

Автор ерр.

Л 40

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

Одесский технологический институт имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи

В. В. ДЖЕМЕЛЛА

МНОГОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД
КОНТРОЛЯ
ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель — доцент
кандидат технических наук

В. Г. ПУСТЫННИКОВ

1966 г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

Одесский технологический институт имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи

В. В. ДЖЕМЕЛЛА

МНОГОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД
КОНТРОЛЯ
ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

Переучет 1987 г.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель — доцент
кандидат технических наук

В. Г. ПУСТЫННИКОВ

с. в. 1213 v 001213

Одесский технологический

институт

им. М. В. Ломоносова

БИБЛИОТЕКА

1966 г.

ОНАХТ

25.07.11

Многочастотный метод



v001213

Направляется Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы инженера ДЖЕМЕЛЛА Вадима Владимировича на тему: «Многочастотный метод контроля влажности зерна», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится

24 севт,

1967 г.

Просим Вас и всех заинтересованных лиц Вашего учреждения принять участие в публичной защите диссертации или прислать свои замечания в письменном виде в 2-х экземплярах, заверенные печатью, по адресу:

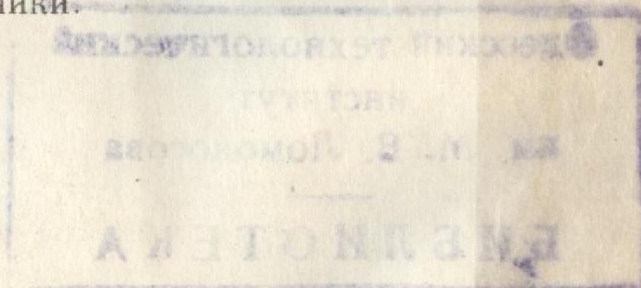
г. Одесса, ул. Свердлова, 112.

Одесский технологический институт имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь совета инженер Л. Запорожед.

Л. Запорожед

Работа выполнена в Ростовском-на-Дону институте сельхозмашиностроения на кафедре электротехники.



ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно развивающееся производство зерна, технология его хранения и переработки выдвигают очень высокие требования к измерениям его влажности. В настоящее время от состояния контроля влажности зависит успех таких важных задач, как быстрый прием огромного потока зерна на заготовительных пунктах во время уборки урожая, сохранность зерна, автоматизация технологических процессов при приемке, хранении и переработке.

При определении влагосодержания различных материалов широкое применение находят электрические методы, которые, хотя и уступают основным методам в точности, но обладают ценным свойством — высокой скоростью измерения.

Большая величина погрешности при определении влажности зерна электрическими способами объясняется тем, что на электрические параметры зерна, помимо количества влаги, воздействует целый ряд так называемых мешающих факторов. Борьба с их влиянием на протяжении многих лет шла, в основном, по двум направлениям. Первое — поиски электрических параметров зерна, достаточно селективных к влажности. Второе — использование мер по стабилизации и учету этих факторов.

Как известно, электрический параметр, достаточно избирательный к влажности, обнаружен не был. Использование таких мер, как помол зерна, прессование до постоянной концентрации, измерение температуры и насыпного веса, определение типа, очистка и другие, позволило в настоящее время приблизить точность измерений на лабораторных влагомерах к $\pm 0,5\%$ по влажности. Но эти меры ведут к утрате быстродействия, основного преимущества электрических методов, что практически исключает возможность их применения в приборах автоматического контроля. В тех влагомерах, где изме-

рение влажности производится без специальной подготовки зерна, и особенно в приборах со свободной засыпкой датчика, пригодных для автоматического контроля, погрешность измерения влажности в большинстве случаев совершенно не удовлетворяет требованиям производства.

Электронные приборы, обслуживающие влагомеры, позволяют измерять электрические величины с высокой точностью. В то же время сам преобразователь влажности зерна, являясь источником погрешности, стал непреодолимым барьером при повышении точности влагомеров. В этих условиях применение качественно новых методов контроля является назревшей необходимостью. По-видимому, приборы автоматического измерения влажности зерна могут получить дальнейшее развитие не на путях стабилизации мешающих факторов, а на путях использования таких методов, которые позволят непрерывно измерять и уверенно учитывать влияние факторов — помех на результат контроля. К числу таких методов, в первую очередь, необходимо отнести многопараметровые методы: комбинированные — с оценкой измеряемого фактора по электрическим и электрофизическим параметрам материала и методы, использующие параметрическое разделение информации.

Данная работа преследовала следующие основные цели:

1) с учетом специфики материала вскрыть основные свойства многочастотного метода измерения;

2) теоретически и экспериментально исследовать возможность практического использования для контроля влажности зерна методов частотного и амплитудно-фазового разделения информации, снимаемой с преобразователя.

Диссертация, включающая в себя 231 страницу машинописного текста, состоит из 5 глав, 71 иллюстрации, 3 таблиц, 15 приложений и перечня литературы в количестве 91 печатной работы.

1. СПОСОБЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ВЛАЖНОСТИ

В общем случае на величину сигнала U , снимаемого с датчика влажности, влияют как контролируемый фактор x_1 — влажность, так и ряд мешающих: x_2, x_3, \dots, x_n ;

$$U = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Выделение из сигнала датчика (1) полезной составляющей, которая бы отражала закон изменения только контролируемого фактора, и составляет задачу разделения.

Наиболее простым и известным методом, позволяющим в принципе разделить влияние контролируемого и мешающих факторов в выходном сигнале датчика, является однопараметровый энергетический, или селективный метод. Он заключается в том, что мы путем выбора соответствующего параметра измерения добиваемся такого положения, когда доля энергии сигнала, приходящаяся на изменение контролируемого фактора Δx_1 , значительно бы превышала в этом же сигнале долю энергии от изменений мешающих, т. е.

$$\frac{\Delta W_{x_1}}{\Delta x_1} \gg \frac{\sum_{i=2}^n \Delta W_{x_i}}{\sum_{i=2}^n \Delta x_i} . \quad (2)$$

Подобная задача для электрических методов измерения влажности решалась на протяжении многих лет.

Принципиально иной характер имеет амплитудно-фазовое разделение. Если, например, в комплексном сигнале, снимаемом с датчика

$$\dot{U}(x_1, x_2) = U'(x_1, x_2) + jU''(x_1, x_2), \quad (3)$$

окажется, что контролируемый и мешающий факторы по-разному влияют на действительную и мнимую часть сигнала, в этом случае его проекции будут представлять два уравнения:

$$U' = f_1(x_1, x_2), \quad U'' = f_2(x_1, x_2). \quad (4)$$

Зная признаки f_1 и f_2 влияния факторов на составляющие сигнала, систему (4) можно решить относительно контролируемого фактора и, естественно, ее решение не будет зависеть от мешающего.

Попытки применить данный метод были и раньше, например, работы Е. С. Кричевского, Л. Гартшорна и В. Вильсона, но появление таких приборов пока не внесло заметного вклада в измерение влажности. Это объясняется тем, что исследователи не раскрыли до конца сущности метода и не исследовали всех его свойств. В частности, не был объяснен сам меха-

низм разделения, не исследовалось поведение составляющих комплексного сигнала датчика в зависимости от изменений влажности и мешающих факторов и не изучалось влияние на качество этого разделения частоты, выбор которой в устройствах был случаен.

Несколько отличным способом разделения является параметрическое. Оно заключается в том, чтобы с помощью какого-то параметра λ (разделения) получить такое преобразование переменных факторов материала в сигналы, при котором реакции этих сигналов на воздействие факторов были бы различны. В результате, задача сводится к получению и решению системы уравнений вида:

$$U_{\lambda_i} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

В качестве параметра разделения может быть использована любая физическая величина, которая не зависит от контролируемого фактора материала: частота тока, амплитуда его, температура и др. В результате сравнительного анализа этих параметров и проведения некоторых экспериментов было показано, что для зерна целесообразно вести поиски по использованию частотного и амплитудно-фазового методов разделения, а также их комбинации.

При частотном разделении информации, снимаемой с преобразователя, необходимо получить на различных частотах сигналы $U_{\omega_1}, U_{\omega_2}, \dots, U_{\omega_n}$ *, представляющие левые части уравнений системы (5). На выбранных частотах реакция электрических характеристик зерна на воздействия мешающих факторов должна быть отлична от реакции на действия контролируемого фактора. Возможность получения сигналов, удовлетворяющих этим требованиям, могла бы вытекать из уравнений, описывающих связь электрических параметров зерна с различными его факторами и частотой. Но мы не располагаем еще подобными экспериментальными или теоретическими зависимостями. Имеющиеся данные говорят о значительном влиянии частоты на электрические характеристики зерна, что давало некоторое основание надеяться получить подобные сигналы. Все это привело к большим экспериментальным исследованиям в данной работе.

Основной трудностью реализации параметрического разделения является отыскание таких параметров разделения, ко-

* В дальнейшем индекс ω опущен.

торые бы позволили получить систему (5) наиболее простого вида. Это могло быть достигнуто, прежде всего, сокращением количества уравнений путем отбора наиболее существенных мешающих факторов. Потребовался тщательный анализ большого числа помех, влияние которых при измерении влажности было в свое время зарегистрировано и изучено рядом исследователей.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОЧАСТОТНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

Поставленные в работе задачи потребовали развить теорию частотного разделения (с учетом специфики данного материала), найти условия, в которых оно происходит, определить его основные свойства и разработать способы определения оптимальных значений параметра разделения. С этой целью были проведены исследования для линейной зависимости между электрическими сигналами преобразователя и взаимонезависимыми факторами материала на примерах двух- и трехчастотного измерений.

