

случае глухого замыкания на землю в любой точке сети.

Выводы

Автором принят подход, что устройства контроля изоляции должны сигнализировать о всех значениях сопротивления изоляции, при которых в случае: а) прикосновения человека к любому полюсу ток через его тело превысит допустимый уровень; б) возникновения глухого замыкания на землю в любой точке сети появится угроза возникновения пожара и взрыва, а также неправильной работы электрических аппаратов. Наоборот, ни при каких других значениях сопротивления изоляции эти устройства срабатывать не должны.

Из рис. 6 видно, что устройства измеряющие эквивалентное сопротивление изоляции не в состоянии выполнить эти условия, так как их характеристика срабатывания (гипербола 6 дана уравнением $R_{из} = (R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$) значительно отличается от контура заштрихованной зоны, в которой все вышеупомянутые угрозы отсутствуют. Поэтому предлагается воспользоваться этими устройствами по-другому – для выявления всех вышеупомянутых угроз они должны проверять критерии данные неравенствами (8), (10) и (11). Для цифровых устройств контроля изоляции задача эта вполне выполнима, если им ввести необходимые номинальные параметры аппаратов. Устройства эти способны в процессе измерения сопротивления изоляции определять также суммарную емкость сети.

Список литературы

1. Hofheinz W. Protective Measures with Insulation Monitoring, VDE Verlag Berlin-Offenbach, 2nd edition 2000.
2. Olszowiec P. Insulation Measurement and Supervision in Live AC and DC Unearthed Systems Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 167, Springer 2012.

УДК 681.586

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЛАЖНЫХ СИСТЕМ

***П.И. Каландаров, Р.К. Азимов, Ш.М. Машарипов,
Б. Хаитов***

*Ташкентский государственный технический университет
Polvon_1955@yahoo.com*

Аннотация

Проанализированы математические модели диэлектрической проницаемости гетерогенных влажных систем и способы повышения достоверности и точности результатов контроля влажности материалов диэлькометрическим методом. Получены зависимости диэлектрической проницаемости свободной воды от частоты внешнего поля, аналитические выражение расчета диэлектрической проницаемости различных компонентных смесей, отражены предложения по использованию диэлькометрических средств технологического контроля параметров гетерогенных систем, а также диэлектрической проницаемости для хлопка-сырца, которая учитывает температуру, материала, что позволяет оценить степень и характер влияния каждого фактора на суммарную погрешность измерения её влажности.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, влажностные системы, контроль влажности, диэлькометрический метод, гетерогенные системы, хлопок-сырец, температура, погрешность измерения.

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF PERMITTIVITY OF HETEROGENEOUS WET SYSTEMS

R.K.Azimov, P.I.Kalandarov, Sh.M.Masharipov, B.Khaitov

*Tashkent State Technical University, Uzbekistan, Tashkent
Polvon_1955@yahoo.com*

Abstract

Analyzes the mathematical model of the dielectric constant of wet heterogeneous systems and methods of increasing the reliability and accuracy of materials humidity control capacity method. The dependences of the dielectric permittivity of free water on the frequency of the external field, the analytical expression of dielectric constant of different component mixtures calculation, suggestions of using capacitive means of technological parameters control of heterogeneous systems, and the dielectric constant for cotton are presented, which takes into account temperature, matter, and enables to evaluate the extent and nature of the impact of each factor on the total error of measurement of humidity of raw cotton.

Key words: dielectric constant, and the humidity of the system, moisture control, dielcometric method, heterogeneous systems, raw cotton, temperature measurement error.

Гетерогенными системами считаются материалы, в которых состав, структура, свойства или отношения между элементами структуры

не постоянны по объему. Единственным критерием гетерогенности материала с позиции диэлькометрии является изменение макроскопических свойств по сравнению с однородной, изоморфной, гомогенной среды. Наиболее резко диэлектрические характеристики гетерогенной системы отличаются от свойств однородных материалов при больших концентрациях неоднородностей. По теории гетерогенной поляризации рассматриваются два типа концентрированных сред. Слабо концентрированными считаются среды, в которых размеры неоднородностей малы по сравнению с расстояниями до ближайших элементов системы [1]. Сильно концентрированные среды содержат такие включения, которые существенно влияют на свойства всего материала.

Для матричных систем характерно наличие некой общей фазы – матрицы, в которую вкраплены не связанные между собой частицы, составляющие вторую фазу.

