

## Метод вариации разностной частоты для определения резонанса и добротности СВЧ-датчиков в процессе микроволнового отверждения термореактивных и термопластичных материалов

*П.В. Гаврилов, Д.И. Садикова, В.А. Куликов*

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

**Аннотация:** В данной статье представлен новый двухчастотный метод определения резонансной частоты, полосы пропускания, коэффициента отражения и добротности резонансного СВЧ-датчика для мониторинга реакций отверждения термореактивных и термопластичных смол и клеев. Метод получил название – метод вариации разностной частоты. Результаты показывают, что может быть реализован неинвазивный, непрерывный и постоянный мониторинг диэлектрических свойств полимеров, что позволяет по известным начальным условиям управлять адекватной эволюцией процесса их отверждения. В статье рассмотрены вопросы реализации метода при вариации как разностной, так и средней частоты зондирующего колебания, а также вариант при фиксированном зондировании, при условии, что все четыре составляющих двух двухчастотных колебаний попали в спектральную полосу СВЧ-датчика. Кроме этого представлена оценка определения погрешности измерения резонансной частоты при зондировании различных зон спектральных характеристик датчиков от 0,1 до 0,707 максимального значения отражения. Универсальность метода позволяет использовать систему измерений на его основе в качестве средства контроля как за производством полимеров, так и для лабораторных исследований.

**Ключевые слова:** микроволновые технологии, термореактивные и термопластичные полимеры, СВЧ-измерения, резонансный датчик, метод вариации разностной частоты, огибающая биений, резонансная частота, добротность, полоса пропускания, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, степень отверждения.

### Введение

Исследование диэлектрических свойств материалов в ходе их обработки в микроволновых технологических комплексах вызывает огромный интерес разработчиков как мощной технологической аппаратуры [1-11], так и сенсорных систем для их мониторинга [12-18].

Недостатком метода двухчастотного зондирования резонансных СВЧ-датчиков с вариацией средней частоты и определения их резонанса является невозможность точного определения добротности датчиков, что требует проведения ряда дополнительных операций по перестройке частоты или

---

обработке вычислительного массива данных [19]. Опираясь на преимущества двухчастотного метода зондирования, рассмотрим иные пути решения.

Они основаны на методе вариации разностной частоты двухчастотного зондирующего колебания. При этом существует два варианта реализации метода. Первый – предварительная настройка на резонанс, изменение разностной частоты, вычисление полных характеристик резонансного СВЧ-датчика по двум множествам данных полученных до и после изменения разностной частоты [20]. Под полным набором данных будем понимать определение его резонансной частоты, коэффициента отражения, полосы пропускания и добротности. Второй – фиксирование зондирования при условии, что формируемое зондирующее колебание является четырехчастотным, т.е. две пары двухчастотных колебаний с общей средней частотой, укладываемые в спектральный диапазон СВЧ- датчика [21].

Далее статья построена следующим образом. В первом разделе рассматривается первая реализация метода, во втором – вторая, в третьем анализируются методические погрешности этих реализаций по сравнению с одночастотным зондированием (метод вариации частоты).

## **1 Комбинированное двухчастотное зондирование резонансного СВЧ-датчика со сканированием средней и разностной частот**

На рис.1 показано спектральное расположение составляющих зондирующего колебания в случае совпадения их средней частоты с резонансной частотой СВЧ-датчика, где  $f_{11}$  и  $f_{12}$ ,  $f_{21}$  и  $f_{22}$  – частоты составляющих двух двухчастотных зондирующих колебаний;  $f_c = (f_{12} + f_{11})/2 = (f_{22} + f_{21})/2$  – их средняя частота;  $\Delta f_{P1} = f_{12} - f_{11}$  и  $\Delta f_{P2} = f_{22} - f_{21}$  – первая и вторая разностные частоты;  $f_p$  – резонансная частота СВЧ-датчика;  $U_1$  и  $U_2$  – амплитуды составляющих двух двухчастотных зондирующих

колебаний, отраженные от СВЧ-датчика, и выделенные соответственно на первой и второй разностных частотах на выходе перестраиваемых избирательных фильтров;  $U_p$  – резонансная амплитуда, отраженного от СВЧ-датчика колебания.

