической проницаемостью ϵ и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta$.

Зависимости между указанными величинами имеют вид

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\epsilon = \epsilon'$$

$$tg\delta = \epsilon''/\epsilon'$$

$$\epsilon^* = \epsilon' (1 - j tg \delta)$$

Высокочастотный диэлькометрический метод используется в диапазоне частот $5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^7$ Гц, в котором первичные измерительные преобразователи приборов измерения влажности зерна и зерновых культур можно рассматривать как системы с сосредоточенными параметрами.

Зерно представляет собой сложный по составу, неоднородный капиллярно-пористый коллоидный твердый материал с разнообразными формами связи влаги (химическая, адсорбционная, осмотическая, структурная, макро- и микрокапиллярная) с сухим веществом. В таком неоднородном сложном органическом диэлектрике наблюдаются почти все виды поляризации - электронная, ионная, дипольная, структурная, внутрислойная и другие.

Диэлектрическая проницаемость связана с основными видами поляризации, из которых инерционными, приводящими к рассеянию энергии, являются дипольно-релаксационная и структурная.

Диэлектрические потери обусловлены не только релаксационными, видами поляризации, но и сквозной проводимостью материала, которая может достигать больших значений, особенно при высокой влажности.

Следствие сложности физических процессов, определяющих электрические свойства зерна, - нестабильность и зависимость их от условий измерений (частота электрического поля) и от параметров самого материала (селекционная разновидность, распределение влаги, засоренность). Это обуславливает невозможность использования для зерна (как и почти для всех других влагосодержащих твердых материалов) математических моделей диэлектрических свойств. К таким моделям относятся формулы смеси, соответствующие лишь грубой бинарной модели «сухое вещество - вода» и не учитывающие свойства сложных гетерогенных систем, содержащих влагу, в частности влияние видов и форм связи влаги на их электрические свойства, а также зависимости этих свойств от частоты тока [20].

В указанных условиях в качестве базы для расчета и оптимизации параметров диэлькометрических приборов для измерения влажности зерна и зерновых культур на стадии проектирования, а также для их градуировки приходится использовать экспериментальные характеристики, описывающие зависимость диэлектрических свойств материала от влажности, частоты электрического тока, температуры и плотности материала, распределения влаги в его объеме и других влияющих величин.

2.2. Особенности высокочастотного метода измерения влажности

Анализ поведения материала в высокочастотном электрическом поле позволяет установить общие закономерности, которым это поведение подчиняется, но в то же время не дает возможности найти детерминированные зависимости, пригодные для аналитических расчетов изменений параметров материала от количества введенной в материал влаги и остается единственная возможность определять электрофизические параметры материала на основе экспериментально полученных частотно-влажностных характеристик исследуемого материала.

Высокочастотный контроль определения влажности зерна предусматривает воздействие на материал, размещенный в специальном датчике, переменным электрическим полем и определения характеристик поглощения материала, для чего проанализируем радиофизические процессы, происходящие в емкостном датчике, влияющие на измерение влажности.

Компоненты датчика характеризуются рядом параметров, и по роду единиц физических величин подразделяются на основные, зависящие от основных единиц и характеристик среды (различные скалярные величины) и производные, выражаемые через основные параметры и частоту (частично безразмерные величины).

К основным параметрам датчика относятся электрическая емкость датчика- C , индуктивность катушек – L , а в контуре основные параметры - резонансная частота, полоса пропускания.

Производными параметрами являются тангенс угла потерь, добротность,

постоянная времени и т.д.

К остаточным параметрам - наличие которых вызвано несовершенством конструкции компонентов и характеристик применяемых материалов, можно отнести (рис 2.1.):

R_1 - потери электромагнитного поля индуктивности за счет паразитных связей,

R_3 - потери электромагнитного поля за счет излучения открытых электродов,

R_4 - омические потери в катушке.

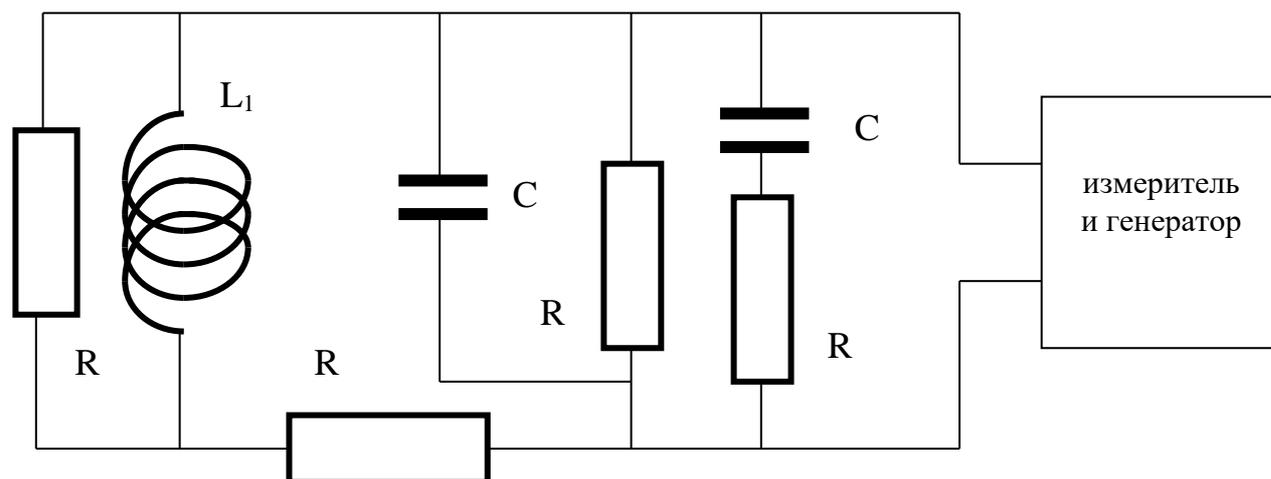


Рис. 2.1. Эквивалентная схема диэлькометрического измерителя влажности

По сравнению с главным параметром остаточные должны иметь возможно меньшие значения. Наличие остаточных параметров приводит к именованию и размыванию главного параметра компонента электрической цепи по сравнению со значением, соответствующим "совершенному" виду, поэтому для обеспечения работоспособности ВЧ-измерителей необходимо уменьшение следующих потерь:

- R_1 - путем расположения экранов с хорошо пропаянными стыками на расстоянии, не менее 2 диаметров катушки,

- R_4 - изготовлением индуктивности из толстого медного, желательно посеребренного провода,

- R_3 - разработки датчика со 100% использованием электромагнитного поля.

При условии сведения к минимуму значений R_1, R_3, R_4 , эквивалентная схема будет содержать лишь потери в материале – R_2 , которые и будут определять основные параметры (полоса пропускания, напряжение на контуре и т.д.) в зависимости от влажности.

