

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА УГЛЕЙ И ЖИДКИХ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

*Бухаров С. В.¹, старший преподаватель
Овсяников Вл. В.², ассистент*

*¹Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,
г. Днепропетровск, Украина*

²Национальный горный университет, г. Днепропетровск, Украина

Введение и постановка задачи

Диагностика параметров качества различных веществ в специализированных лабораториях традиционными физико-химическими методами связана со значительным расходом времени (до 7 часов на один анализ) и затратами на приобретение необходимых химических реактивов. От этих недостатков свободны электромагнитные методы диагностики основных параметров качества веществ. Они позволяют определять ряд важных параметров качества сыпучих и жидких веществ для обеспечения управления технологическими процессами переработки и использования этих веществ на предприятиях горнодобывающей, металлургической и энергетической промышленности в режиме реального времени.

Метод оценки параметров качества веществ в электромагнитном микроволновом диапазоне [1, 2] основан на измерениях их комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) или коэффициентов затухания (отражения) электромагнитной (ЭМ) волны в исследуемом веществе, либо коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) при облучении веществ ЭМ полем.

Целью работы является повышение эффективности диагностики путем ускорения оценки параметров качества веществ и повышения степени достоверности, получаемых результатов, например, калорийности, зольности и влажности угля и жидких нефтепродуктов для передачи информации в автоматизированные системы управления технологическими процессами на предприятиях.

Математическое моделирование волноводного метода определения комплексной диэлектрической проницаемости

Для получения информации о комплексной ДП вещества, исследуемое вещество помещается в короткозамкнутую измерительную волноводную ячейку (ИЯ) (рис. 1), которая подсоединяется к входу частотно-сканирующего измерителя КСВН.

Используя метод многократных отражений [3,4], для короткозамкнутого фрагмента прямоугольного волновода с образцом 2 можно получить следующее выражение частотной зависимости коэффициента отражения для моды H_{10}

$$R(f, \varepsilon) = \frac{r_{12}(f, \varepsilon) \cdot \exp\left[-i\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot f}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} 2d\right]}{1 - r_{12}(f, \varepsilon) \cdot \exp\left[-i\sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot f}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} 2d\right]}, \quad (1)$$

где

$$r_{12}(f, \varepsilon) = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2} - \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2} + \sqrt{\varepsilon - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}} - \text{коэффициент}$$

отражения от первой границы раздела; $\varepsilon = \varepsilon' - i \cdot \varepsilon''$ – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость; a – размер широкой стенки волновода; d – глубина заполнения ИЯ исследуемым веществом; c – скорость света, f – частота.

Частотная зависимость КСВН, рассчитанная с использованием (1) для трёх материалов при $tg\delta = 0,001$ и значениях $a = 72$ мм, $d = 85$ мм, представлена на рис. 2.

Положение минимумов частотной зависимости КСВН определяется приближенным соотношением, которое получается из условия максимума знаменателя (1):

$$\text{Re}[h(f, \varepsilon) \cdot d] = \frac{\pi}{2} + \pi \cdot n, \quad n = 0, 1, 2, \dots,$$

где $h(f, \varepsilon) = \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot f}{c}\right)^2 \cdot \varepsilon - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2}$ — продольное волновое число.

Первое приближение значения ДП можно определить по положению минимумов частотной зависимости КСВН из выражения

$$\text{Re}[h(f_{\min 2}, \varepsilon) - h(f_{\min 1}, \varepsilon)] = \pi / d, \quad (2)$$

где $f_{\min 2} > f_{\min 1}$ – частоты соседних минимумов частотной зависимости КСВН.

При наличии измеренных значений КСВН $K_{c1,изм}$ и $K_{c2,изм}$ на близких

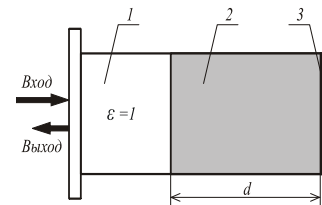


Рис. 1 Схема металлической волноводной ИЯ: 1 – воздух; 2 – исследуемое вещество (уголь); 3 – короткозамыкатель.

