

Автор ер.  
Ж 91

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

**ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА**

---

**НА ПРАВАХ РУКОПИСИ**

**ЖУРБЕНКО  
АЛЕКСЕЙ АЗАМатович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ ВЛАЖНОСТИ  
С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ  
ВЛАГОМЕРОВ ЗЕРНА**

Специальность 05.13.07.

Автоматическое управление технологическими процессами  
(в пищевой промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

ОДЕССА — 1975

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ЖУРБЕНКО

Алексей Азаматович

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
АНАЛОГОВ ВЛАЖНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ПОСТРОЕНИЯ И  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВЛАГОМЕРОВ ЗЕРНА

Специальность 05.13.07

Автоматическое управление технологическими процессами  
(в пищевой промышленности)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОНАХТ 28.07.11  
Исследование методов



v012590

Дереу: ст 1985

Одесса - 1975

v012590

Одесский технологический  
институт пищевой промыш-  
ленности им. М. В. Ломоносова

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова.

Научные руководители :

доктор технических наук, профессор П.Н.ПЛАТОНОВ  
кандидат технических наук, доцент Л.Л.ХУДОЛЕЙ

Официальные оппоненты :

доктор технических наук, профессор Е.С.КРИЧЕВСКИЙ  
кандидат технических наук, доцент А.А.ПИКЕРСКИЛЬ

Ведущее предприятие - Всесоюзный научно-исследовательский институт аналитического приборостроения, г.Киев

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ 1975 г.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_\_ 1975 г.  
на заседании Ученого Совета факультета автоматизации и приборостроения Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах заверенные печатью, просим направлять по адресу: 270039, г. Одесса-39, Свердлова, 112, ОТИПИ им.М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫМ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
кандидат технических наук

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**А к т у а л ь н о с т ь р а б о т ы.** Метрологическое обеспечение измерителей влажности сводится к их градуировке, поверке и аттестации путем сличения показаний с "действительной" влажностью параллельных проб, определяемой весовым методом. При поверке большого количества влагомеров данный метод не лишенный субъективности становится громоздким и трудоемким. Создание электрических аналогов влажности обеспечит проектирование влагомеров, их градуировки и ее поверку на основе объективных математических методах, что позволит проводить систематическую поверку влагомеров в условиях эксплуатации.

**Ц е л ь р а б о т ы** заключается в исследовании и разработке методов синтеза электрических аналогов влажности сыпучих материалов.

**Н а у ч н а я н о в и з н а** заключается в исследовании, обосновании и разработке методов синтеза электрического аналога влажности. Наличие аналога влажности позволит на научном основе решать задачи проектирования и эксплуатации измерителей влажности сыпучих материалов.

**П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь** заключается в том, что разработанные алгоритмы и программы для ЭЦМ значительно сокращают время расчета аналогов влажности и расширяют возможности экспериментатора-разработчика при проектировании высокочастотных измерителей влажности.

**А п р о б а ц и я р а б о т ы.** Результаты настоящей работы доложены и одобрены на научно-технических конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова 1972, 1974 гг.

На Республиканской научно-технической конференции "Средства автоматизации и системы управления", Севастополь, 1972.

На У Всесоюзной научно-технической конференции "Достижения и перспективы работ в области разработки приборов и методов измерения влажных твердых, жидких и газообразных веществ" Кутаиси, 1973.

На Республиканской научно-технической конференции "Научное приборостроение", Киев, 1973.

На городском семинаре по кибернетике и автоматическому управлению, Одесса, 1973.

На XII конференции молодых специалистов Всесоюзного научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства, Москва, 1974.

П у б л и к а ц и и. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 работ.

С т р у к т у р а диссертационной работы. Работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложения, включающего в себя экспериментальные данные и программы расчета на ЭЦМ.

В Обращении ЦК КПСС к партии, к советскому народу поставлена задача — энергично добиваться, чтобы продукция наших предприятий не только не уступала зарубежным образцам, но и превосходила их. Борьба за качество — это последовательная программа действий, охватывающая все стадии разработки, изготовления и эксплуатации изделий.

Влажность является одним из основных показателей качества промышленной и сельскохозяйственной продукции, контроль которой является сложной и пока не полностью решенной задачей. Одной из причин, сдерживающих это, является отсутствие эталонных образцов влагосодержания различных сыпучих материалов, позволяющих оперативно определять работоспособность влагомеров.

Создание совершенных влагомеров, повышение их надежности должно решаться одновременно с совершенствованием методов градуировки и поверки приборов. Внедрение приборов и их эффективное использование в производстве невозможно без опережающего развития метрологической базы.

Успешному решению проблемы измерения влажности сыпучих материалов способствуют исследования их электрофизических свойств, выполненных в последние годы в СССР и за рубежом.

Обобщение результатов исследования электрофизических свойств различных сыпучих материалов позволяет развить методы расчета электрических аналогов влажности, которые давали бы возможность определять структуру и оптимальные параметры измерительных устройств не путем кропотливого подбора этих параметров на основе анализа многих вариантов, а непосредственно методом синтеза, исходя из технических условий.

Не претендуя на исчерпывающий перечень проблем влагомер-

рии, можно считать, что одним из актуальных направлений в ближайшие годы будет применение аналитических методов при разработке, градуировке и эксплуатации влагомеров.

В первой главе приводится анализ публикаций, который показывает, что работы по изучению метрологических характеристик влагомеров ведутся, в основном, по следующим направлениям:

- разработка новых и совершенствование существующих методов измерительного преобразования влажности материалов в электрический сигнал;

- улучшение метрологических характеристик первичных преобразователей, как основного звена измерительной системы;

- конструктивное совершенствование измерительной аппаратуры с целью снижения инструментальной погрешности и повышения надежности;

- исследование методов метрологического обеспечения при разработке и эксплуатации промышленных влагомеров.

В главе рассматриваются различные подходы к решению задач нахождения аналогов влагосодержащих материалов, которые на данном этапе развития влагометрии могут заменить трудоемкие процессы градуировки, основанные на приготовлении эталонных образцов методом сушки до постоянного веса. Вопросы создания физических и электрических имитаторов влажности посвящены работы Е.С.Кричевского, М.А.Барлинера, В.Е.Мелкумяна, Л.Л.Худолея, И.Ф.Бородина, И.Ю.Клугмана, В.М.Венедиктова, Л.Н.Тюркина, В.П.Катушкина и других авторов.