В статических дисперсных системах диэлектрическая проницаемость представляет собой сложную функцию парциальных диэлектрических проницаемостей и объемных концентраций компонентов дисперсионной среды ε_1 , ν_1 и дисперсной фазы ε_2 , ν_2 , инвариантную к замене индексов

$$\varepsilon = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \nu_1, \nu_2) = f(\varepsilon_2, \varepsilon_1, \nu_2, \nu_1). \quad (1)$$

Это значит, что фазы статических дисперсных систем равноценны. При этом дисперсионная среда обволакивает дисперсные частицы, в результате чего в диэлектрических характеристиках системы ее параметры доминируют. Это приводит к неинвариантности свойств системы относительно индексов фаз

$$\varepsilon = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \nu_1, \nu_2) \neq f(\varepsilon_2, \varepsilon_1, \nu_2, \nu_1). \quad (2)$$

Вода, как правило, играет важную роль в диэлькометрическом контроле гетерогенных влажных систем. Для воды, находящейся в свободном состоянии при комнатной температуре, в диапазоне частот диэлектрической проницаемости принимаются $10^5 \leq f \leq 10^8$ Гц значения $\varepsilon \approx 81$. Высокое значение диэлектрической проницаемости является структурной особенностью воды: водородные связи удерживают выделенное направление диполя молекулы в течение времени их «жизни», тем самым обеспечивая многократную поляризацию каждой молекулы, обусловленную активационно-флуктуационным механизмом теплового движения протонов на линии связи $O-H...O$. По экспериментальным данным [2], длина волны, соответствующая кри-

тической частоте, при температуре $t = 20^\circ C$ равна $\lambda_0 = 1,74 \text{ см}$.

Значение ϵ_∞ принято считать равным 5,5, хотя по данным некоторых исследователей более точным и являются значения 4,5 или 4,9.

Для расчёта диэлектрической проницаемости на практике приходится обращаться к следующим формулам, изложенных в [3]:

1. Модель Максвелл-Вагнера для матричной двухкомпонентной смеси

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \frac{2\epsilon_1 + \epsilon_2 + 2V(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2 - V(\epsilon_2 - \epsilon_1)}, \quad (3)$$

где ϵ_c – диэлектрическая проницаемость смеси; ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость материала матрицы; ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость материала включений; V – объемная концентрация (относительный объем) включений.

2. Модель Релея (для $V \ll 1$)

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \left(1 + 3V \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \right). \quad (4)$$

3. Модель Оделевского

$$\epsilon_c = \epsilon_1 \left(1 + \frac{V}{\frac{1-V}{3} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}} \right). \quad (5)$$

4. Модель Кубо-Накамуры

$$\begin{aligned} 3\epsilon_2 \lg \left(\frac{\epsilon_2 - \epsilon_c}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \right) - (\epsilon_2 - 0,74) \lg \left(\frac{\epsilon_1 + 0,37}{\epsilon_2 + 0,37} \right) = \\ = (2,2\epsilon_2 + 0,81) \lg(1 - V). \end{aligned} \quad (6)$$

5. Модель Полдера-ван-Сантена

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \frac{1}{3}V(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1 \right)} \right], \quad (7)$$

где A_j – фактор формы, численное значение которого зависит от формы включений: для сферических частиц $A_1 = A_2 = A_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$; для дисков $A_1 = A_2 = 0, A_3 = 1$; для плоских пластин $A_1 = A_2 = 0,5, A_3 = 0$.

6. Модель Де Лура, которая представляет собой дальнейшее развитие модели Полдера-Ван-Сантена

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \frac{1}{3}V(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right)} \right]. \quad (8)$$

Формула (8) отличается от (7) тем, что в правой части вместо ε_1 (диэлектрическая проницаемость материала матрицы) записана величина ε^* (комплексной диэлектрической проницаемости – КДП) области, непосредственно примыкающей к частицам включений.

Если смесь содержит не два диэлектрических материала (например, хлопок-сырец), а три или более, формула (8) может быть записана в виде

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n V_i (\varepsilon_i - \varepsilon_c) \sum_{j=1} \left[\frac{1}{1 + A_j \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right)} \right]. \quad (9)$$

В моделях, описывающих диэлектрическую проницаемость статических смесей, должны соблюдаться следующие условия:

во-первых, значение КДП смеси ε_c должно удовлетворять нера-

венствам Винера

$$\left(\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\varepsilon_i} \right)^{-1} \leq \varepsilon_c \leq \sum_{i=1}^n V_i \varepsilon_i ; \quad (10)$$

во-вторых, формула должна быть симметричной, т.е. ε_c - должна изменяться в зависимости от того, какие номера i мы будем присваивать тем или иным компонентам [4]. На формулы для матричных смесей требование симметрии не распространяется. Необходимо отметить, что все вышеприведенные модели применимы к физическим смесям, т.е. предполагается, что смешиваемые вещества не вступают друг с другом в химическое взаимодействие, при этом моделирование диэлектрической проницаемости гетерогенных влажных материалов с учетом химических процессов затрудняется.