В простейшем случае, при двухчастотном контроле, двухмерный выходной сигнал, снимаемый с датчика при воздействии контролируемого x_1 и мешающего x_2 факторов, имеет координаты:

$$U_k = \sum_{i=1}^{i=2} S_{ki} \cdot x_i, \quad (k = 1, 2; i = 1, 2), \quad (6)$$

где S_{ki} — чувствительность измерителя электрического параметра датчика на K -той частоте к i -тому фактору.

При $x_1 = \text{const}$ и $x_2 = \text{var}$ совместное решение (6) даст резольвенту (в координатах U_1 и U_2)

$$U_1 = U_2 \frac{S_{12}}{S_{22}} + x_1 \cdot \frac{D}{S_{22}} \Big|_{x_1 = \text{const}, x_2 = \text{var}}, \quad (7)$$

где D — определитель (6).

Следовательно, измеряемая влажность x_1 может быть найдена, помимо способа Крамера, через свободный член (7):

$$U_p(x_1) = U_1 - U_2 \frac{S_{12}}{S_{22}}, \quad \left(\frac{S_{12}}{S_{22}} < 1 \right), \quad (8)$$

что может быть реализовано простой схемой на потенциометрах.

Результирующая чувствительность всего устройства (на выходе пассивной решающей схемы) к контролируемому фактору всегда ниже максимальной исходной:

$$S_p^{(2)} = \frac{dU_p}{dx_1} = \frac{D}{S_{22}} \quad (9)$$

Из (7) и (9) следует: 1) разделение факторов x_1 и x_2 обеспечивается, если частотная функция

$$F(\omega) = \frac{S_{\omega 1}}{S_{\omega 2}} \quad (10)$$

не является постоянной величиной; 2) для получения возможно большей результирующей чувствительности (9) необходимо выбирать такие частоты, на которых (10) принимает экстремальные значения:

$$\left. \frac{S_{11}}{S_{12}} \right|_{\omega_1} = \max, \quad \left. \frac{S_{21}}{S_{22}} \right|_{\omega_2} = \min; \quad (11)$$

3) для получения параллельных резольвент (7) при различных значениях x_1 необходимы сигналы, у которых отношение чувствительностей измерительной схемы к мешающему фактору на принятых частотах оставалось бы постоянным во всем диапазоне изменений контролируемой величины

$$K_1 = \frac{S_{12}}{S_{22}} = \text{const} \quad \left| \quad x_1 = \text{var}; \quad (12)$$

4) с другой стороны, для обеспечения линейности (7) требуется постоянство (12) и при изменении мешающего фактора во всем диапазоне его возможных колебаний:

$$K_2 = \frac{S_{12}}{S_{22}} = \text{const} \quad \left| \quad x_2 = \text{var}. \quad (13)$$

Таким образом, показано, что для обеспечения линейности (7) в принципе не обязательны линейные зависимости в $U_1(x_2)$ и $U_2(x_2)$.

Систему с тремя переменными, аналогичную (6), можно представить в виде уравнения плоскости:

$$\bar{U} \cdot \bar{p}_0 - D \cdot M \cdot x_1 = 0. \quad (14)$$

Чувствительность трехчастотного устройства к контролируемому фактору определяется

$$S_p^{(3)} = \frac{D}{\sqrt{A_{11}^2 + A_{21}^2 + A_{31}^2}}, \quad (15)$$

где A_{ki} — алгебраические дополнения соответствующих элементов определителя D в (14). Следовательно, чувствительность устройства тем выше, чем больше определитель системы и меньше миноры сигналов.

Коэффициенты потери чувствительности в решающей схеме для двух- и трехчастотной схемы соответственно равны:

$$\alpha_{(2)}^* = \frac{S_{11}}{S_p^{(2)}} = \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{D}, \quad (16)$$

$$\alpha_{(3)}^* = \frac{S_{11}}{S_p^{(3)}} = \frac{S_{11} \cdot \sqrt{A_{11}^2 + A_{21}^2 + A_{31}^2}}{D}. \quad (17)$$

Большой интерес представляют полученные данные о влиянии на результат контроля неучтенных мешающих факторов. Методу придает особенность то, что основные из них действуют на параметры преобразователя однозначно в широком диапазоне радиочастот (знак первой производной электрических характеристик зерна по мешающим факторам не зависит от частоты).

При двухчастотном контроле величина ошибки в выходном сигнале влагомера от воздействия неучтенного мешающего фактора x_3 зависит от положения всех векторов: вектора контролируемого, учитываемого и неучтенного факторов. Если обозначить углы, образуемые этими векторами с осью абсцисс, соответственно через φ_1 , φ_2 и φ_3 , то можно получить коэффициент доли погрешности от действия неучтенного фактора, в зависимости от направлений всех действующих векторов:

$$\alpha_0 = \left| 1 + \frac{\operatorname{ctg} \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_3}{\operatorname{ctg} \varphi_2 - \operatorname{ctg} \varphi_1} \right|. \quad (18)$$

Из (18) следует ряд выводов. 1. При $\varphi_3 = \varphi_2$, $\alpha_0 = 0$. В этом случае влияние на выходной сигнал влагомера помехи x_3 устраняется полностью.

