

сигналу, завадостійкості (здатності модульованих сигналів протистояти шкідливому впливу перешкод), складності встаткування та ін., рекомендується застосовувати ФІМ при побудові систем передачі з часовим розділенням каналів.

Список літератури. 1. Теоретические основы электросвязи: Учебное пособие / Иванов М.А., Кравец В.А.; Под ред. В.А.Кравца. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – 354 с. 2. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / Иванов В.И., Гордиенко В.М., Попов Г.Н. и др.; Под ред. Иванова В.И. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 232 с. 3. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3 томах. Том 1 – Современные технологии / Крж Б.И., Попантопуло В.И., Шувалов В.П.; под ред. профессора В.П.Шувалова. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 647 с. 4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / Крухмалев В.В., Гордиенко В.М., Моченов А.Д. и др.; Под ред. В.Н.Гордиенко и В.В.Крухмалева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с. 5. Системы электросвязи: Учебник для вузов / Под ред. В.П.Шувалова. – М.: Радио и связь, 1987. – 512 с. 6. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с. 7. Многоканальные системы передачи. Учебник для вузов / Н.Н.Баева, В.Н.Гордиенко, С.А.Курицын и др.; под ред. Н.Н.Баевой и В.Н.Гордиенко. – М.: Радио и связь, 1997.

Надійшла до редколегії 27.10.2009

УДК 621

Б.И.НЕВЗЛИН, канд.техн.наук, ВНУ им. В.Даля, Луганск;
Н.П.ГОЛОВАЧЕВ, аспирант, ВНУ им. В.Даля, Луганск

РАСЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА

Запропонована електрична модель пористого вологого сипкого матеріалу, що враховує форми зв'язку води з сухим матеріалом і адекватно відображає частотну залежність діелектричної проникності і електропровідності в межах 0,5 - 110 МГц. Мал. 4, табл.1, іст 9.

The electronic model of porous, moist, friable material, taking into account the combination of water with dry material, and adequately reflecting the frequency dependence of inductance and conductivity within the limits of 0.5-110 MHz, is offered in Fig. 4, Table 1, Source 9.

Введение. В работе [1] приведены многие известные электрические модели влажных материалов. Как отмечено там же, наиболее существенными недостатками известных моделей являются отсутствие учета форм связи воды с материалом и не зависимость диэлектрической проницаемости (ДП) и электропроводности (Э) от частоты приложенного к материалу электрического поля. Второй недостаток противоречит многочисленным экспериментальным данным, приведенным многими авторами [2-5], в том числе и результатам исследований автора [6].

В последней работе предложена электрическая модель влажного сыпучего материала (СМ) в определенной мере свободная от упомянутых недостатков. В ней СМ представлен состоящим из одинаковых частиц сферической формы в

которых находится вода при невысокой влажности и на поверхности частиц, если влажность превышает пористость. Расчет параметров СМ выполнен цепипольным методом. Для учета форм связи воды с материалом и частотной зависимости ДП и Э приняты их значения в частице на нулевой и бесконечной частотах.

Не решенная часть проблемы. Модель значительно приближена к реальному СМ, но частотная зависимость параметров выражена в недостаточной мере, в частности, ДП СМ не может быть больше ДП воды, что в реальном СМ при значительной влажности может иметь место [7].

Основной материал исследования. Для устранения этого недостатка сделаем следующее допущение, из числа свойств связанной воды следует указать повышенную плотность. Предположим, что связанная вода находится в наиболее сильной связи (но не химической) образуя двойной мономолекулярный слой с $\epsilon = 4,5$ и плотностью $1,74 \text{ т/м}^3$ [8], при этом она находится на значительной части, если не всей поверхности материала. Плотность связанной воды является постоянной величиной в пределах одного минерального состава, и не зависит от температуры, а определяется энергией связи с гетерогенной поверхностью соответствующей величине слоевого заряда, до температуры структурной неустойчивости. Величина, которой сдвинута в высокотемпературную область по сравнению температурой фазового перехода свободной воды [9]. Вся остальная вода в материале является свободной и сохраняет свои свойства. Конечно, это допущение несколько упрощает общую картину, но зато делает возможным учет форм связи, который в общем случае слишком затруднителен.