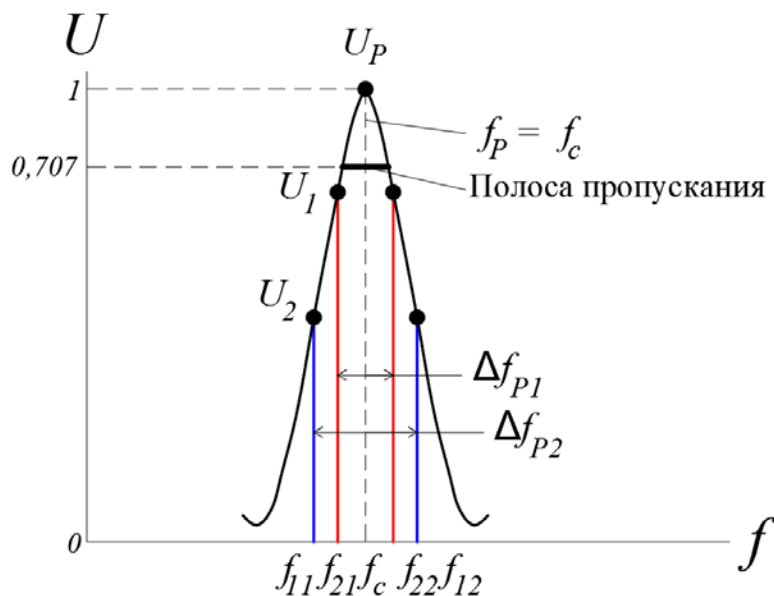
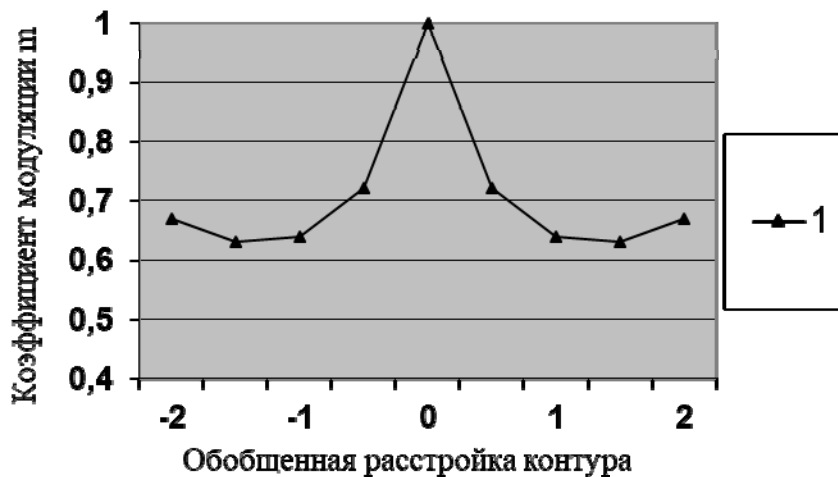


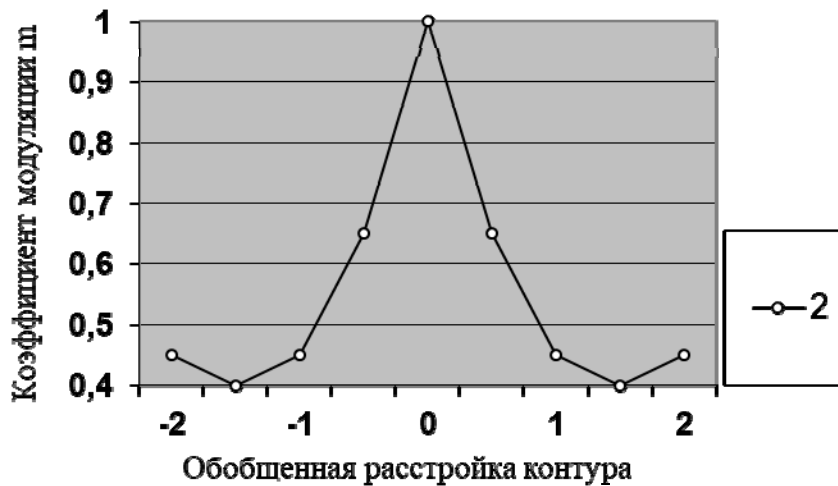
Рис.1. – Спектральное расположение составляющих зондирующего колебания в случае совпадения их средней частоты с резонансной частотой СВЧ-датчика