В работах И.Ю.Клугмана, В.Е.Мелкумяна в качестве физических имитаторов для поверки влагомеров нефти предложены смеси обезвоженной нефти и воды, приготовленные по специальной методике.

В Свердловском филиале ВНИИМ им. Менделеева В.Г. Романовым, В.В. Пушкарёвым, А.С. Запорожец разрабатываются физические эквиваленты влажности зерна, представляющие собой искусственные вещества. Однако, по мнению авторов, для успешного применения физических аналогов на практике необходимо добиться воспроизводимости параметров в процессе производства эквивалентов, стабильности их характеристик во времени, получение аналогов соответствующих реперным точкам шкалы влагомеров, а также решить ряд других вопросов, которые позволят значительно упростить процесс поверки влагомеров.

Поверка влагомеров электрическими имитаторами может осуществляться по различным методикам, так например, сотрудниками ВНИИАПа В.М. Венедиктовым, В.В. Масловским и др. предлагается использовать конденсатор высокой добротности или образцовое сопротивление. Однако, как считают авторы, выпуск большого количества эталонных конденсаторов затруднен, а их эксплуатация в условиях хлебоприемных пунктов, вероятно, окажется мало эффективной. Кроме того, следует заметить, что поверка измерительной схемы при подключении на вход влагомера эталонного конденсатора не адекватно нагрузке реальным образцам, что естественно не гарантирует точность и надежность поверки.

По нашему мнению, в случае поверки влагомеров с использованием эталонных сопротивлений или конденсаторов, то есть по одной из составляющих, активной или реактивной, входной проводимости, вносит существенную неопределенность, так как активная и реактивная составляющие проявляются совместно, а для двухчастотных влагомеров рассмотрена методика вообще не приемлема.

В работах М.А. Берлинера и И.Ю. Клузмана предложены элект-

рические схемы замещения, исходя из физических процессов, происходящих в первичном преобразователе с контролируемым материалом. Положительным является то, что такие схемы дают наглядное представление о физических процессах, происходящих в сыпучем материале, но не представляется возможным рассчитать все параметры таких схем с учетом их физической интерпретации.

В работах Е.С.Кричевского впервые была поставлена задача нахождения электрических схем замещения путем использования электрофизических свойств сыпучих материалов. Анализируя некоторый набор априорно заданных двухполюсников в виде RC-цепей, которые описываются уравнениями зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от частоты и заданного свойства, автор минимизирует их по среднеквадратичному отклонению.

В работах Л.Л.Худолея предложена методика получения электрических схем замещения с использованием электрофизических свойств сыпучих материалов аппроксимированных дробно-рациональными функциями с последующей их реализацией, т.е. получение схем и номиналов их элементов.

В работах И.Ф.Бородина рассматриваются вопросы создания эквивалентной схемы зерновой массы методом минимизации функций диэлектрической проницаемости и проводимости.

К недостаткам рассматриваемых методов следует отнести то, что применяемые авторами математические и графические методы не позволяют синтезировать электрические схемы наперед заданной структуры для образцов различных свойств (например влажности, плотности и т.д.) в различных диапазонах частоты.

Анализ выполненных исследований позволяет сделать вывод о том, что из всех направлений предпочтение следует отдать электрическим эквивалентам, так как они просты в изготовлении,

строятся на основе экспериментальных данных с применением строгих математических методов, могут выпускаться заводом-изготовителем в комплекте с влагомером, обеспечивают возможность расчета на любой реперной точке шкалы, не требуют сложных методов их аттестации и т.д.

Несмотря на то, что методы синтеза по заданным стандартным характеристикам достаточно хорошо разработаны в работах А.А.Ланне, П.Н.Матханова, В.П.Сигорского и других авторов, при решении задачи синтеза электрических аналогов они не могут быть использованы, так как частотно-влажностные характеристики в результате эксперимента получаются произвольного вида и в основном задаются таблично, их аппроксимация должна производиться дробно-рациональными функциями с учетом условий физической реализуемости. Этот переход представляет определенные трудности, что объясняет причину того, что значительная часть известных методов синтеза не нашла практического применения в аналитическом приборостроении.

Изложенные соображения определили направление и цель настоящей работы:

- исследовать исходную информацию, необходимую для синтеза электрических аналогов влажности сыпучих материалов;
- исследовать различные методы аппроксимации частотно-влажностных характеристик сыпучих материалов;
- разработать алгоритмы аппроксимации, позволяющие учитывать условия физической и структурной реализации;
- разработать методику синтеза электрических аналогов влажности, удовлетворяющие наперед заданной структуре;
- выработать рекомендации по практическому применению электрических аналогов влажности при проектировании и эксплуатации высокочастотных влагомеров зерна.

Во второй главе излагаются теоретические основы разработки алгоритма синтеза электрических аналогов влажности сыпучих материалов. Алгоритм (рис. I) предусматривает проведение физического эксперимента с целью получения исходной информации, обработку экспериментальных данных методом наименьших квадратов или методом Чебышева, что позволяет получить исходную информацию с любым шагом квантования по частоте или влажности.

Дальнейшее решение идет по двум направлениям:

- рассчитывается активная и реактивная составляющие входной проводимости с учетом индуктивности первичного преобразователя;

- в зависимости от методов синтеза электрических аналогов (по проводимости или сопротивлению) производится расчет активной и реактивной составляющих входного сопротивления двухполюсной цепи, которые являются исходными при синтезе электрических аналогов.

Определение коэффициентов схемной функции предшествует вопросу формирования схемной функции и математических выражений, обеспечивающих выполнение условий физической реализуемости.

Анализ частотно-влажностных характеристик сыпучих материалов (зерна пшеницы различных типов, гречихи, кормовых дрожжей, марганцевой руды и др.) показывает, что характер изменения характеристик один и тот же, разница только в абсолютной величине выходного сигнала. Это позволяет строить электрические аналоги по реальным частотным характеристикам образцов сыпучих материалов с учетом емкости первичного преобразователя.