Хлопок-сырец в первом приближении представляет собой трехфазную композицию, состоящую из клетчатки, влаги и воздуха, имеющие различные электрофизические свойства. Электрофизические параметры влажных хлопковых материалов как композиционных макро- и микронеоднородных систем описываются в основном процессами миграционной поляризации, роль которых существенно возрастает с понижением частоты. Физической основой миграционной поляризации является перемещение слабосвязанных ионов в объеме диэлектрика на значительное расстояние, соизмеримое с толщиной всего диэлектрика [5]. Эти перемещения приводят к образованию пространственных зарядов на границах раздела диэлектрика, поэтому эта поляризация называется межслоевой. Время, затрачиваемое на такие перемещения велико, поэтому идет запаздывание.

При переменном напряжении синусоидальной формы плотность абсорбционного тока, определяемая медленно устанавливающейся поляризацией, равна:

$$J_{аб} = \frac{E_m e^{i\omega t}}{1 + \omega^2 \tau^2} (\omega^2 \tau^2 \gamma + i\omega \tau \gamma), \quad (11)$$

где τ – время релаксации; γ – электропроводность; ω – угловая частота; E_m – действующее значение напряженности электрического поля.

Амплитуда плотности емкостного тока выражена как

$$J = \omega \varepsilon_0 \varepsilon E_m . \quad (12)$$

Из последних уравнений получим величину диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = \frac{\tau\gamma}{\varepsilon_0(1 + \omega^2\tau^2)}. \quad (13)$$

При наличии разных видов поляризации с различными τ и γ величина ε очевидно будет равна:

$$\varepsilon = \sum_i \frac{\tau_i\gamma_i}{\varepsilon_0(1 + \omega^2\tau_i^2)}. \quad (14)$$

Согласно [7], из рис. 1. видно, что отношение $\varepsilon_{0,2}/\varepsilon_{20}$ быстро растет с увеличением влажности W . Результаты анализа из [6] подтверждают, что механизм влияния температуры на величину емкости датчика, т.е. на диэлектрическую проницаемость влажного материала, определяется изменением при нагревании соотношения в материале количеств связанной и свободной влаги – где диэлектрическая проницаемость связанной влаги гораздо ниже (≈ 5), чем 81. Для диэлектрических влагомеров в диапазоне ниже 10^8 Гц влияние температуры можно учесть введением температурной коррекции к результатам измерения по формуле:

$$W = W_{II} - k_t(t - t_0), \quad (15)$$

где W – истинная влажность материала при температуре t .; W_{II} – результат отсчета влажности по шкале; t и t_0 – температура материала соответственно в момент измерения и при градуировке влагомера; k_t – температурный коэффициент для данного материала.

В результате комплексная диэлектрическая проницаемость хлопко-сырца рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{a}{i\omega\varepsilon_0} e^{-\frac{B}{T}} + \sum_i \frac{\varepsilon_{ci} - \varepsilon_{\infty i}}{1 + i\omega A_i \cdot e^{-\frac{B_i}{T}}}, \quad (16)$$

С ростом температуры ε при $\omega\tau \gg 1$ увеличивается, так как уменьшается τ и поляризация за время полупериода приложенного напряжения развивается в большей степени. Отмеченные выше особенности материалов необходимо принимать во внимание при матема-

тическом описании диэлектрических свойств исследуемых материалов от влажности. Диэлектрические свойства влажных материалов описываются формулами смесей, являющимися достаточно точными для влагосодержащих жидкостей.

При экспериментальном исследовании в поле высокой частоты диэлектрических свойств таких материалов, как хлопок-сырец, необходимо решать следующие малоизученные задачи [8]:

- определение и анализ функций преобразования первичного измерительного высокочастотного преобразователя (для этого необходимо экспериментальным путем исследовать зависимости диэлектрических свойств исследуемых продуктов от влажности важнейших влияющих факторов);

- построение на основе полученных экспериментальных данных электрической модели первичного преобразователя, с оптимальной аппроксимацией реальных характеристик исследуемых материалов;

- реализация полученных данных путем разработки высокочастотных приборов контроля влажности для дисперсных и неоднородных материалов и их испытании в лабораторных и производственных условиях.

На основе выполненного анализа можно констатировать следующее:

1. Проведенный анализ показывает, что в известных работах недостаточно уделено внимания разработке универсальных аналитических моделей диэлектрических свойств гетерогенных систем вообще и дисперсных влагосодержащих тел в частности. Одним из основных причин неудовлетворительности известных формул смеси при их применении влажным материалом – отсутствие учета влияния видов и форм связи влаги на электрофизические свойства материала.

