

Двухчастотный метод определения резонансной частоты СВЧ-датчиков в процессе микроволнового отверждения термореактивных и термопластичных материалов

П.В. Гаврилов

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ*

Аннотация: В данной статье представлен новый двухчастотный метод определения центральной частоты резонансного СВЧ-датчика для мониторинга реакций отверждения термореактивных и термопластичных смол и клеев. Результаты показывают, что может быть реализован неинвазивный, непрерывный и постоянный мониторинг диэлектрических свойств полимеров, что позволит по известным начальным условиям управлять адекватной эволюцией процесса отверждения. Примеры экспериментальных измерений во время реакции отверждения полиуретановых клеев были выбраны, чтобы проиллюстрировать действие метода. По сравнению с известными данный метод позволяет повысить отношения сигнал/шум измерений и их точность за счет проведения процедуры измерений по максимальному сигналу и в область минимальных шумов детектора огибающей. В качестве развития метода в заключении были предложены метод вариации разностной частоты и СВЧ-датчики на запрещенных зонах, что обусловлено полученными результатами только по измерению центральной частоты и существующей необходимостью проводить измерения в реальном времени и в сложной помеховой обстановке с учетом меняющейся добротности и коэффициента отражения резонансного датчика. В статье не акцентировалось внимание на простоте и стоимости реализованного устройства. Однако очевидность этого позволяет использовать систему в качестве средства контроля как за производством полимеров, так и для их лабораторных исследований.

Ключевые слова: микроволновые технологии, термореактивные и термопластичные полимеры, СВЧ-измерения, резонансный датчик, двухчастотное симметричное зондирование, огибающая биений, центральная частота, диэлектрическая проницаемость, степень отверждения.

Введение

Вместо традиционного теплового нагрева для обработки термореактивных и термопластичных смол и клеев (например, эпоксидно-аминовых или полиуретановых), а также других материалов в последнее время применяется микроволновая энергия, распространяющаяся в волноводах или сосредоточенная в многомодовых рабочих камерах [1-9]. Проведенные исследования показывают, что по сравнению с тепловым нагревом в случае применения энергии микроволн можно получить

объемный равномерный нагрев и увеличенную скорость отверждения смол и клеев [10-13].

Для контроля процесса отверждения и получения диэлектрических характеристик обрабатываемых смол и клеев используются резонансные датчики с центральной частотой, лежащей, как правило, в диапазоне рабочих частот СВЧ-генераторов, 2,45 ГГц [12, 13].

Ионный вклад в диэлектрические свойства эпоксидно-аминовых и полиуретановых смол и клеев незначителен на микроволновых частотах, а коэффициент диэлектрических потерь этих смол и клеев обусловлен наличием в молекулах полярных групп. Микроволновая энергия может поглощаться этими полярными группами, вызывая локальное нагревание, которое инициирует процесс отверждения. Поглощение СВЧ-излучения происходит преимущественно в эпоксидно-аминовых группах на ранних стадиях нагрева. Эти полярные группы поглощаются во время отверждения через химическую реакцию, в то время как формируются группы гидроксила, которые также поглощают микроволновое излучение и как следствие реагируют с эпоксидными группами. Подвижность полярных цепей уменьшается по мере сшивки. Влияние изменения подвижности и численности этих полярных групп на диэлектрические свойства системы может быть определено измерением коэффициента диэлектрических потерь и может быть напрямую связано со степенью отверждения для мониторинга процесса отверждения. Скорость поглощения СВЧ-энергии определяется коэффициентом диэлектрических потерь и напряженностью электрического поля. Сшитые молекулы (низкие диэлектрические потери) поглощают микроволновую энергию в значительно меньшем объеме, по сравнению с несшитыми молекулами (высокие диэлектрические потери). Поэтому коэффициент диэлектрических потерь может быть показателем диссипации энергии в термореактивных смолах в электромагнитных полях [12].

Характеристики поглощения для полиуретановых смол и клеев схожи и будут рассмотрены нами в заключительной части статьи при проведении экспериментальных исследований [13].