Принцип действия ВЧ – измерителя влажности заключается в следующем: Индуктивность L_x имеющая активное сопротивление R_x и конденсатор $C_{изм}$ составляют параллельный колебательный контур. Источником питания служит высокочастотный генератор ВЧ на используемый диапазон частот.

Если добротность контура достаточно высока, резонансное напряжение на конденсаторе, пропорционально добротности катушки ($U_c = E \cdot Q$), которая определяется влажностью материала, так как поглощение электромагнитного поля зерной определяется комплексной диэлектрической проницаемостью, зависящей от влажности введенного материала и измеряя напряжение на контуре регистрируется влажность материала по градировочной зависимости.

Помещение влажного материала в конденсатор образует цепь с потерями электромагнитной энергии в материале. Однако, если при прохождении постоянного тока через материал величина поглощения определяется удельным сопротивлением материала, то при облучении материала электромагнитным полем величина взаимодействия определяется двумя факторами-осцилляцией и поворотом плоскости орбит заряженных частиц и необратимых потерь. Первое определяет действительную ϵ' , а второе мнимую ϵ'' диэлектрическую проницаемость.

Электронная, ионная и ориентационная поляризуемость многокомпонентного и гетерогенного зерен, как показано выше, вносит аддитивные вклады в комплексную диэлектрическую проницаемость зерновых материалов, $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$, где ϵ' и ϵ'' вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости.

При воздействии на материал в датчике переменного электрического поля $e = E_0 \cos \omega t$ появляется ток.

$$I(t) = \epsilon_0 E_0 \operatorname{Re} [(\epsilon' - i\epsilon'') \exp i\omega t] = \omega_0 \epsilon_0 E_0 (\epsilon'' \cos \omega t - \epsilon' \sin \omega t)$$

Составляющая, содержащая вещественную часть диэлектрической проницаемости, ϵ' - есть ток смещения, возвращаемая энергию, а составляющая, содержащая ϵ'' - ток активных, необратимых потерь. Поглощаемая 1 м^3 материала в 1 с энергия активных потерь

$$A(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(t) E(t) d\omega t = \frac{\omega}{2} \epsilon_0 \epsilon'' E_0^2,$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха; E_0 - напряженность поля в воздухе.

В качестве измерительного датчика в ВЧ системе контроля влажности зерна, нами используется конденсатор контура, поэтому исследуем его резонансные процессы.

При помещении в конденсатор измеряемого материала собственная частота контура за счет увеличения емкости измерительного конденсатора определяется формулой.

$$X_c = 1 / \Omega C$$

$$X_L = \Omega L$$

$$\Omega = 2\pi f$$

$$\text{Сравнивая получим: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Шириной полосы пропускания называют разность частот f_1 и f_2 , на которых мощность в контуре равна половине ее значения на резонансной

частоте f_0 , при этом напряжение на контуре при частотах f_1 и f_2 равно 0,707 значения при резонансной частоте, в которых вторая производная резонансной кривой равна нулю, связаны с добротностью резонансного контура почти точным равенством:

$$Q = f_0 / \Delta f \sqrt{2} = (f_1 + f_2) / 2 \sqrt{2(f_1 - f_2)}$$

f_0 - резонансная частота; f_1 и f_2 частоты, соответствующие точкам перегиба

$$\Delta f = f_1 - f_2$$

При квадратичном детектировании это выражение принимает вид

$$Q = (f_1 + f_2) / \sqrt{3(f_1 - f_2)}$$

Если измеряемое сопротивление r_x много меньше резонансного сопротивления контура x_p , то r_x вводится в контур последовательно. При этом полное сопротивление контура при резонансе

$$R = r_c + r_L + r_x$$

Разделив обе части равенства на x_p получим

$$1/Q_2 = 1/Q_1 + r_x / x_p$$

Где Q_1 и Q_2 - значения добротности контура, измеренные до и после введения r_x . Отсюда $r_x = (Q_1 - Q_2) Q_1 Q_2 2\pi f (C_k + C_0)$ добротность контура.

Использование свойств колебательного контура изменять свою добротность при введении неизвестного сопротивления позволяет определять влажность материала, но интегральный способ измерения добротности контура определяется отношением полосы частот к центральной частоте и при низкой влажности значительно снижается нелинейно. Измерители добротности трудно автоматизировать и этот метод не используется в измерителях влажности.

Для повышения разрешающей способности и точности измерений разработанных измерителях влажности применяются два генератора и влажность определяется по сдвигу частоты измерительного генератора с пробой в конденсаторе, от опорного эталонного генератора и момент резонанса фиксируется по нулевым биениям, либо используют кварцевый генератор и измеряют напряжение на контуре при резонансе и определяют влажность по градуировочной зависимости, но при увеличении влажности значительно завышается погрешность измерителей влажности на зернах.

При низкой влажности полоса пропускания контура узкая, напряжение достаточно высокое $U_k = 25$ мВ и величина напряжения для обратной связи находится на уровне $0,01 U_k$ и боковая частота при срыве генерации достаточно точно определяется.

При повышенной влажности добротность контура понижается, полоса пропускания расширена, боковые скаты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) крайне пологи и при перестройке частоты уровень напряжения на боковой ветви мало изменяется, и срыв генерации производится уже при другом весьма неопределенном уровне, и боковые значения частоты измеряются на пологом скате АЧХ с большой неопределенностью из-за чего имеется также и нелинейная зависимость от влажности, что завышает

погрешность при высокой влажности.

Уже при влажности выше 5-7% напряжение на контуре занижено мало изменяется из-за поляризационного насыщения, не учитывается нелинейность напряжения на контуре от влажности, имеется зависимость частоты контура от номинала измеряемого объекта, что увеличивает погрешность ее измерения и требует более глубокого исследования влияния фундаментальных радиофизических характеристик зерно, именно диэлектрической проницаемости на характеристики емкостных датчиков в диэлькометрических измерителях диэлектрических величин.

Исследование резонансных процессов в контуре. При изменении влажности зерна от 5% до 15% увеличивается действительная проницаемость, ($1 < \varepsilon' < 2,8$), понижающая резонансную частоту измерительного контура на $-df_{ц}$, и мнимая ($0,05 < \varepsilon'' < 0,8$), расширяющая полосу пропускания на $\pm df_{п}$ (рис.2.2.).