2. При $\varphi_3 < \varphi_1$ получаем $\alpha_0 < 1$. Здесь воздействие фак-

тора x_3 на результат измерения меньше в сравнении с его влиянием при одночастотном контроле. Оба этих вывода имеют принципиальное значение, поскольку показывают, что влияние на результат контроля оставшихся неучтенными мешающих факторов может быть ослаблено в α_1 раз,

если направление их векторов будет иметь угол с осью абсцисс меньший, чем у вектора контролируемого фактора:

$$\frac{S_{11}}{S_{21}} > \frac{S_{13}}{S_{23}}, \frac{S_{14}}{S_{24}}, \dots \quad (19)$$

или устранено полностью, если

$$\frac{S_{12}}{S_{22}} = \frac{S_{13}}{S_{23}} = \frac{S_{14}}{S_{24}} = \dots \quad (20)$$

Эти положения вскрывают большие принципиальные возможности метода и делают целесообразными поиски подобных зависимостей между сигналами и мешающими факторами.

3. При $\varphi_3 = \varphi_1$, имеем $\alpha_0 = 1$. Действие помехи эквивалентно ее действию при однопараметровом методе.

4. При $\varphi_3 > \varphi_1$ получим $\alpha_0 > 1$. Доля помехи в выходном сигнале возрастает в сравнении с ее долей при одночастотном контроле и при $\varphi_3 = 90^\circ$ получаем максимальное увеличение относительной погрешности (от действия x_3) до (16).

$$\alpha_{0\max} = \frac{1}{1 - \operatorname{tg}\varphi_2 \cdot \operatorname{ctg}\varphi_1} = \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{D} \quad (21)$$

Таким образом, многочастотному и, в частности, двухчастотному методу присуща некоторая избирательность к помехам со свойствами, подобными фильтр-пробке, по аналогии с которой его «непрозрачность» к факторам-помехам может быть определена некоторым углом $\Delta\varphi_3$. С этой точки зрения, выражение (18) представляет собой амплитудно-угловую характеристику метода, которая подобна кривой резонанса. Если полосу «непрозрачности» определить на уровне $\alpha_0 = 0,5$, где действие неучтенных факторов - помех ослабляется в два раза по сравнению с одночастотным контролем, то каждому положению вектора контролируемого фактора соответствует определенное оптимальное, с точки зрения полосы ослабления, положение вектора учитываемого мешающего фактора:

$$\varphi_{2\Delta\varphi_3=\max} = \operatorname{arc} \operatorname{ctg} \left(\operatorname{ctg}\varphi_1 + \sqrt{\frac{4 + 3\operatorname{ctg}^2\varphi_1 + \operatorname{ctg}\varphi_1}{3}} \right) \quad (22)$$

В общем случае, когда мы не знаем направления действия мешающих факторов, оставшихся неучтенными, максимум выражений

$$S_p^{(2)} = \max \left| \frac{D}{S_{22}} \right|, \quad S_p^{(3)} = \max \left| \frac{D}{\sqrt{A_{11}^2 + A_{21}^2 + A_{31}^2}} \right| \quad (23)$$

может служить критерием выбора оптимальных частот соответственно при двух- и трехчастотном контроле.

Несколько иные закономерности обнаруживаются во влиянии на результат измерения собственных погрешностей измерителей сигналов U_1, U_2, \dots . Так, если в двухчастотном влагомере эти измерители имеют одинаковую погрешность $|\xi_1| = |\xi_2|$, то абсолютное значение ошибки на выходе решающей схемы определится положением вектора учитываемого фактора:

$$\xi_p^{(2)} = \xi_1 (1 + \operatorname{tg} \varphi_2). \quad (24)$$

Ее величина всегда будет больше погрешности одного канала измерения и лежать в пределах $2\xi_1 \geq \xi_p^{(2)} \geq \xi_1$. Из-за потери чувствительности к влажности в решающей схеме относительная погрешность, вносимая измерителями, возрастет в

$$\alpha = \alpha_{(2)}^* \cdot (1 + \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (25)$$

т.е. пропорционально увеличению абсолютного значения погрешности измерителей электрических сигналов и потери чувствительности устройства к контролируемому фактору. В худшем случае она станет в два раза больше коэффициента потери чувствительности

$$\alpha_{\max} = 2 \cdot \alpha_{(2)}^* \quad (26)$$

При трехчастотном контроле положение еще более усугубляется, так как норма вектора помехи $|\bar{U}(\xi)|$ от действия ошибок всех трех каналов (при равенстве их абсолютных значений) возрастает до $\xi_1 \sqrt{3}$ против $\xi_1 \sqrt{2}$ при двухчастотном измерении.