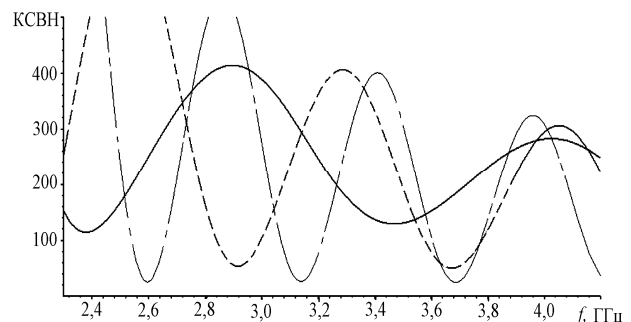


Рис.2 Частотная зависимость КСВН ИЯ при различных значениях ДП исследуемого вещества: — $\varepsilon' = 2$; ---- $\varepsilon' = 5$; - - - $\varepsilon' = 10$.

частотах f_1 и f_2 , для получения значения ДП численно решаем систему трансцендентных уравнений

$$|R_{1, \text{мод}}(\varepsilon', \varepsilon'', f_1, d)| = \frac{K_{c1, \text{изм}} - 1}{K_{c1, \text{изм}} + 1}; |R_{2, \text{мод}}(\varepsilon', \varepsilon'', f_2, d)| = \frac{K_{c2, \text{изм}} - 1}{K_{c2, \text{изм}} + 1}. \quad (3)$$

При получении данных от измерительной аппаратуры, результатом измерений являются массивы значений f_i и $K_{c_i}(f_i)$. Для определения значения ДП используем метод оптимизации [5]. В качестве целевой функции принимаем следующее выражение

$$F(\varepsilon', \varepsilon'') = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\left[\frac{K_{c_i, \text{изм}}(f_i) - K_{c_i, \text{мод}}(\varepsilon', \varepsilon'', f_i, d)}{K_{c_i, \text{изм}}} \right]^2 \right), \quad (4)$$

где N — количество точек отсчета частоты, $K_{c_i, \text{мод}}(\varepsilon', \varepsilon'', f_i, d)$ — значение КСВН на частоте f_i , рассчитанное при подстановке в модель значений $\varepsilon', \varepsilon''$.

Поиск минимума целевой функции (4) осуществляем численным методом координатного спуска с изменяемым шагом. Первое приближение значения диэлектрической проницаемости определяем по положению минимумов частотной зависимости КСВН из уравнения (2). Далее в цикле, пока разность между значениями F больше определенного предела (например, 0.001), вычисляем значения $F(\varepsilon', \varepsilon'')$, $F(\varepsilon' + \Delta\varepsilon', \varepsilon'')$, при его возрастании — уменьшаем значение шага $\Delta\varepsilon'$ и его знак, аналогично вычисляем значение $F(\varepsilon', \varepsilon'' + \Delta\varepsilon'')$, при его возрастании — уменьшаем значение шага $\Delta\varepsilon''$ и меняем его знак.

При слабой дисперсии ДП и $tg\delta$ в небольшой полосе частот можно считать постоянными, что позволяет уменьшить количество точек отсчета и ускорить вычисления. Для повышения точности измерений, для точек отсчета частоты определяется таблица поправок и на каждой частоте опре-

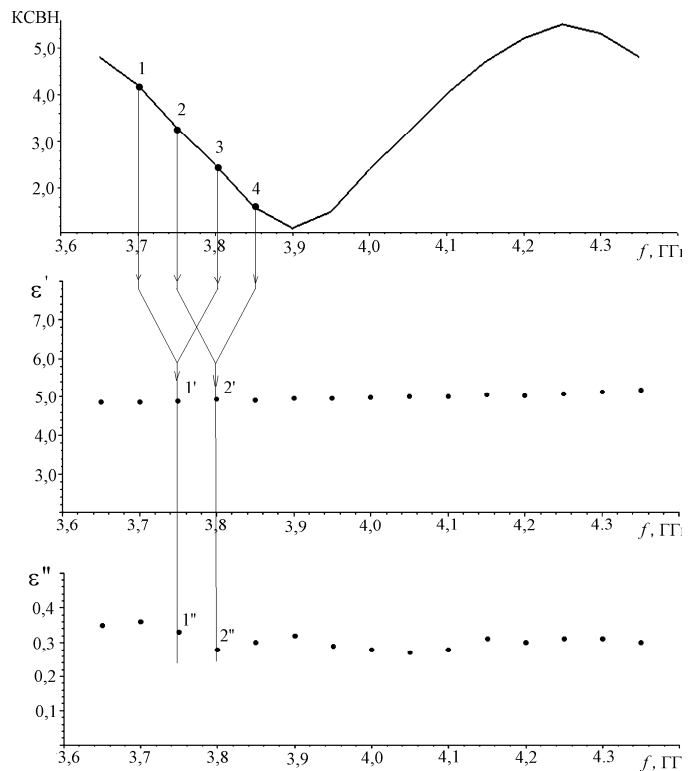


Рис.3 Определение ДП пробы угля ($d=85$ мм.) по частотной зависимости КСВН.