Так как при росте частоты активная составляющая влагосодержащего образца сыпучего материала непрерывно уменьшается,

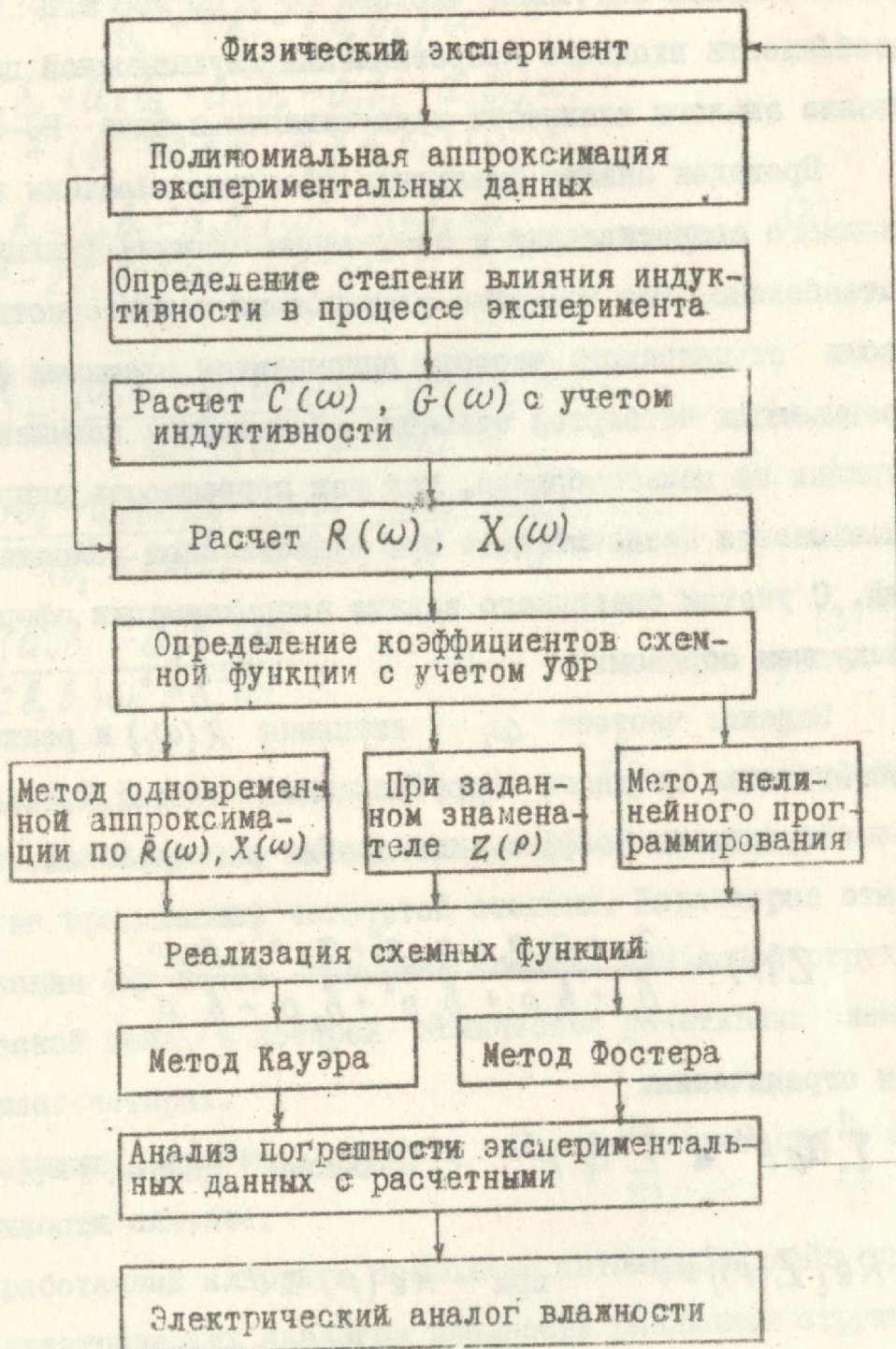


Рис. I Алгоритм синтеза электрического аналога влажности сыпучих материалов

а реактивная составляющая является отрицательной при всех положительных значениях частоты от 1 до 250 МГц то, используя особенности входного сопротивления двухполосной цепи, электрические аналоги влажности представляем в виде RC-схем.

Проведен анализ различных RC-схем, выведены выражения входного сопротивления и составлены схемные функции для них. Установлено, что частотно-влажностные характеристики в зависимости от диапазона частот описываются схемными функциями не превышающих четвертой степени. Дальнейшее повышение степени функции не целесообразно, так как погрешность аппроксимации уменьшается незначительно при существенном усложнении уравнений. С учетом сказанного задача аппроксимации сформулирована следующим образом:

Задано: частота  $\omega_i$ , активная  $R(\omega_i)$  и реактивная  $X(\omega_i)$  составляющие входного сопротивления ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ).

Определить коэффициенты дробно-рациональной функции

$$Z(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + a_4 p^4}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + b_4 p^4} \quad (I)$$

при ограничениях

1.  $\sum_{l=0}^n a_l p^l$  и  $\sum_{l=0}^m b_l p^l$  - полиномы Гурвица,  $l = 0, 1, 2, \dots, n(m)$

2.  $Re[Z(p)] \geq 0$  при  $Re(p) \geq 0$

3.  $Res[Z(p)] \geq 0$  при  $p = p_k$

4.  $F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{ [R(\omega_i) - R^*(\omega_i)]^2 + [X(\omega_i) - X^*(\omega_i)]^2 \} \rightarrow \min.$

где

$$R^*(\omega_i) = \frac{a_0 b_0 + (a_1 b_1 - a_0 b_2 - a_2 b_0) \omega_i^2 +}{b_0^2 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) \omega_i^2 +} +$$

$$\frac{(a_0 b_4 + a_2 b_2 + a_4 b_0 - a_1 b_3 - a_3 b_1) \omega_i^4 +}{(b_2^2 - 2b_1 b_3 + 2b_0 b_4) \omega_i^4 +} +$$

$$\frac{(a_3 b_3 - a_2 b_4 - a_4 b_2) \omega_i^6 + a_4 b_4 \omega_i^8}{(b_3^2 - 2b_2 b_4) \omega_i^6 + b_4^2 \omega_i^8} \quad (2)$$

$$X^*(\omega_i) = \frac{(a_1 b_0 - a_0 b_1) \omega_i + (a_0 b_3 + a_2 b_1 -}{-b_0^2 + (b_1^2 - 2b_0 b_2) \omega_i^2 +} -$$

$$\frac{a_1 b_2 - a_3 b_0) \omega_i^3 + (a_1 b_4 + a_2 b_3 - a_4 b_1) \omega_i^5 +}{(b_2^2 - 2b_1 b_3 + 2b_0 b_4) \omega_i^4 + (b_3^2 -} -$$

$$\frac{(a_4 b_3 - a_3 b_4) \omega_i^7}{-2b_2 b_4) \omega_i^6 + b_4^2 \omega_i^8} \quad (3)$$