Все эти выводы, имея принципиальное значение, указывают на один из существенных недостатков многочастотного контроля. Это вызывает необходимость даже при двухчастотном контроле повышать практически в два раза (в сравнении с одночастотным контролем) точность измерений электриче-

ских сигналов на каждом из частотных каналов. Отсюда, если следовать применяемой в одночастотных влагомерах зерна точности измерения электрической величины датчика, в 2,5 раза превышающей точность измерений влажности ($\pm 5\%$ от верхнего предела шкалы), то класс точности каждого из каналов двухчастотного влагомера должен быть не хуже 1%. Этот недостаток частично или полностью может быть восполнен компенсационными свойствами метода. Так, например, погрешность на выходе влагомера за счет нестабильности амплитуд генераторов, питающих датчик, или амплитудных передаточных коэффициентов усилительных звеньев может быть сведена к нулю, если отношения этих нестабильностей будут постоянны и численно равны настроечному коэффициенту k_1 (12). Выполнение этого условия часто может быть обеспечено конструктивными мерами.

При решении вопроса о количестве n сигналов, снимаемых с датчика на n частотах, с помощью которых мы желаем устранить влияние $(n-1)$ мешающих факторов, надо учитывать, что чрезмерное увеличение числа этих сигналов может нас разочаровать. В самом деле, число учитываемых мешающих факторов будет всегда меньше общего числа помех, воспринимаемых схемой (хотя бы из-за присутствия погрешностей измерителей), а возможность значительной потери чувствительности к контролируемой величине может настолько увеличить долю помехи в выходном сигнале от неучтенных факторов, что с введением нового сигнала U_{n+1} (для устранения влияния на результат контроля параметра x_{n+1}) ошибка на выходе влагомера, работающего на $n+1$ частоте, может превысить ошибку в устройстве с n частотами. Это же обстоятельство требует осторожного подхода к выбору мешающих факторов, влияние которых на результат контроля мы желаем устранить.

3. О ПРАКТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ МНОГОЧАСТОТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

При теоретических исследованиях метода мы исходили из линейных зависимостей (5). Реальные гетерогенные материалы, к которым относится и зерно, имеют нелинейную зависимость (5). Решение такой системы с двумя переменными факторами при неизменном значении влажности дает зависимость

$$U_1 = \psi_i(U_2)_{w_i = \text{const}}, \quad (27)$$

которая в двухчастотных координатах представляет кривую.

Новое значение W_k даст новую резольвенту ψ_k . Таким образом, при неавтоматическом контроле, влажность может быстро определяться по заранее выполненному графику семейства кривых (27) для всего диапазона влажности с шагом квантования ΔW равным или меньше допустимой погрешности измерения.

При автоматическом контроле влажность из (27) также должна определяться автоматически. Для простоты решения, очевидно, лучше, идя сознательно на определенную погрешность, (27) интерполировать линейно на всем участке возможных значений мешающего фактора. Отсюда вытекает аналитический метод определения оптимальных частот разделения, критерием в котором является минимальная погрешность в измерении влажности. Расчет оптимальных частот может быть произведен по экспериментально полученным сигналам U_{ki} с исключенной погрешностью их измерений, либо непосредственно по ним, если класс измерителей был достаточно высоким ($\leq 1\%$). Последовательность расчетов заключается в нахождении постоянных коэффициентов, линейно интерполирующих (27), для всех значений влажности зерна, участвовавших в экспериментах,

$$\sum_{i=1}^n U_{1i} \cdot U_{2i} - k \sum_{i=1}^n U_{2i}^2 - b \cdot \sum_{i=1}^n U_{2i} = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n U_{1i} - k \sum_{i=1}^n U_{2i} - b \cdot n = 0, \quad (28)$$

и определении их средней величины (k_0, b_0) для всего диапазона влажности. После этого могут быть найдены градуировочные значения выходного сигнала решающей схемы для всех W_i ,

$$U_p(W_i) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n U_1 - k_0 \sum_{i=1}^n U_2 \right), \quad (29)$$

где n — число измерений при $W_i = \text{const}$ и $x_2 = \text{var}$. По данным (29) определяется уравнение градуировочной кривой —

$$W = F(U_p) \quad (30)$$

Зная (30), можно найти среднюю квадратичную или максимальную погрешность измерения W по имеющимся сигналам U_{ik} для различных сочетаний пар частот и выбрать оптимальную пару.