При слабой дисперсии ДП и $tg\delta$ в небольшой полосе частот можно считать постоянными, что позволяет уменьшить количество точек отсчета и ускорить вычисления. Для повышения точности измерений, для точек отсчета частоты определяется таблица поправок и на каждой частоте опре-

деляются характеристики детекторов, вычисление коэффициента отражения осуществляется цифровыми средствами.

На рис. 3 представлены результаты определения ДП по результатам измерения КСВН. ДП на интервале между двумя отсчетами частоты считается постоянной и находится как корни системы трансцендентных уравнений (3)

Отметим, что при традиционном методе определения ДП по результатам измерений комплексного коэффициента отражения на одной частоте [1] возникает неопределенность выбора значения ДП, поскольку корней множество.

При определении ДП методом, предложенным в данном разделе по двум точкам частоты, такая неопределенность значительно снижается.

Математическое моделирование резонаторных измерительных ячеек "закрытого" типа с жидким нефтепродуктом

Математическая модель резонатора с частичным заполнением исследуемым веществом представляет собой набор трансцендентных уравнений для нескольких основных мод. Решением соответствующего уравнения для каждой моды может быть построена калибровочная кривая, которая связывает ДП и резонансную частоту. Например, для цилиндрического резонатора с коаксиальным заполнением исследуемой жидкостью l (рис. 4) для моды HE_{111} получаем уравнение (5) с учетом [6].

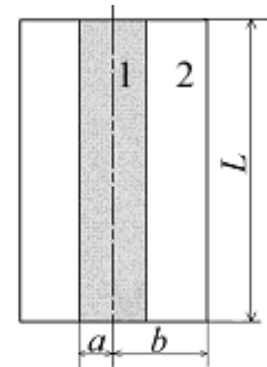


Рис.4 Измерительный цилиндрический резонатор: 1 – жидкий нефтепродукт; 2 – фторопласт.

$$\frac{\pi^2}{a^2 L^2} (\varepsilon_1 \mu_1 - \varepsilon_2 \mu_2)^2 - \left(\mu_1 \chi_2^2 \frac{J_1'(\chi_1 a)}{J_1(\chi_1 a)} - \mu_2 \chi_1^2 \frac{G_1'(\chi_2 a)}{G_1(\chi_2 a)} \right) \times$$

$$\times \left(\varepsilon_1 \chi_2^2 \frac{J_1'(\chi_1 a)}{J_1(\chi_1 a)} - \varepsilon_2 \chi_1^2 \frac{F_1'(\chi_2 a)}{F_1(\chi_2 a)} \right) = 0, \quad (5)$$

здесь $\chi_1 = \sqrt{k_1^2 - (\pi/L)^2}$; $\chi_2 = \sqrt{k_2^2 - (\pi/L)^2}$ — поперечные волновые числа; $k = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\varepsilon}/c$ — волновое число; $F_1 = \frac{J_1(\chi_2 r)}{J_1(\chi_2 b)} - \frac{Y_1(\chi_2 r)}{Y_1(\chi_2 b)}$ — функция, удовлетворяющая граничным условиям на поверхности металлического цилиндра для компонент поля E_z, E_φ ; $G_1 = \frac{J_1(\chi_2 r)}{J_1'(\chi_2 b)} - \frac{Y_1(\chi_2 r)}{Y_1'(\chi_2 b)}$ — функция, удовлетворяющая граничным условиям на поверхности металлического цилиндра для компонент поля H_z, H_φ ; J_1, N_1 — функции Бесселя и

Неймана первого порядку; J_1', F_1', G_1' — производные соответствующих функций.