Использование микроволнового нагрева и диэлектрической диагностики для инициирования и мониторинга процесса отверждения в общем диапазоне имеет следующие преимущества:

- селективный и контролируемый прямой объемный нагрев терморезактивных смол за счет поглощения СВЧ-энергии полярными группами;

- квази-постоянный контроль за температурно-временным профилем терморезактивных смол и уровнем входной мощности для снижения термической деградации и оптимизации цикла отверждения.

Реализация этих преимуществ приведет к тому, что отвержденные энергией микроволн материалы будут иметь улучшенные механические характеристики, в том числе при использовании аддитивных или комбинированных процессов отверждения (тепловых, акустических, химических и т.д.) и выбора оптимальных условий цикла обработки микроволнами [10-13].

1. Резонансная СВЧ-диагностика

Обычно при диэлектрических измерениях на микроволновых частотах используют метод материально-резонансного возмущения одномодового резонатора [12, 13]. Практическим экспериментальным критерием для данной методики возмущений является то, что сдвиг резонансной частоты за счет введения материала должен быть значительно меньше резонансной частоты [12]. Диэлектрические измерения с использованием теории возмущений могут быть осуществлены измерением обычного сдвига резонансной частоты и изменения добротности резонатора (метод вариации

частоты), и измерением изменения параметров резонатора и коэффициентов мощности на выбранной резонансной частоте (метод резонансного усиления). Измеренные изменения резонансной частоты и добротности резонатора при наличии и отсутствии в нем исследуемых материалов связаны с их диэлектрической проницаемостью и коэффициентом диэлектрических потерь. Резонансный сдвиг частоты увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости материалов, но добротность резонатора уменьшается с увеличением коэффициента диэлектрических потерь материалов.

При прямом детектировании амплитуд зондирующих сигналов после их взаимодействия с резонансным СВЧ-датчиком, отношение сигнал/шум измерений очень мало, что объясняется наличием токовых шумов детектора.

Для устранения указанного недостатка нами предложено использование двухчастотного зондирования резонансного СВЧ-датчика и определения его текущей центральной частоты в ходе микроволновой обработки материала, помещенного в резонатор, аналогичного методам мониторинга центральной длины волны волоконных брэгговских решеток [14-18]. Особенность формирования двухчастотного зондирующего СВЧ-излучения заключается в применении модуляционного амплитудно-фазового преобразования одночастотной микроволновой несущей, лежащей в диапазоне 2,45 ГГц, по методу Ильина-Морозова [14].

В результате указанного преобразования образуются две зондирующие составляющие, амплитуды которых равны, как и фазы, которые альтернативны по знаку. Данные составляющие имеют разностную частоту, равную полосе пропускания СВЧ-датчика в ненагруженном состоянии, и определяемую частотой модуляции. Исходное несущее колебание подавлено. Амплитудные и фазовые параметры огибающей биений зондирующих составляющих после взаимодействия с СВЧ-датчиком в нагруженном

состоянии (отражение или пропускание) на указанной разностной частоте позволяют определить его центральную частоту, при этом влияние шумов и флуктуации низкочастотной природы исключаются за счет обработки информации в области минимальных шумов детектора.

2. Определение резонансной частоты СВЧ-датчика при двухчастотном зондировании

Как правило, резонансные характеристики СВЧ-датчика и коэффициент диэлектрической проницаемости исследуемого материала известны. Поэтому выбор параметров зондирующего колебания не представляет проблем. В ходе процесса микроволновой обработки указанные параметры могут меняться для получения оптимальных характеристик зондирования на каждой стадии отверждения клеев и смол.

Двухчастотное колебание (рис.1) с составляющими $f_1 = f_s - \Delta f$ и $f_2 = f_s + \Delta f$ зондирует резонансный контур СВЧ-датчика, при этом частота f_s соответствует его резонансной частоте, а расстройка Δf – половине его ширины полосы пропускания на полувысоте. Двухчастотное колебание, отраженное от датчика принимается детектором огибающей.

