МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

Матякубова Парахат Майлиевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для студентов направление образованию 5311000 - «Автоматизация и управление технологических процессов и производств»

Издательства «Tafakkur-bo‘stoni»
Ташкент – 2018

УДК: 681.5:631.563.2(075.8)
ББК: 41.47
М 35

Матякубова П.М. Автоматизация и управление технологическими процессами. Учебное пособие. Ташкент, «Tafakkur-bo‘stoni». 2018. – 256 с.

В данном учебном пособии «Автоматизация технологических процессов" даны характеристики технологических процессов и объектов автоматизации, основы анализа и синтеза автоматических систем управления этими процессами. Изложены принципы и технические решения автоматизации типовых технологических процессов в измерение влажности сыпучих материалов, а также в установках сушки и определение характеристики параметров сыпучих материалов, а также изложено научные и технологические основы автоматизации, рассмотрены типовые автоматизированные технологические процессы сушки сыпучих материалов (на примере в переработке сельско-хозяйственной продукции). Приведены технологические, функционально-технологические и принципиальные схемы автоматических систем. Для студентов бакалавров по специальности 5311000 – «Автоматизация и управления технологических процессов и производства».

Рецензенты:
к.ф-м.н. Махмудов Х.М. – Директор Центра национальных эталонов
д.т.н. проф. Азимов Р.К. – Профессор кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация» ТашГТУ

УДК: 681.5:631.563.2(075.8)
ББК: 41.47

ISBN 978-9943-993-58-7

© Матякубова П.М.
© «Tafakkur-bo‘stoni», 2018

Предисловие

Технологический процесс сушки зернистых материалов, представляющий собой совокупность явлений переноса тепла и массы, сопровождающихся структурно механическими, а в ряде случаев и химическими изменениями высушиваемого материала, широко представлен во многих отраслях промышленности. Тепловая сушка характеризуется высокой энергоемкостью.

Проблема экономии энергии в значительной мере должна обеспечиваться созданием, совершенствованием и рациональным практическим применением энергосберегающих технологий и оборудования.

Различные дисперсные материалы растительного и искусственного происхождения относящиеся к классу материалов с высоким внутридиффузионным сопротивлением, используются в качестве сырья для изготовления продукции во многих отраслях промышленности и в агропромышленном комплексе.

Исследования, направленные на совершенствование технологий их производства и, в частности, на определение оптимальных условий сушки зернистых материалов, имеют большое народно-хозяйственное значение. Кроме того интенсивное развитие фермерских хозяйств, мини пунктов переработки и хранения зерна (в особенности селекционного и семенного) требует создания энерго-и ресурсосберегающей малогабаритной мобильной сушильной техники, позволяющей проводить сушку или активное вентилирование при первичной обработки или хранение зерна.

Научно обоснованные методы расчета и рекомендации по трактированию такого класса сушильной техники в настоящее время отсутствуют.

ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Математическая модель импульсного измерительного преобразователя электрофизических характеристик сыпучих материалов

Импульсный датчик можно условно принять состоящим из двух частей: первичного и вторичного преобразователей. Функция первичного преобразователя - получение электрического сигнала, связанного со значением технологического параметра. Функция вторичного преобразователя - превращение электрического сигнала, полученного первичным преобразователем, в форму, удобную для передачи по линии связи.

Первичный преобразователь соприкасается с измеряемой средой и изменяет свои электрические параметры в зависимости от свойств среды. Вторичный преобразователь, представляющий собой генератор, выдает импульсный сигнал, зависящий от электрических параметров первичного преобразователя.

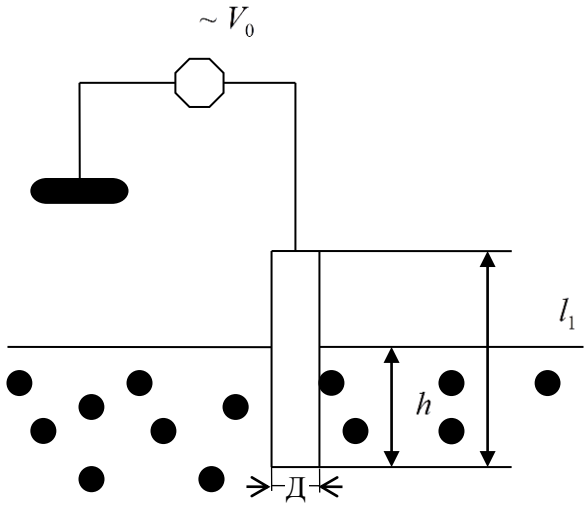


Рис. 1.1. Схема подключения импульсного датчика.

Рассмотрим работу импульсного датчика. Схема подключения типового первичного преобразователя, используемого для контроля технологических параметров процессов влаго-тепловой обработки зерна, выполненного в виде металлического стержня круглого сечения и состоящего из первичного I, и вторичного V_o преобразователей, приведена на рис. 1.1.

В зависимости от частоты сигнала C_0, выдаваемого генератором V_0, изменяются основные параметры исследуемой среды: комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, комплексная магнитная проницаемость $\mu = \mu' - \mu''$ и комплексная проводимость $\sigma = \sigma' - \sigma''$. Диэлектрическая проницаемость ε и комплексная проводимость σ связаны между собой следующими соотношениями [1]: (1)

$$\sigma + \varpi\varepsilon = \sigma' + \omega\varepsilon'' + j\varpi(\varepsilon' - \sigma''/\omega) = \sigma_c + j\varpi\varepsilon_c . \qquad (1.1)$$

Уравнения (1.1) определяют вещественную эквивалентную проводимость $\sigma_e = \sigma' + \varpi\varepsilon''$ и вещественную эквивалентную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_e = \varepsilon' - \sigma'/\omega$. Введем комплексную эквивалентную диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_э$ [1] (1)

$$\varepsilon_э = \varepsilon - j\sigma/\varpi = \varepsilon_e - j\sigma_e/\omega = \varepsilon_e(1 - jp_e), \qquad (1.2)$$

где p_e - тангенс угла потерь, определяемый как [2] (2)

$$p_e = \frac{\sigma_e}{\omega\varepsilon_e} = \frac{\sigma' + \varpi\varepsilon''}{\omega\varepsilon' - \sigma''} . \qquad (1.3)$$

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ характеризует макроскопическое распределение диполей и определяется через поляризованность P; комплексная проводимость $\sigma = \sigma' - j\sigma''$ характеризует макроскопические движущиеся свободные заряды и определяется через объемную плотность тока J_f. Периодические движения свободных зарядов в объеме характеризуются намагниченностью M.

Если к перечисленным параметрам добавить напряженность электрического поля *E*, то усредненную объемную плотность тока *J* определим из соотношения [1]: (3)

$$J = J_f + rotM + j\omega P = \underline{\sigma} E\,,$$

(1.4)

где

$$\underline{\sigma} = \mu\sigma + j\omega\varepsilon_0(\mu\varepsilon - 1)\,.$$

(1.5)

Если представить $\underline{\sigma} = \underline{\sigma'} - j\underline{\sigma''}$, то нетрудно показать, что

$$\underline{\sigma'} = (\mu'\sigma' - \mu''\sigma'') + \omega\varepsilon_0(\mu''\varepsilon' + \mu'\varepsilon'')\,,$$

(1.6)

$$\underline{\sigma''} = (\mu''\sigma' + \mu'\sigma'') + \omega\varepsilon_0(1 + \mu''\varepsilon' - \mu'\varepsilon')\,,$$

(1.7)

Следует заметить, что полная плотность движущегося заряда зависит от *P, M* и J_f, и поэтому в общий коэффициент, выражающий линейность среды, входят $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, $\mu = \mu' - j\mu''$, $\sigma = \sigma' - j\sigma''$.

Если использовать компактную запись (1.2), то уравнения Максвелла [91] для произвольной линейной среды примут вид:

$$div\,E = 0\,, \tag{1.8}$$

$$rot\,E = j\omega B\,, \tag{1.9}$$

$$rot\,B = j\omega\mu\varepsilon_э E\,, \tag{1.10}$$

$$div\,B = 0\,. \tag{1.11}$$

где *B* - индукция магнитного поля.

Граничные условия на границе двух сред запишутся следующим образом:

$$\varepsilon_{1э} n_1 E_1 + \varepsilon_{2э} n_2 E_2 = 0\,, \tag{1.12}$$

$$n_1 \times E_1 + n_2 \times E_2 = 0\,, \tag{1.13}$$

$$\mu_1^{-1} n_1 \times B_1 + \mu_2^{-1} n_2 \times B_2 = 0\,, \tag{1.14}$$

$$n_1 B_1 + n_2 B_2 = 0\,, \tag{1.15}$$

где *n* - единичный вектор внешней нормали; нижние индексы "1" относятся к первой рассматриваемой среде, а нижние индексы

"2" ко второй среде; знак "х" означает векторное произведение [3]. (4)

Векторы E и B в (1.9) и (1.10) нетрудно разделить, взяв роторы от обеих частей уравнений и произведя подстановку. Тогда для вектора Е получим уравнение второго порядка

$$rot\, rot\, E - k^2 E = 0. \qquad (1.16)$$

Оператор Лапласа [3], действующий на вектор E, определяется как

$$\Delta E = grad\, div\, E - rot\, rot\, E. \qquad (1.17)$$

Учитывая (1.8), получим другую эквивалентную форму уравнения (4.16):

$$(\Delta + k^2)E = 0. \qquad (1.18)$$

В уравнения (1.16) и (1.18) введено комплексное волновое число $k = \beta - j\alpha$, определяемое как [2] (3)

$$k^2 = \varpi^2 \mu \varepsilon_э = \varpi^2 (\varepsilon_e - j\sigma_e / \varpi)(\mu' - j\mu''). \qquad (1.19)$$

Это соотношение можно записать иначе

$$k^2 = \varpi^2 \mu' \varepsilon_e (1 - p_e)(1 - jp_m), \qquad (1.20)$$

где $p_m = \mu'' / \mu'$ и $\varepsilon_e > 0$.

Отсюда следует, что

$$k = \varpi \mu' \varepsilon_e \{1 - jp_e\}^{1/2} \{1 - jp_m\}^{1/2}. \qquad (1.21)$$

Вещественную и мнимую части (1.21) можно разделить, исходя из выражений [2] (3)

$$\{1 - jp\}^{1/2} = f(p) - jg(p), \qquad (1.22)$$

$$f(p) = ch(1/2\, Arsh\, p) = \{1/2[p^2 + 1]^{1/2} + 1\}^{1/2}, \qquad (1.23)$$

$$g(p) = sh(1/2\, Arsh\, p) = \{1/2[p^2 + 1]^{1/2} - 1\}^{1/2}. \qquad (1.24)$$

Следует заметить, что для сыпучих материалов, имеющего тангенс угла потерь p_e^2 значительно меньше единицы, выражения (1.23) и (1.24) примут вид

$$f(p) \approx 1,\ g(p) \approx p/2. \qquad (1.25)$$

Комплексное волновое число k – основная физическая характеристика произвольной линейной среды. Другой важный параметр – волновое сопротивление среды ζ, определяемое как

$$\varsigma = \frac{\varpi\mu}{k} = \frac{\varpi\mu}{\beta(1-j\alpha/\beta)} = \frac{\varsigma_0}{\Lambda(1-j\alpha/\beta)}, \qquad (1.26)$$

где $\varsigma_0 = \{\mu_0/\varepsilon_0\}^{1/2} \approx 377$ Ом - волновое сопротивление свободного пространства; Λ - нормирующий множитель, определяемый как [2] (3)

$$\Lambda = \beta\varsigma_0/\varpi\mu. \qquad (1.27)$$

Приведенные аналитические выражения позволяют определить эквивалентные электрические параметры первичного преобразователя цилиндрической формы, представляющего собой металлический проводник, помещенный в исследуемую среду.

1.2. Расчет параметров модели первичного импульсного измерительного преобразователя

Цилиндрическая форма первичного преобразователя выбрана из следующих соображений. Опасность возникновения искры возрастает при увеличении напряженности электрического поля на поверхности проводника. Значение напряженности электрического поля у поверхности проводника обратно пропорциональна квадрату радиуса кривизны поверхности. При заданном поперечном сечении проводника наименьшей кривизны можно добиться, если поперечное сечение будет представлять собой круг.

Приложенное внешнее напряжение переменного тока, действующее значение которого V_o (рис. 1.1), вызывает в проводнике радиуса r ток частотой ω. Определим распределение плотности тока J и напряженности магнитного поля H по сечению и длине первичного преобразователя. В цилиндрической системе координат выражение (1.18) примет вид

$$\frac{d^2E}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dE}{dr} + k^2E = 0. \qquad (1.28)$$

Решение уравнения (1.28) можно записать как [3]:

$$E = AJ_0(kr) + BN_0(kr), \qquad (1.29, \text{а})$$

где A и B - постоянные интегрирования; $J_o(kr)$ - функция Бесселя нулевого порядка первого рода; $N_o(kr)$ - функция Бесселя нулевого порядка второго рода.

Функция Бесселя нулевого порядка второго рода N_o обладает той особенностью, что при $r = 0$ (на оси проводника) обращается в бесконечность [3] (4) .

Но из физических соображений ясно, что напряженность электрического поля Е должна быть всегда конечна, в том числе и на оси проводника. Поэтому принимаем $B = 0$, а второе слагаемое в формуле (1.29, а) отбрасывается. Следовательно, решение выглядит так

$$E = AJ_0(kr). \qquad (1.29, \text{б})$$

Нетрудно определить напряженность магнитного поля, исходя из формулы (1.9) и известного соотношения $B = \mu H$ [3], (4)

$$H = (j\varpi\mu)^{-1} rot\, E = -jA\{\varepsilon_э / \mu J_1(kr)\}^{1/2}, \qquad (1.29, \text{в})$$

где $J_1(kr)$ - функция Бесселя первого рода первого порядка [3]. (4)

Найдется напряженность магнитного поля H на поверхности цилиндрического проводника (при $r = a$) и приравняем правой части формулы (1.29, в). Считая координату z, проходящей через ось проводника, получим [3] (5)

$$(2\pi a)I(z) = -jA\{\varepsilon_э / \mu\}^{1/2} J_1(ka),$$

$$A = jI(z)[2\pi a\{\varepsilon_э / \mu\}^{1/2} J_1(ka)]^{-1}.$$

где $I(z)$ - значение тока в сечении z проводника.

Подставится найденное значение А в формулы (1.29, б) и (1.29, в). В результате получим

$$E = jI(z)J_0(kr)[2\pi a\{\varepsilon_э / \mu\}^{1/2} J_1(ka)]^{-1},$$

$$H = I(z)J_1(kr)[2\pi aJ_1(ka)]^{-1}.$$

Определятся волновое сопротивление Z_c первичного преобразователя

$$Z_c = \{z_L / y_L\}^{1/2} = j\{\mu / \varepsilon_э\}^{1/2} \frac{J_0(kr)}{J_0(kr)}, \qquad (1.30)$$

где z_L - последовательный импеданс на единицу длины проводника; y_L -параллельный адмитанс на единицу длины проводника первичного преобразователя.

Ток, протекающий по поперечному сечению первичного преобразователя, удовлетворяет дифференциальному уравнению [2] (3)

$$(d^2/dz^2 + k^2)I(z) = 0, \qquad (1.31)$$

где комплексное волновое число *k* определяется как [4]: (4)

$$k = \{-z_L y_L\}^{1/2}.$$

Решением уравнения (4.31) будет

$$I(z) = C_1 \cos(kz) + C_2 \sin(kz), \qquad (1.32, \text{а})$$

где C_1 и C_2 - коэффициенты, определяемые следующим образом.

Учитывая, что ток на конце первичного преобразователя ($z = l$) равен нулю,

$$I(l) = C_1 \cos(kl) + C_2 \sin(kl) = 0,$$

найдем, что

$$C_1 = -\frac{C_2 \sin(kl)}{\cos(kl)}.$$

Отсюда

$$I(z) = -\frac{C_2 \sin[k(l-z)]}{\cos(kl)}. \qquad (1.32, \text{б})$$

Распределение заряда вдоль проводника получим из уравнения непрерывности [1], отражающего закон сохранения электрического заряда *q(z)*

$$q(z) = \frac{1}{j\varpi}\frac{dI(z)}{dz} = \frac{jkC_2 \cos[k(l-z)]}{\cos(kl)}. \qquad (1.33)$$

В теории длинных цепей [1] в качестве переменной обычно рассматривают не заряд на единицу длины, а разность потенциалов вдоль линии V(z). Эти величины связаны между собой соотношением [2]:

$$V(z) = -j\varpi q(z) y_L^{-1}.$$

Подставляя выражение (1.33) для электрического заряда *q(z)* в последнюю формулу, получим

$$V(z) = jZ_c \frac{C_2 \cos[k(l-z)]}{\cos(kl)}. \qquad (1.34)$$

В начале проводника (*z = 0*) действующее значение напряжения равно *Vo*. Учитывая это, найдем

$$C_2 = -jV_0 Z_c^{-1}.$$

Подставляя полученное выражение в (1.32, б), будем иметь

$$I(z) = j\frac{V_0}{Z_c}\frac{\sin[k(l-z)]}{\cos(kl)}. \qquad (1.35)$$

Ток в начале проводника находится по формуле [2]

$$I(0) = j\frac{V_0}{Z_c} tg(kl).$$

Отсюда найдем входной адмитанс *Y* цилиндрического проводника

$$Y = jZ_c^{-1} tg(kl). \qquad (1.36)$$

Формула (1.36) определяет адмитанс однородной диэлектрической среды. Переход к неоднородной диэлектрической среде можно осуществить, если воспользоваться выражением [2]

$$l = \frac{l}{\varepsilon_1}\int_0^{l_1} \varepsilon(r,z)\,dz = l_1 + \left[\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - l\right]h, \qquad (1.37)$$

где l_1 - геометрическая длина цилиндрического проводника; *h* -уровень насыпи сыпучих материалов относительно свободного конца цилиндрического проводника; ε_1 - диэлектрическая проницаемость среды, непосредственно примыкающей к началу первичного преобразователя ε (*r*, 0) = ε_1; ε_2 -диэлектрическая проницаемость среды в объеме, где $z > l_1 - h$.

Найдется, при каких условиях достигается наибольшая чувствительность преобразователя к изменению параметров исследуемой среды (сыпучих материалов). В качестве такого параметра выберем уровень сыпучих материалов *h*. Для расчетов удобно воспользоваться величиной K_h - относительным

заполнением, которое определим как $K_h=h/l_1$. Определим относительную или нормированную, чувствительность S_{Kh}^{Y} [5]

$$S_{Kh}^{Y}=\frac{Kh}{Y}\frac{\partial Y}{\partial K_h}.$$

Производя необходимые преобразование над соответствующими выражениями, придем к такому результату

$$S_{Kh}^{Y}=\frac{2K_h kl_1}{\sin(2kl)}\left[\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}-l\right]. \qquad (1.38)$$

В большинстве практических применений первичных преобразователей выполняется условие kl << 1. В этом случае формула (1.38) упрощается

$$S_{Kh}^{Y}\approx l-[l+(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}-l)K_h]^{-1}. \qquad (1.39)$$

Из последних двух выражений видно, что для надежной работы измерительного прибора, использующего первичные преобразователи, показанные на рис. 1.1, необходимо: достаточно глубоко погружать первичные преобразователи в исследуемую среду; иметь достаточное отношение диэлектрических проницаемостей свободного пространства ε_1 и исследуемой среды ε_2. Наличие заметных потерь электромагнитной энергии в исследуемой среде ухудшает линейность характеристики преобразования первичного датчика и повышает погрешность измерения технологических параметров.

1.3. Математическая модель импульсного датчика

Структурная схема импульсного датчика приведена на рис. 1.2. Представленная схема является простейшим вариантом импульсного датчика, используемого для измерения технологических параметров. Она содержит нелинейный элемент 1, обладающий гистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), и апериодическое звено первого порядка 2. Нелинейный элемент 1 обеспечивает схему датчика дополнительным фазовым сдвигом, приводящим к возможности возникновения автоколебательного режима [6-7]. Нелинейность ВАХ элемента 1

обеспечивает определенную стабилизацию параметров генерируемого сигнала (при изменении напряжения питания, температуры окружающей среды и др.).

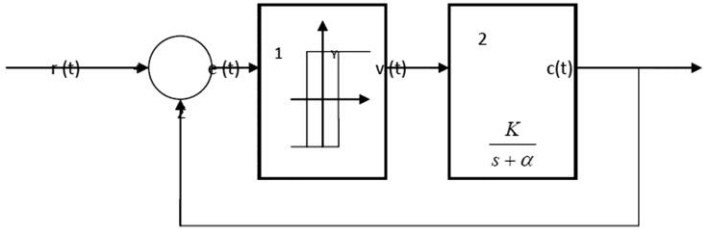


Рис. 1.2. Структурная схема импульсного датчика.

Генерируемые импульсы обычно имеют форму, близкую к прямоугольной (меандра). Поэтому преобразование по Лапласу [3,8] генерируемого сигнала на выходе элемента 1 можно представить таким образом:

$$V(s) = \frac{M[l - \exp(-Ts)]}{s} \exp(-\tau s) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \exp(-nTs), \quad (1.40)$$

где M - константа, определяемая высотой петли гистерезиса нелинейного элемента 1; τ - фазовый сдвиг выходного сигнала $e_2(t)$ относительно входного $e_1(t)$ нелинейного элемента 1 (рис. 1.3, а); T - период квантования (рис. 1.3, б).

Если обозначить передаточную функцию апериодического звена более общего вида (состоящего из нескольких апериодических звеньев с частотами сопряжения 0, s_1, s_2, . .) через

$$G_1 = \{s(s + s_1)(s + s_2)....\}^{-1}, \quad (1.41)$$

то изображение по Лапласу выходного сигнала импульсного датчика (рис. 1.2) будет иметь вид [9,10]

$$C(s) = \frac{M\, th(Ts)}{s} \frac{1}{s(s + s_1)(s + s_2)...}. \quad (1.42)$$

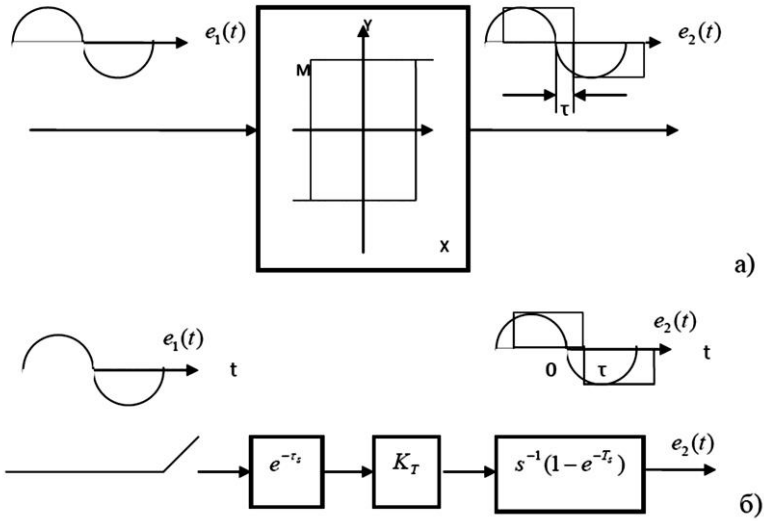


Рис. 1.3. а) гистерезисная характеристика негатрона типа S; б) эквивалентная импульсная передаточная функция негатрона типа S.

Осуществляя обратное преобразование по Лапласу [3] от выражения (1.42), получается

$$c(t) = MG(t) - Mk_0\frac{T}{2} + \sum_{i=1}^{m} Mk_i \exp(-s_i t)\, th\left[\frac{s_i T}{2}\right], \qquad (1.43)$$

где $G(t)$ - оригинал изображения $G_1(s)$; k_i - вычет от изображения по Лапласу выражения $G_1(s)s^{-1}$ для i -ого полюса.

Первый член в левой части (1.43) определяет переходный процесс установления амплитуды колебаний, а члены под знаком суммы описывают установившийся режим автоколебаний в импульсном датчике. Поскольку рассматривается устойчивая система, элементы переходной матрицы после некоторого промежутка времени должны стать константами. Переключение нелинейного гистерезисного элемента 1 происходит в моменты, сдвинутые относительно нулевого значения входного сигнала на величину τ (рис. 1.2.). При этом значения первой гармоники сигнала ошибки будут

$$|e[(1-r)T]| = \lambda, \qquad (1.44)$$

где знак абсолютной величины указывает на то, что знак λ, совпадает со знаком $e_1(t)$ (рис. 1.3, а); κ - некоторый коэффициент, определяемый по формуле $r = 1 - \tau T^{-1}$, принадлежащий отрезку [0, 1].

Для моментов переключения справедливо

$$\lambda = MG[t_0 = (1-r)T] - Mk_0 \frac{T}{2} + M \sum_{i=1}^{m} k_i \exp\{-s_i[t_0 + (1-r)T]\} th(\frac{s_i T}{2}) \quad , \qquad (1.45)$$

где t_o - новая переменная, определяемая как $t_o = t - (1 - r)T$.

Импульсные датчики являются приборами, генерирующими импульсные сигналы. Для самовозбуждения этих приборов необходимы условия: наличие элемента, обеспечивающего фазовый сдвиг (реактивного элемента); наличие между клеммами, к которым подключают реактивный элемент, участка отрицательного дифференциального сопротивления [11]. Причем, участки отрицательного дифференциального сопротивления ВАХ можно получить, используя приборы с однозначными ВАХ, если применить достаточно глубокую положительную обратную связь. Приборы с участками отрицательного дифференциального сопротивления относят к негатронам [12]. По виду ВАХ негатроны бывают N-типа или S-типа [13]. Во многих случаях предпочтительнее использовать негатроны S-типа [4]. Обычно датчики с негатронами S-типа питаются меньшими напряжениями, более экономичны при преобразовании энергии постоянного тока в переменный.

Любую схему импульсного датчика, содержащую резисторы с положительными сопротивлениями, независимые источники тока и напряжения, p биполярных транзисторов и q биполярных диодов, можно рассматривать как многополюсник $c(2p+q)$ парами полюсов [11,14].

Условием существования предельного цикла в рассматриваемой системе будет наличие в z - плоскости полюса $z = -1$. Полюса замкнутой системы в z - плоскости являются корнями характеристического уравнения [11, 15]:

$$1 + K_T G(z, m) = 0, \qquad (1.46)$$

где $K_T G(z,m)$ - передаточная функция эквивалентной разомкнутой системы, охваченной единичной отрицательной обратной связью.

Выражения (4.45) и (4.46) образуют систему уравнений с двумя неизвестными *r* и *T*, решение которой обычно находится численными методами [16]. Значение *T*, которое удовлетворяет выражениям (1.45) - (1.46), является величиной, обратной частоте Найквиста [17, 18]. Эта величина численно равна половине периода предельного цикла.

Критерий стабильности автоколебаний импульсного датчика можно сформулировать, если использовать предположение о негатроне [12], как элементе с прямоугольной петлей гистерезиса. На рис. 1.2, а в качестве негатрона используется нелинейный элемент 1. Для этого предположим, что под влиянием возмущения увеличилось *T*. Как следует из (1.46), это приведет к перемещению нуля передаточной функции во внутрь единичной окружности в плоскости *z*, а также к увеличению отрицательного показателя экспоненты, что ведет к уменьшению амплитуды колебаний. В результате уменьшится *r*. Это означает, что положение равновесия амплитуды колебаний устойчивое.

Апериодическое звено 2 описывается следующим выражением:

$$G_1(s) = \frac{\alpha}{s+\alpha}, \qquad (1.47)$$

где α - частота сопряжения апериодического звена [15].

Отличным от нуля вычетом для апериодического звена (1.47) будет

$$res\left[\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}\right] = -1,$$

а параметр t_o можно определить из выражения

$$\frac{1}{2}th(\frac{\alpha T}{2}) - \exp(-\alpha t_0)th(-\frac{\alpha T}{2}) = 0.$$

Решая последнее уравнение, получим

$$t_0 = \alpha^{-1}\ln 2.$$

Подставляя полученное выражение для t_o в формулу (1.45), найдем

$$\frac{\lambda}{M} = \frac{1}{2} th(\frac{\alpha T}{2}) - \frac{1}{4}\{\exp(-\alpha T) - \exp(-2\alpha T)\}. \quad (1.48)$$

Несмотря на обилие трансцендентных функций [3], выражение в левой части формулы (4.48) представляет собой монотонную функцию при изменении T от нуля до бесконечности. Для удобства дальнейших расчетов импульсного датчика преобразуем формулу (1.48) к виду [19, 20]:

$$R_H = -R th^2(\frac{\alpha T}{2})\{1 - \frac{\exp(-\alpha T) + \exp(-2\alpha T)}{2}\}^2, \quad (1.49)$$

где R и $R_н$ - номинал нагрузочного резистора и дифференциальное сопротивление падающего участка ВАХ негатрона импульсного датчика.

Формула (4.49) показывает, что наивысшей чувствительности к изменению технологических параметров можно достичь, если номинал нагрузочного резистора R составляет половину абсолютного значения дифференциального сопротивления падающего участка ВАХ негатрона Rн. Для дальнейших расчетов нам необходимы два момента: определение наличия падающего участка ВАХ нелинейного элемента электронной схемы датчика (негатрона); аналитическое выражение для определения дифференциального сопротивления падающего участка ВАХ негатрона.

$$Pu = Qi + C, \quad (1.50)$$

где P и Q - действительные квадратные матрицы порядка ($2p+q$); C -действительный вектор размера ($2p+q$); u и i - действительные векторы размера ($2p+q$), элементами которых являются напряжения на парах полюсов и протекающие через полюса токи.

1.4. Расчет параметров электронного блока импульсного датчика

В качестве основы для расчета параметров полупроводниковых приборов примем модель Эберса-Молла [21]:

$$i = -TF(u) \quad (1.51)$$

где T - прямая сумма p матриц второго порядка, имеющих следующий вид для k - ого транзистора

$$\begin{bmatrix} 1 & -\alpha_1^{(k)} \\ -\alpha_N^{(k)} & 1 \end{bmatrix}, \tag{1.52}$$

где $\alpha_N^{(k)}$, $\alpha_1^{(k)}$ - нормальный и инверсный коэффициенты усиления по току транзисторов в схеме с общей базой, соответственно.

Значения коэффициентов усиления по току транзисторов принадлежат открытому интервалу: (0, 1). Для полупроводниковых диодов коэффициенты усиления по току принимаются равными нулю, поэтому для диодов матрицы, аналогичные (4.52), являются единичными. Вектор $F(u)$ имеет вид

$$F(u) = \{ f_1(u), ..., f_{2p+q}(u_{2p+q}) \}^T, \tag{1.53}$$

где k - ая составляющая функция f_k, описываемая выражением

$$f_k(u) = I_{sk}[\exp(\theta_k u) - 1],\ k = \overline{1, 2p+q}, \tag{1.54}$$

где $f_k(u)$ - ток, протекающий через базовую область k - ого транзистора [4]; I_{sk} - ток насыщения электронно-дырочного перехода k-ого транзистора, смещенного в запирающем направлении; θ_k - крутизна диодной характеристики k - ого транзистора.

Последние два параметра имеют положительный знак для транзисторов типа p-n-p и отрицательный - для типа n-p-n [4].

Исключив с помощью уравнения (4.51) ток i в выражении (1.50), получим

$$AF(u) + Bu = C \tag{1.55}$$

где A и B - действительные квадратные матрицы порядка $2p + q$.

Динамическая линейная система с постоянными параметрами, описываемая уравнением (4.55), является полностью управляемой тогда и только тогда, когда вектор-столбцы матрицы управляемости

$$Py = [B, AB, A^2B, ..., A^{n-1}B]$$

порождают ($2p+q$)-мерное пространство [22]. В этом случае говорят, что пара [A,B] полностью управляема [14, 23, 24].

Необходимое и достаточное условие, чтобы уравнение (1.55) обладало единственным решением при всех векторах *F(u)*, состоит в том, чтобы функции $f_k(u)$ были монотонно возрастающими, а матрица $A^{-1}B$ обладала бы двумя следующими свойствами [14]: для любой диагональной матрицы $\underline{D} > 0$ $\det(\underline{D} + A^{-1}B) \neq 0$; каждый главный минор матрицы [$A^{-1}B$] был бы неотрицательным.

Для закороченных клемм электронной схемы негатрона и линеаризованных моделей Эберса-Молла биполярных полупроводниковых приборов [21] уравнение (1.51) запишем как

$$Pu = Qi\,. \tag{1.56}$$

Аналогичное уравнение для разомкнутых клемм негатрона будет

$$P_0 u = Q_0 i \tag{1.57}$$

Ток I, втекающий в узел электронной схемы, в общем случае можно представить выражением

$$I = Du + i \tag{1.58}$$

где D - диагональная матрица линеаризованных сопротивлений модели Эберса-Молла для объемных сопротивлений базы, коллектора и эмиттера.

Подставляя выражение (1.58) в (1.57), получим

$$(Q_0 D + P_0)u = Q_0 i \tag{1.59}$$

Поскольку $[P_o, Q_o]$ является пассивной парой, то $\det(Q_0 D + P_0) \neq 0$, а выражение (1.59) преобразуется к такой форме:

$$u = (Q_0 D + P_0)^{-1} Q_0 I\,. \tag{1.60}$$

С учетом источников тока, принятых в модели Эберса-Молла [25] для биполярных транзисторов, управляемых напряжениями $u_1, ..., u_{2p+q}$, выражение (1.58) представим в виде

$$I = -(T - 1)Du\,. \tag{1.61}$$

где T - матрица, использованная в формуле (1.51); 1 - единичная матрица соответствующего порядка.

Исходя из (1.60) и (1.61), нетрудно получить обратную разность относительно параметра α [7]

$$F\alpha = 1 + (T - 1)D(Q_0 D + P_0)^{-1} Q_0 . \qquad (1.62)$$

Аналогичным образом найдем матрицу нулевой обратной разности $\underline{F}_\alpha$

$$\underline{F}\alpha = 1 + (T - 1)D(QD + P)^{-1} Q . \qquad (1.63)$$

На основе теоремы Г.Боде [7] получим выражение для входного сопротивления $Z(\alpha)$

$$Z(\alpha) = Z(0)\frac{\det(Q_0 D + P_0)\det(QTD + P)}{\det(QD + P)\det(Q_0 TD + P_0)}, \qquad (1.64)$$

где $Z(0)$ - сопротивление между входными полюсами электронной схемы при отсутствии источников тока ($\alpha = 0$).

Последнее выражение удобно использовать для оценки принадлежности электронной схемы к негатронам типа *S*. Для этого предположим, что диагональная матрица $\mathrm{D} \in D$ (D - множество диагональных матриц, определяемых формулами (1.58) и (1.61)]. Существует собственное подпространство D_H такое, что ВАХ электронной схемы обладает участком отрицательного дифференциального сопротивления для некоторых значений матрицы $\mathrm{D} \in D_H$. Следовательно, принадлежность электронной схемы на биполярных полупроводниковых приборах к негатронам типа S можно определить из следующих условий [14]:

$$\begin{aligned} &-\det(QTD + P) < 0, \quad D \in D_H , \\ &-\det(QTD + P) \geq 0, \quad D \in D - D_H \end{aligned} \qquad (1.65)$$

Однако в приборостроении все больше биполярные приборы заменяются на униполярные [4, 21], отличающиеся высокими входными сопротивлениями, большей стабильностью к изменению возмущающих факторов (температуры, электромагнитных полей, питающих напряжений и др.). Если биполярные транзисторы управляются токами, то униполярные приборы управляются напряжениями [4, 21]. Интересующую нас зависимость между вектором входных напряжений U размерностью p, и вектором ЭДС источников питания E размерностью q, выразим в виде [14]

$$E = MU , \qquad (1.66)$$

где M - матрица коэффициентов усиления по напряжению размером qxp.

Входное сопротивление электронной схемы $R(M)$ на униполярных полупроводниковых приборах определим как

$$R(M) = u_1 / i_1 \tag{1.67}$$

где u_1, i_1 - напряжение и ток на полюсах электронной схемы.

Попытается определить входное сопротивление $R(M)$. Для этого предположим, что элементы векторов E не зависят от u_1. Тогда можно воспользоваться условием суперпозиции [14]

$$i_1 = G_1 u_1 + BE, \tag{1.68}$$

где G_1 и B - некоторые матрицы проводимостей электронной схемы. Заметим, что если $M = 0, E = 0$, то $G_1 = R(0)^{-1}$.

Вектор напряжений U представим аналогичным образом:

$$U = Au_1 + PE, \tag{1.69}$$

где A и P - некоторые матрицы передачи электронной схемы [14].

Умножая обе части уравнения (1.69) слева на M и используя формулу (1.66), получим

$$E = (1_q - MP)^{-1} MAu_1, \tag{1.70}$$

где 1_q - единичная матрица порядка q.

Подставляя выражение (1.70) в (1.68) и учитывая (1.67), найдем

$$R(M)^{-1} = G_1 + B(1_q - MP)^{-1} MA. \tag{1.71}$$

Учитывая, что обратная матрица представляет собой отношение присоединенной матрицы к определителю матрицы [26, 27], формулу (1.71) можно переписать

$$R(M)^{-1} = \frac{G_1\{\det(1_q - MP) + G_1 B\, adj(1_q - MP)MA\}}{\det(1_q - MP)}. \tag{1.72}$$

Используется известное свойство из теории матриц [26, 27], которое запишем как

$$\det X + Z\, adj(X)Y = \det(X + YZ),$$

где X - квадратная матрица порядка p; Y, Z - прямоугольные матрицы размером qxp и pxq, соответственно.

На основании этого свойства выражение (1.72) примет вид [14]

$$R(M) = G_1^{-1} \frac{\det(1_q - MP)}{\det[1_q - M(P - G_1^{-1}AB)]}. \qquad (1.73)$$

Формула (1.73) является аналогом формулы (1.64), приведенной ранее для биполярных полупроводниковых схем.

Сформулируется критерий принадлежности электронной схемы на униполярных полупроводниковых приборах к негатронам типа *S*. Пусть матрица $P \in D$ {D - множество диагональных матриц, определяемых формулой (1.69)}.

Существует собственное подпространство $D_н$ – такое, что ВАХ электронной схемы на униполярных транзисторах обладает участком отрицательного дифференциального сопротивления для некоторых $P \in D$. Тогда принадлежность упомянутой схемы к негатронам типа *S* можно определить из следующих условий [14]:

$$-\det[1_q - M(P_G_1^{-1}AB)] < 0 \text{ для некоторых } P \in D_H,$$

$$-\det[1_q - M(P - G_1^{-1}AB)] \geq 0 \text{ для } P \in D - D_H. \qquad (1.74)$$

Получение более общего критерия принадлежности электронных схем, состоящих как из униполярных, так и биполярных полупроводниковых приборов, к негатронам типа *S* требует приведения электронных схем на биполярных полупроводниковых приборах к эквивалентным схемам на униполярных приборах и наоборот [28]. При этом используют либо критерий (1.74), либо (1.65). Соответственно, для определения входного сопротивления используют (1.72) либо (1.64).

Контрольные вопросы

1. Математическая модель импульсного измерительного преобразователя электрофизических характеристик сыпучих материалов.
2. Объясните схема подключения импульсного датчика.
3. Как характеризует комплексная диэлектрическая проницаемость?
4. Что такое импульсные датчики?
5. Расчет параметров модели первичного импульсного измерительного преобразователя.
6. Математическая модель импульсного датчика.
7. Расчет параметров электронного блока импульсного датчика.

ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА АСУТП ВЛАГО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. Алгоритмизация контроля и управления технологическими процессами и производствами

Проблема алгоритмизации контроля и управления производственными процессами, имеет достаточно давнюю историю. Здесь не же ограничимся кратким обзором более поздних достижений разработок второй половины XX века, когда обильный поток исследований в области теории управления и автоматического контроля, в целом, оказался подкрепленным мощным развитием средств электронной и вычислительной техники.

Современный подход к оптимизации контроля и управления производственными процессами предполагает создание алгоритмического обеспечения во взаимосвязи с вопросами развития информационных технологий. Это означает переход к качественному объединению разнородных технологий, позволяющему осуществлять разработку алгоритмов контроля и управления с учетом возможности модификации и развития соответствующих систем хранения и переработки информации.

Примером реализации подобного подхода являются аналитические информационные технологии (АИТ), представляющие собой подкласс информационных технологий, ориентированных на задачи автоматизированной поддержки принятия решений и прогнозирования состояния сложных динамических систем в нестационарных и неоднородных средах.

В настоящее время основным и наиболее распространенным инструментом прогнозирования развития сложных ситуаций и выработки управляющих решений на производстве является эмпирический анализ. Большинство АСУ функционируют по единой методологии: осуществляется сбор информации, ее визуализация и представление специалистам по оперативному управлению производственными процессами. Информационная система работает в этом случае в режиме оперативной визуализации и передачи команд к исполнительным механизмам (ИМ).

Однако в сложных, нестационарных ситуациях, обусловленных влиянием большого числа разнообразных гетерогенных факторов, специалисты далеко не всегда находят рациональные решения; их мнения оказываются субъективными и противоречивыми. Человеческий мозг не способен прогнозировать развитие ситуаций, находящихся под воздействием более 3...5 независимых факторов. Для взаимосвязанных воздействий даже опытный специалист способен корректно учесть не более трех факторов. В то же время большинство реальных производственных ситуаций требуют учета, как минимум, 6...50 (и более) значимых факторов влияния.

Таким образом, существует настоятельная актуальная проблема создания качественно новой *аналитической системы контроля и управления,* ориентированной на решение задач выработки управляющих решений на основе комплексного системного анализа производственных ситуаций и прогнозирования их развития в интересах формирования и реализации оптимальных режимов контроля и управления производством.

Возникновение новых технологий хранения и обработки данных (хранилища или витрины данных) связано с необходимостью накопления и оперативной обработки сверхбольших объемов ретроспективной информации (единицы Гбайт) [29-30]. В частности, необходимость ускорения обработки аналитических запросов привела к разработке многомерного формата представления данных и созданию новых концепций хранения и обработки данных, представленных в виде постулатов Б. Инмона [31] и Е. Кодда [32].

Однако для более глубокого понимания протекающих производственных процессов необходимо проведение соответствующих аналитических исследований, основанных на применении сложных математических средств анализа многомерных ситуаций, прогнозирования их развития и выработки оптимизирующих рекомендаций.

Следует заметить, что формирование производственного решения является центральным элементом рассматриваемый системы контроля и управления (рис.2.1). Указанная функциональность, помимо аналитической обработки (выявление

скрытых закономерностей и взаимосвязей, оценка их влияния на основные показатели исследуемой ситуации, прогнозирование развития ситуаций и т.п.), включает функции сбора и предварительной обработки информации, ее хранения, самообучения, подготовки наглядных отчетов и др.

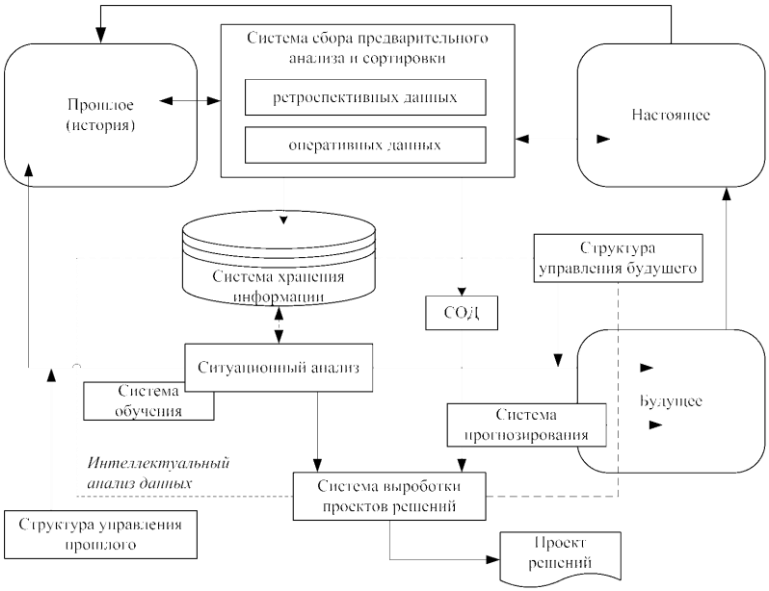


Рис.2.1. Структура автоматизированного формирования управляющих решений.

Таким образом, главным отличием DM от известных систем обработки данных (СОД), широко применяемых в современных промышленных информационных системах, следует считать подход к формированию управленческих решений с позиции историзма, т.е. на основе полномасштабного количественного анализа всего ретроспективного опыта, предшествовавшего текущей ситуации и позволяющего перенести результаты прецедентов на прогнозируемый сценарий.

Что DM не является альтернативой СОД; традиционная транзакционная система обработки сохраняет за собой функции

поддержки оперативных управленческих решений и подготовки экспресс-отчетов.

Акцент на количественном анализе ситуаций позволяет перенести центр тяжести процедуры выработки управленческого решения с эвристических логико-интуитивных методов, характерных для эмпирических технологий, на мощную, глубоко формализованную платформу прикладной математики. При этом качественный, эмпирический анализ также сохраняется, и его основным приложением остается вполне обозримый объем конечного перебора уже сформированных вариантов решений на фоне подготовленных прогностических сценариев. Таким образом, речь, по - существу, идет об основой форме гибридного интеллекта, в которой машине отводится роль сверхмощного количественного анализатора, оставляя за человеком вопросы окончательного решения [33÷34].

2.2. Концептуальные основы интеллектуальной поддержки измерителей состава и свойств твердых сыпучих материалов

В современных условиях эффективность управления производством в значительной степени определяется методами и техническими средствами контроля и управления качеством продукции на всех стадиях технологических процессов. Задачи контроля и управления качеством промышленной продукции, оптимизации технологических процессов решаются на базе комплексной автоматизации производства, широкого внедрения систем и средств автоматизации. Одно из основных условий успешного решения задачи – обеспечение систем автоматического управления средствами оперативного автоматического контроля параметров – характеристик технологических процессов: физических, химических и др. величин, информация о которых необходима для обеспечения оптимального управления тем или иным технологическим процессом.

Основными параметрами, обеспечивающими конкурентоспособность и покупательский спрос веществ, материалов и изделий, является их качество. На этапе проектирования эти параметры обеспечиваются правильным выбором сырья, полуфабрикатов, базы комплектующих изделий и материалов,

режимов осуществления технологических процессов. На этапе же технической подготовки производства упомянутые переменные обеспечиваются проектированием современных эффективных технологий, исключающих или минимизирующих случаи возникновения брака в процессе промышленного производства. Наконец, в процессе собственно промышленного производства параметры качества обеспечиваются путем соблюдения предписаний технологии, осуществления входного контроля параметров сырья, полуфабрикатов и выходным контролем качества конечной продукции.

На каждом из этих этапов реализуются локальные функциональные подсистемы контроля и управления качеством конечных материалов, веществ и изделий. В современных условиях актуальна увязка этих разрозненных подсистем в единую, интегрированную систему. Без этого невозможно проведение сквозного контроля качества.

Реализация принципа интеграции позволит значительно повысить оперативность и эффективность контроля и управления качеством. В ряду подобных мероприятий необходимо особо выделить целесообразность включения в данные подсистемы и в единую интегрированную систему средств интеллектуальной поддержки, что способствует исключению или минимизации субъективизма при принятии управленческих решений. Таким образом, проблема интеллектуализации технологий распределенного контроля и управления качеством промышленной продукции может рассматриваться как одна из злободневных задач научно-технического прогресса. Искусственный интеллект – один из наиболее эффективных методов и средств, используемых для решения сложных производственных задач.

В современных АСУТП к управлению процессами предъявляются качественно новые требования. Если на ранних этапах реализации АСУТП превалировали информационные (технологические и технико-экономические) параметры и критерии, в основном реализующие принципы наблюдения за состоянием оборудования и протекания технологических процессов, то в настоящее время важнейшие функции АСУТП состоят не только в анализе качества протекания

технологических процессов, но и в управлении ходом их выполнения, т.е. в формировании управленческих решений и планов.

Если до последнего времени удовлетворялись простой фиксацией отклонений от заданных норм и доведением фактической информации до оперативного персонала систем управления, то сегодня управление технологическими процессами должно осуществляться на основе оптимизационных процедур, базирующихся на использовании современных математических методов. Это, в свою очередь, требует наличия в составе АСУТП быстродействующих точных датчиков, достоверных и оперативных систем распределенного контроля и средств локальной полевой автоматики.

Анализ протекания большинства реальных технологических процессов свидетельствует о существовании предпосылок для возникновения отклонений от планируемых показателей качества материалов, веществ и промышленных изделий.

В связи с этим в настоящее время предпринимаются попытки повысить качество теоретических моделей, используемых при управлении технологическими процессами промышленных производств. Это совершенствование теоретических моделей происходит в следующих направлениях [35, 36]:

- использование таких математических моделей, в которых учитывается случайный характер свойств перерабатываемого сырья, вспомогательных материалов и полуфабрикатов, дрейф характеристик технологического оборудования;
- использование стохастических адаптивных моделей прогнозирования химического состава компонентов сырья, вспомогательных материалов и полуфабрикатов и методов расчета их оптимального состава на основе выполненных прогнозов; расчет оптимальных уставок регуляторов и стабилизация расходов материальных и энергетических потоков;
- разработка теории группового управления цепочкой стохастических технологических объектов с глобальным критерием, чаще всего, в виде линейной свертки локальных целевых функций с неизвестными коэффициентами.

Создание таких моделей позволяет осуществить переход к методам решения задач адаптивного управления, основанным на

теории стохастического управления, методах векторной оптимизации и теории искусственного интеллекта.

Отклонения технологических параметров от регламентированных заданных норм, обусловленные различными дестабилизирующими факторами реального производства, требуют корректировки состава исходного сырья, промежуточных продуктов. На практике такая корректировка происходит с определенным запаздыванием, если сравнивать с моментом принятия управленческого решения о необходимости корректировки. Длительность такого чистого запаздывания определяется конкретной технологией промышленного производства.

В этой связи целесообразно отметить, что выполненная сравнительная оценка трех известных способов регулирования процессов с чистым запаздыванием (классического метода регулирования, метода линейного программирования и самонастраивающегося регулятора) свидетельствуют о том, что наиболее точное управление обеспечивается при использовании самонастраивающихся регуляторов.

Известны два подхода к решению производственных задач: один из них основан на человеческом опыте и знаниях, другой – на применении техники оптимизации. Первый более приемлем для задач, сложных по их математическому описанию и решению методами оптимизации; второй – более удобен для задач, которые можно сформулировать в терминах и категориях математического программирования. Заметим, что ни тот, ни другой подход не являются универсальными. В этой связи поиск альтернативных путей решения проблемы продолжается, и на этих путях были разработаны так называемые специализированные экспертные системы. Обычно экспертная система, базирующаяся на человеческом опыте и знаниях, обеспечивает решение той конкретной задачи, для которой она создана. Другой подход связан с построением так называемой тандемной системы, состоящей из двух различных по своим режимам работы подсистем, первая из которых – экспертная система, а вторая включает в себя модель с алгоритмом. Экспертной системой оценивается частное решение задачи, генерируемое алгоритмом. Как следствие такой оценки,

экспертная система может модифицировать ограничения модели, генерировать новый набор параметров и т.д. При этом модель должна быть простой, чтобы решение легко можно было получить алгоритмическим путем. Ту часть задачи, которую трудно математически сформулировать, рассматривает экспертная система.

Повышение интеллектуального уровня АСУТП промышленных производств идет в направлении реализации функции оптимального управления. Как правило, задача решается с помощью математической модели технологического процесса. Параметры математической модели рассчитываются по статистическим экспериментальным данным. В процессе эксплуатации системы математическая модель подстраивается под технологический процесс путем периодической адаптации ее параметров.

Важным направлением повышения интеллектуального уровня систем контроля и управления является использование элементов искусственного интеллекта и моделирования. База знаний системы включает в себя сведения о причинах возникновения дефектов и отклонений на основе сравнения удачных и неудачных технологических решений, синтезирует закономерности между технологическими параметрами и причинами отклонений.

Перспективно создание локальных вычислительных систем сетевой архитектуры, реализации современных децентрализованных распределенных смысле слова систем управления, снабженных работоспособными средствами комплексирования в локальные сети программируемых контроллеров и управляющих машин реального времени. Важнейшим направлением дальнейшего совершенствования систем автоматизации технологических процессов промышленных производств, в том числе и систем контроля и управления процессами влого-тепловой обработки сыпучих материалов, является создание таких программно-технических комплексов, которые на основе протоколов связи позволяют объединить средства вычислительной и управляющей техники различных линий и модификаций.

В настоящее время одним из магистральных путей повышения эффективности функционирования систем контроля и диагностики является разработка концептуальных основ и их практическая реализация в ходе построения гибких, адаптивных систем, способных к обучению и самообучению, самонастройке и оперативной перестройке, принимающих управленческие решения и оценивающих их достоверность, т.е. систем, обладающих элементами искусственного интеллекта.

Появившееся в последнее время понятие «интеллектуальный датчик» (smart sensor) определяет измерительные системы, обладающие сложной пятиуровневой структурой.

На первом уровне иерархии происходит преобразование физического явления в электрический сигнал. Такую возможность обеспечивают датчики всех типов, причем, в отдельных случаях используется сложная технология.

На второй ступени осуществляется компенсация воздействия внешней среды (например, температурная коррекция, устранение электромагнитного воздействия). Сюда также относится защита датчика от разрушения вследствие внешних воздействий.

На третьем уровне иерархии осуществляется цифровая связь датчика с системой сбора данных или управления, причем, связь может быть двухсторонней.

На четвертой ступени иерархии решаются вопросы, связанные с автоматической диагностикой датчика.

Пятый уровень относится к управлению: датчик снабжен переключающими устройствами и вырабатывает управляющие воздействия.

В процессе автоматизации производства возникает необходимость измерять такие субъективные показатели качества, как вкус, запах, масличность и др. Для этих целей разрабатываются новые типы датчиков, обладающих «шестым чувством» – благодаря использованию возможностей искусственного интеллекта.

Создается сеть, объединяющая несколько датчиков, позволяющих измерять отдельные физические и химические параметры, а также экспертную систему, в которой хранятся сведения, соответствующие чувственным ощущениям человека.

Первый этап создания таких сетей – сбор данных, что является наиболее трудоемким процессом. Например, в пищевой промышленности для оценки вкусовых качеств продукции необходимо собрать многочисленные образцы с различным вкусом и измерить обычными датчиками параметры каждого образца: pH, химический состав, влажность, цвет и др. Затем группа экспертов с точностью определяет вкусовые качества каждого образца.

Второй этап состоит в обучении процессора сети с искусственным интеллектом способам обработки накопленной на первом этапе информации. В результате обучения процессор должен уметь определять взаимосвязь измеряемых параметров и вкусовые качества продукта.

На третьем этапе проводятся испытания и оценка сети, при этом должны апробироваться новые образцы.

Подобная сеть датчиков с искусственным интеллектом может с успехом применяться для управления качеством промышленной продукции.

Управление качеством продукции промышленного производства осуществляется посредством сбора и анализа информации и принятия решений по устранению причин, вызывающих снижение показателей качества конечной продукции. Эффективность систем контроля и управления качеством в большинстве случаев определяется степенью интеграции с подсистемами автоматизированного контроля качества.

Наиболее ответственными этапами управления качеством являются оценка текущих ситуаций и процесс принятия управленческих решений. На этих этапах на адекватность решений применительно к ситуациям значительное влияние оказывает субъективизм лиц, принимающих решение. Исключить или значительно снизить погрешности субъективных решений призван подход, основанный на интеллектуализации интегрированных систем управления качеством.

На рис. 2.2 приведена структурная схема использования элементов и алгоритмов интеллектуальной поддержки при автоматизации технологий контроля и управления качеством [37].

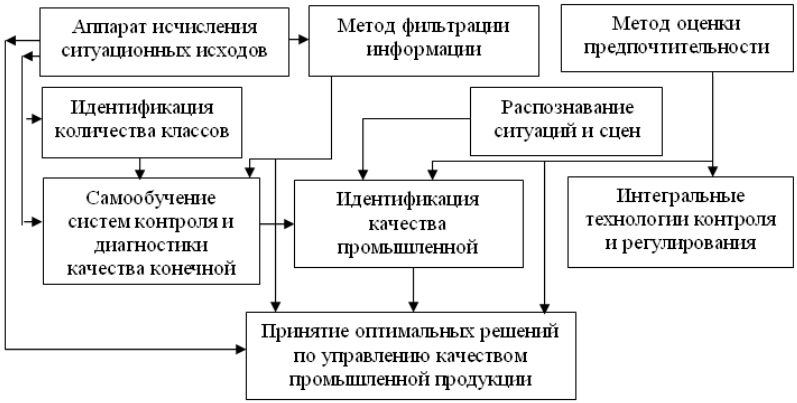


Рис. 2.2. Взаимодействие средств интеллектуальной поддержки в технологиях автоматизированного контроля и управления качеством промышленной продукции.

Оценка качества промышленной предполагает наличие следующей последовательности действий: измерение технологических параметров (выявление исходной ситуации), анализ полученных данных с целью принятия решений о качестве объекта контроля и формирование заключения (прогнозирование исхода).

В процессе управления качеством продукции последовательность действий аналогична: анализ текущей ситуации, оценка возможных событий и исходов. В общем случае имеется ряд отображений вида: ситуация $\Rightarrow$ событие $\Rightarrow$ исход. Приведенная цепь отображений не является законченной, поскольку достигнутый исход может создать свою ситуацию, предшествующую новому событию, приведшему к новому исходу и т.д.

Из сказанного следует наличие причинно-следственной связи «ситуация-исход» в технологиях контроля и управления качеством промышленной продукции. Использование аппарата ситуационных исходов для создания систем контроля, диагностики, прогнозирования надежности и управления качеством позволяет формировать свойства интеллекта в

исчислении исходов контроля и испытания и оценки ситуаций по результатам полученных данных.

Важнейшим свойством интеллекта является возможность проведения целенаправленного отбора информации с целью обеспечения ее достоверности для адекватной оценки ситуации и принятия оптимального решения. Основными причинами существования факта недостоверности информации при контроле и управлении качеством промышленной продукции являются [38]: отсутствие возможности обеспечения объективности оценок; зашумленность измерительной информации; погрешность из-за неправильного выбора методов измерения или средств их реализации; случайные помехи и искажения и т.д.

При этом для минимизации вероятности использования недостоверной информации при анализе ситуаций и принятии решений необходим ее предварительный отбор, или фильтрация. Это особенно актуально в системах искусственного интеллекта (СИИ).

Зачастую подобный отбор в эргатических системах осуществляется лицом, принимающим решение на нечетком логическом или интуитивном уровне без использования строгих формализмов. Данные обстоятельства затрудняют простую имитацию поведения лица, принимающего решение (ЛПР), при решении задач построения информационных фильтров в СИИ и требует эффективных принципов и приемов разработки методов фильтрации измерительной информации [39, 40].

2.3. Идентификатор показателей качества сыпучих материалов

Свойства сыпучих материалов формируются в процессе выращивания его в поле и существенно зависят от типа, сорта почвенно-климатических условий данного района страны и конкретного года урожая. После уборки свойства сыпучих материалов изменяются вследствие воздействия внешних факторов (транспортирование, сушка и т.п.). Все это приводит к существенному разнообразию поступающих на перерабатывающие предприятия партий сыпучих материалов по всем показателям качества.

Различие свойств сыпучих материалов требует корректировки режимов технологических систем для их оптимизации, т.е. переналадки всех машин и аппаратов.

Сыпучие материалы должно поступать в переработку с устойчивыми показателями технологических свойств. Стабилизация свойств сыпучих материалов на неизменном уровне – необходимая предпосылка автоматизации технологического процесса. Стабилизация технологических свойств сыпучих материалов достигается посредством гидротермической обработки (ГТО), а также при смешивании разнородных по характеристике отдельных партий в одну помольную смесь. Показатели качества такой смеси могут быть заданы заранее. Задача в этом случае сводится к подбору компонентов смеси и расчету их необходимого соотношения.

При смешивании партий сыпучих материалов значения стекловидности, зольности содержания клейковины подчиняются закону аддитивности, т.е. могут быть определены посредством расчета средневзвешенных величин. Однако показатели, определяющие хлебопекарные свойства, могут быть неаддитивными. Например, объемный выход хлеба, как правило, превышает расчетную среднюю величину. В особенности это характерно при смешивании сыпучих материалов сильной и слабой пшеницы; при некоторых соотношениях, индивидуальных для каждой пары компонентов, объемный выход хлеба превышает даже его величину для муки, полученной только из сыпучих материалов сильной пшеницы.