Уравнение (5) решаем численными методами: при подстановке значения ДП — находим значение частоты, при подстановке измеренной частоты - находим проницаемость. На рис. 5 показаны решения (H и E ветви) уравнения (5) при подстановке различных значений проницаемости. Такие зависимости резонансной частоты моды от проницаемости далее – изомоды можно найти для каждой моды, решая соответствующую граничную задачу (своё трансцендентное уравнение). Набор таких изомод будет описывать положение наблюдаемых резонансов при включении ИЯ, заполненной исследуемым веществом, например, жидким нефтепродуктом в тракт измерителя КСВН или ослабления (рис. 6).

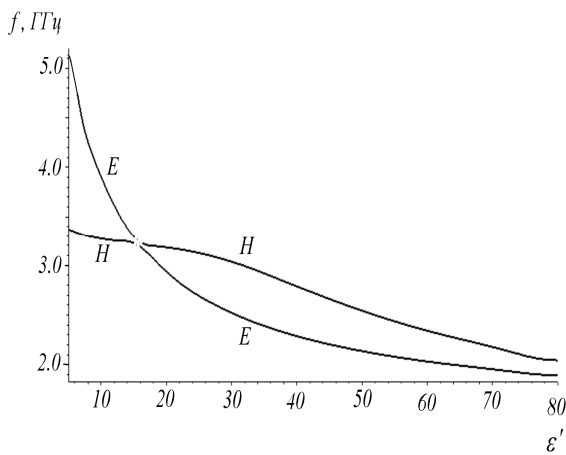


Рис.5 Корни уравнения (5) для $a=10$ мм, $b=25$ мм, $L=84$ мм: зависимость H – преобладание H -моды; зависимость E - преобладание E - моды.

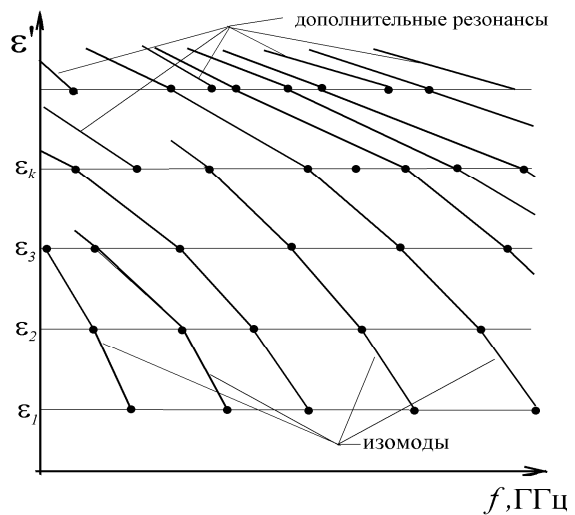


Рис.6 Изменение положения резонансов при изменении ДП исследуемого вещества (жидкого нефтепродукта).

Точками показано положение резонансов на оси частот при определенном значении ДП. Следует отметить, что, при изменении ДП образца в широких пределах, могут происходить такие явления, как разделение вырожденных мод, слияние мод, исчезновение моды, появление дополнительных резонансов, что необходимо учитывать при идентификации мод при проведении измерений.

Для описания положения резонансов на оси частот при определенном значении ДП исследуемого образца ϵ_k предложено использовать полином распознавания вида

$$P_k = |(f - f_{1,k}) \cdot (f - f_{2,k}) \cdot \dots \cdot (f - f_{n,k})|, \quad (6)$$

где $f_{n,k}$ — центральные частоты резонансных кривых, полученные в результате измерений частотной характеристики коэффициента отражения (либо передачи) измерительной ячейки.

Подобные полиномы были использованы для распознавания принадлежности вещества к определенному классу диэлектриков и для определения первого приближения ДП вещества. При обработке результатов измерений по построенным изосодам для трёх – пяти основных мод, изменяя ДП от минимального до максимального значения, находим резонансные частоты и подставляем их значения в полином (6). Значение проницаемости, при котором полином будет минимальным, является первым приближением, которое далее уточняется с учетом добротностей резонансов. При этом сменные резонаторные ИЯ, торцевые стенки которых выполнены из металлической сетки, встраиваются в трубопровод с транспортируемой жидкостью или газом. При размере ячейки сетки 3 - 6 мм на измерительных частотах порядка 2 – 4 ГГц значения добротности измерительного резонатора составляют 300 – 500, что достаточно для проведения автоматических измерений с помощью частотно сканирующего измерителя КСВН или ослабления.