Используя выражения для  $R^*(\omega_i)$  и  $X^*(\omega_i)$  схемной функции (1), можно получить их значение для любого вида схемной функции, не превышающей четвертой степени. Характерно отметить, что выражения (2) и (3) являются общими для любой структуры электрической цепи, в которой количество реактивных элементов не превышает четырех.

Завершающим этапом алгоритма является реализация и проверка погрешности синтеза.

Разработанный алгоритм позволяет автоматизировать процесс синтеза электрических аналогов влажности различной структуры.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов аппроксимации частотно-влажностных характеристик и реализации схемных функций электрических аналогов влажности.

Аппроксимация является самым важным и трудоемким этапом синтеза, так как здесь решаются все вопросы, связанные с по-

грешностью воспроизведения экспериментально полученных данных, видом схем, количеством элементов и другие вопросы.

Анализ методов аппроксимации показывает, что для решения поставленной задачи наиболее применимы методы одновременной аппроксимации по активной и реактивной составляющим входного сопротивления (проводимости), аппроксимации при заданном знаменателе схемной функции и метод нелинейного программирования.

Экспериментально полученные частотно-влажностные характеристики зерна пшеницы, гречихи, гидролизных дрожжей и других сыпучих материалов соответствуют частотным характеристикам RC-схем. Это позволило в работе использовать методы реализации Кауэра и Фостера. Данные методы позволяют получать электрические схемы с минимальным числом элементов, а при выборе соответствующего вида схемной функции, исключить появление индуктивных элементов.

Следует отметить, что существует несколько вариантов лестничных схем, при помощи которых можно реализовать схемную функцию (I). Это объясняется тем, что полиномы числителя и знаменателя в процессе реализации могут быть расположены по возрастающим или по убывающим степеням P. Кроме того, вид схемы зависит от того изменялся или не изменялся в процессе реализации порядок расположения слагаемых по степеням P в числителе и знаменателе.

В процессе реализации схемной функции (I) в общем виде получены параметры электрической схемы:

$$Z_1 = \frac{a_4}{b_4}, \quad Y_2 = \frac{b_4}{K_1}, \quad Z_3 = \frac{K_1}{K_5},$$
$$Y_4 = \frac{K_5}{K_8}, \quad Z_5 = \frac{K_5}{K_{11}}, \quad Y_6 = \frac{K_{11}}{K_{13}}$$

$$Z_7 = \frac{K_{13}}{K_{15}}, \quad Y_8 = \frac{K_{15}}{K_{16}}, \quad Z_9 = \frac{K_{16}}{b_0}.$$

где:

$$K_1 = a_3 - \frac{a_v b_3}{b_v}, \quad K_2 = a_2 - \frac{a_v b_2}{b_v}, \quad K_3 = a_1 - \frac{a_v b_1}{b_v},$$

$$K_4 = a_0 - \frac{a_0 b_0}{b_v}, \quad K_5 = b_3 - \frac{b_v K_2}{K_1}, \quad K_6 = b_2 - \frac{b_v K_3}{K_1},$$

$$K_7 = b_1 - \frac{b_v K_4}{K_1}, \quad K_8 = K_2 - \frac{K_5 K_6}{K_5}, \quad K_9 = K_3 - \frac{K_1 K_7}{K_5},$$

$$K_{10} = K_4 - \frac{K_1 b_0}{K_5}, \quad K_{11} = K_6 - \frac{K_5 K_9}{K_8}, \quad K_{12} = K_7 - \frac{K_5 K_{10}}{K_8},$$

$$K_{13} = K_9 - \frac{K_8 K_{12}}{K_4}, \quad K_{14} = K_{10} - \frac{K_8 b_0}{K_{11}}, \quad K_{15} = K_{12} - \frac{K_{11} K_{14}}{K_{13}},$$

$$K_{16} = K_{14} - \frac{K_{13} b_0}{K_{15}}.$$

Располагая выражениями для  $K$ , можно наложить ограничения на разброс параметров и их величину. Это имеет существенное значение, так как синтезированные электрические схемы с разбросом параметров от десятых долей ома до  $10^6$  и более Ом не всегда удовлетворяют условиям поставленной задачи. С другой стороны, с помощью этих выражений можно упростить задачу записи условий схемной реализуемости и постановку в целом задачи синтеза электрических аналогов с применением методов нелинейного программирования.

Основой алгоритма аппроксимации по активной и реактивной составляющим входного сопротивления (проводимости) является метод реализации Фостера, идея которого состоит в разложении заданных схемных функций входного сопротивления или проводимости на простые дроби вида:

$$Z(p) = A' + \frac{A_0}{p} + \frac{A_1}{p + \sigma_1} + \frac{A_2}{p + \sigma_2} + \dots + \frac{A_n}{p + \sigma_n} \quad (4)$$

$$Y(p) = B'p + B_0 + \frac{B_1}{p + \beta_1} + \frac{B_2}{p + \beta_2} + \dots + \frac{B_n}{p + \beta_n} \quad (5)$$

Выражения (3), (4) являются общими для RC-схем, так как сопротивления или проводимости могут отличаться по количеству слагаемых, подобным последним, или исключением одного или обоих первых слагаемых. Это зависит от вида схемной функции. Данный метод объединяет в себе процесс реализации и аппроксимации.