Таким образом, смешивание разнородных партий материалов перед размолом предопределяет технологическую эффективность, промышленной переработки сыпучих материалов.

При оценке силы пшеницы используют следующие показатели: содержание белка, стекловидность, содержание сырой клейковины, ее качество, хлебопекарные свойства. Главным показателем следует считать объемный выход хлеба. Именно проведение пробных выпечек хлеба наиболее полно выявляет потенциальную способность муки (табл.2.1).

Установлено, что при смешивании сильной и слабой пшеницы существенно улучшаются хлебопекарные свойства

муки. Под смесительной ценностью понимают способность сильной пшеницы улучшать слабую, доводя показатели качества хлеба до нормы.

Таблица 2.1

Оценка качества сыпучих материалов

Признак качества	Нормы для пшеницы		
	сильной	средней	слабой (менее)
Содержание белка, % на сухое вещество	Не ниже 14	14…11	11
Стекловидность, %:			
I и IV типов	Не ниже 75	75…40	40
III типа	Не ниже 60	—	60
Содержание сырой клейковины, %:	Не ниже 28	25	25
в зерне	Не ниже 32	30	30
в муке 70 %-ного выхода	I	II	II
Качество клейковины (не ниже группы)			
Объемный выход хлеба из 100 g (г) муки, sm^3 ($см^3$)	Свыше 500	400…500	400

Мерой улучшения качества хлеба может служить показатель - эффект улучшения

$$E = \frac{100(V_1 - V_2)}{V_2}, \qquad (2.1)$$

где v_1 – объемный выход хлеба из смеси муки; v_1 – то же, из муки слабой пшеницы.

Смесительная ценность сильной пшеницы может быть определена величиной отхода от аддитивности объемного выхода хлеба. На рис. 2.3 приведён график зависимости объёмного выхода хлеба от состава муки, взятой для его приготовления. По оси абсцисс отложено содержание муки со слабой клейковиной.

Установлено, что при 50 % слабой муки и 50 % сильной хлебопекарные ее достоинства выше, чем при остальных

вариантах. Но это соотношение не является постоянным, а зависит от взятых компонентов партий сильной и слабой муки.

Для оценки технологических свойств помольной смеси желательно провести помол сыпучих материалов на лабораторной мельнице МЛУ-202.

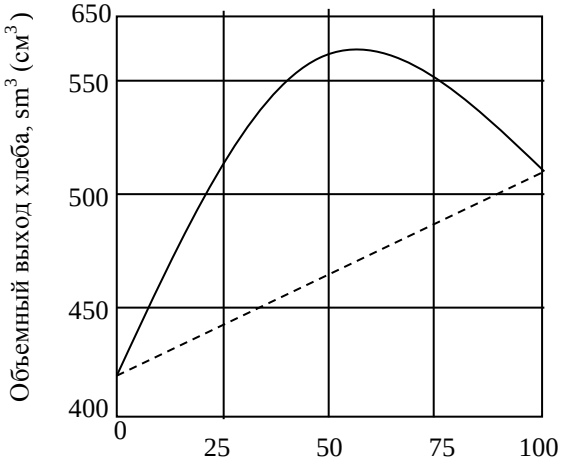


Рис. 2.3. Зависимость объёмного выхода хлеба от соотношения сильной и слабой муки.

Сыпучая материал, поступающее на предприятие, закладывают на предварительное хранение в бункере. Рекомендуется, чтобы запас сыпучих материалов был равен не менее чем месячной производительности завода. Сыпучие материал в бункере размещают с учетом его свойств и показателей качества. Партии сыпучих материалов хранят раздельно:

по типу, желательно при этом учитывать также сорт и район произрастания;

по влажности – при разности значений 1 % и более;

по стекловидности – менее 40 %, от 40 до 60 и более 60 %;

по зольности – менее 1,97 и более 1,97 %;

по содержанию клейковины - свыше 25 %, 25….20 и ниже 20 %;

по натуре - свыше 750 g/l (г/л), от 750 до 690 g/l (г/л).

Строгое выполнение этих требований позволяет так подобрать компоненты помольной партии, чтобы она обладала достаточно высокими технологическими свойствами.

Состав помольной партии определяют расчетом, основываясь на требуемом качестве сыпучих материалов и исходя из наличия сыпучих материалов в бункере. Обычно помольную партию составляют из двух – трех или четырех компонентов, не более. При расчете исходят из того, что все учитываемые показатели качества подчиняются закону аддитивности, т.е. могут быть найдены посредством расчета средневзвешенной величины.

Обозначим: М - масса итоговой помольной партии; m_i - масса отдельных компонентов помольной партии; $\bar{x}$ – средневзвешенное значение избранного показателя качества сыпучих материалов; x_i - индивидуальные значения этого показателя для каждого из компонентов смеси. Тогда для случая формирования помольной партии из двух компонентов можно составить уравнения

$$\begin{gathered} \mathrm{M}\,\bar{x} = m_1 x_1 + m_2 x_2, \\ \mathrm{M} = m_1 + m_2. \end{gathered} \tag{2.2}$$

Отсюда получаем массу исходных компонентов

$$\begin{gathered} m_1 = \frac{\mathrm{M}\left(\bar{x} - x_2\right)}{\left(x_1 - x_2\right)}, \\ m_2 = \mathrm{M} - m_1. \end{gathered} \tag{2.3}$$

Для партии из трех компонентов аналитически задача решается при условии равенства масс двух из них. Приняв $m_2 = m_3$, получим

$$m_1 = \frac{\mathrm{M}\left(\bar{x} - \dfrac{x_2 + x_3}{2}\right)}{x_1 - \dfrac{x_2 + x_3}{2}}, \tag{2.4}$$

$$m_2 = m_3 = \frac{\mathrm{M} - m_1}{2}.$$

Расчет ведут по каждому из показателей качества: содержанию клейковины, зольности, стекловидности. Иногда учитывают также натуру. Приведем числовой пример.

Предположено**,** что требуется составить помольную партию со средневзвешенным значением стекловидности 60 % из двух исходных партий: стекловидность одной 86 %, второй 43 %; заданная масса партии 1000 t (т). Последовательность операций приведена в табл.6.2.

Таблица 2.2

Порядок расчета помольной смеси из двух компонентов

Показатели	Компоненты смеси		Требуемая смесь
	первой	второй	
Стекловидность, %	86	26	60
Отклонение стекловидности данного компонентов от заданного значения	86-60=26	60-43=17	—
Расчетное соотношение компонентов в партии	17	26	17=26=43

Массу компонентов находим по формулам:

первого

$$m_1 = \frac{1000 \cdot 17}{43} \approx 395 \text{ t (т)};$$

второго

$$m_2 \approx 605 \text{ t (т)};$$

или же

$$m_2 = \mathrm{M} - m_1 = 605 \text{ t (т)}.$$

Проверяется правильность расчета, определяя средневзвешенное значение стекловидности для получения помольной партии

$$\bar{x} = \frac{395 \cdot 86 + 605 \cdot 43}{1000} = 60\%.$$

Расчет проведен верно, поскольку значение стекловидности составленной помольной партии соответствует заданному.

Применение метода расчетной таблицы для помольной партии, составленной из трех компонентов, приводит к тому, что массы двух компонентов получаются одинаковыми.

Возможен также графический метод расчета состава помольной партии по номограммам. Значительный эффект достигается, если расчет состава помольной партии проводят на ЭВМ. В этом случае ЭВМ при переборе вариантов исходит из целевой функции стабилизации технологических свойств сыпучих материалов в течение возможно более продолжительного периода. Такая стабилизация позволяет поддерживать режимы технологических систем на неизменных оптимальных уровнях, что положительно сказывается на эффективности процесса. Кроме того, наличные запасы сыпучих материалов в бункере используются равномерно. Наконец, метод позволяет одновременно учитывать не один или два показателя, как это было при нашем расчете, а 5 …8 или более различных показателей качества сыпучих материалов.

Смешивание сыпучих материалов должно быть организовано так, чтобы, во-первых, обеспечивалась однородность состава помольной смеси и, во-вторых, каждый компонент помольной смеси раздельно подготавливался к помолу в оптимальном режиме.

Реализация второго условия определяет необходимость смешивания компонентов помольной смеси только после завершения гидротермической обработки (ГТО), режимы которой индивидуальны для каждого компонента. Обычно смешивание проводят после основного отволаживания сыпучих материалов. Для этого под бункерами для отволаживания устанавливают дозаторы и шнековые смесители.

Первое же условие требует, чтобы процесс смешивания был достаточно развит для обеспечения однородности помольной партии. Такому требованию отвечает смешивание сыпучих материалов непосредственно после бункеров для отволаживания. В этом случае, кроме шнекового смесителя, сыпучие материал проходит через транспортные устройства, что обеспечивает достаточно высокую однородность помольной партии на выходе из подготовительного отделения. Иногда для смешивания

используют специальный оперативный бункер, в который подают в заданном соотношении компоненты помольной партии.

С целью идентификации показателей качества сыпучих материалов, поступающего на мукомольные предприятия и элеваторы, нами предложен классификатор показателей качества [41], представляющий собой трёхмерный массив диапазонов изменения анализируемых параметров. Границы диапазонов классификатора выбираются таким образом, чтобы в пределах диапазонов ГОСТ (или стандарты Республики Узбекистан) разрешалось смешивание различных порций сыпучих материалов для формирования укрупненных партий перерабатываемого сырья.

Структура классификатора выглядит следующим образом:

$$KPZ=<D(K,P,d), \qquad (2.5)$$

$$K_6\{K\};\ P=1,\ KP(K);\ d \in <1,2,KD(P)>;\ d=d_1(K_1P),\ d_2(K_1P);$$

где $D(K,P,d)$ – диапазон с номером d для сыпучая материала с кодом K показателя качества сыпучих материалов P; K – код культуры (берется из отраслевого классификатора культур); $\{K\}$ - множество кодов сыпучих материалов, поступающих на мукомольное предприятие или элеватор; P – номер (код) показателя качества сыпучих материалов, который определяет наименование этого показателя:

$$P= \begin{cases} 1 - \text{для культуры зерна;} \\ 2 - \text{для влажности зерна;} \\ 3 - \text{для сорных примесей;} \\ 4 - \text{для зерновых примесей;} \\ 5 - \text{содержания сырой клейковины;} \\ 6 - \text{для влажности;} \\ 7 - \text{для показания стекловидности;} \end{cases}$$

$KP(K)$ – количество показателей качества, характеризующих сыпучие материалом с кодом К;

$$KP(K) = \begin{cases} 7, \text{ если } K \text{ определяет материалу}; \\ 4, \text{ если } K \text{ определяет другую материалу}; \end{cases} \qquad (2.7)$$

d – порядковый номер (код) одного из диапазонов, на которые разбивается область возможных значений показателя Р для сыпучая материала с кодом К; *KD(P)* – максимальное количество диапазонов для показателя качества Р, $KD(P) \in (1, 2, \ldots 9)$; $D_1(K_1P)$ и $d_2(K_1P)$ – нижняя и верхняя границы для изменения показателя Р материала К (эти параметры кодируют область изменения показателя Р для всех материалов: $<1, 2, \ldots, KD(P)>$).

Каждый диапазон классификатора задается нижней *N(K, P, d)* и верхней *V(K, P, d)* границами изменения показателя, причем, нижняя граница следующего диапазона равна верхней границе предыдущего:

$$D(K, P, d) \le N(K, P, d), V(K, P, d) >; N(K, P, d+1) = V(K, P, d). \quad (2.8)$$

На основании разработанного классификатора предложен способ кодирования показателей качества сыпучих материалов.

Обозначим вектором Z_i - код культуры и физические значения показателей качества i-ой порции сыпучих материалов, поступившей с *i*-ым автомобилем:

$$Z_i = < K, Z(K,1), \ldots, Z(K, KP(K)) >, \quad (2.9)$$

где *Z(K,P)* – физическое значение показателя качества Р.

Располагая классификатором *KPZ*, включающим информацию о материале *K*, можно сформировать вектор кодов $\vec{KH}_i$, отображающий физические значения показателей качества i-ой порции сыпучих материалов:

$$\vec{KH}_i = < K, KH(1), \ldots, KH(P), \ldots, KH(KP(K)) >, \quad (2.10)$$

где *KH(P)* – код показателя Р, соответствующий его физическому значению *Z(K, P)*.

Рассматриваемый способ кодирования сводится к следующему:

$$KH(P) = d,$$

если

$$N(K,P,d) < z(k,p,D) \le V(K,P,d) \cap P_\delta\{2,3,4,6\}$$

$$\bigcup N(K,P,d) \le Z(K,P,d) < V(K,P,d) \cap P_\delta\{1,5,7\}. \quad (2.11)$$

Наличие в (2.11) двух неравенств объясняется включением граничных значений показателей в соответствующие диапазоны для разных показателей качества сыпучих материалов.

2.4. Прогнозирование влажности хлопковых семян

Один из возможных путей получения формализованного описания характеристик партий семейной и сыпучих материалов, поступающих на промышленные перерабатывающие предприятия, состоит в применении методов распознавания образов [42, 43]. Получаемая при этом математическая модель позволяет прогнозировать поведение объекта. Достоинство такого подхода состоит в инвариантности решения к изменению внутренних характеристик системы.

Предсказание свойств хлопковых семян покажем на примере прогнозирования влажности масличного сырья, подлежащего дальнейшей промышленной переработке. На рис.6.4 представлен график суточных колебаний влажности хлопковых семян, поступивших на переработку в течение месяца на Ташкентский масложировой комбинат.

Основная идея прогнозирования состоит в том, что на основе анализа ограниченного участка колебаний исследуемой переменной для каждого из возможных кодов путем сравнения по критерию близости с траекторией параметра предсказывается знак движения наблюдаемой координаты. Для исследуемого процесса целесообразно трехзначное кодирование траектории рассматриваемой переменной. Если обозначить через Δt - интервал временного, а через Δh - интервал уровневого квантования переменной x, то значение последней в момент времени $T=N\Delta t$ можно вычислить по формуле:

$$x(T) = x_0 + \Delta h \sum_{k=1}^{N} Sgx(k). \qquad (2.12)$$

Здесь: x_0 - начальное значение переменной (уровень привязки); Δt - интервал временного квантования переменной; $Sgx(k)$ - знак, определяющий движение переменной по уровням квантования в k-ый интервал времени; знак «+» соответствует переходу на один уровень вверх; «-» переходу по один уровень вниз; «0» - означает, что переменная остается на том же уроне, что и в интервале (k-1).

Кодирование переменных состоит в определении на каждом временном интервале Δt_R соотношений между $x(k-1)$ и $x(k)$ по правилу:

$$Sgx(R) = \begin{cases} +1, если \quad 1 < [x(k) - x(k-1)]/\Delta h < 2; \\ 0, если \quad -1 \le [x(k) - x(k-1)]/\Delta h \le 1; \\ -1, если \quad -2 < [x(k) - x(k-1)]/\Delta h < -1. \end{cases} \qquad (2.13)$$

Траектория параметра (влажности хлопковых семян) в соответствии с рис. 6.4 может быть задана в следующем виде:

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 1 8 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30

\- + - + - + - + + - - + - 0 0 + 0 - 0 + - 0 + + - + - 0 - +

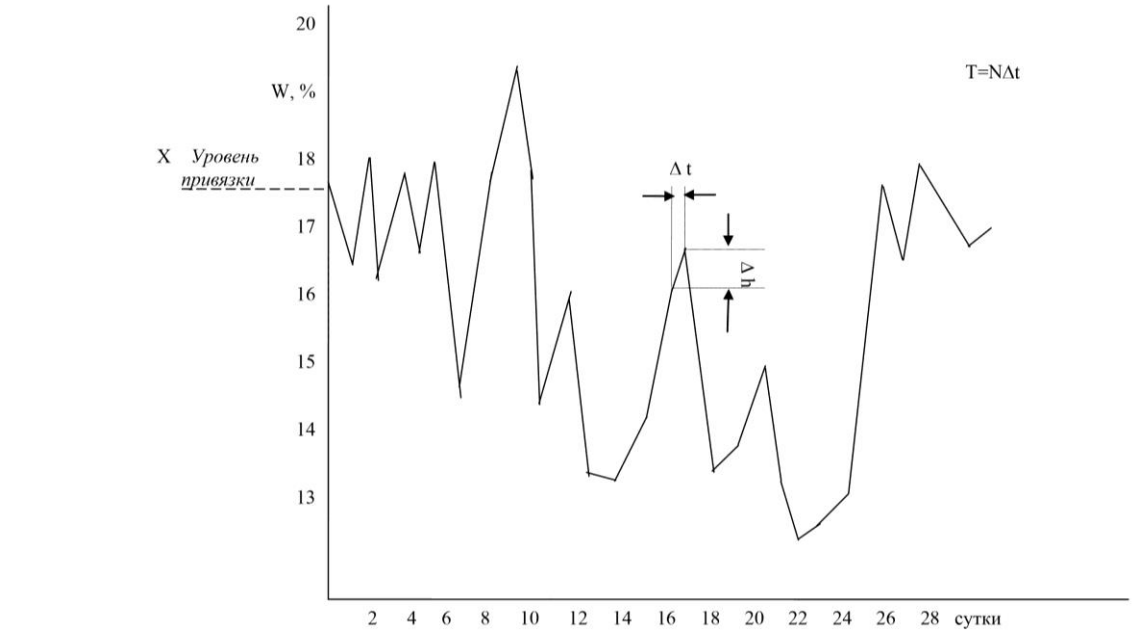
Здесь N=30 – длина предыстории процесса.

Процедура формирования эталонов состоит в построении матриц предыстории, представляющих собой корреляционное поле для каждого из трех возможных знаков кода траектории. На рис. 2.5 - 2.7 изображены результаты предыстории и представлены итоги классификации предысторий с помощью прототипов.

Закон корреляции определяется в виде последовательности временных интервалов, отделяющих один и тот же знак траектории параметра. Столбцы матрицы предыстории представляют собой соответствующие признаки. Формирование прототипа сводится к выбору знаков областей притяжения кодов признаков, которые обеспечивают наибольшую близость между прототипом и предысториями для данного знака. Выбор знака каждого разряда прототипа производится по большинству плюсов или минусов, входящих в столбец матрицы предыстории.

Распознающие возможности прототипов проверяются на той же обучающей последовательности путем последовательного сравнения строк корреляционных матриц с каждым из прототипов и вычисления меры сходства, в качестве которой используется мера типа скалярного произведения:

$$\sum x_1 p_1 + x_2 p_2 + ... + x_S p_S \qquad (2.14)$$



Код траектории	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	0	0	+	0	-	0	+	-	0	+	+	-	+	-	0	-	+
№ врем. интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Рис. 2.4. Суточные колебания влажности хлопковых семян, поступивших на Ташкентский масложиркомбинат.

Код траектории	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	0	0	+	0	-	0	+	-	0	+	+	-	+	-	0	-	+
№ врем. интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Предыстория переключения (+) в заданной траектории

	Знак группиров. и № его врем. интервала		Близость к прототипу переключений							
			Мера сходства X + P				Мера сходства / X - P/			
			+	0	-	решение	+	0	-	решение
-	+	2	1	1	0	+0	+	1	1	+0
-+-	+	4	2	1	0	+	0	1	2	+
-+-+-	+	6	4	3	0	+	1	2	4	+
-+-+-+-	+	8	5	3	1	+	1	2	5	+
-+-+-+-+-+	+	9	1	3	6	-	6	3	1	-
-+-+-+-++--	+	12	8	5	4	+	2	4	6	+
-+-+-+-++--+-00	+	16	12	2	2	+	1	8	9	+
-+-+-+-++--+-00+0-0	+	20	10	4	4	+	3	9	10	+
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0	+	23	4	4	10	-	9	8	6	-
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0+	4	24	11	7	4	+	3	10	12	-
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++-	+	26	12	16	4	+	3	1	13	+
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++-+-	+	30	19	11	2	+	1	6	1	+
01010203221322240324044417442	(+) по столбцам									
10102031224132315232423381647	(-) по столбцам									
-+-+-+-+++-+-+-+-+-+++-+-+-+-	прототип (+) по большинству									

Рис. 6.5. Матрица предыстории переключения «+» и классификация предысторий с помощью прототипов.

Примечание: ошибочно классифицируются предыстории 2-го знака.
возможны ошибки в классификации с вероятностью 0,67 в предыстории этого знака.

Код траектории	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	0	0	+	0	-	0	+	-	0	+	+	-	+	-	0	-	+

№ врем. интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Предыстория переключения (0) в заданной траектории

	Знак группиров. и № его врем. интервала		Близость к прототипу переключений							
			Мера сходства X + P				Мера сходства / X - P/			
			+	0	-	решение	+	0	-	решение
-+-+-+-++--+-	0	14	9	6	5	+	3	5	7	+
-+-+-+-++--+-0	0	15	3	8	7	0	9	3	4	0
-+-+-+-++--+-00+	0	17	1	6	9	-	12	5	3	-
-+-+-+-++--+-00+0-	0	19	4	11	7	0	10	2	5	0
-+-+-+-++--+-00+0-0+-	0	22	15	12	3	+	4	5	10	+
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++-+-	0	28	15	18	3	0	3	2	6	0
0101010211221423323233123 1	(+) по столбцам									
1010102012222314233232142 14	(-) по столбцам									
-+-+-+-++--++-+-++-+-++-++-	прототип (0) по большинству									

Рис. 2.6. Матрица предыстории переключения «0» и классификация предысторий с помощью прототипов.

Примечание: ошибочно классифицируются предыстории 14, 17 и 22-го (0)-ых знаков.

Код	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	0	0	+	0	-	0	+	-	0	+	+	-	+	-	0	-	+

траектории

№ врем. интервала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Предыстория переключения (-) в заданной траектории

	Знак группиров. и № его врем. интервала		Близость к прототипу переключений								
			Мера сходства X + P				Мера сходства / X - P/			
			+	0	-	решение	+	0	-	решение
	-	1	0	0	0	+0-	0	0	0	+0-
-+	-	3	1	2		-	2	1	0	-
-+-+	-	5	0	2	4	-	3	2	0	-
-+-+-+	-	7	0	2	5	-	5	1	1	-
-+-+-+-++	-	10	5	3	2	+	2	4	6	+
-+-+-+-++-	-	11	2	5	6	-	7	3	2	-
-+-+-+-++--+	-	13	3	3	6	-	8	7	5	-
-+-+-+-++--+-00+0	-	18	9	4	5	+	3	6	7	+
-+-+-+-++--+-00+0-0+	-	21	3	6	14	-	9	6	4	-
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++	-	25	1	5	15	-	14	8	3	-
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++-+	-	27	4	6	12	-	13	12	5	-
-+-+-+-++--+-00+0-0+-0++-+-+	-	29	3	7	19	-	16	9	2	-
01020303131322132216133635 49	(+) по столбцам									
10203030313232312332534153 61	(-) по столбцам									
-+-+-+-+-+-+-+-+-++--+-+-+-+-+-	прототип (-) по большинству									

Рис. 6.7. Матрица предыстории переключения «-» и классификация предысторий с помощью прототипов.

Примечание: ошибочно классифицируются предыстории 10 и 18-го (+)-ых знаков.
ошибочно классифицируется предистория 1-го знака, возможны ошибки в классификации с вероятностью 0,5 в предыстории этого знака.

и мера типа расстояния по Хеммингу

$$\sum | x_1 - p_1 | + | x_2 - p_2 | + ... + | x_S - p_S |, \qquad (2.15)$$

где x_i и p_i - код траектории и прототипа соответственно.

При равновероятном выборе принимается знак последнего разряда столбца матрицы или знак, выдаваемый генератором случайных чисел.

Проверка прототипов на обучающей последовательности дала 19 правильных ответов и 1 возможно правильный ответ из 29 предъявленных траекторий, зафиксированных в строках матриц траектории.

При принятой сквозной нумерации строк матриц правильно опознаны траектории 3+8, 11+13, 15, 16, 19÷21, 24, 25, 27÷30.

Ответы при показе траекторий 1, 2 определялись с помощью генератора случайных чисел. Отметим, что с увеличением числа учитываемых признаков или длины предыстории процент правильных ответов повышается.

Чтобы выполнить прогноз, необходимо исходную траекторию параметра, зафиксированную на рис.6.4, сравнить с каждым из трех построенных прототипов и вычислить соответствующие степени сходства. При этом решение определяется наибольшей степенью сходства.

В данном случае к исходной траектории наиболее близок прототип «-», что и определяет знак прогноза влажности хлопковых семян.

Характерным свойством использованного метода распознавания образов является отсутствие необходимости знания распределения вероятностей данных. Данный подход оправдан тем, что другими методами трудно связать информацию о состоянии системы с ее общим поведением.

При этом машинные программы могут сравнивать новый образец с хранящимся вариантом каждого альтернативного образца. Наиболее близкое совпадение с заранее выбранной мерой близости выявляет класс данного образца.

Предложенная схема решения является одним из вариантов персептронных структур алгоритмов. Исходная информация о влажности хлопковых семян, зафиксированная в принятом трехзначном коде (+,0,-), может рассматриваться в виде некоторого сенсорного S –слоя, состоящего из 30 элементов, соединенных с элементами (или компонентами) A_1 слоя-первого ассоциативного слоя. Выбор знака полюса осуществляется по большинству кодов одного знака. В случае же их равенства применяется знак признака, который в траектории является более поздним. Направление связей и число A_1 - элементов зависят от числа кодов и законов корреляции знаков в траектории параметра (рис.6.8).

Элементы первого ассоциативного слоя представляют собой логические блоки, выполняющие упомянутое правило выбора знака полюса и связанные посредством своих выходов со следующим A_2 - слоем, каждый элемент которого предназначен для определения меры сходства между знаком полюса и соответствующим ему знаком S –элементов.

Выходные сигналы этих элементов поступают на A_3 - слой, где суммируются. Некоторая часть компонентов A_3 -слоя соединена с элементами высших слоев, куда они входят в группу эталонов. Выходные сигналы элементов A_3 -слоя, объединенных по трое, сравниваются в слое A_4, где происходит выбор по максимуму условной вероятности одного из трех знаков кода.

Результаты выбора передаются на следующий A_s -слой, компоненты которого выполняют функции, аналогичные функциям элементов A_2 -слоя, т.е определяют меру сходства пары, образованной элементом A_4 -слоя и компонентой сенсорного слоя.

Выходные сигналы элементов A_5 -слоя поступают на сумматор A_5 - слоя.

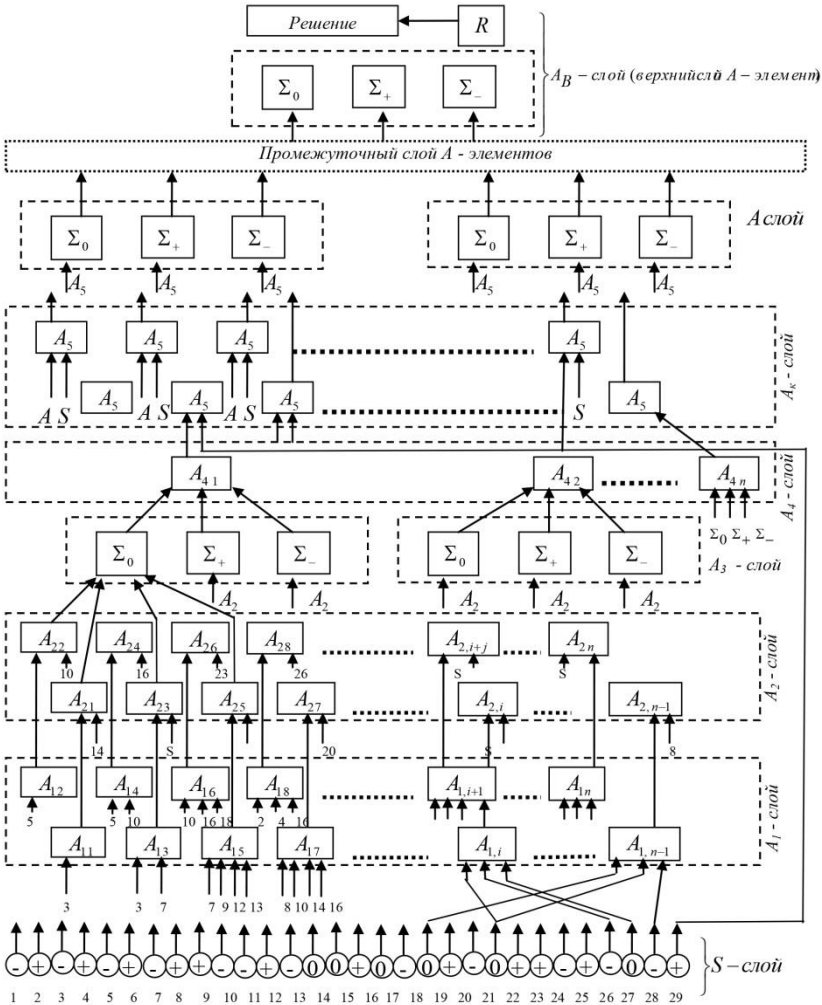


Рис. 2.8. Персептронная структура алгоритма предсказания.

Последний слой ассоциативных компонентов содержит три элемента, объединение выходов которых происходит в R-блоке, функционирующем аналогично элементам A_4 и осуществляющем окончательную классификацию исходной информации.

Описанный персептрон работает в подготовительном режиме и в режиме собственно решения. В первом режиме устанавливаются связи между S и A – элементами по правилам построения корреляционных матриц. Во втором режиме формируются эталоны и осуществляется собственно решение.

2.6. Алгоритмы повышения достоверности первичной измерительной информации

Контроль работы промышленного производства предполагает сбор необходимой информации о технологических процессах от датчиков, ее переработку и передачу оперативному персоналу. При решении задач контроля осуществляется ряд последовательно выполняемых операций по переработке измеряемой информации: аналитической градуировки датчика; экстра- и интерполяции дискретно измеряемых величин; фильтрации от помех; интегрирования и усреднения измеряемых величин; введения поправок по температуре, давлению и расходу материально-энергетических потоков; проверки достоверности измеряемых величин и т.д.

Алгоритмы информационно-измерительной подсистемы АСУТП предназначены для сбора информации от датчиков аналоговых, число-импульсных дискретных и кодируемых по времени сигналов с заданным периодом опроса, от датчиков дискретных и число-импульсных инициативных сигналов, для обработки введенной информации, связи технолога-оператора с системой и ввода оперативных сообщений о ходе технологического процесса.

Информационная подсистема выполняет стандартную обработку измеряемых параметров: масштабирование и линеаризацию измеренных значений; контроль на достоверность; введение поправок по давлению и температуре для расходов технологических потоков; экспоненциальное сглаживание (фильтрация); контроль измеренных значений на соответствие заданным регламентным и аварийным границам; усреднение результатов измерений.

Выходы первичных измерительных преобразователей последовательно опрашиваются коммутатором, и измеряемые сигналы поступают далее на аналого-цифровой преобразователь

(АЦП). Частота равномерного опроса одного сигнала при стационарном случайном процессе определяется верхней граничной частотой спектра полезного сигнала, допустимой погрешностью измерения, среднеквадратичной ошибкой измерительного канала и дисперсией самого случайного процесса.

Преобразование измеряемой величины в машинный код управляющего комплекса (УВК) происходит в соответствии с выражением:

$$Y = f_1\{f_2[f_3(X)]\}, \tag{2.16}$$

где X - измеряемая величина; Y - машинный код; f_1 - линейная функция преобразования кода АЦП в машинный код; f_2 - линейная функция преобразования входных сигналов в код АЦП; f_3 – зависимость между измеряемой величиной и электрическим сигналом первичного измерительного преобразователя.

Операция фильтрации поступающего с первичного измерительного преобразователя электрического сигнала позволяет определить случайную составляющую погрешности измерения. Для этого необходимо знать частотные характеристики сигнала и помехи.

Для фильтрации часто используется простой в реализации алгоритм экспоненциального сглаживания:

$$Y_n = \alpha X_n + (1-\alpha)Y_{n-1}, \tag{2.17}$$

где X_n - измеренная линеаризованное значение параметра; Y_{n-1} - сглаженное значение на предыдущем шаге; α - коэффициент сглаживания (постоянная фильтра).

На первом шаге Y_1 при $n=1$ устанавливается равным X_1. Регулярная составляющая погрешности измерения в некоторых случаях может быть скомпенсирована с помощью алгоритмов коррекции показаний датчиков.

Коэффициент поправки K^1 при отклонении температуры T и давления P от расчетных T_0 и P_0 определяется следующими выражениями

$$K^1 = \sqrt{\frac{P + 0{,}1}{T + 273} K}\ ;\ K = \frac{T_0}{P_0}, \qquad (2.18)$$

где T_0 - расчетная температура газа (°К); P_0 - расчетное давление, МРа (МПа).

Расчет с поправкой вычисляется по формуле

$$Y = K^1 Y_L, \qquad (2.19)$$

где Y_L - измеренное линеаризованное значение расхода.

Изменение характеристик датчиков или измерительных каналов приводит к появлению погрешностей измерения, которые невозможно установить описанными приемами первичной обработки информации. В АСУТП при решении задач управления используются результаты измерения многих параметров одновременно. Поэтому вероятность получения неверного результата при отказе отдельных измерительных каналов резко возрастает. В связи с этим контроль достоверности исходной измерительной информации является одной из важнейших функций АСУТП [44].

Контроль достоверности информации в простейшем случае осуществляется по технологически возможным границам изменения измеряемой величины. Нарушение этих границ обычно свидетельствует о неисправности функционирования датчика или канала измерения:

$$X_{НВГ} \le X_i \le X_{ВВГ}, \qquad (2.20)$$

где $X_{НВГ}$ - нижняя граница возможного изменения переменной X; $X_{ВВГ}$ - верхняя граница возможного изменения переменной X; X_i - текущее значение переменной X в *i*-ом цикле опроса.

При обнаружении нарушения на пульт технолога-оператора выдается сообщение. Дальнейшая обработка этого параметра осуществляется с использованием последнего достоверного его значения.

Контроль за протеканием технологического процесса осуществляется по нижней регламентной границе (НРГ), верхней регламентной границе (ВРГ), нижней аварийной границе (НАГ),

верхней аварийной границе (ВАГ), допускаемой скорости изменения параметров (СКИ) в пределах:

$$X_{НАГ} \le X_i \le X_{ВАГ}, \tag{2.21}$$

где $X_{НАГ}$ - нижняя аварийная граница измеряемой технологической переменной; $X_{ВАГ}$ - верхняя аварийная граница измеряемой технологической переменной X;

$$X_{НРГ} \le X_i \le X_{ВРГ}, \tag{2.22}$$

где $X_{НРГ}$ - нижняя регламентная граница измеряемой технологической переменной X; $X_{ВРГ}$ - верхняя регламентная граница измеряемой технологической переменной X;

$$\Delta X = \left| X_i - X_{i-1} \right| \le \delta X_{\max}, \tag{2.23}$$

где $\delta X_{\max}$ - наибольшее допустимое приращение переменной за цикл опроса.

Для анализа работы технологического оборудования, а также технологической стадии в целом необходимо определить усредненные значения расходов, используемых в производстве сырья, реагентов, энергии и т.д. Усреднение измеренных значений параметров производится по формуле

$$Y_{Ci} = \frac{1}{n} X_i + \left(1 - \frac{1}{n}\right) Y_{Ci-1}, \tag{2.24}$$

где X_i - *i*-ое измеренное линеаризованное значение параметра; n - число опросов параметра на заданном интервале усреднения.

В практике создания АСУТП существует необходимость в масштабировании и линеаризации измеряемых величин.

Для датчиков с линейным характером шкалы значения X рассчитываются по формуле

$$X = B + (A - B)N / L_1; \tag{2.25}$$

для датчиков с квадратичным характером шкалы

$$X = \sqrt{(A^2 - B^2)N/L + B^2}, \tag{2.26}$$

где X - значение параметра; A – истинное значение конца шкалы датчика; B – истинное значение начала шкалы датчика; N – код АЦП; $L = 1000$ – максимальное значение кода АЦП.

Для эффективного управления процессом оперативному персоналу необходимо располагать информацией о текущих значениях контролируемых параметров, косвенно измеряемых величин, технико-экономических показателей работы агрегатов и участков производства.

Традиционные модели обработки информации с целью повышения ее достоверности основаны на допущении о низменности математической модели объекта исследования как на стадии получения информации, так и на горизонте прогнозирования. Очевидно, более предпочтителен вариант, когда алгоритм обработки информации способен автоматически распознавать модели и приспосабливаться к ним.

С учетом «старения» информации и динамики изменения модели задачу статистического синтеза оптимальных алгоритмов обработки измерительной информации можно сформулировать следующим образом:

- исходя из теоретических соображений или накопленного опыта, выбирается аналитическое выражение для алгоритма обработки информации, которое зависит от неизвестных параметров;
- задаются ограничения на неизвестные коэффициенты;
- выбирается или определяется форма критерия оптимальности метода обработки результатов измерений;
- решается задача отыскания условного экстремума критерия оптимальности J при заданных ограничениях μ путем варьирования значений неизвестных коэффициентов C_1;
- определяется метод и алгоритм обработки информации.

Рассматривается сформулированную задачу применительно к случаям геометрического и арифметического сглаживания.

Пусть имеем простую случайную выборку независимых и равноточных измерений одной и той же величины $X = \{X_1, X_2, ... X_n\}$, дисперсии которых одинаковы и равны δ^2. Требуется по результатам первичных измерений найти оценку, удовлетворяющую свойству несмещенности. Оценку $\overline{X}$ ищем в виде линейной комбинации измерений:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^{n} C_i X_i, \tag{2.27}$$

где C_i - некоторые постоянные коэффициенты, которые следует определить.

Решение задачи дает следующие выражения для дисперсии оценки:

$$D(\hat{X}) = \delta^2 \left(\frac{1-\alpha}{1-\alpha^2} \right)^2 \frac{1-\alpha^{2n}}{1-\alpha^2} = \delta^2 \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^n} \tag{2.28}$$

$$\widetilde{D}_{Г.С.} = \frac{D(\hat{X})}{\delta^2} = \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \cdot \frac{1+\alpha^n}{1-\alpha^n}, \tag{2.29}$$

где α - постоянная сглаживания.

Как видно,

$$\min \frac{D(\hat{X})}{\delta} = \frac{1}{n} \tag{2.30}$$

при $\alpha = 1$.

Метод геометрического сглаживания, являющийся конечномерным аналогом экспоненциального сглаживания, применяется для выборки ограниченного объема, а условие несмещенности выполняется для любых объемов выборки.

Выбор значения постоянной сглаживания α (или числа измерений М в скользящей средней) предполагает достижение компромисса между скоростью реагирования на изменение модели (увеличение и уменьшение М), а также качеством фильтрации случайных помех. Поскольку диапазон изменения постоянной сглаживания очень большой (обычно от 0,01 до 0,3, а объем выборки в скользящей средней – от 6 до 200), задача заключается в нахождении способа выбора в каждом конкретном случае.

Если предположить, что «возраст» текущего измерения равен нулю, предыдущего измерения – единице и что в дальнейшем «возраст» предыдущих измерений увеличивается на единицу, то средний «возраст» в скользящей средней равен среднему «возрастов» всех отдельных измерений, взятых с весами, равными для этих отдельных измерений:

$$\rho_{С.С.} = \frac{1}{M}(0+1+2+...+M-1) = \frac{M(M-1)}{2} \cdot \frac{1}{M} = \frac{M-1}{2}. \tag{2.31}$$

При геометрическом сглаживании средний «возраст» измерений определяется в виде

$$\rho_{Г.С.} = \left\{\sum (n-k)\alpha^{n-k}\right\}\frac{1-\alpha}{1-\alpha^n}\cdot\frac{1-\alpha^{n-1}}{1-\alpha^n} - (n-1)\frac{\alpha^n}{1-\alpha^n}; \quad (2.32)$$

$$\lim \rho_{Г.С.} = \frac{n-1}{2}; \quad (2.33)$$

$$\lim \rho_{Г.С.} = \frac{1}{1-\alpha},\ \alpha \to \infty \quad (2.34)$$

2.7. Алгоритмы прогнозирования свойств сыпучих материалов на основе процедур последовательной динамической фильтрации

Формулируется общую постановку задачи прогнозирования характеристик стохастического процесса в терминах статистической теории оптимального оценивания [1,45].

Пусть имеется производственный процесс, текущее состояние которого в момент времени *i* может быть описано *n*- мерным случайным вектором $x_i\left(i=\overline{1,l}\right)$. Наблюдение за процессом в момент времени *j* может быть представлено в виде m-мерного вектора $z_j\left(j=\overline{1,k}\right)$, статистически связанного с вектором состояния. Пусть определена последовательность наблюдений $z_j\left(j=\overline{1,k}\right)$. Требуется определить оценку вектора состояния $\widehat{Y}_s$ для некоторого заданного *s*-го момента времени, если x_0 недоступно непосредственному наблюдению.

Поскольку вектор состояния x_i и вектор наблюдения z_j статистически связаны, то оценку траектории *x* можно дать по наблюдениям z. Из возможных оценок необходимо выбрать ту, которая обладает наибольшей точностью, то есть задает оценочную траекторию $\widehat{x}$, наиболее близкую к траектории *x*.

Обозначение оценка, полученную на основе наблюдений, через $\widehat{x}_s$

$$\widehat{x}_s = \varphi_s\left(z_j\right),\ \left(j=\overline{1,k}\right). \quad (2.35)$$

Рассматривается динамическое соотношение:

$$x_{n+1} = Fx_n + GU_n, \quad (2.36)$$

где F и G - характеризуют соответственно динамические свойства процесса и ограничения на входной сигнал; U_n - независимая гауссова случайная последовательность с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей G.

Наблюдения определяются соотношением:

$$z_n = Hx_n + V_n, \tag{2.37}$$

где H - характеризует ограничения, накладываемые на наблюдения за x_n; V_n - последовательность, аналогичная V_n с ковариационной матрицей R.

Начальными условиями являются $x(0)$, причем,

$$M[x(0)] = x, \quad \operatorname{cov}[x(0), x(0)] = P_0.$$

Значения F, G и H могут изменяться во времени.

Задача получения оценки $\hat{x}(0 \le i \le n)$ поставлена следующим образом. Даны измерения z_1, z_2,..., z_n. Требуется определить оценки $\hat{x}_{i/n}(0 \le i \le n)$ по данным измерений, которые минимизируют критерий:

$$J = \frac{1}{2}\left[\left(\hat{x}_{0/n} - x\right)^T \left(\hat{x}_{0/n} - x\right)\right] + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2}\left\{\left[\left(z_{(i+1)} - H\hat{x}_{(i+1)/n}\right)^T k^{-1} \times \right.\right.$$
$$\left.\left. \times \left(z_{i+1} - H\hat{x}_{(i+1)/n}\right)\right] + \left[\left(\hat{U}_{i/n}\right)^T Q^{-1}\left(\hat{U}_{i/n}\right)\right]\right\} \tag{2.38}$$

при ограничениях

$$\hat{x}_{(i+1)/n} = F\hat{x}_{i/n} + G\hat{U}_{i/n}. \tag{2.39}$$

Здесь необходимо знание оптимальной (минимизирующей критерий J) оценки $\hat{x}_{n/n}$, т.е. в первую очередь следует решить задачу фильтрации. Оптимальное решение можно получить при использовании следующих соотношений:

$$x_{n/n} = F\hat{x}_{(n-1)/(n-1)} + P_{n/n}H^T R^{-1}\left(z_n + HF\hat{x}_{(n-1)/(n-1)}\right),$$
$$P_{n/n} = P_{n/(n-1`)}H^T\left(HP_{n/(n-1)}H^T + R\right)^{-1} HP_{n/(n-1)}, \tag{2.40}$$
$$P_{n/(n-1)} = FP_{(n-1)/(n-1)}F^T + GQG^T.$$

Пусть прогнозируемый процесс задан в виде многомерной дискретной системы, переход которой из i-го состояния в $(i+1)$-ое описывается многомерным разностным уравнением:

$$x_{(i+1)} = A_{i,(i+1)} x_i + \varepsilon_i, \qquad (2.41)$$

где A_i - известная матрица перехода размерности (nxn); x_i - вектор-столбец фазовых координат в i-ый момент времени размерности (nx1); ε_i - вектор- столбец аддитивных помех размерности (nx1).

В момент времени i проводится измерение z_i, которое связано векторным уравнением с вектором фазового состояния:

$$z_i = D_i x_i + \sigma_i \qquad (2.42)$$

где z_i - вектор - столбец измерений размерности (mx1); D_i - матрица известных коэффициентов размерности (mxn); σ_i - вектор-столбец аддитивных помех размерности (nx1).

Считать, что случайные процессы ε и δ являются независимыми с равными нулю средними значениями: $M(\varepsilon) = M(\sigma) = 0$ и симметрическими, неотрицательно определенными ковариационными матрицами: $M(\varepsilon\varepsilon^T) = Q$, $Mm[\sigma\sigma^T] = R$.

Уравнение (2.42) позволяет получать экстраполированные оценки вектора состояния в (i+1)-ый момент, если известны предыдущие оценки

$$\hat{x}_{(i+1)} = A_{i,(i+1)} \hat{x}_i. \qquad (2.43)$$

Ошибки экстраполированной оценки характеризуются следующей ковариационной матрицей:

$$K_{(i+1)} = A_{i,(i+1)} K_i A^T_{i,(i+1)} + Q_i. \qquad (2.44)$$

Выбор линейной формы оптимальной оценки определяется следующими основными факторами. Во-первых, в большинстве технических задач линейный оператор проще реализуется с помощью линейных устройств. Во-вторых, для нормального случайного процесса при выполнении критерия А - оптимальности оптимальный линейный оператор является вообще линейным оператором, т.е. нельзя улучшить значения критерия путем перехода от линейного оператора к любому другому нелинейному оператору.

В соответствии со сказанным, новая оценка записывается в виде:

$$\hat{x}_i^+ = \hat{x}_i + F(z_i - D\hat{x}_i), \tag{2.45}$$

где F_i - матрица коэффициентов усиления размерности (nxm).

Представляется выражение (6.41) в виде

$$\hat{x}_i^+ - x_i = \hat{x}_i - x_i + F\left[-D_i(\hat{x}_i - x_i) + \sigma_i\right], \tag{2.46}$$

где $\hat{x}_i$ -истинное значение вектора фазового состояния исследуемого процесса.

Тогда ошибка новой оценки фазового состояния будет равна:

$$\varepsilon_i^+ = \varepsilon_i + F\left[\sigma_i - \sigma_i\varepsilon_i\right]. \tag{2.47}$$

Определяется матрица ковариации ошибки новой оценки состояния управляемого процесса. По определению имеем:

$$k_i^+ = M(\varepsilon_i^+ \varepsilon_i^{+T}). \tag{2.48}$$

Выполняя операцию определения математического ожидания и используя лемму об обращении матриц [93], можно показать, что система, описывающая оптимальный фильтр, имеет вид:

$$\begin{aligned} &\hat{x}_i^+ = \hat{x}_i + F_i(z_i - D_i\hat{x}_i), \\ &F_i = k_i D^T (k_i + D_i k_i D^T)^{-1}, \\ &k_i^+ = k_i - k_i D^T (k_i + D_i k_i D^T)^{-1} - D_i k_i. \end{aligned} \tag{2.49}$$

Этот фильтр является фильтром калмановского типа [4] и обеспечивает получение оценок параметров прогнозируемого процесса по минимуму обобщенной дисперсии ошибок (минимум следа ковариационной матрицы k_i^+).

Система, характеризующая оптимальный прогнозирующий фильтр, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} &\hat{x}_{i+1} = A_{i,(i+1)}\hat{x}_i^+, \\ &k_{(i+1)} = A_{i,(i+1)}k_i^+ A_{i,(i+1)} + \sum_{n=1}^{s} A_{(n+1),(i+s)} Q_{(i+n-1)} A_{(i+n),i}^T \end{aligned} \tag{2.50}$$

Прогнозирующий фильтр (2.50) не накладывает никаких ограничений на вид законов распределения помех ε и σ.

Достаточно лишь, чтобы были заданы два первых начальных момента.

Таким образом, в случае линейной зависимости между измерениями и фазовым вектором состояния, нормальных законов распределения ошибок измерения и оценок состояния процесса, процедуры, найденные по критерию максимума информации, эквивалентны.

Процесс прогнозирования (экстраполирования) состояния объекта может быть осуществлен, если использовать результаты предыдущих измерений, т.е. моделировать уравнение динамики процесса на момент каждого последующего измерения, применяя аппроксимацию измеряемого процесса заданным классом функции, выбираемым, исходя из физических свойств исследуемого процесса. При этом наиболее простой формой аппроксимации уравнения динамики нелинейного процесса является его представление в виде ряда Тейлора для известного интервала квантования

$$x_{(i+1)} = x_i + x_i\Delta^+ + \frac{1}{2!}x_i\Delta^{+2} + \ldots, \qquad (2.51)$$

где $x_i = x(t_i)$ - значение измеряемого параметра в момент $T = t_i$.

Поскольку значения производных $\dot{x}_i, \ddot{x}_i$ точно неизвестны, то для определения воспользуемся предыдущими измерениями в момент $(i-1), (i-2), \ldots$ и т.д. Осуществив на интервале квантования операцию линейной аппроксимации и удерживая три члена разложения в ряд Тейлора, после некоторых преобразований можно придти к выражению вида:

$$x_{(i+1)} = A_i x_i + A_{(i-1)}x_{(i-1)} + A_{(i-2)}x_{(i-2)} + \gamma, \qquad (2.52)$$

где γ - вектор столбец погрешности аппроксимации, состоящий из слагаемой погрешности, обусловленной конечным числом членов разложения и слагаемой, обусловленной неточностью вычисления производных; $A_{(i-j)}$ - матрица постоянных коэффициентов.

Последнее выражение (2.52) является предикатором второго порядка и позволяет предсказать состояние процесса на $(i+1)$-ый момент времени.

Без потери общности предположим теперь, что числовые характеристики ошибки аппроксимации удовлетворяют условиям:

$$M(\gamma) = 0; \quad M(\gamma, \gamma^T) = Q. \tag{2.53}$$

Обобщенная форма квазиоптимального фильтра, когда постановка задач прогнозирования в условиях априорной неопределенности модели процесса предполагает нахождение оценок параметров объекта с произвольным заданным интервалом упреждения $s \geq 1$ при использовании предикатора любого порядка, имеет вид:

$$\hat{x}_{(i+s)} = \left\{ \prod_{j=1}^{s} A_{(i+s),(i+s-j+1)} \right\} \hat{x}_i^+ - B_{i,(i+s)} \hat{x}_i^+,$$

$$x_{(i+s)} = Q_{i,(i+s)} k_i^+ B^T Q_{i,(i+s)} + \sum_{j=1}^{s} B_{(i+j),(i+s)} Q_{(i+j-1)} B_{(i-1),(i+s)}^T \tag{2.54}$$

$$\hat{x}_i^+ = \hat{x}_i + F_i (Z_i - D_i \hat{x}_i),$$

$$k_i^+ = k_i - k_i D_i^T (R_i + D_i k_i D_i^T)^{-1} D_i k_i.$$

Чтобы получить прогнозируемое состояние процесса $Y_{(i+s)}$, необходимо ввести в рассмотрение новый вектор переменных x повышенной размерности и найти значение $\hat{x}_{(i+s)}$. Из полученного вектора $\hat{x}_{(i+s)}$ можно выделить искомый вектор состояния процесса $Y_{(i+s)}$.

Можно отметить, что показано: в случае априорно заданных линейных математических моделей технологических процессов и систем эффективным с точки зрения прогнозных оценок является оптимальный адаптивный фильтр калмановского типа. Решена задача синтеза квазиоптимального прогнозирующего фильтра в случае априорной неопределенности в знании математической модели объекта, позволяющей предсказывать его состояние на каждый последующий интервал квантования.

Контрольные вопросы

1. Алгоритмизация контроля и управления технологическими процессами и производствами.

2. Объясните структура автоматизированного формирования управляющих решений.

3. Какие направление совершенствоваться теоретические моделей?

4. Концептуальные основы интеллектуальной поддержки измерителей состава и свойств твердых сыпучих материалов.

5. В чем заключается взаимодействия средств интеллектуальной поддержки в технологиях автоматизированного контроля и управления качеством промышленной продукции?

6. Идентификатор показателей качества сыпучих материалов.

7. Как разделяется партии сыпучих материалов при хранения?

8. Прогнозирование влажности хлопковых семян.

9. Объясните персептронная структура алгоритма предсказания.

10. Алгоритмы повышения достоверности первичной измерительной информации.

11. Алгоритмы прогнозирования свойств сыпучих материалов на основе процедур последовательной динамической фильтрации.

ГЛАВА 3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПОДСИСТЕМЕ АСУТП ВЛАГО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

3.1. Унифицированный комплекс задач обработки оперативной измерительной информации

В составе математического обеспечения АСУТП можно выделить следующие группы задач: автоматизированный сбор и ввод в ЭВМ с заданной частотой результатов измерений параметров состояния технологических процессов; обработка и хранение результатов измерений; выдача (передача, представление и т.д.) результатов обработки.

Задачи сбора и ввода данных в ЭВМ обычно зависят от характеристик технических средств и структуры системы сбора. Их общий алгоритм специфичен для конкретных АСУ.

Задачи выдачи результатов обработки определяются конкретной формой представления информации, диктуемой требованиями потребителей, и алгоритмы представления информации должны удовлетворять разнообразию этих требований.

В составе задач обработки можно выделить большую совокупность, достаточно общую для широкого класса АСУ. Эти задачи содержат такие вычислительные операции как масштабирование, усреднение, интегрирование, определение показателей по данным нескольких величин, фильтрация недостоверных измерений, обнаружение событий и др. Каждый вводимый в ЭВМ параметр, как правило, подвергается обработке, прежде чем будет получен конечный результат. Поэтому задачи, алгоритмы которых основываются на указанных операциях, являются общими для различных АСУ (набор их ограничен и достаточно формализован). Такие задачи удобно выделить в группу формальных информационных задач (ФИЗ).

Из-за общности ФИЗ для широкого класса АСУ возможна разработка унифицированного алгоритма их решения. Эта унификация достигается на основе: создания полной библиотеки ФИЗ рассматриваемых АСУ; задания условий решения ФИЗ но каждому вводимому параметру; организации специального информационного обеспечения.

На этой основе проблему унификации в настоящие время решают путем представления каждой ФИЗ или отдельных её блоков

в виде набора программных модулей. Правила составления этих модулей и их связи с информационным обеспечением, удовлетворяющие условиям обработки каждого выделенного параметра, определяют алгоритм унифицированной части математического обеспечения (МО) АСУ.

Проблему унификации в настоящие время решают путем представления каждой ФИЗ или отдельных её блоков в виде набора программных модулей. Правила составления этих модулей и их связи с информационным обеспечением, удовлетворяющие условиям обработки каждого выделенного параметра, определяют алгоритм унифицированной части МО АСУ.

Обратимся к алгоритму унифицированного комплекса задач обработки информации, предназначенной для АСУТП влаго-тепловой обработки сыпучих материалов. В алгоритме в качестве программных модулей приняты ФИЗ. Их перечень определяет состав укреплённых вычислительных и логических операций, которые связаны с обработкой исходной информации и независимы от особенностей конкретных промышленных производств. К числу таковых можно отнести следующие: расчёт действительных значений параметров температуры, давления уровня, концентрации, pH; расчёт действительных значений параметров расхода; вычисление поправки по давлению к расходным параметров; вычисление поправки по температуре к расходным параметрам; вычисление поправки по удельному весу к расходным параметрам; коррекция расходных параметров при отклонении параметров среды от расчётных; суммирование параметров расхода для параллельных потоков; обработка позиционных сигналов; обработка сигналов о состоянии технологических линий; вычисление объёма в цилиндрической ёмкости, поставленной на основание; вычисление объёма в ёмкости; вычисление объёма в цилиндрической ёмкости, положенной на бок; определение состояния запасов в оперативных ёмкостях на входе в цех и на выходе из цеха; контроль за состоянием основных технологических параметров; вычисление показателей качества технологических потоков и коэффициентов перехода в установленный стандарт; вычисление показателей качества потоков сыпучих веществ и коэффициентов перехода в установленный стандарт; пересылка данных в массивы с полной структурой адресов; пересылка данных в массивы с неполной структурой адресов; проверка состояния и учёт работы групповых

преобразователей; учёт работы оборудования; оценка хода выработки цеха; учёт расходов материальных потоков в натуре; учёт расходов материальных потоков в натуре и в установленном стандарте; учёт выработки по технологическим линиям цехов; расчёт средних значений; проверка сообщений с датчиков ручного ввода на границы достоверности; учёт выполнения норм технологического регламента по технологическим параметрам с одностороннем ограничением; наконец учёт выполнения норм технологического регламента по технологическим параметрам с двухстороннем ограничением.

Основные решения, обеспечивающие унификацию решения этих задач, состоят в следующем:

1. Особенности измерений, сбора и обработки параметров состояния технологических процессов определяют целесообразность последовательного решения ФИЗ по каждому вводимому параметру с выводом результатов в соответствующие формальные массивы (ФМ). Алгоритм ввода в задачи и размещения информации в ФМ включается в состав программ ФИЗ. При решении заданных ФИЗ обычно требуются некоторые общие условия обработки введенного в ЭВМ параметра. Такая информация размещается в специальном массиве данных для решения задач (ДРЗ), который передаётся из задачи в задачу.

2. Набор ФИЗ для различных параметров неоднороден. Кроме того, формулы обработки каждого параметра отличаются числом и величинами входящих в них коэффициентов. Это определило выбор формы задания условий обработки отдельно по каждому вводимому параметру в виде последовательности записей в массиве условий, содержащих номер (шифр) ФИЗ, требуемое число и значения используемых при решении ФИЗ коэффициентов.

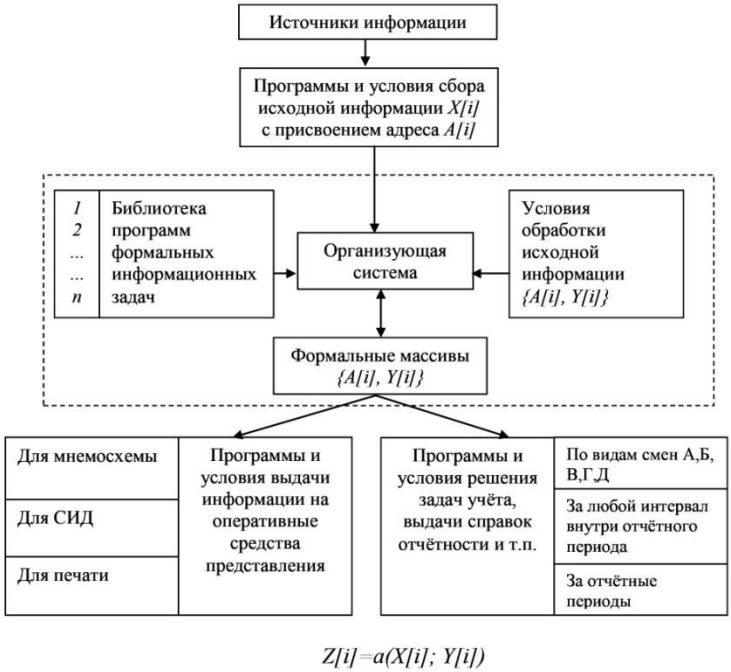
3. Результаты решения ФИЗ целесообразно объединить в формальные массивы (ФМ) по следующим группам, характеризующим состояние: расфасовки; выработки; качества продукции; оборудования; оперативных запасов; технологических параметров; сантехнических параметров (выбросы и стоки); расходов сырья; энергоресурсов. Такая группировка информации удобна для решения таких задач как учёт, отчётность, планирование, представление информации для принятия решения и других. Выбор данных из ФМ может выполняться на основе соответствующих массивов условий выбора.

4. Выбор требуемой ФИЗ и переход на решение следующей задачей организован через общую задачу-диспетчер. Она определяет последовательность решения задач сбора и обработки параметров по заданным приоритетам.

Схема организации прохождения решения задач сбора и обработки параметров представлена на рис.3.1. и реализуется в следующем виде:

– задача - диспетчер, входящая в состав организующей системы, по реквизитам введённого параметра на основе данных массива условий формирует массив ДРЗ и выбирает первую задачу обработки для введённого параметра из библиотеки ФИЗ;

– формальная информационная задача по данным из ДРЗ осуществляет: выбор условий решения, обработку параметров, засылку результатов решения в соответствующие ФМ, формирование адреса следующих условий обработки *i* -ого параметра *A[i]*;



$$Z[i]=a(X[i];\ Y[i])$$

Рис. 3.1. МО АСУ с унифицированным комплексом задач обработки информации.