На рис.2,*a* показана зависимость коэффициента модуляции  $m_1$  огибающей биений первого двухчастотного колебания на разностной частоте относительной обобщённой расстройки полосы пропускания СВЧ-датчика, которая представлена для случая, когда разностная частота  $\Delta f_{P2} = \Delta f_{P1} + \Delta f$  меньше или равна его спектральной ширине.

Характерной точкой данной зависимости является точка нулевой относительной обобщённой расстройки, которая соответствует равенству средней частоты  $f_c$  зондирующего колебания резонансной частоте  $f_p$  СВЧ-датчика. В этом случае коэффициент модуляции  $m_1$  огибающей сигнала биений первого двухчастотного колебания на разностной частоте  $\Delta f_{P1}$  будет равен единице.



а



б

Рис.1. – Зависимость коэффициента модуляции огибающей биений от относительной обобщенной расстройки двухчастотного сигнала  $m$  при разных значениях расстройки между частотами составляющих:  
а) на первой разностной частоте  
б) на второй разностной частоте

Все сказанное выше относится и к зависимости коэффициента  $m_2$  для второй разностной частоты. В этом случае и коэффициент модуляции  $m_2$  огибающей сигнала биений второго двухчастотного колебания с разностной частотой  $\Delta f_{p2}$  будет также равен единице (рис.2,б).

Факт равенства коэффициентов модуляции  $m_1$  и  $m_2$  единице для огибающих сигналов биений первого и второго двухчастотных колебаний с разностными частотами  $\Delta f_{p1}$  и  $\Delta f_{p2}$ , используется для принятия решения об определении резонансной частоты  $f_p = f_c$ .

Далее в соответствии с алгоритмом измерений в микроконтроллере управления и измерения характеристик СВЧ-датчика вычисляют резонансную амплитуду  $U_p$  по выражению:

$$U_p = \sqrt{(\chi^2 U_1^2 - U_2^2) / (\chi^2 - 1)}, \quad (1)$$

где  $\chi = U_2 \Delta f_{P2} / U_1 \Delta f_{P1}$ , и добротность  $Q$  по выражению:

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f_{P1}} \sqrt{(U_p / U_i)^2 - 1}, \quad (2)$$

где  $i=1$  или  $2$ ,  $U_i$  – амплитуда огибающей зондирующего колебания.

## 2. Четырехчастотное зондирование СВЧ-датчика на фиксированной частоте и восстановление его частотных характеристик

Способ необходим для вычисления, а также мониторинга таких важных параметров, как коэффициент отражения и добротность резонансного СВЧ-датчика, необходимые для решения ряда задач измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь обрабатываемого энергией микроволн материала и контроля степени его отверждения [12-18].

Для решения задачи восстановления частотных характеристик СВЧ-датчиков путем его зондирования на фиксированной частоте калибровочное их детерминирование заключается в том, что строятся зависимости коэффициентов модуляции для всех разностных частот для четырех частотного зондирования, а также для  $f_{P1}$ ,  $f_{P2}$ ,  $\Delta f_{P1}$  и  $\Delta f_{P2}$ .

На рис. 3 показано спектральное расположение двух двухчастотных колебаний относительно АЧХ СВЧ-датчика в случае попадания их составляющих на один ее склон. На рис.4 показано спектральное расположение двух двухчастотных колебаний относительно АЧХ СВЧ-датчика в случае попадания их составляющих на разные ее склоны.