Определения параметров затухания ЭМ волны при прохождении сквозь слой исследуемого вещества (угля)

Этот метод оценки качества вещества (угля) ограничивается только определением коэффициентов затухания (отражения) ЭМ волны при прохождении сквозь исследуемое вещество, не прибегая к определению его ДП. Рассмотрим схему (рис. 7), где на слой вещества 2 толщиной h падает плоская ЭМ волна под произвольным углом θ_1 , отражается от него и проходит сквозь этот слой, затухая и преломляясь.

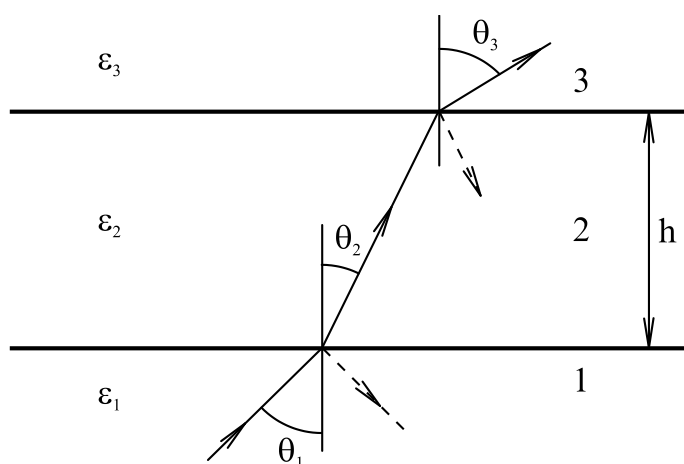


Рис.7. Схема отражения и прохождения ЭМ волны сквозь исследуемое вещество 2 (среды 1, 3 – воздух)

С учетом граничных условий для уравнений Максвелла и теоремы Шнеллиуса в [3] были получены выражения для показателей затухания ЭМ волны для исследуемого вещества в виде квадратов модулей комплексных коэффициентов ослабления. С учетом этих соотношений, в частотном диапазоне нами были выполнены расчеты и экспериментальные исследо-

вания для веществ с различными ДП и постоянным значением толщины слоя 2 (рис. 7) $h = 0,13$ м. Результаты расчетов и экспериментальной проверки приведены на рис 8 в дБ для 4-х значений ДП слоев. Как следует из рассмотрения графиков (рис.8) результаты расчетов ослабления ЭМ волны в веществе согласуются с измерениями (точки на графике) в частотном диапазоне 3 – 5 ГГц для ДП $= 4,5 - i 0,11$ (кривая 2) с учетом незначительных отклонений экспериментальной установки от теоретической модели. Из этих результатов также следует, что незначительные изменения мнимой части вещества (угля), характеризующей потери ЭМ энергии в нем значительно сказывается на значениях затуханий ЭМ волны на исследуемых частотах, что в свою очередь свидетельствует о калорийности (зольности), влажности угля.

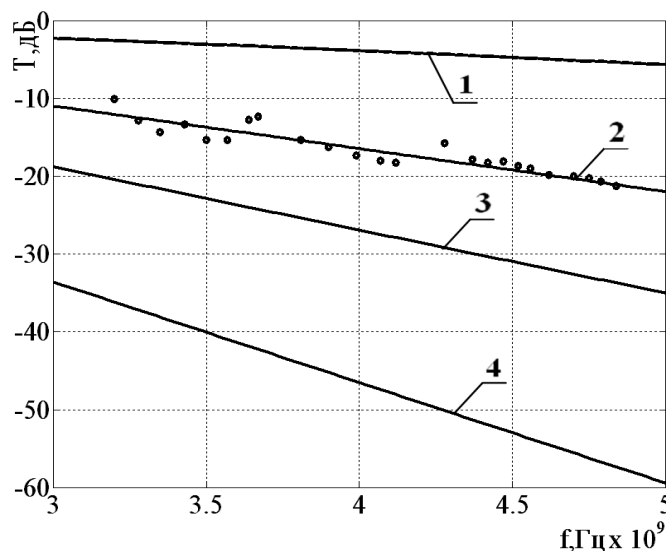


Рис. 8. Графики частотной зависимости ослабления ЭМ волны T , дБ в веществе с толщиной слоя $h = 0,13$ м (см. рис. 7) для различных значений ДП этого слоя: 1 - $4,5 - i 0,08$; 2 - $4,5 - i 0,11$; 3 - $4,5 - i 0,14$; 4 - $4,5 - i 0,19$.