При этом левый скат полосы пропускания $-f$ движется влево на $-d_{п}$ и на $-df_{ц}$, т.е. суммарное смещение $f_{н} = (-df_{ц} - df_{п})$, а правый скат полосы пропускания имеет смещение влево на величину $-df_{ц}$, за счет увеличения ε' и понижения центральной частоты, и вправо на $+df_{п}$, т.е. суммарное смещение равно $f_{в} = (-df_{ц} + df_{п})$ и взаимно частично компенсируется и уменьшается информативность верхней частоты $f_{в}$ (рис.2.3.).

Отсюда видно, что наиболее информативным параметром для измерения влажности, с радиотехнических позиций процессов в контуре, является измерения влажности, использование нижней частоты полосы пропускания $f_{н}$, а потери электромагнитной энергии наиболее полно характеризуются шириной полосы использования нижней полосы пропускания $f_{н}$ и напряжением на контуре и также являются наиболее информативные.

Исследование характеристик электромагнитного поля в измерителях влажности. ВЧ-метод использует значительно заниженную частоту (длина волны 50-60 м), что устраняет неравномерность электромагнитного поля, но для обеспечения работоспособности емкостного датчика требуются специфические требования:

- Высокий коэффициент использования электромагнитного поля;
- Низкая неравномерность электромагнитного поля в измерительной камере;
- Низкая сорбция и десорбция влаги конструктивных элементов в измерительной камере;
- Легкость загрузки образца в камеру с однородной плотностью.

Рассмотрим значимость перечисленных требований:

Высокий коэффициент использования электромагнитного поля необходим, в первую очередь, для обеспечения наибольшей чувствительности к изменению влажности, так как неиспользуемое электромагнитное поле за пределами измерительной камеры не взаимодействует с материалом, перемененно шунтирует рабочее электромагнитное поле в камере, при изменении влажности пробы и, в конечном случае, уменьшает чувствительность к изменению влажности, вносит непредсказуемые факторы, кроме того нерабочее электромагнитное поле необходимо экранировать, как для независимости

влияния рук операторов, так и исключения излучений помех.

Низкая неравномерность электромагнитного поля в измерительной камере требуется для независимости чувствительности к переукладке пробы, вызванной неоднородной влажностью зерна, поэтому измерительный датчик должен иметь неравномерность электромагнитного поля меньше чем в 3-5 раз неравномерности влажности образца.

Низкая сорбция и десорбция влаги конструктивных элементов в измерительной камере обуславливается тем, что при смене проб на стенках камеры, электродах, крепящих элементах, остается сорбированная влага которая десорбируется при помещении сухого образца и наоборот, вызывая изменение показаний времени измерений, что требует минимальной массы и поверхности закрепляющих элементов.

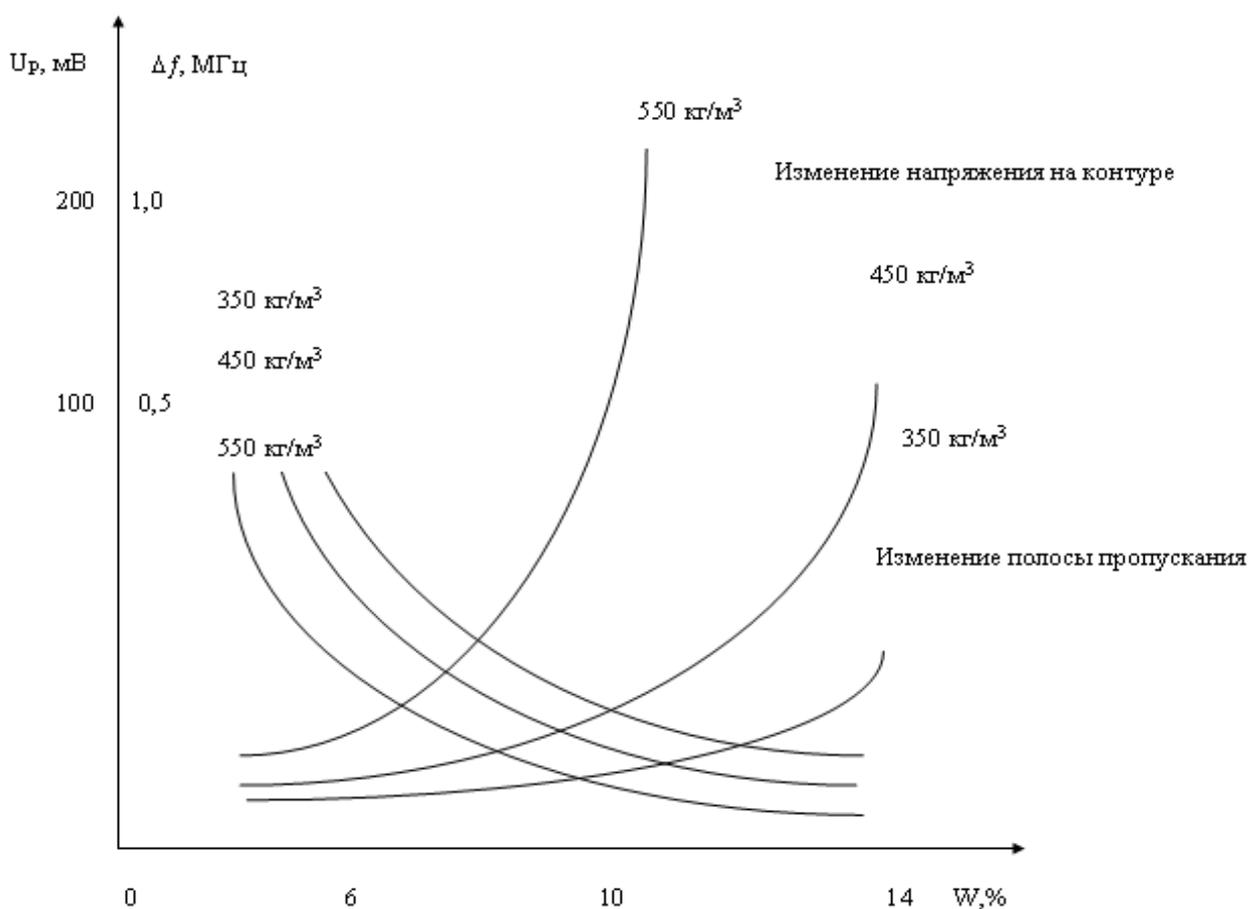


Рис.2.2. Изменение напряжения на контуре и полосы пропускания в зависимости от влажности зерна

