

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. В. Лисовский, И. А. Титовицкий

**МИКРОВОЛНОВОЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК**

Минск
БГАТУ
2013

УДК 631.531.011.3:53

Лисовский, В. В. Микроволновой контроль влажности в технологических процессах АПК / В. В. Лисовский, И. А. Титовицкий. – Минск : БГАТУ, 2013. – 400 с. : ил. – ISBN 978-985-519-636-6.

В монографии изложены теоретические основы микроволновых методов контроля влажности твердых, жидких и сыпучих сельскохозяйственных материалов. Приводятся результаты экспериментальных исследований основных типов первичных измерительных преобразователей микроволновых влагомеров. Дается методика инженерного расчета основных узлов устройств контроля влажности. Приведены результаты разработки и внедрения в сельскохозяйственное производство свыше 40 типов отечественных влагомеров «Микрорадар» и «Аквар-систем», а также описание и технические характеристики микроволновых измерителей влажности ведущих зарубежных производителей.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области сельскохозяйственного приборостроения, автоматизации и контроля производственных процессов в АПК, а также студентов старших курсов и аспирантов высших сельскохозяйственных учебных заведений.

Табл. 23. Ил. 146. Библиогр.: 166 назв.

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор *В. Р. Соболев*,
доктор технических наук, профессор *В. А. Конев*

ISBN 978-985-519-636-6

© БГАТУ, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ВЛАЖНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА	9
1.1. Оптимизация конструкторско-технологических решений при разработке влагометрических систем.....	12
1.2. Влияние влаги с различной энергией связи с твердым веществом на его диэлектрические свойства.....	17
1.3. Частотные характеристики воды и влажных веществ. Обоснование выбора частотного диапазона	20
1.4. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности капиллярно-пористых материалов в микроволновом диапазоне.....	26
1.4.1. Взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности мелкодисперсных материалов	37
1.5. Исследование диэлектрических свойств связанной воды в зерне в радио- и микроволновом диапазонах электромагнитного излучения.....	56
1.5.1. Теоретическая модель расчета диэлектрических свойств зернового материала как двухуровневой дисперсной системы	60
1.5.2. Диэлектрические свойства связанной воды в зерне	69
2. МЕТОДЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ВЛАГОМЕТРИИ	88
2.1. Оптические методы (методы свободного пространства).....	88
2.1.1. Амплитудные методы и параметры преобразования.....	94
2.1.2. Фазовые методы и параметры преобразования.....	104
2.1.3. Отражательные методы и параметры преобразования.....	107
2.1.4. Многочастотные методы и параметры преобразования.....	110
2.2. Методы локализованного поля.....	113
2.2.1. Резонаторные методы и параметры преобразования.....	116
2.2.2. Резонаторные датчики измерения влажности зерновых материалов коаксиального типа	127
2.3. Комбинированные методы	157
2.3.1. Комбинированный СВЧ-акустический метод	169
2.4. Экспериментальная проверка основных параметров преобразования	179
2.4.1. Амплитудные параметры преобразования	179
2.4.2. Фазовые, отражательные, комплексные и комбинированные параметры преобразования.....	190
3. ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ МИКРОВОЛНОВЫХ ВЛАГОМЕРОВ.....	206
3.1. Требования к конструкции первичных измерительных преобразователей	208
3.1.1. Оптимизация конструкции ПИП «на прохождение»	212
3.1.2. Оптимизация конструкции ПИП «на отражение»	218
3.1.3. Влияние засыпки сыпучих материалов на параметры ПИП	229
3.1.4. Исследование влияния геометрических размеров приемопередающих устройств на метрологические характеристики ПИП.....	232
3.2. Разработка генераторных узлов	250
3.2.1. Результаты исследований резонатора 30×17,5×6	256
3.2.2. Разработка конструкции СВЧ-генератора	263
3.3. Сравнительный анализ промежуточных измерительных преобразователей	268
3.3.1. Измерительные преобразователи на основе видеодетектирования.....	269
3.3.2. Измерительные преобразователи компенсационного типа	288
3.3.3. Автодинный измерительный преобразователь	290
3.3.4. Измерительный преобразователь на основе автодинного смесителя частоты.....	298
3.3.5. Сравнительный анализ метрологических характеристик промежуточных измерительных преобразователей.....	306
4. СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭКСПРЕССНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК	317
4.1. Влагомеры серии «Микрорадар».....	318
4.1.1. Лабораторный СВЧ-влагомер «Микрорадар-101»	318
4.1.2. Влагомеры зерна поточные серии «Микрорадар-113» МР-113, МР-113М и МР-113-2	320
4.1.3. Резонаторные поточные СВЧ-влагомеры для свеклосахарного производства «Микрорадар-114с»	323
4.1.4. Резонаторный поточный СВЧ-влагомер сухого молока «Микрорадар-114м»	326
4.1.5. Лабораторный резонаторный влагомер сыпучих сельскохозяйственных продуктов «Микрорадар-101.2» (МР-101.2)	327
4.2. Влагомеры «Аквар-систем»	330
4.2.1. Многопараметрический микроволновой влагомер зерна в потоке «А-315»	330