– задача-диспетчер по *A [L]* осуществляет выбор следующей формальной информационной задачи и проверку: "закончилась ли обработка введённого параметра?" Если обработка закончилась, то осуществляются аналогичные операции для следующих параметров.

5. Для современных предприятий характерна эволюция развития, приводящая к изменению числа объектов управления и их технологических структур, а также к совершенствованию средств автоматизации и т.д. Всё это определяет расширение номенклатуры автоматизируемых задач и изменение во времени числа и типов датчиков, а следовательно и объёмов исходной информации, характеризующих состояние того или иного объекта управления. Отсюда необходимость в расширении библиотеки ФИЗ и в изменении информационного обеспечения АСУТП. Последнее осуществляется на основе решения специальной задачи, включённой в состав унифицированного комплекса. Задача на основе заданных условий обработки и структур ФМ формирует состав адресной части всех массивов с учётом введённых в условие дополнений и изменений. Тем самым обеспечивается соответствие содержания информационного обеспечения новым условиям. Задача предназначена для использования как на проектной стадии создания АСУТП, так и в процессе ее эксплуатации при внесении изменений в состав исходной информации и условий её обработки.

3.2. Математическое моделирование кинетики сушки сыпучих материалов

Кривая конвективной сушки пищевых продуктов состоит из двух периодов. В первый период испаряется свободная влага. Энергия связи свободной влаги с материалом считается минимальной и в процессе первого периода эту энергию связи принято считать постоянной. Скорость сушки первого периода постоянна. Во втором периоде из-за увеличения прочности связи влаги с материалом скорость сушки убывает. Условно энергию связи влаги с материалом для первого и второго периодов в координатах $\ln\left(E_{связ} / E_{своб}\right)$ в функции от скорости сушки $\left(dw / d\tau\right)$ можно изобразить прямой линией (рис.3.2).

Уравнение линии для второго периода сушки будет иметь следующий вид:

$$\ln\left(E_{связ} / E_{своб}\right) = \ln A - m\ln\left(dw / d\tau\right). \qquad (3.1)$$

Величина отношения энергий $\left(E_{связ} / E_{своб}\right)$, является, по-существу, величиной, пропорциональной приведенной скорости сушки ψ, которую есть отношение действительной скорости во втором периоде к постоянной скорости сушки в первом периоде [136]:

$$\psi = \left[\left(dw/d\tau\right)_{II}\left(dw/d\tau\right)_{I}\right] = \left(dw/d\tau\right)_{II} / N = 1/N\left(dw/d\tau\right)_{II} \quad (3.2)$$

Потенцируя уравнение (7.1), получим

$$\left(E_{связ} / E_{своб}\right) = A\left(dw/d\tau\right)^{-m}. \quad (3.3)$$

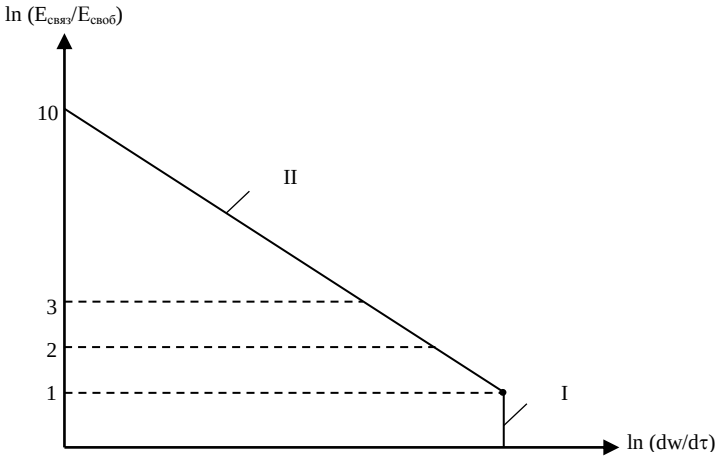


Рис.6.2. Зависимость энергии связи влаги с материалом в процессе сушки

Переписывается уравнение (3.1) в следующем виде:

$$\left(E_{связ} / E_{своб}\right) = A\left(dw/d\tau\right)\left(dw/d\tau\right)^{-m-1}. \quad (3.4)$$

Поскольку точка А характеризует переход процесса сушки с первого на второй период, то уравнение (3.3) должно удовлетворять условиям как первого, так и второго периодов. Для первого периода уравнение (7.4) при $\left(E_{связ} / E_{своб}\right) = 1$ и $m = -1$ примет следующий вид:

$$I = A\left(dw/d\tau\right) = AN, \quad (3.5)$$

где N - постоянная скорость сушки первого периода.

Из уравнения (3.5) находим значение постоянного коэффициента $A = 1/N$, подставляем его в уравнения (3.1) и (3.3) и получаем

$$\ln\left(E_{связ}/E_{своб}\right) = \ln\left(1/N\right) - m\ln\left(dw/d\tau\right); \quad (3.6)$$

$$\ln\left(E_{связ}/E_{своб}\right) = \ln\left(1/N\right)\left(dw/d\tau\right)^{-m}.$$

Чтобы воспользоваться уравнением (3.5) для определения продолжительности сушки первого и второго периодов, необходимо найти отношение величины $\left(E_{связ}/E_{своб}\right)$, обозначенное через К. Для этого поступим следующим образом. Будем считать, что количество теплоты, подводимое от воздуха к продукту, как в первом, так и на большей части второго периода (за исключением приближения к участку равновесной влажности) расходуется на испарение влаги из продукта. Количество же испаряемой влаги как в первом, так и во втором периодах зависит от прочности связи влаги с материалом. Для первого периода

$$E_{своб} = Q_1/W_{влаги^1} = \left[\alpha_1 F\left(t_C - t_M\right)\tau_1\right]\left(W_1 - W_{kp}\right), \quad (3.7)$$

где $E_{своб}$ - энергия, необходимая для удаления свободной влаги, kJ/kg (кДж/кг); α_1 - конвективный коэффициент теплоотдачи, W/(m^{2}K) (Вт/(м^{2}К)); Q_1 - теплота, подводимая от воздуха к высушиваемому продукту; $W_{влаги^1}$ - количество испаряемой влаги; W_1, W_{kp} - начальное и критическое влагосодержание для продукта (начало и окончание процесса сушки первого периода); τ_1 - продолжительность первого периода.

Для второго периода

$$E_{связ} = Q_2/W_{влаги^2} = \left[\alpha_2 F\left(t_c - t_{пр}\right)\tau_2\right]\left(W_{кр} - W_2\right), \quad (3.8)$$

где α_2 - конвективный коэффициент теплоотдачи на участке второго периода сушки, W/(m^{2}K) (Вт/(м^{2}К)); $t_{пр}$ - переменная температура продукта в процессе сушки, ^{0}C; W_2 - конечное влагосодержание в продукте, близкое к равновесному влагосодержанию $\left(W_2 \rangle W_p\right)$.

Разделятся уравнение (3.7) на уравнение (3.8) и получим

$$K = \left(E_{связ} / E_{своб}\right) = \left[\alpha_1\left(t_c - t_{пр}\right)/\left(dw/d\tau\right)\right]/\left[\alpha_2\left(t_C - t_M\right)/N\right] = \\ = \left[\alpha_1\left(t_c - t_{пр}\right)N\right]/\left[\alpha_2\left(t_C - t_M\right)\left(dw/d\tau\right)\right], \quad (3.9)$$

где $\left(W_1 - W_{кр}\right)/\tau_1$ - постоянная скорость сушки первого периода, N; $\left(W_{кр} - W_2\right)/\Delta\tau_2 = \left(dw/d\tau\right)$ - действительная скорость сушки в процессе времени $\Delta\tau_2$.

Рассмотрено отношение $\alpha_1\left(t_c - t_{пр}\right)/\alpha_2\left(t_C - t_M\right)$. Поскольку α_1 характеризует интенсивность теплоотдачи в первом периоде, α_2 - то же самое на участке второго периода, то важно знать, как эти величины между собой соотносятся.

Целесообразно оценивать соотношение между коэффициентами теплоотдачи следующим образом:

$$\alpha / \alpha_0 = \left(W_2 / W_{кр1}\right)^n, \quad (3.10)$$

где α_0 - коэффициент теплоотдачи в период постоянной скорости сушки; α - то же в период падающей скорости сушки, т.е. на втором участке сушки; W_2 - текущее влагосодержание материала на втором участке; $W_{кр1}$ - критическое влагосодержание, граничное значение первого и второго участков; n - показатель степени, зависящий от свойств материала и определяемый экспериментально.

Коэффициент теплообмена а в первом периоде постоянной скорости непрерывно уменьшается и при достижении равновесного влагосодержания W_p во втором периоде становится равным коэффициенту теплообмена для сухого тела (при условии равенства температурных напоров, т.е. $t_C - t_П = const$, где t_C - температура греющей среды; t_P - температура поверхности тела).

Процесс конвективной сушки растительных материалов в первом периоде характеризуется тем, что на поверхности высушиваемого продукта находится свободная влага. Над поверхностью воды находится насыщенный пар с давлением насыщения P_H. Температура жидкости равна температуре мокрого термометра. Во втором же периоде сушки температура поверхности материала растет, а зона испарения жидкости перемещается внутрь продукта.

Процесс сушки в конце второго периода отличается от первого тем, что подводимая теплота от воздуха расходуется как на испарение влаги, так и на нагрев самого продукта. В дифференциальной форме это можно записать следующим образом:

$$\alpha F \Delta t d\tau = r dw + MC_P dv, \qquad (3.11)$$

где dw - количество влаги, испарившейся за промежуток времени $d\tau$, dv - разность температур продукта между интервалом времени $d\tau$; M - масса продукта к рассматриваемому моменту времени $(M = M_H - \Delta W)$; M_H - начальная масса продукта, кг; ΔW - количество испарившейся влаги, кг; r - удельная теплота парообразования; $\Delta t = t_C - t_{ПОВ}$ - температурный напор.

Уравнение (3.11), чтобы выразить коэффициент теплоотдачи α:

$$\alpha = \frac{(r dw / d\tau)}{F(t_C - t_{ПОВ})} + \frac{MCp dv}{F(t_C - t_{ПОВ}) d\tau}. \qquad (3.12)$$

Поскольку между разностями температур dv и $(t_C - t_{ПОВ})$ существует определенная зависимость, то можно принять, что отношение этих величин будет характеризоваться какой-то постоянной величиной. Тогда второе слагаемое уравнения (7.12) будет константой, и на величину α оказывает влияние первая составляющая уравнения (7.12). Следовательно, определяющей величиной, влияющей на изменение численного значения α, является отношение скорости сушки $dw/d\tau$ к разности температур $(t_C - t_{ПОВ})$. Величина скорости сушки во втором периоде постоянно снижается, вместе с ней уменьшается и разность температур $(t_C - t_{ПОВ})$. Чтобы оценить, какая из величин $dw/d\tau$ или $\Delta t = t_C - t_{ПОВ}$ оказывает большее влияние на изменение коэффициента теплоотдачи α во втором периоде, проанализируем кривую сушки и кривую скорости сушки солода [46], а такие кривую сушки дрожжей в виброкипящем слое (рис.3.3).

Результаты обработки зависимости кривой скорости сушки и величины Δt от влагосодержания солода в логарифмических координатах дают уравнения вида $dw/d\tau = f(w)^n$ и $\Delta t = f(w)^n$, причем показатель степени n оказался для обеих зависимостей равным 0,9.

Полученные зависимости скорости сушки температурного напора Δt от влагосодержания свидетельствуют о том, что отношение величин $(dw/d\tau)/\Delta t$ постоянно.

Кривая сушки дрожжей в виброкипящем слое приведена на рис.3.3.

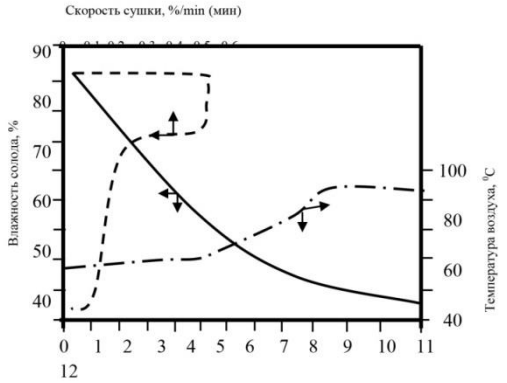


Рис.3.3. Кривые продолжительности и скорости сушки солода для непрерывного процесса (сушка солода нагретым

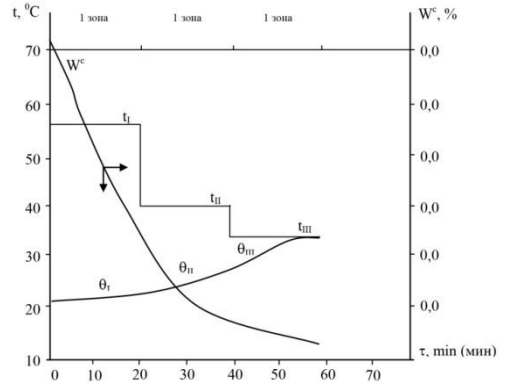


Рис.3.4. Параметры процесса сушки дрожжевых гранул в виброкипящем слое, где t_I, t_{II}, t_{III} – температура воздуха (по зонам);
θ - температура дрожжей; W^c – влажность ($G_{ул}$=60 kg/m^2(кг/м^2), $d_{гр}$=1,5 mm (мм)).

Расчеты, проведенные по определению коэффициентов теплоотдачи α в трех зонах сушки, дали следующие результаты: $\alpha_1 = 6{,}0 W/m^2 K(Bm/(м^2 \cdot K))$;

$$\alpha_2 = 5{,}88 W/m^2 K (Bm/(м^2 \cdot K));$$
$$\alpha_3 = 5{,}47 W/m^2 K (Bm/(м^2 \cdot K)).$$

Расчет коэффициентов теплоотдачи для каждой зоны производился с учетом влагосодержания для каждого из периодов сушки и изменения поверхности дрожжей с учетом убыли влаги. Несмотря на то, что значение величин α отличается на каждом из этапов сушки, эти отклонения невелики и они вполне объяснимы, так как при переходе от одного этапа сушки к другому изменяются диаметр гранул дрожжей, режим обтекания воздуха (толщина пограничного слоя) поверхности дрожжей, массовая скорость потока воздуха.

Таким образом, можно с достаточной уверенностью утверждать (и это подтверждают проведенные расчеты), что отношение значений α_1 / α_2 близко к единице на протяжении всего процесса сушки. Принимая это во внимание, перепишем формулу (3.9) в виде

$$K = [(t_C - t_{ПОВ})/(t_C - t_M)][N/(dw/d\tau_1)] =$$
$$\{[(t_C - t_M) - (t_{ПОВ} - t_M)]/(t_C - t_M)\}[N/(dw/d\tau_1)] = \quad (3.13)$$
$$= [(E - e)/E][N/(dw/d\tau_1)],$$

где $E = t_C - t_M$ - внешний потенциал сушки, ^{0}C; $e = t_{ПОВ} - t_M$ - внутренний потенциал сушки, ^{0}C.

Подставится полученное значение K в формулу (3.6) и получим

$$[N/(dw/d\tau)][(E - e)/E = (1/N)(dw/d\tau)^{-m}. \quad (3.14)$$

Преобразуя уравнение (7.14), получим

$$dw/d\tau = [N^2 (E - e/E)]^{1/1-m}. \quad (3.15)$$

Отсюда время сушки равно

$$d\tau = dw/[N^2 (E - e/E)]^{1/1-m}. \quad (3.16)$$

Для точки A, находящейся на границе первого и второго периодов сушки (рис.3.4), справедливо уравнение (3.14). Проанализируем его. Сначала применительно к первому участку процесса сушки. Во-первых, величина $e = 0;$ во вторых, – отношение $N/(dw/d\tau)$ есть величина, обратная приведенной скорости сушки, т.е. $N/(dw/d\tau) = 1/\psi$, а значение $\psi = 1$, поскольку

скорость сушки $dw/d\tau = 1/N$. Таким образом, уравнение для первого участка сушки примет следующий вид:

$$1 = 1/N\left(dw/d\tau\right)^{-m}. \tag{3.17}$$

Для написания окончательного вида уравнения с целью определения времени сушки первого периода нужно определить показатель степени m. Для этого уравнение (3.17) запишем в следующем виде:

$$1 = 1/N\left[\left(dw/d\tau\right)^{-1}\left(dw/d\tau\right)^{-m-1}\right]. \tag{3.18}$$

Затем переписывается уравнение таким образом:

$$\left(dw/d\tau\right)/\left(1/N\right) = \left(dw/d\tau\right)^{-m-1}. \tag{3.19}$$

Так как $\left(dw/d\tau\right)/\left(1/N\right)$ есть приведенная скорость сушки ψ, а в первом периоде эта величина равна единице, выражение $\left(dw/d\tau\right)^{-m-1}$ должно быть также равно единице. Это возможно только при условии, когда показатель степени $\left(-m-1\right)$ будет равен 0, т.е. $m = -1$.

Таким образом, уравнение для определения продолжительности сушки первого периода будет иметь окончательный вид:

$$1 = 1/N\left(dw/d\tau\right), \text{ или } d\tau = dw/N. \tag{3.20}$$

Окончательно общее время сушки в первом периоде равно

$$\tau_1 = \left(W_1 - W_K\right)/N. \tag{3.21}$$

Продолжительность сушки во втором периоде составит

$$\tau_2 = \frac{W_K - W_2}{\left(\frac{1}{N^2}\cdot\frac{E-e}{E}\right)^{\frac{1}{1-m}}}. \tag{3.22}$$

Общее время сушки первого и второго периодов будет равно [при $m = -1$, значение $1/1-m = 1/1-(-1) = 1/2$]:

$$\tau_{общ} = \frac{1}{N}\left\{\left(W_1 - W_K\right) + \frac{W_K - W_2}{\left[\left(E-e\right)/E\right]^{1/2}}\right\}. \tag{3.23}$$

Скорость сушки во втором периоде можно определить по уравнению (3.15). Если в уравнение (3.18) подставить найденное ранее значение $m = -1$, то окончательно получим

$$\frac{dw}{d\tau} = N\sqrt{\frac{E-e}{E}}. \qquad (3.24)$$

Таким образом, скорость сушки во втором периоде прямо пропорциональна скорости сушки первого периода и корню квадратному из отношения энергий связанной и свободной воды в высушиваемом материале.

Для практического использования приведенных формул необходимо предварительно определить значение величин E и e. Значение величины потенциала сушки определяется по показаниям сухого и мокрого термометров $\left(E = t_C - t_M\right)$. Что касается величины $e = t_C - t_{ПР}$, то, так как температура продукта во втором периоде постоянно повышается и к концу процесса сушки достигает значений, близких к температуре сушильного агента, процесс переноса теплоты внутри тела описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье:

$$\partial\theta/\partial\tau = a\left[\left(\partial^2\theta/\partial x^2\right) + \left(\partial^2\theta/\partial y^2\right) + \left(\partial^2\theta/\partial z^2\right)\right], \qquad (3.25)$$

где $\partial\theta/\partial\tau$ - скорость изменения температуры в фиксированной точке высушиваемого тела; $a = \lambda/\rho C_P$ - коэффициент температуропроводности, $м^2/с$; λ - коэффициент теплопроводности высушиваемого тела, W/(m^2·K) (Вт/ (м^2·K); ρ - плотность, kg/m^3 (кг/м^3); C_P - удельная теплоемкость тела, J/kg (Дж/кг); x, y, z - пространственные координаты.

Уравнение Фурье может быть решено различными методами. Наиболее простое решение имеет следующий вид:

$$\frac{t_c - t}{t_c - t_0} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{+u} e^{-(u)^2}\,du, \qquad (3.26)$$

где t_c - температура сушильного агента по сухому термометру, ^{0}C; t_0 - температура на поверхности продукта, равная температуре мокрого термометра, ^{0}C; $u = x/2\sqrt{a\tau}$ - аргумент подынтегральной функции; x - расстояние от поверхности до центра продукта, m (м);

t - температура продукта в центре после его нагрева в течение времени τ.

Функция $\int_0^{+u} e^{-(u)^2} du,$ известна как интеграл ошибок.

Этот интеграл равен нулю при $(u) = 0$ и равен единице, когда интеграл стремится к бесконечности. В случае теплопереноса $u = x / 2\sqrt{a\tau}$ - берется по таблицам.

По кривым сушки гречневой крупы (рис.3.5) [46] проведен расчет по определению продолжительности сушки.

Используется формулу (3.25), определяем и температуру в центре гречневой крупы. Размеры гречневой крупы были взяты из источника. Сыпучих материалов гречихи имеют толщину $a = 2 - 4{,}2 mm(мм)$; ширину $b = 3{,}0 - 5{,}2 mm(мм)$; длину $l = 4{,}4 - 8{,}0 mm(мм)$; плотность

$\rho = 1{,}2 - 1{,}3 g/cm^3 (г/см^3)$. Равновесная влажность сыпучих материалов при $t = 20^0 C$ равна 7,8 %. Расчет проводился при средних значениях величин $a = 3{,}1 mm(мм)$, $b = 4{,}0 mm(мм)$, $l = 6{,}2 mm(мм)$. Значение

$$a = C_P = 0{,}35/(1100 \cdot 3350) = 0{,}96 \cdot 10^{-7} m^2/s(м^2/с).$$

Численное значение интеграла ошибок для $\tau = 3000$ s (с):

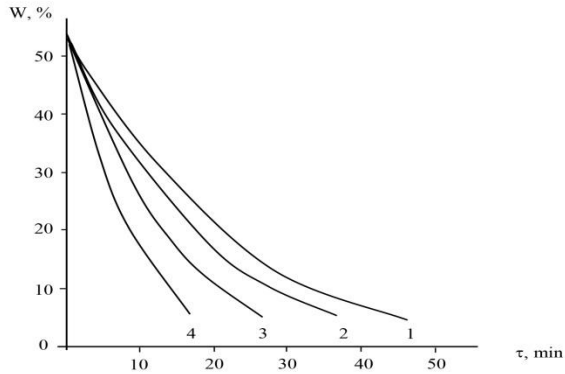


Рис.3.5. Кривые сушки крупы (вихревая сушка по М.А.Гришину) при различных температурах входящего воздуха: 1 – 90 ^{0}C; 2 – 120 ^{0}C; 3 – 140 ^{0}C; 4 – 150 ^{0}C (потенциал сушки входящего воздуха:

1 – 55 ^{0}C; 2 – 78 ^{0}C; 3 – 91 ^{0}C; 4 – 100 ^{0}C)

$$u = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{0{,}96 \cdot 10^{-7} \cdot 3000}} = 0{,}176.$$

По таблицам интеграла функции ошибок находим $u(x) = 0{,}138$. Тогда из отношения

$$\left(\frac{t_C - t_Ц}{t_C - t_{ПОВ}} \right) = erf\left(\frac{x}{2} \right)\left(\frac{1}{\sqrt{a\tau}} \right),$$

где erf - errow function - функции ошибок.

Находится температуру в центре сыпучих материалов гречихи через 50 min (мин) сушки во втором периоде:

$$t_Ц = t_C - (t_C - t_{ПОВ})erf\,(x/2)(1/\sqrt{a\tau}) =$$

$$= 90 - (90 - 35) \cdot 0.138 = 82.4^0 C.$$

Средняя температура сыпучих материалов гречихи после 50 min (мин) сушки во втором периоде равна: $1/2(90 + 82{,}4) = 86{,}2^0 C$. Тогда значение $e = t_{ср} - t_м = 86{,}2 - 35 = 51{,}2^0 C.$ Результаты обработки кривых сушки гречихи, приведенные в [46] (см. рис.3.5), обработанные по формуле (12), сведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Результаты обработки кривых сушки растительных материалов

№ кривой по [1]	Температура ^{0}C		Потен циал сушки E, ^{0}C	Расчет значения $e = t_{ПОВ} - t_M$ в конце процесса сушки, ^{0}C	Скорость сушки в первом периоде N, %/мин.	Изменение влажности продукта в период, %		Расчетные значе-ния продолжи-тельности сушки в период, мин.		Общее время сушки, мин.	
	сушиль-ного агента t_c	мокро-го термо-метра $t_м$				первый	второй	первый	второй	первый	второй
1	90	35	55	52	3,50	56-40	40-8	4,50	39,1	43,60	46,0
2	120	42	78	72	3,73	56-40	40-5	4,20	33,8	38,00	35,6
3	140	49	91	84	4,48	56-26	26-5	6,69	16,9	23,59	23,0
4	150	50	100	92	5,60	56-26	26-4	5,30	13,8	19,10	19,0

Таблица 3.2.

Результаты расчета продолжительности процесса сушки растительных материалов

Продукт	Размер мм	Температура ^{0}C		Потенциал сушки E, ^{0}C	Расчет значения $e = t_{ПОВ} - t_M$ в конце процесса сушки, ^{0}C	Скорость сушки в первом периоде N, %/min (мин).	Изменение влажности продукта в период, %		Расчетные значения продолжительности сушки в период, мин.		Общее время сушки, мин.	
		сушильного агента t_c	мокрого термометра $t_м$				первый	второй	первый	второй	первый	второй
Свекла	20x20x20	90	36	54	51	3,37	86,6-79,4	79,4-14,0	2,13	82,5	84,6	82,6
Морковь	12x12x12	90	36	54	51	5,80	86,6-78,7	78,7-14,0	1,36	47,0	48,36	50,0
Лук	3	90	36	54	50	15,75	84,6-69,7	69,7-14,0	0,94	12,99	13,93	10,7

Как видно из табл.3.1, результаты расчетов довольно близко совпадают с действительными значениями продолжительности сушки гречихи в вихревом потоке сушильного агента. Для круп, включая гречиху, показатель степени m, входящий в уравнение приведенной скорости ψ, Г.К.Филоненко нашел равным 2. Для таких растительных продуктов, как капуста, лук, морковь, яблоки, абрикосы и т.д., значение m рекомендуется брать равным 1. Важно проверить, можно ли использовать формулу (3.23) для определения общей продолжительности сушки продуктов с различным значением степени m. За основу были взяты кривые сушки картофеля, моркови и лука, приведенные в источнике [46] (рис.3.6).

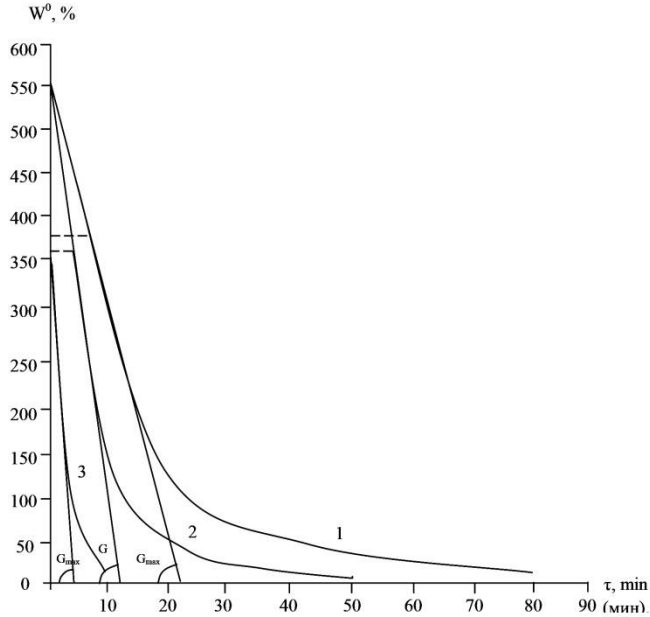


Рис. 3.6. Кривые сушки: 1- свеклы, нарезанной кубиками 20x20x20 mm (мм); 2- моркови, нарезанной кубиками 12x12x12 mm (мм); 3- лука, нарезанного кружками толщиной 3 mm (мм).

Для этих кривых по той же методике, которую использовали для определения продолжительности сушки гречневой крупы, были проведены расчеты. Значения абсолютной и относительной

влажности были пересчитаны предварительно в относительную влажность. Результаты расчетов сведены в табл.3.2.

Из приведенных в табл.3.2 данных видно, что расчетное и действительное время сушки совпадает. Это служит подтверждением того, что формулу (3.23) можно использовать для расчета общей продолжительности сушки различных продуктов конвективным способом.

Для математического описания переноса тепла и массы в случаях переменных кинетических коэффициентов процесса сушки растительных материалов применимо представление о дискретном распределении влагосодержания внутри пор материала и параметров, характеризующих интенсивность испарения.

Исходные положения: вся жидкость, испаряющаяся из материала, состоит из двух объемов с различными скоростями испарения; количество испаряющейся из соответствующих зон жидкости, приведенное к единице движущей силы (разности между текущей и равновесной влажностью), постоянны.

Такой подход позволяет корректно описывать кинетические процессы, которые протекают со скоростью, понижающейся в первом периоде и постоянном во втором.

Математическая модель [47] достаточно гибка и отвечает требованиям стандартности.

Дополнительно примем допущение, что относительно трудноотгоняемая часть жидкости контактирует не непосредственно с окружающей газовой фазой, а только через зону с легкоотгоняемым объемом жидкости.

Разделим элементарные зоны на две группы в зависимости от формы связи влаги с материалом, глубины расположения объема жидкости внутри частиц, размеров поровых каналов и др. факторов, определяющих скорость испарения из рассматриваемой зоны, и перейдем к двухзонной кинетической модели сушки сыпучих тел. Таким образом, постулируется внутрипоровое конвективное перемешивание целевого компонента, но только не в пределах зон с легко- и трудноудаляемыми объемами влаги, а в пределах элементарных зон.

Поток испаряющейся влаги представим как произведение разности текущих и равновесных значений влагосодержания в зоне и коэффициента массопередачи, отнесенного к единице объема (или массы) слоя материала. Относительными удельными показателями

оперируем из-за отсутствия расчетных уравнений, позволяющих надежно определять величину поверхности материала в слое.

Согласно принятой модели влага из зоны с трудноудаляемой частью жидкости переходит во внешнюю (первую) зону, а затем в газовую фазу с относительной влажностью φ.

Такая модель описывается уравнением:

$$\begin{cases} \Delta V_1 (dW_1 / d\tau) = l_1 (W_p - W_1) + l_2 (W_2 - W_1), \\ \Delta V_2 (dW_2 / d\tau) = l_2 (W_1 - W_2), \end{cases}$$

(3.27) где ΔV_1 и ΔV_2 – объемы пористого материала с соответственно легко- и трудноудаляемыми частями жидкости, m^3 ($м^3$); l_1 и l_2-соответствующие объемные потоки, m^3/s ($м^3/с$); W_1 и W_2-содержание влаги в материале (W_p- равновесное значение), %.

Введем обозначения:

$$m=\Delta V_2/(\Delta V_1+\Delta V_2);$$
$$K_1=l_1(\Delta V_1+\Delta V_2);$$
$$K_2=l_2/(\Delta V_1+\Delta V_2),$$

где m- доля трудноудаляемой части жидкости; K_1 и K_2 – кинетические параметры зон, m^3/s ($м^3/с$).

Считая, что $W_1(0)=W_2(0)=W_0$; $C_1=W_1-W_p$; $C_2=W_2-W_p$ и проведя преобразования Лапласа, после некоторых преобразований получим

$$C_1(P)=C_0(P+d_1)/(P-a)(P-b);$$
$$C_2(P)=C_0(P+d_2)/(P-a)(P-b),$$

где a и b- корни знаменателя.

Переходя к оригиналу, получим решение:

$$\begin{cases} C_1(\tau) = \{[(a+d_1)/(a-b)]\exp(a\tau) + [(b+d_1)/(b-a)]\exp(b\tau)\}C_0, \\ C_2(\tau) = \{[(a+d_1)/(a-b)]\exp(a\tau) + [(b+d_2)/(b-a)]\exp(b\tau)\}C_0. \end{cases} \quad (3.28)$$

Общая влажность

$$W=(1-m)W_1+mW_2=(1-m)C_1+mC_2+W_p.$$

Тогда, обозначив

$$(W(\tau)-W_p)/(W_0-W_p)=U(\tau),$$

получим

$$U(\tau)=A\exp(a\tau)+(1-A)\exp(b\tau). \quad (3.29)$$

При аппроксимации экспериментальных данных методом нелинейной оценки получили положительные значения параметров a и b, что противоречит исходным физическим представлениям. Это объясняется тем, что максимальная скорость испарения наблюдается

не в самом начале процесса, вызванного разницей в начальных температурах материала и воздуха.

Приняв коэффициенты массопередачи линейно зависимым от температуры материала [46] и зная его теплофизические свойства (зависимости теплоемкости и коэффициента теплопроводности материала и скрытой теплоты парообразования от температуры), определили изменение температуры материала во времени и учли его при аппроксимации кинетических кривых.

Решение системы (3.28) можно представить в виде

$$\begin{cases} W_1(\tau) = \{[(a+d_1)/(a-b)\}\exp(a\tau) + [(b+d_1)/(b-a)]\exp(b\tau)\}W_0, \\ W_2(\tau) = \{[(a+d_2)/(a-b)\}\exp(a\tau) + [(b+d_2)/(b-a)]\exp(b\tau)\}W_0. \end{cases} \quad (3.30)$$

где

$$W_1 = W_1 - W_p;$$
$$W_2 = W_2 - W_p;$$
$$W_p = W_0 - W_p;$$

W_0 – начальные условия $[W_1(0) = W_2(0) = W_0]$.

В этом случае кинетические параметры K_1, K_2 и m определяют при аппроксимации экспериментальной кривой по формулам:

$$K_1 = -a - b - D; \; D = A(a-b) - a;$$
$$K_2 = m[D + m(a+b)];$$
$$m + (ab/K_1 - D)/(a+b) + ab/K_1). \quad (3.31)$$

Для сушки хлопковой мятки получено: $m = 0{,}1\text{-}0{,}8$ (в зависимости от режимов подготовительных технологических операций); $K_1/K_2 = 5\text{-}100$ (в зависимости от условий подготовки и сушки).

Экспериментальные кривые сушки при стабильной температуре материала получить сложно, поэтому целесообразно предлагаем определять кинетические параметры двухзонной модели (K_1, K_2, m) с учетом нагрева материала от начальной $t_н$ до конечной $t_к$ температуры на основе предположения о пропорциональности K_1 и K_2 температуре материала: $K_1 = C_1(t_м - 4)$; $K_2 = C_2(t_м - 4)$.

Тогда система (3.27) сводится к виду

$$\begin{cases} (1-m)[dW_1/(t_M - 4)d\tau = C_1(W_p - W_1) + C_2(W_2 - W_1), \\ m[dW_2/(t_M - 4)d\tau] = C_2(W_1 - W_2)/ \end{cases} \quad (3.32)$$

Обозначим

$$d\Theta = (t_{тмМ} - 4)d\tau,$$

откуда

$$\Theta\int_0^{\tau}(t_M-4)d\tau \qquad (3.33)$$

Изменение t_M во времени определим из решения уравнения теплового баланса для материала

$$d(QCt_M)/d\tau = K_T F(T_{окр}-t_M)+Q(dW/d\tau)r, \qquad (3.34)$$

где Q - количество материала, кг; C - теплоемкость материала, J/(kg·K) (Дж/(кг·К)); K_T-коэффициент теплопередачи, W/(m^2·K) (Вт/(м^2·К)); F - поверхность теплообмена, m^2 (м^2); r-удельная теплота парообразования, J/kg (Дж/кг).

При этом для исследуемого материала должны быть заранее известны зависимости $K_T=f(t_M)$, $C=f(t_M,W)$, $r=f(t_M)$.

В первом приближении $\Delta\tau$ и значения влажностей берутся от результатов экспериментов. Полученный массив значений температур используется для численного решения задачи (3.34) путем перехода от t к Θ.

Таким образом, найти кинетические параметры модели при изменяющейся температуре можно при решении (3.33) с предварительной деформацией кривых сушки по оси абсцисс.

При определении параметров известным методом нелинейного оценивания из-за отсутствия явного функционального вида аппроксимирующей зависимости необходимо рассчитывать величины влажности и значения частных параметров путем совместного численного решения системы уравнений (3.33) и (3.34) на каждом шаге уточнения параметров.

Для расчета параметров предварительно определяют температуру материала t_M и переходят от t к Θ, что в дальнейшем при итерационном уточнении параметров позволяет использовать аналитическое решение (3.31).

На основе разработанной математической модели кинетики сушки хлопковой мятки предложен алгоритм расчета кинетических параметров.

В табл.3.3 приведены расчетные параметры для предложенной модели кинетики сушки хлопковой мятки с лузжностью 14% и значения следующих параметров: $W_н$ и W_k- соответственно начальная и конечная влажности материала.

Таблица 3.3

Результаты расчета параметров модели кинетики процесса сушки хлопковой мятки

t,C	W_H, %	W_K, %	W_p, %	Параметры модели						Критерий близости R
				A	a	b	m	C_1	C_2	
40	7,8911	5,1609	0,5	0,961638	-0,0047	-0,510222	0,942	0,0361	0,00816	0,048057
50	7,8911	4,4062	0,5	0,130818	-0,223795	-0,004691	0,831	0,05	0,00664	0,014211
60	7,8911	2,8314	0,5	0,530955	-0,025576	-0,004261	0,318	0,0234	0,00228	0,06804
90	7,8911	0,0048	0,1	0,005117	-0,001124	-0,057769	0,0049	0,0862	0,00001	0,358743
100	7,8911	0,0027	0,1	0,038242	-0,020089	-0,126819	0,0271	0,184	0,00082	0,459008
40	13,3045	5,6738	1,1	0,397893	-0,066618	-0,004747	0,515	0,0441	0,00403	0,045104
60	13,3045	3,0705	1,1	0,121044	-0,003449	-0,041821	0,102	0,558	0,00532	0,065203
80	13,3045	1,9739	1,1	0,739136	-0,037483	-0,011347	0,549	0,163	0,0398	0,321642
100	13,3045	0,6005	0,3	0,016107	-0,001935	-0,047244	0,0148	0,698	0,00004	0,19532
40	20,2476	10,633	1,5	0,895223	-0,008653	-0,004512	0,0363	0,0122	0,00019	0,037342
60	20,2476	3,9024	1,5	0,282272	-0,004198	-0,050597	0,237	0,0563	0,00154	0,053115
80	20,2476	4,8261	1,5	0,183635	-0,003719	-0,111128	0,172	0,1037	0,00096	0,067114
100	20,2476	1,538	1,5	0,369177	-0,041528	-0,066918	0,5890	1,19	0,0645	0,422103

Результаты моделирования кинетики процесса сушки показали, что по высоте слоя изменения температуры частиц на порядок ниже, чем температуры теплоносителя. В этом случае можно интенсифицировать процесс, обрабатывая частицы при более высокой температуре, не опасаясь их перегрева.

Таким образом, новая двухзонная кинетическая модель сушки хлопковой мятки, основанная на дискретных представлениях о переносе тепла и массы при удалении влаги из материала, адекватна реальному процессу.

Возможно несколько вариантов решения задачи аппроксимации кривых равновесия влагосодержащих материалов. Эти варианты различаются тремя признаками: соотношением погрешностей измерения, способом выражения погрешностей и методом получения решений. При применении этих методов к конкретной технологической задаче или к конкретному влагосодержащему материалу возникает необходимость анализа и учета различий в результатах оценивания параметров, полученных по тому или иному методу. Такой анализ позволяет обоснованно выбирать метод аппроксимации и учитывать условия эксперимента, когда имеют место существенные отклонения оценок.

С этой целью нами рассмотрено восемь вариантов обработки результатов экспериментов (приближенные методы рассмотрены только для случаев применения "абсолютного" и "относительного" метода наименьших квадратов - МНК). При рассмотрении вопросов алгоритмизации нам удалось все варианты решить с помощью основной подпрограммы NELIN, реализующей следующий подход. Сначала подбирается и решается схожая линейная задача, затем решение последовательно уточняется путем повторного решения той же линейной задачи, но уже в условиях введения так называемых "штрафных" коэффициентов, которые определяются в зависимости от величины отклонения расчетных данных от экспериментальных, когда расчеты выполнены по линейным и нелинейным зависимостям.

Подпрограмма NELIN – ядро алгоритма решения задач второго типа. Суть предложенного общего алгоритма решения задач указанного типа состоит в следующем. На начальном этапе решается обычная задача МНК, т.е. степень близости данных оценивается по ординате. К полученной кривой из каждой экспериментальной точки проводятся с соответствующим наклоном прямые линии. Абсциссы

точек пересечения прямых с кривой считаются уточненными абсциссами экспериментальных точек. Затем опять решается задача МНК, и так продолжается до тех пор, пока данные не стабилизируются с заданной точностью.

Следует отметить, что обратный МНК решается путем решения задачи второго типа, при весовых коэффициентах $\beta_{\varphi_i}=1$ и $\beta_{W_i^{(P)}}=0{,}01$.

Критерий близости для нашего случая имеет вид:

$$R(C_1, C_2, ..., C_n) = \sum_{i=1}^{n} \min_{W_{P_i}} [\beta_{\varphi_i}(\varphi_i^P - \varphi_i^Э)^2 + \beta_{W_i^{(P)}}(W^{(P)}{}_{P_i} - W^{(P)}{}_{Э_i})^2] \to \min \quad . \qquad (3.35)$$

Обозначим

$$l_i^2 = \min [\beta_{\varphi_i}(\varphi_i^P - \varphi_i^Э)^2 + \beta_{W_i^{(P)}}(W^{(P)}{}_{P_i} - W^{(P)}{}_{Э_i})^2],$$

$$Y_P = f(C_1, C_2, ..., C_n, X_P).$$

Тогда

$$\frac{\partial l_i^2}{\partial W_i^{(P)}} = 2\beta_{\varphi_i}(\varphi_i^P - \varphi_i^Э)\frac{\partial \varphi_i}{\partial W_i} + 2\beta_{W_i^{(P)}}(W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_ш}^{(P)}) = 0, \ i = (1,2,.....m) \quad . \qquad (3.36)$$

Полученное уравнение трансцендентное, поэтому кривую заменяем касательной, проведенной к ней в точке перегиба.

$$\varphi_i = g + hW_i^{(P)}, \qquad h = \frac{\partial \varphi_i}{\partial W_i^{(P)}} | W^{(P)} = W_1^{(P)}. \qquad (3.37)$$

где g находится из условия $\varphi(W_i^{(P)}) = g + hW_1^{(P)}$, откуда $g = \varphi(W_1^{(P)}) - hW_1^{(P)}$.

Подставляя в уравнение (3.36) эти выражения, имеем

$$\beta_{\varphi_i}(g + hW_i^{(P)} - \varphi_{Э_i})h + \beta_{W_i^{(P)}}(W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_i}^{(P)}) = 0$$

$$\beta_{\varphi_i} gh + \beta_{\varphi_i} h^2 W_i^{(P)} - \beta_{\varphi_i}\varphi_{Э_i} h + \beta_{W_i^{(P)}} W_{P_i}^{(P)} - \beta_{W_i^{(P)}} W_{Э_i}^{(P)} = 0 \qquad (3.38)$$

Оценка

$$W_i^{(P)} = \frac{\beta_{W_i^{(P)}} W_{Э_i}^{(P)} + \beta_{\varphi_ш} p(\varphi_{"_ш} - g)}{\beta_{\varphi_i} h^2 + \beta_{W_i^{(P)}}}. \qquad (3.39)$$

В последующем можно результат уточнить, повторив процедуру проведения касательной уже в точке $\overline{W_i}$.

Таким образом, нами предложен эффективный алгоритм нахождения W_i при известных C_1 и C_2, т.е. когда W_i представляется как функция от C_1 и C_2.

Уравнение $\partial R / \partial C_j = 0$ имеет вид:

$$\sum_{i=1}^{m} [2\beta_{\varphi_i}(\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i}) \frac{\partial \varphi_i}{\partial C_j} + 2\beta_{W_i^{(P)}}(W_{P_i}^{(P)} - (W_{Э_i}^{(P)}) \frac{\partial W_i^{(P)}}{\partial C_j}] = 0, \quad (j = 1,2) \qquad (3.40)$$

где

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \varphi_i}{\partial C_1} = \varphi_i (1 - \dfrac{C_2}{[W_i^{(P)}]^2}, \dfrac{\partial W_i^{(P)}}{\partial C_1}); \\ \dfrac{\partial \varphi_i}{\partial C_2} = \varphi_i (\dfrac{1}{W_i^{(P)}} - \dfrac{C_2}{[W_i^{(P)}]^2}, \dfrac{\partial W_i^{(P)}}{\partial C_2}) \end{cases} \qquad (3.41)$$

Таким образом, имеем (n+m) трансцендентных уравнений системы (3.41) и (3.40) относительно неизвестных $C_j \quad (j = 1,2)$ и $W_i^{(P)} \quad (i = 1,2,..,m)$.

Нами предложен алгоритм решения задачи минимизации для трех видов исходного аппроксимирующего уравнения $Y_P = f(C_1, C_2, ..., C_n, X_P)$, когда линейность зависимости достигается путем замены переменных. Алгоритм NORMAL состоит из следующей последовательности действий:

1. Ввод исходных данных: $t_i, Л, W_i^{(P)}, \varphi_i \quad i = \overline{1,10}$;

2. Расчет средних значений зависимых и независимых переменных $\overline{W_i^{(P)}}$ и $\overline{\varphi_i}$ и преобразование их экспериментальных

значений в логарифмические координаты и выбор $BO(I), \beta_{W_i^{(P)}}, \beta_{\varphi_i}$ по сформированным признакам;

3. Выбор $BO(I), \beta_{W_i^{(P)}}, \beta_{\varphi_i}$ по сформированным признакам;

4. Вычисление коэффициентов системы линейных уравнений;

5. Вычисление значений $W_{P_i}^{(P)}$ по подпрограмме NELIN и с использованием метода Гаусса;

7. Вычисление по формуле (7.39) для известных C_j; приближенных значений $W_i^{(P)}$;

7. Вычисление уточненных значений φ_{P_i} по формуле и критериев близости R и R' точного и логарифмического методов

$$R = \sum_{i=1}^{m} [\beta_{\varphi_i} (\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i})^2 + \beta_{W_i^{(P)}} (W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_i}^{(P)})^2] \qquad (3.42)$$

8. Проверка окончания локального цикла $\left\| W_{i+1}^{(P)} - W_i^{(P)} \right\| < \varepsilon$, при невыполнении этого условия возврат к п.12 алгоритма;

9. Вычисление значений абсолютного и относительного критериев подобия R_a и R_0 по следующим формулам:

$$R_a = \sum_{i=1}^{m} [(\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i})^2 + (W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_i}^{(P)})^2], \qquad (3.43)$$

$$R_0 = \sum_{i=1}^{m} [\frac{1}{\varphi_i^2} (\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i})^2 + \frac{1}{[W_i^{(P)}]^2} (W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_i}^{(P)})^2]; \qquad (3.44)$$

10. Вычисление коэффициентов C_1 и C_2, а также значений гигроскопической влажности и влажности в точке перегиба:

$$W_г = -\frac{C_2}{C_1}; W_n = -\frac{C_2}{2}; \qquad (3.45)$$

11. Печать значений $C_1, C_2, W_г, W_n$;

12. Вычисление квадратного корня значений суммы квадратов отклонений зависимой переменной

$$SQO = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} \Delta\varphi_i^2}{M}}, \qquad (3.46)$$

где $\Delta\varphi_i = \varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i}$

13. Вывод экспериментальных и расчетных значений зависимой и независимой переменных $W_{Э_i}^{(P)}, W_{P_i}^{(P)}, \varphi_{Э_i}, \varphi_{P_i}$, а также $\Delta\varphi_i, \varphi_i^{отн} (i = 1,2,...,M)$;

14. Вычисление среднеквадратических значений абсолютных отклонений

$$ASREDP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} \left| \left(\frac{\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i}}{\varphi_{Э_i}} \right) \right|^2}{M}}, \qquad (3.47)$$

средних ошибок определения относительной влажности в процентах

$$ASRED = \frac{\sum_{i=1}^{m} \left| \left(\frac{\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i}}{\varphi_{Э_i}} \right) * 100 \right|}{M} \qquad (3.48)$$

и среднеквадратического отклонения оценки влажности

$$SX1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{M} (W_{P_i}^{(P)} - W_{Э_i}^{(P)})^2}{M}}, \qquad (3.49)$$

а также средней ошибки определения относительной влажности

$$PR1 = \frac{\sum_{i=1}^{M} (\varphi_{P_i} - \varphi_{Э_i})}{M}; \qquad (3.50)$$

15. Вывод на печать значений SQO, ASREDP, ASRED, SX1, PR1, R_a, R_0

17. Проверка окончания глобального цикла $\left\| C_j^{n+1} - C_j^n \right\| < \varepsilon$, при выполнении этого условия – возврат к п.13 алгоритма, в противном случае – возврат к п.4 алгоритма и расчеты повторяются для следующего критерия и так далее.

3.3. Оценка равновесных зависимостей по выборкам экспериментально полученных данных

Традиционные, априорно задаваемые эмпирические, полуэмпирические или теоретические функциональные зависимости содержат, как правило, параметры, подлежащие определению в нелинейной форме. В этих условиях используется подход к решению задач аппроксимации, опирающийся на различные приемы выравнивания. Последние зависят от конкретного вида исходных уравнений и в большинстве случаев сводятся к замене переменных путем предварительного логарифмирования.

Однако привносимая при этом в оценку параметров ошибка обусловлена искажением критерия близости экспериментальных и расчетных данных. Для многих практически важных случаев она весьма существенна. Поэтому возникает необходимость улучшения приемов оценки параметров моделей с привлечением методов нелинейного оценивания (МНО).

Методы и средства получения и интерпретации экспериментальной информации относительно значений переменных, характеризующих физическое равновесие, обусловливают ощутимые ошибки значений переменных, дисперсии которых соизмеримы.

Проанализируется [48] связь между результатами применения некоторых приемов выравнивания параметров моделей и вызванными этим соответствующими деформациями критерия близости.

Задачи минимизации суммы квадратов разностей между логарифмами значений экспериментальных ($Y_э$) и расчетных (Y_P) данных.

Преобразуем разность

$$\lg Y_p - \lg Y_э = \lg(\frac{Y_P}{Y_э}) = \lg(1+\frac{Y_P - Y_э}{Y_э}) = \frac{Y_P - Y_э}{Y_э}. \qquad (3.51)$$

Как видит, такое выравнивание правомерно в тех случаях, когда

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{Y_э^2}, \qquad (3.52)$$

где σ_Y^2-дисперсия ошибок.

Отсюда следует, что введение в трансформированный критерий близости весовых коэффициентов, равных $Y_Э^2$, приводит к следующей ситуации:

$$\sum_{i=1}^{n} Y_{"_i}^2 (\lg Y_{P_i} - \lg Y_{Э_i})^2 = \sum_{i=1}^{n} (Y_{P_i} - Y_{Э_i})^2, \qquad (3.53)$$

Распространим данный подход на случай замены независимой переменной на ее обратную величину. В качестве примера рассмотрим аппроксимацию гигротермического равновесия состояния системы «твердое тело-воздух» уравнением Поснова [48]:

$$\varphi = e^{C_1 + C_2 / W_P}, \qquad (3.54)$$

где φ - относительная влажность воздуха; W_P – равновесная влажность материала %.

Если $\sigma_Y^2 << \sigma_{W_P}^2$, то для применения МНК необходимо преобразовать (3.54):

$$\frac{1}{W_P} = \frac{\ln \varphi - C_1}{C_2}, \qquad (3.55)$$

Обозначим:

$$Y = \frac{1}{W_P}; X = \ln \varphi; a = \frac{1}{C_2}; b = -\frac{C_1}{C_2}.$$

Преобразование разности

$$Y_{P_i} - Y_{Э_i} = \frac{1}{W_P^{(P)}} - \frac{1}{W_P^{(Э)}} = \frac{W_{P_i}^{(Э)} - W_{P_i}^{(З)}}{W_{P_i}^{(Э)} W_{P_i}^{(P)}} \qquad (3.56)$$

показывает, что полученный критерий близости отличается от исходного весовыми коэффициентами

$$\left(\frac{1}{W_{P_i}^{(P)} - W_{P_i}^{(Э)}} \right)^2.$$

Вообще говоря, подобная замена имеет свой резон, когда необходимо значительно выделить роль и вклад малых значений параметров.

Применение методов теории максимального правдоподобия [49-50] к случаям учета совокупных ошибок измерений физических

переменных приводит к критерию близости в виде (двумерный случай):

$$R(C_1, C_2, ..., C_n) = \sum_{i=1}^{n} \min_{X_{P_i}} [\beta_{Y_i} (Y_{P_i} - Y_{Э_i})^2 + \beta_{X_i} (X_{P_i} - X_{Э_i})^2] \to \min \quad (3.57)$$

где $C_1, C_2, ..., C_n$ - параметры уравнения $Y_P = f(C_1, C_2, .., C_n, X_P)$; X и Y – переменные.

Приведенный вид критерия близости позволяет сделать вывод о том, что в решении задачи аппроксимации равновесной зависимости (изотермы сорбции или десорбции) максимальное правдоподобие по Байесу оценок параметров исследуемого уравнения независимо от методики экспериментирования однозначно достигается с помощью величин β_{Y_i} и β_{X_i}, характеризующих дисперсии погрешностей измерения содержания влаги в газовой и твердой фазах.

Иными словами, при обработке результатов опытов факт зависимости или независимости переменных при реализации конкретных экспериментов по снятию равновесных точек, характеризующих получаемые изотермы сорбции и десорбции, не должен отражаться на выборе абсциссы (или независимой переменной).

Таким образом, исходя из соотношения β_{Y_i} и β_{X_i} (в нашем случае β_{φ_i} и $\beta_{W_i^{(P)}}$), можно говорить о следующих трех возможных ситуациях, возникающих при обработке результатов экспериментов:

1. Влажность материала определена настолько точно, что ошибками измерений можно пренебречь по сравнению с ошибками измерения относительной влажности воздуха. В данном случае задачу обработки равновесных кривых можно решить методом наименьших квадратов. При этом в качестве абсциссы (независимой переменной) принимается равновесная влажность $W^{(P)}$.

2. Погрешности в определении влажности материала и относительной влажности воздуха соизмеримы между собой. Этот случай означает, что степень близости расчетных и экспериментальных данных должна быть оценена не по ординате и

абсциссе, а с учетом наклона, зависящего от соотношения β_{φ_i} и $\beta_{W_i^{(P)}}$.

3. Точность определения значений относительной влажности воздуха на порядок и более выше точности определения значений равновесной влажности материала. В этом случае, применяя метод МНК, необходимо преобразовать уравнение Поснова к указанной выше форме

$$W^{(P)} = \frac{C_2}{\ln\varphi - C_1}. \qquad (3.58)$$

В каждом из перечисленных случаев необходимо различать способ выражения погрешности:

– если измерения выполнены с помощью контрольно-измерительной аппаратуры, то обычно ее точностные характеристики выражаются в классах точности приборов, т.е. нам известны значения при веденных относительных погрешностей измерения;

– если точность результатов оценена обработкой параллельно проведенных опытов, то обычно известно отклонение от средне го значения (абсолютная погрешность).

Во всех перечисленных случаях при аппроксимации равновесных данных посредством уравнения Поснова приходим к задаче приближения, когда минимизируемый критерий близости нелинейно зависит от оцениваемых параметров C_1 и C_2.

Применение МНК в этом случае обусловливает необходимость решения системы нелинейных или трансцендентных уравнений.

Выше рассмотрены применяемые на практике приемы получения приближенных решений при оценке параметров посредством выравнивания путем подходящей замены переменных. Также были рассмотрены пути рационализации приближенных методов введением весовых коэффициентов, соответствующих конкретному виду уравнения, Точные решения задач, соответствующих первому и третьему случаям (соответственно МНК и обратный МНК), могут быть получены, как было показано выше, методом нелинейного оценивания. Следует особо отметить, что задачи, относящиеся ко второму случаю (соизмеримость погрешностей), гораздо более сложны в вычислительном плане.

3.4. Структурная схема АСУТП установок для влаго-тепловой обработки сыпучих материалов

Внедрение автоматических средств и систем контроля и управления обеспечивает повышение производительности технологического оборудования и качества выпускаемой продукции. Работу по автоматизации технологических установок и комплексов производят в следующих направлениях: создание диспетчерского автоматизированного контроля и управления процессом со стабилизацией основных параметров; обеспечение необходимыми измерительными приборами и средствами контроля и регулирования (влагомерами, термометрами, измерительными преобразователями, регуляторами, задвижками, клапанами и т. д.); комплексная автоматизация контроля и регулирования режимов влаго-тепловой обработки сырья с применением общепромышленных регуляторов и средств; создание системы автоматического контроля и управления основными технологическими процессами и производствами.

Автоматизация установок влаго-тепловой обработки сыпучих материалов должна обеспечивать требуемый режим эксплуатации при соблюдении следующих правил: пуск устройств только после подачи предупредительного сигнала; пуск всех электроприводов с обязательным соблюдением контрольного времени разгона приводных двигателей до нормальной скорости; включение электрозапального устройства после предварительной вентиляции топки и топочного помещения; пуск в определенной последовательности вентиляторов сушильных и охлаждающих камер; подача топлива при появлении искры между электродами запально-зажигательного устройства (ЗЗУ); включение транспортных механизмов после запуска вентиляторов; повторное включение ЗЗУ для восстановления факела в случае его погасания. Если в течение 5 s (с) факел не восстанавливается, то система управления отключается, возвращаясь в исходное положение; предотвращение переполнения бункера сырого продукта и понижения уровня в тепловлагообменнике; аварийный останов установки.

Конструкция установки, как правило, предусматривает дистанционное управление электродвигателями приводов механизмов с пульта управления в автоматическом, полуавтоматическом и ручном режимах работы, а также местный пуск и останов электродвигателей для ремонта или снятия ав-

тоблокировки. Используемые контрольно-измерительные и автоматические приборы должны обеспечивать блокировку, контроль и сигнализацию работы электрооборудования, уровни заполнения продуктом бункеров и тепломассообменников, температуры агента сушки, влажности просушенного материала, индикацию положения клапанов и задвижек, работу топки и состояние её топливо- и воздухоподводящих систем.

В шахтной сушилке система автоматизации управления, блокировки и сигнализации предусматривает: дистанционный пуск - сушилки (подача топлива и воспламенение факела, слокированный запуск электродвигателей); поддержание постоянного давления топлива перед форсункой; восстановление факела при исчезновении пламени; дистанционный пуск и останов всех электродвигателей сушилки с пульта оператора; автоматическое закрытие задвижек под ёмкостью для сырого сыпучих материалов при срабатывании датчиков подпора сыпучих материалов в башмаке рециркуляционной нории, при прекращении подачи топлива в форсунку и при переполнении надсушильных бункеров; автоматическое закрытие задвижек под шахтой окончательного охлаждения при понижении уровня сыпучих материалов в тепломассообменниках ниже рабочей зоны (нижний уровень); дистанционный контроль температуры агента сушки на входе и выходе камеры нагрева и температуры сыпучих материалов в тепломассообменниках; контроль расхода жидкого топлива; световую и звуковую сигнализацию о прекращении подачи топлива в форсунку, повышении температуры сыпучих материалов в тепломассообменниках, превышении допустимого (верхнего) уровня сыпучих материалов в надсушильных бункерах и тепломассообменниках.

Подача топлива в форсунку может быть прекращена при: остановке любого вентилятора камер нагрева; превышении температуры отработавшего агента сушки 100 °С; превышения температуры сыпучих материалов в теплообменниках 80 °С; снижении давления распыливающего воздуха, поступающего в форсунку; снижении давления топлива перед форсункой ниже допустимого; переполнении тепломассообменников (срабатывании датчиков верхнего уровня); невозможности в течение 5-10 s (с) восстановить погасший факел топки.

Для выполнения указанных условий используется соответствующее контрольно-измерительное, силовое и технологическое оборудование. От надежности и точности указанного оборудования зависит обеспечение нормального функционирования технологических установок. Помимо этого, для создания АСУТП необходимо математическое, программное, лингвинистическое обеспечение. Учитывая большое количество используемых измерительных датчиков и исполнительных механизмов, требуются вычислительные машины с расширенным интерфейсом, обеспечивающих создание управляющих вычислительных комплексов (УВК).

Алгоритмизация технологических процессов влаго-тепловой обработки сыпучих материалов представляет собой разработку математического описания поведения системы «технологический процесс-АСУТП» на нескольких уровнях формализации; она является одной из основных составляющих процесса проектирования АСУТП на всех этапах ее жизненного цикла. Автоматизация включает: изучение технологического процесса и факторов, определяющих его протекание; постановку задачи автоматизированного управления процессом; разработку математической модели, алгоритма управления процессом, создания программ применительно к конкретному УВК.

В основу математического обеспечения АСУТП входят алгоритмы и программы, связанные с непосредственным управлением объектом. Построение математического обеспечения возможно на основе математической модели технологического процесса. При этом следует учесть, что практически любая модель является той или иной степенью приближения к реальному технологическому процессу. Алгоритмы функционирования АСУТП должны обеспечивать надёжную работу агрегатов при возможных отклонениях от параметров реального технологического процесса.