Громоздкость вычислений не оставляет сомнения в необходимости их выполнения на счетно-решающих машинах. Это заставило разработать графический метод расчета оптимальных частот, который не требует больших вычислений. Он заключается в нанесении на график в двухчастотной плоскости всех экспериментально полученных значений сигналов U_{ki} при $W_{\min}, W_2 \dots W_{\max}$ и каждый раз изменяемом мешающем факторе $x_2 = x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}$. За ось ординат принимается сигнал, измеренный на одной из крайних частот, например, $U_1 = U_{\omega_1}$, а на оси абсцисс поочередно откладываются сигналы на частотах $\omega_2, \omega_3 \dots$ при различных значениях W и x_2 . В результате на график будут нанесены все точки резольвент (27) для пар частот $\omega_1 \omega_2, \omega_1 \omega_3 \dots \omega_1 \omega_p$, которые затем линеаризируются. По построенному графику семейств резольвент (27) легко прослеживается разделение, графически определяются коэффициенты k_0 и b_0 для любой пары частот, и по минимуму абсолютной погрешности определяется лучшая пара частот. Здесь следует отметить, что разработанная методика экспериментов и оба способа выбора оптимальных частот разделения не требуют измерений самого мешающего фактора. В процессе экспериментов важно лишь то, чтобы он претерпевал изменения в интересующем диапазоне. Это является преимуществом методов, так как зачастую непосредственное измерение мешающих факторов вызывает большие трудности или вообще невозможно.

Строгое экспериментальное подтверждение возможности частотного разделения информации, снимаемой с датчика влажности, было одной из основных задач работы. Поэтому в качестве мешающего фактора была выбрана плотность зерно-воздушной смеси, как легко управляемый в эксперименте один из существенных мешающих факторов, относительно влияния которого имеются противоречивые мнения.

В результате проведенных экспериментов были получены частотные функции (10), в которых чувствительности сигналов по переменным факторам находились как приращения этих сигналов от приращений факторов:

$$\left. \frac{\Delta U (\Delta W)}{\Delta U (\Delta P)} \right|_{W_i} = F(\omega)_{W_i} \cong \frac{S_{\omega_1}}{S_{\omega_2}} \Big|_{W_i} \quad (31)$$

Функции (31) были получены в диапазоне от 20 гц до 30 мггц для дискретных значений влажности в интервале 14—26%. Изменение насыпного веса ΔP зерна в датчике производилось различными условиями его засыпки, вплоть до применения вибрации.

В качестве сигналов датчика измерялись полный ток, активная составляющая проводимости и кажущаяся емкость.

Все полученные частотные функции (31) изменяются с частотой, что говорит о возможности разделения сигналов. Кроме того, все они имеют падающий характер с ростом частоты от 20 кгц и выше. Использование частот ниже 20 кгц для частотного разделения оказалось невозможным в силу большого непостоянства импеданса преобразователя с зерном во времени.

Падающий характер частотных функций (31) можно объяснить тем, что на сравнительно низких частотах рассмотренного диапазона (0,02—0,1 мггц) проводимость зерна определяется в основном сопротивлениями: контакта зерна с электродом, зерна с зерном, поверхностным и объемным сопротивлениями зерна. Все они очень чувствительны к изменениям влажности, в то время как колебание плотности в основном изменяет число цепочек из зерна, проводящих ток, и не вносит заметных изменений в составляющие этих цепей.

На частотах выше 0,25 мггц те же изменения влажности зерна вызывают приращения проводимости, равные или даже меньшие, чем от колебаний плотности, т. е. (31) уменьшается. Это можно объяснить тем, что на повышенных частотах доля активной составляющей проводимости уменьшается, а относительная чувствительность диэлектрической проницаемости смеси к изменениям влажности меньше относительно активной составляющей. С ростом влажности (на ΔW) возрастает коэффициент трения между зёрнами и, как следствие, происходит падение плотности зерно-воздушной смеси в датчике. Оба эти фактора и приводят к тому, что на высоких частотах ($f > 0,25$ мггц) проводимость смеси менее чувствительна к изменениям влажности, нежели к плотности сравнительно с ее чувствительностями на низких частотах. Из этого следует, что в случае одночастотного метода контроля при свободной засыпке зерна в датчик или контроля в потоке меньшие погрешности от колебаний плотности будут получены при использовании частот от 0 до 100—250 кгц, а не на высоких, как это утверждалось некоторыми исследователями.

Параллельно с описанными экспериментами, когда плот-

ность изменялась только условиями засыпки, были поставлены опыты с уплотнением зерна путем его сжатия поршнем при постоянном объеме в измерительной части датчика. При этом изменение проводимости зерно-воздушной смеси идет по совершенно отличным зависимостям. Частотная функция (31) имеет минимум на 20 кгц и растет с частотой. Это объясняется тем, что при сжатии на проводимость в области низких частот, в первую очередь, влияет уже не изменение количества проводящих ток цепочек из зерна, а резкое уменьшение всех контактных сопротивлений в смеси. В этих условиях большая ошибка в выходном сигнале одночастотного влагомера от колебаний плотности, естественно, будет при более низкой рабочей частоте. Но подобные явления при контроле в потоке или при свободной засыпке зерна в датчик отсутствуют.