4.2.2. Микроволновой датчик влажности листовых материалов А 313 CAN.....	334
4.2.3. Микроволновые датчики концентрации «А-343», «А-344»	336
4.2.4. Инфракрасный влагомер сыпучих и листовых материалов А1108	339
4.3. Зарубежные микроволновые влагомеры	341
4.4. Микроволновые влагомеры в системах непрерывного контроля и регулирования влажности	354
4.4.1. Автоматический контроль и регулирование влажности в мукомольном производстве влагомерами «Микрорадар»	354
4.4.2. Результаты испытаний системы автоматического контроля и регулирования влажности в мукомольном производстве на основе влагомера «Микрорадар 113-2»....	362
4.5. Автоматизированная система контроля влажности и доувлажнения зерна на основе резонаторного датчика влагосодержания зерновых материалов	368
5. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ	375
5.1. Методика градуировки «Микрорадар-101»	378
5.2. Методика поверки влагомера лабораторного «Микрорадар-101».....	380
5.3. Поверочные схемы влагомеров твердых веществ и материалов.....	386
5.4. Стандартные образцы для градуировки и поверки микроволновых влагомеров	387
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	390

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения конкурентоспособности сельскохозяйственного сырья и продуктов переработки становится все более острой для отечественных товаропроизводителей.

Влажность является тем ключевым параметром, от достоверности контроля которого зависит решение задачи максимального снижения себестоимости переработки продукции при сохранении ее высокого качества.

Достижения научно-технического прогресса приводят к совершенствованию старых и созданию новых технологических процессов в производстве, хранении и переработке сельскохозяйственной продукции. Эффективность процессов АПК непосредственно связана с энерго- и ресурсосбережением при получении конечной продукции высокого качества.

Из большого числа параметров, влияющих на ход технологического процесса и качество получаемой продукции, которые подлежат обязательному контролю, – ключевым является влажность. Так, сокращение потерь при уборке, первичной переработке, хранении и транспортировке сельскохозяйственной продукции во многом зависит от точности определения ее влажности. Каждый процент систематической погрешности измерения влажности может привести к искажению статистических данных о произведенной продукции АПК. Например, при систематической погрешности определения влажности зерна только на 1 %, неопределенность в установлении действительного его количества, произведенного в республике, составит 90–100 тыс. т, или свыше 60–80 млрд белорусских рублей. Аналогичные примеры можно привести в отношении льна, сахара, сухого молока, травяной муки и других продуктов сельскохозяйственного производства [1–5].

От точности измерения влажности зависят:

- качество и сохранность зерна и зернопродуктов, сахара, соевого, табака, минеральных удобрений и т. д.;
- режим полива полей и тепличного грунта;
- производительность зерноуборочной техники и зерносушилок;
- качество и выход высокосортовой муки при помоле и др.

Эффективность грузоперевозок также зависит от влажности, так как перевозка зерновых влажностью на 1 % выше кондиционной