На основании результатов реализации алгоритмов блока предсказания в системе управления формируется алгоритм управления технологическим процессом. Алгоритмы блока предсказания разделяются на две группы: алгоритмы, на основании которых вырабатывается прогноз поведения управляемого объекта; алгоритмы, реализующие оптитмальный регламент ведения процесса управления.

Известны модели технологических процессов влаго-тепловой обработки сыпучих материалов, приведенные, например, в работе Н.В.Остапчука [51]. Основаны эти модели на более ранних работах А.В.Лыкова [52], А.С.Гинзбурга [53], А.А.Гухмана [54], А.С.Бомко и В.И.Жидко [55]. Однако, несмотря на отдельные попытки создания автоматизированных установок, распространения АСУТП на основе указанных математических моделей не получили: сказались как ошибки в математическом описании, так и в используемом алгоритме. Определенную роль сыграло игнорирование изменений технической базы и появление более совершенных контрольно-измерительных приборов и технологических агрегатов, на которые ещё не были получены адекватные математические модели.

Дальнейшие разработки видятся в использовании адаптивных алгоритмов функционирования и выборе контрольно-измерительной аппаратуры с оптимальными, исходя из требований технологического процесса, характеристиками. Прогноз и выявление отклонений в модели и ходе технологического процесса образуют самообучающийся блок. Алгоритмы блока самообучения предназначены для ведения программы эксперимента, анализа полученных результатов и определения соответствующих параметров математической модели технологического процесса. Для реализации алгоритмов ведения эксперимента используются логико-арифметические операции; для алгоритмов анализа результатов эксперимента - корреляционный анализ, математический аппарат методов оценки вектора состояния (методы наименьших квадратов, максимального правдоподобия и др.); для алгоритмов коррекции математической модели технологического процесса - логико-арифметические операции [56, 57].

Помимо работ российских специалистов по созданию АСУТП, отметим зарубежные разработки. Фирмой Buhler-Miag (Браун-швейг, Германия) поставляется оборудование, обеспечивающее автоматическую сушку сыпучих материалов на элеваторах. Алгоритм функционирования реализован в пакете программ MYAE, в качестве УВК используется PC-компьютер фирмы IBM. Посредством серийного интерфейса RS-485 происходит обмен информацией между ЭВМ и контрольно-измерительными приборами и исполнительными механизмами. На экране монитора отображаются основные параметры технологического процесса. При этом предусмотрена звуковая сигнализация 20 аварийных ситуаций.

Все получаемые данные о ходе технологического процесса регистрируются автоматически или по вызову посредством паролей на магнитных носителях или на печатающем устройстве.

Информация о физических параметрах исследуемого технологического процесса преобразуется в электрические сигналы с помощью датчиков (измерительных преобразователей). Электрические сигналы могут быть аналоговой или импульсной (цифровой) формы. АСУТП должна быть способной в реальном времени интерпретировать сигналы от датчиков, реагировать на них и осуществлять управление. Поэтому в составе АСУТП должны быть входные и выходные устройства, позволяющие осуществлять связь с датчиками, управлять обменом информации.

Для обеспечения работы измерительной информационной подсистемы (ИИП) АСУТП сушки сыпучих материалов в реальном времени необходимо основную нагрузку по обработке сигналов от датчиков технологических параметров возложить на (ЛИУС). В составе ЛИУС для импульсных датчиков рассматриваемой АСУТП имеются однокристальные ЭВМ (ОЭВМ), таймеры, универсальные асинхронные последовательные приемо-передатчики (УАПП), устройства согласования и сопряжения и др. оборудование.

Информационная подсистема АСУТП предусматривает на блочном щите управления отображение информации о ходе технологического процесса, состоянии силового и измерительного оборудования и технических средств АСУТП. Информация выводится под управлением ЭВМ на экраны видеоконтрольных устройств, табло индикации, на принтеры, на магнитные носители информации с помощью локальных систем автоматики и управления. В рассматриваемой АСУТП предусматривается возможность управления загрузкой программ и внесения изменений в рабочие программы с консоли оператора-технолога. ЭВМ соединяется с устройствами и комплексами с помощью цифровых каналов связи, ЛИУС сопрягаются с измерительными и силовыми преобразователями аналоговыми и дискретными сигналами, с табло индикации - дискретными и аналоговыми сигналами.

Учитывается, что работа АСУТП протекает в реальном масштабе времени, основную работу по обработке измерительной информации и осуществлению выполнения управляющих воздействий исполнительными механизмами должны выполнять

ЛИУС. В зависимости от сложности выполняемых задач структура ЛИУС может существенно изменяться.

Для простых команд типа "включить" и "выключить" достаточно иметь буферный регистр с дешифратором и силовой преобразователь. Для осуществления сложных алгоритмов работы исполнительного оборудования используют контроллеры с ПЗУ, где записывается алгоритм функционирования в виде соответствующей программы на языке, понятном для встроенного микропроцессора.

Наличие большого количества импульсных датчиков, исполнительных механизмов требует для обмена информацией большого числа линий связи. Использование параллельных каналов связи приводит к необходимости прокладки большого числа проводов (кабелей), что бывает часто неудобно и невыгодно и к тому же приводит к снижению достоверности получаемой информации. Поэтому в условиях АСУТП более перспективным является использование последовательных каналов связи на основе универсальных асинхронных приемо-передатчиков (УАПП), представляющих собой устройство последовательного интерфейса (ИРПС). Стандартный ИРПС для приема-передачи информации требует одну линию связи для передачи информации и одну линию связи - для приема, что существенно меньше, чем в случае использования параллельного интерфейса (ИРПР).

Передача и прием информации по каналам ИРПС производится побайтно, т. е. передаваемые слова содержат только 8 информационных бит, что часто бывает недостаточно для программирования микросхем, входящих в состав ЛИУС. Для преодоления этого недостатка целесообразно рассматривать передаваемое слово, состоящим из двух полубайтов: верхнего и нижнего. Верхний полубайт содержит код адреса, а нижний - код данных. При этом достаточно просто осуществлять программирование таймера, содержащего три программируемых счетчика. Это значительно упрощает передачу в управляющую ЭВМ информации от импульсных датчиков, частота сигнала которых непосредственно связана с измеряемым технологическим параметром (рис.3.7). С центральной ЭВМ эту операцию можно осуществить с помощью ОЭВМ ЛИУС.

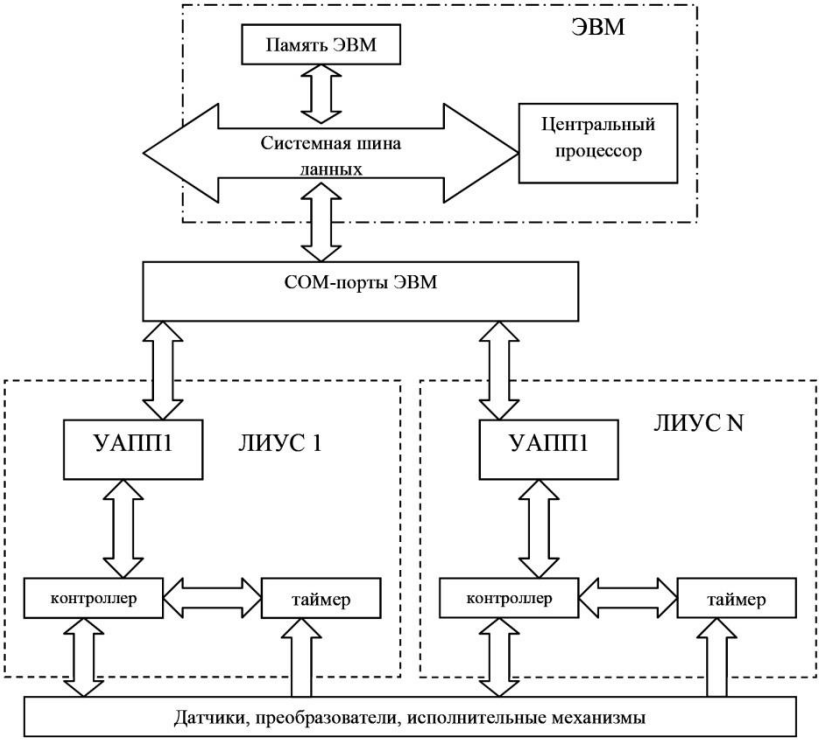


Рис. 3.7. Схема измерительной информационной подсистемы АСУТП.

Описанная структура УВК АСУТП для своего функционирования требует выполнения ряда операций, указанных на рис.7.8. Перед включением технологического оборудования в работу необходимо установить начальные значения в программируемых средствах сбора и обработки информации. Затем необходимо проконтролировать состояние исполнительных механизмов и измерительных приборов, осуществить диагностику не только электронного, но и технологического оборудования [58, 59].

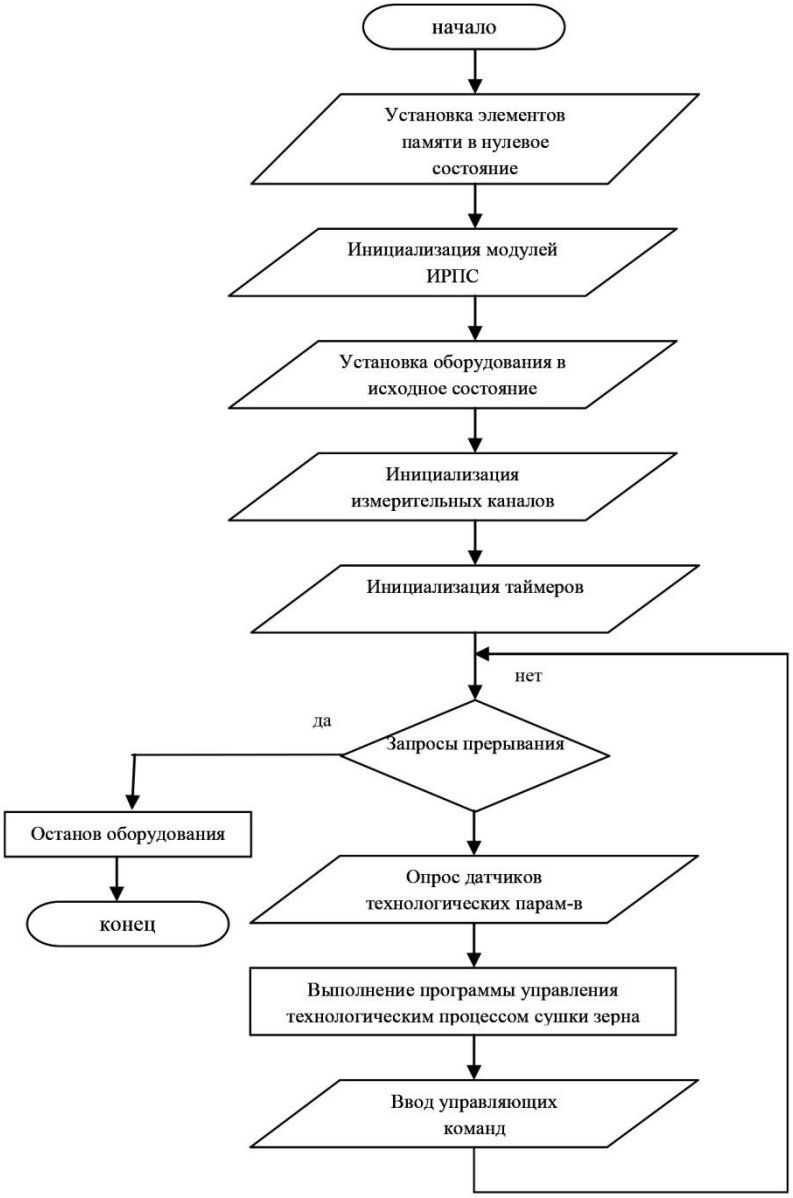


Рис.3.8. Структурная схема алгоритма функционирования АСУТП сушки сыпучих материалов

В соответствии с программой работы осуществляется пуск технологического оборудования, осуществляется непрерывный контроль за состоянием силового оборудования, измерительных приборов и технологического процесса. Программно или по прерыванию вносятся коррективы в алгоритм функционирования АСУТП.

Режим технологического процесса должен поддерживаться в заданных границах. Выход за пределы установленных ограничений на технологические параметры считается предаварийным состоянием, при появлении которого выставляется запрос прерывания, включается предупредительная сигнализация и происходит отключение технологического оборудования.

Помимо выполнения программ работы с силовым и измерительным оборудованием, АСУТП должна обеспечить нормальное или оптимальное протекание технологического процесса. Для этого необходимо наличие математических моделей технологического и информационно-измерительного оборудования, соответствующих алгоритмов адаптации к изменяющимся условиям работы.

3.5. Повышение достоверности измерительной информации о влажности сыпучих материалов

Достоверность информации, получаемой с помощью датчиков влажности в информационно-измерительных системах (ИИС) и АСУТП переработки сыпучих материалов, зависит от качества поверки и контроля соответствия градуировочных характеристик датчиков объекту измерений. Обратимся к опыту поверки датчиков влажности сыпучих материалов с использованием климатической камеры, стандартного термогравиметрического метода и натурных образцов объектов измерений.

Две пробы образцов испытываемых сыпучих материалов, помещали в климатическую камеру, одну - на весы, другую – в зону измерения датчика влажности. Температуру в климатической камере поддерживали постоянной, а относительную влажность воздуха меняли в пределах от 28 до 82 %. При этом фиксировали текущие значения массы пробы на весах и показания датчика. После этого пробу с весов высушивали в сушильном шкафу для определения ее условной «сухой» массы m_c. В качестве истинных значений

изменяющейся влажности проб в климатической камере использовали значения, рассчитанные по формуле

$$\omega = (m_i - m_c)100 / m_i, \qquad (3.59)$$

где m_i - текущие значения массы пробы на весах.

Погрешность результатов измерений с помощью датчика рассчитывали по модели

$$\Delta\omega = a + b\omega, \qquad (3.60)$$

для которой значения параметров a и b определяли по известной процедуре методом наименьших квадратов.

На основе статистических оценок параметров модели (3.60) возможны решения двух задач. Первая – коррекция показаний датчиков

$$\omega_u = (\omega_q - a) / (b - a), \qquad (3.61)$$

где ω_q - показания датчика; ω_u - исправленное (скорректированное) показание.

В табл.3.4 и табл.3.5 приведены данные для сравнения величин показаний датчика ω_q, исправленных показаний ω_u и истинных значений влажности ω, полученные при метрологической аттестации измерителей влажности сыпучих материалов с использованием климатической камеры [60, 61].

Таблица 3.4

Показания измерителя влажности сыпучих материалов при его метрологической аттестации

№ п/п	$W_д$	W	W_K	$W_д$- W_K	W_K- W
1	5.70	4.20	4.32	1.50	0.12
2	7.10	4.55	4.90	1.59	0.35
3	7.40	5.52	5.33	0.88	-0.19
4	7.65	5.31	5.69	1.34	0.38
5	7.90	7.28	7.05	0.62	-0.23
6	7.10	7.58	7.33	0.52	-0.25
7	7.40	7.98	7.76	0.42	-0.22
8	8.30	8.55	8.06	-0.25	-0.49
9	9.25	9.41	9.42	-0.16	0.01
10	9.60	9.92	9.92	-0.32	0.00
11	10.60	10.83	11.36	-0.23	0.53

Таблица3.5

Показания измерителя влажности сыпучих материалов при его метрологической аттестации

№ п/п	$W_д$	W	W_K	$W_д$- W_K	W_K- W
1.	5,00	5,02	5,17	-0,02	0,15
2.	5,50	5,55	5,49	-0,05	-0,05
3.	6,15	5,81	5,92	0,34	0,11
4.	6,12	6,01	6,00	0,11	-0,01
5.	6,90	6,33	6,41	0,57	0,08
6.	7,90	7,04	7,06	0,86	0,02
7.	8,60	7,61	7,52	0,99	-0,09
8.	8,57	7,92	7,50	0,65	-0,042
9.	12,00	9,45	9,75	2,55	0,30

Значения W_K в таблицах в большинстве случаев значительно более близки к W , чем $W_д$. Это свидетельствует о целесообразности коррекции. Наличие же четырех поправок, ухудшающих $W_д$, - следствие малого количества измерений и их случайных погрешностей. Из этого следует необходимость использования более эффективных критериев статистической значимости оценок параметров *а* и *в*.

При проверке метрологических характеристик в условиях эксплуатации отбирают 2 пары проб сыпучих материалов для точек диапазона измерений и помещают их в климатическую камеру. Взвешенные в камере пары проб помещают в пакеты из влагонепроницаемой антистатической пленки, после чего одну из каждой пары направляют в лабораторию для определения M_c, а другую - помещают в зону измерений датчика. Далее рассчитывают параметры *а* и *в*, вводят их в память ЭВМ и определяют значения W_K для управления технологическим процессом.

3.6. Экспериментальное исследование импульсного измерительного преобразователя

Выше получена математическая модель и сформулированы критерии оценки для электронных схем импульсных датчиков на негатронах. Математические модели получены для импульсных датчиков на различных полупроводниковых структурах, функционально являющихся негатронами типа S. Для экспериментальной проверки полученных результатов можно было

бы использовать цифровые ЭВМ, но при этом наглядность полученных результатов расчета мала, а составление необходимых машинных программ требует использования специальных методов численного интегрирования для схем негатронов, описываемых жесткими дифференциальными уравнениями [12].

В этом смысле использование аналоговых вычислительных машин (АВМ) значительно облегчает экспериментальные исследования, делает их достаточно наглядными. Во-первых, при цифровом моделировании достаточно трудно получить заданные вольт-амперные характеристики (ВАХ) нелинейных элементов электронной схемы. На АВМ получение даже гистерезисной ВАХ не представляет большого труда. Во-вторых, датчики, моделируемые на АВМ, практически совпадают по физической сущности с исследуемыми негатронами. В-третьих, нужно учесть значительное сокращение времени на программирование и отладку задачи.

На рис.7.9, а приведена схема набора, соответствующая простейшему импульсному датчику на негатроне. Негатрон моделируется релейной характеристикой. Для моделирования негатрона типа S используются два операционных усилителя А1 и А2 и шесть резисторов R_1 ... R_7. Резисторы R_4... R_6 определяют наклоны горизонтальных участков релейной характеристики, а резисторы R_1... R_3 определяют высоту и ширину гистерезисной характеристики негатрона. Если задать отношения резисторов R_5 и R_6 к R_4 достаточно малыми, то можно считать, что горизонтальные участки петли гистерезиса релейной характеристики (рис.3.9,б) будут практически параллельными оси абсцисс *x*. С увеличением этого отношения горизонтальные участки релейной ВАХ негатрона будут подниматься все круче и круче. Отношение ширины петли гистерезиса к ее высоте определяется выражением:

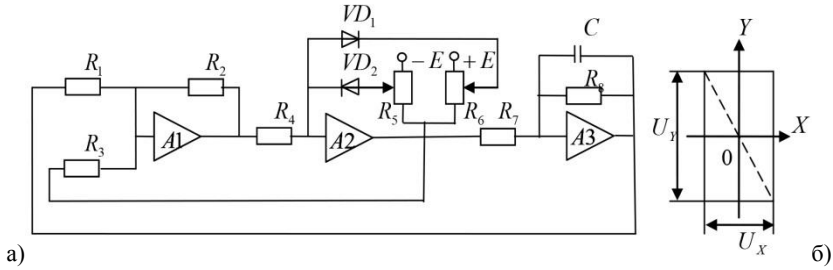
$$\frac{\lambda}{M} = \frac{U_X}{U_Y} = \frac{R_1}{R_3}. \qquad (3.62)$$

Резисторы R_1 и R_4 влияют только на масштаб релейной характеристики негатрона. Как показано выше, изменение масштаба релейной характеристики негатрона (изменение на один и тот же масштабный коэффициент относительно осей абсцисс и ординат) не влияет на частоту и форму сигнала.

Задающая время резистивно-емкостная цепь импульсного датчика (апериодическое звено), представляющая собой суперпозицию интегрирующего звена первого порядка и

масштабного звена, собрана на операционном усилителе А3 (рис. 3.9, а). Коэффициент передачи складывается из коэффициента передачи масштабного звена

$$W_M = -\frac{R_8}{R_7} \tag{3.63}$$



а) б)

Рис.3.9.:а) Схема набора задачи исследования характеристик вырожденных автоколебательных систем; б) Модель характеристики негатрона.

и коэффициента передачи интегрирующего звена

$$W_И = -(R_7 C) \tag{3.64}$$

где R_7 и R_8 - номиналы одноименных резисторов, показанных на рис. 3.7, а.

Установку параметров релейной характеристики негатрона удобно производить, используя генератор синусоидальных сигналов.

Выше было показано, что выбирая нагрузочный резистор, определяем границу самовозбуждения импульсного датчика на негатроне. На границе самовозбуждения отношение АУМ равно 0,5. Если увеличить это отношение при сохранении остальных параметров электронной схемы импульсного датчика, то происходит срыв автоколебаний (корни уравнения станут комплексными). Если же уменьшать отношение ширины петли гистерезиса к ее высоте относительно критического значения, то частота автоколебаний будет увеличиваться. При нулевой ширине петли гистерезиса частота автоколебаний теоретически должна бы стать равной бесконечности. Однако недостижимость идеальной прямоугольной характеристики (из-за шумов, нелинейностей и т. д.), естественные частотные ограничения (ширина полосы пропускания), существующие для электронных приборов, не позволяют достичь частоту выше определенного значения. Поэтому для дальнейших

исследований введем коэффициент *y*, который примем равным единице на границе самовозбуждения импульсного датчика. Если уменьшить отношение АУМ, то новое значение *y* будет пропорционально этому отношению.

Для проверки была собрана электронная схема (рис.7.9,а) со следующими номиналами резисторов: R_1 = 100 kΩ (кОм); R_2 и R_4 - 1 MΩ (МОм); R_7 = 344 kΩ (кОм). Резисторы R_3, R_5 и R_6 выбирались для получения заданной релейной характеристики негатрона. Резистор R_8 и конденсатор С использовались как апериодическое звено.

Для обобщения результатов экспериментальных исследований введем безразмерную частоту ω, которую определим следующим образом:

$$\omega = \alpha T, \qquad (3.65)$$

где Т - период генерируемого сигнала; α - частота сопряжения, определяемая как $\alpha = (CR_8)^{-1}$.

Результаты экспериментальных исследований на макете (рис.3.9,а) сведены в табл.3.6 и 3.7.

Для малых значений отношения ширины петли гистерезиса к её высоте параметр ω будет пропорционально изменяться, что подтверждают данные табл. 3.7.

Таблица 3.6

Результаты экспериментальных исследований

Задаваемые параметры	λ/M=0,175 при α			λ/M=0,35 при α		
A	100	200	400	100	200	400
Частота, Hz (Гц)	95	194	380	47	96	201
Ω	1,0526	1,031	1,0526	2,1276	2,083	1,99

Если данные табл.3.6 подтверждают постоянство параметра ω при постоянстве отношения λ/M, то в табл. 7.7 показано, как изменяется параметр ω при изменении величины γ. Сравнение расчетных величин с экспериментально измеренными показывает, что для значений параметра $\gamma > 0{,}1$ погрешность определения безразмерного параметра ω для импульсного датчика на негатроне типа S не превышает 5% от номинала.

Таблица 3.7

Результаты экспериментальных исследований

Условия эксперимента	Значения параметра ω при γ						
γ	0,052	0,087	0,125	0,167	0,211	0,345	0,583
R_8= 0,1 М	0,29	0,395	0,48	0,59	0,70	0,97	1,52
R_8 = 1М	0,285	0,381	0,48	0,588	0,71	0,96	1,58
Формула (4.44)	0,3911	0,405	0,496	0,598	0,694	0,99	1,594

Релаксационный генератор на негатронах (РГН) является основным элементом измерительной информационной подсистемы АСУТП, осуществляющим преобразование «технологический параметр – частота». Точность и стабильность такого преобразования непосредственно влияет на характеристики упомянутой подсистемы.

Работа РГН основана на следующих моментах:

1. Переходные процессы в РГН являются оптимальными по быстродействию траекториями в системе с переменной структурой ;
2. Частота и форма генерируемого сигнала зависят не только от параметров времязадающей цепи, но и от формы ВАХ негатрона типа S, являющегося существенно нелинейным элементом [12];
3. Влияние негатрона типа S на частоту и форму генерируемого сигнала определяется наклоном участка отрицательного дифференциального сопротивления его ВАХ или отношением высоты к ширине эквивалентного релейного элемента, причем, абсолютные значения высоты и ширины релейной характеристики в соответствующих единицах измерения влияют только на амплитуду генерируемого сигнала, но не на его частоту или форму;
4. Реактивные и активные схемные элементы оказывают влияние как на ВАХ негатрона типа S, так и на частотные характеристики импульсного преобразователя;
5. При соответствующем выборе режима работы негатрона типа S можно получить импульсный датчик без использования

внешних реактивных элементов (безреактивный импульсный датчик).

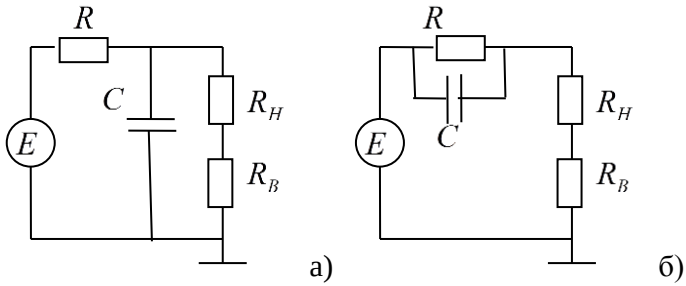
Для сравнения с известными методами расчета воспользуемся методом гармонической линеаризации, предложенным Н.М.Крыловым и Н.Н.Боголюбовым [62-63]. Основываясь на известной теории, линеаризуем негатрон импульсного датчика с помощью описывающей функции [63]

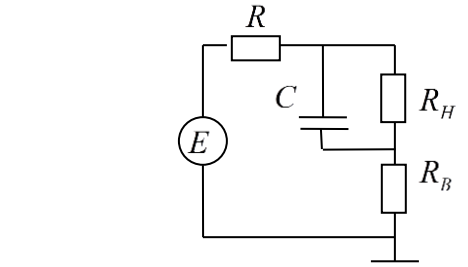
$$R_H = n_1 - jn_2, \qquad (7.66)$$

где R_H - описывающая функция негатрона; n_1 и n_2 - действительная и мнимая части описывающей функции негатрона, соответственно.

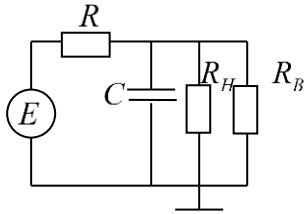
На рис.7.10 приведены основные конфигурации импульсных датчиков на негатронах типа S. Приняты следующие обозначения: E - источник постоянного напряжения питания; R - резистор и C - конденсатор, служащие в качестве времязадающей цепи; Rв - дополнительный активный линейный резистор; Rн - негатрон типа S. На основе гармонической линеаризации негатрона с использованием теории расчета электрических цепей получены формулы для определения частоты повторения импульсного датчика (табл.7.8) и ограничений, накладываемых на действительную и мнимую части описывающей функции негатрона (табл. 7.9).

Особенностью полученных формул (табл.7.8) является наличие знака "минус" под радикалом. Так как нас интересуют только вещественные значения частоты повторения импульсного датчика, то в табл.7.9 указаны диапазоны допустимых изменений вещественной и мнимой частей описывающей функции негатрона RH, обеспечивающие самовозбуждение РГН.

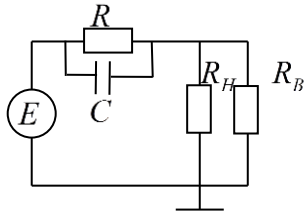




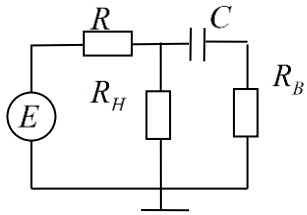
в)



г)



д)



е)

Рис.3.10. Основные конфигурации схемных решений импульсных датчиков на негатронах типа S.

Полученные формулы отличаются наглядностью; погрешность расчета с помощью формул табл.3.7 доходит до 25%.

Таблица 3.8

Формулы для вычисления частоты повторения импульсного датчика

Номер рисунка	Формула для вычисления частоты повторения импульсного датчика
7.10, а	$\omega = \frac{1}{RC}\sqrt{\frac{-(R+R_B+n_1)}{R_B+n_1}}$
7.10, б	$\omega = \frac{1}{RC}\sqrt{\frac{-(R+R_B+n_1)}{R_B+n_1}}$
7.10, в	$\omega = \frac{1}{(R+R_B)C}\sqrt{\frac{-(R+R_B+n_1)}{n_1}}$
7.10, г	$\omega = \frac{1}{RR_BC}\sqrt{-\frac{n_1(R+R_B)^2+RR_B(R+R_B)}{n_1}}$
7.10, д	$\omega = \frac{1}{RR_BC}\sqrt{-\frac{n_1(R+R_B)^2+RR_B(R+R_B)}{n_1}}$
7.10, е	$\omega = \frac{1}{C}\sqrt{-\frac{n_1+R}{n_1(R+R_B)^2+RR_B(R+R_B)}}$

Существующие ограничения на вид ВАХ негатрона свидетельствуют о том, что необходимо располагать элементом, способным изменять свою проводимость в достаточно широких пределах, обеспечивая автоматическое попадание в интервал ограничений. В качестве такого элемента можно использовать, например, полупроводниковый диод, имеющий экспоненциальную ВАХ. При малых токах он имеет малую проводимость, обусловленную токами утечки. С увеличением прямого тока через полупроводниковый диод его проводимость растет по экспоненциальному закону, охватывая практически весь диапазон значений проводимостей используемых резисторов. В связи с использованием полупроводникового диода условия самовозбуждения импульсных датчиков достаточно легко

выполнимы, а релаксационные колебания более устойчивы. В результате удается значительно расширить количество схемных решений, обеспечивающих получение импульсных датчиков технологических параметров.

Обозначив негатрон типа S в виде кружка с буквой «Н» внутри, а полупроводниковый диод символом «VD» и сохраняя ранее принятую символику обозначений схемных элементов на рис.7.9, приведем возможные конфигурации схемных решений импульсных датчиков на трех- (рис.3.11, а ... г) и четырехэлектродных (рис.3.11, д ... н) негатронах типа S. В результате исследований были получены схемные решения импульсных датчиков технологических параметров, среди которых отметим наиболее важные.

Таблица 3.9

Описывающие функции для негатронов

Номер рисунка	Мнимая часть описывающей функции	Ограничения на действующую часть описывающей функции
7.10, а	$n_2 = \frac{R + R_B + n_1}{\omega RC}$	$-(R + R_B) \le n_1 \le -R_B$
7.10, б	$n_2 = \frac{R + R_B + n_1}{\omega RC}$	$-(R + R_B) \le n_1 \le -R_B$
7.10, в	$n_2 = \frac{R + R_B + n_1}{\omega (R + R_B) C}$	$-(R + R_B) \le n_1 \le 0$
7.10, г	$n_2 = \frac{(R + R_B) n_1 + R R_B}{\omega R R_B C}$	$-\frac{R R_B}{R + R_B} \le n_1 \le 0$
7.10, д	$n_2 = \frac{(R + R_B) n_1 + R R_B}{\omega R R_B C}$	$-\frac{R R_B}{R + R_B} \le n_1 \le 0$
7.10, е	$n_2 = \frac{R + n_1}{\omega (R + R_B) C}$	$-R \le n_1 \le \frac{R R_B}{R + R_B}$

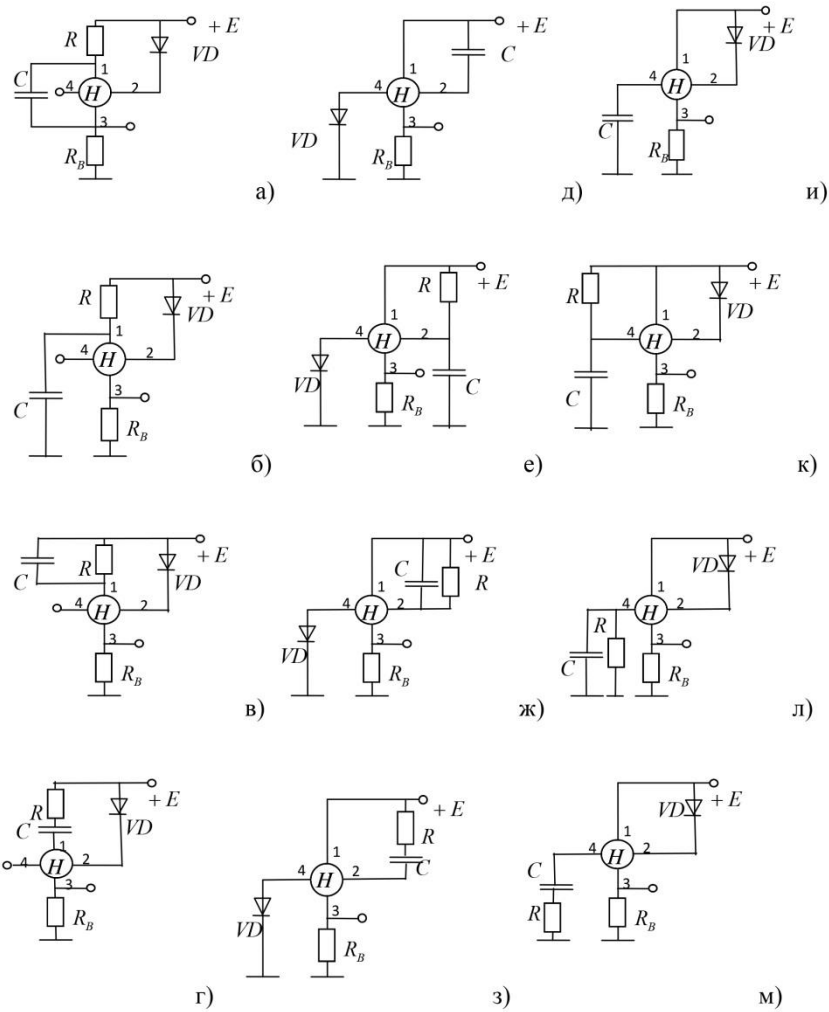


Рис.3.11. Схемные построения импульсных датчиков на трёх- и четырёхэлектродных негатронах типа S.

Выделим схему импульсного датчика на двух биполярных транзисторах разного типа проводимости. Эта схема используется для контроля влагосодержания сыпучих материалов кондуктометрическим методом [64], уровня насыпи сыпучих материалов в силосах и бункерах и для ряда других применений.

Упомянутое устройство (рис.7.10) содержит два биполярных транзистора разного типа проводимости VT_1 и VT_2, биполярный диод VD, времязадающую резистивно-емкостную цепь на дискретных элементах R_1 и C и нагрузочный резистор R_2. Схемы обеспечивает самовозбуждение при изменении резистора R_1 в диапазоне 10^2... 10^5 Ω (Ом). Минимальное напряжение питания в диапазоне температур функционирования - 60 . . . +100 °C составляет не более 1,42 V (В). Частота генерируемого сигнала изменяется от сотых долей Hz (Гц) до 30 MHz (МГц), т. е. диапазон самовозбуждения простирается от инфранизкочастотного до сверхвысокочастотного [65]. Скважность генерируемых импульсов изменяется от единицы до нескольких сотен.

Мощность генерируемых импульсов определяется предельными параметрами используемых для построения схемы биполярных транзисторов. При большой скважности импульсов даже маломощные транзисторы обеспечивают амплитуду импульсов несколько ампер. Следует отметить, что с повышением напряжения питания увеличивается относительная доля электрической энергии, выделяющейся в нагрузке, по сравнению с потребляемой от источника питания.

На рис.3.13 приведена зависимость частоты повторения импульсного датчика от номинала резистора ri и температуры. Вид зависимости получается нелинейным, близким к гиперболическому, что, на первый взгляд, усложняет преобразование сигналов импульсного датчика в машинные коды. Однако, используя диффузионные резисторы или однопереходные транзисторы в качестве первичных датчиков температуры, можно добиться на достаточно протяженных участках характеристики преобразования практически линейную зависимость частоты повторения от температуры. На рис. 7.12, а приведена схема импульсного датчика на двух униполярных транзисторах, которая позволяет производить многоточечное измерение температуры. В этом случае импульсный датчик содержит два МОП-транзистора обогащенного типа [66] VT_1 и VT_2, пять резисторов R_1 . . . R_5, одного конденсатора C, несколько первичных преобразователей R_z и дешифратор. Полевой транзистор VT_2 выполнен двухзатворным и при правильном

выборе номинала резистора R_3 обеспечивается термостабилизация рабочей точки.

При изменении номинала резистора R_z изменяется частота повторения импульсного датчика (рис.7.12, а). Причем при изменении сопротивления первичного преобразователя R_z в диапазоне 10 ... 15000 Ω (Ом) достигается близкая к линейной зависимость частоты повторения импульсного датчика от номинала сопротивления R_z.

Нелинейность при этом не превышает 1,5 %. С увеличением номинала резистора R_z повышается линейность характеристики преобразования.

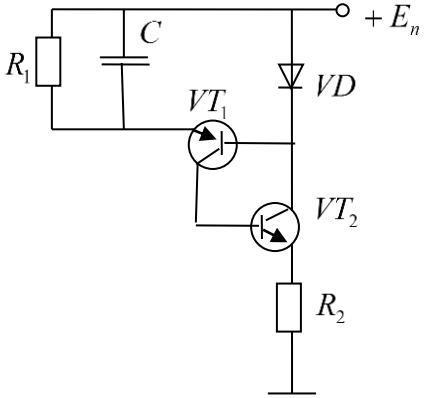


Рис. 3.12. Импульсный датчик на биполярных транзисторах.

Схемы импульсных датчиков на комплиментарных униполярных транзисторах отличаются сравнительно небольшим диапазоном перестройки параметров (резисторов, напряжения питания и т.д.). Участок отрицательного дифференциального сопротивления ВАХ негатрона типа S на комплиментарных униполярных (полевых) транзисторах сравнительно небольшой и почти параллелен оси абсцисс.

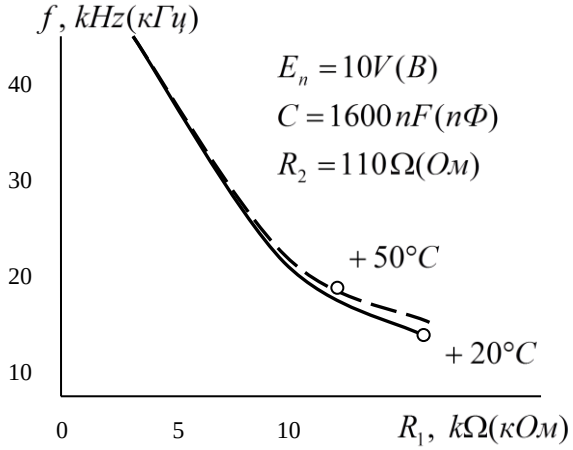
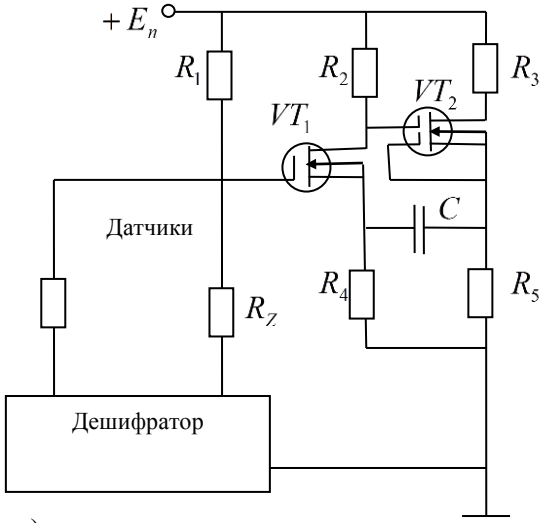


Рис. 3.13. Зависимость частоты повторения импульсного датчика от номинала резистора R_1.

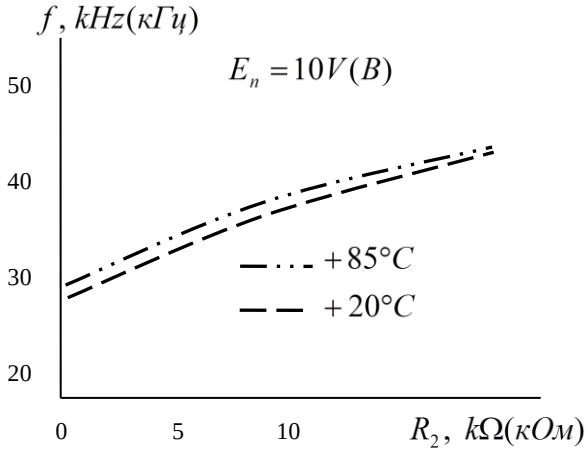
Для обеспечения достаточно широкого диапазона перестройки по частоте импульсного датчика на комплиментарных униполярных транзисторах за счет изменения резистивных элементов необходимо иметь источник питающего напряжения не менее 20 ... 30 V (В). Однако большинство выпускаемых полевых транзисторов выходят из строя при таких напряжениях питания. Поэтому основной путь перестройки по частоте таких импульсных датчиков - изменение номинала конденсатора С (рис.7.14, а). Одна из снятых на макете характеристик приведена на рис.7.14, б. На комплиментарных униполярных транзисторах импульсные датчики используются для контроля относительной влажности воздуха (агента сушки) или сыпучих материалов.

Помимо контроля технологических параметров, управление процессом сушки сыпучих материалов требует вести постоянное наблюдение за функционированием различных транспортных средств: норий, ленточных транспортёров и конвейеров. В качестве первичных датчиков в устройствах контроля за работой транспортных средств чаще всего используются индуктивные датчики: электромашинные генераторы, трансформаторы (линей-

ные, вращающиеся, статические и др.), катушки индуктивности, сельсины и др.



а) принципиальная электрическая схема.

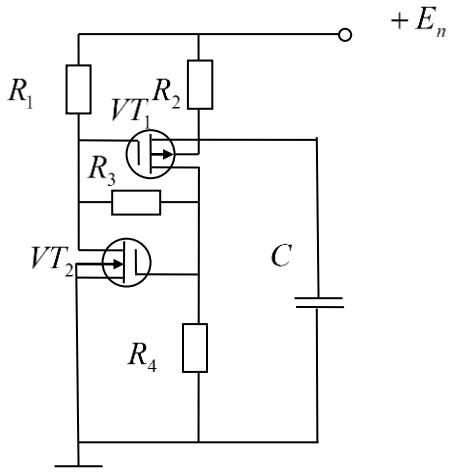


б) характеристика преобразования.

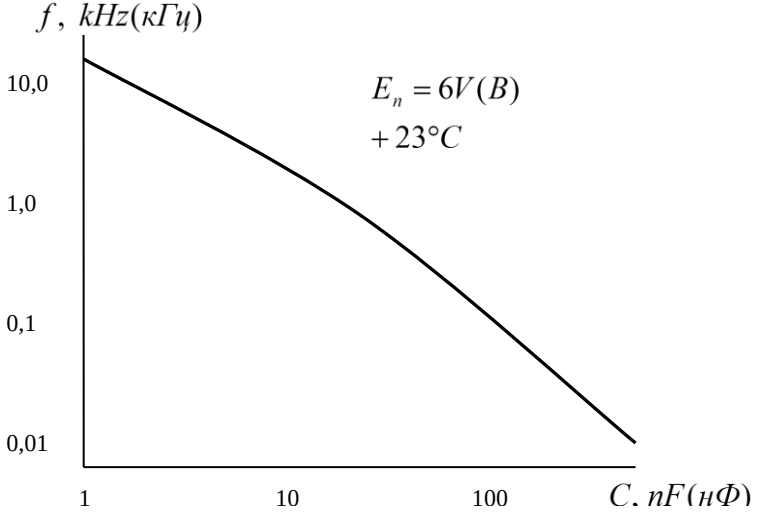
Рис. 3.14. Преобразователь «сопротивление-частота» на двух униполярных транзисторах.

В транспортных устройствах возникают обрывы ленты транспортера, завалы продуктом, выход из строя технологического оборудования и др. Такие явления могут привести к серьезным авариям на сушилке, поэтому для контроля используются достаточно сложные устройства, которые часто не удовлетворяют требованиям по надежности и экономичности. Поэтому предложено устройство контроля превышения допустимых параметров транспортного средства, содержащее негатрон типа S на двух биполярных транзисторах разного типа проводимости, полупроводниковый диод, регулировочный резистор, обмотку первичного индуктивного датчика. В схеме, в отличие от схемы рис.7.8, отсутствовал конденсатор С. Его заменил индуктивный первичный преобразователь. Такая замена существенно повлияла на характеристики импульсного датчика. С одной стороны, это привело к повышению стабильности частоты генерируемого сигнала в условиях изменения температуры окружающей среды и питающего напряжения. С другой стороны, при этом сильно повысилась чувствительность импульсного датчика к изменению параметров индуктивного первичного преобразователя. При монотонном изменении индуктивного сопротивления первичного датчика происходят периодические скачки частоты и амплитуды генерируемого сигнала. Поэтому в некоторой малой окрестности установленного значения частоты можно получить резкие изменения параметров генерируемого сигнала (точка бифуркации). Такое положение облегчает использование импульсных датчиков, поскольку транспортные средства, как правило, настраиваются на заранее заданные параметры.

Схемы импульсных датчиков на одноперехoдном транзисторе (рис. 3.14, а) часто используются для многоточечных измерений. На рис. 3.14, б приведены характеристики преобразования для указанного датчика. Вид характеристик преобразования напоминает аналогичные характеристики для схемы рис.3.10, но сопротивление аналогичного первичного преобразователя R_1, как правило, используется большим.

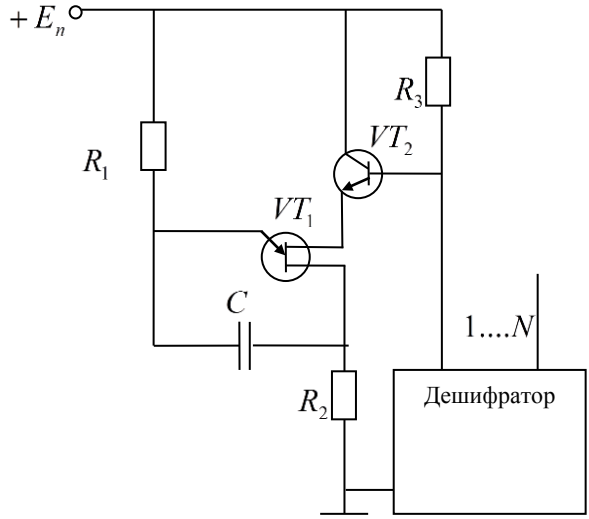


а) принципиальная электрическая схема.

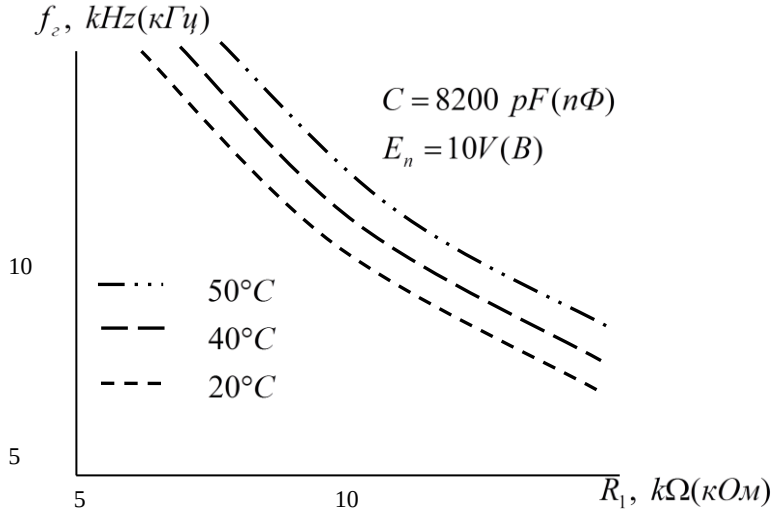


б) характеристика преобразования.

Рис. 3.15. Преобразователь «емкость-частота» на комплиментарных униполярных транзисторах.



а) принципиальная электрическая схема.



б) характеристика преобразования.

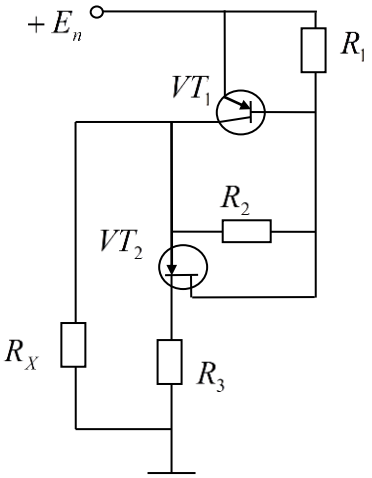
Рис. 3.17. Преобразователь «сопротивление-частота» на однопереходном транзисторе.

На рис.3.17 приведена схема безреактивного импульсного датчика, построенная на двух транзисторах, один из которых - биполярный, а другой - униполярный. Данное сочетание позволяет создавать миниатюрные импульсные датчики, имеющие микронные размеры. Такие датчики могут использоваться для контроля параметров среды в очень малых объемах.

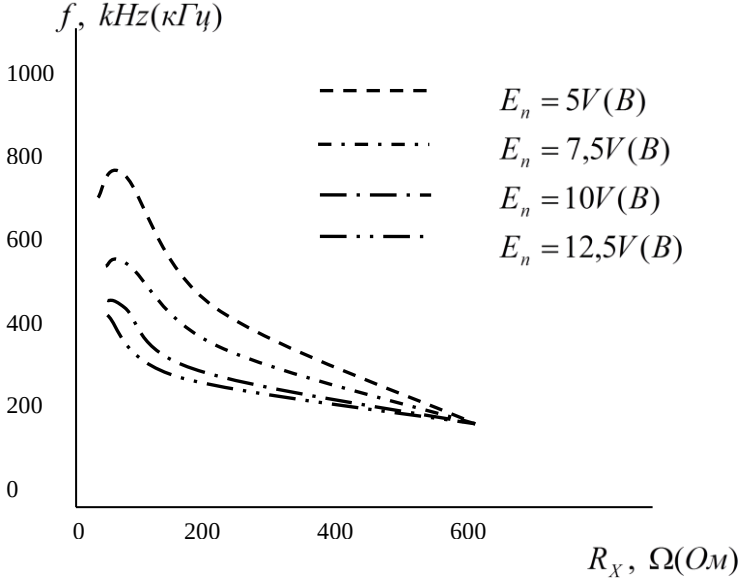
В схеме (рис.3.17, а) использованы следующие элементы: VT_1 -биполярный транзистор КТ 361 Д; VT_2 - униполярный транзистор КП 303 В; резисторы R_1= 1 kΩ (кОм). R_2 = 10 kΩ (кОм), R_3 = 20 kΩ (кОм). В качестве первичного преобразователя использовался резистор R_X. Полученные кривые (рис.3.17, б) показывают, что у безреактивного импульсного датчика существуют достаточно протяженные участки линейной зависимости частоты повторения от номинала резистора R_X.

Используя достижения современной полупроводниковой технологии, можно создать на этой основе импульсные датчики, обеспечивающие исследование физических параметров даже биологических объектов – таких, как материалов, внутренние органы человека и др.

Отметим пути стабилизации параметров импульсных датчиков. На рис. 3.16, а приведена зависимость частоты повторения импульсного датчика (рис.3.9) от напряжения питания и температуры. Как видно из рис. 3.16, а, увеличение напряжения питания снижает чувствительность частоты генерируемого сигнала от изменения температуры окружающей среды. Если напряжение источника питания $E_п$ превышает 9 V (В), то температура окружающей среды практически не сказывается на частоте повторения импульсных датчиков на биполярных полупроводниковых структурах (рис. 3.10). Аналогичный эффект имеет место и для импульсных датчиков на униполярных транзисторах. Как видно из рис.3.16, б, частота повторения этих импульсных датчиков стабилизируется при напряжении питания свыше 12 V (В).

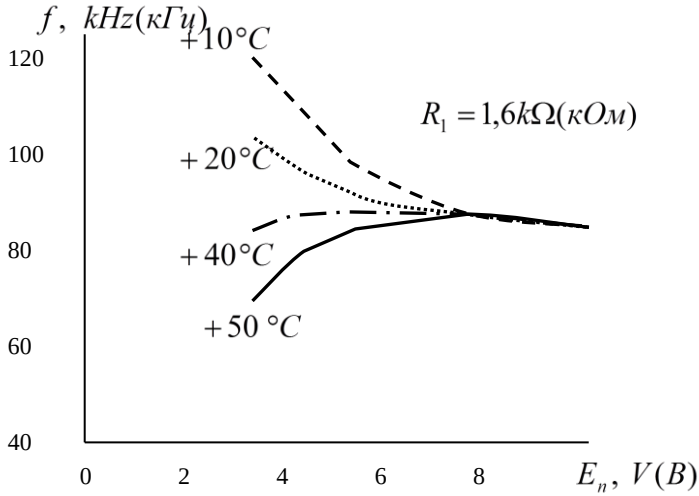


а) принципиальная электрическая схема.

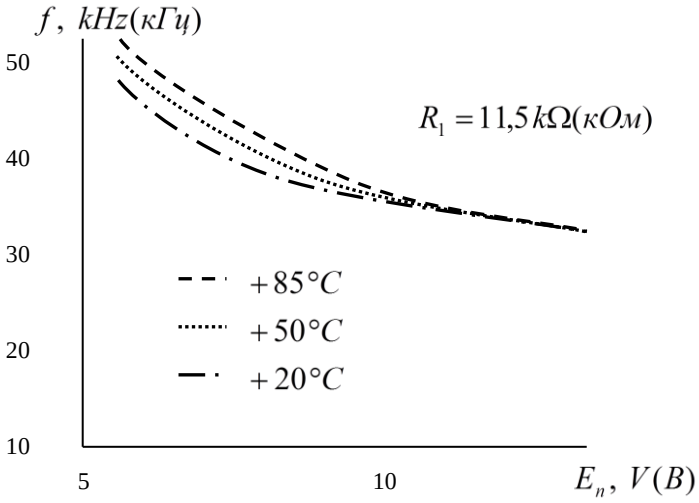


б) характеристика преобразования.

Рис. 3.17. Безреактивный частотный преобразователь на биполярном и униполярном транзисторах.



а) для схемы рис. 7.6



б)для схемы рис. 3.8

Рис. 3.18. Зависимость частоты повторения преобразователей от температуры и напряжения источника.

3.7. Испытания влагометрической системы на шахтной сушилке

Испытания влагометрической системы проводились на шахтной сушилке. Датчик влажности влагометрической системы сыпучих материалов устанавливался в зоне охлаждения сушилки. Пробы сыпучих материалов для измерения влажности в лабораторных условиях образцовым методом (Лаб) брались на выходе шахт сушилки. За образцовый метод принят метод определения влажности в соответствии с ГОСТ 13587.5-93. Результаты измерения влажности сведены в табл. 3.10 и представлены на рис.3.19, где t – время, $W_{ВПЗ}$ – показания влажности сыпучих материалов, полученные влагометрической подсистемой, $W_{Лаб}$ – показания влажности сыпучих материалов, полученные в лабораторных условиях:

$$\Delta W = W_{ВПЗ} - W_{Лаб} \qquad (3.67)$$

Таблица 3.10

Результаты измерения влажности во времени

№ п/п	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**
T, min (мин)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
$W_{ВПЗ}$, %	14.7	14.8	14.9	14.4	14.0	15.0	17,0	17.7	17.8	17.5	14.6	14.0	13.7	13.7	14.4	15.3	15.6	15.5	15.3	15.0	14.7
$W_{Лаб}$, %	15,0	14.9	14,7	14.2	13,7	14.6	17.4	17,0	17.0	17.8	15.3	14.0	13.8	13.8	15.0	15.7	15.8	15.9	15.6	15,3	15,0
ΔW, %	-0.3	-0.1	0.2	0.2	0,3	0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.3	-0.7	0.0	0.0	-0.1	-0.6	-0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3
№ п/п	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**	**41**	**42**
T, min (мин)	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400	410
$W_{ВПЗ}$, %	14.8	14.8	15.5	14.7	14.8	14,9	14,4	14,0	14,9	15,5	15,4	15,1	14,8	14.0	13,7	14,1	15.3	15.6	15.5	15.7	15.0
$W_{Лаб}$, %	14.9	14,9	14.8	15.1	14,7	15.2	14,6	14.4	15.2	15,4	15,6	15,3	14,5	14,2	13,9	14.7	15.7	15.2	15,2	15,3	15,2
ΔW, %	-0.1	-0.1	-0.3	-0.4	0.1	-0.3	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.4	0.4	0.3	0.4	-0.2

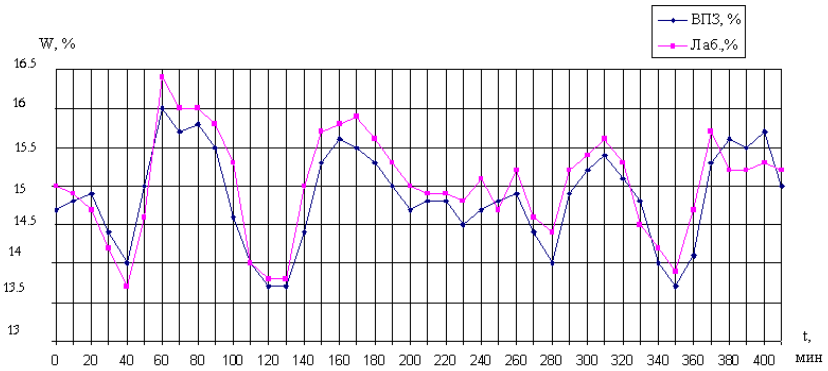


Рис. 3.19. Результаты измерения влажности во времени.

Для выборки ΔW гипотеза о том, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, проверяется при помощи двух составных критериев.

Критерий 1. Вычисляют отношение

$$\widetilde{d} = \sum_{i=1}^{n} \left| x_i - \widetilde{A} \right| / (nS^*), \tag{3.68}$$

где S^* - смещенная оценка среднего квадратического отклонения -

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \widetilde{A})^2}\ , \tag{3.69}$$

$\widetilde{A}$ - среднее арифметическое результатов наблюдений -

$$\widetilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \tag{3.70}$$

n - количество наблюдений.

Результаты наблюдений можно считать распределенными нормально, если

$$d_{1-q_1/2} < \widetilde{d} < d_{q_1/2}\,, \tag{3.71}$$

где $d_{1-q_1/2}, d_{q_1/2}$ - квантили распределения; q_1 – заранее выбранный уровень значимости критерия.

Вычисляем d по формуле (7.68): d = 0,7798. Выбрав уровень значимости q_1 = 0,05 при n = 46, находим $d_{0.05}$ = 0.8508; $d_{0.95}$ =0.7497. Поскольку 0.7496<0.7798<0.8508, то критерий 1 выполняется.

Критерий 2. Можно считать, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более двух разностей $\left|x_i - \widetilde{A}\right|$ превысили значение $z_{P/2}S$, где $z_{P/2}$ - верхняя квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающая вероятности P/2; S – оценка среднего квадратического отклонения результата наблюдения

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \widetilde{A})^2}{(n-1)}}. \qquad (3.72)$$

Принимается уровень значимости q_2=0.02. Для n=42 и q_2=0.02 находим P=0,99 и $z_{P/2}$=2,7. Отсюда, $z_{P/2}S$=2,6*0,2777=0,722. Разность $\left|x_i - \widetilde{A}\right|$ не превышает ну одно значение из данных табл. 7.10. Следовательно, критерий 2 выполняется.

Таким образом, гипотеза о нормальности распределения полученных данных согласуется с данными наблюдений.

Для определения вероятности отклонения показаний влагометрической подсистемы, не превышающих ± 0.5 (%) от среднего арифметического ($\widetilde{A}$), определим вероятность заданного отклонения нормально распределенной случайной величины по абсолютной величине в соответствии с формулой

$$P(|X| < 0.5) = 2\Phi(0.5/\sigma), \qquad (3.73)$$

где P(X)– вероятность, Φ(X) – функция Лапласа, σ - среднеквадратическое отклонение нормального распределения

$$\sigma = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i^{\,2} - (\sum_{i=1}^{n} x_i)^2}{n(n-1)}}. \qquad (3.74)$$

Вероятность отклонения, P(| X | < 0.5) = 0,94.