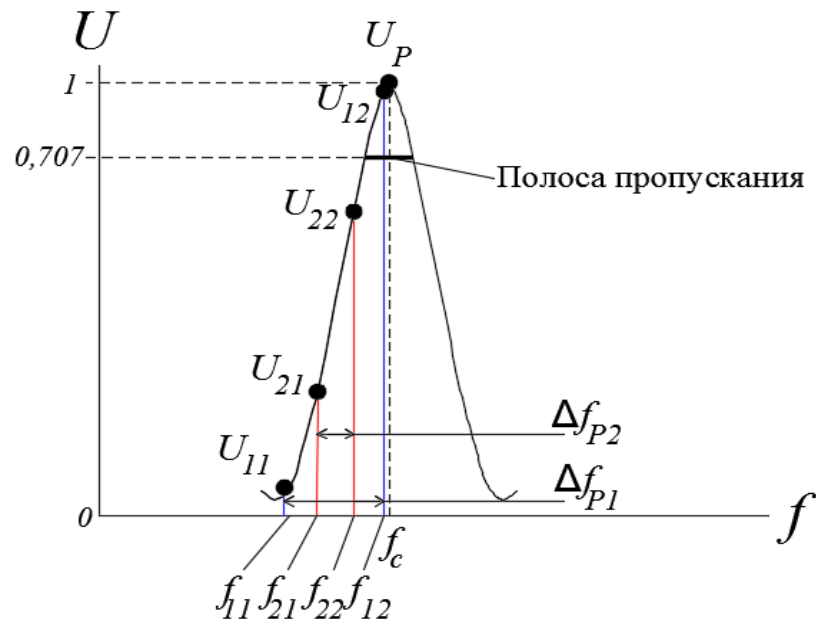


Рис.3 – Спектральное расположение составляющих зондирующего колебания в случае попадания их составляющих на один склон СВЧ-датчика

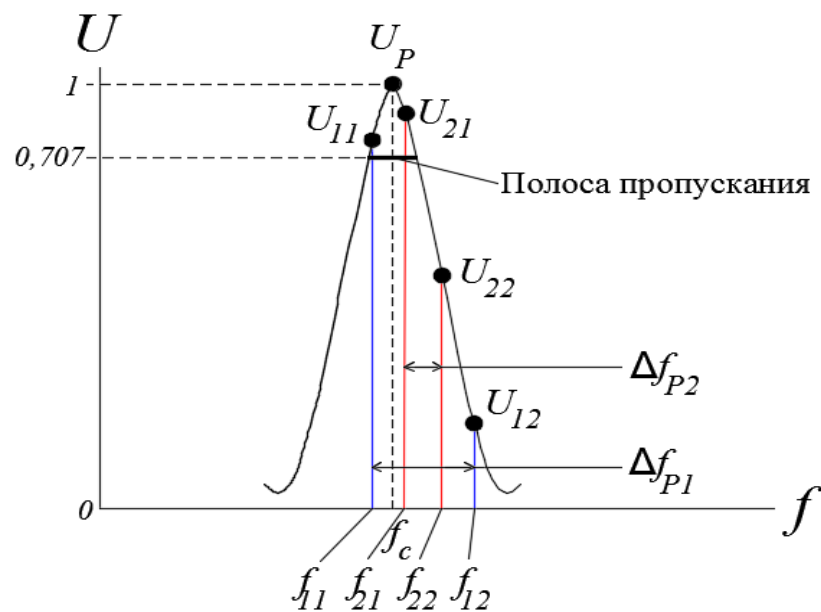


Рис.4 – Спектральное расположение составляющих зондирующего колебания в случае попадания их составляющих на разные склоны СВЧ-датчика

При произвольном попадании зондирующего колебания на склоны СВЧ-датчика, измеряя коэффициенты модуляции на частотах  $\Delta f_{P1}$  и  $\Delta f_{P2}$  необходимо требовать полное соответствие всех коэффициентов модуляции заранее определенным значениям в соответствии с рис.5.

На рис. 5 показана зависимость коэффициента модуляции от средней обобщенной расстройки двухчастотного сигнала  $m(\varepsilon_0)$  при разных значениях расстройки между частотами составляющих  $\Delta\varepsilon$ .