Поставленные эксперименты позволили определить оптимальные частоты разделения при исключении влияния на результат контроля насыпного веса зерна. Оказалось, что при любом виде снимаемого с датчика сигнала этими частотами являются $f_1=0,02 \div 0,1$ мгц и $f_2=5 \div 10$ мгц.

Эксперименты позволили определить оптимальную частоту для амплитудно-фазового разделения. Расчет частотной функции

$$\frac{\Delta C(\Delta W) \cdot \Delta g(\Delta P)}{\Delta C(\Delta P) \cdot \Delta g(\Delta W)} = F(\omega) \quad (32)$$

показал, что ее максимум лежит на частотах $0,5 \div 4$ мгц. Кроме этого, были определены оптимальные частоты и для случая комбинированного разделения, когда на одной частоте в качестве сигнала используется реактивная составляющая проводимости, а на второй — активная. Для этого случая получены частоты $f_1=0,5$ мгц и $f_2=20$ мгц.

Примером реализации в устройстве двухчастотного принципа может служить прибор, разработанный автором в целях подтверждения возможности использования данного метода для контроля влажности зерна пшеницы. В этом приборе предусматривалось устранение влияния на результат контроля переменной плотности зерновой массы и контактных сопротивлений между зернами при достаточно равномерном распределении в нем влаги.

Схема прибора состоит из двух измерителей кажущейся емкости датчика с зерном. Оба они собраны по идентичным

схемам, но работают на разных частотах: $f_1=0,5$ мггц и $f_2=20$ мггц. Сигналы с измерителей поступают на решающую схему, в которой устраняется составляющая сигналов от мешающих факторов.

Проведенные в РИСХМе и в Донском зональном институте сельского хозяйства испытания (на твердых и мягких сортах зерна) разработанного влагомера показали, что максимальная погрешность прибора в условиях переменной плотности зерно-воздушной смеси не превышает $\pm 0,75\%$ по влажности, в то время, как измерение на одночастотном устройстве аналогичного типа в подобных же условиях привело бы к погрешности на частоте 0,5 мггц $\pm 3,5\%$ по влажности и $\pm 5,8\%$ на частоте 20 мггц.

Среди других результатов, полученных при выполнении данной работы, следует остановиться на ряде экспериментальных исследований изменения импеданса датчика с зерном при свободной засыпке, а также влияний геометрических параметров датчиков с плоскими электродами на воспроизводимость его электрических характеристик при повторных загрузках в условиях неорганизованной засыпки.

Проведенные исследования характера изменения во времени импеданса датчика с зерном показали, что при свободной засыпке влажного зерна ток в цепи датчика со временем растет, при этом: а) постоянство тока наблюдается только при сухом зерне (влажность ниже 14%); б) с ростом частоты тока непостоянство во времени импеданса датчика уменьшается и, начиная с частоты 0,1–0,2 мггц, практически прекращается; в) с ростом напряжения, приложенного к электродам датчика, относительный прирост тока во времени увеличивается, при этом уменьшение запыленности зерна резко ослабляет зависимость изменения импеданса зерна во времени от напряжения. Экспериментами было установлено, что уменьшение импеданса датчика зерна в условиях свободной засыпки происходит в основном за счет уменьшения контактных сопротивлений между зёрнами в результате самоуплотнения зерновой массы под действием ее веса и за счет повышения влажности в точках зерна, образующих контактные сопротивления. Эти исследования позволили выработать ряд рекомендаций для устранения влияния непостоянства импеданса во времени на результат измерения влажности.

Исследования поведения воспроизводимости импеданса датчика в зависимости от геометрических размеров последнего

с.в. 1213

V 001213

позволили установить связь между погрешностью при повторных загрузках датчика и площадью электродов, а также расстоянием между ними. Полученные характеристики показывают, что расстояние между плоскими электродами, в условиях свободной засыпки, не может приниматься менее двух сантиметров без риска резкого ухудшения воспроизводимости, а площадь электрода — менее 40—50 см². В этой связи следует отметить, что поведение воспроизводимости ряда датчиков, описанное в диссертации Е. С. Кричевского, объясняется с тех же позиций, на которых основывается предлагаемый автором выбор геометрических параметров датчиков.

Основные результаты и выводы

1. Доказано, что в качестве способов снижения погрешностей при непрерывном и дискретном измерении влажности зерна может быть использовано частотное и амплитудно-фазовое разделение информации, снимаемой с преобразователя, основанное на решении системы линейно-интерполированных уравнений.

2. Установлено, что избирательные свойства многочастотного метода измерения влажности зерна обладают определенной «полосой» ослабления помех. Это придает методу большие возможности, позволяя в принципе при ограниченном числе частот получать выходной сигнал влагомера с отстройкой не только от учтенных факторов, но и ослабить воздействие на выходной сигнал ряда других — неучтенных, вектора которых лежат в «полосе» ослабления.