Все параметры технологического процесса сушки сыпучих материалов (такие, как температура агента сушки, температура

нагрева сыпучих материалов, влажность сыпучих материалов, период срабатывания затворов с периодичностью 1 секунда) передаются по линии связи на персональный компьютер в лаборатории и сохраняются в протоколе технологического процесса. Это позволяет работникам лаборатории делать выводы о соблюдении технологии сушки сыпучих материалов оператором сушилки. Применение влагометрической подсистемы при сушке различных культур на шахтной сушилке позволило оператору оперативно управлять температурой агента сушки, что видно из рис.7.20.

Экономический эффект ($Э_{сум}$) от использования влагометрической системы для сушилок и влагомера определяется двумя составляющими:

$$Э_{сум} = Э_{п} + Э_{о}, \qquad (3.75)$$

где $Э_{п}$ – прямой экономический эффект, полученный в результате экономии расхода топлива, $Э_{о}$ – опосредованный экономический эффект, обусловленный получением продукта сушки заданного качества.

Отметим, что составляющая $Э_{о}$, в ряде случаев, значительно превышает $Э_{п}$. В 2007 году, в сравнении с 2006 годом, когда сушилка не была оборудована приборами, экономия топлива составила не менее 30 %.

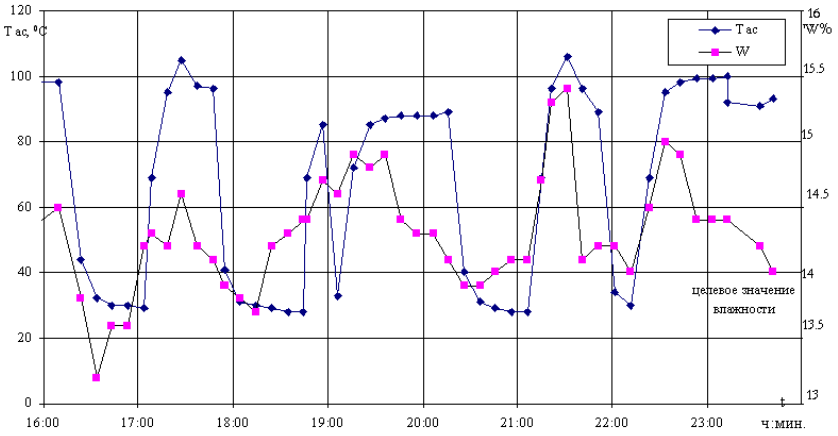


Рис.3.20. График процесса сушки подсолнечника на сушилке.

Из рисунка 3.20 видно, что зависимость

$$W = f(t), \qquad (3.76)$$

где t – время, W – влажность сыпучих материалов

сдвинута во времени по отношению к зависимости

$$Tac = f(t), \qquad (3.77)$$

где Тас – температура агента сушки. Снижение температуры агента сушки по средствам прикрытия форсунки горелки (линейные участки графика T= - к(t) + Тас в интервале значений Тас = 100$\pm$ 5 ^{0}C до 40 $\pm$ 10 ^{0}C) при Тас<=90 ^{0}C приводит к дискретному режиму работы топки.

Дискретный режим не является предпочтительным, а является следствием конкретных условий проведения процесса. При непрерывном режиме колебательный характер зависимости сохранится, однако при этом можно достигнуть минимальной амплитуды разброса Тас при максимально возможном периоде, что обуславливает дополнительный прямой экономический эффект.

Автоматизированная система контроля и управления процессом сушки сыпучих материалов, обеспечивает, с одной стороны, прямую экономию топлива, с другой стороны, своевременность принятия мер по поддержанию режима сушки в заданном температурном интервале; при этом влажность сыпучих материалов поддерживается близко к целевому значению (7%). Именно этот фактор обеспечивает $Э_o$ процесса сушки с заданными характеристиками качества сыпучих материалов на выходе - основную составляющую экономического эффекта. Расчеты показывают, что окупаемость влагометрической подсистемы достигается при сушке не более 5 тыс. тонн сыпучих материалов. При трехсменной загрузке сушилки это составляет не более 7 суток.

Испытания опытного образца влагометрической системы показали, что вероятность абсолютной погрешности (не превышающей $\pm$ 0.5 (%)) составляет 0.94. Точность показаний влагометрической системы позволяет создать систему контроля и управления технологическим процессом сушки сыпучих материалов, работающую в ручном, автоматизированном и автоматическом режимах.

В 2007 году (по сравнению с 2006, когда сушилка не была оборудована и влагометрической системой) экономия топлива составила не менее 30 %.

3.8. Влагомер сыпучих материалов в потоке

В настоящее время сушилки не имеют современных систем контроля и управления процессом сушки сыпучих материалов. Наиболее узкое место таких систем - отсутствие отвечающих необходимым требованиям по цене, точности, надежности устройств, которые обеспечивают в режиме реального времени контроль влажности сыпучих материалов в процессе сушки. Применение для этих целей влагомеров сыпучих материалов в потоке ПВЗ-3 и РВЗ-3 не используется на практике в виду низких характеристик надежности. Импортные влагомеры сыпучих материалов в потоке для большинства предприятий агропромышленного комплекса (АПК) не доступны по цене. Между тем, процесс сушки-сыпучих материалов - один из наиболее энергоемких и ответственных из всего цикла хранения и переработки сыпучих материалов. Это связано как с прямыми убытками, обусловленными потерей качества сыпучих материалов и с невозможностью хранения при несоответствующей влажности, так и большими энергетическими затратами на процесс сушки. Размеры убытков по этой причине на уровне отдельных комбинатов хлебопродуктов достигает существенных размеров.

Влажность в процессе сушки сыпучих материалов определяют лабораторным путем.

$$T = Tn + Ta + Tc;$$

При этом время получения показаний состоит из следующих составляющих: где: Тп – время, которое необходимо затратить работнику лаборатории для того, что бы взять пробу на сушилке и принести образец в лабораторию; Та – время проведения анализа; Тс – время для сообщения оператору сушилки о результатах анализа.

При использовании СЭШ-3М время получения результатов составляет не менее 60 минут, что является неприемлемым. Это

приводит к необоснованному расходу теплоносителя, а в ряде случаев и к потере качества сыпучих материалов.

Для определения влажности зерна при сушке, на некоторых предприятиях применяют экспресс - анализаторы влажности сыпучих материалов. Эти приборы, как правило, зарубежного производства. Использование его имеет следующие недостатки: наличие человеческого фактора, которое может проявиться в несвоевременности измерения влажности сыпучих материалов; взятая проба, может характеризовать не все сыпучих материалов, а лишь ту часть, которая помещается в экспресс- анализатор влажности сыпучих материалов.

Таким образом, отечественный АПК не располагает влагомером сыпучих материалов в потоке, доступным по цене и отвечающим необходимым требованиям и показателям.

Анализ показывает, что влагомер сыпучих материалов в потоке должен удовлетворять следующим условиям: измерять влажность сыпучих материалов в потоке в целом, а не отдельных его частей; обеспечивать возможность индикации данных о влажности в режиме реального времени; обеспечивать возможность использования обратной связи для рециркуляционной сушки сыпучих материалов в автоматическом режиме; характеризоваться простотой монтажа на сушилках; быть доступным по цене; обеспечивать абсолютную погрешность не хуже $\pm$1%;

Аналитический обзор известных методов измерения влажности в потоке показал [1, 2, 3, 4, 5, 6], что наиболее полно по интегрированному показателю «цена/качество» отвечает диэлькометрический метод. Исследование метода с позиции рабочих частот измерений, при условии минимальных затрат на реализацию показало, что наиболее приемлемым является высокочастотный спектр электромагнитных колебаний.

В высокочастотных влагометрических системах измеряемая емкость датчика, пропорциональна диэлектрической проницаемости (Е) контролируемого материала, которая является сложной функцией многих параметров

$$E=F(W; T; Г; X; П; \ldots), \qquad (3.79)$$

где W, Т, Г и Х – соответственно влажность, температура, гранулометрический и химический состав контролируемого материала; П – электрохимический критерий границы «электрод – материал».

Исследования показывают, что:

$$\left|\frac{\partial E}{\partial W}\right| > \left|\frac{\partial E}{\partial (T)}\right| >> \left|\frac{\partial E}{\partial (\Gamma, X, \Pi)}\right| \qquad (3.80)$$

Это означает, что на диэлектрическую проницаемость наибольшее влияние оказывают влажность и температура сыпучих материалов. Учет влияния факторов Г, Х, П и др. не целесообразен, так как ведет к существенному удорожанию прибора при незначительном повышении точности. Следовательно, с целью минимизации стоимости влагомера в первом приближении достаточно ограничиться

$$E=F(W;T) \qquad (3.81)$$

Из доступных информационных источников характеристики зависимости диэлектрической проницаемости от температуры не выявлены. Использование по аналогии с полученных для апатитового и нефелинового концентратов линейных характеристик зависимости диэлектрической проницаемости (Е) от температуры (Т), не обеспечило требуемой точности показаний прибора.

Поэтому были проведены лабораторные исследования зависимости диэлектрической проницаемости от температуры на сыпучих материалов. В результате было выявлено, что зависимость диэлектрической проницаемости от температуры носит нелинейный характер и различна при различных значениях влажности (рис.3.21).

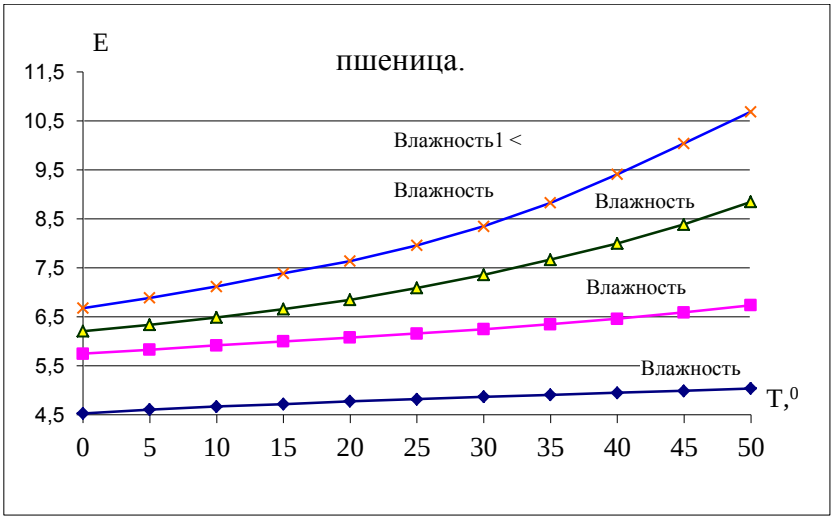


Рис.3.21. Зависимость диэлектрической проницаемости сыпучих материалов от температуры.

На базе выполненных исследований были изготовлены опытные образцы влагомера в потоке, которые успешно прошли опытную эксплуатацию на ОАО «Хоразмдон махсулотлари». Наличие надежного, отвечающего требованиям эксплуатации, в соответствии с согласованным техническим заданием, влагомера позволило создать автоматизированную систему контроля и управления процессом сушки сыпучих материалов для сушилок.

Система обеспечивает выполнение следующих функций: измерение, индикацию и контроль по уставкам до 6 каналов температуры; измерение и индикацию влажности сыпучих материалов в потоке; управление исполнительными механизмами, аварийной сигнализацией и отсечным клапаном; управление затворами выпуска сыпучих материалов; управление рециркуляционной сушкой сыпучих материалов в режиме реального времени; мониторинг и регистрацию протокола технологических параметров на персональном компьютере;

На рис.3.22. приведена схема автоматизации сушилки.

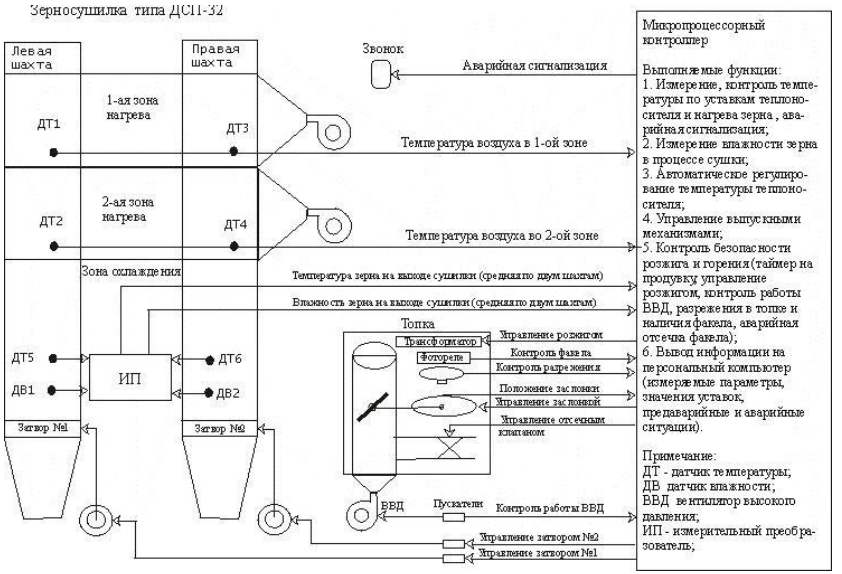


Рис. 3.22. Схема автоматизации сушилки ДСП-32.

3.9. Повышение достоверности первичной производственно-технологической информации в АСУТП влаго-тепловой обработки сыпучих материалов

В рамках решения задачи оценки достоверности результатов измерений количественной и качественной информации в АСУТП влаго-тепловой обработки сыпучих материалов нами обоснована методика анализа информационно-измерительной информации с целью выявления первичных источников информации с низкой достоверностью (рис. 3.23).

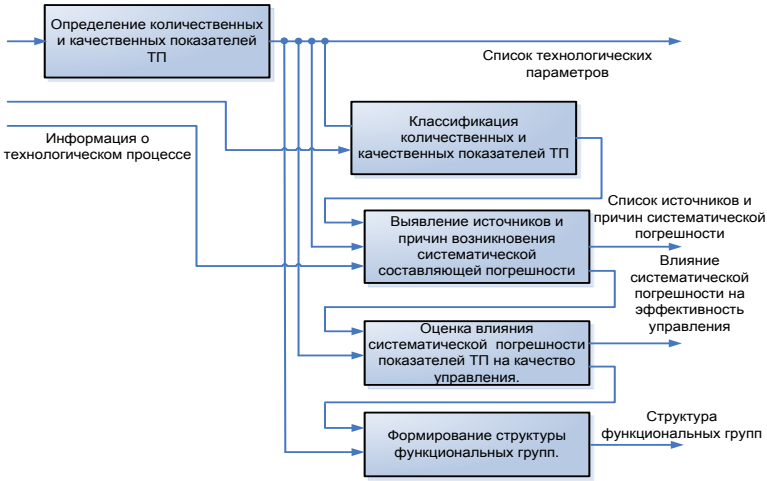


Рис.7.23. Схема анализа информационно-измерительной подсистемы АСУТП.

Данная методика, используя в качестве входных данных несистематизированную информацию о свойствах информационной подсистемы АСУТП, позволяет осуществлять построение перечня количественных и качественных параметров, наиболее полно описывающих технологический процесс, выявлять источники систематической погрешности, а также причины возникновения данной погрешности и анализировать ее влияние на эффективность управления технологическим процессом.

Предложено, используя функциональные группы (ФГ), позволяющие воссоздать логику рассуждения эксперта об изменении одного технологического параметра и о влиянии его на другие, строить функциональные зависимости с несколькими входными и одним выходным технологическим параметром. В рамках этой методики сформулированы требования к функциональным группам, реализован алгоритм их формирования (рис.3.24).

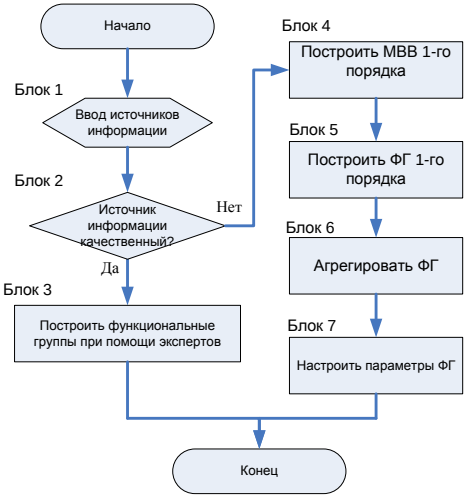


Рис. 3.24. Алгоритм формирования структуры функциональных групп.

Целесообразно использование двух типов функциональных групп: первый тип – группы только с количественными параметрами, второй – группы как с количественными, так и с качественными технологическими параметрами.

Для построения структуры первого типа построена корреляционная матрица взаимного влияния первого порядка. Определение структуры второго типа групп осуществляется посредством опроса экспертов и обработки полученных результатов методом парного сравнения.

Для определения параметров функциональных групп первого типа использовалась адаптивная нечеткая нейронная сеть (АННС), для второго типа – продукционная база знаний (БЗ).

Структура функциональных групп, построенная с использованием данной методики, может применяться в качестве базы знаний метода оценки достоверности первичной информации в АСУТП. Особенностью предлагаемого метода является совместное использование количественной и качественной информации и применение гибридной модели проверки достоверности результатов измерения технологических параметров объекта.

Рассмотрим нейросетевую структуру функциональной группы первого типа, состоящую из двух входных параметров x и y и одного выходного f (рис. 3.22).

Продукционная база знаний такой функциональной группы содержит два правила нечеткого вывода Сугено 1-го порядка:

Правило 1: Если $x=A_1$ *и* $y=B_1$ *то* $f_1=p_1x+q_1y+r_1$,

Правило 2: Если $x=A_2$ *и* $y=B_2$ *то* $f_2=p_2x+q_2y+r_2$,

где p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2 – параметры нечеткого вывода.

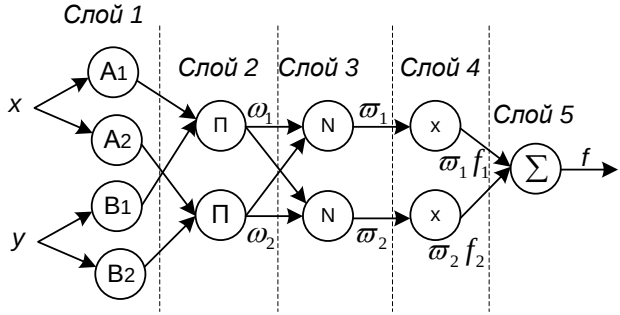


Рис. 3.25. Нейросетевая структура функциональной группы.

Узлы первого слоя этой нейросети являются адаптивными со следующими функциями принадлежности: $Z_i = \mu_{A_i}(x)$, где x – независимый технологический параметр, i – количество входных параметров (в данном случае i=2), A_i – лингвистическая переменная. В качестве функции принадлежности этого слоя выбрана функция Гаусса:

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \tag{3.82}$$

где, b,c – параметры функции принадлежности.

Каждый узел второго слоя является выходом продукционного правила и преобразует входные параметры, выдавая на выходе некоторый вес правила:

$$\omega_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x), i = 1,2. \tag{3.83}$$

На третьем слое каждый i-ый узел определяет отношение веса i-ого правила к сумме весов всех правил:

$$\varpi_i = \omega_i / (\omega_1 + \omega_2), i = 1,2. \tag{3.84}$$

Узлы четвертого слоя определяются линейными функциями принадлежности выходных параметров (нечеткого логического вывода Сугено):

$$f_i = \varpi_i \cdot f_i = \varpi_i (p_i x + q_i y + r_i). \tag{3.85}$$

Единственный узел пятого слоя является фиксированным, в котором вычисляется полное выходное значение адаптивной нечеткой нейронной сети как сумма всех входных параметров:

$$f = \sum_i \varpi_i f_i = \sum_i \omega_i f_i / \sum_i \omega_i . \quad (3.86)$$

Для заданных значений параметров предпосылок полное выходное значение является линейной комбинацией параметров вывода:

$$f = \frac{\omega_1}{\omega_1+\omega_2} f_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1+\omega_2} f_2 = \varpi_1 f_1 + \varpi_2 f_2 = (\varpi_1 x) p_1 + \\ + (\varpi_1 y) q_1 + (\varpi_1) r_1 + (\varpi_2 x) p_2 + (\varpi_2 y) q_2 + (\varpi_2) r_2 . \quad (3.87)$$

Обучение нейронной сети осуществлено в два этапа. На первом – методом субстрактивной кластеризации, при котором определяется количество продукционных правил и вид функций принадлежности первого слоя. На втором этапе – гибридным методом обучения осуществляется построение нейронной сети и формируются продукционные правила. Алгоритм обучения нейронной сети (рис. 3.26) является комбинацией метода наименьших квадратов и алгоритма обратного распространения ошибки.

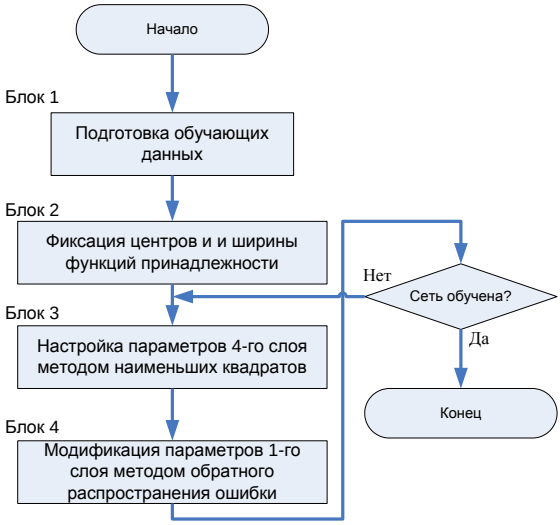


Рис.3.27. Алгоритм обучения нейронной сети.

Для всех количественных функциональных групп осуществляется построение АННС.

Для построения функциональных групп, содержащих качественные источники информации, используется нечеткий логический вывод Мамдани. Применение этого типа вывода обусловлено способностью лица, принимающего решения (ЛПР), выносить суждение о том или ином технологическом параметре в виде утверждений (в отличие от их представления линейными функциями, характерного для нечеткого вывода Сугено).

В данном случае для нечеткого вывода Мамдани выбраны функции принадлежности трапециидального вида. Продукционные правила каждой такой функциональной группы записываются в виде:

$$\begin{gathered} \textit{Если } x=x_1 \textit{ и } y=y_1, \textit{ то } f=f_1, \textit{ иначе} \\ \textit{Если } x=x_2 \textit{ и } y=y_2, \textit{ то } f=f_2, \textit{ иначе} \end{gathered} \qquad (3.88)$$

……

Если $x=x_N$ *и* $y=y_N$, *то* $f=f_N$,,

где f – выходной для данной ФГ первичный источник информации; (f_1, f_2, f_N) – его значения); x и y – входные технологические параметры.

Если в момент времени t_k текущая информация поступает от первичных источников в виде количественных данных или качественного описания оператором текущих значений параметров процесса, то может быть сформировано текущее правило вида:

$$\textit{Если } X=X_K \textit{ и } U=U_K, \textit{ то } Y=Y_K. \qquad (3.89)$$

В этом случае задача оценки и восстановления достоверности сводится к поиску текущего правила в продукционной БЗ.

При поступлении в БЗ гибридной модели технологических параметров первоначально осуществляется отбор функциональных групп с максимальной согласованностью источников информации, а затем по ним восстанавливаются истинные их значения.

Измеренные значения количественных источников информации поступают в соответствующую функциональную группу. Выходом каждой группы является рассчитанный зависимый технологический параметр. Затем для оценки достоверности элементов группы для каждого рассчитанного выходного параметра осуществляется его сравнение с измеренным значением по формуле:

$$\mu_i(f_i) = 1/exp\left(k\left|f_i' - f_i\right|\right), \qquad (3.90)$$

где k – масштабирующий множитель, f_i', f_i – соответственно рассчитанное и измеренное значение выходного параметра, i – номер функциональной группы.

Величина $\mu_i(f_i)$ характеризует соответствие измеренного и рассчитанного значения выходного источника информации каждой группы.

Если $f_i' = f_i$, $\mu_i(f_i) \approx 1$, то принимается решение о достоверности результатов измерений технологических параметров в функциональной группе. Если $f_i' \neq f_i$, то $\mu_i(f_i) < 1$ и тогда принимается вывод о недостоверности результатов измерений технологических параметров, включенных в данную группу, и их необходимости корректировки.

При наличии нескольких групп с одним и тем же выходным источником информации его значение выбирается по группе с максимальным значением $\mu_i(f_i)$:

$$T = arg\ max(\mu_i(f_i)), \tag{3.91}$$

Таким образом выявляются функциональные группы с достоверными источниками информации. Группы, в которых $\mu_i(f_i) < 1$, нуждаются в подстановке восстановленных значений источников информации из групп, где $\mu_i(f_i) \approx 1$, после чего повторно рассчитываются выходные параметры этих групп.

На основе рассмотренного метода создана система поддержки принятия решений (СППР) для оценки и восстановления достоверности первичной информации в АСУТП, структура которой представлена на рис.7.27. Синтезирован алгоритм СППР оценки и восстановления достоверности первичной информации в АСУТП в режиме реального времени (рис. 3 .28), позволяющий осуществлять построение продукционной БЗ с возможностью дальнейшей ее корректировки в режиме реального времени. Алгоритм включает в себя алгоритмы формирования структуры функциональных групп и обучения нейросети.

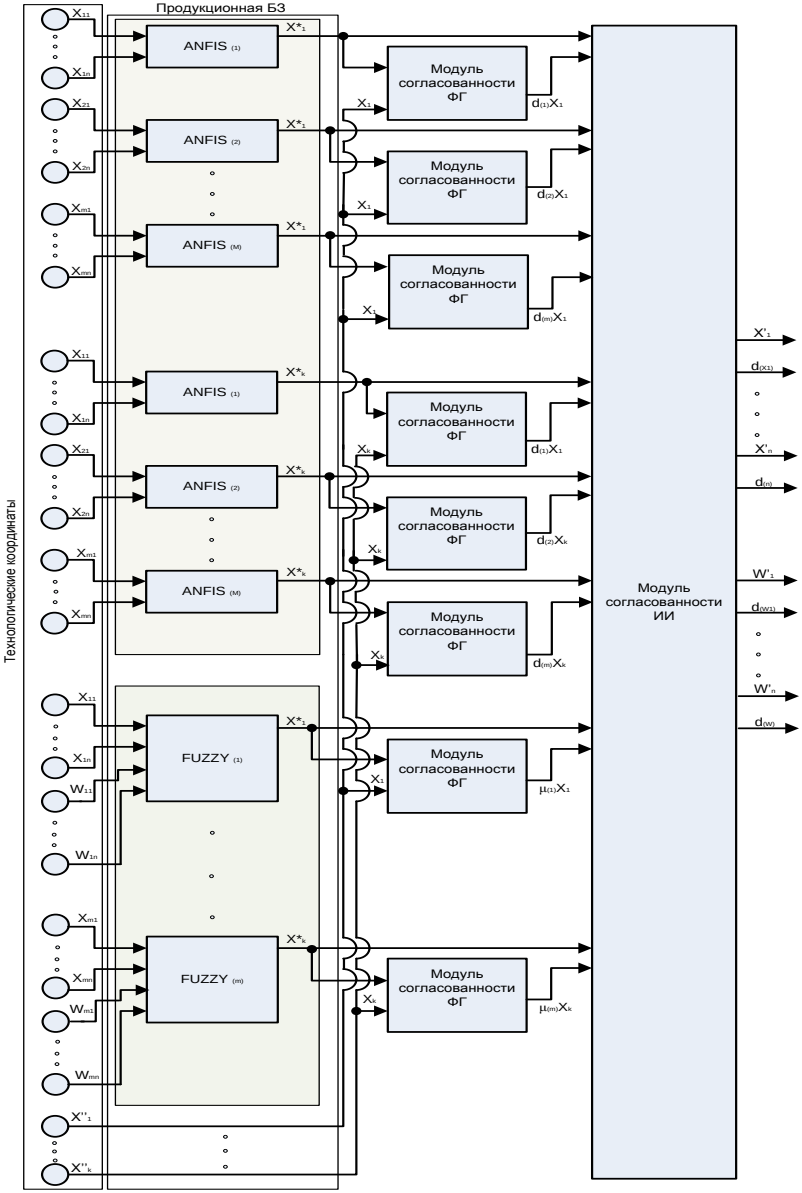


Рис. 3.27. Структура СППР для оценки и восстановления достоверности первичной информации в АСУТП.

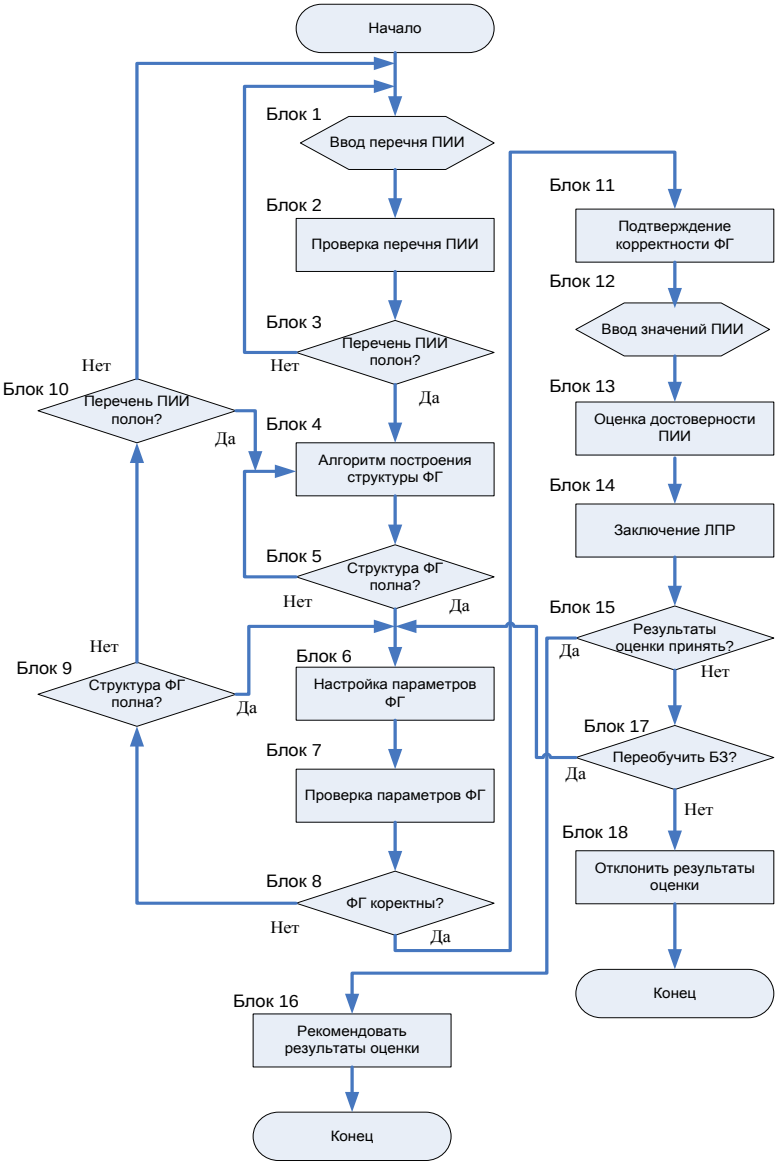


Рис. 3.28. Алгоритм СППР оценки и восстановления достоверности.

3.10. Автоматизированная поверка средств измерения влажности сыпучих материалов

Годным к эксплуатации по результатам поверки считают такое средство измерения (*СИ*), у которого погрешность Δ не превышает предела Δq допускаемого значения погрешности или контрольного допуска Δk. Однако, чем точнее и чувствительнее поверяемое средство, тем больше вероятность того, что в результате воздействия случайной составляющей погрешности поверяемого *СИ*, образцовых средств или случайной помехи суммарная погрешность $\widetilde{\Delta}$ превысит Δq или Δk. Поэтому при современной поверке обычно применяют вероятностно – статистические методы, допускающие возможность события $\left|\widetilde{\Delta}\right| > \left|\Delta_q\right|$ или $\left|\widetilde{\Delta}\right| > \Delta_k$ в определенном числе наблюдений даже для годного *СИ*. В противном случае возникает неоправданно большой запас по точности. Следовательно, традиционное определение «годности» требует пересмотра. Особенно насущно это требование при попытке разработки теоретических основ автоматизированной поверки [67-68].

Объектом исследования является верхняя граница зоны годности поверяемого *СИ*, или предел допускаемого значения систематической составляющей его погрешности Δ_{cq} при автоматизированной поверке.

Методами исследований являлись: последовательный анализ А. Вальда, методы теории вероятности, планирования экспериментов, проверки статических гипотез, оптимизации, а также имитационное моделирование процесса поверки и натурные эксперименты. В основе исследований лежит четкая система аксиом. Образцовое *СИ* априори считается годным к эксплуатации. Для алгебраизации интегральных уравнений использованы наихудшие (с точки зрения вероятности ошибок поверки) равномерные распределения.

При оптимизации автоматизированной поверки по критериям минимума числа наблюдений и максимума апостериорной

достоверности $D_Г$ результата «годен» приближенно решена в общем виде специфическая задача нелинейного программирования. Получена возможность формализации всех параметров автоматизированной поверки, за исключением исходного - $D_Г$, задаваемого по методу «ступенчатого спуска» из перечня допускаемых значений 0,9999; 0,999; 0,99; 0,95; 0,9; 0,8; 0,67.

Тривиальное требование положительности верхней границы зоны годности

$$\Delta_{cq} = |\Delta_q| - 2|\Delta_{oq}|(1-\alpha-\beta) \geq 0, \qquad (3.92)$$

(где Δ_{oq} - предел допускаемой погрешности образцового средства измерения) приводит к условию выбора допускаемого отношения погрешностей образцового и поверяемого приборов:

$$\xi = |\Delta_{oq}| / |\Delta_q| \leq 0{,}5 / \sup_D \xi. \qquad (3.93)$$

Здесь $\sup_D \xi$ - верхняя грань (супремум) множества значений отношения ξ по множеству допустимых значений априорной достоверности результатов поверки $D = 1-\alpha-\beta$.

Можно показать, что при автоматизированной поверке всегда

$$0{,}5 < \sup_D \xi < 1{,}0, \qquad (3.94)$$

поскольку $\alpha + \beta < 0{,}5$. Это означает, что стандартный предел отношения погрешности при традиционной ручной поверке, равной 1 : 3, существенно повышается при автоматизированной поверке. За счет этого автоматизированная поверка удешевляется, поскольку снижаются требования к точности образцовой аппаратуры. С другой стороны, при автоматизации расширяются возможности поверки, т.к. при неизменной точности образцового средства измерения появляется возможность поверять более точные приборы.

Имитационное моделирование и натурные испытания показывают, что основным требованием к выбору (по точности) образцового средства измерения является выполнение условия $\xi \leq 0{,}95$. В то же время возникает необходимость в требовании к

дискретности образцового средства измерения, не менее чем в 4 раза превышающей дискретность поверяемого $СИ$.

Возможность проведения автоматизированной поверки при близких к 1 отношениях погрешностей «обменивается» на расширение так называемой зоны неопределенности, характеризующейся всплеском среднего числа наблюдений по сравнению с зонами годности и брака. Оптимизация автоматизированной поверки сглаживает этот всплеск.

Особенно эффективна автоматизированная поверка образцовых и прецизионных средств измерений. При положительных выводах поверки здесь достигается достоверность результата $D_{\Gamma} = 0{,}9999.$

Таким образом, изложенный подход к определению понятия «годный прибор» приводит к возможности пересмотра (в сторону существенного увеличения) стандартного требования к отношениям погрешностей и поверяемых приборов при автоматизированной поверке на базе ЭВМ.

3.11. Пути совершенствования систем контроля и управления процессами влаго-тепловой обработки сыпучих материалов

Рациональное расходование электроэнергии установками для влаго-тепловой обработки сыпучих материалов перерабатывающих отраслях приобретает все большую злободневность. Особую роль в снижении расхода тепловой и электрической энергии играют системы автоматического контроля и управления процессами в машинах и агрегатах перерабатывающих отраслей промышленного комплекса.

На современном уровне развития производства на предприятиях по переработке сыпучих материалов автоматизация технологических процессов позволяет повысить производительность труда, качество обработки семян и продовольственного сыпучих материалов.

При автоматизации к установкам влаго-тепловой обработки материалов предъявляется следующий ряд специфических требований:

1. Равномерность температурных *t* и влажностных *W* полей обрабатываемого материала в сушильных камерах. Достигнуть

идеальной равномерности *W* и *t* в реальных условиях не удается, и речь поэтому идет о допустимых отклонениях этих параметров. Действительные пределы отклонений Δt и ΔW зависят, в основном, от типа технологических установок, а допустимые Δt и ΔW определяются технологическими, экономическими и техническими соображениями. Неравномерность влажностного сыпучих материалов в сушилках составляет $\Delta W_m = \pm 2{,}5\%$, в барабанных - $\Delta W_m = \pm 1\%$, а температурного поля соответственно $\Delta t_6 = \pm 2^0 C$ и $\Delta t_m = 5 - 10^0 C$. Эти отклонения не являются удовлетворительными, особенно для сушилок. Действительно, если $\Delta W_m = \pm 2{,}5\%$, то в самом неблагоприятном случае на выходе из сушилки будет иметь место сыпучих материалов с влажностью $W_m = 16 - 16{,}5\%$. Такое сыпучих материалов непригодно к длительному хранению и нуждается в дополнительный досушке. Для автоматизируемых сушильных установок большая неравномерность температурного *t* и влажностного *W* полей недопустима, поскольку при большой неравномерности не удается интенсифицировать процесс нагрева сыпучих материалов; приходится контролировать и регулировать *W* и *t* в точке максимального нагрева сыпучих материалов, а в других точках и слоях эти параметры могут быть значительно ниже контрольных.

2. Непрерывность и регулируемость процесса. Это условие предъявляется для большинства автоматизируемых процессов. Оно предполагает возможность работы установки в поточных линиях с различной производительностью в зависимости от исходной влажности сыпучих материалов.

Влажность поступающего на сушку сыпучих материалов может изменяться в широком диапазоне (от 17 до 30 %). Если сушилка рассчитана на съем за один пропуск 6 % влаги, то при поступлении сыпучих материалов с влажностью 17 %, установка должна иметь производительность в 1,5 раза больше паспортной. При исходной влажности сыпучих материалов выше 20% сушка производится либо за два пропуска через сушилку (шахтные и барабанные сушилки), либо с резко сниженной

производительностью (противоточные сушилки). В первом случае производительность должна автоматически регулироваться от 1 до 1,5-2Q, а во втором случае в пределах 0,5-1,5Q (Q – производительность установки).

Непрерывность процесса – это требование поточности сушки с момента поступления сыпучих материалов в приемный канал и до выхода сыпучих материалов из сушильной камеры. При поточной технологии сушки сыпучих материалов может идти непрерывной струей или порционно - через определенные, заранее установленные интервалы времени. Порционность потока сыпучих материалов создается периодическим включением выпускного устройства сушилки. Однако в отдельных типах сушилок, где сыпучих материалов соприкасается с подводящими сушильный агент коробами, возможно просыхание или обжигание зерен (особенно семян), поэтому приходится отказываться от порционного выпуска сыпучих материалов и идти на более сложный, непрерывный выпуск с переменной производительностью.

3.Наличие зон, в которых можно устанавливать датчики. Существующие типы сушилок в большинстве случаев не имеют зон, в которых при минимальных помехах можно было бы измерять температуру и влажность сыпучих материалов в потоке. Измерение температуры сыпучих материалов в различных типах сушилок обычно затруднено тем, что на показания датчиков оказывает влияние сушильный агент, температура которого, как правило, на несколько десятков градусов выше, нежели температура сыпучих материалов. Однако во многих сушилках отсутствуют зоны, которые не пронизывались бы сушильным агентом, поэтому для измерения температуры создают искусственные (огражденные от влияния сушильного агента) зоны. Это усложняет устройство систем контроля и регулирования. Те же трудности имеют место с выбором места контроля влажности сыпучих материалов. Поэтому при создании новых типов сушильных установок необходимо учитывать это условие и предусматривать в зоне максимального нагрева сыпучих материалов места для установки датчиков температуры и влажности. При выборе мест установки датчиков необходимо, чтобы количество контролируемых параметров было

минимальным, поскольку увеличение их числа проводит к усложнению и удорожанию систем регулирования. Например, если при прочих равных условиях в одном из вариантов конструкции сушилки две зоны, в которых возможны предельные температуры нагрева сыпучих материалов, а в другом варианте - одна, то предпочтение должно отдаваться второму варианту.

4. Минимальная инерционность процесса является при автоматическом управлении важным требованием к сушилкам. Чем больше постоянная времени процесса, тем сложнее система управления процессом, поскольку в систему вводятся дополнительные, корректирующие связи, а в отдельных случаях приходится выполнять систему дискретной. Поэтому следует стремиться к созданию установок с малой инерционностью.

Ход процесса сушки сыпучих материалов в технологических установках может быть оценен на основании информации, получаемой от датчиков, установленных в наиболее характерных точках сушильной камеры.

Параметры, характеризующие эффективность автоматизации процесса. Температура нагрева сыпучих материалов t и влажность сыпучих материалов W характеризуют сохранность сыпучих материалов, подвергающегося сушке, и косвенно отражают его качественные показатели: всхожесть, энергию прорастания, хлебопекарные свойства. Другие параметры могут характеризовать эффективность протекания процесса, энергоемкость и т.д.

В настоящее время наибольшее распространение получили системы автоматического управления процессом сушки сыпучих материалов с контролем и регулированием параметров сушильного агента, поскольку они просты и надежны в эксплуатации. Косвенно они приводят к стабилизации других параметров: производительности (т.е. количества Q сыпучих материалов, подаваемого в камеру сушки), времени τ пребывания сыпучих материалов в сушильной камере и скорости v движения сушильного агента. При температуре сушильного агента на $20-30^0C$ выше температуры окружающего воздуха можно считать постоянной также относительную влажность сыпучих материалов φ на входе. Системы, основанные на

стабилизации t, Q, v и φ, не приспособлены к условиям изменения исходных параметров сыпучих материалов. При постоянной начальной влажности сыпучих материалов на выходе из сушилки получают сыпучих материалов строго определенной влажности. При переменных значениях W_0 и различных видах сыпучих материалов обеспечить на выходе заданную влажность не удается. Поэтому параметры процесса стабилизируют на таком уровне, чтобы при случайных возмущениях обеспечивалась сохранность семенных и продовольственных качеств сыпучих материалов.

Системы автоматического управления процессом сушки по параметрам сушильного агента и сыпучих материалов, составляющие второе направление, незначительно отличаются от первого и логически развивают предыдущие системы. В процессе сушки эти системы контролируют и регулируют температуру t и влажность W сыпучих материалов или оба параметра одновременно. Наиболее простые системы регулируют только температуру сыпучих материалов, а более сложные – и его влажность. Системы регулирования температуры сыпучих материалов отличаются от систем, стабилизирующих температуру t_{ca} сушильного агента, дополнительным контролем параметра t. Это обеспечивает автоматическую защиту сыпучих материалов от перегрева. Нижний предел температуры нагрева сыпучих материалов не контролируется.

ГЛАВА 4. КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Метрологические основы техники измерения влажности

Вода содержится во многих природных и технических материалах и поэтому при обработке их чрезвычайно важно знать содержащееся в них количество воды и определять допустимое количество ее в данном материале. Поиск приемлемых не только в области научных исследований, но и в промышленности методов измерения влажности привел к появлению большого числа теоретических предложений и аппаратурных реализаций.

Причиной появления большого числа методов измерения является многообразие форм существования воды и материалов. Принципиально возможны следующие методы измерения влажности: гигрометр, действие которого основано на термостатическом уравновешивании энергии (волосяной гигрометр и др.); психрометр; изобарическое охлаждение (гигрометр точки росы); адиабатическое охлаждение; изобарический нагрев; изотермическая абсорбция (электролитический гигрометр); изотермическое испарение (гигрометр насыщения); давление пара.

Если в газах с переменными силами межмолекулярного сцепления воды и носителя эти силы учитываются при высоких температурах и давлениях, то межмолекулярное сцепление воды и твердых материалов или жидкости учитывается при низких температурах вследствие пористости структуры, т.е. адгезивности силы сцепления.

Различные условия внедрения приборов измерения влажности, вытекающие из этого факта, обусловливают выбор приемлемой системы измерения. Критерии выбора: область измерения; допустимая погрешность измерения, инерционность (постоянная времени); виды помех (пыль, коррозионные среды, магнитное поле и т.п.); необходимость очистки или отбора проб; виды агрессивных компонентов в измеряемой среде; наличие нормальных или специальных условий (например, по давлению или температуре); наличие особых условий применения взрывоопасного прибора; необходимость овода среды измерения после процесса измерения (обводной путь или открытый выход);

характеристики экспериментального состояния процесса производства в месте измерения; необходимость очистки места измерения или места монтажа. Далее решаются вопросы, связанные с характеристиками измерительных преобразователей (ИП) и параметрами устройств обработки сигналов: вид выходного сигнала ИП; линейность его рабочей характеристики; градуировки; явления гистерезиса; необходимость дополнительной энергии для измерения; тип и класс защиты; срок технического обслуживания; стоимость капитальных вложений и обслуживания.

Влажность газа характеризуется содержанием в нем водяного пара. Абсолютная влажность d_v определяется плотностью водяного пара в газе

$$d_v = \frac{m_v}{V}, \tag{4.1}$$

где m_v -масса водяного пара; V -объем газа.

Относительная влажность U есть отношение массы водяного пара x_v в

веществе при значениях температуры T и давления p, заданных для измеряемой среды, к массе водяного пара x_{vw} при насыщении этого вещества при низменных значениях p и T:

$$U_w = (\frac{x_v}{x_{vw}})_{p,T} \cdot 100\%. \tag{4.2}$$

В области температур ниже 0^0C следует определить, идет ли речь о насыщении льда или переохлажденной воде. Относительно льда из (4.2) получается

$$U_i = (\frac{x_v}{x_{vi}})_{p,T} \cdot 100\%. \tag{4.3}$$

Если предлагать идеальное поведение газа, то переходят к (4.2) и (4.3) с помощью идеального закона газодинамики

$$U_w = (\frac{e}{e_w})_{p,T} = (\frac{d_v}{d_{vw}})_{p,T}; \tag{4.4}$$

$$U_i = (\frac{e}{e_i})_{p,T} = (\frac{d_v}{d_{vi}})_{p,T}, \quad (4.5)$$

где e_w, e_i, d_{vw}, d_{vi}, а также d_{vw} и d_{vi} являются функциями температуры [82], которые получают для различных температурных функций парообразования воды $L_v(T)$ или теплоты сублимации льда $L_з(T)$.

Точность, достаточная для практических применений, получается из

формулы Магнуса для давления насыщенного пара надо льдом:

$$e_i = e_{i,0} \cdot \exp(\frac{a_i \cdot t_i}{b_w + t_i}), \quad (4.6)$$

где t_i - область температур от – 60^0C до 0^0C.

Количество водяного пара в веществе x_v получается из

$$x_v = \frac{n_v}{n_v + n_g}, \quad (4.7)$$

где n_v - количество (масса) водяного пара в веществе в молях, n_g - количество (масса) сухого газа в молях.

Отношение массы влажного газа к массе сухого газа определяется по

формуле:

$$r = \frac{m_v}{m_g}, \quad (4.8)$$

где m_v - масса водяного пара; m_g -масса сухого газа.

При насыщении применимо соотношение (4.8) относительно воды r_w и

относительно льда r_i. Температура точки кипения T_d определяется из:

$$(r)_{p,T} = (r_w)_{p,T_d}. \quad (4.9)$$

Она обусловлена такой температурой, при которой водяной пар, содержащийся во влажном газе при изобарическом охлаждении, достигает состояния насыщения относительно воды.

В области температур ниже 0^0C адекватно получается температура T_1 точки согревания

$$(r)_{p,T} = (r_i)_{p,T_1}. \qquad (4.10)$$

Она определяется такой температурой, при которой водяной пар, содержащийся во влажном газе при изобарическом охлаждении, достигает состояния насыщения относительно льда.

В случае неидеального поведения газа идеальный закон распространяется на реальной газ через коэффициент компенсации Z. Для Z, который выбирается при идеальном поведении газа равным 1, значение получается из:

$$Z = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T}, \qquad (4.11)$$

где p - давление влажного газа; V - объем влажного газа; n - количество вещества; R - универсальная газовая постоянная.

Влажность твердого материала характеризуется содержанием в нем воды. Однако влажность твердого материала определяют только те молекулы, воды, которые располагаются в материале как «свободная вода», т.е. физически связаны с материалом межмолекулярными силами.

Эти обстоятельства ведут при градуировке (поверке) различных косвенно измеряющих приборов (например, методом электронного торможения) к возрастанию погрешности измерения. Измерение влажности методом нейтронного торможения охватывает общее количество атомов воды, в то время как при градуировке (поверке) методом сухого взвешивания определяется только «свободная вода».

Определение содержания воды в твердых, пористых материалах осуществляется с помощью сорбционных изотерм. Для заданных температур в качестве параметра выступают сорбционные изотермы влажности твердого материала, который находится в термодинамическом равновесии с окружающей влажной средой.

Количественная оценка влажности твердых веществ может осуществляться по формуле:

$$f = \frac{m_f - m_{dtr}}{m_f} \qquad (4.12)$$

и задается в единицах g/kg (г/кг) или kg/kg (кг/кг), где m_f - масса влажного материала, m_{dtr} - масса высушенного вещества.

4.2. Методы и средства измерения электрофизических характеристик зернистых материалов

Совершенствование измерительных преобразователей электрофизических свойств зернистых материалов в классе емкостных датчиков, обладающих расширенным диапазоном изменений параметров эквивалентной электрической схемы замещения и повышенной точностью преобразования.

В известных разработках [69,70] емкостной датчик с веществом представляется в основном двухэлементной схемой замещения, что приводит к появлению погрешности от влияния не учитываемых параметров.

Повышение точности приборов для измерения влажности возможно лишь при более корректном представлении схемы замещения емкостных датчиков с веществом в виде многоэлементного двухполюсника. Задача раздельного преобразования параметров многоэлементных двухполюсников в общем случае не нова [71,72] и различные аспекты ее решения разрабатываются многими научными школами.

Специфика преобразования параметров многоэлементных двухполюсников, представляющих схемы замещения емкостных датчиков (ЕД) влажности сыпучих веществ, заключается в сложности наиболее полной адекватной электрической схемы замещения и чрезвычайно широком диапазоне соотношений параметров для некоторых классов веществ. Получение с высокой точностью информации о значении параметров ЕД при широком диапазоне их значений – одна из задач данного исследования.

Для измерения влажности вещество необходимо поместить в электрическое поле между обкладками ЕД. Для задания воздействия определенной интенсивности, формы и частоты

повторения необходим источник опорного воздействия (ИОВ). Возникающие между обкладками ЕД электрические токи необходимо выделить, преобразовать в промежуточные активные величины и произвести их дальнейшую обработку по определенным алгоритмам.

Достигается это измерительной схемой (ИС), состоящей из ЕД, опорных элементов (опорных конденсаторов, резисторов или катушек индуктивности) и активных элементов, например, операционных усилителей (ОУ). Выходное напряжение ИС представляет собой или суперпозицию составляющих, зависящих от значений параметров ЕД и значений опорных величин, или сложную временную зависимость от значений двух или более параметров ЕД и опорных величин.

Задача измерения значений параметров ЕД во многом аналогична измерению значений пассивного многоэлементного двухполюсника (ПМД). Разработке устройств измерения значений ПМД в последнее время посвящено значительное число работ.

В [71] значения ПМД определяются или путем моделирования активными или пассивными элементами аналогов многоэлементного двухполюсника соответствующей структуры с последующим уравновешиванием по каждому из параметров или путем обработки сигналов о переходном процессе в определенным образом синтезированной ИС при воздействии на ее вход импульсным сигналом, либо использованием алгоритма вычисления коэффициентов иммитанса при последовательном воздействии на ИС синусоидальными сигналами различных частот с последующим решением соответствующей системы уравнений.

В работе [73] с целью упрощения вычислений модернизируется алгоритм решения системы уравнений путем определения еще одного промежуточного параметра - коэффициента иммитанса.

В работах [74,75] для определения значений ПМД предлагается использовать мостовые схемы с различными алгоритмами уравновешивания при воздействии на ИС одно- или многочастотными гармоническими сигналами последовательно во времени. Особенностью этих работ является использование в

плечах мостов и в качестве источников компенсирующего сигнала схем с ОУ.

В монографии [76] для измерения значений ПМД используются мостовые схемы с импульсным питанием. Это позволило получить информацию о значении ПМД весьма разнообразной конфигурации. Однако и в этом случае для получения значений ПМД требуются сложные вычисления.

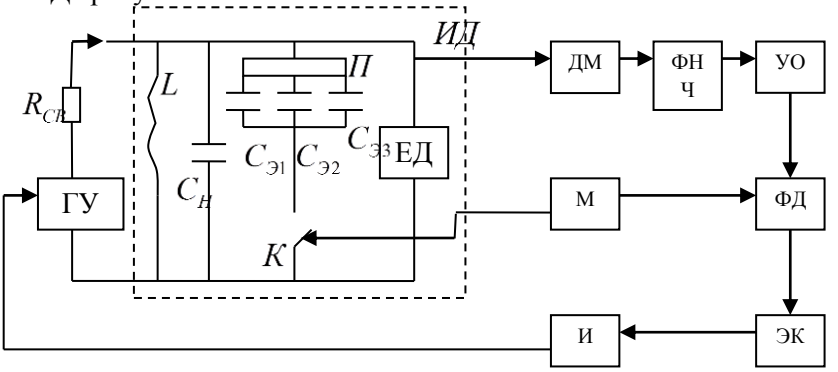


Рис.4.1.Функциональная схема измерительного преобразователя.

Измерительный двухполюсник (ИД) представляет собой пассивный колебательный контур $LC_н$, параллельно которому включены ЕД со схемой замещения рис. 4.1 и три опорных емкости $C_{Э1} \neq C_{Э2} \neq C_{Э3}$, которые в процессе измерения поочередно трехкратно подключаются переключателем П к ключу К, периодически замыкаемому с частотой Ω и скважностью, равной двум. В результате такого воздействия на ИД образуется амплитудно-модулированное напряжение, огибающая которого после демодулятора ДМ, фильтра нижних частот (ФНЧ) и усилителя-ограничителя (УО) поступает на один из входов фазового детектора (ФД), на второй вход которого подается опорное напряжение той же частоты от модулятора (М). В зависимости от соотношения фаз напряжений на входах ФД его выходное напряжение управляет работой электронного ключа (ЭК), который через интегратор (И) управляет частотой генератора ГУН. Преобразователь образует замкнутую систему, динамическое равновесие которой соответствует равенству

модулей полной проводимости ИД при замкнутом и разомкнутом ключе К.

Полная проводимость ИД при разомкнутом и замкнутом ключе определяется соответственно следующими выражениями:

$$Y_{P1} = \frac{1}{R1} + \frac{\omega^2 C_2^2 R_2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2} + j\omega(C_H + C_1 + \frac{C_2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2} - \frac{1}{\omega^2 L}) \ , \tag{4.13}$$

$$Y_{З1} = \frac{1}{R1} + \frac{\omega^2 C_2^2 R_2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2} + j\omega(C_H + C_{Д1} + \frac{C_2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2} - \frac{1}{\omega^2 L}) . \tag{4.14}$$

Приняв $|Y_{P1}| = |Y_{З1}|$ после преобразований получим первое уравнение

$$C_2 + (1+\omega^2 C_2^2 R_2^2)(C_1 + C_H + \frac{C_{Э1}}{2} - \frac{1}{\omega_1^2 L}) = 0 . \tag{4.15}$$

Второе и третье уравнение получаются при подключении опорных емкостей $C_{Э2}$ и $C_{Э3}$:

$$C_2 + (1+\omega^2 C_2^2 R_2^2)(C_1 + C_H + \frac{C_{Э2}}{2} - \frac{1}{\omega_2^2 L}) = 0 , \tag{4.16}$$

$$C_2 + (1+\omega^2 C_2^2 R_2^2)(C_1 + C_H + \frac{C_{Э3}}{2} - \frac{1}{\omega_3^2 L}) = 0 . \tag{4.17}$$

В результате совместного решения системы указанных трех уравнений получаем выражения для определения параметров C_1, C_2 и R_1.

Для определения R_1, измеряют напряжение $U_г$ генератора и напряжение U на двухполюснике в состоянии динамического равновесия и вычисляют модуль полного сопротивления

$$|Z_{РАВН}| = R_{СКВ} U / (U_Г - U) , \tag{4.18}$$

который приравнивается эквивалентному сопротивлению потерь $R_{ЭКВ}$, откуда вычисляется R_1

$$R_1 = R_{ЭКВ} \frac{1+\omega^2 C_2^2 R_2^2}{1+\omega^2 C_2^2 R_2 (R_2 - R_{ЭКВ})} . \tag{4.19}$$

Наиболее многочисленную группу устройств для измерения значений ПМД представляют устройства, использующие инвариантный метод преобразования параметров электрических цепей с синусоидальным с несинусоидальным [77] входным воздействием на ИС. Рассмотрим несколько ИП этой группы.

На рис. 4.2 приведена схема ИП с временным разделением каналов и изменяющимся в каждом такте преобразования воздействии на ИС. Рассмотрим работу на примере преобразования параметров последовательной или параллельной RLC цепи. На вход ИС с выхода генератора опорных воздействий последовательно во времени подают три воздействия различной формы

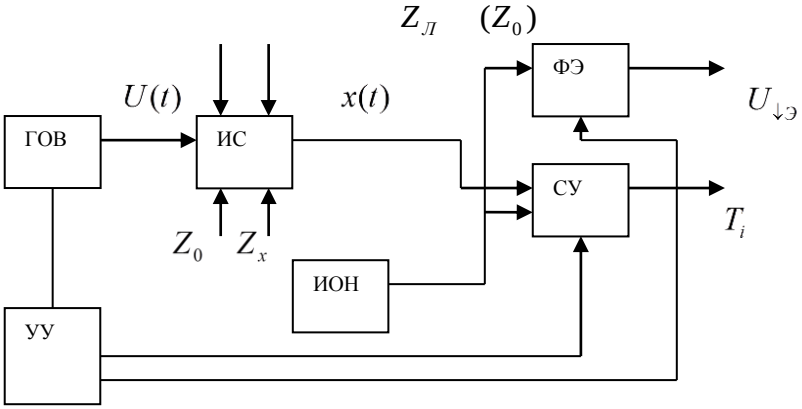
$$u_1(t) = k_1 U_0 t^2;\ u_2(t) = k_2 U_0 t;\ u_3(t) = k_3 U_0 . \qquad (4.20)$$

Каждый раз при достижении выходным напряжением ИС напряжения $U_{ОП}$ кончается формирование интервала времени, длительности которых T_1, T_2, T_3.

В результате получаем и решаем систему уравнений

$$\begin{cases} U_0(a_1 + a_2 T_1 + a_3 T_1^2) = U_{ОП1}, \ \textit{при воздействии} U_1(t); \\ U_0(a_2 + a_3 T_2) = U_{ОП2}, \ \textit{при воздействии} U_2(t); \\ U_0 a_3 = U_{ОП3}, \ \textit{при воздействии} U_3(t); \end{cases} \qquad (4.21)$$

где a_1, a_2, a_3 - искомые ПМД, $U_{ОП1}, U_{ОП2}, U_{ОП3}$, - напряжения на соответствующих выходах ИОН.



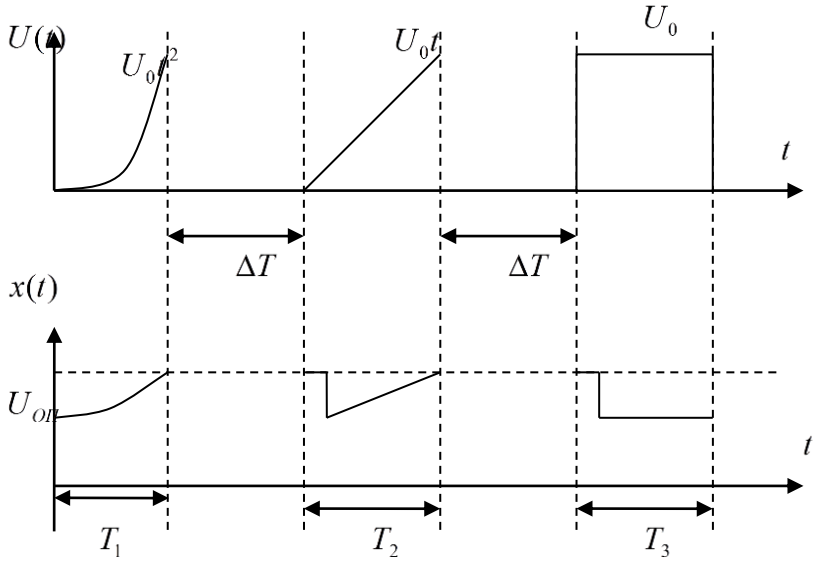


Рис.4.2. Схема измерительного преобразователя с временным разделением каналом (а) и графики измерения воздействий на каждом такте преобразования.