При  $p = j\omega$  активная и реактивная составляющие выражений (4) и (5) равны:

$$\operatorname{Re}[Z(j\omega)] = A' + \sum_{i=1}^n \frac{A_i \sigma_i}{\sigma_i^2 + \omega^2} \quad (6)$$

$$\operatorname{Im}[Z(j\omega)] = -\left(\frac{A_0}{\omega} + \sum_{i=1}^n \frac{A_i \omega}{\sigma_i^2 + \omega^2}\right) \quad (7)$$

$$\operatorname{Re}[Y(j\omega)] = B_0 + \sum_{i=1}^n \frac{B_i \omega^2}{\beta_i^2 + \omega^2} \quad (8)$$

$$\operatorname{Im}[Y(j\omega)] = \omega \left( B' + \sum_{i=1}^n \frac{B_i \beta_i}{\beta_i^2 + \omega^2} \right) \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Располагая выражениями (6) + (9), переходим к аппроксимации экспериментальных данных. Для этого записываем функционал по составляющим входного сопротивления и проводимости

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ A' + \sum_{i=1}^n \frac{A_i \sigma_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} - R(\omega_i) \right]^2 + \left[ X(\omega_i) + \frac{A_0}{\omega_i} + \sum_{i=1}^n \frac{A_i \omega_i}{\sigma_i^2 + \omega_i^2} \right]^2 \right\} \quad (10)$$

$$F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[ B_0 + \sum_{i=1}^n \frac{B_i \omega_i^2}{\beta_i^2 + \omega_i^2} - G(\omega_i) \right]^2 + \left[ B' + \sum_{i=1}^n \frac{B_i \beta_i}{\beta_i^2 + \omega_i^2} - C(\omega_i) \right]^2 \right\} \quad (11)$$

Минимизируя функционал (10) или (11), определяем неизвестные, входящие в уравнения (4) или (5).

Для минимизации функционала (10) и (11) разработана программа минимизации функций многих переменных с двухсторонними ограничениями на независимые переменные.

После определения неизвестных  $A', B', A_0, B_0, A_i, B_i, \sigma_i, \beta_i$  определяются значения параметров электрических аналогов из следующих выражений

$$A' = r_0, \quad r_i = \frac{A_i}{\sigma_i}, \quad C_0 = \frac{1}{A_0}, \quad C_i = \frac{1}{A_i}$$

$$r_0 = \frac{1}{B_0}, \quad r_i = \frac{1}{B_i}, \quad C_0 = B', \quad C_i = \frac{B_i}{\beta_i}$$

(  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  ).

Время счета зависит от выбранных начальных условий, области ограничения и составляет в среднем 15-20 минут для ЭЦМ средней производительности.

✓ 012590

Алгоритм аппроксимации при заданном знаменателе позволяет привести задачу синтеза электрических аналогов вязкости к линейному виду. Для схемной функции

$$Z(p) = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3} \quad (12)$$

значения активной и реактивной составляющих находятся из выражений (2) и (3). Избавляясь от знаменателя в правой части и объединив коэффициенты относительно неизвестных  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  получим

$$\left. \begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^N \left( \frac{b_0}{\omega_i^2} - b_2 \right) + a_1 \sum_{i=1}^N (b_1 - b_3 \omega_i^2) &= \sum_{i=1}^N R(\omega_i) \cdot K + a_2 \sum_{i=1}^N (b_0 - b_2 \omega_i^2) \\ a_0 \sum_{i=1}^N (b_3 \omega_i - \frac{b_1}{\omega_i}) + a_1 \sum_{i=1}^N \left( \frac{b_0}{\omega_i} - b_2 \omega_i \right) &= \sum_{i=1}^N X(\omega_i) \cdot K + a_2 \sum_{i=1}^N (b_3 \omega_i^3 - b_1 \omega_i) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots, N$

$$K = \frac{b_0^2}{\omega_i^2} + b_1^2 - 2b_0 b_2 + (b_2^2 - 2b_1 b_3) \omega_i + b_3^2 \omega_i^3$$

В процессе реализации схемной функции (12) получается выражение  $\frac{b_3}{a_2} p$ , которое соответствует емкости двухполюсной цепи с номиналом равным  $\frac{b_3}{a_2} M$  ( $M$  - принятый масштаб по частоте и сопротивлению). Ввиду того, что  $b_3$  задано при выборе знаменателя, то  $a_2$  выбирается таким, чтобы отношение  $\frac{b_3}{a_2} M$  соответствовало емкости первичного преобразователя. Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  находятся путем решения системы (13).

При определении коэффициентов схемной функции (12) должны выполняться следующие условия:

- знаменатель должен удовлетворять условиям Гурвица;
- коэффициенты числителя должны быть действительными и положительными числами;

0828102

- нули функции должны быть отрицательными;
- нули и полюсы должны чередоваться;
- погрешность аппроксимации минимальна.

Рассмотренный алгоритм позволяет определить коэффициенты пяти различных структур схемных функций, соответствующий вид которой выбирается в зависимости от диапазона частоты и погрешности аппроксимации. По данному алгоритму составлена программа для ЭЦМ "Раздан-2". Время счета зависит от выбора знаменателя схемной функции и составляет 5 + 10 сек.

Использование методов нелинейного программирования для решения задачи синтеза электрических аналогов влажности или других свойств сыпучих материалов открывает возможности решения задачи для любого класса электрических цепей. Разработанный алгоритм аппроксимации частотно-влажностных характеристик методом нелинейного программирования с учетом условий физической реализуемости позволяет накладывать также ограничения на величину номиналов элементов схемы.

В работе так же получены выражения, позволяющие перейти от любой структуры электрических аналогов влажности к проводимости и емкости на фиксированной частоте параллельной RC-схемы. В результате представляется возможным оценить погрешность частотных характеристик электрических аналогов влажности экспериментальным данным реальных влагосодержащих образцов в процессе аппроксимации и реализации.

Четвертая глава посвящена использованию методики получения электрических аналогов влажности применительно к практическим задачам влагометрии.

Согласно предложенного алгоритма (рис. I) основой для получения электрических аналогов являются электрофизические свой-

ства сыпучих материалов, представленных в виде амплитудно-частотных характеристик соответствующего диапазона частот. С этой целью была разработана методика исследования электрофизических свойств сыпучих материалов и получены частотно-влажностные характеристики некоторых типов зерна пшеницы, гречихи, гидролизных дрожжей и других материалов. Для этого необходимо использовать мосты полной проводимости с отдельным измерением активной и реактивной составляющих полной проводимости. Первичный преобразователь применять емкостного типа. Метод измерения - прямые равноточные измерения. Шаг квантования по влажности следует принимать равным  $2 + 2,5\%$ , т.е. во всем исследуемом диапазоне влажности ( $8\% + 32\%$ ) должно быть  $10+12$  измерений. Весь диапазон частот ( $1+250$  МГц) следует разбить на три поддиапазона:  $1+25$  МГц,  $20+100$  МГц и  $80+250$  МГц с шагом квантования соответственно  $2$  МГц,  $5$  МГц и  $10$  МГц.