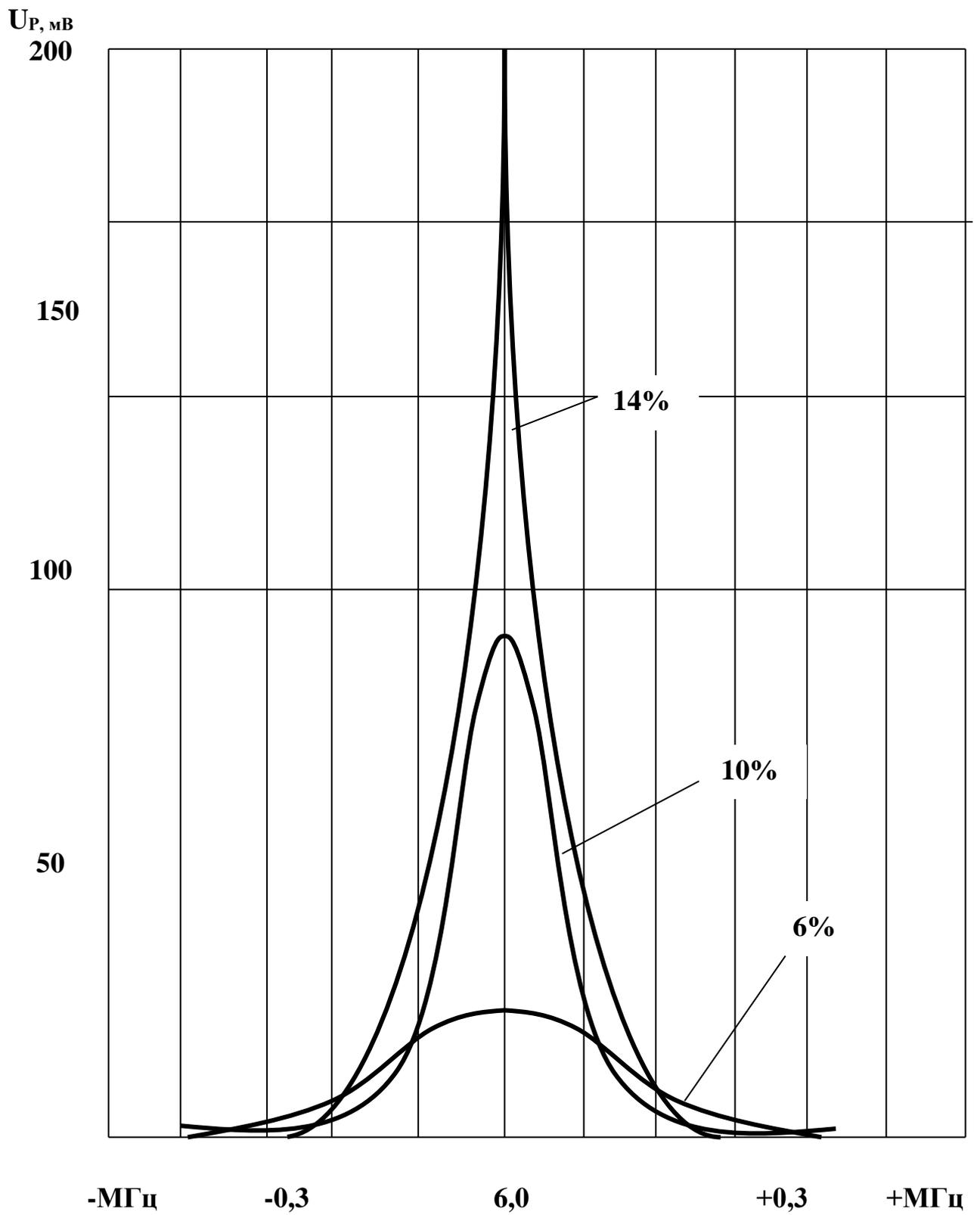


Рис.2.3. Изменение полосы пропускания в зависимости от влажности зерна

2.3. Разработка измерительного емкостного датчика измерения влажности

Рассмотренные выше диэлектрические свойства зерна будут использованы при разработке диэлькометрических приборов для измерения влажности.

Диэлькометрические методы измерения влажности исследованы для многочисленных промышленных материалов и сельскохозяйственной продукции.

Основные достоинства приборов, основанных на этом методе, - компактность, простота в наладке и обслуживании и во многих случаях достаточная для технологических целей точность. Электрический выходной сигнал позволяет сопрягать эти приборы непосредственно с устройствами управления технологическими процессами, а также с устройствами передачи, обработки и хранения информации [29].

Диэлькометрические измерители влажности строятся по схемам измерения параметров конденсаторного датчика — активной или реактивной составляющих полного сопротивления или его модуля.

Иногда для увеличения точности измеряются обе составляющие полного сопротивления, в других случаях схемы строят таким образом, чтобы устранить влияние одной из составляющих на результат измерения.

Наиболее распространены дифференциальные, резонансные, мостовые измерительные схемы, причем измерения могут проводиться как путем прямого отсчета, так и замещением. Схемы с прямым отсчетом проще в эксплуатации, однако большую точность обеспечивают схемы замещения.

Схемная реализация каждого из измерителей определяется предъявленными к нему требованиями, особенностями условий измерения и контролируемого материала.

Использование двухстороннего плоского конденсатора увеличивает коэффициент использования электромагнитного поля, но также устраняет деформацию электромагнитного поля во внешних торцевых объемах и имеет чувствительность к окружающим предметам [30].

Поэтому для соответствия к основным перечисленным требованиям устранения перечисленных факторов (R_1 , R_3 , R_4), вызывающих снижение точности измерителей влажности, в данной работе используется датчик – 9 (рис.2.4.). Датчик представляет собой параллелепипед с размерами (ширина 200 мм, высота 300 мм, длина 70 мм). К боковым стенкам на расстоянии 70 мм прикреплены две параллельные между собой пластины. В качестве параллельных пластин применяются плоские металлические пластинки. Корпус датчика сделан из диэлектрика.

Принцип действия емкостных преобразователей

Емкостные преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров, расположения его обкладок и от диэлектрической проницаемости среды между ними.

Для плоского конденсатора электрическая емкость определяется выражением:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta},$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная; ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; S - активная площадь обкладок; δ - расстояние между обкладками. Из этого выражения следует, что в емкостном преобразователе переменной (входной) величиной может быть либо δ , либо S , либо ε .

На рис. 1 схематично изображены различные типы емкостных преобразователей.