При пространственном разделении каналов по команде УУ (рис. 4.4) в начальный момент времени на вход ИС подается воздействие $u(t) = U_0$. Выходной сигнал ИС для трехэлементной *RLC* цепи будет описываться выражением

$$U_{ИС}(t) = U_0 a_1 + U_0 a_2 t + U_0 a_3 t^2 . \quad (4.22)$$

По достижении напряжением $U_{ИС}(t)$ трех опорных уровней $U_{ОП1}, U_{ОП2}, U_{ОП3}$ формируются три интервала времени T_1, T_2, T_3, которые и являются основой для получения системы уравнений. В обоих случаях решение систем уравнений осуществляется с помощью средств вычислительной техники.

Пространственное разделение каналов реализуется и с помощью ИП с весовым суммированием (ВС) [78]. В этом случае ЕД (рис. 4.5) включается на вход ОУ, а опорный конденсатор емкостью C_0 - в цепь отрицательной обратной связи.

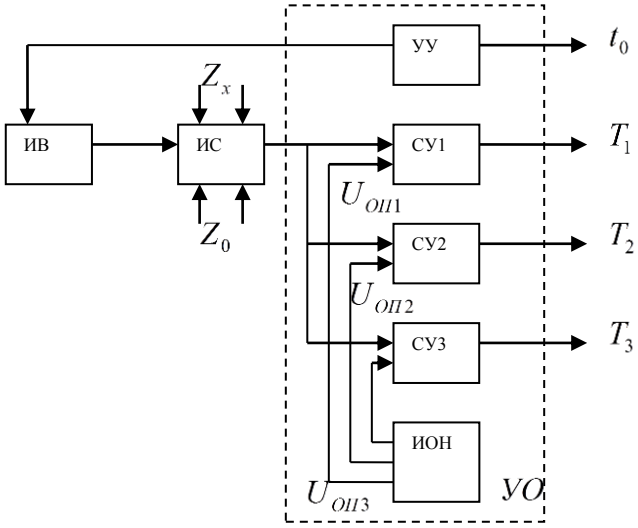


Рис.4.3

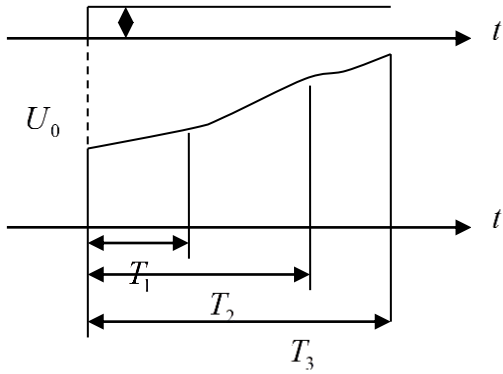


Рис. 4.4. Пространственное разделение каналов управления.

При воздействии в виде единичной функции $A(t) = 1(t)$ выходной сигнал ИС определяется

$$x(t) = -\frac{C_1}{C_0} - \frac{t}{R_1 C_0} - \frac{C_2}{C_0}\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{C_2 R_2}\right)\right] \qquad (4.23)$$

и поступает одновременно на входы дифференциатора Д, интегратора И и двойного интегратора ДИ$_1$.

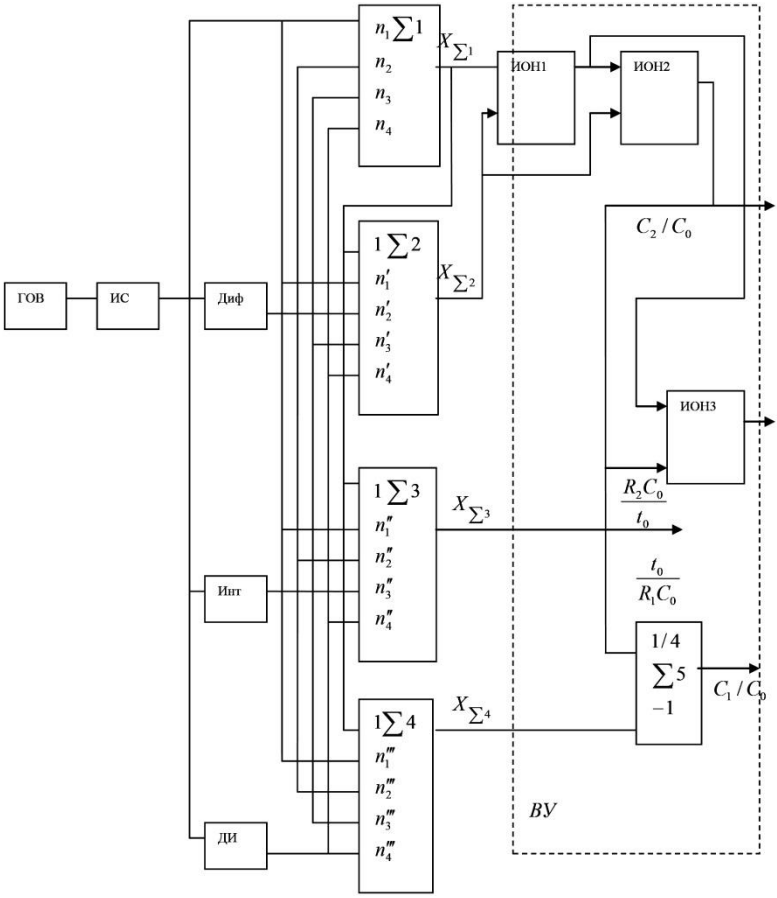


Рис.4.5. Схемы включения емкостного датчика с весовым суммированием.

В результате получаем четыре различных сигнала с составляющими, определяемыми измеряемыми параметрами, которые подаются на четыре весовых сумматора $\sum 1, \sum 2, \sum 3, \sum 4$. Выходной сигнал весовых сумматоров в общем виде

$$X_{\Sigma} = X(C_1) + X(C_2) + X(1/R_1) + X(R_2C_2^2) + X(R_2^2C_2^3). \quad (4.24)$$

Весовые коэффициенты n_1, n_2, n_3, n_4 весовых сумматоров $\sum 1, \sum 2, \sum 3, \sum 4$ находятся путем решения соответствующей системы уравнений. Для первого ВС:

$$\left\{\begin{array}{l} n_4 \dfrac{R_2^2C_2^3}{C_0\tau_И\tau_{И2}} = 1; \\ \dfrac{R_2C_2^3}{C_0}\left(n_3\dfrac{1}{\tau_И} - n_4\dfrac{t}{2\tau_И\tau_{И2}}\right) = 0; \\ \dfrac{1}{R_1C_0}\left(-n_1 + n_2\tau_Д + n_3\dfrac{t}{2\tau_И} - n_4\dfrac{t^3}{6\tau_И\tau_{И2}}\right) = 0; \\ \dfrac{C_2}{C_0}\left(-n_1 + n_3\dfrac{t}{\tau_И} - n_4\dfrac{t^2}{2\tau_И\tau_{И2}}\right) = 0; \\ \dfrac{C_1}{C_0}\left(-n_1 + n_3\dfrac{t}{\tau_И} - n_4\dfrac{t^2}{2\tau_И\tau_{И2}}\right) = 0. \end{array}\right\} \quad (4.25)$$

Решение приведенной системы уравнений дает значения коэффициентов первого ВС $n_1 = 0{,}5,\ n_2 = \dfrac{t}{2\tau_Д},\ n_3 = \dfrac{\tau_u}{t_0},\ n_4 = \dfrac{\tau_u\tau_{u2}}{t_0^2},$ при которых выходной сигнал первого весового сумматора $\sum 1$

$$X_{\sum 1} = \frac{R_2^2C_2^3}{C_0t_0^2}m_1 \quad (4.26)$$

где m_1 - коэффициент размерности напряжения.

Аналогично путем составления систем уравнений, различающихся лишь тем, какое из уравнений приравнивается 1, находятся коэффициенты остальных ВС. Значения весовых коэффициентов и выходных сигналов ВС следующие:

$$n_1' = \frac{3}{2};\ n_2' = \frac{5t_0}{6\tau_Д};\ n_3' = \frac{\tau_u}{t_0};\ n_4' = \frac{\tau_u \tau_{u2}}{t_0^2};\ X_{\sum 2} = 2\frac{R_2 C_2^2}{C_0 t_0} m_1; \tag{4.27}$$

$$n_1'' = \frac{1}{2};\ n_2'' = \frac{5t_0}{6\tau_Д};\ n_3'' = -\frac{\tau_u}{t_0};\ n_4'' = -\frac{\tau_u \tau_{u2}}{t_0^2};\ X_{\sum 3} = \frac{t_0}{C_0 R_1} m_1; \tag{4.28}$$

$$n_1''' = \frac{9}{2};\ n_2''' = \frac{25t_0}{6\tau_Д};\ n_3''' = -\frac{\tau_u}{t_0};\ n_4''' = -\frac{\tau_u \tau_{u2}}{t_0^2};\ X_{\sum 4} = (\frac{C_1}{C_0} + \frac{C_2}{C_0}) m_1; \tag{4.29}$$

Дальнейшая обработка производится в вычислительном устройстве ВУ. В измерителе отношений напряжений ИОН1 сигнал $X_{\sum 1}$ делится на $X_{\sum 2}$

$$X_{ИОН1} = \frac{X_{\sum 1}}{X_{\sum 2}} = \frac{R_2 C_2}{2t_0}. \tag{4.30}$$

Сигнал $X_{\sum 2}$ делится на выходной сигнал ИОН1. Тогда

$$X_{ИОН2} = \frac{X_{\sum 2}}{X_{ИОН1}} = 4\frac{C_2}{C_0} m_1. \tag{4.31}$$

В ИОН3 сигнал $X_{ИОН1}$ делится на сигнал $X_{ИОН2}$

$$X_{ИОН3} = \frac{X_{ИОН1}}{X_{ИОН1}} = \frac{R_2 C_0}{8t_0} m_1. \tag{4.32}$$

Сигнал с выхода четвертого ВС вычитается из выходного сигнала $X_{ИОН2}$

$$X_{\sum ВУ} = X_{ИОН2} - X_{\sum 4} = -\frac{C_1}{C_0} m_1. \tag{4.33}$$

Примером ИП параметров ЕД может служить преобразователь, функциональная схема которого приведена на рис. 4.6.

По сигналу "Пуск" запускается формирователь опорного напряжения ФОН прямоугольной формы $\pm U_0$. Выходное напряжение ОУ имеет вид:

$$U_{OY}(t) = \frac{U_0 C_1}{C_0} + \frac{U_0 C_2}{C_0}\left[1 - \exp(-\frac{t}{R_2 C_2})\right] + \frac{U_0 t}{C_0 R_1}. \quad (4.34)$$

В момент времени $t = t_0$ смены знака напряжения U_0 выходное напряжение ОУ, пропорциональное параметру C_1 исследуемого двухполюсника ИД, поступает на вход первого узла выборки и хранения УВХ1, управляемого ФОН:

$$U_{УВХ1}(t) = U_{OY}(t = t_0) = U_0 C_1 / C_0. \quad (4.35)$$

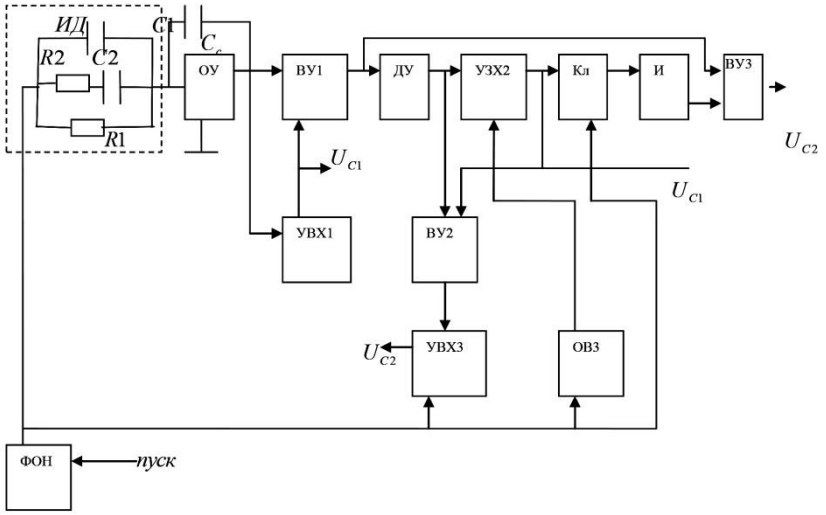


Рис. 4.6. Функциональная схема измерительного преобразователя.

Это напряжение поступает на один из входов первого вычитающего усилителя ВУ1, на другой вход которого поступает напряжение с выхода ОУ. Выходное напряжение ВУ1, равное

$$U_{ВУ1}(t) = U_{ОУ}(t) - U_{УВХ1}(t) = \frac{U_0 C_2}{C_0}\left[1 - \exp(-\frac{t}{R_2 C_2})\right] + \frac{U_0 t}{C_0 R_1}, \quad (4.36)$$

поступает на вход дифференцирующего усилителя ДУ, выходное напряжение которого имеет вид:

$$U_{ДУ1}(t) = \frac{U_0 \tau_Д}{C_0 R_2}\exp(-\frac{t}{R_2 C_2}) + \frac{U_0 \tau_Д}{C_0 R_1}, \quad (4.37)$$

где $\tau_Д$ - постоянная времени ДУ.

В момент времени $t \geq t_{уст} = 6 R_2 C_2$ одновибратор ОВЗ вырабатывает импульс, под действием которого срабатывает второй узел выборки и хранения УВХ1. Напряжение на выходе УВХ2 пропорционально проводимости G_1 параметра R_1:

$$U_{УВХ2}(t) = U_0 \tau_Д G_1 / C_0 . \quad (4.38)$$

Это напряжение через ключ *Кл*, управляемый ФОН, поступает на вход интегратора И, на выходе которого получим:

$$U_И(t) = U_0 \tau_Д t / \tau_И C_0 R_1 = U_0 t / R_1 C_0 , \quad (4.39)$$

где $\tau_И = \tau_Д$ - постоянная времени интегратора И.

На входы второго вычитающего усилителя ВУ2 поступают напряжения с выходов дифференцирующего усилителя ДУ и УВХ1. Выходное напряжение ВУ2 имеет вид:

$$U_{ВУ2}(t) = U_{ДУ}(t) - U_{УХВ2}(t) = \frac{U_0 \tau_Д}{C_0 R_2}\exp(-\frac{t}{C_2 R_2}). \quad (1.40)$$

В момент времени t = 0 максимальное значение выходного напряжения ВУ2 определяется значением проводимости C_2 параметра R_2 исследуемого двухполюсника ИД, что фиксируется третьим узлом выборки и хранения УВХЗ:

$$U_{УВХ3}(t) = U_{ВУ2}(t = 0) = U_0 G_2 \tau_Д / C_0 . \quad (4.41)$$

На входы третьего ВУЗ поступают напряжения с выхода первого ВУ1 и интегратора И. Выходное напряжение ВУЗ изменяется во времени следующим образом:

$$U_{ВУЗ}(t) = U_{ВУ1}(t) - U_{И}(t) = \frac{U_0 C_2}{C_0}\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R_2 C_2}\right)\right]. \quad (4.42)$$

В момент времени $t \geq t_{УСТ} = 6R_2C_2$ это напряжение определяется значением параметра C_2 исследуемого двухполюсника ИД:

$$U_{ВУЗ}(t = t_{УСТ}) = U_0 C_2 / C_0. \quad (4.43)$$

Недостаток рассмотренного преобразователя - ограниченный диапазон изменения соотношений параметров исследуемого двухполюсника ИД.

Из приведенного анализа следует, что для построения ИП значений параметров ЕД наиболее применимы методы инвариантного преобразования параметров электрической цепи с активной ИС на ОУ и импульсным воздействием. Разработке таких ИП посвящено значительное число работ [78, 79-80] и монографии [71,77,81]. Из зарубежных устройств измерения влажности следует отметить [81, 82].

Обобщая, следует отметить, что ЕД при отсутствии в нем предварительно накопленной электрической энергии является пассивным элементом электрической цепи. Поэтому информация о значении его параметров может быть получена лишь в ходе активного измерительного эксперимента, когда на исследуемый ЕД, описываемый параметрами $\prod[\rho, \mathrm{X}, \mathrm{Y}]$, оказывается опорное электрическое воздействие Э(p) и анализируется реакция А(p) измерительной цепи на это воздействие. Здесь: X = {x} - множество информативных параметров ЕД, подлежащих измерению; Y={y} - множество неинформативных параметров ЕД, не подлежащих измерению в данном эксперименте; p - оператор Лапласа или Карсона при записи в операторной форме. Процесс преобразования пассивных параметров П[p,X,Y] в электрический сигнал А(p) осуществляется с участием опорных пассивных цепей $П_0(p)$.

Узел ИП, в котором осуществляется преобразование пассивных параметров ЕД в электрические сигналы, характеризуются оператором Ф(p;П(X,Y);$П_0$), задаваемым обычно

в виде интегрально-дифференциального выражения. Этот оператор определяется топологией ИС, номенклатурой и соотношением параметров ЕД и опорной цепи. Оператор ИС устанавливает соответствие между электрическим воздействием на ИС и ее реакцией на это воздействие, определяемое выходным сигналом ИС:

$$A(\rho) = \Phi(\rho; \Pi(X, Y); \Pi_0) * Э(\rho). \qquad (4.44)$$

В общем случае параметры выходного сигнала ИС (амплитуда, частота, фаза - для гармонического сигнала; спектральные составляющие, мгновенное значение, характер изменения во времени или скорость изменения - для негармонического сигнала) зависят от нескольких параметров ЕД. Это соответствует исходной неразрешимости уравнения преобразования относительно искомых параметров, что требует дополнительной обработки выходного сигнала ИС. Возможные алгоритмы обработки сигнала ИС можно синтезировать, используя методы теории инвариантности. В работах [79,81] показано, что инвариантность в рассматриваемом случае можно обеспечить двумя методами.

Первый или селективный метод обеспечения инвариантности предполагает наличие одного канала преобразования выходного сигнала ИС и основан на селективной (избирательной) обработке, т.е. на выделении путем выполнения определенных операций составляющей выходного сигнала ИС, несущей информацию об интересующем параметре ЕД.

Если неинформативная составляющая выходного сигнала ИС определяется как

$$A_y(\rho) = \Phi_y(\rho; \Pi(Y); \Pi_0) * Э(\rho), \qquad (4.45)$$

то оператор селективного узла обработки $K(p)$ должен удовлетворять условию $K(p) \cdot A_y(p) \equiv 0$. Здесь $A_y(p)$ - операторная форма записи неинформативной составляющей выходного сигнала ИС; $\Phi_y(\rho; \Pi(Y); \Pi_0)$ - оператор ИС по неинформативному параметру. Селекция может осуществляться по уровню, частоте, сдвигу фазы, по спектральному составу, по форме сигнала, по времени и по скорости изменения выходного сигнала.

Второй или многоканальный метод обеспечения инвариантности состоит в увеличении числа исходно неразрешимых уравнений до однозначно разрешимой системы путем составления дополнительных независимых уравнений, аргументами которых являются исходные параметры ЕД. Эти уравнения могут являться результатом дополнительного преобразования непосредственно параметров ИС путем введения одного (или нескольких) дополнительных каналов (ДК).

В случае асимметричных каналов каждый канал имеет различные операторы по компонентам выходного сигнала. Операторная форма записи промежуточных сигналов $\Theta(p)$ имеет вид:

$$\begin{cases} \Theta_1(p) = K_{1X}(p)A_X(p) + K_{1Y}A_Y(p); \\ \Theta_2(p) = K_{2X}(p)A_X(p) + K_{2Y}A_Y(p). \end{cases} \quad (4.46)$$

При условии $K_{1y}(p) \equiv K_{2y}(p)$ и $K_{1x}(p) \neq K_{2x}(p)$ получим:

$$\Delta\Theta = \Theta_1(p) - \Theta_2(p) = [K_{1X}(p) - K_{2X}(p)]A_X(p). \quad (4.47)$$

Отметим, что этот путь практически можно реализовать лишь при временном разделении каналов.

В случае асимметричных воздействий на идентичные каналы необходимо подвергнуть информативную составляющую сигнала ИС предварительному преобразованию L(p):

$$\begin{cases} \Theta_1(p) = K(p)[L(p)A_X(p) + A_Y(p)]; \\ \Theta_2(p) = K(p)[A_X(p) + A_Y(p)]. \end{cases} \quad (4.48)$$

Тогда:

$$\Delta\Theta = \Theta_1(p) - \Theta_2(p) = K(p)A_X(p)[L(p) - 1]. \quad (4.49)$$

Условие реализуемости - $\Delta\Theta \neq 0$, и введение оператора $L(p) \neq 1$ осуществляет решение системы путем задания дополнительного уравнения. Предварительное преобразование может быть селективным, тогда осуществляется предварительное преобразование неинформативной составляющей выходного сигнала ИС.

При использовании многоканальных методов обеспечения инвариантности решение исходной системы уравнений можно выполнить [14, 12] введением в ДК дополнительной регулируемой меры $M_0(p)$:

$$\begin{cases}\Theta_1(p) = K_{1X}(p)A_X(p) + K_{1Y}(p)A_Y(p); \\ \Theta_2(p) = K_{ДОК}(p)Э_2(p)M_0(p);\end{cases} \quad (4.50)$$

$$\Delta\Theta = K_{1X}(p)A_X(p) + K_{1Y}(p)A_Y(p) - K_{ДОК}(p)Э_2(p)M_0(p). \quad (4.51)$$

Используя априорную информацию о неинформативной составляющей выходного канала ИС, выбираем $Э_2(p)$ и $M_0(p)$ - так, чтобы

$$K_{1Y}(p)A_Y(p) - K_{ДОК}(p)Э_2(p)M_0(p) = \varepsilon \to \infty. \quad (4.52)$$

Обычно $Э_2(p)=Э(p)$ и регулирование сигнала в ДК осуществляется изменением меры $M_0(p)$, в качестве которой используют управляемые резисторы или конденсаторы, делители напряжения или цифроаналоговые преобразователи.

На рис. 4.7. преобразователей обобщенная схема, поясняющая [77] алгоритм функционирования инвариантных измерителей ПМД. ИС служит для получения активных величин, определяемых параметрами электрической цепи. Одно- или многоканальный узел обработки УО осуществляет линейное или нелинейное функциональное преобразование, выделяя информативную составляющую выходного напряжения ИС.

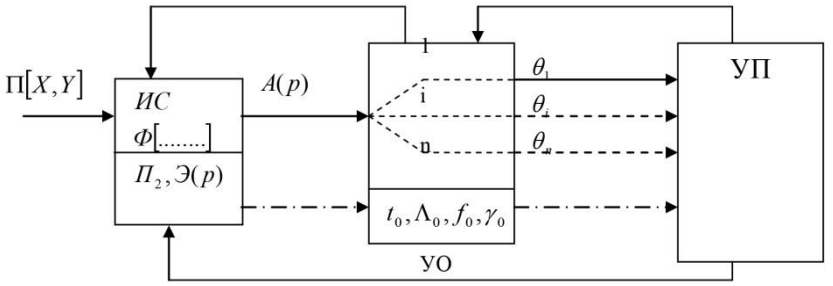


Рис. 4.7. Обобщенная схема алгоритма функционирования инвариантных измерителей ПМД.

Унифицирующий преобразователь УП преобразует информативный сигнал в код. УП воздействует на основной канал или дополнительный ДК узла обработки УО, который, в свою очередь, может воздействовать на ИС путем возможного изменения

места включения ЕД и опорного элемента или изменения источника входного воздействия. УП может также воздействовать на ИС, изменяя параметры опорного элемента или входного воздействия. Кроме основных связей возможно использование дополнительных информационных связей о значении параметров элементов в ИС - $П_0$, *Э(р)* или в узле обработки УО - t_0, A_0, f_0,φ_0 (на рисунке показано пунктирной линией).

Резюмируется, следует отметить:

- ИП с использованием многочастотного воздействия [71,73] имеют значительные погрешности из-за больших значений обусловленности матрицы выходных сигналов ИС, обладают низким быстродействием и требуют наличия достаточно мощного
вычислительного устройства;

- ИП с использованием мостовых схем уравновешивания [76,74,75] сложны в реализации, обладают низким быстро действием и трудно поддаются автоматизации;

- ИП с использованием методов инвариантного преобразования [77,79,13] обладают недостаточной точностью и малым диапазоном допустимых изменений неинформативных параметров.

4.3. Применение методов теории диэлектриков к определению электрофизических параметров сыпучих материалов

Физически сыпучий материал можно рассматривать как своеобразную систему, существующую при определенных условиях. Свойства этой системы определяются параметрами ее твердой и газообразной фаз. Поэтому проблему исследования электрофизических свойств материалов можно рассматривать в общем плане.

Итак, сыпучий материал с физической точки зрения – это дисперсная двухфазная система «твердое тело-газ (жидкость)», существующая при определенном соотношении фаз. Количественно это соотношение определяется коэффициентом плотности укладки K_ρ:

$$K_{\rho} = \frac{V_T}{V} = \frac{V_T}{V_{уд}}, \qquad (4.53)$$

где V_T - объем твердой фазы; V - объем сыпучего материала и $V_{уд}$ - удельный вес сыпучего материала.

С механической точки зрения, сыпучий материал – это дискретная замкнутая система, состоящая из контактирующих между собой частиц твердой фазы. Степень контактирования характеризуется эффективной поверхностью, которая зависит как от плотности укладки материала, так и от гранулометрического состава.

Эти специфические параметры сыпучего материала существенно влияют на электрические параметры сыпучих материалов. В то же самое время многие сыпучие материалы можно рассматривать как гидрофильные дисперсные системы, вода в которых может находиться в различных видах, быть прочно связанной с частицами материала, либо являться лишь дисперсной средой.

Строение поверхности частиц сыпучих материалов может быть неоднородным, в результате чего гидрофильность в разных местах частицы будет различной, т.е. количество связанной воды будет меняться под действием многих факторов. Связывание воды принято относить к действию адсорбционных сил; при этом ряд исследователей считает, что при адсорбции образуется одномолекулярный слой вокруг частицы, а другие, что число слоев может достигать сотен – в зависимости от концентрации адсорбируемого вещества.

Таким образом, можно полагать, что электрофизические свойства сыпучих материалов существенно зависят от форм связи воды с частицами твердой фазы, а также от общего агрегатного состояния сыпучего материала.

Если на образец сыпучего материала наложить высокочастотное поле, то его можно рассматривать как некоторый комплекс, физические свойства и состояние которого определенным образом влияют на прохождение электрической энергии [83,84].

Активная и реактивная составляющие полной проводимости образца материала при вариации его параметров может быть выражена уравнениями:

$$\begin{cases} \Delta Y_G = \dfrac{\partial Y_G}{\partial W} dW + \dfrac{\partial Y_G}{\partial \rho} d\rho + \dfrac{\partial Y_G}{\partial \gamma} d\gamma + ...; \\ \Delta Y_C = \dfrac{\partial Y_C}{\partial W} dW + \dfrac{\partial Y_C}{d\rho} d\rho + \dfrac{\partial Y_C}{\partial \gamma} d\gamma + ... \end{cases} \quad (4.54)$$

Полная проводимость будет равна

$$\Delta Y(Wi) = \Delta Y_G(Wi) + j\Delta Y_C(Wi) = \frac{\partial Y_G(Wi)}{\partial W} dW + \frac{\partial Y_G(Wi)}{\partial \rho} d\rho + \sum + \frac{\partial Y_G(Wi)}{\partial \gamma} d\gamma + ... + j\left(\frac{\partial Y_C(Wi)}{\partial W} dW + \frac{\partial Y_C(Wi)}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial Y_C(Wi)}{\partial \gamma} d\gamma + ... \right) \quad (4.55)$$

Полная проводимость образца сыпучего материала зависит как от активной, так и от реактивной составляющих, измеренных на соответствующей i-ой частоте $(W = 2\pi f)$. Теория диэлектриков позволяет установить параметры, характеризующие образец сыпучего материала, помещенный в высокочастотное поле. В качестве электрических параметров, характеризующих свойства сыпучего материала, можно считать полную проводимость (адмитанц) первичного измерительного преобразователя с образцом материала, выраженную через ее активную Y_G и реактивную Y_C составляющие. Параметры, метрология которых может быть обеспечена, по своей физической сути более естественны, нежели заимствованные из радиотехники добротность, потери и др. К этому заключению можно придти, если учитывать современные тенденции развития в области приборостроения – построение систем с раздельным уравновешиванием активной и реактивной составляющих адмитанца объекта измерения.

4.4. Методика расчета емкостных датчиков для измерения диэлектрической проницаемости сыпучих материалов

В производственной и научно-исследовательской практике большое распространение получили емкостные преобразователи. Емкость плоского или цилиндрического конденсатора при постоянных геометрических размерах зависит (в области слабых полей) только от диэлектрической проницаемости среды, заполняющей конденсатор. Изменение диэлектрической проницаемости вызывает соответствующее изменение емкости датчика, что дает возможность определять качество исследуемой среды. Если среда двухфазна и известны диэлектрические свойства обеих составляющих смеси, то по емкости легко вычисляется объемное соотношение фаз. Этот метод, получивший название диэлектрического, используется в технике для контроля влажности различных технологических сред (сыпучих материалов, почвы, товарной нефти, масел и др.) [85,82,16]. Применение его обеспечивает во многих случаях достаточно высокую точность.

Обратится к источникам погрешностей измерения при диэлектрическом методе. Для расчета и измерения диэлектрической погрешности постоянной смеси используется несколько математических зависимостей, полученных различными авторами.

В частности, уравнение Максвелла, являющееся исходным и отображающее физические процессы в поле электрического конденсатора, после исключения вектора электрического смещения имеет вид [86]:

$$div\overline{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\rho - div\overline{P}\right), \qquad (4.56)$$

где $\overline{E}$ - напряженность электрического поля; ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума; ρ - объемная плотность заряда; $\overline{P}$ - вектор электрической поляризации, отражающий диэлектрические свойства среды.

Это уравнение справедливо только для однородного, гомогенного диэлектрика. Для гетерогенной среды $\overline{P}$ вектор электрической поляризации является функцией координат. Если

среда гетерогенна, то величина $\overline{P}$, а, следовательно, и диэлектрическая проницаемость ε, с изменением координаты изменяются скачком. Функция, выражающая связь между векторами электрического смещения и напряженностью, может претерпевать разрыв, и емкость конденсатора датчика не может быть выражена через то же значение ε_{Cn}, что и для гомогенной смеси. Гетерогенность среды приводит к появлению внутреннего заряда в поле конденсатора, и, следовательно, его емкость зависит не только от состава смеси двух диэлектрических сред, но и от суммарной поверхности, разделяющей обе среды, т.е. от структуры контролируемого объекта.

Отсюда следует различать две возможные структуры воды в контролируемой среде: в виде чрезвычайно мелких капель или частиц, равномерно распределенных по всему объему (квазиизотропная, гомогенная структура); в виде относительно крупных капель воды.

Каждая из этих структур должна разделяться еще на две: с водой, проводимостью которой можно пренебречь; с водой относительно большой проводимости.

Существенное влияние в гетерогенном диэлектрике на диэлектрическую проницаемость смеси оказывает также проводимость неоднородных включений. Большинство предложенных различными исследователями формул для определения диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{Cм}$ выведено именно для квазиизотропного диэлектрика с водой, проводимостью которой можно пренебречь. Таким образом, расхождение теоретических и практических данных вызвано влиянием структуры контролируемой среды на емкость диэлектрического датчика.

Другим источником расхождения может быть способ преобразования (или измерения) емкости датчика. При использовании, например, генераторного метода, при котором датчик входит в колебательный контур, частота генерируемых колебаний зависит не только от емкости, но и от потерь в контуре, в частности, от степени дисперсности воды и от ее проводимости.

Обратимся к влиянию проводимости воды на свойства диэлектрической среды, состав которой необходимо контролировать. В зависимости от электропроводности среды последняя может быть классифицирована либо как диэлектрик, либо как проводник, однако имеются среды, занимающие по электропроводности промежуточное положение. К таковым относятся, например, земля, вода. Решающее влияние на характер поведения этих сред в переменном электромагнитном поле приобретает частота колебаний.

В гармоническом переменном поле круговой частоты ω, напряженность которого $\overline{E}$ изменяется по закону

$$\overline{E} = \overline{E}_m(x, y, z)\cos\omega t, \tag{4.57}$$

определяя вектор плотности тока проводимости $\overline{\delta}$ и производную по времени от вектора электрического смещения $\overline{D}$ (ток смещения), получаем:

$$\begin{aligned} \overline{\delta} &= \partial\overline{E}_m(x, y, z)\cos\omega t; \\ \frac{\partial\overline{D}}{\partial t} &= -\omega\varepsilon\overline{E}_m(x, y, z)\sin\omega t, \end{aligned} \tag{4.58}$$

где ∂ - удельная проводимость.

Отношение амплитуд является параметром, определяющим поведение среды. Последняя рассматривается как диэлектрик, при отношении $\partial/\omega\varepsilon << 1$, и как проводник, если оно намного больше 1.

Проводимость воды зависит в основном от ее минерализации. В естественных условиях минерализация воды колеблется в широких пределах: от минерализации пресной воды (0,1 g/l (г/л)) до минерализации насыщенного раствора (234 g/l (г/л)) [87]. Соответственно удельная электропроводность раствора поваренной соли (NaCl) при 18 °C равна $2\div10^{-2}$ S/m (сим/м) и 20 S/m (сим/м). Определим частоту, при которой уже пресная вода должна рассматриваться как проводник.

Критическая частота, при которой среда занимает промежуточное положение и не может быть отнесена ни к диэлектрику, ни к проводнику, определяется из выражения

$$\delta/\varepsilon = \omega_{Kp} = 2\pi f_{Rh}. \tag{4.59}$$

Если учесть, что ε_B - относительная диэлектрическая проницаемость воды, равная 80, а ε_0 - диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m (Ф/м), то, принимая во внимание значения удельной проводимости для пресной воды и ее диэлектрической проницаемости ε_B^1:

$$\varepsilon_B^1 = \varepsilon_B \cdot \varepsilon_0 = 80 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12} = 7{,}08 \cdot 10^{-10} \text{ F/m (Ф/м)},$$

получим

$$fкр = 4{,}\dot{6} \cdot 10^{-6} \text{ Hz (Гц)}.$$

При частотах, намного больших критической, пресная вода ведет себя преимущественно как диэлектрик, а при частотах, намного меньших критической, - как проводник.

С ростом минерализации воды происходит сдвиг частоты $fкр$ в сторону увеличения. Следовательно, практически в природных условиях на частотах ниже $(1 \div 2) \cdot 10^{-6}$ Hz (Гц) вода должна рассматриваться как проводник, для которого понятие диэлектрической проницаемости теряет смысл.

Используемые частоты [66] не превышают величины $5 \cdot 10^5$ Hz (Гц). В работе [88] максимальная частота достигает 10^7 Hz (Гц). Для сильно минерализованной воды это значение все же намного ниже $fкр$. Для пресной воды область частот 10^6-10^7 Hz (Гц) является промежуточной, где почти равнозначны как проводимость среды, так и ее диэлектрическая проницаемость. Теоретические исследования в промежуточной области затруднительны, и поэтому здесь нет формул, выражающих диэлектрическую проницаемость смеси в зависимости от количества и свойств ее составных частей.

Для определения диэлектрической проницаемости «материал – вода» в каждом конкретном случае в зависимости от структуры смеси должна решаться самостоятельная задача. При частотах, намного меньших критической, задача сводится к определению электрического смещения в поле датчика, заполненном по определенной схеме проводящими включениями – каплями воды, форма которых может быть принята сферической. Это достаточно сложно и сводится к решению уравнения Лапласа.

При изменении параметров материалов с переменной толщиной применение обычных двухсторонних датчиков с плоскопараллельными пластинами встречает большие затруднения, поскольку существенное влияние на результаты измерений оказывают колебания толщины контролируемого материала.

Для измерения диэлектрической проницаемости ε движущихся материалов с переменной толщиной необходим датчик, который создавал бы резко неоднородное поле, убывающее на расстояниях, значительно меньших, нежели толщина испытуемого материала.

Методика расчета датчиков подобного типа. Создаваемое системой плоских металлических электродов шириной a, которые расположены в одной плоскости параллельно друг другу. Расстояние между электродами равно b (рис 4.8). Соседние электроды заряжены разноименно.

Предположено, что система электродов бесконечна в обе стороны и находится в вакууме. Роль изолятора и контролируемого материала оценим позднее.

Масштабом, характеризующим быстроту спадания поля при удалении от плоскости электродов, является величина $S=a+b$. Точный расчет поля при произвольных a и b сложен. В то же самое время для двух крайних случаев, существует упрощенное решение задачи, позволяющее с сделать вывод о характере спадания поля в общем случае.

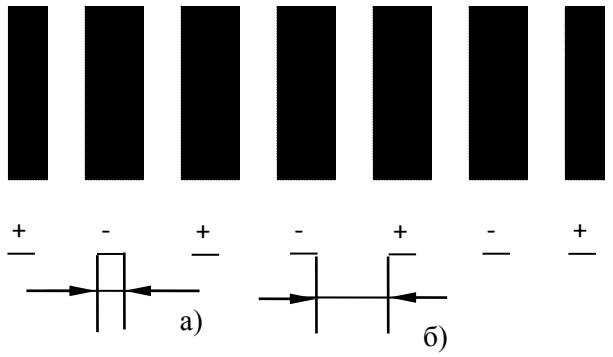


Рис.4.8. Система плоских электродов емкостного датчика.

Случай 1. Пусть $b=0$, $a=S$.

В плоскости, перпендикулярной к плоскости электродов, введем координаты x и y и будем считать, что $x=R_eZ$, $y=I_mZ$, где $Z=x+iy$- комплексная переменная (рис.4.9.).

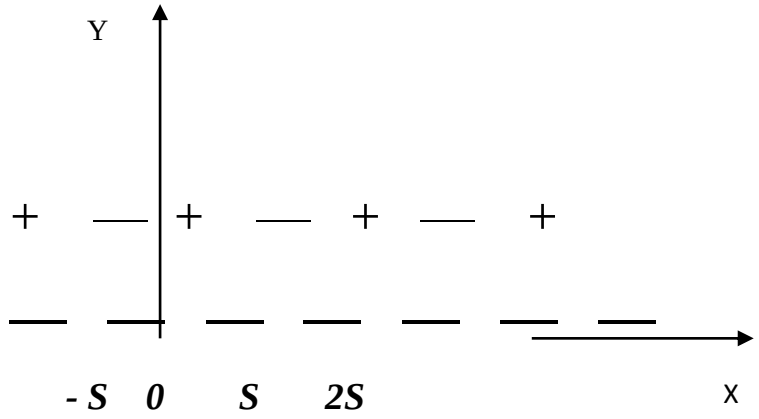


Рис.4.9. Электростатическое поле при a=0.

Потенциал двухмерного электростатического поля $\varphi(x,y)$ можно рассматривать как

$$\varphi(x,y) = I_m f(z), \tag{4.60}$$

где $f(z)$ - аналитическая функция.

В этой задаче $f(z)$ не должна иметь особенностей вне вещественной оси. На самой оси должны выполняться условия: $\varphi(x,y)=0$ для отрицательно заряженных пластин (будем считать их заземленными) и $\varphi(x,y)=V$ для положительно заряженных пластин. Этим условиям удовлетворяет функция:

$$f(z) = \frac{\nu}{\pi} \ln tg \frac{\pi z}{2S} \cdot \tag{4.61}$$

В самом деле, $tg\ \frac{\pi Z}{2S}$ имеет значение, равное нулю в точках $z=2nS$ и равное бесконечности в точках $z+(2n+1)S$, где n - целое число. Когда точка x лежит на положительно заряженных пластинах

$$tg\ \frac{\pi x}{2S} > 0\ ;\ I_m = \frac{V}{\pi}\ln tg\frac{\pi x}{2S} = 0 \qquad (4.62)$$

.

В противном случае

$$tg\ \frac{\pi x}{2S} < 0\ ;\ I_m = \ln tg\frac{\pi x}{2S} = U\ . \qquad (4.63)$$

Можно показать, что

$$\varphi(x,y) = \mathrm{Im}\frac{U}{\pi}\ln\ tg\frac{\pi z}{2S} = \frac{U}{\pi}arctg\frac{d}{c}, \qquad (4.64)$$

где $C + id = tg\ \frac{\pi z}{2S}$ (4.65)

и что

$$d = \frac{\sin\frac{\pi x}{2S}\cos\frac{\pi x}{2S}}{\cos^2\frac{\pi x}{2S}ch^2\frac{\pi x}{2S} + \sin^2\frac{\pi x}{2S}sh^2\frac{\pi y}{2S}}; \qquad (4.\ 66)$$

$$c = \frac{sh\frac{\pi y}{2S}ch\frac{\pi y}{2S}}{\cos^2\frac{\pi x}{2S}ch^2\frac{\pi y}{2S} + Sin^2\frac{\pi x}{2S}sh^2\frac{\pi y}{2S}}; \qquad (4.67)$$

$$\varphi(x,y) = \frac{U}{n}arctg\frac{\sin\frac{\pi x}{s}}{sh}. \qquad (4.68)$$

Вдали от плоскости электродов, когда $\frac{\pi v}{S} >> 1$

$$\varphi(x,v) \cong \frac{U}{n}e^{-\pi v/s}\ \sin\frac{\pi x}{s}. \qquad (4.69)$$

Из этого выражения видно, что вдали от плоскости электродов потенциал (а вместе с ним и напряженность

электрического поля) убывают экспоненциально, затухая в *e* раз на расстоянии l=s/ π .

Оценивается поле вблизи плоскости электродов. Для этого пишется выражение для напряженности поля

$$E_x = -\frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial x} = -\frac{U}{S}\cdot\frac{\cos \pi x/s \cdot sh\pi y/s}{\sin^2 \pi x/s + sh\pi Y/S}; \qquad (4.70)$$

$$E_y = -\frac{\partial \varphi(x,y)}{\partial y} = -\frac{U}{S}\frac{\sin \pi x/s \cdot sh\pi y/s}{\sin^2 \pi x/s + sh\pi y/s}. \qquad (4.71)$$

На нормалях к плоскости электродов, проведенных через линии контакта разноименных пластин, т.е. когда $\sin \pi x/s$=0

$$E_x = -\frac{U}{S}\cdot\frac{\cos \pi x/s}{sh\pi y/s} \approx -\frac{U}{S}\cos \pi x/s\left(\frac{s}{\pi y}\right) \qquad (4.72)$$

при $\pi y/s << 1$. На большом расстоянии от линий контакта, когда $\sin\frac{\pi x}{s} \approx 1$, имеем:

$$E_x \approx -\frac{U}{S}\cdot\frac{\cos \pi x/s}{1+(\pi Y/s)}; E_y \approx \frac{U}{S}\cdot\frac{\pi н/s}{1+(\pi y/s)^2}. \qquad (4.73)$$

Случай 1. Пусть *a*=0, *b*=S.

Это означает, что имеем поле разноименно заряженных линейных проводов с зарядом $\pm q$ на единицу длины. Как и в первом случае, ищем потенциал в виде $\varphi(x,y) = I_m f(x)$. Граничное условие требует, чтобы вблизи положительно заряженных проводов $\varphi(x,y) = 2q\ln r$, а вблизи отрицательно заряженных проводов $\varphi(x,y) = 2q\ln r$, где r - расстояние от провода (рис.4.10)

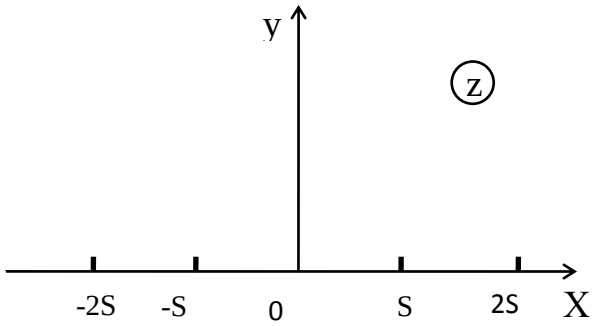


Рис.4.10. Электростатическое поле при b=0.

Вне точек, изображающих провода, f(z) должна быть регулярной. Этим условиям удовлетворяет функция

$$f(z) = 2qi \ln\left(tg \frac{\pi z}{2s} \right); \tag{4.74}$$

откуда

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) &= 2q \ln\left| tg \frac{\pi z}{2s} \right| = q \ln\left(c^2 + d^2\right) = \\ &= q \ln \frac{\sin^2 \frac{\pi x}{2s} \cos^2 \frac{\pi x}{2s} + sh^2 \frac{\pi yz}{2s} ch^2 \frac{\pi y}{2s}}{\left(\cos^2 \frac{\pi x}{2s} ch^2 \frac{\pi y}{2s} + \sin^2 \frac{\pi x}{2s} sh^2 \frac{\pi y}{2s} \right)^2}. \end{aligned} \tag{4.75}$$

Оценивая поле вдали от плоскости электродов $\left(\frac{\pi y}{s} >> 1 \right)$, имеем:

$$\varphi(x, y) = q \left[\frac{\sin^2 \frac{\pi x}{2s} \cos^2 \frac{\pi x}{2s} + sh^2 \frac{\pi yz}{2s} ch^2 \frac{\pi y}{2s}}{\left(\cos^2 \frac{\pi xz}{2s} ch^2 \frac{\pi x}{2s} + \sin^2 \frac{\pi x}{2s} sh^2 \frac{\pi y}{2s} \right)} - 1 \right]^2 \approx q e^{-\frac{\pi y}{s}} \cos \frac{\pi x}{s}, \tag{4.76}$$

т.е., как и в первом случае, поле убывает экспоненциально.

Из приведенного анализа следует, что поле датчика с плоскими электродами вдали от плоскости электродов убывает по закону $\exp\left(\frac{-\pi y}{s}\right)$.

Следовательно, для измерения параметров (например, ε материала, толщина которого d) требуется датчик с такими размерами электродов, чтобы $S \langle\langle d$.

При этом поле в контролируемом материале не достигнет его поверхности и с точностью порядка $\exp\left(\frac{-\pi d}{s}\right)$ будет таким же, как и для материала бесконечной толщины. Таким образом, пренебрегая зависимостью результатов измерений от толщины материала d, мы допустим ошибку порядка $\exp\left(\frac{-\pi d}{s}\right)$.

Следует отметить, что приведенные выше рекомендации практически осуществимы лишь при контроле материалов, обладающих достаточной толщиной.

4.5. Методика расчета емкости датчика одностороннего типа

Расчет емкости датчика одностороннего типа. Она может быть определена следующим образом. Известно, что в любой точке поля потенциал, создаваемый зарядом на пластинах, выражается формулой

$$\varphi = \iiint \frac{\rho}{4T\varepsilon\varepsilon_0} \cdot \frac{dV}{r}, \qquad (4.77)$$

где ρ - объемная плотность заряда; dV - элемент объема заряженного тела; r - расстояние от точки, в которой определяется потенциал, до элемента объема.

Интегрирование производится по всему объему заряженного тела. Зная закон распределения ρ и учитывая, что потенциал пластин - величина постоянная (ее удобно принять за единицу),

можно определить заряд q пластины и рассчитать емкость датчика по следующей формуле:

$$C = \frac{q}{n} = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{2}, \qquad (4.78)$$

если считать, что $\varphi_1 = 1;\ \varphi_2 = -1$ - потенциалы первой и второй пластины, а n – количество пластин.

Такое решение интегрального уравнения связано с решением системы весьма большого числа линейных алгебраических уравнений.

Возможна следующая более простая методика расчета. Распределение плотности заряда по поверхности пластин (электродов) при достаточно большом их числе показано на рис.4.11а. В то же время эпюра распределения заряда на двух параллельных полосках имеет другой вид (рис.4.11б). При этом оказывается, что при ширине полосы, равной приблизительно половине ширины пластины датчика, площадь эпюры поверхностной плотности заряда δ равна приблизительно половине площади эпюры распределения потенциала над пластиной датчика (при одной и той же разности потенциалов между полосами и между пластинами датчика).

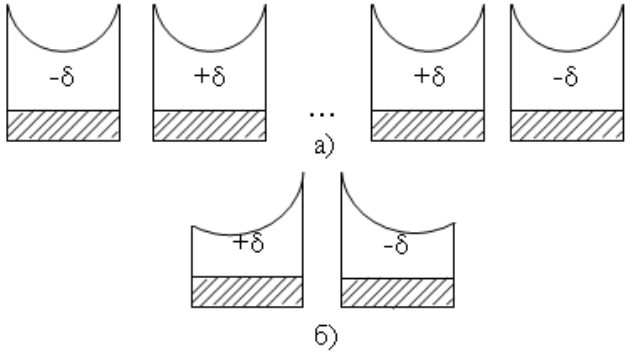


Рис.4.11. Распределение плотности заряда по поверхности электродов.

Это означает, что заряд на единицу длины пластины, расположенной между двумя такими же пластинами при достаточной ее длине, приблизительно равен удвоенному заряду

на единицу длины одной из двух параллельно расположенных полос.

Основываясь на этом, можно предположить, что датчик, состоящий из двух электродов типа гребенок, вложенных одна в другую, при расчете может быть представлен сложенным из двух параллельных полос шириной, равной половине ширины пластины датчика, и длиной, равной длине средней линии зазора датчика.

Таким образом, расчет емкости датчика сводится к расчету емкости двух длинных полос, не представляющему большой сложности.

Формула для подсчета емкости в этом случае имеет вид:

$$C = \frac{l}{4}(\varepsilon + 1)\sum_{k=1}^{n} \tau_K \,, \tag{4.79}$$

где l – длина средней линии зазора между электродами; ε - относительная диэлектрическая проницаемость прокладки; τ_K - линейная плотность заряда; n - число участков, на которые разбивается полоса.

Следует отметить, что погрешность расчетного определения емкости по сравнению с экспериментальным колеблется в пределах 0,75÷16 %. При этом большие погрешности получаются при малом числе электродов-зубцов датчика (первая и последняя цифры соответственно относятся к датчикам с 29 и 5 парами зубцов).

Это вполне закономерно, поскольку погрешность определяется, во-первых, крайними двумя пластинами (при расчете принимается во внимание лишь заряд внутренней половины пластины) и, во-вторых, искажением поля на углах пластин. Первый фактор сказывается тем сильнее, чем меньше число пластин. Влияние второго тем меньше, чем больше высота зубца датчика.

Влияния диэлектрической проницаемости ε на емкость датчика. Пусть полупространство снизу от электродов заполнено диэлектриком с проницаемостью ε_1 (рис.4.12), а сверху – диэлектриком с проницаемостью ε_0. Пусть также $\vec{E}(x, y)$ - напряженность поля датчика в отсутствии диэлектриков. На

границе раздела диэлектриков поле $\vec{E}$ направлено вдоль границы, а на самих заряженных пластинах – нормально к ним. В результате поляризации на границе диэлектрика и пластин появятся заряды с плотностью $\delta_1(X)$ (сверху) и $\delta_0(X)$ (снизу)

.

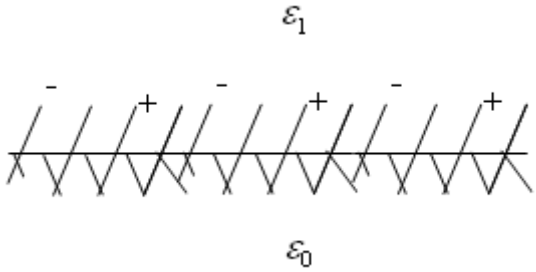


Рис. 4.12. Электроды на границе двух диэлектриков.

Обозначим через

$$\delta^1(X) = \delta(X) - \delta_1(X) - \delta_0(X). \quad (4.80)$$

В результате поле уменьшится и станет равным

$$\vec{E}(X) = \alpha\vec{E}(X) \quad (4.81)$$

Найдется коэффициент α. Учитывается, что поле уменьшается пропорционально плотности зарядов, т.е.

$$\delta^1(X) = \alpha\delta(X). \quad (4.82)$$

Поскольку

$$\delta^1(X) = \frac{E_n(X)}{2\pi}, \quad (4.83)$$

$$\delta_1(X) = E_n^1(X)\frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi} = \alpha E_n(X)\frac{\varepsilon - 1}{4\pi}, \quad (4.84)$$

$$\delta_0(X) = E_n^1(X)\frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi} = \alpha E_n(X)\frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi}, \quad (4.85)$$

а $E_n(X)$ - нормальная составляющая поля, то

$$\frac{E_n(X)}{2\pi} - \alpha E_n(X)\frac{\varepsilon_1 - 1}{4\pi} - \alpha E_n(X)\frac{\varepsilon_0 - 1}{4\pi} = \alpha\frac{E_n(X)}{2\pi}. \quad (4.86)$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{2}{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}. \tag{4.87}$$

Уменьшение напряженности поля в несколько раз приводит к увеличению емкости датчика во столько же раз. Следовательно, в результате помещения электродов датчика в диэлектрик его емкость становится равной

$$C^1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{2} C, \tag{4.88}$$

где C – емкость электродов датчика в пустоте.

Будить считать ε_0 фиксированной (изолятор), а ε_1 - переменной величиной (контролируемый материал). Из (1.88) вытекает, что величина ε_0 не оказывает влияния на зависимость C от ε_1[89]:

$$\frac{dC^1}{d\varepsilon_1} = \frac{C}{r}. \tag{4.89}$$

Иначе обстоит дело с относительными изменениями емкости при изменениях ε_1:

$$\frac{1}{C^1} \cdot \frac{dC^1}{d\varepsilon_1} = \frac{1}{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}. \tag{4.90}$$

В этом случае для увеличения чувствительности датчика выгодно брать изолятор с возможно меньшей проницаемостью ε_0.

На практике лучше всего использовать фольгированный текстолит. При таком способе изготовления легко получить нужную рабочую емкость при хорошей чувствительности датчика.

Размеры датчика определяются в основном геометрическими параметрами контролируемого материала, а также необходимой чувствительностью измерения.

4.6. Влияние массообмена воды на точность измерения сыпучих материалов

Современные сушилки не имеют современных систем контроля и управления процессами сушки сыпучих материалов, которые соответствовали бы необходимым требованиям по цене, точности, надежности и обеспечивали бы возможность контроля влажности сыпучих материалов в режиме реального времени. Влагомеры, которые выпускались до настоящего времени не используются на практике из-за их фактических низких точностей. Использование импортных влагомеров сыпучих материалов для большинства предприятий агропромышленного комплекса (АПК) недоступно из-за высокой стоимости последних. Тем не менее процесс высушивания сыпучих материалов – один из наиболее энергоемких и ответственных из всего цикла хранения и переработки сыпучих материалов. Это связано как с прямыми убытками, обусловленными потерей качеств сыпучих материалов и невозможности их хранения при несоответствующей влажности, так и с увеличением энергетических расходов на процесс высушивания. Размеры убытков по этой причине только для отдельных комбинатов хлебопродуктов весьма существенно за сезон [90]. Актуальность этого вопроса в целом для АПК не вызывает сомнения.

При измерении влажности сыпучих материалов различают прямые и непрямые методы. Прямые методы базируются на удалении из опытной пробы любым способом влаги и измерении массы образца до и после удаления влаги. Самыми распространенными в этой группе являются термогравиметрические влагомеры. Такие влагомеры обеспечивают высокую точность результатов (погрешность на уровне ±0,1%), однако требуют много времени на измерение (от 20 мин. до нескольких суток) [91]. С средины 90-х годов прошлого века предлагаются импортные лабораторные влагомеры со встроенными весами и инфракрасными источниками излучения (иногда такие приборы комплектуются миниатюрными мельницами для размалывания опытной пробы сыпучих материалов), которые благодаря объединению сушильного шкафа, весов и микропроцессорного устройства управления в одном приборе дают возможность уменьшить время

измерения и повысить сходимость результатов; при этом обеспечивается граница допустимой погрешности анализатора на уровне ±0,2…0,3% [92]. Однако для использования таких приборов в лаборатории необходима адаптация их режимов работы к существующим требованиям, для чего необходимо проводить метрологические поверки, что вызывает дополнительные расходы; к тому же практически все приборы, которые используют термогравиметрический метод относятся к группе приборов разрушающего контроля, то-есть опытный образец сыпучих материалов в процессе измерения его влажности становится непригодным для последующего использования, что не всегда приемлемо.

Непрямые методы измерения влажности базируются на зависимости физических свойств объекта контроля – опытной пробы сыпучих материалов - от степени ее увлажненности. В приборах, построенных на таких методах, время измерения не превышает 1 – 5 мин. [93]. Наибольшее распространение в данной группе получили приборы, которые используют электрические способы определения влажности: кондуктометрические (или резистивные), основанные на измерении электрического сопротивления образца при прохождении через него постоянного тока и диэлькометрические (емкостные и микроволновые), действие которых основано на сильной зависимости диэлектрической проницаемости сыпучих материалов от содержания влаги. Это обусловлено аномально большим значением ε воды (81 при 20°С) [94].

Такие влагомеры состоят из первичного (при необходимости промежуточного) измерительного преобразователя и измерительного устройства. На точность диэлькометрических влагомеров влияет много факторов, поскольку ε объекта контроля является сложной функцией многих параметров [94].

$$\varepsilon = f(W, T, G, H, P), \qquad (4.91)$$

где W, T, G, H, P – соответственно влажность, температура, гранулометрический состав пробы, химический состав пробы, электрохимический критерий границы «электрод – сыпучих материалов».

В современных диэлькометрических влагомерах влияние температуры на результат определения влажности в большинстве

случаев учтено в виде поправочных коэффициентов, которые автоматически или в ручном режиме вводятся в конечный результат измерений (влагомеры серии “Kett”, ЦВЗ-3А WILE-65/55, Sinar AP 6060, “Капля”, Grain Master ВПС-100, Mu1tiGrain, Farmpoint GAC500, HE-50, Superpoint; см. данные табл.4.2).

Гранулометрические характеристики сыпучих материалов не идеальны, поэтому при каждом повторном засыпании плотность упаковки опытной пробы в конденсаторе-контейнере разная, и, как следствие, падает повторяемость (сходимость) результатов. Уменьшить влияние плотности упаковки в некоторых современных влагомерах пытаются применением пробоподготовки – предварительного уплотнения сыпучих материалов в камере конденсатора-контейнера (влагомеры “Капля”, Grain Master, ВСП-100 WILE-65, Farmpoint, HE-50, Superpoint; см. данные табл.4.2).

Химический состав опытной пробы сыпучих материалов зависит от его селекционных особенностей, которые определенным образом учитываются введением калибровочных кривых для сортов максимально возможного количества наименований сельскохозяйственных культур в память микропроцессорного блока или комплектацией влагомеров соответствующими таблицами и (или) проведением перед измерением специальной калибровки (влагомеры серии “Kett”, ИВЗ-М1, ИВЗМ1Т, ЦВЗ-3А WILE-55/65, Smar AP 6060, “Капля”, Grain Master ВСН-100, ВСП-6П Mu1ti Grain, ФАУНА, ФАУНА М, Farmpoint GAC500, HE-50, Superpoint; см. данные табл.1.2). Кроме того, на химический состав сыпучих материалов влияют условия, в которых росла культура (почвы, количество удобрений, погодные факторы и др.), которые практически, не поддаются аналитическому прогнозированию и могут быть учтены лишь в единичных случаях при предварительной калибровке с использованием данных, полученных гравиметрическим методом для конкретного вида (сорта) культуры.

Информация о вопросах, связанных с влагообменом на границе «стенка – сыпучих материалов» (электрохимический критерий границы «сыпучих материалов-электрод») в кювете-конденсаторе первичного измерительного преобразователя, в

информации производителей диэлькометрических влагомеров отсутствует, поэтому с высокой достоверностью можно утверждать, что в современных влагомерах влияние этого параметра на $\boldsymbol{\varepsilon}$ опытной пробы сыпучих материалов не учитывается. Существуют лишь варианты, в которых предлагается после проведения нескольких повторных измерений первые полученные результаты влажности пробы отбросить, а другие – усреднить [95].