Плотность укладки материала и температуру в полости первичного преобразователя во время опыта поддерживать постоянными. Увлажнение материала производить дистиллированной водой. Повторное увлажнение и исследование образцов исключить.

На основе полученных экспериментальных данных и математического аппарата, описанных во второй и третьей главах работы, были синтезированы электрические аналоги влажности зерна пшеницы четвертого типа в диапазоне от  $10\%$  до  $20\%$  влажности, схемы которых изображены на рис. 2а и 2б, а номиналы этих элементов сведены в таблицы 1 и 2.

Особенностью схемы рис. 2б является то, что она состоит как бы из двух каскадов - постоянного  $C_0, R_0, C_1$  и  $R_1$  и добавочных  $R_{2,1}, C_{2,1}, R_{2,2}, C_{2,2}$  и т.д., подключаемых для соответствующего диапазона влажности от  $10\%$  до  $20\%$  и более,

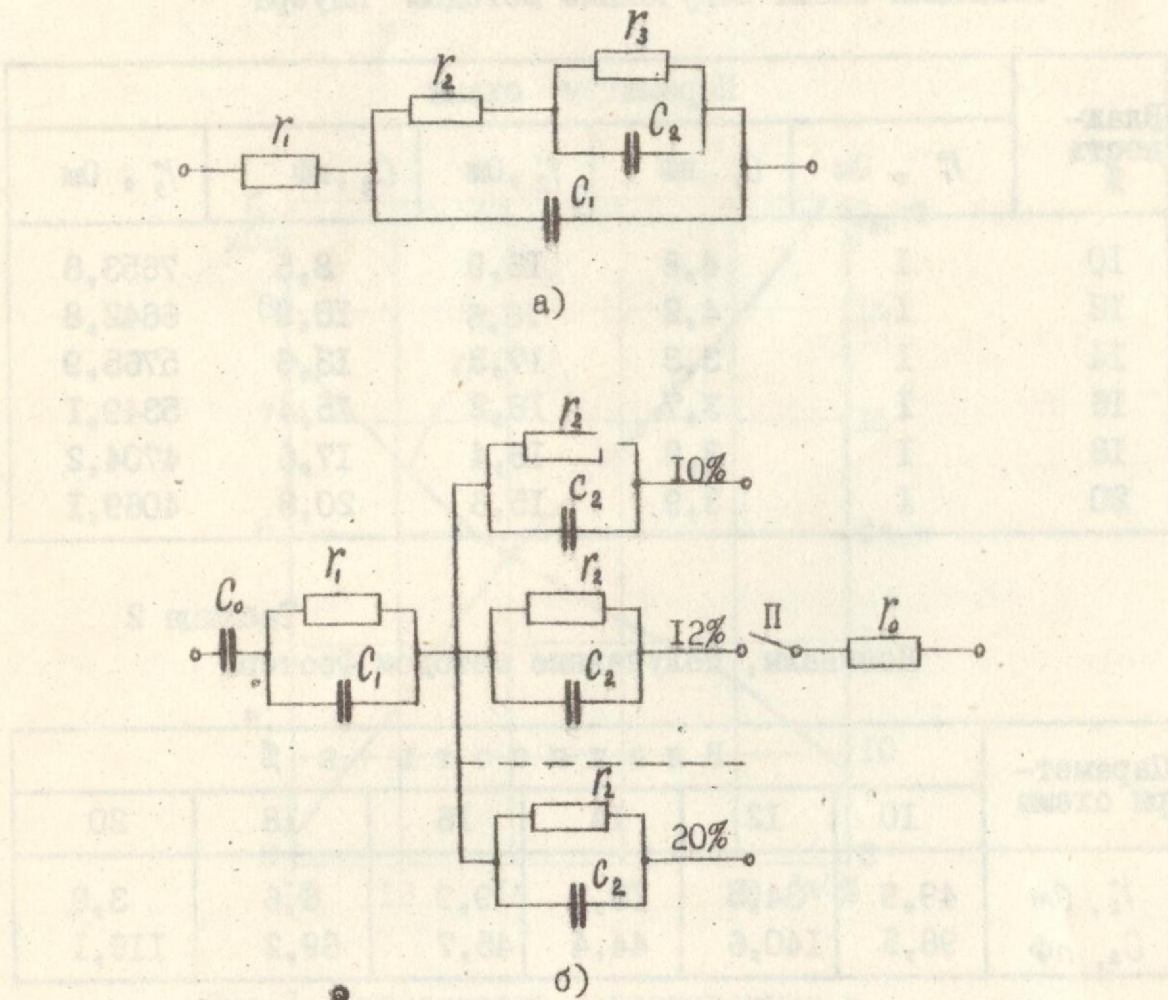


Рис. 2 Электрические аналоги влажности зерна пшеницы, тип IV. Реализация по методу Кауэра (а) и методу Фостера (б).

что обеспечивает возможность наилучшего приближения без перестройки всей схемы, а лишь поиском элементов второго каскада.

Таблица I  
Номиналы схемы полученные методом Кауэра

Влаж- ность %	Параметры схемы				
	$R_1$ , Ом	$C_1$ , пФ	$R_2$ , Ом	$C_2$ , пФ	$R_3$ , Ом
10	1	4,6	16,9	8,5	7653,8
12	1	4,2	16,6	10,9	6642,8
14	1	3,3	17,3	13,6	5765,9
16	1	3,7	18,2	15,4	5349,1
18	1	3,8	16,4	17,6	4704,2
20	1	3,9	15,6	20,8	4069,1

Таблица 2  
Номиналы, полученные методом Фостера

Парамет- ры схемы	Влажность в %					
	10	12	14	16	18	20
$R_1$ , Ом	49,9	34,5	10,3	9,3	6,6	3,8
$C_2$ , пФ	98,5	140,6	44,4	45,7	69,2	119,1

Анализ схем позволяет сделать вывод, что алгоритм реализации по методу Фостера при необходимости позволяет получить электрические аналоги в заданном диапазоне влажности с меньшим количеством элементов электрической схемы.