2. При проектировании диэлькометрических средств технологического контроля параметров гетерогенных систем достаточно охватить диапазон от инфракрасных до десятков мегагерц, поскольку именно в этом частотном диапазоне проявляются факторы структурой поляризации.

3. Модель диэлектрической проницаемости для хлопка-сырца, которая учитывает температуру, материала, позволяет оценить степень и характер влияния фактора на суммарную погрешность измерения влажности хлопка-сырца и, следовательно, может быть использована для введения в результат измерения необходимых поправок.

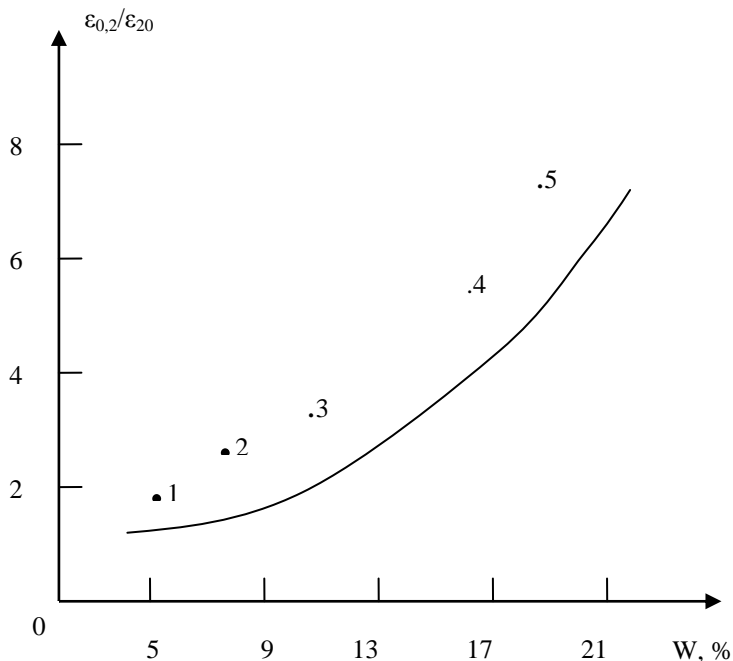


Рис. 1. Зависимость отношения $\epsilon_{0,2} / \epsilon_{20}$ от значений W хлопка-сырца

Список литературы:

1. Емец Ю.П. Дисперсия диэлектрической проницаемости трех- и четырехкомпонентных матричных сред // Журнал технической физики. – 2003. – Том 73. Вып.3. – С. 42-53.
2. Челидзе Т.Л. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. – Киев: Наукова думка, 1977. – 232 с.
3. Федюнин П.А. Микроволновая термовлагодетрия. – под общ. ред. П.А. Федюнина. – М.: «Издательство Машиностроение -1», 2004. – 208 с.
4. Мищенко С.В., Малков Н.А. Проектирование радиоволновых (СВЧ) приборов неразрушающего контроля: Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – 128 с.
5. Котюк А.Ф. Датчики в современных измерениях А.Ф. Котюк. – М.: Радио и связь, Горячая линия-Телеком, 2006. – 96 с.
6. А.с. №947731. Способ измерения влажности сыпучих и жидких материалов. Б.И.№28.-Опубликовано: 30.07.1982.

7. Казанский В.В. Исследование диэлектрических свойств, методов и средств измерения влажности хлопка-сырца: Автореф. дисс....тех.наук. - Т,1970. - 17 с.

8. Искандаров П.И., Каландаров П.И. Анализ влияния факторов на результат измерений влажности материала на высоких частотах // Журнал. Измерительная техника. №7. – 2013. – с. 64-66.

УДК 621.311

О РЕЗОНАНСАХ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Д.А. Силкин

*Национальный Исследовательский Университет «МЭИ»,
Россия, г. Москва
espp@mpei.ru*

Аннотация

Описано влияние резонансных условий на общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Выявлены основные причины возникновения резонансов высших гармоник при питании оборудования от подстанций с установками компенсации реактивной мощности. Теоретические выкладки проиллюстрированы данными экспериментальных измерений.

Ключевые слова: резонанс высших гармоник, установки компенсации реактивной мощности, нелинейные электроприемники

ON HARMONIC RESONANCES IN POWER SYSTEMS

D.A. Silkin

*National Research University «MPEI», Russia, Moscow
espp@mpei.ru*

Abstract

The effect of resonant conditions on grid voltage distortion is described. Main reasons for harmonic resonance occurrence while supplying from substations with compensating installations are considered. Theoretical implications are illustrated with the grid measurement results.

Key words: harmonic resonance, compensating installations, nonlinear electrical devices