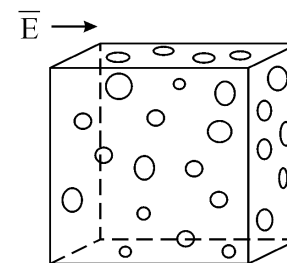


Рисунок 1 – Единичный куб из пористого материала

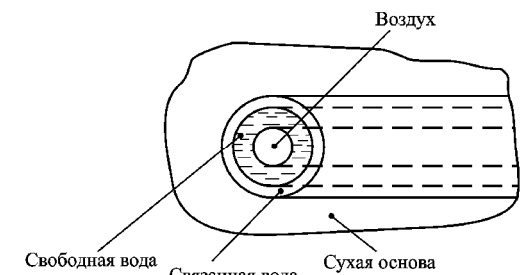


Рисунок 2 – Расположение составляющих в поре материала

Для более подробного рассмотрения представим куб из материала, который содержит сухую основу, воздух, связанную и свободную воду (рис. 1) в сквозных порах. Каждая такая пора включает в общем случае оба вида воды и воздух (рис. 2). Можно считать, что одна треть пор расположены по направлению вектора электрического поля и две трети – нормально к нему. То есть одна треть сухого мате-

риала, связанной и свободной воды и воздуха включены параллельно и две трети – последовательно, что отражается схемой замещения на рис. 3, где C_{1cx} , g_{1cx} емкость и проводимость сухого материала (основы) в последовательном включении; C_{1cv} , g_{1cv} – то же для связанной воды; $C_{1св}$, $g_{1св}$ – для свободной воды; $C_{1вз}$, $g_{1вз}$ – для воздуха в порах; индекс 2 при C , g относится к параллельному включению.

Обозначив относительную порозность материала J для куба единичного размера можно записать

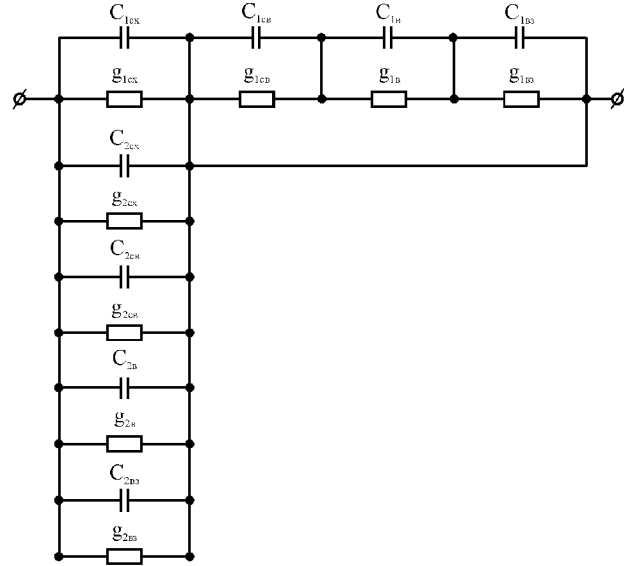


Рисунок 3 – Схема замещения пористого материала

$$\begin{aligned} C_{1cx} &= \frac{2e_o e_c (1-J)^{2/3}}{3(1-J)^{1/3}} = \frac{2e_o e_c (1-J)^{1/3}}{3}; \\ g_{1cx} &= \frac{2g_c (1-J)^{1/3}}{3}; \\ C_{2cx} &= \frac{e_o e_c (1-J)}{3}, \quad g_{2cx} = \frac{g_c (1-J)}{3}. \end{aligned} \quad (1)$$