Из анализа графика (рис.3) видно, что с ростом влажности значение сопротивления  $R_3$  изменяется по убывающему закону, а значение емкости  $C_2$  по возрастающему закону.

При синтезе аналогов влажности зерна 10% получаются значения параметров схемы (рис.2б)  $R_0 = 3$  Ом,  $R_1 = 8290$  Ом,  $C_0 = 200$  пФ, и  $C_1 = 20$  пФ, которые фиксируются и в дальнейшем

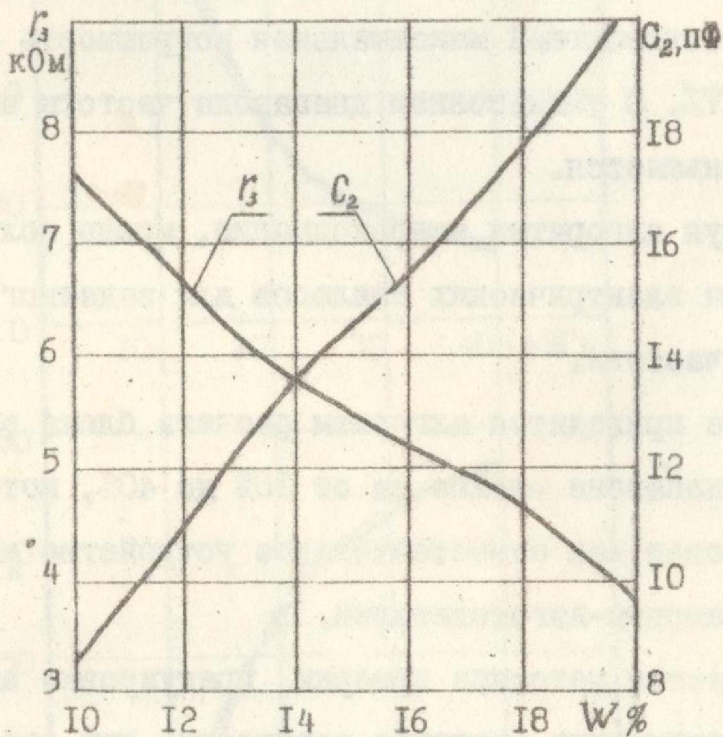


Рис.3 Зависимость сопротивления и емкости электрического аналога зерна пшеницы от влажности

определяются только сопротивление  $X_2$  и емкость  $C_2$  для остальных влажностей.

На рис.4 показаны частотные характеристики зерна пшеницы и электрического аналога, соответствующие влажности 18%. Наибольшая относительная погрешность во всем диапазоне частот по активной составляющей 6%, а минимальная погрешность 2,1%. По реактивной составляющей максимальная погрешность 4,5%, а минимальная 0,7%. С уменьшением диапазона частоты погрешность синтеза уменьшается.

Используя алгоритмы аппроксимации, можно получать различные структуры электрических аналогов для заданного диапазона влажности и частоты.

В работе приводится алгоритм расчета блока электрических аналогов в диапазоне влажности от 10% до 40%, который может быть использован как самостоятельное устройство для проверки влагомеров заводом-изготовителем.

Предлагается методика проверки градуировки влагомера с помощью электрических аналогов влажности, при которой электрическая схема влагомера работает в режиме, близком к режиму измерения влажности сыпучего материала. Методика позволяет в зависимости от методов синтеза электрические аналоги влажности подключать параллельно либо последовательно первичному преобразователю влагомера, в результате чего возможно проверить:

- изменение параметров электрической схемы влагомера (аппаратурную погрешность);
- изменение параметров первичного преобразователя;
- работоспособность всех блоков влагомера в режиме измерения влажности.

Рассматриваются вопросы построения градуировочной кривой

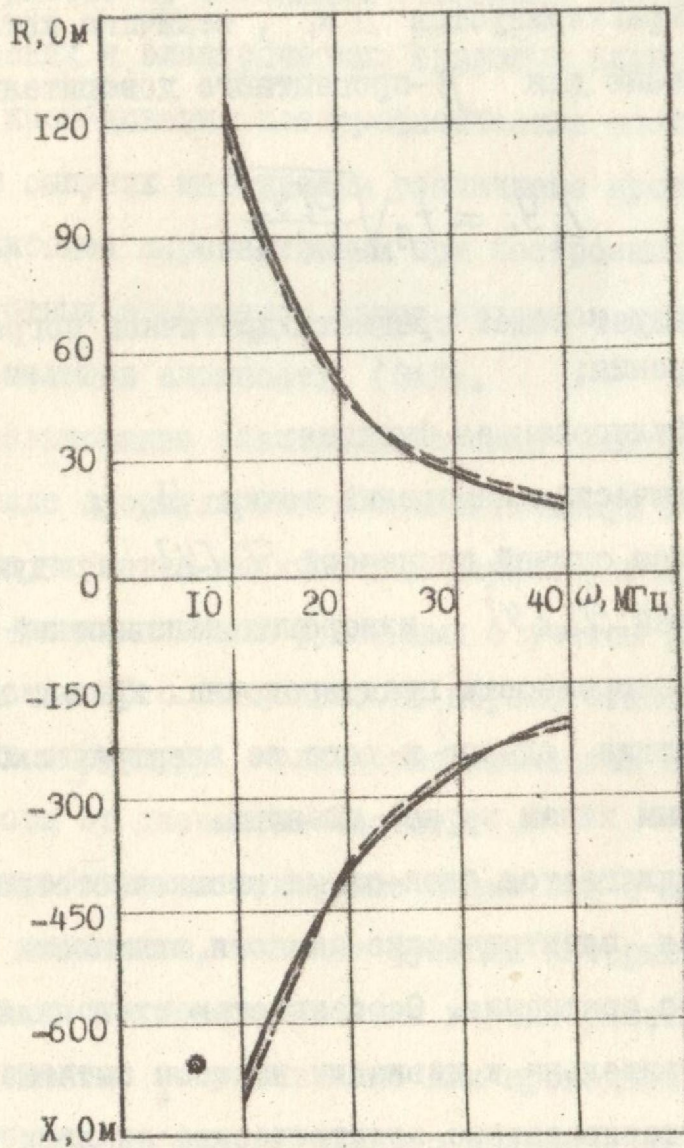


Рис.4 Частотные характеристики:  
— зерна пшеницы,  $W=18\%$ ;  
---электрического аналога  
влажности.