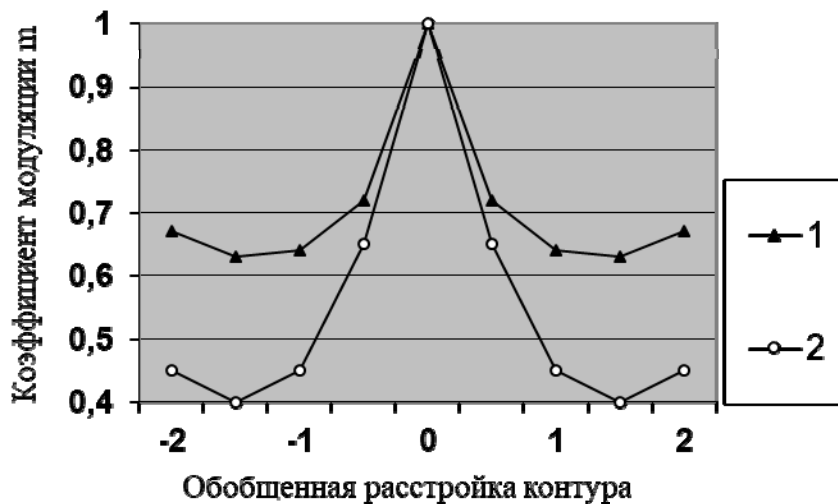


Рис.5 – Зависимость коэффициента модуляции огибающей биений от относительной обобщенной расстройки двухчастотного сигнала  $m(\varepsilon_0)$  при разных значениях расстройки между частотами составляющих  $\Delta\varepsilon$

### 3 Оценка отношения сигнал/шум измерений при реализации метода вариации разностной частоты

Спектральная зависимость коэффициента отражения СВЧ-датчика при наличии шума со средним квадратичным отклонением  $N$  в измерительной системе приводит к погрешности в измерении центральной частоты в спектре пропускания ( $\delta f_p$ ). Представим зависимость коэффициента отражения при наличии шума в следующем виде:

$$S - N = \frac{S \cdot \left(\frac{\Delta f_p}{2}\right)^2}{(\delta f_p)^2 + \left(\frac{\Delta f_p}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

где  $S = R(f_p)$  – максимальный коэффициент отражения на резонансной частоте;  $N$  – шум;  $\Delta f_p$  – полная ширина полосы пропускания СВЧ-датчика на

полувысоте (FWHM, 0,707 от максимальной амплитуды отраженного зондирующего колебания);  $f_p$  – резонансная частота.

На рис.6 представлена зависимость определения ошибки резонансной частоты от отношения сигнал/шум (ОСШ) при измерениях на уровне сигнала на полувысоте. Отобразим график зависимости определения ошибки при измерении резонансной частоты от значения ОСШ при ширине линии генерации зондирующего колебания равной 10 Гц, которая определяет разрешающую способность измерений.

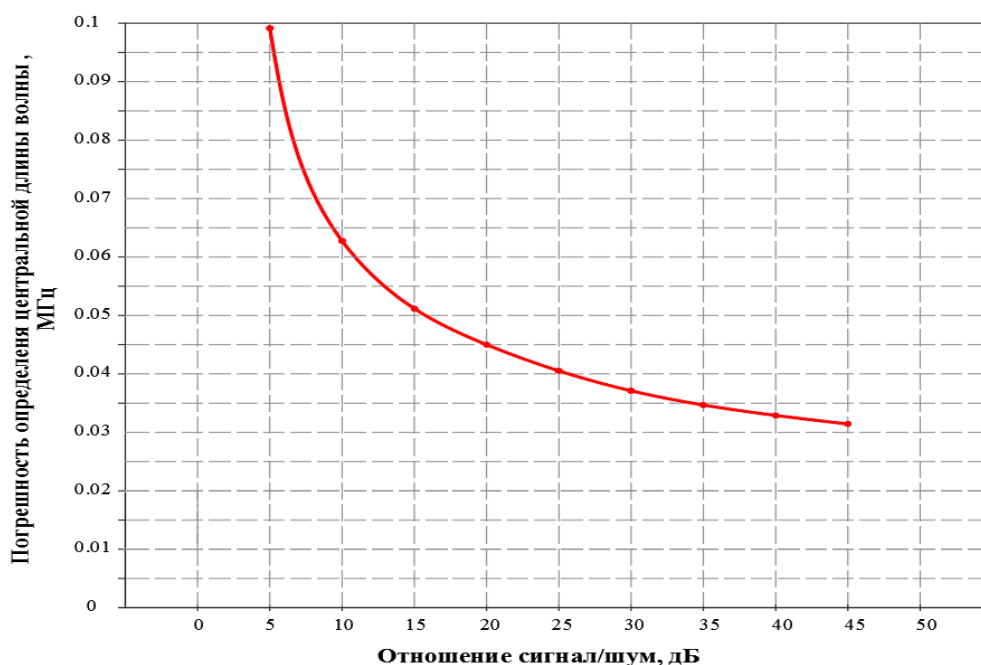


Рис.6 – Зависимость определения ошибки резонансной частоты от отношения сигнал/шум при измерении на полувысоте (FWHM)