Эту зависимость предлагается использовать для оценки параметров качества углей на конвейерной ленте. Для повышения информативности результатов диагностику лучше проводить в частотном диапазоне путем автоматизированного частотного сканирования. Метод включает 2 этапа диагностики: этап градуировки и этап измерения частотной зависимости электромагнитных параметров ослабления [7,8]. Последовательное по частотное сравнение частотной зависимости ослабления неизвестного вещества с дискретным банком данных градуировочных характеристик, запомненных ранее для веществ с известными характеристиками (K_a), выполняется путем поиска минимума целевых функций вида

$$Z(A) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \left[\frac{K_n(f_j) - K_z(f_j, A_i)}{K_z(f_j, A_i)} \right]^2 \right\}, \quad (7)$$

где $i=1, 2, \dots, M$; N – общее число дискретных частот рабочего диапазона; $K_2(f_j, A_i)$ – градуировочные значения затуханий набора M веществ с известными зольностями (калорийностями) A_i , измеренные и запомненные заблаговременно в частотном диапазоне; $K_H(f_j)$ – затухание вещества с неизвестной зольностью (калорийностью) A^* , измеренное в том же частотном диапазоне.

Для получения результата по искомому значению зольности (калорийности) решается задача поиска минимума M целевых функций (7) на всех дискретных частотных N точках рабочего частотного диапазона. В общем виде эта задача формулируется таким образом

$$\min Z(A), \text{ где } A \in (A_1, A_2, \dots, A_M), \quad (8)$$

где (A_1, A_2, \dots, A_M) – зольности (калорийности) дискретного набора M градуировочных частотных зависимостей затуханий веществ с известным параметром качества; $Z(A)$ – целевая функция (7).

Для реализации рассмотренного метода была применена схема диагностики и управления (рис. 9), обеспечивающая контроль и управление технологическими процессами в режиме реального времени. Затухание ЭМ волны, измеренное в блоке 2 преобразуется в цифровой код, передается в спец. ЭВМ 3, где решается задача определения параметра качества угля (зольности, влажности, калорийности) в соответствии с выражениями (7) и (8). После этого результаты измерений от спец. ЭВМ 3 передаются в автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) предприятия 4 в режиме реального времени, например, по каналу типа RS. Блок датчиков качества 1 включает две антенны-датчика – передающую и приемную, между которыми на конвейере движется исследуемый уголь. Одновременно могут работать несколько конвейеров с углем. При необходимости изменения качественного состава угля, АСУ ТП 4 воздействует на исполнительные механизмы по заранее разработанной программе. Если необходимо изменить калорийность, зольность жидкого нефтепродукта, например, мазута, подаваемого по трубопроводу одновременно с подачей угля на конвейере, исполнительный механизм регулирует качество мазута в одном или нескольких трубопроводах,

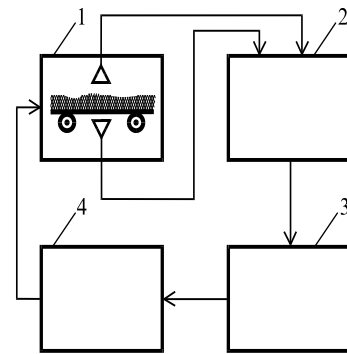


Рис.9 Структурная схема системы диагностики и управления параметрами качества углей: 1 – блок датчиков качества вблизи конвейерной ленты; 2 – измеритель затухания ЭМ волны; 3 – специализированная ЭВМ; 4 – АСУ ТП предприятия.

Выводы и рекомендации

Результаты математического моделирования электромагнитного контроля ДП, КСВН и затухания могут использоваться для ускоренной достоверной автоматизированной проверки параметров качества углей и нефтепродуктов волноводными и резонаторными методами при времени контроля одной пробы не более 10-15 мин.

Кроме того, в режиме реального времени ЭМ метод обеспечивает оперативный контроль и автоматизированное управление качеством углей и жидких нефтепродуктов, перемещаемых на конвейерах и по трубопроводам к местам их использования на предприятиях горнодобывающей, металлургической и энергетической промышленности.