и нахождение ее погрешности. Физический смысл получения градуировочной кривой заключается в том, что выходной сигнал  $Y$  лежит в интервале, ограниченном разбросом точек. Разброс каждой точки  $Y_i$  характеризуется  $\Delta Y_i$ , величина которого находится по соотношению для  $\beta$ -процентного доверительного интервала:

$$\Delta Y_i = t_\beta \sqrt{\frac{D[Y]}{K}}$$

где  $D[Y]$  - квадрат общей среднеквадратичной погрешности измерения;

$t_\beta$  - табулированная функция;

$K$  - количество измерений точки  $Y_i$  ;

$D[Y]$  определяется суммой дисперсий  $D_1[Y]$  градуировочной кривой и дисперсией  $D_2[Y]$  измерения неизвестной пробы.

Определение погрешности градуировочных кривых позволит оценить соответствие одного и того же электрического аналога влажности различным типам зерна пшеницы.

В работе предлагается блок-схема высокочастотного влагомера, использующая электрические аналоги влажности в качестве блоков подекадного сравнения. Особенностью схем является то, что она не чувствительна к девиации частоты питающего генератора, так как синтезированные электрические аналоги инвариантны к частоте, т.е. уход параметров аналогов влажности при изменении рабочей частоты на  $\pm 30\%$  составляет менее 5%.

Создание сменных электрических аналогов влажности позволит использовать данную схему при работе с широким классом сыпучих материалов.

## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В работе на основании обобщения результатов определения физических и электрических аналогов влажности, а также результатов исследования электрофизических свойств представительной группы сыпучих материалов различного происхождения показано, что наиболее перспективным при построении и эксплуатации высокочастотных влагомеров зерна является использование электрических аналогов влажности (ЭАВ).

2. Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов позволило сформулировать математическую модель задачи аппроксимации частотно-влажностных характеристик сыпучих материалов дробно-рациональными функциями с учетом условий физической реализуемости. Это позволило на первом этапе синтеза ЭАВ формировать их структуру, количество элементов которых выбирается в зависимости от диапазона частоты.

3. Разработаны структурные схемы ЭАВ с минимальным числом реактивных элементов, схемные функции которых позволяют аппроксимировать частотно-влажностные характеристики, используя для этого входное сопротивление или проводимость с учетом параллельного или последовательного подключения емкости первичного преобразователя. Полученные выражения активной и реактивной составляющих входного сопротивления (2) и (3) являются общими для любой структуры ЭАВ не превышающего четвертой степени, что позволяет представить задачу аппроксимации в общем виде.

4. Проведенный анализ методов аппроксимации частотных характеристик показал, что аппроксимация является самым трудоемким процессом при синтезе ЭАВ сыпучих материалов. Приведенные в работе алгоритмы и программы аппроксимации позволяют определять коэффициенты схемных функций с учетом условий физической и схемной реализуемости для различных структур ЭАВ.

5. Разработанный алгоритм позволяет синтезировать электрические аналоги в виде двухполюсных RC-схем различной структуры не превышающей четырех реактивных элементов для любых свойств сыпучих материалов (плотности, грансостава, температуры и т.д.). Основным требованием при синтезе является задание исходной информации в виде активной и реактивной составляющих полной проводимости (сопротивления) или диэлектрической проницаемости

6. Синтезированные ЭАВ могут быть использованы в низших звеньях поверочной схемы для влагомеров зерна в процессе эксплуатации и на заводах-изготовителях при выпуске высокочастотных влагомеров. Основным достоинством ЭАВ является их простота, надежность, стабильность характеристик во времени, а также возможность их расчета на любую реперную точку шкалы прибора. Использование ЭАВ исключит необходимость использования образцов зерна, что повысит производительность поверочных работ и позволит сократить интервал плановых проверок.

7. Предложена методика исследования электрофизических свойств сыпучих материалов, синтез электрических аналогов влажности и методика поверки градуировки влагомеров позволяют перейти от эмпирических методов расчета и градуировки измерительных систем к строгим математическим методам.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Худолей Л.Л., Журбенко А.А., Согин А.Е. Формирование математической функции цепи высокочастотного преобразователя влажности в электрический сигнал. Научные труды ВНИИАП, "Методы и приборы для анализа состава вещества", вып.3, Киев, 1973.

2. Платонов П.Н., Худолей Л.Л., Журбенко А.А. Методика исследования электрических параметров зерна в диапазоне частот от 1 до 250 МГц. Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической

конференции, Кутаиси, 1973.

3. Журбенко А.А., Платонов П.Н., Худолей Л.Л. Методика расчета электрических аналогов влагосодержащих образцов сыпучих материалов. Тезисы докладов У Всесоюзной научно-технической конференции, Кутаиси, 1973.

4. Платонов П.Н., Худолей Л.Л., Журбенко А.А. Аппаратура и методы исследования электрических характеристик материалов. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции по научному приборостроению, вып. III, УкрНИИНТИ, Киев, 1973.

5. Худолей Л.Л., Журбенко А.А., Согин А.Е. Развитие инженерного метода расчета электрических схем замещения сыпучих материалов с применением ЭЦМ. Научные труды ВНИИАП "Методы и приборы для анализа состава вещества", вып.4, Киев, 1974.

6. Журбенко А.А., Худолей Л.Л. К вопросу синтеза электрических схем замещения сыпучих материалов. Сб. "Кибернетика и автоматическое управление", Киев, 1974.

7. Худолей Л.Л., Журбенко А.А. Математический метод поиска электрических схем замещения образцов материалов по их амплитудно-частотным характеристикам. Приборы для исследования физических свойств материалов. "Наукова думка", Киев, 1974.

8. Соколов Л.И., Лобачев С.С., Головки Л.И., Журбенко А.А., Перетяка Н.С. Программа минимизации функции многих переменных с двухсторонними ограничениями на независимые переменные. Материалы Украинского ЦФАП, Киев, 1973.