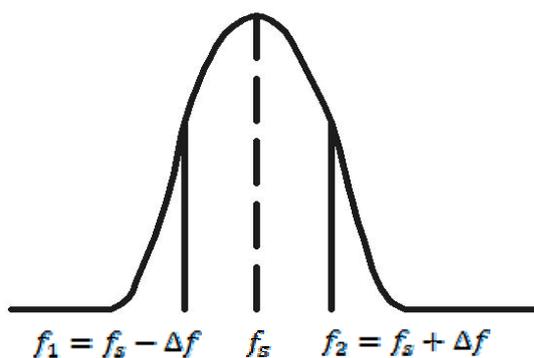


Рис. 1. – Зондирование резонансного СВЧ-датчика двухчастотным колебанием

Зондирующее колебание определяется выражением:

$$E_{\text{вх}}(t) = A_{1\text{вх}} \exp[j2\pi(f_s - \Delta f)t] + A_{2\text{вх}} \exp[j2\pi(f_s + \Delta f)t] \quad (1)$$

где $A_{1\text{вх}} = |A_1| \exp(j\phi_1)$, $A_{2\text{вх}} = |A_2| \exp(j\phi_2)$ – комплексные амплитуды двухчастотного симметричного колебания, причем $A_{1\text{вх}} = A_{2\text{вх}}$, а $\phi_1 = -\phi_2$.

Резонансный СВЧ-датчик, характеризуется передаточной функцией $H(f)$, определяемой коэффициентом диэлектрической проницаемости исследуемого материала на определенной стадии микроволновой обработки. Отраженное от СВЧ-датчика колебание будет определяться как:

$$E_{\text{вых}}(t) = A_{1\text{вх}} |H(f_s - \Delta f)| \exp[j \arg H(f_s - \Delta f)] \times \exp[j 2\pi (f_s - \Delta f)t] + A_{2\text{вх}} |H(f_s + \Delta f)| \exp[j \arg H(f_s + \Delta f)] \times \exp[j 2\pi (f_s + \Delta f)t] \quad (2)$$

Выходной ток детектора огибающей на разностной частоте $2\Delta f$ определяется как:

$$i_{\text{вых}}(t) \propto |A_{1\text{вх}}| |A_{2\text{вх}}| |H(f_s - \Delta f)| |H(f_s + \Delta f)| \times \cos[4\pi t \Delta f + \phi_1 - \phi_2 + \arg H(f_s - \Delta f) - \arg H(f_s + \Delta f)] \quad (3)$$

Анализ (3) показывает, что выходной ток детектора огибающей характеризует передаточную функцию СВЧ-датчика по амплитуде и фазе. При этом в положении средней частоты двухчастотного сигнала, равном центральной частоте датчика, амплитуды и модули фаз обеих составляющих становятся равны, коэффициент амплитудной модуляции (КАМ) огибающей выходного сигнала максимален и равен 1 (рис.2), а фаза его огибающей совпадает с фазой огибающей биений двухчастотного сигнала на входе [14-18]. Погрешность измерений по данному методу зависит от многих факторов, к которым относятся стабильность поддержания параметров модуляционного амплитудно-фазового преобразования, отношение сигнал/шум измерений, необходимость контроля климатических условий и т.д. Существуют и известные решения для ее минимизации до уровня 10^{-4} .

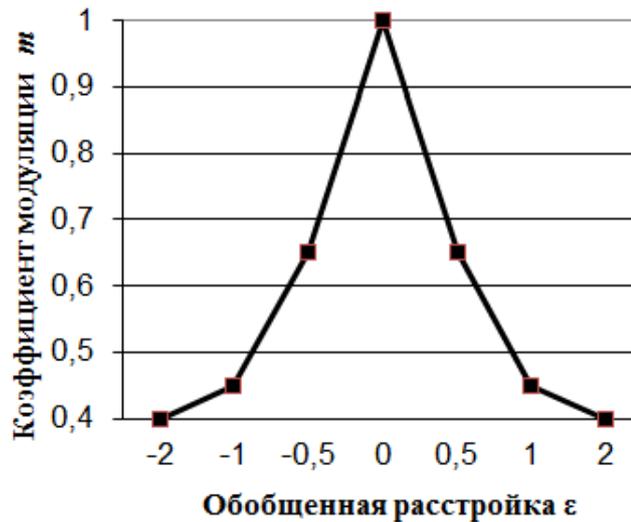


Рис.2. – Вид измерительных характеристик для обобщенной расстройки по коэффициенту амплитудной модуляции

3. Структура устройства, реализующего метод двухчастотного определения резонансной частоты

Решаемая техническая задача при реализации метода заключается в повышении точности определения текущей резонансной частоты СВЧ-датчика с помещенным в него материалом, находящимся в обработке за счет увеличения отношения сигнал/шум измерений [19].