3. Выведенные соотношения между точностью измерения влажности зерна при многочастотном методе и погрешностью инструментов показывают, что класс измерителей электрических параметров преобразователя при многочастотном контроле в принципе должен быть выше, чем у одночастотных влагомеров.

4. Предложен критерий существования частотного разделения, который может быть получен с высокой достоверностью для многих мешающих факторов.

5. Разработана и экспериментально подтверждена методика определения оптимальных частот для различных видов разделения и действующих факторов, основывающаяся на наименьшей погрешности контроля.

6. Неизбежная потеря чувствительности метода к влажности и возможность возрастания веса доли сигнала

ла от неучтенных факторов-помех в сравнении с одночастотным показывают, что практическое использование многочастотного метода требует осторожного выбора как природы, так и количества подлежащих исключению мешающих факторов. Это говорит о том, что преимущества метода могут быть ощутимы прежде всего при отстойке от факторов-помех, наиболее сильно искажающих измерение. Эти же свойства вряд ли позволят с эффективностью использовать в приборах более двух-трех частот.

7. Показано, что в случае неавтоматического измерения влажности двухчастотное устройство может выполняться без решающей схемы. Это исключает специальную линеаризацию годографов, а следовательно, может обеспечить более высокую точность измерения.

8. Экспериментальные исследования в диапазоне $20-30 \cdot 10^3$ кгц показали возможность осуществления частотного и амплитудно-фазового разделения сигнала датчика на составляющие, зависящие соответственно от влажности и плотности зерновой массы.

9. Проведенные отдельные экспериментальные исследования изменений импеданса датчика со свободно засыпанным зерном позволили вскрыть причины этих изменений и дать рекомендации для устранения влияния этого непостоянства на результат контроля.

10. Полученные результаты при исследовании влияния геометрии датчика на его воспроизводимость электрических параметров позволяют обоснованно выбирать геометрические размеры преобразователей со свободной засыпкой или устанавливаемых в потоке.

* * *

Рассмотренные свойства многочастотного метода говорят о его перспективности. Например, в зерне, такие мешающие факторы, как температура, неравномерность распределения влаги, наличие электролитов, гранулометрический состав и др., в достаточной степени доступны к управлению в эксперименте, а следовательно, для них возможно получение частотных характеристик, что позволит выбрать оптимальное количество и величину частот для устранения или значительного уменьшения влияния перечисленных факторов на результат измерения влажности.

Полученные результаты могут найти применение для контроля состава и состояния различных гетерогенных материа-

лов, у которых те или иные мешающие факторы ограничивают сейчас применение косвенных электрических методов измерения.

Статьи, опубликованные по теме диссертации

1. В. Г. Пустынников, В. В. Джемелла. Частотное разделение информации при непрерывном контроле влажности зерна. Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, № 4, 1965.

2. В. В. Джемелла, В. Г. Пустынников. Двухпараметровое устройство для автоматического контроля влажности зерна. Приборостроение № 7, 1965.

3. В. Г. Пустынников, В. В. Джемелла. Датчики автоматических влагомеров зерна со свободной засыпкой. В сборнике «Автоматизация контроля технологических процессов сельхозмашиностроения». Ростиздат, 1965.

4. В. В. Джемелла, В. Г. Пустынников. Выбор и расчет оптимальных частот для двухпараметровых влагомеров зерна. Измерительная техника, № 3, 1966.

5. В. В. Джемелла, В. Г. Пустынников. О некоторых общих свойствах датчиков влагомеров зерна со свободной засыпкой. Приборостроение, № 5, 1966.

6. В. В. Джемелла. О некоторых свойствах многочастотного контроля влажности зерна. Измерительная техника, № 8, 1966.

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. «Многочастотный метод контроля влажности зерна» — на научно-техническом совете Госкомитета по приборостроению, на заседании Комиссии по рассмотрению вопросов о состоянии и дальнейших направлениях научно-исследовательских работ и разработки влагомеров для зерна. Москва, 1965 г.

2. «Частотное разделение информации, снимаемой с датчика влажности зерна» — на Всесоюзной научно-технической конференции по вопросам конструкции, технологии, надежности, качества и долговечности сельскохозяйственных машин, г. Ростов-на-Дону, 1965 г.

3. «О непостоянстве во времени импеданса датчика с зерном», «О некоторых свойствах многочастотного измерения влажности зерна» — на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Ростовского-на-Дону института сельскохозяйственного машиностроения». г. Ростов-на-Дону, 1964 и 1966 гг.

Сдано в набор 2-1-67 г. Подписано к печати 7-1-67 г. Бумага 60x84/16

Объем 1 $\frac{1}{2}$ п. л.

Таганрог, тип. № 10 — Ростовского областного управления по печати
ПК16004 Заказ № 7 Тираж 200