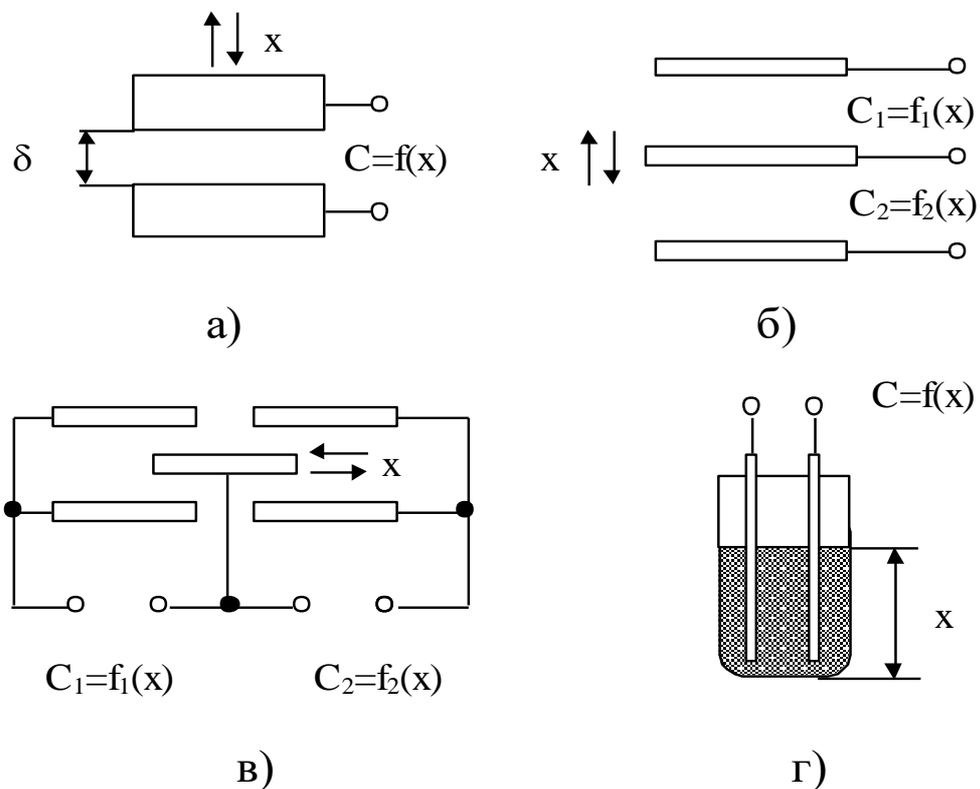


Рис. 1. Емкостные преобразователи

Преобразователь на рис. 1, а представляет собой конденсатор, одна пластина которого перемещается относительно другой так, что изменяется расстояние δ между пластинами. Функция преобразования $C=f(\delta)$ нелинейная, причем чувствительность возрастает с изменением расстояния между δ между пластинами. Функция преобразования $C=f(\delta)$ нелинейная, причем

чувствительность возрастает с уменьшением δ . Минимальное значение δ определяется напряжением пробоя конденсатора. Такие преобразователи используются для измерения малых перемещений (менее 1 мм).

На рис. 1, б показан дифференциальный емкостный преобразователь, в котором при перемещении центральной пластины емкость одного конденсатора увеличивается, а другая уменьшается. Дифференциальная конструкция позволяет уменьшить погрешность нелинейности или увеличить рабочий диапазон перемещений.

Преобразователь на рис. 3, в также имеет дифференциальную конструкцию, но в нем происходит изменение активной площади пластин. Он используется для измерения сравнительно больших линейных (более 1 мм) и угловых перемещений. В таком преобразователе можно получить необходимую функцию преобразования путем профилирования пластин.

Емкостные преобразователи просты по конструкции, имеют высокую чувствительность и относительно малую инерционность. К их недостаткам следует отнести влияние внешних электрических полей, паразитных емкостей, температуры, влажности.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

3.1. Разработка измерительной схемы преобразователя влажности зерна

Для расширения диапазона измерения влажности (от 5 до 15%), необходима как достаточно узкая полоса контура df , для высокой чувствительности к низкой влажности зерна, так и высокая добротность при высокой влажности.

Объектом сравнения, т.е. образцовым эталоном в разрабатываем приборе для определения влажности зерна является колебательный контур, именно индуктивность, что требует обеспечения минимального изменения его параметров, отсутствия шунтирования параллельными конденсаторами для его перестройки. Поэтому контур изготовлен с максимальной индуктивностью и в качестве конденсатора используется только измерительный плоскопараллельный датчик, параметры которого изменяются только от состояния материала.

Для удовлетворения этим требованиям разработан лабораторный макет измерителя влажности зерна: Макет измерителя влажности с оптимальным датчиком, где в качестве измерительных приборов использовались внешний генератор, ВЧ - вольтметр и частотомер, для снижения инструментальной погрешности при исследовании метода, которые возникали из-за низкой точности использованного стрелочного ВЧ-вольтметра, и определения метрологических характеристик метода.

АЧХ контура измеряется (рис3.1.) подачей от ВЧ-генератора - 1 напряжения с перестройкой на $\pm \Delta f$ и измеряется ширина полосы пропускания частотомером - 4, методом "вилки", путем расстройки на уровень 0,707 относительно максимального резонансного напряжения на контуре U_K в обе стороны и измеряются частоты f_H и f_B , что обеспечивает ее высокую точность определения по этим значениям как полосы пропускания, так и центральной: частоты контура и измерения напряжения в контуре.

Известно, что выходные сопротивления предыдущих цепей (у генератора достаточно низкое - 75 Ом) передаются в нагрузку и расширяют полосу пропускания, что требует оптимальной согласованности генератора с измерительным контуром, и минимального шунтирования и влияния подсоединенных цепей на ширину полосы пропускания и измерителя напряжения на параметры контура. Для обеспечения этого требования генератор подключается к индуктивности на уровне 1/5, емкость конденсатора связи с вольтметром равна 15 пФ.

3.2. Экспериментальные исследования макета измерителя влажности

3.2.1. Методика проведение экспериментальных исследований

Для сравнительных измерений использовались следующие приборы:

1. Стандартный метод определения влажности (совместно с УЗ-8)
2. Вольтметр ВЗ-56
3. Генератор стандартных сигналов Г4-18А
4. Цифровой вольтметр постоянного тока
5. Частотомер Щ-4300
6. Весы ВЛКТ-500

Измерение проводились на образцах зерна с различной влажности и засоренностью 25% и 8%, селекции «Красный водопад» место произрастания Ташкент, Самарканд и Фергана.

Образец зерна для измерения влажности увлажнялся распылением много игольчатыми шприцами водопроводной воды и загружался в полиэтиленовые пакеты на 4 суток, каждый день перемешивался для установления приемлемого соотношения влажности.

После загрузки пробы в камеру изменялось напряжение на контуре U_x , полоса пропускания f_v , f_n , после чего из каждой секции отбирались равномерно пинцетом пробы зерна по 20 г и проводилось измерение влажности образцовым методом, с учетом потери массы на весах ВЛКТ-500.