На рис.3 изображена структурная схема устройства.

На рис.4,*а* показана ситуация при подходе зондирующего колебания к резонансу слева. На рис.4,*б* изображена временная диаграмма огибающей биений его составляющих, КАМ которой соответствует положению средней частоты и не равен 1.

На рис.5,*а* показана ситуация, когда средняя частота двухчастотного колебания равна резонансной частотой СВЧ-датчика. На рис.5,*б* изображена временная диаграмма огибающей биений его составляющих, КАМ которой равен 1. Данная частота и будет тем самым искомым значением, соответствующим определенной величине диэлектрической проницаемости материала на данной стадии отверждения.

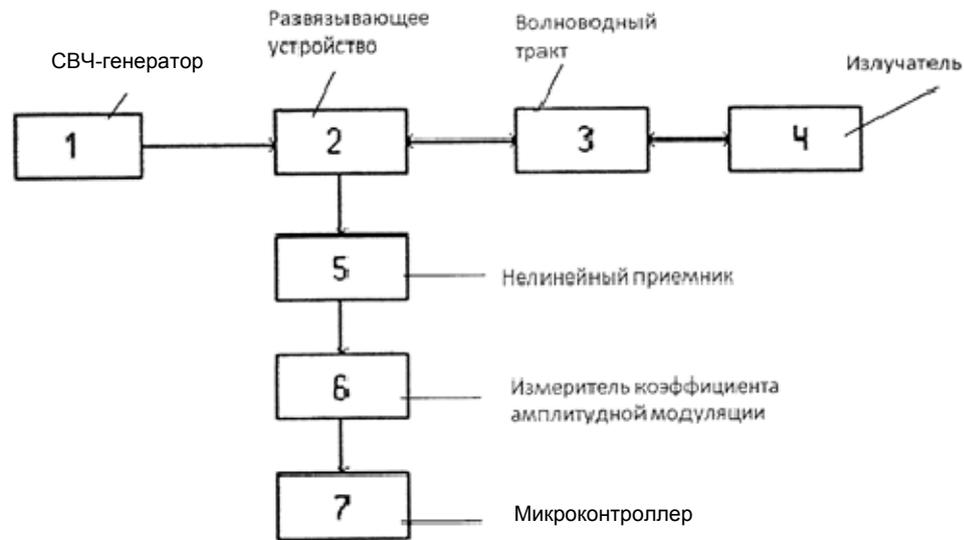


Рис.3. – Структурная схема двухчастотного измерителя резонансной частоты