Литература

1. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на СВЧ. М.: Физматгизд, 1964. —404с.
2. Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 208 с.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. перев. с англ. Г.П. Мотулелича. – М.: Наука. ГРФМЛ. 1973. 713 с.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. Изд-во Наука, 1973, 343с.
5. .Моисеев Н.Н. Методы оптимизации / Н.Н Моисеев., Ю.П. Иванилов, Е.М. Столярова – М.: Наука, 1978. – 352 с.
6. Вендик М.В. Об излучении из открытого конца круглого металлодиэлектрического волновода. / М.В. Вендик, В.А. Калашин // Радиоэлектроника, №2, 2001, С. 93-98.
7. Овсяников Вол. В. Контроль якості сипучих речовин шляхом частотного НВЧ сканування / Тр. междун. молод. н.-т. конф. студ., аспирантов и ученых, 17-21 04. 06 г., г. Севастополь, Тезиси, С. 270.
8. Кузнецов Г.В., Випанасенко С.І., Овсяніков В.В., Гусев О.Ю., Овсяников В.В., Фесак Г. І., Мартиненко С.В. Спосіб автоматизованого контролю якісних характеристик речовин у мікрохвильовому діапазоні та пристрій для його реалізації. Патент UA 90540, опубл. 11.05.10. Бюл. №9.

Бухаров С. В., Овсяников Вл. В. Діагностика параметрів якості вугілля і рідких нафтопродуктів електромагнітними методами. Наведено результати математичного моделювання хвилевідного і резонаторного методів діагностики параметрів якості вугілля і рідких нафтопродуктів (калорійності, зольності, вологості). Розглянуто новий підхід до визначення хвилевідним методом комплексної діелектричної проникності (ДП) досліджуваної речовини, заснований на результатах вимірювання її коефіцієнта стоячої хвилі по напрузі при зондуванні у деякому частотному діапазоні. Розглянуто резонаторний метод визначення ДП рідких нафтопродуктів шляхом розміщення в трубопроводі резонаторних вимірювальних осередків. Досліджено можливість контролю якості вугілля на конвеєрі з використанням значень загасання електромагнітної хвилі, що проходить крізь шар досліджуваного вугілля. Результати досліджень запропоновано використовувати для діагностики та управління якістю цих речовин, що транспортуються на конвеєрі або по трубопроводу.

Ключові слова: електромагнітний метод діагностики якості, діагностика і керування параметрами якості, діелектрична проникність, коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі, загасання, зольність і калорійність.

Бухаров С.В., Овсяников Вл. В. **Диагностика параметров качества углей и жидких нефтепродуктов электромагнитными методами.** Приведены результаты математического моделирования волноводного и резонаторного методов диагностики параметров качества углей и жидких нефтепродуктов (калорийности, зольности, влажности). Рассмотрен новый подход к определению волноводным методом комплексной диэлектрической проницаемости (ДП) исследуемого вещества, основанный на результатах измерения его коэффициента стоячей волны по напряжению при зондировании в некотором частотном диапазоне. Рассмотрен резонаторный метод определения ДП жидких нефтепродуктов путем размещения в трубопроводе резонаторных измерительных ячеек. Исследована возможность контроля качества углей на конвейере с использованием значений затухания электромагнитной волны, проходящей сквозь слой исследуемого угля. Результаты исследований предложено использовать для диагностики и управления качеством этих веществ, транспортируемых на конвейере или по трубопроводу.

Ключевые слова: электромагнитный метод диагностики качества, диагностика и управление параметрами качества, диэлектрическая проницаемость, коэффициент стоячей волны по напряжению, затухание, зольность и калорийность.

*Bukharov S.V., Ovsyanikov Vl. V. **Diagnosis of quality parameters of coal and liquid petroleum products by electromagnetic methods.** The results of mathematical modeling of the waveguide and resonator methods for diagnosis of the parameters of quality of coal and liquid petroleum products (calorific value, ash, moisture). A new approach to defining the waveguide by the method of complex permittivity (CP) of the substance, based on the results of measuring its voltage standing wave ratio in probing the in some frequency range. Considered resonator method for determining the CP of liquid petroleum products by placing in the pipe cavity measuring cells. The possibility of controlling the quality of coal on the conveyor with the use of attenuation of electromagnetic waves passing through the layer under coal is study. The results of the research proposed to use for diagnostic and quality control of these substances to be transported on a conveyor belt or pipeline wire.*

Key words: electromagnetic method for diagnosing the quality of diagnosis and management of quality parameters, dielectric constant, voltage standing wave ratio, attenuation, ash and caloric content.