К отмеченному выше необходимо прибавить, что результаты измерений $\boldsymbol{\varepsilon}$ зависят от соотношения между количеством свободной и связанной влаги в исследуемом материале [96]. Кроме того, существующие диэлькометрические влагомеры дают оценку влажности опытной пробы по значению модуля ее комплексной относительной диэлектрической проницаемости, значение которой находится по формуле:

$$\left|\dot{\varepsilon}\right| = \frac{C'_{изм}}{C_0}, \tag{4.92}$$

где $C'_{изм}$ – измеренное влагомером значение емкости контейнера с сыпучим материалом, C_0 – емкость пустого контейнера.

Значение $C'_{изм}$ можно рассчитать по формуле:

$$C'_{изм} = C_0 \times \varepsilon\sqrt{1+tg^2\delta}, \tag{4.93}$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость опытного материала, $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь в опытной пробе сыпучих материалов.

Иными словами, результат измерения будет зависеть не только от емкости заполненного сыпучих материалов контейнера (влажности пробы), но и от тангенса угла диэлектрических потерь в исследуемом материале (влажности и минерального состава). Способ измерения влажности сыпучих материалов, предложенный в [96], позволяет повысить точность диэлькометрических влагомеров за счет одновременного измерения действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости пробы сыпучих материалов. Однако процесс массообмена воды в объеме сыпучие массы и на

границе «стенка кювете – сыпучих материалов» во время измерений приводит к тому, что степень связи молекул воды со структурой изменяется, и, как следствие, не остаются постоянными на протяжении проведения эксперимента активная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Экспериментальном исследуем влияние процессов влагообмена в кювете-конденсаторе, заполненном сыпучих материалов, на значение относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пробы испытуемого материала.

Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований электрофизических параметров пробы одного и того же сыпучих материалов с разной степенью увлажненности при разных условиях проведения экспериментов в чувствительном элементе конденсаторного типа первичного измерительного преобразователя влагомера.

На рис. 4.13 приведены графики зависимости изменения ε и во времени

при разном увлажнении опытной пробы сыпучих материалов. Как видно из графиков, ε и $tg\delta$ изменяются на протяжении проведения эксперимента тем быстрее, чем выше влажность сыпучих материалов. Так, за 20 минут значения относительной диэлектрической проницаемости пробы сыпучих материалов по сравнению с начальным результатом увеличивается более чем на 10%, а потерь – более чем на 25% для влажного сыпучих материалов и только на 0,3°/об и соответственно на 1,5% - для сухого сыпучих материалов. Таким образом, изменение ε и $tg\delta$ во времени можно использовать как дополнительный информативный параметр при определении влажности сыпучих материалов.

На рис. 4.13 приведены зависимости относительной диэлектрической проницаемости и потерь во времени для пробы влажного сыпучих материалов, полученные с помощью одного чувствительного элемента конденсаторного типа со стенками (обкладками), изготовленными из разных материалов.

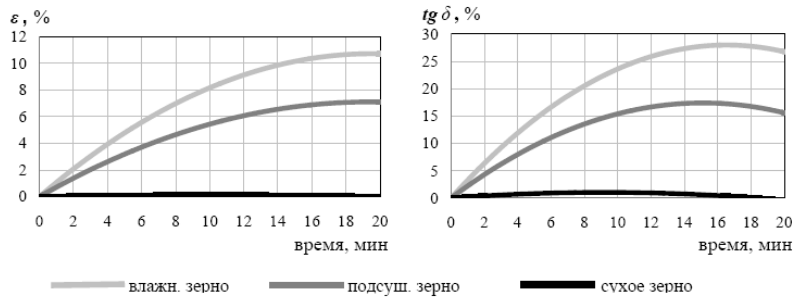


Рис. 1. Зависимость во времени изменения относительной диэлектрической проницаемости и потерь опытной пробы зерна разной увлажненности

Рис.4.13.

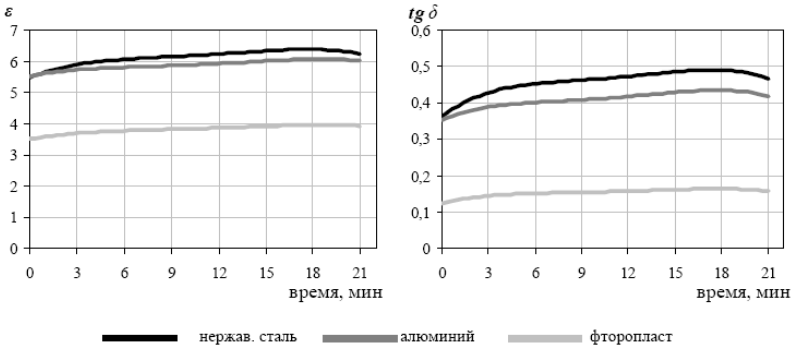


Рис. 2. Зависимость во времени диэлектрической проницаемости и потерь опытной пробы зерна от материала стенок контейнера при одинаковой увлажненности

Рис.4.14.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что после засыпания опытной пробы сыпучих материалов в кювету чувствительного элемента конденсаторного типа (как в объеме сыпучих массы, так и на границе «стенка контейнера – сыпучих материалов») происходят процессы влагообмена (как в направлении “высвобождения”, так и в направлении “связывания” влаги), которые приводят к тому, что значение ε и $tg\delta$ изменяются на протяжении проведения эксперимента. Процессы, которые происходят в объеме опытной партии

сыпучих материалов после засыпания ее в кювете-конденсатор первичного измерительного преобразователя можно объяснить следующим образом. Когда сыпучая масса опытной пробы в кювете находится в состоянии покоя, на связь молекул воды со структурой влияют два фактора – “ связывания” активными центрами сорбции поверхности сыпучих материалов [96] и “высвобождения” в объем менисков, которые образуются в местах прикосновения зерен к стенкам кювете и между собой в объеме опытной пробы. В момент засыпания сыпучих материалов в кювете все мениски разрушаются, при этом происходит высвобождение энергии, в результате чего молекулы воды становятся более связанными, что приводит к уменьшению ε и $tg\delta$. После завершения засыпания наступает новое состояние покоя для сыпучих материалов и происходит обратный процесс поглощения энергии из объема пробы, что приводит к уменьшению степени связи между молекулами воды и структурой сыпучих и увеличению ε и $tg\delta$. Через определенное время, которое зависит от соотношения свободной и связанной влаги в зерне, процессы высвобождения и связывания молекул воды уравновешиваются.

Упомянутые процессы существенно влияют на точность диэлькометрических влагомеров и имеют сложный характер, который зависит от материала стенок (обкладок) чувствительного элемента, а интенсивность влагообмена зависит от степени увлажненности опытной пробы сыпучих материалов.

Необходимо отметить, что влагообмен в объеме опытной пробы сыпучих материалов существенно влияет на результат измерения лишь в приборах насыпного (лабораторного) типа. Для поточных влагомеров, где объект исследования постоянно находится в движении, высвобождение молекул воды в мениски практически не происходит, поскольку они постоянно разрушаются при транспортировке сыпучих материалов в потоке.

Следовательно, для повышения точности результатов диэлькометрических влагомеров необходимо учитывать влияние влагообмена, который происходит как в объеме опытной пробы, так и на границе “стенка кювете – сыпучих материалов”.

Резюмируется, необходимо отметить:

- точность измерения комплексной диэлектрической проницаемости объектов контроля биологического происхождения, например, сыпучих материалов, которые являются основными продуктами сельскохозяйственного производства, после засыпания сыпучих материалов в кювете чувствительного элемента конденсаторного типа, снижается за счет существенного влияния влагообмена как в объеме сыпучие массы, так и на границе “стенка – зерно”;

- процесс влагообмена носит сложный характер и зависит от многих факторов, которые необходимо учитывать при проектировании диэлькометрических влагомеров;

- для повышения точности измерения комплексной диэлектрической проницаемости сыпучих материалов в качестве дополнительного информативного параметра целесообразно использовать зависимость во времени изменения относительной диэлектрической проницаемости ε и потерь $tg\delta$ опытной пробы сыпучих материалов.

Контрольные вопросы

1. Метрологические основы техники измерения влажности.
2. Чем характеризуется влажности газа?
3. Как определяется отношение массы влажного газа к массе сухого газа?
4. С чем заключается количественная оценка влажности твердых веществ?
5. Методы и средства измерения электрофизических характеристик зернистых материалов
6. Объясните функциональная схема измерительного преобразователя.
7. Как определяется полная проводимость измерительный двухполюсник при разомкнутом и замкнутом ключе?
8. Принцип действия схемы измерительного преобразователя с временным разделением каналов.
9. Объясните принцип действия схемы включения емкостного датчика с весовым суммированием.
10. Применение методов теории диэлектриков к определению электрофизических параметров сыпучих продуктов

11. Методика расчета емкостных датчиков для измерения диэлектрической проницаемости сыпучих материалов

12. Методика расчета емкости датчика одностороннего типа

13. Влияние массообмена воды на точность измерения влажности сыпучих материалов.

14. Зависимость во времени изменения относительной диэлектрической проницаемости сыпучих материалов.

4.7. Опытно-экспериментальная установка для исследования электрофизических характеристик сыпучих материалов

Существует значительное число различных способов и схемных решений электрического воздействия на сыпучий материал с целью получения информации о его свойствах [97,98]. Классификация методов исследования электрических свойств сыпучих материалов может быть осуществлена по виду воздействия на материал, что соответствует физическим процессам, происходящим в анализируемом образце. Воздействия могут быть: постоянным током, полями высокой частоты, полями СВЧ, импульсами напряжения с различным спектром частоты и др. Перечисленные воздействия могут осуществляться при действии на образец дополнительных полей, играющих роль интенсификаторов.

При анализе методов исследования электрофизических свойств в высокочастотном диапазоне – таких, как: резонансные (расстройки контура, Q-метра, биений, замещения); с использованием фазочувствительных вольтметров; мостовые методы (с синусоидальным и импульсным питанием и различными способами уравновешивания),- обращает на себя внимание тот факт, что в последнее время все большее распространение получают мостовые схемы с раздельным измерением активной и реактивной составляющих комплексного сопротивления.

Это, по-видимому, объясняется тем, что при исследовании электрофизических свойств сыпучих материалов высокочастотными методами представляется возможным схему замещения образца определенных свойств представить в виде двухполюсника, состоящего из параллельно (последовательно) включенных активного К и реактивного L элементов

электрической цепи, обладающих идентичными с образцом частотными характеристиками; осуществлять компенсацию неконтролируемых свойств за счет включения измерительной ячейки с образцом эталонных свойств в одно из смежных плеч моста; исследовать материалы с большой активной проводимостью (до $1 \cdot 10^2$ мS) в широком диапазоне частот (от 30 до $250 \cdot 10^6$ Hz (Гц)) с высокой точностью; наконец, накопить данные, которые способствовали бы созданию анализаторов свойств сыпучих материалов, работающих на более совершенных принципах, с высоким информационным КПД [70,90, 95,99].

Трудоемкий процесс получения частотных характеристик сыпучих материалов значительно упрощается при использовании свип-анализаторов (с генераторами качающейся частоты – ГКЧ), совершенствование которых, по-видимому, следует проводить в направлении создания анализаторов с раздельным измерением составляющих проводимости.

Большинство экспериментаторов свои исследования обычно проводят на частотах, не превышающих $30 \cdot 10^6$ Hz (Гц) и диапазоне СВЧ. По-видимому, это связано с тем, что применяемая ими аппаратура (Q-метры, мосты типа УМ и др.) не позволяли исследователям работать на более высоких частотах без снижения достоверности получаемых результатов.

Нами частотный диапазон был расширен от $30 \cdot 10^6$ до $100 \cdot 10^6$ Hz (Гц) и далее до $250 \cdot 10^6$ Hz (Гц). Исследования проводились на серийно выпускаемой аппаратуре, что позволяет осуществлять ее поверку по образцовым мерам с целью снижения погрешностей и обеспечить воспроизводимость получаемых результатов.

Блок-схема экспериментальной установки для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов приведена на рис. 4.15.

Основным узлом установки является блок измерительных ячеек 1 и 2, состоящий из двух идентичных емкостных датчиков, из которых одну можно загружать образцом материала с эталонными свойствами, другую – анализируемой средой. Температура в обеих ячейках поддерживается при помощи термостата 5 и холодильного агрегата 6. Контроль температуры образцов осуществляется с помощью автоматического

электронного потенциометра 8. Укладка материала производится виброукладчиком 4 либо поршнем гидравлического пресса 7.

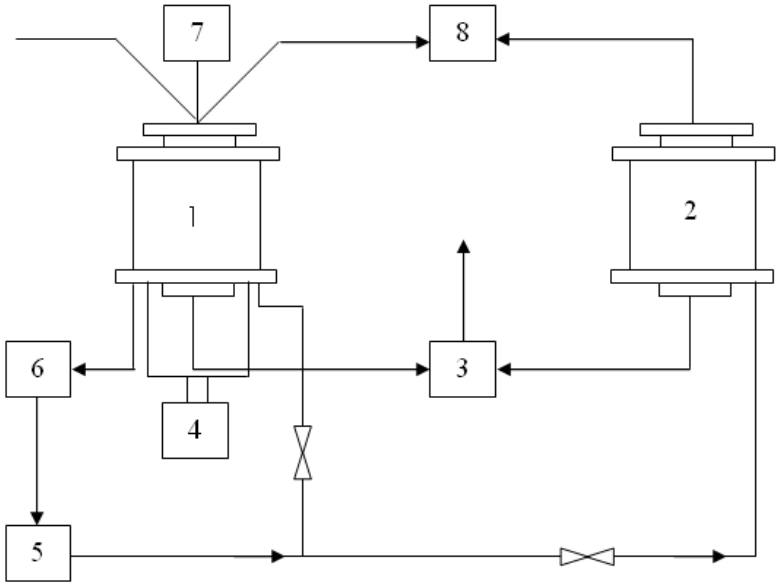


Рис. 4.15. Блок-схема экспериментальной установки для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов: 1 – измерительная ячейка; 2 – измерительная ячейка; 3 – электронный фазометр; 4 – виброукладчик; 5 – термостат; 6 – холодильник; 7 – гидравлический пресс; 8 – автоматический потенциометр.

Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики в функции от влажности, плотности укладки, гранулометрического состава, температуры материала и других параметров можно получить, подключая к блоку ячеек соответствующую аппаратуру измерительного комплекса (рис. 4.16).

Последний состоит из измерителей полных проводимостей 2, электронного фазометра 3, измерителя амплитудно-частотных характеристик (ИАЧХ) с селективным усилителем 4 и цифрового электронного частотомера 5.

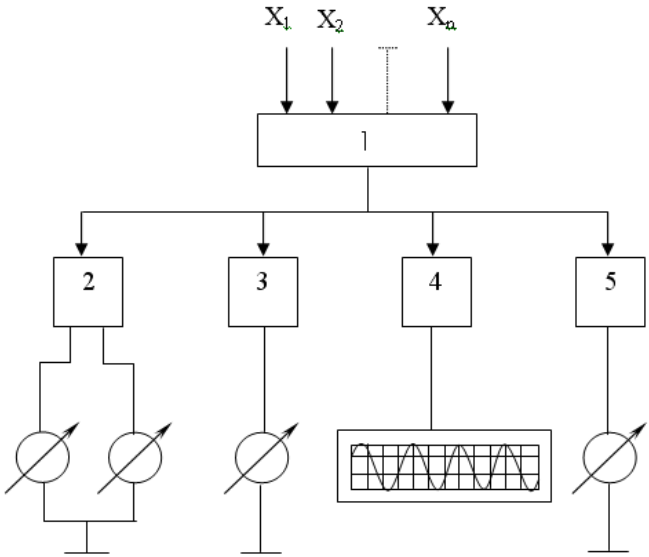


Рис. 4.16. Блок-схема измерительного комплекса для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов в полях высокой частоты:
1 – измерительная ячейка; 2 – измеритель полной проводимости; 3 – электронный фазометр; 4 – измеритель амплитудно-частотных характеристик (ИАЧХ) с селективным усилителем; 5 – цифровой электронный частотомер.

Существуют различные способы раздельного измерения активной и реактивной составляющих полной проводимости. Нами использован способ получения частотно-фазовых характеристик методом измерения фазового сдвига по переходам через нуль.

Принцип работы ИАЧХ позволяет автоматизировать процесс исследования. В основу работы ИАЧХ положен метод генератора качающейся частоты. С целью оперативной регистрации результатов исследования применен двухкоординатный самописец, осуществляющий запись в виде графика двух функциональных зависимостей:

$$A_n(W) = F[X_n(W)], \qquad (4.94)$$

где A_n - амплитуда выходного сигнала на интервале $|W_0, W_k|$;

X_n - значение n-го параметра анализируемого образца.

Другой отличительной особенностью ИАЧХ является использование селективного усилителя, позволяющего увеличить чувствительность метода, воспроизводить АЧХ в линейном и логарифмическом масштабах, измерять одновременно входную амплитуду и частоту в любой точке частотной характеристики путем непосредственного отсчета по шкалам прибора.

Корректировка комплексной частотной характеристики осуществляется путем введения соответствующих поправок. Анализ существующих конструкций измерительных ячеек (ИЯ) емкостного типа (химических, коаксиальных, кампланарных, многоштыревых, двойных емкостно-резистивных и др.) позволяет выбрать конструкцию термостатируемых измерительных ячеек для исследования сыпучих материалов в полях высокой частоты, а также конструкцию полистироловых ячеек – стаканов с внутренними пленочными электродами, позволяющих осуществлять быструю смену образцов. Градуировочные кривые для различных температур представляются в виде $Y_G(W)$ и $Y_C(W)$

Предложенная экспериментальная установка позволяет: варьировать основные параметры сыпучего материала (температуру, плотность укладки, влагосодержание и т.д.) в пределах, удовлетворяющих большинству прикладных задач; выполнять исследования с минимальными затратами времени; получать хорошо воспроизводимые результаты в широком диапазоне частот.

4.8. Емкостные влагомеры сыпучих материалов

Анализ известных методов и средств контроля удельной электропроводности и диэлектрической проницаемости сильнопроводящих веществ [86, 96] свидетельствует о значительных потенциальных возможностях метода Л.М. Плакка, разработанного для измерения электропроводности с помощью уравновешенного моста переменного тока, содержащего синхронный детектор положения равновесия измерительной схемы.

Схема измерительной ячейки, положенная в основу автоматического прибора для измерения диэлектрической проницаемости сильнопроводящих веществ, приведена. Для обеспечения инвариантности измерительной схемы относительно изменения величины тока, протекающего через измерительный двухполюсник, схему Плакка целесообразно дополнить трансформатором высокой частоты, работающим в режиме холостого хода, а контроль состояния равновесия измерительной схемы осуществлять путем непрерывного сравнения падений напряжения на вторичной обмотке трансформатора и измерительном двухполюснике [100, 101].

Для приведенной расчетной схемы измерительного преобразователя с переменным значением рабочей емкости справедливо следующее соотношение между его геометрическими параметрами:

$$\left(\frac{D_1}{D_4}\right)^{1-(\varepsilon_{\min}/\varepsilon_{\max})} = \frac{D_2}{D_3}, \qquad (4.95)$$

где D_1 - диаметр центрального электрода 2; D_2 - внутренний диаметр бесконтактного поршня 3; D_3 - наружный диаметр бесконтактного поршня 3; D_4 - диаметр внешнего электрода 4; $\varepsilon_{\min}$ - минимальное значение диэлектрической проницаемости анализируемой среды; $\varepsilon_{\max}$ - максимальное значение диэлектрической проницаемости исследуемого материала.

Это соотношение обеспечивает необходимый диапазон изменения величины рабочей емкости для известного диапазона изменения диэлектрической проницаемости анализируемых сред.

Ошибка измерения приведенной измерительной схемы определяется выражением:

$$\delta_{отн} = \Delta C / C = (\Delta U(1 + Wtg^2\delta)) / I, \qquad (4.96)$$

где ΔU - абсолютная ошибка при сравнении падений напряжения; $tg\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

Лабораторные испытания автоматического прибора для измерения диэлектрической проницаемости сильнопроводящих анализируемых сред свидетельствуют о том, что максимальная

абсолютная погрешность измерения диэлектрической проницаемости составляет ±0.15 ед.

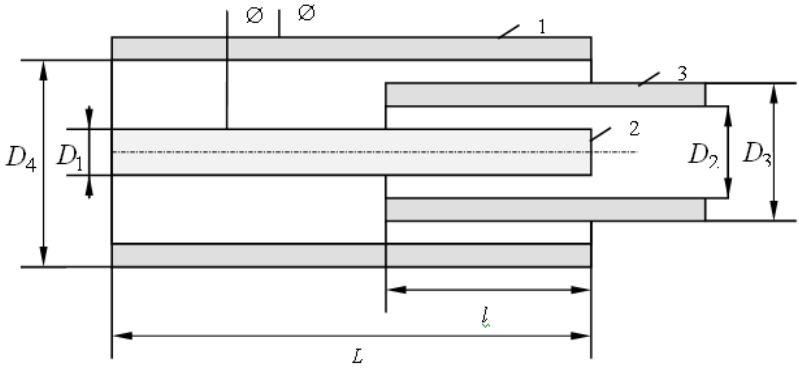


Рис.4.17. Расчетная схема измерительной ячейки автоматического прибора для измерения диэлектрической проницаемости:
1 - внешний электрод; 2 - центральный электрод; 3 - бесконтактный поршень; 4 - глубина погружения поршня в межэлектродное пространство; L - длина электродов конденсатора; D_1 - диаметр центрального электрода; D_2 - внутренний диаметр бесконтактного поршня; D_3 - наружный диаметр бесконтактного поршня; D_4 - диаметр внешнего электрода.

Выше были сформулированы требования к влагомерам, предназначенным для измерения влажности сена, кормовых трав и фуражного сыпучих материалов. Упомянутые требования были учтены при разработке полевого электронно-цифрового емкостного влагомера для кормовых материалов зеленой массы трав, идущей на силос, сенаж и высокотемпературную сушку; сена и фуражного сыпучих материалов.

На рис. 4.18 приведено устройство влагомера, а в табл. 4.1 представлены основные его технические характеристики.

Влагомер представляет собой цилиндр 3 диаметром 150 mm (мм), разделенный на две части. Верхняя часть является измерительной ячейкой 7 объемом 3700 sm^3 ($см^3$). В нижней части 8 размещена плата электрической схемы прибора 9 и источник питания.

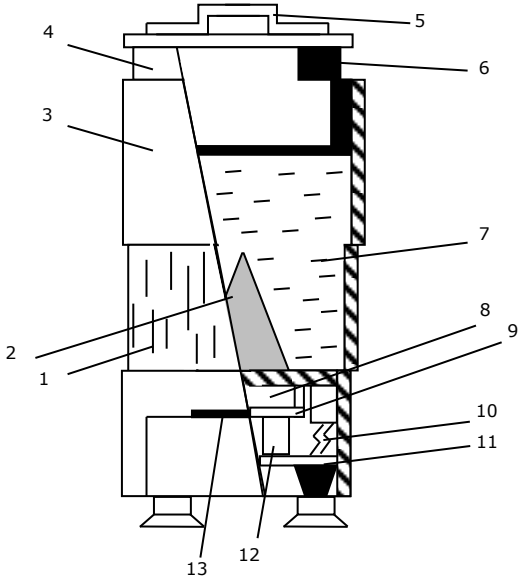


Рис.4.18. Устройство электронно-емкостного влагомера.

На плате размещен индикатор на жидких кристаллах, считывание показаний с которого производится через окно 13 в корпусе прибора. Внутренний электрод 2 выполнен в виде конуса. Наружный электрод 1 представляет собой тонкую металлическую ленту, размещенную с внешней стороны цилиндра. Конструкция электродной системы позволяет получить ее хороший контакт с материалом, быстрое и полное удаление образца из измерительной емкости. Включение измерительной схемы происходит при достижении нужного значения плотности кормового материала в измерительной ячейке. Уплотнение образца осуществляется действием вертикального усилия, прикладываемого оператором к крышке-поршню 4 с ручкой 5. Крышка фиксируется двумя защелками 6 и служит для переноски влагомера. При уплотнении материала днище прибора 11, преодолевая сопротивление пружин 10, перемещается вверх и замыкает контакт 12, включающий измерительную схему. Для получения различной плотности укладки материала предусмотрена возможность регулирования

усилия, необходимого для замыкания контакта. Установлено, что уже при усилии уплотнения, равном 80 Н, достигается удовлетворительная сходимость результатов измерения. При этом должны соблюдаться требования к измельчению материала: размер частиц не должен превышать 20 mm (мм).

Таблица 4.1.

Технические характеристики влагомера для кормовых материалов

№№ п/п	Основные данные	Единицы измерения	Значения
1.	Диапазон измерения влажности	%	8÷85
2.	Основная погрешность измерения по диапазонам влажности 14-40 40-70 Фуражного сыпучих материалов 10-20 20-40	 % % % %	 ±1,5÷2,0 ±3,5÷4,0 ±2,0 ±2,5
3.	Масса анализируемой свежескошенной травы	g (г)	Не менее 500
4.	Время на одно измерение	s (с)	Не более 40
5.	Напряжение питания	V (В)	9
6.	Габаритные размеры	mm (мм)	175x200x355
7.	Масса	kg (кг)	Не более 2,3

Компенсация влияния температуры осуществляется автоматически. Цикл работы прибора состоит из измерения влажности исследуемого образца и внесения поправки на температуру в результате измерения примерно через 17 с после

включения влагомера. Через такой же промежуток времени он автоматически выключается. Небольшая масса, простота в обслуживании делают прибор удобным для работы при заготовке кормовых материалов.

4.9. Экспериментальное исследование частотных характеристик сыпучих материалов

Некоторые сыпучие материалы можно рассматривать как гетерогенные среды и анализировать их частотно-влажностные характеристики (ЧВХ) на основании теоретических формул, полученных Максвеллом или Лоренц-Лорентцом применительно к гетерогенным средам [8]. Однако эти формулы, как и выведенные позже Релеем, Лихтенекер-Бюхнером, В.И. Одолевским, не всегда обеспечивают хорошую сходимостью результатов исследования материалов с большим влагосодержанием, а тем более, если влага способна вступать в химическую реакцию с частицами твердой фазы, в результате чего происходит формирование сложных гидратных молекул, ЭФС которых, как показали опыты, проведенные Н. Миренеско, Б. Дерягиным, А.В. Думанским, П.А. Ребиндером и др., отличаются как от свойств сухого материала, так и от свойств воды. Поэтому вычисление электрофизических характеристик влагосодержащих сыпучих материалов, с учетом влияния температуры, плотности укладки, гранулометрического состава и других факторов - задача, вероятно, трудновыполнимая. Естественным выходом из этого положения является экспериментальные определение необходимых для влагометрии характеристик сыпучих материалов [95,102,103].

Методика исследования ЧВХ. В результате эксперимента необходимо с наибольшей достоверностью раскрыть зависимости полной проводимости (сопротивления) образца от влагосодержания:

$$\sum Y_i = F(W_i, \omega); \qquad (4.97)$$

где $\omega = 2\pi f$, при стабилизации мешающих факторов($П, Г, T, X - const$), т.е. снятие ЧВХ должно рассматриваться как сложная многофакторная задача.

Опытами было установлено, что влагосодержащий образец материала не должен находиться в полости измерительной ячейки более 20÷30 минут, т.к. в противном случае наблюдается миграция влаги по высоте образца, что, по-видимому, связано с электро- и термоосмосом. С целью сокращения времени пребывания образца в высокочастотным поле на время балансировки измерительного комплекса на новых частотах последний отключается от измерительной ячейки специальным высокочастотным разъемом.

Пробы образца для определения влагосодержания отбирали до начала эксперимента (три пробы по 10 g (г)) и после его окончания (три пробы по 10 g (г)) – с различных уровней по высоте рабочей полости измерительной ячейки. Влагосодержание всего образца определяли как среднеарифметическое по шести пробам путем высушивания до постоянного веса.

При исследовании ЧВХ различных сыпучих материалов были найдены зависимости вида:

$$\left.\begin{array}{l} Y_{G_n} = F_1(\omega), \quad Y_{C_n} = F_1(\omega), \quad W_1, \\ Y_{G_n} = F_2(\omega), \quad Y_{C_n} = F_2(\omega), \quad W_2, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ Y_{G_n} = F_n(\omega), \quad Y_{C_n} = F_n(\omega), \quad W_n, \end{array}\right| \begin{array}{c} \\ W_1 \to W_n \\ \Pi, \Gamma, T, X - const. \end{array} \qquad (4.98)$$

Далее, по известным формулам пересчета определяли параметры эквивалентного двухполюсника (модуль $Z(\omega)$ и фазовый угол φ^0), а также $R(\omega)$ и $X(\omega)$ для последовательной схемы замещения образца, $tg\delta(\omega)$ - тангенс угла диэлектрической потери, а затем осуществляли пересчет перечисленных параметров в функции от влагосодержания, т.е. устанавливали зависимости:

$$\left.\begin{array}{l} Y_{G_n} = F_n(W, \omega), \quad Z_n = F_n(W, \omega), \\ Y_{C_n} = F_n(W, \omega), \quad \varphi_n^0 = F_n(W, \omega), \\ tg\delta_n = F_n(W, \omega), \quad R_n = F_n(W, \omega), \ldots \end{array}\right| \begin{array}{c} W_1 \to W_n, \\ \omega_1, \omega_2, \omega_3, \ldots \\ \Pi, \Gamma, T, X - const. \end{array}$$

(4.99)

Анализ частотно-влажностных характеристик образцов различных сыпучих материалов (СМ): сыпучих материалов пшеницы различных типов, муки и др. показывает, что составляющие полной проводимости $Y_G(W,\omega)$ и $Y_C(W,\omega)$ а также полученные по ним $tg\delta(W,\omega)$ и $\varphi^0(W,\omega)$ обладают определенной чувствительностью к влагосодержанию, однако неодинаковой на различных частотах исследованного диапазона.

На характеристиках $tg\delta(W,\omega)$ и $Y_C(W,\omega)$ наблюдается минимум, лежащий в определенном диапазоне частот $1\cdot10^7 \div 1\cdot10^8$ Hz (Гц), установленный Р. Хиппелем и воспроизведенный в наших опытах. Объяснить это явление можно как результат наложения различных механизмов поляризации, происходящих в СМ. В исследованном диапазоне частот модуль полного сопротивления Z(W,ω) асимптотически убывает с ростом частоты, а фазовый угол имеет максимум на интервале частот $20\cdot10^6 \div 50\cdot10^6$ Hz (Гц), несколько смещающийся влево или вправо – в зависимости от материала. Чувствительность модуля полного сопротивления к влагосодержанию с ростом частоты убывает.

В результате расширения диапазона исследования ЧВХ установлено, что частотные характеристики $tg\delta(W,\omega)$ и $Y_C(W,\omega)$ имеют нисходящие и восходящие участки с минимумом, лежащим на частоте, характерной для конкретного сыпучего материала. Наличие такого свойства позволяет по-новому подойти к выбору рабочих частот проектируемых влагометрических систем и выбирать рабочую частоту на любом из перечисленных выше интервалов.

С целью проверки методики экспериментов проведены опыты по выявлению факторов, влияющих на точность получаемых результатов. В результате установлено, что эксперимент желательно проводить по способу, предусматривающему следующие операции:

1.Устанавливаются зависимости:

$$\begin{array}{l|l} Y_{Gn} = F_1(T_1,\omega); Y_{Cn} = F_1(T_1,\omega), & \omega_1,\omega_2,...,\omega_n, \\ Y_{G|\ n} = F_2(T_2,\omega); Y_{Cn} = F_2(T_2,\omega), & \omega_0 - const, \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & \\ Y_{Gn} = F_n(T_n,\omega); Y_{Cn} = (T_n,\omega), & \Pi,\Gamma,X - const. \end{array} \quad (4.100)$$

2. Осуществляется пересчет и находятся зависимости:

$$Y_{Gn} = F(T), Y_{Cn} = F(T), \omega_1,\omega_2,...\omega_n,\omega_1,\omega_2,...,\omega_n\,. \quad (4.101)$$

На частотно-температурных характеристиках в исследованном диапазоне частот есть интервал частот, на котором влияние температуры на реактивную проводимость оказывается минимальным. Влияние температуры на активную и реактивную составляющие полной проводимости материалов органического и неорганического происхождения неодинаково, поэтому подход к практированию измерительных приборов для этих групп материалов должен быть различным, что позволит создать специализированные приборы.

Гранулометрический состав – один из факторов, определяющих электрофизические свойства сыпучих материалов. Поэтому целью эксперимента было установление влияния гранулометрического состава на ЭФС сыпучих материалов.

С помощью стандартного набора сит анализируемые материалы разделяли на фракции ∅ 0,5/1,0; ∅ 2,0/3,0; ∅ 3,0/5,0. Эксперимент проводили путем осуществления 10÷15 равноточных измерений с последующей обработкой результатов стандартными статистическими методами. Установлено, что обе составляющие полной проводимости зависят от гранулометрического состава исследуемых образцов. На кривых зависимости реактивной составляющей проводимости от гранулометрического состава наблюдается минимум, лежащий в интервале частот $1\cdot10^7 \div 3\cdot10^7$ Hz (Гц). Это позволяет подобрать такую пару рабочих частот ω_h и ω_b, расположенных на нисходящем и восходящем участках характеристик $\omega_H < 2\cdot10^7$ Hz (Гц)$< \omega_b$, когда зависимости $Y_C(\omega_H) = F(\Gamma)$ и $Y_C(\omega_6) = F(\Gamma)$ (

ω, n, T, X - const) будут идентичными, т.е. аппроксимируются одними и теми же зависимостями.

Используя такие частоты в двухканальных измерительных системах, можно исключить влияние гранулометрического состава как мешающего фактора. Кроме того, использование повышенных рабочих частот (более $40 \cdot 10^6$ Hz (Гц)) позволяет по-новому подойти к решению вопроса гранулометрического анализа сыпучих материалов высокочастотными методами.

От плотности укладки зависят многие параметры сыпучего материала: коэффициенты внешнего и внутреннего трения, газопроницаемость, теплопроводность и т.д. Из существующих методов определения плотности укладки СМ (аналитического, визуального и радиоактивного поглощения), по мнению ряда исследователей, емкостные высокочастотные методы являются наиболее предпочтительными.

Были исследованы различные способы укладки образцов в полости измерительной ячейки: уплотнение поршнем в течение определенного промежутка времени всей массы образца; послойное уплотнение с различным числом слоев; виброукладка на различных частотах и др.

Образец исследуемого материала определенного влагосодержания и температуры, загружали в полость измерительной ячейки слоями и осуществляли принудительное уплотнение каждого слоя. Необходимость такой операции объясняется тем, что СМ, помещенный в ограниченное стенками ячейки пространство, при создании вертикальных усилий, не способен передать их на все частицы столба материала из-за так называемого сводообразования. Метод укладки сыпучих материалов слоями оказался наиболее воспроизводимым для сыпучих материалов с отношением длины частицы к ее ширине 1:2.

Снимали частотные зависимости образцов от плотности укладки, выраженной в kg/sm^2 (кг/см^2), из ряда 0,5 kg/sm^2, 1,0 kg/sm^2, 5 kg/sm^2, 10,0 kg/sm^2, 15,0 kg/sm^2, 20,0 kg/sm^2. Установлено, что для получения хорошо воспроизводимых результатов число слоев, подвергаемых принудительному уплотнению, для неорганических мелкодисперсных материалов

должно быть не менее трех, а для органических - не менее шести.

Следует отметить, что плотность укладки сыпучего материала существенно влияет на активную и реактивную составляющие полной проводимости. Зависимость активной составляющей на низких частотах ($<30 \cdot 10^6$ Hz (Гц)) от плотности укладки для материалов с малым влагосодержанием незначительна, но с увеличением частоты и влагосодержания резко возрастает. Реактивная составляющая в функции частоты для различных плотностей укладки имеет минимум, который смещается для органических материалов в область более высоких частот, а для нормальных – в область низких.

Таким образом, при разработке экспрессных измерительных систем необходимо обеспечить постоянство плотности укладки сыпучего материала в полости измерительной ячейки, либо применить дополнительные измерительные каналы, обеспечивающие автоматическую компенсацию вариации плотности укладки испытуемого материала.

4.10. Модернизированный СВЧ – влагомер с повышенными точностными характеристиками

Разработанное устройство относится к области СВЧ-влагометрии. Цель разработки - повышение точности измерения.

Устройство может использоваться для контроля влажности различных материалов, например, сыпучих материалов, бумаги, тканей, кожи, пленок и т.д.

Известно устройство для измерения влажности [104], содержащее соединенные последовательно сверхвысокочастотный генератор, управляемый коаксиальный резонатор и детектор, синхронный детектор, соединенный с индикатором, а также генератор прямоугольных импульсов, соединенный с другими входами управляемого коаксиального резонатора непосредственно и через формирователь пилообразных импульсов, а также последовательно соединенные дифференциатор, первый пороговый блок, схему совпадения и ключ и последовательно соединенные второй пороговый блок и инвертор, при этом другой вход ключа соединен с выходами детектора и выходами дифференциатора и второго порогового блока, а выход - с входом синхронного детектора, другой вход

которого подключен к генератору прямоугольных импульсов, а выход инвертора - к другому входу схемы совпадения. Однако это устройство не обладает достаточной точностью измерения.

Известные различные структуры аналоговых дифференциаторов не обеспечивают требуемой точности при дифференцировании измерительных сигналов, наблюдаемых на фоне помех с изменяющимися характеристиками. Используемый в прототипе дифференциатор не позволяет решать задачу получения высококачественных производных и тем самым достижения требуемой точности конечного результата измерения влажности.

Цель достигается тем, что в составе предлагаемого устройства используется гибридный адаптивный дифференциатор первого порядка, построенный на основе метода квазиоптимальной фильтрации.

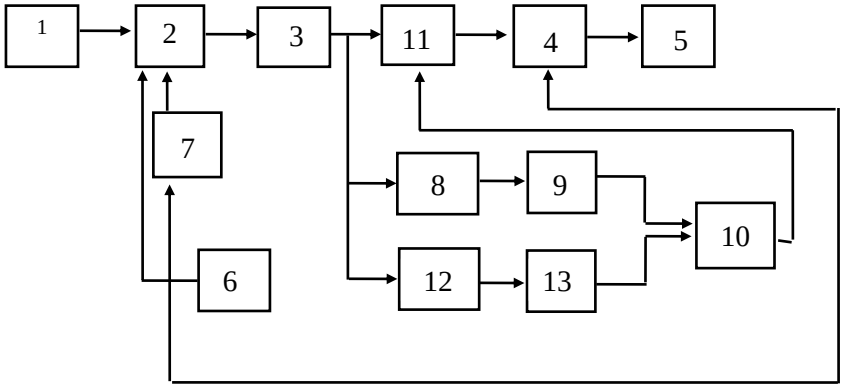


Рис. 4.19. Структурная схема устройства для измерения влажности.

На рис. 4.19. изображена структурная электрическая схема предложенного устройства для измерения влажности.

Устройство содержит сверхвысокочастотный генератор 1, управляемый коаксиальный резонатор 2, детектор 3, синхронный детектор 4, индикатор 5, генератор 6 прямоугольных импульсов, формирователь 7 пилообразных импульсов, дифференциатор 8, первый пороговый блок 9, схему 10 совпадения, ключ 11, второй пороговый блок 12, инвертор 12.

Устройство для измерения влажности работает следующим образом.

Управляемый коаксиальный резонатор 2 возбуждается сверхвысокочастотным генератором 1. Генератор 6 осуществляет поочередное открывание окон связи управляемого коаксиального резонатора 2, обеспечивая поочередное взаимодействие СВЧ-поля управляемого коаксиального резонатора 2 с эталонным и измеряемым образцами.

При этом формирователь 7 линейно перестраивает собственную частоту управляемого коаксиального резонатора 2 так, что в последнем всегда в какой-то момент наступает резонанс независимо от реактивного сопротивления, вносимого образцами.

Амплитуда колебаний при резонансе зависит от влажности измеряемых образцов. Поскольку образцы включаются поочередно, то на выходе детектора 3 наблюдается последовательность колоколообразных импульсов, амплитуда которых зависит от влажности эталонного и измеряемого образцов.

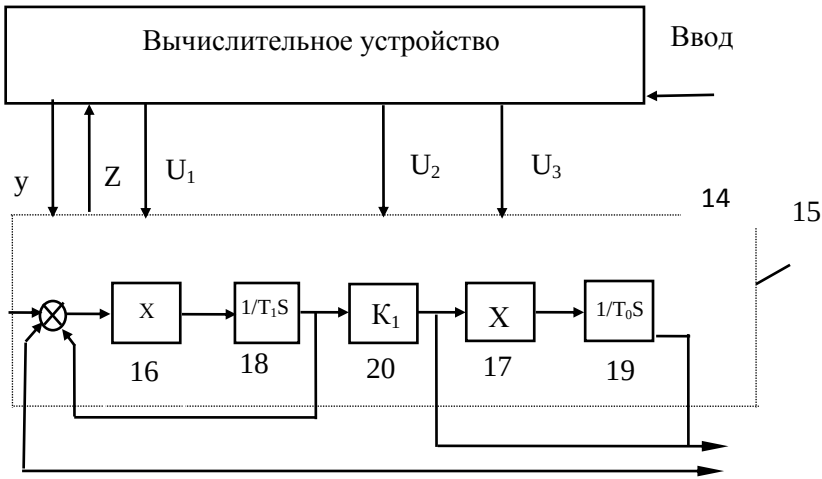
При этом необходимо точно определить момент наступления резонанса и именно в это время произвести отсчет амплитуды. С этой целью сигнал с выхода детектора 3 поступает на дифференциатор 8, напряжение на выходе которого переходит через нуль в момент максимума сигнала на его выходе. Первый пороговый блок 9 фиксирует момент прохождения напряжения через нуль. Чтобы исключить из рассмотрения моменты отсутствия сигнала на выходе детектора 3, они фиксируется вторым пороговым блоком 12 с инвертором 12.

В результате на выходе схемы 10 совпадения импульсы появляются только в моменты максимума сигнала на выходе детектора 2. Эти импульсы поступают на управляющий вход ключа 11, напряжение на выходе которого представляет собой короткие импульсы с амплитудой, пропорциональной влажности эталонного и измеряемого образцов. Далее эти импульсы поступают на синхронный детектор 4, и с него уже детектированный сигнал поступает на индикатор 5.

Таким образом, на выходе устройства получается сигнал, пропорциональный отклонению измеряемой влажности от

нормируемой. Это отклонение фиксируется посредством синхронного детектора 4 строго в момент наступления резонанса как от эталонного, так и от измеряемого образцов.

Изображенный на рис.4.20 дифференциатор 8 состоит из вычислительного устройства 14, выполненного на элементах постоянной памяти и аналоговый схемы 15, которая содержит умножители 16 и 17, интеграторы 18 и 19 и элемент пропорциональности 20. Вычислительное устройство 14 воспринимает аддитивную смесь полезного сигнала *X(t)* и помехи *Z(t).*



В результате анализа последней вычислительное устройство идентифицирует уровни *Q* и *Z* полезного сигнала *X(t)* и помехи *Z(t).* Затем вычислительные устройство 14 выдает сигналы U_1, U_2, U_3, сформированные на основе вычисления в соответствии с выражением:

$$W_{\Phi.опт}(i\omega)=\frac{Q}{R}\left\{\prod_{j=0}^{\frac{N}{2}-1}\left[(i\omega)^2+2i\omega\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}\cos\left(\frac{\pi}{2N}+\frac{\pi}{N}j\right)+\sqrt[N]{\frac{Q^2}{R^2}}\right]\right\}, \qquad (4.102)$$

где $W_{ф.опт(iw)}$ - частотная передаточная функция квазиоптимального фильтра, Q и R- величины, характеризующие соответственно мощность полезного сигнала и помехи, N - величина, получаемая из анализа спектральных плотностей полезного сигнала и помехи (может быть четной и нечетной).

Вычислительное устройство 14 производит подстройку параметров аналоговой части схемы 15.

Дальнейшего повышения точности измерения влажности сыпучих материалов можно добиться, если в составе влагомера использовать дифференциатор второго порядка. На рис.4.21 приведена структурная электрическая схема такого модернизированного устройства для измерения влажности материалов.

Устройство для измерения влажности материалов содержит тактовый генератор 1, СВЧ–генератор 2, перестраиваемый по частоте, дополнительный частотно-задающий элемент 3, разветвитель 4 мощности, линию 5 задержки, приемную и передающую антенны 6 и 7 с исследуемым материалом 8 между ними, блок 9 вычитания, первый 10 и второй 11 блоки выборки и хранения, фильтр 12 нижних частот (ФНЧ), выпрямитель 13, детектор 14, разделительный конденсатор 15, дифференциатор 16 второго порядка, состоящий из вычислительного устройства 17 и аналоговой схемы 18, которая содержит аналоговую часть дефференциатора второго порядка, сумматор 19, элемент пропорциональности 20, умножитель 21 и интегратор 22, а также включает компаратор 23, интегратор 24 и Т-мост 25.

Устройство для измерения влажности материалов работает следущим образом. Колебания СВЧ–генератора 2 разветвляются в разветвителе 4 и, пройдя в одном плече через линию 5 задержки, а во втором – через передающую и приемную антенны 6 и 7 с материалом 8, складываются в Т – мосте 25.

На выходе Т-моста 25 вырабатывается сигнал

$$|E| = 2\cos[\beta(t)(L - l\sqrt{3})], \qquad (4.103)$$

где L -эффективная электрическая длина линии задержки; l - длина канала с материалом; β - волновое число.

Нулевые напряжения на детекторе 14 наблюдаются при условии

$$\beta(t)(L - l\sqrt{3}) = \pi K / 2 \qquad (4.104)$$

или

$$\omega(t) / l(L - l\sqrt{3}) = \pi K / 2, \qquad (4.105)$$

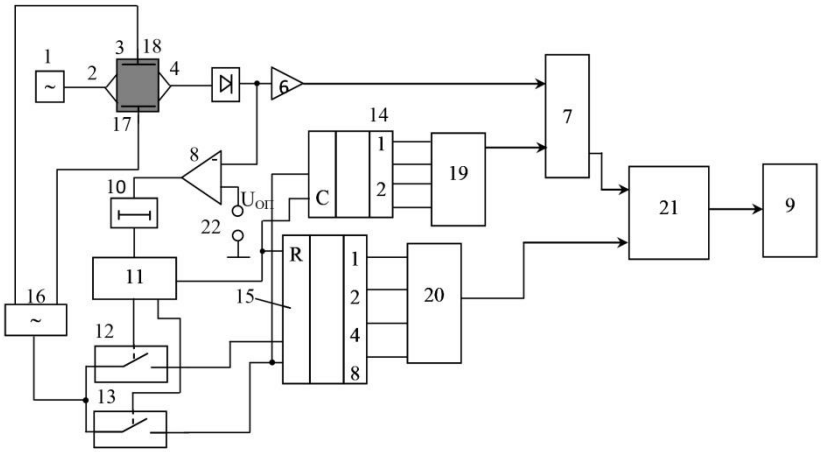


Рис. 4.21 Структурная электрическая схема устройства для измерения влажности сыпучих материалов.

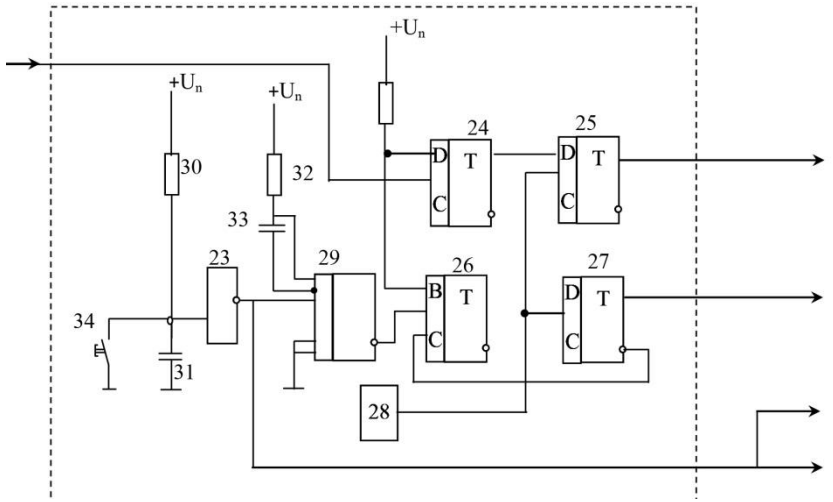


Рис. 4.22. Структурная электрическая схема блока управления влагомера для измерения влажности сыпучих материалов**.**

т.е. при изменении влажности. Следовательно, нулевые значения напряжения на детекторе наблюдаются при частотах

$$\omega(t) = \pi CK/2(L - l\sqrt{3}), \quad (4.106)$$

где C – скорость света в вакууме.

Отсюда следует, что соседние нулевые значения напряжения на детекторе 14 наблюдаются при девиации частоты в $L/l\sqrt{3}$ раз меньше, чем в известном устройстве. Для компенсации уменьшения чувствительности измеряется разность между двумя сигналами нулей на двух незначительно различающихся частотах.

Продетектированный сигнал проходит через разделительный конденсатор 15, выпрямляется блоком 13, сглаживается ФНЧ 12 и поступает на блок обработки информации о затухании радиоволны во влажном материале, т.е. о величине коэффициента ослабления $\alpha_м$. Тот же сигнал поступает последовательно на аналоговый дифференциатор 16 второго порядка, компаратор 23 и интегратор 14. Выходное напряжение интегратора 24 управляет частотой СВЧ-генератора 2. В зависимости от такта генератора 1 выходное напряжение интегратора 24 сглаживается и запоминается в одном из блоков 10 и 11 выборки и хранения и подается на дополнительный управляющий вход генератора 1, снабженный дополнительным частотно-задающим элементом 2. В качестве частотно-задающего элемента 3 может быть использован, например, варактор. Подача напряжения на варактор приводит к работе СВЧ-генератора 2 на другой частоте, отличающейся на величину порядка 250 МГц. Сдвиг нуля напряжения на детекторе 14 приводит к изменению смещения интегратора 24. Разность этих смещений на двух частотах с выхода блока 9 вычитания поступает на вход блока обработки и несет информацию о фазовом сдвиге во влажном материале, т.е. о волновом числе во влажном материале $\beta_м$. При одновременном определении $\alpha_м$ и $\beta_м$ влажного материала функция преобразования имеет вид:

$$\omega=\alpha_м(\beta_c-\beta_o)/\rho_c\alpha_в(\beta_м-\beta_o+\beta_o\alpha_м/\alpha_в-\beta_в\alpha_м/\alpha_в)+\alpha_м(\rho_c-\beta_o), \quad (4.107)$$

где $\alpha_в$ и $\beta_в$ – соответственно коэффициент ослабления и волновое число воды; ρ_c – плотность сухого материала; β_o – волновое число в пустом пространстве; β_c – волновое число сухого материала.

Это выражение является алгоритмом определения влажности по результатам измерений. Принципиальная схема аналоговой части 18 гибридного адаптивного дифференциатора 16 второго порядка приведена.

Вычислительное устройство 17, построенное на элементах постоянной памяти, воспринимает аддитивную смесь полезного сигнала *x(t)* и помехи *Z(t)*. В результате ее анализа вычислительное устройство 17 идентифицирует уровни *Q* и *R* полезного сигнала *x(t)* и помехи *Z(t)* . Затем вычислительное устройство 17 производит подстройку параметров аналоговой части 18 дифференциатора 16 путем выдачи сигналов U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, сформированных на основе вычисления в соответствии с выражением вида:

$$\omega_{onm}(i\omega) = f(\omega, Q/R, N) \quad (4.108)$$

Эта функция представляет собой собственно частотные передаточные функции для четных и нечетных значений *N* соответственно:

$$\omega_{g,\,onm}(i\omega)=Q/R\{\Pi[(i\omega)^2+2\,i\omega\sqrt{}\,Q/R\cos(\pi/2+\pi/Nj)+\sqrt{Q^2/R^2}]\};$$

$$\omega_{g,\,onm}(i\omega)=Q/R\{\,(i\omega+\sqrt{}\,Q/R)\Pi[(i\omega)^2+2\,i\omega\sqrt{}\,Q/R\cos(\pi/Nj)+\sqrt{Q^2/R^2}]\}.$$

В вычислительное устройство 17 предварительно заносится информация о характеристиках полезного сигнала и помехи в виде числа N, определяющего порядок фильтра:

$$N= n-(m-q)-(l-k)>0, \quad (4.109)$$

где *n, m, q, k, l* - целые числа, а *(m-q)- >0,*

Поскольку в дальнейшем полезный сигнал *x(t)* и помеха *Z(t)* дифференцируются *q* раз, то это накладывает ограничения на связь величин *n, (m-q), l* и *k.*

Для того, чтобы сигнал можно было *q* раз продифференцировать, необходимо выполнение соотношения

$$2\int\omega^2qQ^2\Pi(\omega^2+aj^2)/\Pi(\omega^2+вj^2)d\omega<\infty, \quad (4.110)$$

которое имеет место при $2(m-q)+2q<2n$, т.е. при $n>m$. Аналогична связь l и k:

$$2l \geq 2k+2q. \qquad (4.111)$$

Вычислительное устройство 17 устанавливает число элементарных фильтров в аналоговой части дифференциатора второго порядка, а также величину интервала времени наблюдения

$$\Delta t=2\pi\int f_x(Q,\omega)d\omega/\int\omega f_x(Q,\omega)d\omega,\ \omega\neq 0. \qquad (4.112)$$

Величина интервала времени наблюдения Δt является параметром предварительной настройки и устанавливается в зависимости от частотных свойств полезного сигнала $x(t)$, т.е. его существенной частоты. Величины N и Δt являются предварительными и в процессе функционирования гибридного адаптивного дифференциатора могут уточняться на основании накопления дополнительных данных о полезном сигнале $x(t)$ и помехе $Z(t)$. При этом в аналоговую часть схемы адаптивного дифференциатора могут вводиться дополнительные элементарные фильтры.

Таким образом, введение дополнительного частотно-задающего элемента, выполнение индикатора в виде разделительного конденсатора, выпрямителя, фильтра низких частот, адаптивного дифференциатора второго порядка, компаратора нуля, интегратора, первого и второго устройств выборки и хранения, вычитателя и тактового генератора при условии достаточной длины L линии задержки ($L>10l$), где l – электрическая длина плеча с материалом от разветвителя до T-моста, приводит к значительному уменьшению диапазона необходимой девиации частоты СВЧ и учету плотности материала, а выполнение адаптивного дифференциатора второго порядка состоящим из вычислительного устройства и аналоговой части дифференциатора первого порядка, сумматора, элемента пропорциональности, умножителя и интегратора, позволяет добиться высокой помехоустойчивости, причем, отношение «сигнал/помеха» на выходе дифференциатора практически не изменяется при изменении уровня помехи в широких пределах, а сам дифференциатор второго порядка подавляет случайные помехи, уровень которых изменяется со скоростью, при которой

дифференциатор успевает перестроить свои параметры с быстродействием, определяемым быстродействием аналого-цифрового преобразователя, что, в свою очередь, приводит к повышению точности измерения [105,106, 107].

Сравнительные испытания предложенного и известного устройства для измерения влажности показали, что при частоте генератора прямоугольных импульсов 10 kHz (кГц) и небольших отклонениях влажности испытуемого образца от нормированной точность измерения увеличивается примерно в 2 раза.

Качество функционирования систем контроля и управления существенно зависит от использования в законе управления производных от различных сигналов, характеризующих поведение системы. Известны методы построения оптимальных систем контроля и управления на основе использования производных высокого порядка от регулируемой координаты объекта управления [108]. Такие методы имеют в основном методологическое значение и на практике не используются из-за невозможности получения в реальных условиях производных высокого порядка от сигналов, наблюдаемых на фоне разнообразных помех.

Известны различные структуры аналоговых дифференциаторов. Однако они не обеспечивают требуемой точности при дифференцировании сигналов, наблюдаемых на фоне помех с изменяющимися характеристиками [109,110]. Решение задачи получения высококачественных производных может быть выполнено на основе использования методов адаптации для построения дифференциаторов и фильтров.

Рассмотрим структуру гибридных адаптивных дифференциаторов первого и второго порядка, построенных на основе метода квазиоптимальной фильтрации. Рассмотрим также принципиальные схемы таких дифференциаторов и сравним их характеристики с характеристиками дифференциаторов первого и второго порядка, описанных в работе [111].

Структурные схемы гибридных дифференциаторов приведены на рис.2.17. Схема дифференциатора первого порядка (рис. 2.17а) состоит из микропроцессорного контроллера 1 и аналоговой схемы 7, которая содержит умножители 2 и 5,

интеграторы 3 и 6 и элемент пропорциональности 4. Микропроцессорный контроллер воспринимает аддитивную смесь полезного сигнала и помехи *Z*. В результате ее анализа он идентифицирует уровни *Q* и *R* полезного сигнала *X(t)* и помехи *Y(t)*. Затем контролер 1 путем выдачи сигналов U_1, U_2, U_3, сформированных на основе вычисления в соответствии с выражениями

$$W_{\Phi.Onm}(iw)=\frac{Q}{R}\left\{\prod_{j=0}^{\frac{N}{r}-1}\left[(iw)^2+2iw\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}Cos\left(\frac{\pi}{2N}+\frac{\pi}{N}j\right)+\sqrt[N]{\frac{Q^2}{R^2}}\right]\right\}^{-1}, \qquad (4.113)$$

$$W_{\Phi.Onm}(iw)=\frac{Q}{R}\left\{\left(iw+\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}\right)\prod_{j=1}^{\frac{N-1}{2}}\left[(iw)^2+2iw\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}Cos\left(\frac{\pi}{N}j\right)+\sqrt[N]{\frac{Q^2}{R^2}}\right]\right\}^{-1}$$

производит подстройку параметров аналоговой части схемы 7.

Аналогично строится дифференциатор второго порядка (рис. 4.23. в). Дополнительно к схеме дифференциатора первого порядка здесь формируются управляющие сигналы u_4, u_5.

В микропроцессорный контроллер предварительно заносится информация о характеристиках полезного сигнала и помех в виде числа N^1:

$$w_X=\frac{\int_0^\infty wf_X(Q,w)dw}{\int_0^\infty f_X(Q,w)dw}<<w_\gamma=\frac{\int_0^\infty wf_\gamma(R,w)dw}{\int_0^\infty f_\gamma(R,w)dw}. \qquad (4.114)$$

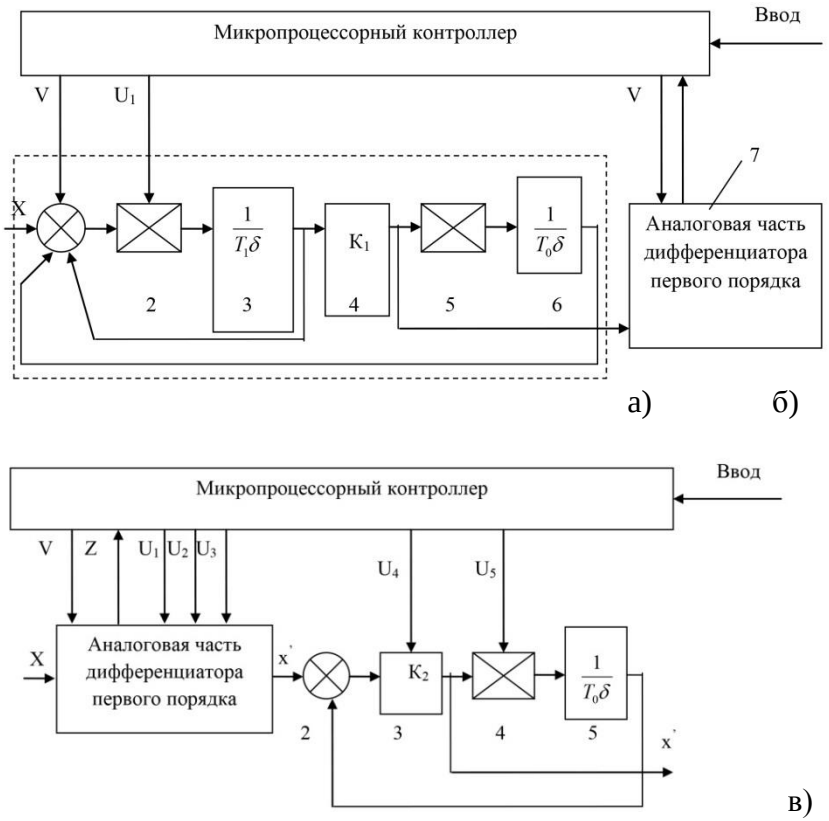


Рис. 4.23. Схемы гибридных адаптивных дифференциаторов:
а) – первого порядка; б) – условное обозначение аналоговой части дифференциатора; в) – второго порядка.