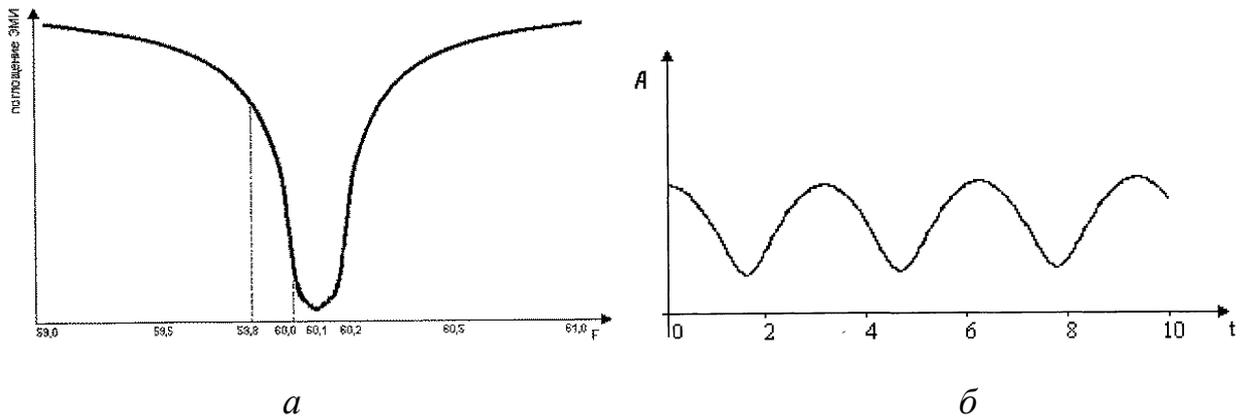


Рис.4. – Ситуация при зондировании СВЧ-датчика левее резонанса

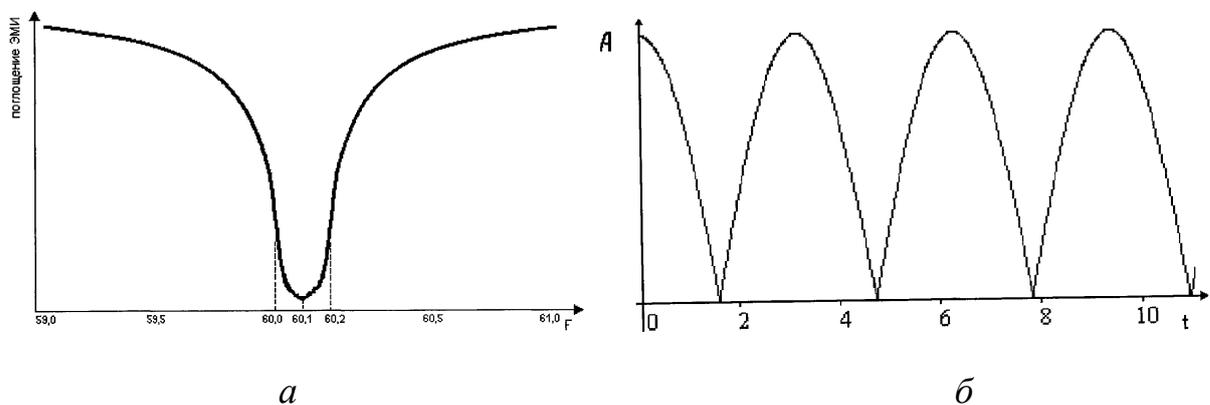


Рис.5. – Ситуация при зондировании СВЧ-датчика в резонансе

На рис.6,*а* показана ситуация при подходе зондирующего колебания к резонансу справа. На рис.6,*б* изображена временная диаграмма огибающей биений его составляющих, КАМ которой соответствует положению средней частоты и не равен 1.

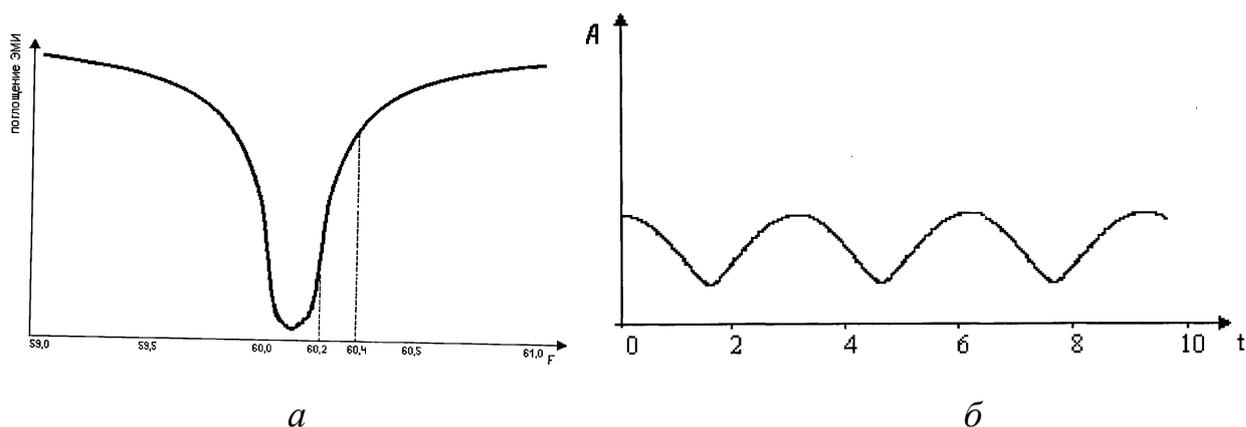


Рис.6. – Ситуация при зондировании СВЧ-датчика правее резонанса

На рис.7 представлена зависимость коэффициента амплитудной модуляции огибающей биений составляющих зондирующего излучения от его средней частоты для разностной частоты, равной полосе пропускания СВЧ-датчика в ненагруженном состоянии.

