

УДК 535.417.2
EDN: RYMKA1

© А. М. Гайнутдинов, Р. В. Фархутдинов, 2026

МУЛЬТИРЕЗОНАНСНЫЙ МИКРОПОЛОСКОВЫЙ ДАТЧИК НА ОСНОВЕ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ЖИДКИХ СРЕД

В статье представлены результаты экспериментального исследования трехчастотного планарного датчика, реализованного на базе микрополосковой линии передачи с тремя концентрическими комплементарными кольцевыми резонаторами (CSRR), интегрированными в заземленный слой печатной платы из стеклотекстолита FR-4. Целью исследования является разработка высокочувствительного мультитемпературного устройства для идентификации состава растительных масел по частотному сдвигу резонансов. Методология базируется на регистрации изменения модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ при нанесении исследуемой жидкости в резервуары, расположенные непосредственно над каждым из трех концентрических колец с радиусами 6.3, 4.2 и 3.0 мм, настроенными на частоты 1.5, 2.45 и 3.8 ГГц соответственно. В качестве модельных сред использовались чистое оливковое масло (с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon' \approx 2.5$), а также его смеси с 5% подсолнечного масла ($\epsilon' \approx 2.8$) и 5% льняного масла ($\epsilon' \approx 3.0$). Экспериментально установлено, что рост диэлектрической проницаемости исследуемых образцов вызывает предсказуемый синхронный низкочастотный сдвиг всех трех резонансных пиков. Наибольшую чувствительность, составляющую 340 МГц на единицу изменения диэлектрической проницаемости, демонстрирует высокочастотный резонатор малого размера (3.0 мм), обеспечивающий абсолютный сдвиг до 170 МГц при переходе от чистого масла к смеси с льняным. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения разработанного датчика для экспресс-диагностики и обнаружения примесей с концентрацией менее 5% в системах автоматизированного контроля качества пищевых продуктов.

Ключевые слова: комплементарные кольцевые резонаторы, CSRR, микроволновый датчик, определение диэлектрической проницаемости жидкостей, диэлектрическая проницаемость, частотный сдвиг

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы, включая газовую хроматографию, для распознавания смесей растительных масел требуют длительной пробоподготовки [1]. Перспективной альтернативой является микроволновая диэлектриметрия, поскольку диэлектрические параметры масел коррелируют с их жирнокислотным составом [2]. Современные метаматериальные структуры, в частности комплементарные кольцевые резонаторы (CSRR — Complementary Split-Ring Resonators), позволяют добиться сильной локализации электромагнитного поля в щелях, что обеспечивает высокую чувствительность к диэлектрическим изменениям покрывающего слоя [3]. Целью работы является разработка и исследование трехчастотного датчика на основе трех концентрических CSRR для количественного анализа состава масел. Новизна заключается в применении мультитемпературного подхода с резервуарами, размещенными над каждым кольцом, что позволяет получить три независимых параметра (сдвига частот) для одного образца [4].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конструкция сенсора и используемые материалы

Сенсорная структура выполнена на базе двусторонней печатной платы из стеклотекстолита марки FR-4. Толщина подложки $h = 0.8$, относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon' = 4.3$, тангенс угла потерь $\tan \delta = 0.025$. Медные проводящие слои имеют толщину $t = 35$ мкм с проводимостью $\sigma = 5.8 \cdot 10^7$ См/м. На лицевой стороне сформирована микрополосковая линия шириной $w = 1.5$ мм (волновое сопротивление 50 Ом, длина $L = 80$ мм) (рис. 1).

В земляном (заземленном) слое обратной стороны вырезаны три концентрических CSRR. Ширина кольца и щели для всех элементов составила 0.35 мм, а расстояние между центрами соседних резонаторов — 20 мм для минимизации связи [5]. Геометрические параметры выбраны для работы

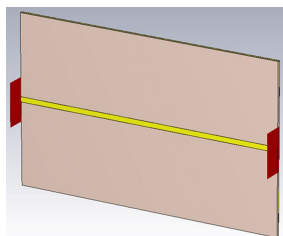


Рис. 1. Электродинамическая модель (вид сверху)

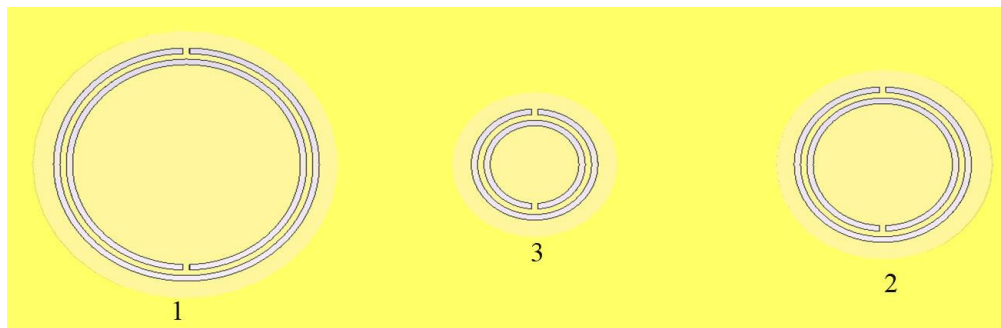


Рис. 2. Электродинамическая модель (вид снизу). Резонаторы: 1 — низкочастотный, 2 — среднечастотный, 3 — высокочастотный

на трех частотах: низкочастотный резонатор (внешний радиус $R_{out1} = 6.3$ мм) настроен на 1.5 ГГц, среднечастотный ($R_{out2} = 4.2$ мм) — на 2.45 ГГц, высокочастотный ($R_{out3} = 3.0$ мм) — на 3.8 ГГц. Выбор концентрической топологии позволяет обеспечить мультисистемный отклик без значительного взаимовлияния (рис. 2) [6].