Обработка экспериментальных данных. В соответствии с изложенными радиофизическими представлениями резонансных характеристик контура, выявлено:

при понижении влажности расширяется полоса пропускания и понижается напряжение на контуре, поэтому для взаимного учета эти наиболее информативные данные обрабатываются отношением половины полосы пропускания к напряжению на контуре по формуле:

$$\alpha df = \text{arc tg} [(f_c - f_n) / U_x]$$

Исследование изменение частотных параметров, в зависимости от влажности, подтвердили результаты теоретических исследований с наиболее оптимальной нижней боковой частоты - f_n и незначительную чувствительность верхней частоты - f_v к влажности.

При изменении влажности от 5% до 15% верхняя частота f_v – изменяется на 0,2 мГц, а нижняя f_n - на 0,6 – 0,8 мГц, т.е. в 3 раза больше по сравнению с верхней. В то же время отношение среднеквадратической погрешности к интервалу изменения (СКО/ ΔF) у верхней и нижней частоты ($F_v - 0,275$, а у $F_v - 0,31$), но наибольшая чувствительность к влажности у нижней частоты.

$\Delta F_n / \Delta W = 0,8 \text{ мГц} / 24$, $6\% = 36,5 \text{ кГц} / \%$ на 1 процент влажности.

Остальные параметры менее информативны из-за меньшей

чувствительности к влажности и могут использоваться как вспомогательные.

Для получения зависимости от влажности образцы зерна искусственно увлажняли. Количество добавляемой воды рассчитывали по формуле:

$$M_B = M_0 \left(\frac{100 - W_n}{100 - W_k} - 1 \right)$$

где M_B – количество добавляемой воды, г;

M_0 - количество материала, г;

W_B – исходная влажность материала, %;

W_k – конечная влажность материала, %.

Затем пробы зерна помещают в полиэтиленовые пакеты, в которых выдерживаются в течении четырех суток, при периодическом перемешивании. Это производится для усреднения влажности по объему.

Постоянная плотность образцов достигается помещением постоянной массы материала в измерительный преобразователь постоянного объема.

Величина дисперсии определяется по формуле:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^2}{(n-1)} - \frac{\sum_{i=1}^n W_i^2}{n(n-1)} - \frac{(n \sum_{i=1}^n x_i W_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n W_i^2)}{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2](n-1)n}$$

где x – измеряемая величина;

n – количество измерений;

W_i - значения влажности соответствующие измеряемой величины;

Систематическая составляющая погрешности определяется по формуле:

$$\Delta_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$$

где $\Delta_i = W_i - W_0$

W_i - измеренное значение влажности i -го образца на образцовой установке;

W_0 - измеренное значение влажности i -го образца на устройстве.

Инструментальная погрешность δ_i измерений при i – том уровне ослабления, вносимого аттенуатором

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_{in})^2}{n-1}}$$

где α_{in} – n -тое измерение ослабления электромагнитных колебаний.

Коэффициент вариации показания прибора, выраженный в процентах

$$\varphi_i = \frac{\delta_i}{\alpha_i} 100\%$$

3.2.2. Влияние засоренности пробы на показания измерительного преобразователя

Для изучения влияния засоренности на работу макета были приготовлены образцы зерна с различной засоренностью. Для этого вначале измерялось резонансное напряжение на контуре на очищенном образце. Затем из образца

удалялась часть зерна и заменялась сорными примесями. Масса всего образца при этом оставалась постоянной. Полученный таким образом образец перемешивался и также измерялся в рабочей камере в 4-5 повторностях. Затем часть зерна вновь заменялось сором, и процесс повторялся. Результаты измерений приведены на рис 3.2. Из рисунка видно, что в изученном диапазоне засоренностей 0-32% зависимость засоренности очень слаба. Один процент сорных примесей изменяет величину ослабления на 0,0015 или в пересчете на проценты влажности, вызывает изменение показания на 0,013% абс. Следовательно, можно сделать вывод, что измерительный преобразователь влажности малочувствителен к изменению засоренности зерна и ее влиянием можно пренебречь.