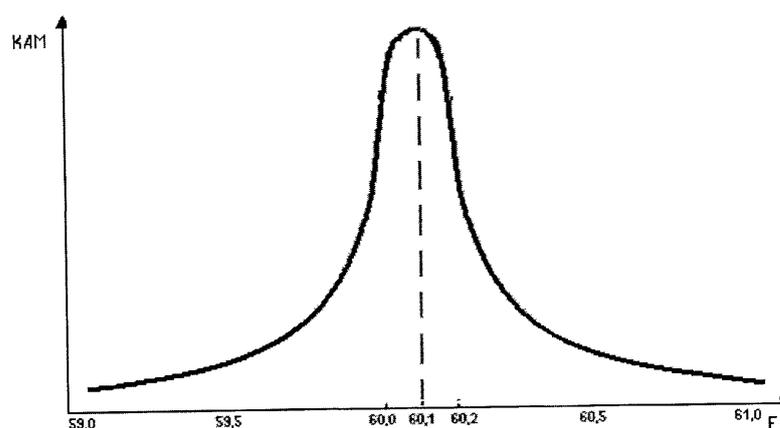


Рис.7. – Зависимость коэффициента амплитудной модуляции огибающей двухчастотного зондирующего колебания

Приведенные значения величин по осям частот, времени на рис. 4-6 условны. Максимальное значение коэффициента амплитудной модуляции на рис.7 равно 1. Зависимость (рис.7) будет регистрироваться на микроконтроллере для определения текущей резонансной частоты СВЧ-датчика с помещенным в него материалом, находящимся в обработке.

Рассмотрим работу устройства для определения резонансной частоты СВЧ-датчика с помещенным в него материалом, находящимся в обработке, которая характеризует соответствующую диэлектрическую проницаемость и является искомой величиной для определения степени отверждения термореактивной или термопластичной смолы или клея. СВЧ-генератор формирует двухчастотное зондирующее излучение, которое через развязывающее устройство, волноводный тракт и излучатель, воздействует на материал, размещенный в СВЧ-датчике. Отраженная от материала доля излучения через излучатель и волноводный тракт поступает на второй вход развязывающего устройства, который соединен с нелинейным детектором огибающей, которая поступает на измеритель КАМ. После измерения в микроконтроллере определяется значение резонансной частоты СВЧ-датчика, при котором КАМ огибающей будет максимален и равен 1 (рис. 7). При этом соблюдается основное требования метода возмущений – сдвиг резонансной частоты за счет введения материала значительно меньше резонансной частоты [12].

В предложенном устройстве определение текущей резонансной частоты СВЧ-датчика с помещенным в него материалом, находящимся в обработке, выполняется при регистрации максимального значения КАМ при максимальном отношении сигнал/шум и в области минимальных шумов детектора огибающей. Таким образом, можно говорить о повышении точности измерения резонансной частоты СВЧ-датчика, а, следовательно, и его диэлектрической проницаемости.

В качестве примера в табл. 1 приведены центральные частоты резонансного СВЧ-датчика, нагруженного на полиуретановый клей, на различных стадиях технологического процесса его отверждения. АЧХ СВЧ-датчика имеет вид узкого резонансного контура отражения с полушириной от 100 до 400 МГц на различных частотах в диапазоне от 1,5 до 2,5 ГГц, соответствующих различным стадиям обработки.