При анализе выражения (3) и рис.6 видно, что при изменении ОСШ ошибка определения резонансной частоты  $\delta f_p$  нелинейно повышается, причём при уровне шума порядка 45-50 дБ погрешность определения центральной длины волна достигает 30 кГц, что составляет около  $10^{-5}$  от резонансной частоты работы СВЧ-датчика, лежащей в диапазоне 2,45 ГГц.



Теперь произведём анализ погрешности измерений на уровне  $0,1$  от максимального уровня отраженного колебания. Отобразим график зависимости определения ошибки при измерении резонансной частоты от значения SNR при измерении на уровне  $0,1 U_{\max}$  на рис.7.

При анализе рис.7 видно, что значение ошибки  $\delta f_p$  нелинейно повышается, причём при уровне шума порядка 50 дБ погрешность определения центральной длины волна достигает 0,06 МГц, при уровне 20дБ – уже порядка 0,09 МГц. Анализируя графики, изображенные на рис.6 и рис.7, можно сделать вывод, что наихудшим вариантом определения резонансной частоты является вариант, когда измерения производятся на уровне  $0,1$  от максимальной интенсивности отраженного сигнала.

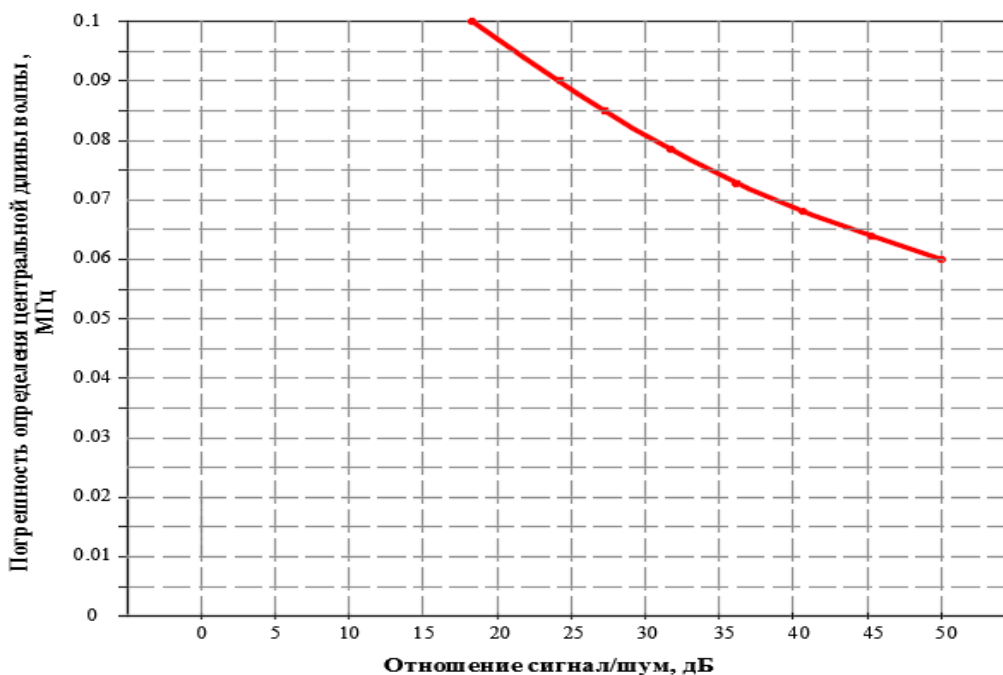


Рис.7. – Зависимость определения ошибки центральной длины волны от отношения сигнал/шум одночастотным методом при измерении на уровне  $0,1 U_{\max}$

При увеличении отношения сигнал/шум в 3 раза погрешность измерения центральной длины волны уменьшается в 2,5 раза.