По остальным элементам:

$$\begin{aligned} C_{1c\dot{a}} &= \frac{2e_o e_{c\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & C_{2c\dot{a}} &= \frac{e_o e_{c\dot{a}} J_{\dot{n}\dot{a}}}{3}; \\ g_{1c\dot{a}} &= \frac{2g_{c\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & g_{2c\dot{a}} &= \frac{g_{c\dot{a}} J_{\dot{n}\dot{a}}}{3}; \\ C_{1\dot{a}} &= \frac{2e_o e_{\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_i + J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & C_{2\dot{a}} &= \frac{e_o e_{\dot{a}} (J_i - J_{\dot{n}\dot{a}})}{3}; \\ g_{1\dot{a}} &= \frac{2g_{\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_i + J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & g_{2\dot{a}} &= \frac{g_{\dot{a}} (J_i - J_{\dot{n}\dot{a}})}{3}; \\ C_{1\dot{a}\dot{c}} &= \frac{2e_o (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J + J_i))^{1/3}}; & C_{2\dot{a}\dot{c}} &= \frac{e_o (J - J_i)}{3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где J_o – объемная влажность; J_{cv} – объемное содержание связанной воды, равное $W_{связ}/1,74$ – плотность связанной воды. Проводимость воздуха считаем равной нулю $g_{1вз} = g_{2вз} = 0$. Переходя от C и g к e и g (так как куб единичный)

$$\begin{aligned} e_{1\dot{n}\dot{o}} &= \frac{2e_{\dot{n}} (1-J)^{1/3}}{3}; & e_{1\dot{n}\dot{a}} &= \frac{e_{\dot{n}\dot{a}} J_{\dot{n}\dot{a}}}{3}; \\ e_{1\dot{a}} &= \frac{2e_{\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_o + J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & e_{1\dot{a}} &= \frac{2(1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J + J_o))^{1/3}}; \\ e_{2\dot{n}\dot{o}} &= \frac{e_{\dot{n}} (1-J)}{3}; & e_{2\dot{n}\dot{a}} &= \frac{e_{\dot{n}\dot{a}} J_{\dot{n}\dot{a}}}{3}; & e_{2\dot{a}} &= \frac{e_{\dot{a}} (J_i - J_{\dot{n}\dot{a}})}{3}; \\ e_{2\dot{a}\dot{c}} &= \frac{J - J_i}{3}; & g_{1\dot{n}\dot{o}} &= \frac{2g_{\dot{n}} (1-J)^{1/3}}{3}; & g_{1\dot{n}\dot{a}} &= \frac{g_{\dot{n}\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; \\ g_{1\dot{a}} &= \frac{2g_{\dot{a}} (1-J)^{2/3}}{3(1-(1-J_o + J_{\dot{n}\dot{a}}))^{1/3}}; & g_{2\dot{n}\dot{o}} &= \frac{g_{\dot{n}} (1-J)}{3}; & g_{2\dot{n}\dot{a}} &= \frac{g_{\dot{n}\dot{a}} J_{\dot{n}\dot{a}}}{3}; \\ g_{2\dot{a}} &= \frac{g_{\dot{a}} (J_i - J_{\dot{n}\dot{a}})}{3}. \end{aligned} \quad (3)$$

Преобразуя схему замещения к виду, показанному на рис. 4, находим

$$\begin{aligned} e_2 &= e_{2\dot{n}\dot{o}} + e_{2\dot{n}\dot{a}} + e_{2\dot{a}} + e_{2\dot{a}\dot{c}}; \\ g_2 &= g_{2\dot{n}\dot{o}} + g_{2\dot{n}\dot{a}} + g_{2\dot{a}}; \\ r_3 &= \frac{g_{1\dot{n}\dot{o}}}{g_{1\dot{n}\dot{o}}^2 + (w e_i e_{1\dot{n}\dot{o}})^2} + \frac{g_{1\dot{n}\dot{a}}}{g_{1\dot{n}\dot{a}}^2 + (w e_i e_{1\dot{n}\dot{a}})^2} + \frac{g_{1\dot{a}}}{g_{1\dot{a}}^2 + (w e_i e_{1\dot{a}})^2}; \\ a_3 &= \frac{e_{1\dot{n}\dot{o}}}{g_{1\dot{n}\dot{o}}^2 + (w e_i e_{1\dot{n}\dot{o}})^2} + \frac{e_{1\dot{n}\dot{a}}}{g_{1\dot{n}\dot{a}}^2 + (w e_i e_{1\dot{n}\dot{a}})^2} + \frac{e_{1\dot{a}}}{g_{1\dot{a}}^2 + (w e_i e_{1\dot{a}})^2} + \frac{1}{(w e_i)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