На основании этой информации контроллер устанавливает число элементарных фильтров в аналоговой части дифференциатора, а также величину времени наблюдения

$$\Delta t^1 = \frac{2\pi \int_0^\infty f_X(Q,w)dw}{2\pi \int_0^\infty w f_X(Q,w)dw, w \neq 0}. \qquad (4.115)$$

Последняя является параметром предварительной настройки и устанавливается в зависимости от частотных свойств полезного сигнала *x (t)*.

Отделение полезного сигнала от помех возможно в том случае, если их спектры не совпадают. В промышленных системах контроля и управления реально существует ограничение, при котором существенные частоты спектральной плотности помехи

$$f_\gamma(R,w) = R^2 \frac{C(iw)C(-iw)}{D(iw)D(-iw)} = R^2 \frac{\prod_{j=1}^{K}\left(w^2 + Cj^2\right)}{\prod_{j=1}^{l}\left(w^2 + dj^2\right)} \qquad (4.116)$$

расположены в более высокочастотной области по сравнению с существенными частотами [112]:

$$f_X(Q,w) = Q^2 \frac{A(iw)A(-iw)}{B(iw)B(-iw)} = R^2 \frac{\prod_{j=1}^{m-q}\left(w^2 + aj^2\right)}{\prod_{j=1}^{n}\left(w^2 + bj^2\right)}, \qquad (4.117)$$

т.е.

$$w_X = \frac{\int_0^\infty w f_X(Q,w)dw}{\int_0^\infty f_X(Q,w)dw} << w_\gamma = \frac{\int_0^\infty w f_\gamma(R,w)dw}{\int_0^\infty f_\gamma(R,w)dw}. \qquad (4.418)$$

Здесь m,q,n,k,l – целые числа, а $(m-q)>0$, $A(iw)$, $R(iw)$, $C(iw)$ $D(iw)$ - нормированные многочлены.

Поскольку в дальнейшем полезный сигнал и помеха q дифференцируются, то это накладывает ограничения на связь величин n и $(m-q)$, l и k. Для того, чтобы сигнал можно было q раз продифференцировать, необходимо выполнить соотношения

$$2\int_0^{\infty} w^2 qQ^2 \frac{\prod_{j=1}^{(m-q)}\left(w^2+aj^2\right)}{\prod_{j=1}^{n}\left(w^2+bj^2\right)}dw<\infty, \qquad (4.119)$$

которые имеют место при $2(m-q)+2q<2n$, т.е. при $n>m$. Аналогична связь l и k: $2l\geq 2k+2q$, откуда $l>k+q$.

Величины N^1 и Δt^1 являются предварительными и в процессе функционирования гибридного дифференциатора могут уточнятся на основе накопления дополнительных данных о полезном сигнале и помехе.

Для возможности сопоставления погрешностей дифференцирования путем численных расчетов полезный сигнал и помеха представлены синусоидальными сигналами:

$$U_C(t)=U_{C.вх}Sin2\pi f_C t; \qquad (4.120)$$

$$U_n(t)=A_{n.вх}Sin2\pi f_n t, \qquad f_n>f_C \qquad (4.121)$$

Поскольку погрешности дифференцирования при гармонических сигналах в основном определяются фазовым сдвигом, то удобно такие сигналы использовать при сопоставлении различных фильтров.

Частотная передаточная функция дифференциатора может быть записана как

$$w_{Onm}(iw)=\frac{Q}{R}\cdot\frac{B(iw)(iw)^q}{A(iw)F(iw)}\sum_{j=1}^{2n}\frac{A(bj)}{Bj(bj)}\cdot\frac{1}{iw-bj} \qquad (4.122)$$

Для четных и нечетных N частотные передаточные функции имеют соответственно следующий вид:

$$w_{Onm}(ш ц)=\frac{Q}{R}(iw)^q\left[\prod_{j=1}^{\frac{N}{2}-1}\left\{(iw)^2+2iw\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}Cos\left(\frac{\pi}{2N}+\frac{\pi}{N}j\right)+\sqrt[N]{\frac{Q^2}{R^2}}\right\}\right]^{-1}, \qquad (4.123)$$

$$w_{Onm}(iw)=\frac{Q}{R}(iw)^q\left\{\left(iw+\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}\right)\prod_{j=1}^{\frac{N-1}{2}}\left[(iw)^2+2iw\sqrt[N]{\frac{Q}{R}}Cos\left(\frac{\pi}{N}j\right)+\sqrt[N]{\frac{Q^2}{R^2}}\right]\right\}. \qquad (4.124)$$

Последние выражения представляют собой функции вида

$$w_{Onm}(iw) = f\left(w, Q/R, N\right).$$

На основании (2.41) и (2.42), а также (2.38) передаточные функции дифференциаторов первого и второго порядка запишутся в виде:

$$w_1(\delta) = \frac{T_0\delta}{\frac{R}{Q}\delta^2 + \sqrt{\frac{2R}{Q}}\delta + 1} = \frac{T_0\delta}{T_1\frac{T_0}{k_1}\delta^2 + \frac{T_0}{k_1}\delta + 1}; \qquad (4.125)$$

$$w_2(\delta) = \frac{T_0T_2\delta}{\left(\sqrt[3]{\frac{R}{Q}}\delta + 1\right)\left(\sqrt[0]{\frac{R^2}{Q^2}}\delta^2 + \sqrt[3]{\frac{R}{Q}}\delta + 1\right)} = \frac{T_0T_2\delta^2}{\left(\frac{T_2}{k_2}\delta + 1\right)\left(T_1\frac{T_0}{k_1}\delta^2 + \frac{T_0}{k_1}\delta + 1\right)} \qquad (4.126)$$

Принято $N = \left(q + 1\right)$, что совместно с (2.38) и (2.39) не нарушает общности результатов.

Для схемы (рис.4.24. а) и выражения (2.43) приняты следующие обозначения:

$$T_0 = R_0C_0/U_3 = U_{Вых}/\left(w_CU_{Вх}\right);\ k_1 = U_2 = T_0\sqrt{Q/\left(2R\right)};$$

$$T_1 = R_0C_1/U_1 = \sqrt{R/\left(2Q\right)}, \qquad (4.127)$$

где u_1, u_2, u_3 - сигналы перестройки параметров схемы; $w_C = 2\pi f_C$ – угловая частота полезного сигнала; $u_{вых}$ - требуемое значение амплитуды выходного сигнала.

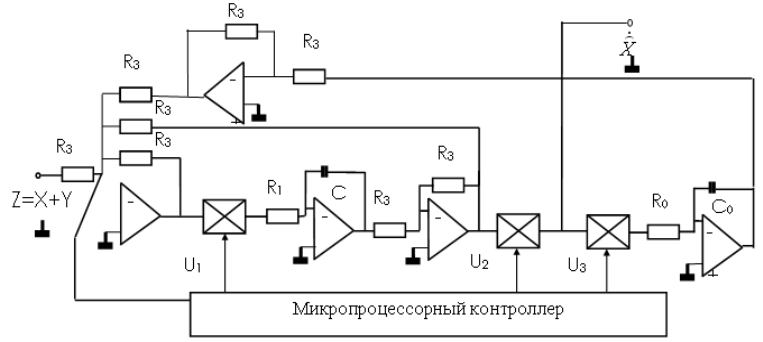
Аналогично для дифференциатора второго порядка имеем:

$$T_0 = R_0C_0/U_3 = U_{Вых}/\left(w_Cw_{Вх}\right); \qquad (4.128)$$

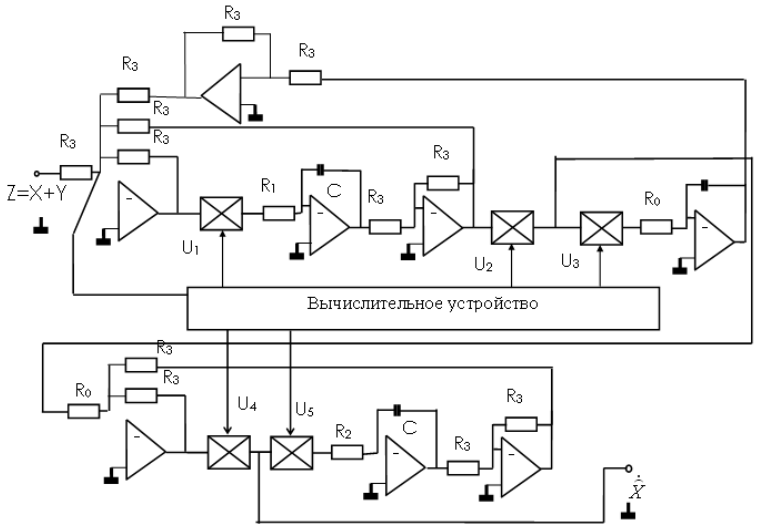
$$k_1 = U_2 = T_0\sqrt[3]{Q/R};\ T_1 = R_1C_1/U_1 = \sqrt[3]{R/Q}; \qquad (4.129)$$

$$T_2 = R_2C_2/U_5 = 1/wc;\ k_2 = U_4 = T_2\sqrt[3]{Q/R}, \qquad (4.130)$$

где u_4, u_5 - сигналы перестройки параметров схемы.



а)



б)

Рис. 4.24. Принципиальная схема аналоговой части дифференциаторов: а) первого порядка; б) второго порядка.

Микропроцессорный контроллер гибридных дифференциаторов оценивает уровни Q и R, вычисляет требуемые значения параметров схемы в соответствии с выражениями (4.127) – (4.130), а также выдает сигналы перестройки структуры дифференциаторов при накоплении дополнительной информации о сигналах. При этом в аналоговую

часть схемы дифференциатора могут вводиться дополнительные элементарные фильтры.

На рис. 4.25. приведены принципиальные схемы неадаптированных дифференциаторов первого и второго порядка [6], настроенных на ту же частоту полезного сигнала, что и адаптивные.

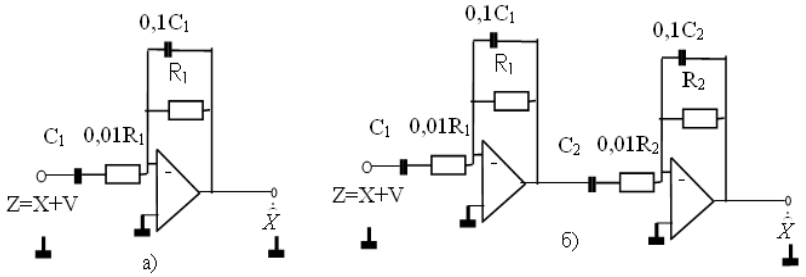


Рис.4.25. Принципиальные схемы неадаптивных дифференциаторов: а) первого порядка; б) второго порядка.

Передаточные функции неадаптивных дифференциаторов первого и второго порядка имеют вид

$$w_1^*(\delta) = T_{Д1}\delta \Big/ \left[(0{,}1T_{Д1}\delta + 1)(0{,}01T_{Д1}\delta + 1)\right]; \qquad (4.131)$$

$$w_2^*(\delta) = \frac{T_{Д2}T_{Д1}\delta^2}{(0{,}1T_{Д1}\delta + 1)(0{,}01T_{Д1}\delta + 1)(0{,}1T_{Д2}\delta + 1)(0{,}01T_{Д2}\delta^2 + 1)}, \qquad (4.132)$$

где $T_1 = R_1C_1;\ T_{Д2} = R_2C_2$.

Абсолютную погрешность дифференцирования можно определить как

$$\Delta = \sqrt{\Delta_Ф^2 + \Delta_П^2}, \qquad (4.133)$$

где $\Delta_ф$ - абсолютная погрешность за счет сдвига фазы производной полезного сигнала; $\Delta_п$ - абсолютная погрешность за счет аддитивной помехи.

Амплитудное отклонение сигнала на выходе дифференциатора от идеального сигнала производной за счет

сдвига фаз может быть представлено гармонической функцией с частотой полезного сигнала f_C и с амплитудным значением

$$A_{\Phi} = 2A_C Sin(\Delta\varphi/2), \tag{4.134}$$

где A_c - амплитуда идеального сигнала производной ; $\Delta\varphi$ - сдвиг фаз между идеальным и истинным сигналом производной.

Фазовая погрешность численно равна действительному значению функции амплитудного отключения

$$\Delta_{\Phi} = \sqrt{2}A_{\Phi}/2 = \sqrt{2}A_C Sin(\Delta\varphi/2). \tag{4.135}$$

Погрешность за счет действия помех (2.39) равна значению помехи, действующему на выходе дифференциатора

$$\Delta_{\Pi} = \sqrt{2}A_n/2, \tag{4.136}$$

где A_n - амплитуда помех на выходе дифференциатора.

Для сравнения адаптивных и неадаптивных дифференциаторов будем использовать относительную и приведенную погрешности:

$$\Delta_{Отн} = \Delta\sqrt{2/A_C}\ ;\ \Delta_{Пр} = \Delta\sqrt{2/D}\ , \tag{4.137}$$

где D - максимальное положительное значение выходных сигналов, не выходящие за рабочий диапазон операционных усилителей.

Когда амплитуда выходных сигналов неадаптивного дифференциатора повышает значение D (операционный усилитель работает в режиме ограничения), теоретически возможная погрешность

$$\Delta \approx \Delta_n = \sqrt{2A_n/2} = \left(\sqrt{2}/2\right)A_{n.Bx}\left|k(iw)\right|, \tag{4.138}$$

где $A_{n\cdot вх}$ - амплитуда значения помех на выходе дифференциатора.

Модуль максимального коэффициента передачи дифференциаторов первого и второго порядка определяются отношениями:

$$\left|k_1(iw)\right| = w_n T_{D1} \Big/ \sqrt{1+\left(0{,}1T_{D1}w_n\right)^2}\ , \tag{4.139}$$

$$\left|k_2(iw)\right| = \frac{w_n^2 T_{D1} T_{D2}}{\sqrt{\left(1+0{,}01 w_n^2 T_{D1} T_{D2}\right)^2 + 0{,}01 w_n^2 \left(T_{D1}+T_{D2}\right)^2}}. \quad 4.140)$$

При получении формул (4.139) и (4.140) в выражениях (4.31) и (4.32) пренебрегаем малыми величинами $0{,}01\,T_{D1}$ и 0,01.

Результаты оценки погрешностей дифференциаторов первого и второго порядка приведены в табл. 4.2. Здесь знаком «*» отмечены значения погрешности, полученные с помощью выражений (4.136) и (4.137), когда операционный усилитель схемы дифференциатора работает в режиме ограничения.

Таблица 4.3

Оценка погрешностей дифференциаторов первого и второго порядка

№№ п/п	$\frac{Q}{R}$	Погрешность, %	Результаты оценки следующих f_D, f_n, Hz (Гц)					
			0,04/0,83		0,08/0,83		0,08/3,84	
			Адап-тивная	Неадап-тивная	Адап-тивная	Неадап-тивная	Адап-тивная	Неадап-тивная
Дифференциатор первого порядка								
1	10	$\Delta_{Отн}$	61,8	180	42,4	96,0	24,9	155,0
2	10	$\Delta_{Пр}$	6,2	18	8,5	19,2	6,2	40,0
3	5	$\Delta_{Отн}$	65,7	360	47,0	180,0	22,8	444,0
4	5	$\Delta_{Пр}$	6,6	36	9,5	36,0	4,6	88,8
5	1	$\Delta_{Отн}$	88,8	1924*	81,5	1924,0*	71,5	2220,0*
6	1	$\Delta_{Пр}$	8,9	112*	16,3	192,0*	14,3	444,0*

Дифференциатор второго порядка								
7	10	$\Delta_{Отн}$	252,0	1736*	83,3	868*	61,0	2210*
8	10	$\Delta_{Пр}$	28,2	174*	38,3	174*	28,0	442*
9	5	$\Delta_{Отн}$	235,0	3472*	85,0	1736*	63,0	4416*
10	5	$\Delta_{Пр}$	28,0	347*	37,5	343*	27,7	883*
11	1	$\Delta_{Отн}$	300,0	17360*	108,0	8680*	87,0	22080*
12	1	$\Delta_{Пр}$	30,0	1736*	49,6	1736*	40,0	4416*

Приведенные результаты показывают, что адаптивные дифференциаторы отличаются высокой помехоустойчивостью, удовлетворительно работают при уровнях помехи, равных или превышающих уровень полезного сигнала, причем, отношение «сигнал/помеха» на выходе адаптивных дифференциаторов практически не изменяется при колебаниях уровня помехи в широких пределах.

Кроме того, адаптивные дифференциаторы подавляют случайные помехи, уровень которых изменяются со скоростью, при которой дифференциатор успевает перестроить свои параметры, причем, время перестройки, в основном, определяется быстродействием аналого-цифрового преобразователя. Помехоустойчивость адаптивных дифференциаторов остается высокой и в том случае, когда существенные частоты спектров полезного сигнала и помехи расположены достаточно близко.

На основе рассмотренной методики синтеза могут быть реализованы адаптивные дифференциаторы, обеспечивающие получение с приемлемой для практических целей точностью производных выше второго для сигналов, наблюдаемых на фоне помех. Неадаптивные дифференциаторы имеют гораздо более низкую помехозащищенность, а практическая реализация

дифференциаторов порядка выше второго, работающих в условиях помех, практически невозможна.

Контрольные вопросы

1. Опытно-экспериментальная установка для исследования электрофизических характеристик сыпучих тел.
2. Объясните принцип работы экспериментальной установки для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов.
3. Принцип действия измерительного комплекса для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов.
4. Емкостные влагомеры сыпучих материалов.
5. Экспериментальное исследование частотных характеристик сыпучих материалов.
6. Структурная электрическая схема устройства для измерения влажности сыпучих материалов.
7. Блок контроля влажности и температуры сыпучих материалов.
8. Структурная электрическая схема блока управления влагомера для измерения влажности сыпучих материалов.
9. Модернизированный СВЧ – влагомер с повышенными точностными характеристиками.
10. Устройство контроля и регистрации влажности и температуры сыпучих материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение комплексной проблемы экономии энергетических ресурсов в значительной мере должно обеспечиваться созданием, совершенствованием и рациональным практическим применением энергосберегающих технологий и оборудования.

Простота конструкции, большая производительность и универсальность барабанных сушильных агрегатов, как уже отмечалось выше, обеспечили широкое распространение их в различных отраслях промышленности. Технологический процесс тепловой сушки характеризуется высокой энергоемкостью. При этом основные затраты энергии в барабанных сушилках приходится на нагрев сушильного агента и на привод барабана.

Интенсифицировать использования сушильного агента можно путем улучшения условий контакта высушиваемого материала и теплоносителя. При этом желательно располагать таким распределительным устройством, которое бы позволяло равномерно распределять высушиваемый материал по поперечному сечению барабана.

Поскольку во многих отраслях народного хозяйства процесс сушки является одной из важнейших технологических операций, определяющей как качество конечной продукции, так и технико-экономические показатели производства в цело, то возникает задача исследования в промышленности более эффективна сушильных установок. Что касается в этом отношение, барабанных сушильных агрегатов, то необходима конструкция аппарата, не требующая дорогостоящих опорно-упорных станций и исключаются потери высокотемпературного теплоносителя через уплотнения.

Развитие фермерских хозяйств и мини- пунктов переработки и хранения сыпучих материалов в особенности, семенного и селекционного, требует создания энерго - и ресурсосберегающей мобильной сушильной техники, позволяющей проводить сушку или активное вентилирование сыпучих материалов при первичной обработке или хранении. Научно обоснованные методы расчёта и рекомендации по проектированию такого класса сушильной техники в настоящее время отсутствуют.

Аппаратурное оформление стадии подобных дисперсных материалов с высоким внутридиффузионным сопротивлением весьма разнообразно. Для проведения процесса, как правило, используются шахтные сушилки с плотным продуваемым движущимся (работают по принципу прямо-, противотока или перекрестного движения фаз), и установки активного вентилирования, (работаю по принципу сквозной или радиальной продувки слоя) с плотным продуваемым стационарными слоями. Подобные сушильные установки в основном, стационарного исполнения имеют большую производительность, значительные массу и габариты и отличаются высокой энергоемкостью, что не позволяет использовать их в качестве основного аппарата малогабаритной мобильной сушильной установки. Кроме того, в сушильных аппаратах шахтного типа из-за неравномерного движения твердой и газовой фаз в сушильной камере материал имеет значительный разброс по конечному влагосодержанию, что не всегда удовлетворяют требованиям к качеству материала.

Существующие методики инженерных расчётов, использующих эмпирические зависимости и нормативы, а также известные методы моделирования и оптимизации процесса и аппарата для сушки не позволяют разрабатывать высокоэффективное энергосберегающее сушильное оборудование.

Разработка малогабаритного сушильного оборудования должна базироваться на уже накопленном теоретическом и практическом опыте, для чего, далее приводится анализ дисперсных материалов, с высоким внутридиффузионным сопротивлением как объектов сушки, аппаратурного оформления процесса, а также существующих математических описаний процесса сушки подобных материалов, экспериментальных исследований процесса сушки, структуры потоков в сушильных аппаратах, методов оптимизации процессов и аппаратов сушки.

Контрольные вопросы

1. Унифицированный комплекс задач обработки оперативной измерительной информации.
2. Математическое моделирование кинетики сушки сыпучих материалов.

3. Оценка равновесных зависимостей по выборкам экспериментально полученных данных.

4. Структурная схема АСУТП установок для влаго-тепловой обработки сыпучих материалов.

5. Повышение достоверности измерительной информации о влажности сыпучих материалов.

6. Экспериментальное исследование импульсного измерительного преобразователя.

7. Испытания влагометрической системы на шахтной сушилке влагомер сыпучих материалов в потоке.

8. Повышение достоверности первичной производственно-технологической информации в АСУТП влаго-тепловой обработки сыпучих материалов.

9. Автоматизированная поверка средств измерения влажности сыпучих материалов.

10. Пути совершенствования систем контроля и управления процессами влаго-тепловой обработки сыпучих материалов.

Список литературы

1. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. –М.: “Машиностроение”, 1982.-94с.

2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов // Учебное пособие для вузов. –М.: “Энергоиздат”, 1982.-320с.

3. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. -М.: Энергоатомиздат, 1986. - 144с.

4. Суровицкая Г.В. Разработка и исследование процессорных средств измерения параметров элементов сложных двухполюсных электрических цепей // Дисс. на соискание уч.ст. к.т.н.-Пенза: ПГТУ, 1996. – 18с.

5. Тюкавин А.А, Измерение параметров трех- и четырехэлементных двухполюсников мостами переменного тока. Саратов: Издат-во СГУ, 1988.-112с.

6. Тюкавин А.А. Теория уравновешивания и методы синтеза мостов переменного тока для измерения параметров трех- четырех- и многоэлементных двухполюсников // Автореф.дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. Ульяновск: ПГТУ, 1995.-39с.

7. Передельский Г.И. Мостовые цепи с импульсным питанием. – М.: “Энергоатомиздат”, 1988. -192с.

8. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей /А.И. Мартяшин, К.Л. Куликовский, С.К. Куроедов, Л.В. Орлова // Под ред. А.И. Мартяшина. -М.: Энергоатомиздат, 1990.-216с.

9. Ахмедов Б.М., Бегунов А.А., Методология построения унифицированных приборов контроля влажности пищевых продуктов. // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление», Ташкент, №1, 2006 – с.38-42.

10. Чураков П.П. Синтез и обработка сигналов в устройствах измерения параметров электрических цепей //Диссертация….д.т.н. Пенза: ПГУ, 1998.-448с.

11. Когельман Л.Г. Помехоустойчивые преобразователи для параметрических датчиков // Диссертация…к.т.н.- Пенза: 1994. -136с.

12. Чураков П.П., Свистунов Б.Л. Измерители параметров катушек индуктивности.- Пенза: Изд-во Пензенск. Гос. Ун-та, 1998.-180с.

13. Автоматизированный контроль и учет в производстве /Городон А.Э. и др.// Обзорная информация / М.: вып.3. 1987. -36с.

14. Петров Б.Н., Викторов В.А. Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: “Наука”, 1976.-244с.

15. Матякубова П.М., Каландаров П.И. Измерение влажности хлеба и хлебобулочных изделий // Фашизм устидан козонилган ғалабанинг 50 йиллигига бағишланган Ал-Хоразмий номли Урганч давлат университети илмий конференцияси докладларининг тезислари, УрДУ, Урганч, 1995. - б. 125.

16. Матякубова П.М, Ишчанов Ж.Р. Применение методов теории диэлектриков к определению параметров сыпучих материалов // «Техника юлдузлари », №1, 2004. - с.43-45.

17. Матякубова П.М. К формализации технологического процесса сушки зерна как объекта автоматического управления // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально - экономических наук», вып 2, Ташкент, 2003. - с.65-67.

18. Берлинер М.А. Измерения влажности. М., 1973. -263с.

19. Берлинер М.А., Иванов В.А. Характеристики влагомеров сверхвысоких частот // «Приборы и системы управления», №3. 1967. – с.13-16.

20. Невельсон М.Б., Касминский Р.З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. Изд-во «Наука». М.: 1972.-182с.

21. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. Изд-во «Энергия». М.: 1973. – с.440.

22. Брандт А.А. Измерение диэлектриков на сверхвысоких частотах, М.: 1963. -193с.

23. Матякубова П.М., Ниязов З.К. Методика расчета емкости датчика влажности одностороннего типа. Харьковский политехнический университет // VIII Международная научно-техническая конференция «Информационная технология: наука, техника, технология, образование, здоровье» «MicroCAD-2000» - Харьков, 2000. – с. 19ч22.

24. Матякубова П.М. Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов // «Наука, медицина и технологии», Ташкент, №3, 1999 - с.43ч45.

25. Матякубова П.М. Экспериментальная установка для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан, №2, 1999 - с. 27ч29.

26. Салимов З., Якубов А.Х., Рашидов П.М., Мусин Г.Р. гидромеханические диффузионно-тепловые характеристики маслосодержащих материалов. Методические указания.- Ташкентский политехнический институт, 1979.-16 с.

27. Матякубова П.М. Повышение точностных характеристик систем контроля электрофизических параметров зернопродуктов // Материалы 11-ой международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 2004», том 2, Киев, 2004. – с.42.

28. Гулямов Ш.М., Игамбердиев Х.З., Ниязов З.К., Матякубова П.М. Автоматизированное управления процессом приемки зерна на мукомольном предприятии // «Промышленные АСУ и контроллеры», №4, Москва, 2008. – с. 4-7.

29. Кричевский Е.С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М., 1980. – 256с.

30. Гост 19450-93. Смена многолетних бобовых кормовых трав. Посевные качества. Технические условия. Минск. Издательство стандартов, 1995.-7с.

Глава №2

31. Суслин М.А. Итерационный метод расчета параметров СВЧ-преобразователей с многомодовыми режимами / Суслин М.А., Дмитриев Д.А., Топильский А.В. // Состояние и проблемы измерений : тез. докл. VII Всерос. НТК, 28–30 ноября 2000 г. М. : МГТУ им. Баумана, 2000. –с.106–107.

32. Суслин М.А. Двухмодовый способ влагометрии и объемного теплопоглащения / Суслин М.А., Дмитриев Д.А., Топильский А.В. // Теплофизические измерения в начале XXI века: тез. докл. IV междунар. теплофиз. шк., 24–28 сентября 2001 г. / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2002. -с.123–124.

33. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов // Учебное пособие для вузов. –М.: “Энергоиздат”, 1982.-320с.

34. Матякубова П.М. Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов // «Наука, медицина и технологии», Ташкент, №3, 1999 - с.43ч45.

35. Матякубова П.М. Экспериментальная установка для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан, №2, 1999 - с. 27ч29.

36. Матякубова П.М. Автоматический прибор для измерения диэлектрической проницаемости электропроводящих веществ // Сборник научных трудов докторантов, аспирантов, соискателей и научных сотрудников «Исследования научно-технических достижений высшей школы», ТашГТУ, Ташкент, 1996.- с. 106ч110.

37. Берлинер М.А., Иванов В.А. Характеристики влагомеров сверхвысоких частот // «Приборы и системы управления», №3. 1967. – с.13-16.

38. Гост 19450-93. Смена многолетних бобовых кормовых трав. Посевные качества. Технические условия. Минск. Издательство стандартов, 1995.-7с.

39. Матякубова П.М. Разработка емкостных влагомеров сыпучих материалов // Международная научно техническая конференция «Состояние и перспективы развития связи и информационных технологий Узбекистана», ТУИТ, Ташкент, 2005.- с. 76-79.

40. Матякубова П.М. Влагомер для сыпучих материалов // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук», вып 1, Ташкент, 2004. – с.34-36.

41. Матякубова П.М. К расчету емкостных датчиков для измерения влажности сыпучих материалов с переменной толщиной // Сборник научных докладов второй Международной научно-теоретической и практической конференции «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления (Автоматизация-99)», Ташкент 1999 – с. 16ч 20.

42. Кричевский Е.С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М., 1980. – 256с.

43. Матякубова П.М. Исследование частотных характеристик сыпучих материалов // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук», выпуск 1, Ташкент, 2001. – с.123-128.

44. Матякубова П.М. Изучение частотно-влажностных характеристик сыпучих материалов // «Химия и химическая технология», № 1-2, 2004. - с.74-76.

45. Бибик Г.А. Дисперсионный анализ формирователей сигналов диэлькометрических влагомеров // Актуальные проблемы инженерного обеспечения в АПК. Международная научная конференция. Сборник научных трудов. Ч.3.Ярославль. 2004.-С. 65-70.

46. Матякубова П.М., Каландаров П.И. Влияние различных факторов на диэлектрические характеристики влажного материала // Урганч шахрини 350 йиллигига бағишланган «Университет профессор укитувчиларининг илмий – амалий анжумани», УрДУ, Урганч ш, 1999.- б. 36ч37.

47. Матякубова П.М., Каландаров П.И. Методы выбора датчиков для определения влажности хлебопродуктов // Урганч шахрини 350 йиллигига бағишланган «Университет профессор укитувчиларининг илмий – амалий анжумани», УрДУ, Урганч ш, 1999. - б. 35ч36.

48. Матякубова П.М., Олимов А. Обоснование параметров СВЧ-поля при выпечке теста лепешки // Сборник научных трудов

докторантов, аспирантов, соискателей и научных сотрудников «Исследования научно-технических достижений высшей школы», ТашГТУ, Ташкент, 1997.- с. 12ч14.

49. Матякубова П.М. Разработка СВЧ влагомеров сыпучих материалов // «Ахборот коммуникация технологиялари сохасида фан, таълим ва ишлаб чикариш хамда уларни интеграциялаш» Республика илмий–техникавий конфиренцияси, ТУИТ, Ташкент, 2005. - с. 250-252.

50. Матякубова П.М., Олимов А. Информационное обеспечение процесса выпечки лепешек методом комбинированного ИК-СВЧ-ИК-энергоподвода // Сборник научных трудов «Проблемы информатики и управления, перспективы их решения», Научно-производственное объединение «Кибернетика» АН РУз, Ташкент, 1996. - с. 56.

51. Харвель А.Ф. Техника сверхвысоких частот, М., 1965.-136с.

52. Исматуллаев П.Р. Электронный влагомер для измерения влажности сыпучих материалов // «Известия АН УзССР, Серия технических наук», №4, 1968. –с.23-28.

53. Юсупбеков Н.Р., Мухамедов Б.И., Гулямов Ш.М. Системы управления технологическими процессами // изд-во «Узбекистан», Ташкент, 1997.-536с.

54. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем // Техническая кибернетика, 1980, №4.-с.11-19.

55. Алиев Т.М., Мелик-Шахназаров А.М., Шайн И.Л. Автокомпенсационные измерительные устройства переменного тока. – М.: «Энергия», 1977. – 360с.

Глава №3

56. Кричевский Е.С., Автоматизированные системы управления, автоматизация и контроль в горной промышленности. Л., 1975.-314с.

57. Кричевский Е.С. Контроль влажности твердых и сыпучих материалов. –М.: «Энергоатомиздат», 1987. -136с.

58. Кричевский Е.С., Дубров Н.С. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. М., 1980.-168с.

59. Майзель М.М., Пятов Л.И. Автоматизация производственных процессов легкой промышленности [Учеб. пособие для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация легкой промышленности»] /М., «Машиностроение», 1973.-286с.

60. Майзель М.М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами. М., «Высшая школа», 1972.-218с.

61. Исматуллаева П.Р. Методы и технические средства контроля влажности в производстве хлопкового масла. Ташкент, Изд-во «Фан», 1983.- с.108.

62. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., «Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основы полых световодов ». М.: Энергоатомиздат, 1987.-105с.

63. Раджабов Т.Д., Лейдерман Р.Ю., Джамалетдинова И.Е. «К моделям формирования многокомпонентных покрытий и родственных процессов», Физические и физико-химические основы ионной имплантации, Нижний Новгород, 2006. с. 206-211.

64. Мухитдинов М.М., Мусаев Э.А., Оптоэлектронные приборы и методы измерения влажности. –М.: Энергоатомиздат, 1985.-с.136.

65. Турсунходжаев П.М. «Производство крупы и сорго». Первая международная конференция «Качество зерна, муки и хлеба». Тезисы докладов. М. 1998-С.139-141.

66. Игамбердиев Х.З., Юсупбеков Н.Р., Базаров М.Б.. Моделирование и управление производственно-технологическими системами с параметрическими неопределенностями интервального типа // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №3, 2008. -С.53-59.

67. Игамбердиев Х.З., Гулямов Ш.М., Норкулов М.Б., Хан Ю.М.. Разработка концепции и методологии системного проектирования информационно-вычислительных сетей в условиях нечеткой исходной информации // Материалы секционного заседания Международной конференции IX Международного форума «Высокие технологии XXI века» «Интеграция образования, науки и производства», МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва. - 2008. – С.32-36.

68. Мухиддинов Д.Н., Закиров Т.З., Мурадов И.М. Математическое моделирование газовой горелки. Химическая технология. Контроль и управление. Ташкент, 2006, №5. –с. 20-22.

Глава №4

69. Кричевский Е.С., Дубров Н.С. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. М., 1980.-168с.

70. Джураев Х.Ф., Матякубова П.М., Абдуллаев А.Ш, Зайнутдинова М.Б. Исследование процесса сушки плодоовощных культур на вальцевых сушилках // «Химия и химическая технология», Ташкент, №2, 2003. - с.67-70.

71. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / Мартяшин А.И., Куликовский К.Л., Куроедов С.К., Орлова Л.В. // Под ред. Мартяшина А.И. – М.: «Энергоатомиздат», 1990. -216с.

72. Цифровые приборы и системы для измерения параметров конденсаторов / С.Л. Эпштейн, В.Г. Давидович, Г.И. Литвинов и др. // Под ред. С.Л. Эпштейна. – М.: «Радио», 1978. -192с.

73. Каландаров П.И. О фазовом методе контроля влажности органических веществ в отраслях масложировой промышленности // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №5, 2008. -С.26-29.

74. Мухитдинов М.М., Мусаев Э.А., Оптоэлектронные приборы и методы измерения влажности. –М.: Энергоатомиздат, 1985.-с.136.

75. Мухиддинов Д.Н., Закиров Т.З., Мурадов И.М. Математическое моделирование газовой горелки. Химическая технология. Контроль и управление. Ташкент, 2006, №5. –с. 20-22.

76. Лыков А.В. Теория теплопроводности [Учеб. пособие теплотехн. специальностей вузов]. М., «Высшая школа», 1967.-268с.

77. Хакимов О.Ш., Бурнаев А.Л.. Акустические методы контроля технологических режимов производства полимерных волокон и пленок // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №1, 2005. –с.31-36.

78. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., «Оптоэлектронные преобразователи больших перемещений на основы полых световодов ». М.: Энергоатомиздат, 1987.-105с.

79. Раджабов Т.Д., Лейдерман Р.Ю., Джамалетдинова И.Е. «К моделям формирования многокомпонентных покрытий и родственных процессов», Физические и физико-химические основы ионной имплантации, Нижний Новгород, 2006. с. 206-211.

80. Мухитдинов Д.П., Банников Р.Г. Моделирование и алгоритмизация парожидкостного равновесия многокомпонентных смесей // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №5, 2006. –с.12-17.

81. Юсупбеков Н.Р., Верлань А.Ф., Гулямов Ш.М., Сагатов М.В., Прикладные задачи исследования и создания измерительных преобразователей приборов контроля физических величин, Вестник ТГТУ, №3, 2007- с.44-48.

82. Сажин Б.С., Мухиддинов Д.П. и др. Математическое моделирование в САПР сушильных аппаратов хлопка и его производных. –Ташкент. 1990.-162с.

83. Латипов В.Б., Хакимов О.Ш.. Вычисление неточности суммарного стандарта измерений // Химическая технология. Контроль и управление. №6, 2007. -С.30–32.

84. Нечаев А.П. Пищевая химия. Учебник для ВУЗов. СПб., ГИОРД, 2001.-198с.

85. Юсупбеков Н.Р., Алиев Р.А., Адылов Ф.Т., Гулямов Ш.М. Аналитические технологии управления сложными технологическими процессами и производствами. ТашГТУ, Ташкент, 2004. – 152 с.

86. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические цепи переменного тока. – М.: «Наука», 1973. -128с.

87. Салимов З.С., Хамидов Б.Н., Убайдуллаев Ф.Б., Якубов С.И., Душанов Р.О. Модифицирование нефтяных битумов специально термообработанной госсиполовой смолой // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №1, 2006. –с.8-11.

88. Исматуллаев П.Р. Методы и технические средства контроля влажности в производстве хлопкового масла. Ташкент, Изд-во «Фан», 1983. -с.108.

89. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов: Учебное пособие для вузов. – М.: «Энергоиздат», 1982. -320с.

90. Игамбердиев Х.З., Юсупбеков Н.Р., Базаров М.Б.. Моделирование и управление производственно-технологическими системами с параметрическими неопределенностями интервального типа // «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, №3, 2008. -С.53-59.

Литература

Глава. 1

1. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М.: Наука, 1975. - 228 с.

2. Исматуллаев П.Р., Ахмедов Б.М., Бегунов А.А. Влагометрия в пищевой промышленности/ Пищевая промышленность, 1990, №1, с.70-72.

3. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. 8-е изд., перераб. М.: Наука, 1980. - 208 с.

4. Лячнев В.В., Сирая Т.Н., Довбета Л.И., Основы теории измерений. СПб. Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2004. - 310 с.

5. Ахмедов Б.М., Бегунов А.А. Теоретические основы аналитических измерений в технологических отраслях. изд-во ООО «Нашр ХА», Ташкент, 2006 – с.83.

6. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: “Наука”, 1981. - 568 с.

7. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью: Пер. с англ./ Под ред. А.А.Колосова и Л.А.Мееровича. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948. - 648 с.

8. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. М.: Высш. шк., 1966. - 408 с.

9. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. - 274 с.

10. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров: Пер. с англ./ Под ред. С.И.Похожаева. М.: “Мир”, 1985. -384с.

11. Бегунов А.А. и др. Метрологическая аттестация влагомера ПВЗ-20Д. //Масло-жировая жировая промышленность. 1981. №10. -с 38-40.

12. Биберман Л.И. Широкодиапазонные генераторы на негатронах. М.: “Радио и связь”, 1982. -82 с.

13. Матякубова П.М., Каландаров П.И. Измерение влажности хлеба и хлебобулочных изделий // Фашизм устидан козонилган ғалабанинг 50 йиллигига бағишланган Ал-Хоразмий номли Урганч давлат университети илмий конференцияси докладларининг тезислари, УрДУ, Урганч, 1995. - б. 125.

14. Купер Дж., Макгиллем К. Вероятностные методы анализа сигналов и систем: Пер. с англ./ Под ред. В.Т. Горяинова. М.: “Мир”, 1989. - 376 с.

15. Чаки Ф. Современная теория управления: Пер. с англ./ Под ред. Н.С. Райбмана. М.: Мир, 1975. - 424 с.

16. Берлинер М.А. Измерения влажности. М., 1973. -263с.

17. Чернецов В.И. Разработка и исследование принципов инвариантного преобразования параметров сложных электрических цепей // Диссертация…д.т.н. Пенза, 1981-256с.

18. Бондаренко Л.Н. Разработка и исследование алгоритмов измерения параметров многоэлементных двухполюсников // Автореферат диссертации …к.т.н.-Пенза: 1998.-22с.

19. Резван В. Абсолютная устойчивость автоматических систем с запаздыванием: Пер. с румын./ Под ред. В.А.Якубовича. М.: “Наука”, 1983. - 360с.

20. Репников А.В. Колебания в оптимальных системах автоматического регулирования. М.: “Машиностроение”, 1968. - 240 с.

21. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов: Пер. с англ./Под ред. С.Гуна, Х.Уайтхауса, Т.Кайлайта. М.: “Радио и связь”, 1989. - 472 с.

22. Атанс М., Фалб П.Л. Оптимальное управление: Пер. с англ./ Подред. Ю.И.Топчиева. М.: Машиностроение, 1968. - 764 с.

23. Управление релаксационными генераторами/ Я.Е.Беленький, О.Е.Левицкий, В.А.Халин, С.Г.Шульгин/ Под ред. Я.Е.Беленького. К.: “Наук. думка", 1982. - 280с.

24. Ахмедов Б.М., Бегунов А.А. Развитие отраслей аналитической приборной базы // «Хранение и переработка сельхозсырья».

Теоретический журнал. Российской академии сельскохозяйственных наук. 2006, №1. –с. 18-21.

25. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. В.В.Шахгильдяна. М.: «Радио и связь», 1989. - 440 с.

26. Матякубова П.М., Равилов Ш.М., Ешматова Б.И. Модифицированный метод восстановления достоверности первичной измерительной информации // Международная конференция «Innovation 2007», ТГТУ, Ташкент, 2006.- с. 323-325.

27. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: «Наука», 1988. - 552 с.

28. Гершберг А.Ф, Мусаев А.А, Шерстюк Ю.М. Концептуальные основы информационной интеграции АСТП нефтеперерабатывающего предприятия. СПб: «Альянстрой», 2003.-с.11-16.

Глава 2

29. Бирюков А. Системы принятия решений и хранилища данных // СУБД. 1997. №4. –с.43-48.

30. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью: Пер. с англ./ Под ред. А.А.Колосова и Л.А.Мееровича. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948. - 648 с., ил.

31. Фиакко А., Мак-Кормик Г. Нелинейное программирование: Методы последовательной безусловной минимизации: Пер. с англ. Под ред. Е.Г. Гольштейна. М.: Мир, 1972. 240 с., ил.

32. Чаки Ф. Современная теория управления: Пер. с англ./ Под ред. Н.С.Райбмана. М.: Мир, 1975. 424 с., ил.

33. Mukhamedkhanov U.T., Kimizbaeva O.E., Matyakubova P.M., Eshmatova B.I. Some principles of building layered information-measuring systems of ensuring the quality of industrial products // Сборник докладов международной научной конференции «Инфокоммуникационные и вычислительные технологии в науке, технике и образовании», Ташкент, 2004. – с.136-138.

34. Каримов М.М., Матякубова П.М. Оптимизация структуры компьютерной сети с помощью алгоритма насыщенного сечения и сравнение его с алгоритмом релаксации Лагранжа сигналов неидеальных приборов // «Хабаршысы вестник», Нукус, 2002. - с.64-65.

35. Шапот М. Интеллектуальный анализ данных в системах поддержки принятия решений // Открытые системы. 1998. № 1.-с.8-9.

36. Мухамедханов У.Т., Матякубова П.М. Основы интеллектуализации технологий автоматизированного контроля качества технологических сред // Материалы Республиканской научной конференции «Современные проблемы математического моделирования», том №2, Нукус, 2005. - с.33-34.

37. Разработка диэлектрического влагомера зерна на базе инвариантного аналого-цифрового преобразователя. Отчет по х/д №83-054. Гос.рег. №01.83.0050722. Рябов В.Ф., Машошин П.В. –Пенза: ППИ, 1985.-168с.

38. Arnold I.H. Phisics, 4, 225 and 334 (1933).

39. Mukhamedkhanov U.T., Matyakubova P.M., Radjabova M.A., Shakhmardanova G.S. Neural networks time series forecasting // Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, b-Quadrat Verlag, 2006. – PP.284-286.

40. Мухамедханов У.Т., Раджабова М.А., Матъякубова П.М. Интегрированная система контроля и управления и средства интеллектуальной поддержки управленческих решений // Совместный выпуск журнала «Проблемы информатики и энергетики» и сборников научных трудов «Вопросы кибернетики», «Вопросы вычислительной и прикладной математики» по материалам республиканской научной конференции «Современное состояние и пути развития информационных технологий», Ташкент, 2006. - с.219-220.

41. Матякубова П.М., Зохидов А.А. Идентификация математических моделей зерновых сушилок // Сборник научных трудов «75 лет кафедре «Теоретические основы теплотехники», ТашГТУ, Ташкент, 2004. – с.69 -72.

42. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений, Изд-во «Наука», М.: 1968.-168с.

43. Матякубова П.М. Разработка СВЧ влагомеров сыпучих материалов // «Ахборот коммуникация технологиялари сохасида фан, таълим ва ишлаб чикариш хамда уларни интеграциялаш» Республика илмий–техникавий конфиренцияси, ТУИТ, Ташкент, 2005. - с. 250-252.

44. Исматуллаев П.Р., Ахмедов Б.М., Бегунов А.А. Влагометрия в пищевой промышленности/ Пищевая промышленность, 1990, №1, с.70-72.

45. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем // Техническая кибернетика, 1980, №4.-с.11-19.

46. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. М.: «Пищевая промышленность», 1973. - 528 с.

Глава 3

47. Матякубова П.М., Зохидов А.А. Идентификация математических моделей зерновых сушилок // Сборник научных трудов «75 лет кафедре «Теоретические основы теплотехники», ТашГТУ, Ташкент, 2004. – с.69 -72.

48. Матякубова П.М., Равилов Ш.М., Ешматова Б.И. Модифицированный метод восстановления достоверности первичной измерительной информации // Международная конференция «Innovation 2007», ТГТУ, Ташкент, 2006.- с. 323-325.

49. Юсупбеков Н.Р., Нуритдинов Ш., Якубов А.Х., Ратушный В.В. Двухзонная кинетическая модель процесса сушки твердого пористого материала// Матем. моделирование и оптимизация процесса масложировой промышленности: тез. докл. Всесоюзной научной конференции 1983.-Краснодар, 1983.-с.41-44.

50. Салимов З., Якубов А.Х., Рашидов П.М., Мусин Г.Р. гидромеханические диффузионно-тепловые характеристики маслосодержащих материалов. Методические указания.- Ташкентский политехнический институт, 1979.-16 с.

51. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. 2-е изд., доп. М.: “Наука”, 1990. - 488 с.

52. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью: Пер. с англ./ Под ред. А.А.Колосова и Л.А.Мееровича. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1948. - 648 с.

53. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. М.: Высш. шк., 1966. - 408 с.

54. Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования. М.: Физматгиз, 1963. - 274 с.

55. Фарлоу С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров: Пер. с англ./ Под ред. С.И.Похожаева. М.: “Мир”, 1985. -384с.

56. Бегунов А.А. и др. Метрологическая аттестация влагомера ПВЗ-20Д. //Масло-жировая жировая промышленность. 1981. №10. -с 38-40.

57. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. В.В.Шахгильдяна. М.: «Радио и связь», 1989. - 440 с.

58. Клюев В.В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. М., «Машиностроение», 2005. - с.656.

59. Алешин Н.П. Неразрушающий контроль и диагностика – приоритетное направление науки в высшей школе. «Дефектоскопия». 1993, №8. - с.3-11.

60. Исматуллаев П.Р. Тургунбоев А. Метрологические основы измерения состава и свойств веществ и материалов. Учебное пособие. ТГТУ, Ташкент. 2002. - 49 с.

61. Тургунбоев А., Матякубов К.Р. Метрологическое обеспечения измерителей влажности дисперсных материалов. Научные труды МНПК «Инновация 2002», Ташкент. 2002.- с.61-63.

62. Исматуллаев П.Р., Гринвальд А.Б. Теоретическое и экспериментальное исследование СВЧ методов измерения влажности материалов. Ташкент, «ФАН», 1982.-214с.

63. Исматуллаев П.Р, Помощников В.С. Оценка эффективности СВЧ влагомеров с учетом точности измерения // «Измерительная техника», №6, 1985.-с.43-48.

64. Рабинович С.Г. Погрешности измерения. Л.: «Энергия», 1980.-118с.

65. Петров Б.Н., Викторов В.А. Лункин Б.В., Совлуков А.С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: "Наука", 1976.-244с.

66. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. Изд-во «Энергия». М.: 1973. – с.440.

67. Юсупбеков Н.Р., Гулямов Ш.М., Сапаров Б.Т., Матякубова П.М. Адаптивное управление билинейными динамическими объектами на примере распылительной сушильной установки // Научно-технический центр «Современные информационные технологии» АН РУз, Препринт, Ташкент, 2006.- с.53.

68. Mukhamedkhanov U.T., Matyakubova P.M., Radjabova M.A., Shakhmardanova G.S. Neural networks time series forecasting // Fourth World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation, b-Quadrat Verlag, 2006. – PP.284-286.

Глава 4

69. Бугров А.В. Высокочастотные емкостные преобразователи и приборы контроля качества. –М.: "Машиностроение", 1982.-94с.

70. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов // Учебное пособие для вузов. –М.: "Энергоиздат", 1982.-320с.

71. Кнеллер В.Ю., Боровских Л.П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. -М.: Энергоатомиздат, 1986. - 144с.

72. Гриневич Ф.Б., Сурду М.Н Высокоточные вариационные измерительные системы переменного тока.- Киев: "Наук. Думка", 1989.-192с.

73. Суровицкая Г.В. Разработка и исследование процессорных средств измерения параметров элементов сложных двухполюсных электрических цепей // Дисс. на соискание уч.ст. к.т.н.-Пенза: ПГТУ, 1996. – 18с.

74. Тюкавин А.А, Измерение параметров трех- и четырехэлементных двухполюсников мостами переменного тока. Саратов: Издат-во СГУ, 1988.-112с.

75. Тюкавин А.А. Теория уравновешивания и методы синтеза мостов переменного тока для измерения параметров трех- четырех- и многоэлементных двухполюсников // Автореф.дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. Ульяновск: ПГТУ, 1995.-39с.

76. Передельский Г.И. Мостовые цепи с импульсным питанием. – М.: "Энергоатомиздат", 1988. -192с.

77. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей /А.И. Мартяшин, К.Л. Куликовский, С.К. Куроедов, Л.В. Орлова // Под ред. А.И. Мартяшина. -М.: Энергоатомиздат, 1990.-216с.

78. Ахмедов Б.М., Бегунов А.А., Методология построения унифицированных приборов контроля влажности пищевых продуктов. // Научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление», Ташкент, №1, 2006 – с.38-42.

79. Чураков П.П. Синтез и обработка сигналов в устройствах измерения параметров электрических цепей //Диссертация….д.т.н. Пенза: ПГУ, 1998.-448с.

80. Когельман Л.Г. Помехоустойчивые преобразователи для параметрических датчиков // Диссертация…к.т.н.- Пенза: 1994. -136с.

81. Чураков П.П., Свистунов Б.Л. Измерители параметров катушек индуктивности.- Пенза: Изд-во Пензенск. Гос. Ун-та, 1998.-180с.

82. Автоматизированный контроль и учет в производстве /Городон А.Э. и др.// Обзорная информация / М.: вып.3. 1987. -36с.

83. Матякубова П.М, Ишчанов Ж.Р. Применение методов теории диэлектриков к определению параметров сыпучих материалов // «Техника юлдузлари », №1, 2004. - с.43-45.

84. Матякубова П.М. К формализации технологического процесса сушки зерна как объекта автоматического управления // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально - экономических наук», вып 2, Ташкент, 2003. - с.65-67.

85. АСУТП приготовления смесей /Дорф и др.// Обзорная информация / Информэнерго. – М.:1983. – 18с.

86. Берлинер М.А., Иванов В.А. Характеристики влагомеров сверхвысоких частот // «Приборы и системы управления», №3. 1967. – с.13-16.

87. Невельсон М.Б., Касминский Р.З. Стохастическая аппроксимация и рекуррентное оценивание. Изд-во «Наука». М.: 1972.-182с.

88. Брандт А.А. Измерение диэлектриков на сверхвысоких частотах, М.: 1963. -193с.

89. Матякубова П.М., Ниязов З.К. Методика расчета емкости датчика влажности одностороннего типа. Харьковский политехнический университет // VIII Международная научно-техническая конференция «Информационная технология: наука, техника, технология, образование, здоровье» «MicroCAD-2000» - Харьков, 2000. – с. 19ч22.

90. Матякубова П.М. Исследование электрофизических свойств сыпучих материалов // «Наука, медицина и технологии», Ташкент, №3, 1999 - с.43ч45.

91. Матякубова П.М. Экспериментальная установка для исследования электрофизических свойств сыпучих материалов // Вестник Каракалпакского отделения Академии наук Республики Узбекистан, №2, 1999 - с. 27ч29.

92. Салимов З., Якубов А.Х., Рашидов П.М., Мусин Г.Р. гидромеханические диффузионно-тепловые характеристики маслосодержащих материалов. Методические указания.- Ташкентский политехнический институт, 1979.-16 с.

93. Матякубова П.М. Повышение точностных характеристик систем контроля электрофизических параметров зернопродуктов // Материалы 11-ой международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 2004», том 2, Киев, 2004. – с.42.

94. Гулямов Ш.М., Игамбердиев Х.З., Ниязов З.К., Матякубова П.М. Автоматизированное управления процессом приемки зерна на мукомольном предприятии // «Промышленные АСУ и контроллеры», №4, Москва, 2008. – с. 4-7.

95. Кричевский Е.С. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов. М., 1980. – 256с.

96. Гост 19450-93. Смена многолетних бобовых кормовых трав. Посевные качества. Технические условия. Минск. Издательство стандартов, 1995.-7с.

97. Суслин М.А. Итерационный метод расчета параметров СВЧ-преобразователей с многомодовыми режимами / Суслин М.А., Дмитриев Д.А., Топильский А.В. // Состояние и проблемы измерений : тез. докл. VII Всерос. НТК, 28–30 ноября 2000 г. М. : МГТУ им. Баумана, 2000. –с.106–107.

98. Суслин М.А. Двухмодовый способ влагометрии и объемного теплопоглащения / Суслин М.А., Дмитриев Д.А., Топильский А.В. // Теплофизические измерения в начале XXI века: тез. докл. IV междунар. теплофиз. шк., 24–28 сентября 2001 г. / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов, 2002. -с.123–124.

99. Матякубова П.М. Автоматический прибор для измерения диэлектрической проницаемости электропроводящих веществ // Сборник научных трудов докторантов, аспирантов, соискателей и научных сотрудников «Исследования научно-технических достижений высшей школы», ТашГТУ, Ташкент, 1996.- с. 106ч110.

100. Матякубова П.М. Влагомер для сыпучих материалов // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук», вып 1, Ташкент, 2004. – с.34-36.

101. Матякубова П.М. К расчету емкостных датчиков для измерения влажности сыпучих материалов с переменной толщиной // Сборник научных докладов второй Международной научно-теоретической и практической конференции «Проблемы и перспективы автоматизации производства и управления (Автоматизация-99)», Ташкент 1999 – с. 16ч 20.

102. Матякубова П.М. Исследование частотных характеристик сыпучих материалов // Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные вопросы в области технических и социально-экономических наук», выпуск 1, Ташкент, 2001. – с.123-128.

103. Матякубова П.М. Изучение частотно-влажностных характеристик сыпучих материалов // «Химия и химическая технология», № 1-2, 2004. - с.74-76.

104. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений, Изд-во «Наука», М.: 1968.-168с.

105. Матякубова П.М., Олимов А. Обоснование параметров СВЧ-поля при выпечке теста лепешки // Сборник научных трудов докторантов, аспирантов, соискателей и научных сотрудников «Исследования научно-технических достижений высшей школы», ТашГТУ, Ташкент, 1997.- с. 12ч14.

106. Матякубова П.М. Разработка СВЧ влагомеров сыпучих материалов // «Ахборот коммуникация технологиялари сохасида фан, таълим ва ишлаб чикариш хамда уларни интеграциялаш» Республика илмий–техникавий конфиренцияси, ТУИТ, Ташкент, 2005. - с. 250-252.

107. Матякубова П.М., Олимов А. Информационное обеспечение процесса выпечки лепешек методом комбинированного ИК-СВЧ-ИК-энергоподвода // Сборник научных трудов «Проблемы информатики и

управления, перспективы их решения», Научно-производственное объединение «Кибернетика» АН РУз, Ташкент, 1996. - с. 56.

108. Харвель А.Ф. Техника сверхвысоких частот, М., 1965.-136с.

109. Исматуллаев П.Р. Электронный влагомер для измерения влажности сыпучих материалов // «Известия АН УзССР, Серия технических наук», №4, 1968. –с.23-28.

110. Юсупбеков Н.Р., Мухамедов Б.И., Гулямов Ш.М. Системы управления технологическими процессами // изд-во «Узбекистан», Ташкент, 1997.-536с.

111. Петров Б.Н., Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем // Техническая кибернетика, 1980, №4.-с.11-19.

112. Алиев Т.М., Мелик-Шахназаров А.М., Шайн И.Л. Автокомпенсационные измерительные устройства переменного тока. – М.: «Энергия», 1977. – 360с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
ГЛАВА 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ 4
1.1. Математическая модель импульсного измерительного преобразователя электрофизических характеристик сыпучих материалов 4
1.2. Расчет параметров модели первичного импульсного измерительного преобразователя 8
1.3. Математическая модель импульсного датчика 12
1.4. Расчет параметров электронного блока импульсного датчика 17
ГЛАВА 2. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА АСУТП ВЛАГО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ 23
2.1. Алгоритмизация контроля и управления технологическими процессами и производствами 23
2.2. Концептуальные основы интеллектуальной поддержки измерителей состава и свойств твердых сыпучих материалов 26
2.3. Идентификатор показателей качества сыпучих материалов 34
2.4. Прогнозирование влажности хлопковых семян 43
2.6. Алгоритмы повышения достоверности первичной измерительной информации 52
2.7. Алгоритмы прогнозирования свойств сыпучих материалов на основе процедур последовательной динамической фильтрации 58
ГЛАВА 3. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ПОДСИСТЕМЕ АСУТП ВЛАГО-ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ 65

3.1. Унифицированный комплекс задач обработки оперативной измерительной информации 65
3.2. Математическое моделирование кинетики сушки сыпучих материалов 69
3.3. Оценка равновесных зависимостей по выборкам экспериментально полученных данных 93
3.4. Структурная схема АСУТП установок для влаго-тепловой обработки сыпучих материалов 97
3.5. Повышение достоверности измерительной информации о влажности сыпучих материалов 105
3.6. Экспериментальное исследование импульсного измерительного преобразователя 107
3.7. Испытания влагометрической системы на шахтной сушилке 127
3.8. Влагомер сыпучих материалов в потоке 133
3.9. Повышение достоверности первичной производственно-технологической информации в АСУТП влаго-тепловой обработки сыпучих материалов 137
3.10. Автоматизированная поверка средств измерения влажности сыпучих материалов 146
3.11. Пути совершенствования систем контроля и управления процессами влаго-тепловой обработки сыпучих материалов 148
ГЛАВА 4. КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ 153
4.1. Метрологические основы техники измерения влажности 153
4.2. Методы и средства измерения электрофизических характеристик зернистых материалов 157
4.3. Применение методов теории диэлектриков к определению электрофизических параметров сыпучих материалов 173
4.4. Методика расчета емкостных датчиков для измерения диэлектрической проницаемости сыпучих материалов 176
4.5. Методика расчета емкости датчика одностороннего типа 185

4.6. Влияние массообмена воды на точность измерения сыпучих материалов 190
4.7. Опытно-экспериментальная установка для исследования электрофизических характеристик сыпучих материалов 198
4.8. Емкостные влагомеры сыпучих материалов 202
4.9. Экспериментальное исследование частотных характеристик сыпучих материалов.....207
4.10. Модернизированный СВЧ – влагомер с повышенными точностными характеристиками.....212
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 233
Список литературы.....236

Матякубова Парахат Майлиевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Редактор:
А.Абдужалилов

Техник редактор:
С.Абдувалиев

Корректор:
Д.Уринова

Лицензия редакции. № AI 190, 10.05.2011-y.
Сдано в печать 12.10.2018 года. Формат: 60x84 1/16
Офсетная печать. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. п.л. 16.0. Тираж 300 шт. Заказ № 09.

Редакция «Tafakkur-bo‘stoni», 100190, город Тошкент,
Юнусабад-9, 13-54. E-mail: tafakkur0880@mail.ru

Отпечатано в типографии ООО «Tafakkur-bo‘stoni»,
г.Ташкент, Чиланзар р-н., 1. Телефон: 199-84-09