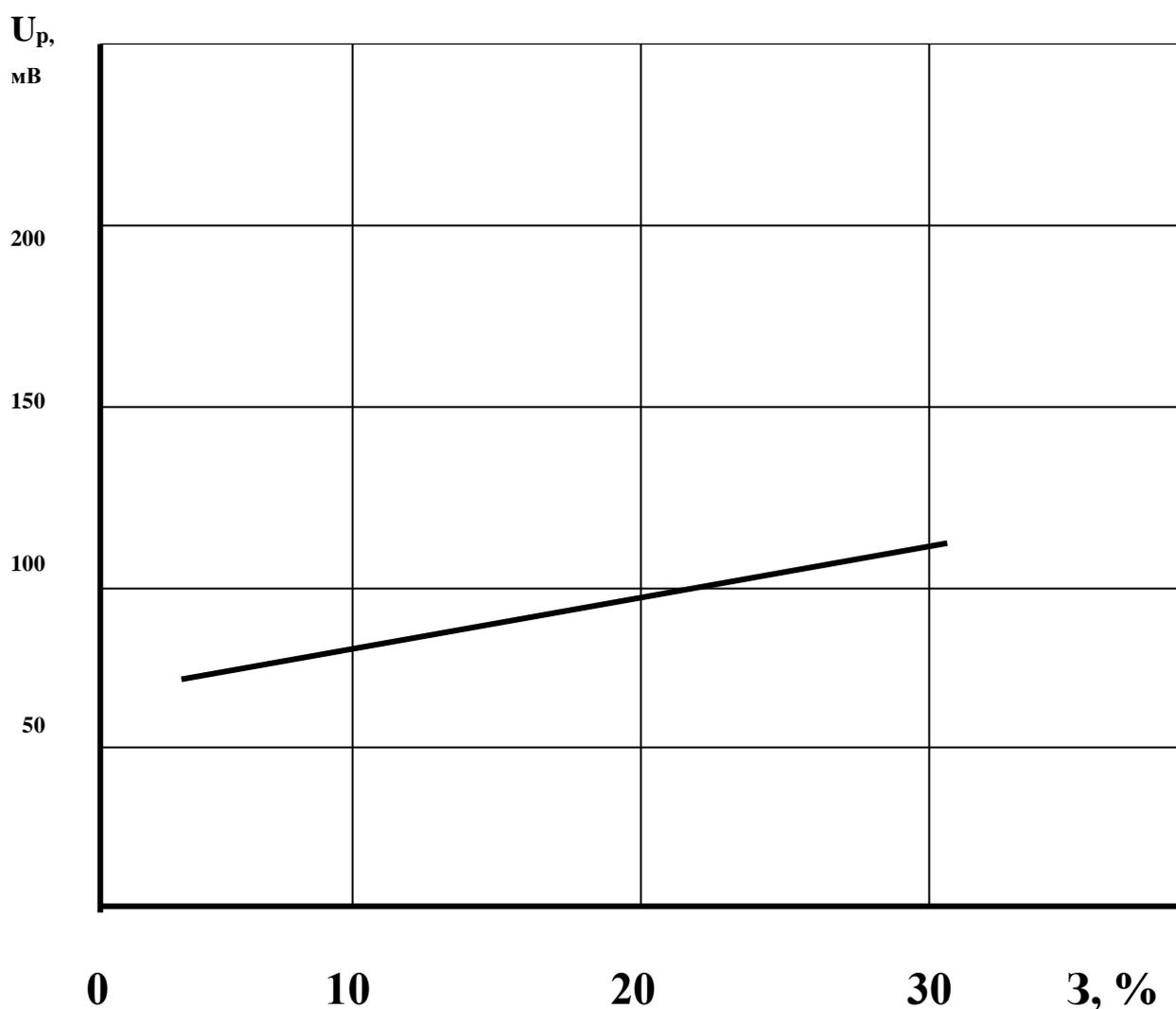


Рис.3.2. Влияние засоренности пробы на результаты измерения изменения резонансного напряжения на контуре

3.2.3. Определение градуировочных зависимостей и метрологических параметров макета измерителя влажности

Для проведения предварительной градуировки макета были проведены испытания нескольких образцов зерна различных сортов при оптимальных условиях работы. Масса образцов была взята 1000 г. Результаты измерений приведены на рис 3.3.

Ошибка измерения, выраженная в процентах влажности, не превышала 0,8% абс. Из рисунка видно, что зависимость ослабления от влажности носит почти линейный характер. Следовательно, вывод, сделанный с помощью теории прохождения сквозь пористые среды, о линейном характере этой зависимости, подтверждается. Различие зависимостей для образцов различных промышленных сортов заключается в изменении крутизны.

На рис. 3.4. приведен график зависимости изменения резонансного напряжения на контуре и соответствующие этим изменениям значения влажности зерна.

По результатам экспериментальных исследований, проведенных при выбранных массах образцах на ЭВМ было определено уравнение регрессии исследуемых зависимостей

$$U_p = -413,27 + 166,5*W + 0,645*W^2 \quad (3.1)$$

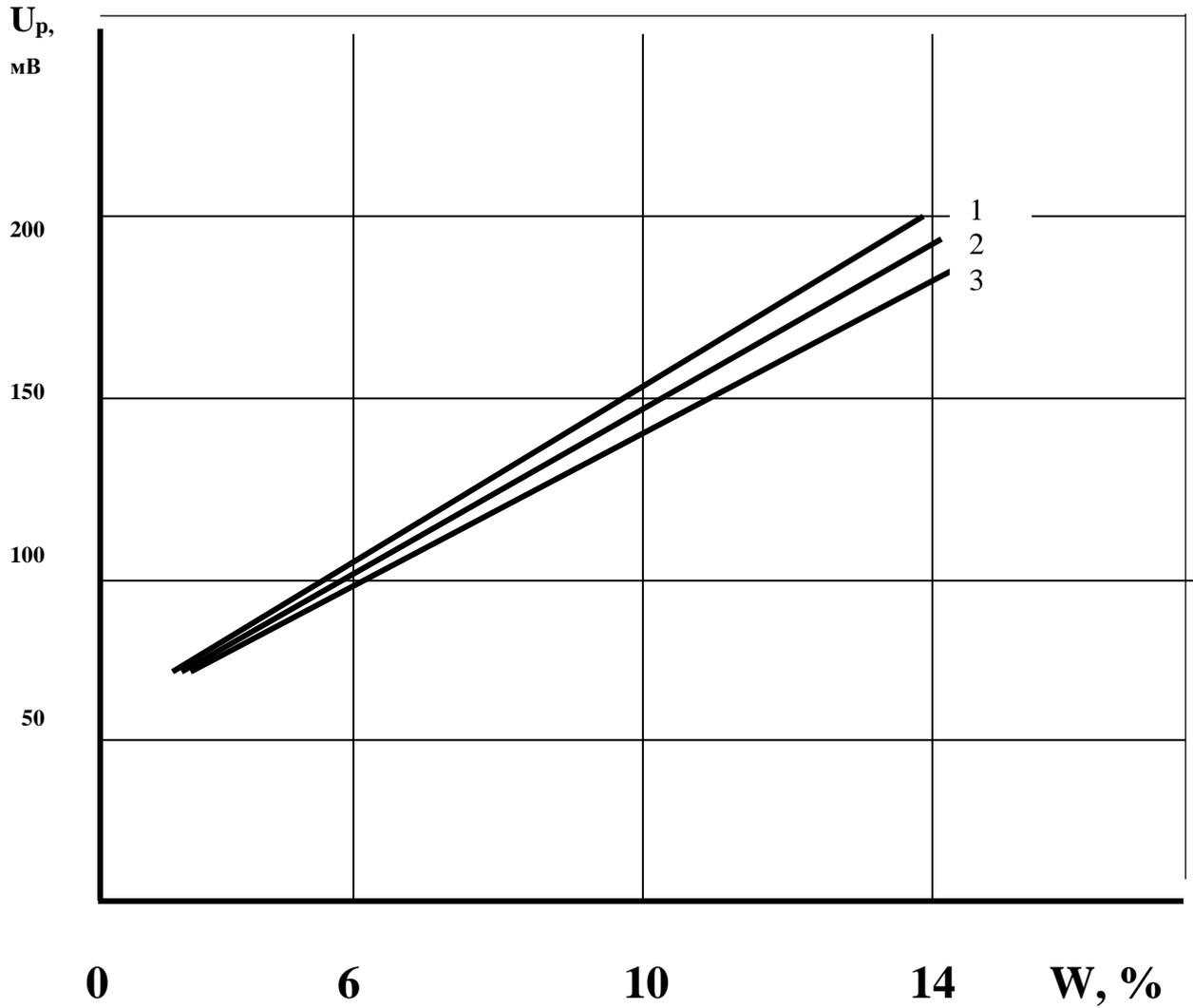
Зависимость обратная выражению (3.1) представляют собой градуировочную характеристику и имеют вид

$$W = -2,143*10^{-5} U_p + 0,0054 U_p + 2 \quad (3.2)$$

Из (3.2.) определим чувствительности преобразования

$$S = d U_p / dW = 21,48*10^{-2} W + 0,981 \quad (3.3)$$

Анализируя полученные результаты определяем основные метрологические параметры разработанного измерителя влажности зерна.