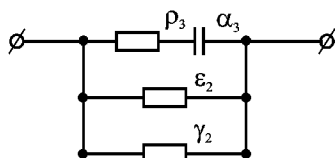


Рисунок 4 – Последовательно-параллельная схема замещения материала частицы

Из последних формул получаем ДП и электропроводность материала частицы на любой из исследованного диапазона частот, то есть при известных значениях ϵ и γ сухой основы, связанной и свободной воды:

$$e_i = e_2 + \frac{a_3}{\left(\frac{a_3}{we_i}\right)^2 + r_3^2}; \quad g_i = g_2 + \frac{r_3}{\left(\frac{a_3}{we_i}\right)^2 + r_3^2}. \quad (5)$$

Произведем расчет локальных $C1$, $C2$, $g1$, $g2$ и интегральных параметров, используя выражения (1)-(5). Для СМ типа угольной шихты для коксования углеподготовительного цеха №1 Авдеевского коксохимзавода влажностью 5 % зольностью 7,8 %, увлажненного водой содержащей 0,5 % NaCl с исходными данными: радиус частицы – 0,5 мм, радиус площадки контактирования между частицами – 20 мкм, высота микронеровностей – 20 мкм, результаты расчетов приведены в таблице.

Среднеквадратичная относительная приведенная погрешность модели построенной по [6] составила более 20 %, что трудно считать удовлетворительным.

f, МГц	C1, нФ	C2, нФ				g1, C _{им}	g2, C _{им}	C _{им} /м		
0,50	602	126	12,4	12,4	0,00	0,0187	0,00170	1,56	1,66	-0,10
1,6	189	88,0	8,47	7,11	1,36	0,0206	0,00188	1,74	1,86	-0,12
5,1	60,8	76,3	7,16	5,43	1,73	0,0212	0,00194	1,96	2,24	-0,28
17	45,3	74,7	6,17	4,32	1,85	0,0213	0,00204	3,41	3,31	0,10
44	43,9	73,7	4,37	3,57	0,81	0,0213	0,00248	6,45	5,62	0,77
110	43,7	71,7	3,33	3,25	0,08	0,0213	0,00352	8,23	8,81	-0,58
Среднеквадратичная относительная приведенная погрешность						0,098				0,047

Вывод. Описанная в работе модель отражает частотную зависимость ДП и Э влажного СМ в диапазоне 0,5-110 МГц со среднеквадратичной относительной приведенной погрешностью до 5 – 10 %, что сравнимо с погрешностью измерений (5 – 7 %).

Список литературы: 1. Невзлин Б.И. О электрических моделях влажных материалов // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. – 2003. – № 2 (7). – С. 45-51. 2. Секанов Ю.П. Научные и технические решения проблемы влагомерии зерна и кормов в процессе их производства: Дис...докт. техн. наук: 05.20.01.05.13.17. – М, 2000. – 76 с. 3. Берлинер М.А. Измерения влажности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с. 4. Теория и практика экспрессного контроля влажности твердых и жидких материалов / Е.С.Кричевский, В.К.Бензарь, М.В.Венидиктов и др. / Под ред. Е.С.Кричевского. – М.: Энергия, 1980. – 240 с. 5. Федоткин И.М., Клочков В.М. Физико-технические основы влагомерии в пищевой промышленности. – К.: Техніка, 1974. – 308 с. 6. Дубров Н.С., Кричевский Е.С., Невзлин Б.И. Многопараметрические влагомеры для сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 144 с. 7. Исследование, разработка и внедрение системы контроля влажности угольной шихты в лабораторных и производственных условиях. Отчет о НИР (заключ.) / Ворошиловградский машиностр. ин-т. – Э-146-79; №ГР 79010671; Инв. № Б 929909. – Ворошиловград, 1980. – 225 с. 8. Лыков А.В. Теория сушки. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950. – 416 с. 9. Макеева Т.Г., Гончарова Л.В., Трофимов В.А., Егоров Ю.М. Природа и закономерности изменения плотности связанной воды в дисперсных системах. <http://geo.web.ru>.

Поступила в редакцию 16.10.2009