Данный анализ проведен для одной частотной составляющей. Реально процедура определения резонансной частоты проводится по частоте огибающей биений двух таких частот. Кроме того, ее выделение происходит с помощью узкополосных фильтров на разностной частоте, лежащей в области минимальных шумов детектора огибающей.

Таким образом можно говорить о большем выигрыше по ОСШ на 1-2 порядка, что показано [22-29], например, для волоконно-оптических радиофотонных сенсоров, при анализе избирательных структур, оптический спектр которых перенесен в радиочастотный, где, собственно и проводился анализ погрешностей.

### **Заключение**

Коэффициент диэлектрических потерь, выраженный через центральную (резонансную) частоту СВЧ-датчика на микроволновых частотах можно использовать для контроля процесса отверждения различных материалов под воздействием энергии микроволн. Однако для более полной картины отверждения указанных материалов необходимо одновременное определение всех трех диэлектрических характеристик резонансного СВЧ-датчика: резонансной частоты, максимальной амплитуды отражения/поглощения, добротности, для чего нами предложен метод вариации разностной частоты. Показаны варианты реализации метода как с дополнительной вариацией средней частоты, так и при фиксированном зондировании на одно средней частоте, входящей в спектральную полосу СВЧ-датчика. Для оценки методических погрешностей измерений проведен анализ влияния отношения сигнал/шум измерений на точность определения резонансной частоты. При увеличении отношения сигнал/шум в 3 раза погрешность измерения центральной длины волны уменьшается в 2,5 раза. Данный анализ проведен для одной частотной составляющей. Реально

---

процедура определения резонансной частоты проводится по частоте огибающей биений двух таких частот. Кроме того, ее выделение происходит с помощью узкополосных фильтров на разностной частоте, лежащей в области минимальных шумов детектора огибающей. Таким образом можно говорить о большем выигрыше по ОСШ на 1-2 порядка.

Универсальность метода позволяет использовать систему измерений на его основе в качестве средства контроля как за производством полимеров, так и для их лабораторных исследований.

*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 термореактивных 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 термореактивных 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. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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

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. – 2 с.

20. Морозов О.Г. и др. Устройство для измерения характеристик резонансных структур // Пат. РФ №124818. 10.02.2013. Бюл. № 4. – 2 с.

21. Касимова Д.И. и др. Устройство для измерения характеристик резонансных структур // Пат. РФ №141415. 10.06.2014. Бюл. № 16. – 2 с.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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

27. 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.

28. Сахабутдинов А.Ж. и др. Характеризация резонанса Фано в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе кольцевых волоконных брэгговских решеток с  $\pi$ -сдвигом. Постановка задач

---

моделирования // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2.  
URL:ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/5002.

29. 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. Morozov O.G., et al. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy. 2012. № 1. pp. 67-75.
  15. Morozov O.G., et al. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. 2012. Vol. 14, no.1-2. pp. 568-572.
  16. Nasybullin A.R. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3761).
  17. Morozov G.A., et al. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy. 2014. Vol. 17, no. 3. pp. 65-70.
  18. Nasybullin A.R., Vaziev T.O., Morozov O.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4451](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4451).
  19. Gavrilov P.V., et al. Pat. RF №107691. 27.08.2011. Bul. № 24. – 2 p.
  20. Morozov O.G., et al. Pat. RF №124818. 10.02.2013. Bul. № 4. – 2 p.
  21. Kasimova D.I., et al. Pat. RF №1414415. 10.06.2014. Bul. № 16. – 2 p.
  22. Il'in G.I., Morozov O.G., Il'in A.G. Proc. of SPIE. 2014. V. 9156. P. 91560M.
  23. Aybatov D.L., Morozov O.G., Sadeev T.S. Proc. of SPIE. 2011. V. 7992. p. 799202.
  24. Natanson O.G., et al. Proc. of SPIE. 2005. V. 5854. pp. 215-223.
  25. Morozov O.G. Proc. of SPIE. 2012. V. 8410. P. 84100P.
  26. Morozov O.G., et al. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 4. URL:[ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2017/4587).
-





27. Morozov O.G., et al. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3525).

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

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