Таблица 1. – Резонансные частоты и другие параметры СВЧ-датчика с помещенным в него полиуретановым клеем

Стадия	Центральная частота, ГГц	Уровень сигнала, дВ	Добротность
Начальная	1,7	-23	1700
1-ая промежуточная	1,8	-20	1500
2-ая промежуточная	1,83	-18	1000
3-ая промежуточная	1,93	-17	950
Конечная	2,2	-11	50

Из табл. 1 видно существование трёх различных этапов изменения структуры материала в процессе отверждения. Первая стадия – нагревание жидкого мономера (строки 1 и 2). Значительное снижение коэффициента диэлектрических потерь характерно для второй стадии (строки 3 и 4), на которой возможно линейное преобразование и образование ответвлений и гелеобразование. Третий этап (строка 5) приводит к формированию трехмерной сети и полностью отвержденной структуры. Полученные данные хорошо коррелирует с данными [13].

Заключение

Доказано, что метод возмущений СВЧ-резонатора датчика является полезным для получения диэлектрических данных химически реагирующих терморезактивных и термопластичных смол и клеев на микроволновых

частотах. Коэффициент диэлектрических потерь, выраженный через центральную (резонансную) частоту СВЧ-датчика на микроволновых частотах можно использовать для контроля процесса отверждения. Предложенный двухчастотный метод вариации частоты позволяет проводить измерения с повышенной точностью, за счет использования процедур, происходящих в области минимальных шумов детектора огибающей и в области максимальных уровней регистрируемого сигнала. Однако для более полной картины отверждения указанных материалов необходимо одновременное определение всех трех диэлектрических характеристик резонансного СВЧ-датчика: центральной частоты, максимальной амплитуды отражения/поглощения, добротности, для чего нами предложен метод вариации разностной частоты [20-23]. Кроме того, определенное значение будет оказывать и структура самих резонансных СВЧ-датчиков, для повышения добротности которых недавно был предложен ряд решений с использованием свойств фотонных СВЧ-кристаллов и резонаторов Фано [24-27].

Работа выполнена при поддержке МОН РФ в рамках госзадания на выполнение НИР в КНИТУ-КАИ на 2017-2019 годы (программа «Асимметрия», задание 8.6872.2017/8.9).

Литература

1. Морозов Г.А., Морозов О.Г. Микроволновые технологии. Результаты и новые задачи // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2006. Т. 9. № 3. С. 82-91.
2. Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А.Р. Микроволновые технологии в процессах переработки и утилизации бытовых полимерных отходов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4(3). С. 580-582.

3. Морозов О.Г. и др. Функциональные адаптивные СВЧ технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3. С. 13-25.

4. Морозов Г.А. и др. Формование изделий из радиопрозрачных материалов с использованием СВЧ-излучения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-2. С. 573-576.

5. Лапочкин М.С., Морозов О.Г. Исследование процесса микроволнового нагрева различных фаз воды в виде трехслойных структур: теория и эксперимент // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 2 (12). С. 24-29.

6. Лапочкин М.С., Морозов О.Г., Морозов Г.А. Повышение энергоэффективности микроволнового нагрева снежно-ледяной массы посредством применения водоотвода // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 1. С. 84-88.

7. Лапочкин М.С., Морозов О.Г. Повышение эффективности таяния снежно-ледяной массы при комбинированном энергетическом воздействии микроволнового и ультразвукового полей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-3. С. 894-899.

8. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Шангараева Я.Н. Современные подходы к построению адаптивных СВЧ технологических комплексов обработки высоковязких водонефтяных смесей // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 4. С. 59-66.

9. Морозов Г.А. и др. Микроволновые технологические комплексы с адаптивным управлением для обработки водонефтяных эмульсий // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 3. С. 125-129.

10. Морозов О.Г. и др. Микроволновая обработка терморезактивных и термопластичных полимеров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. № 3. С. 114-121.

11. Морозов О.Г. и др. Выбор оптимальной структуры построения СВЧ-комплекса обработки терморезактивных композитных материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14(35). № 1(2). С. 525-529.

12. Jow J., et al. Dielectric Analysis of Epoxy/Amine Resins Using Microwave Cavity Technique // Polymer engineering and science. 1988. Vol. 28, no. 22. pp. 1450-1454.

13. B. García-Baños, et al. Noninvasive Monitoring of Polymer Curing Reactions by Dielectrometry // IEEE sensors journal. 2011. Vol. 11, no. 1. pp. 62-70.

14. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Theory of symmetrical two-frequency signals and key aspects of its application // Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.

15. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Dual port MZM based optical comb generator for all-optical microwave photonic device // Proc. of SPIE. 2011. V/ 7992. P. 799202.

16. Natanson O.G., et al. Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures // Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.

17. Morozov O.G. RZ, CS-RZ and soliton generation for access networks applications: problems and variants of decisions // Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.

18. Морозов О.Г. и др. Модуляционные методы формирования спектрально чистого двухканального полигармонического излучения с одинаковой разностной частотой и поляризационным



мультиплексированием. Постановка задачи // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587

19. Гаврилов П.В. и др. Устройство для определения оптимального значения терапевтической частоты пациента при резонансной акупунктурной квч-терапии // Пат. РФ №107691. 27.08.2011. Бюл. № 24. – 11 с.

20. Морозов О.Г. и др. Резонансный метод мониторинга технологического процесса отверждения полимеров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 1. С. 67-75.

21. Морозов О.Г. и др. Резонансные методы мониторинга технологических процессов отверждения полимеров в функционально адаптивных СВЧ-реакторах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14(35). № 1(2). С. 568-572.

22. Морозов О.Г., Артемьев В.И., Кузнецов А.А., Нуреев И.И. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя // Инженерный вестник Дона. 2016. №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525.

23. Насыбуллин А.Р. Пассивные оптические и коаксиальные СВЧ-структуры с периодическими неоднородностями: трансфер сенсорных технологий // Инженерный вестник Дона. 2016. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761.

24. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р. и др. Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65-70.

25. Насыбуллин А.Р., Вазиев Т.О., Морозов О.Г. Формирование резонанса Фано в микрополосковой СВЧ структуре // Инженерный вестник Дона. 2017. №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4451

26. Сахабутдинов А.Ж. и др. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых

волоконных брэгговских решеток с π -сдвигом. Постановка задач моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

27. Мисбахов Рус.Ш. и др. Волоконные брэгговские решетки с двумя фазовыми сдвигами как чувствительный элемент и инструмент мультиплексирования сенсорных сетей // Инженерный вестник Дона. 2017. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4343.

References

1. Morozov G.A., Morozov O.G. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2006. Vol. 9, no 3. pp. 82-91.
2. Morozov O.G., Samigullin R.R., Nasybullin A.R. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2010. V. 12. № 4(3). pp. 580-582.
3. Morozov O.G., et al. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2011. № 3. pp. 114-121.
4. Morozov G.A., et al. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. Vol. 14. № 1(2). pp. 573-576.
5. Lapochkin M.S., Morozov O.G. Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy. 2011. № 2. pp. 24-29.
6. Lapochkin M.S., Morozov O.G., Morozov G.A. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2012. Vol. 15, no. 1. pp. 84-88.
7. Lapochkin M.S., Morozov O.G. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. V. 14, no. 1(3). pp. 894-899.
8. Morozov G.A., Morozov O.G., Shangaraeva Y.N. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2012. Vol. 15, no. 4. pp. 59-66.
9. Morozov G.A., et al. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2007. Vol. 10, no. 3. pp. 125-129.



10. Morozov O.G., et al. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2011. Vol. 14, no. 3. pp. 114-121.
 11. Morozov O.G., et al. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. Vol. 14, no. 1-2. pp. 525-529.
 12. Jow J., et al. Polymer engineering and science. 1988. Vol. 28, no. 22. pp. 1450-1454.
 13. B. García-Baños, et al. IEEE sensors journal. 2011. Vol. 11, no. 1. pp. 62-70.
 14. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.
 15. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. p. 799202.
 16. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
 17. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
 18. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587.
 19. Gavrilov P.V., et al. Pat. RF №107691. 27.08.2011. Bul. № 24. – 11 p.
 20. Morozov O.G., et al. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy. 2012. № 1. pp. 67-75.
 21. Morozov O.G., et al. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. Vol. 14, no.1-2. pp. 568-572.
 22. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525.
 23. Nasybullin A.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761.
 24. Morozov G.A., et al. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2014. Vol. 17, no. 3. pp. 65-70.
-



25. Nasybullin A.R., Vaziev T.O., Morozov O.G. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4451.

26. Sakhabutdinov A.Zh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

27. Misbakhov Rus.Sh., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4343.