- 1 – образец «Ташкент»
- 2 – образец «Самарканд»
- 3 – образец «Фергана»

Рис.3.3. Зависимость изменения резонансного напряжения на контуре от влажности зерна

ПОКАЗАТЕЛИ НАЗНАЧЕНИЯ

Масса пробы зерна	900- 1200 г
Время непрерывной работы прибора, часов	72
Полное время измерения от начала загрузки до выгрузки пробы, минут, не более	1
Частота измерений в час, не менее	40

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Единица измерения изменений напряжения на контуре	мВ
Единица измерения полосы пропускания	МГц
Диапазон измерения влажности, %	5-20
Погрешность измерения величины влажности, % (абс.)	± 1
Устойчивость к воздействию факторов окружающей среды	ГОСТ 12997-88

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований и полученных экспериментальных данных по диссертационной работе можно сделать следующие выводы:

1. Проведен обзор литературы и критический анализ современного состояния техники и технологии определения влажности зерна и зерновых культур.

2. Усовершенствован макет высокочастотного измерительного преобразователя влажности зерна в электрический сигнал.

3. Изучено влияние засоренности и сорта пробы на результаты измерений.

4. Определены технические характеристики преобразователя. Они составляют:

- диапазон измеряемых величин влажности 5 - 20%,
- погрешность измерения $\pm 1\%$ абс.

5. Исследованы градуировочные зависимости измерителя влажности зерна.

6. Определены метрологические параметры макета.

Литература

1. Каримов И.А. Узбекистан по пути углубления экономических реформ. Ташкент: Узбекистан, 1995.
2. Егоров Г. А. и др. Технология и оборудование мукомольно-крупянной и комбикормовой промышленности. М.: МГАПП, 1996. С.286.
3. Трисвятский Л.А., Шатилов И.С. Товароведение зерна и продуктов его переработки. М.: Колос, 1992. С. 122.
4. Мельник Б. Е. И др. Технология приемки, хранения и переработки зерна. М.: Агропромиздат, 1991. С.328.
5. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. Минск: Высшэйшая школа, 1974, 349 с..
6. Болдырев В.М., Патрушев В.Л. Результаты исследования влажностной зависимости диэлектрических параметров зерна сильных пшениц на СВЧ // В сб.: Исследования по математике, физике и химии. Саратов, 1978. С.12-23.
7. Берлинер М. А. Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. 400 с..
8. Nelson S.O., Stetson L.E. 259-Hz to 12 GHz dielektrik properties of grain and seed. Trans& of the ASEA. 1975. 18(4). Pp.714-715,718.
9. Рулев В.Ф. Применение сверхвысоких частот для измерения влажности зерна // Электронная техника. Сер.1, Вып.2. 1970. С.17-134.
10. Busker L.H. Measurement of water content above 30% by mikrowave absorpstion method. Tappi. 1968. Vol. 51 (8). Pp. 348-353.
11. Рулев В.Ф. Исследование и разработка СВЧ влагомера для зерна: Дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук НИИ "Исток". М.,1974. 158 с.
12. Дебай П.П. Полярные молекулы. М., 1931. 247 с.
13. Секанов Ю. П. Влажометрия сельскохозяйственных материалов. М., Агропромиздат, 1985. С.276
14. Правила организации и введения технологического процесса на мельницах - М.: ЦНИИТЭИ Ми СССР, 1978.
15. Автоматизация и механизация технологических процессов и управления на хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятиях.// Труды. Вып.№100. Отв. ред. Л.А. Трисвятский. М.: Внииз,1982.
16. Исматуллаев П.Р., Махмудов М.И., Тургунбоев А. Расчет допустимой погрешности полевого влагомера для измерения влажности зерна.// Актуальные вопросы в области гуманитарных, социально-экономических и технических наук. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск №4, Ташкент, 1997. С. 11-15.
17. Хранение зерна и зерновых продуктов /Пер. с англ. М.: Колос, 1978.
18. ГОСТ 13586.5-93. Зерно. Метод определения влажности.
19. ГОСТ 13496.3-92. Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения влаги.
20. Вода в пищевых продуктах /Пер. с англ. Под ред. Р. Б. Дакуорта М.: Пищевая промышленность, 1980. 376 с.

21. Панкратова К.Г., Файбушевич Г.З., Якунин А.С., Опишанский В.Н. Влажность зерна и методы ее определения. –М.:ВНИИТЭСХ,1977. 52 с.
22. Zoerb G. C. Physical Properties of wheat for moisture content determination. Transactions of the ASAE. 1972. Vol. 15. P. 3.
23. Пляц О. М., Ярошевич Ю. Н. Акустическая влагометрия: состояние и перспективы развития. Экспресс-информация. Сер. Сельское хозяйство. Минск: Белорусский НИИ научно-технической информации и технико-экономических исследований Госплана БССР, 1982. С. 20.
24. Митчелл Дж., Смит Д. Акватметрия. - М.: Химия, 1980. 600 с.
25. Першин А. А., Глушкова Л. Т. Номенклатура и принцип построения нейтронных влагомеров и средств их поверки. //Измерительная техника. 1980. №4. С. 51-53.
26. Регулирование и измерение влажности. Аналитическая информация. М.: Информприбор, 1991. 24 с.
27. Мухитдинов М. М. Оптические методы и устройства контроля влажности. М.: Энергоатомиздат, 1986.
28. Багдасарян Л.В. и др. Инфракрасный влагомер с микропроцессорной системой //Приборы и системы управления. М.: Машиностроение, 1992. №3. С. 21-23.
29. Экспрессный инфракрасный анализатор зерна «Спектран-1». Рекламный листок. Разработчик – М.: ВНПО «Зернопродукт». 6 с.
30. Влагомеры для сельского хозяйства и пищевой промышленности. Экспресс-информация. Вып. 11. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1986.
31. Кричевский Е. С. Высокочастотный контроль влажности при обогащении полезных ископаемых. М.: Недра, 1972.
32. Кричевский Е.С., Бензарь В.К., Венедиктов М.В. и др. /Под общ. Ред. Е.С. Кричевского. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М.: "Энергия", 1980. 240 с.
33. Ж.Усманов, Н.Буназаров. О некоторых проблемах внедрения системы менеджмента качества в производства. Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук. Межвузовский сборник. Выпуск 1.Ташкент. 2008. 71-74с.
34. Ф.Ильясов, Н.Буназаров, Ш.Мамашарипов. HTML как средство создания электронных учебных пособий. Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук. Межвузовский сборник. Выпуск 1.Ташкент. 2008. 120-123с.
35. Н.Буназаров, А.Тургунбаев. Высокочастотный метод и прибор для измерения влажности. “Фан, таълим ва ишлаб чиқариш интеграциясини таъминлашнинг долзарб муаммолари”. Халқаро илмий-амалий анжуман. Ёш олимлар, аспирантлар, магистрантлар ва иктидорли талабалар танлови. Тошкент. ТошДТУ. 2008 й.