Физический механизм сдвига частоты в данной конструкции описывается моделью эквивалентного LC-контура [7]. При нанесении жидкости в резервуары над кольцами поле в зазорах CSRR взаимодействует с полярными молекулами, увеличивая эквивалентную емкость. Резонансная частота обратно пропорциональна корню из произведения индуктивности и емкости, что и вызывает низкочастотный сдвиг [8].

Методика проведения эксперимента

В качестве исследуемых сред применялись три образца: чистое оливковое масло, смесь оливкового масла с 5% подсолнечного масла и смесь оливкового масла с 5% льняного масла. Измерение коэффициента передачи S_{21} проводилось в диапазоне от 0 до 10 ГГц. Исследуемые образцы загружались в резервуары, расположенные непосредственно над каждым из колец, при этом жидкость полностью покрывала область CSRR-резонаторов [9].

Результаты и их анализ

В ходе эксперимента зафиксированы три выраженных резонансных провала, соответствующие каждому CSRR (рис. 3).

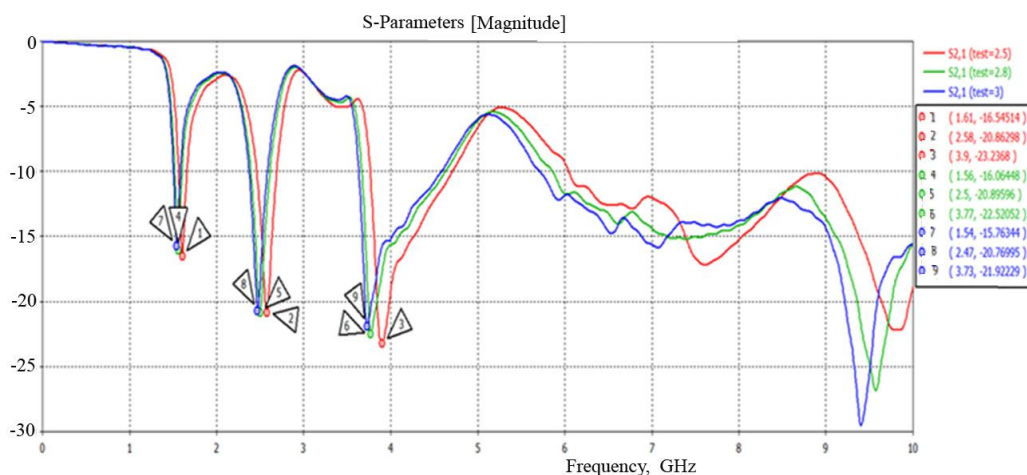


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи S_{21} от частоты для трех исследуемых образцов масла. 1 — чистое оливковое (test = 2.5, маркеры 1, 2, 3); 2 — смесь с подсолнечным (test = 2.8, маркеры 4, 5, 6); 3 — смесь с льняным (test = 3.0, маркеры 7, 8, 9)

Значения относительной диэлектрической проницаемости (ϵ') испытуемых сред: чистое оливковое масло ($\epsilon' \approx 2.5$), смесь с 5% подсолнечного масла ($\epsilon' \approx 2.8$), смесь с 5% льняного масла ($\epsilon' \approx 3.0$) [10, 11]. Экспериментальные значения сведены в табл. 1.

Данные демонстрируют систематическое смещение частот в низкочастотную область. Абсолютные сдвиги представлены в табл. 2. Наибольший сдвиг (170 МГц) зафиксирован для третьего резонатора при переходе от чистого масла к смеси с льняным.

Полученный сдвиг объясняется различным составом жирных кислот. Подсолнечное масло бога-

то линолевой кислотой, а льняное — альфа-линоленовой кислотой, обладающей более высокой полярностью, что увеличивает ϵ' [12]. Наибольшая чувствительность высокочастотного резонатора ($R_{out3} = 3.0$ мм) обусловлена ростом напряженности поля в щелях с уменьшением размеров резонатора [13, 14]. Глубина резонансных провалов меняется незначительно, что свидетельствует о стабильности связи. Сравнение с литературными данными показывает преимущество трехчастотного подхода перед однодиапазонными аналогами, т.к. позволяет получить несколько независимых параметров, снижая влияние случайных погрешностей [15].

Табл. 1. Экспериментальные значения резонансных частот и амплитуд коэффициента передачи

Исследуемый образец	Резонанс 1 (НЧ)		Резонанс 2 (СЧ)		Резонанс 3 (ВЧ)	
	f_1 , ГГц	S_{21} , дБ	f_2 , ГГц	S_{21} , дБ	f_3 , ГГц	S_{21} , дБ
Чистое оливковое масло ($\epsilon' = 2.5$)	1.61	−16.55	2.58	−20.86	3.90	−23.22
Оливковое + 5% подсолнечного ($\epsilon' = 2.8$)	1.56	−16.06	2.50	−20.90	3.77	−22.53
Оливковое + 5% льняного ($\epsilon' = 3.0$)	1.54	−15.76	2.47	−20.77	3.73	−21.92

Табл. 2. Анализ сдвига резонансных частот при переходе между образцами

Сравниваемые образцы	Абсолютный сдвиг f_1 , МГц	Абсолютный сдвиг f_2 , МГц	Абсолютный сдвиг f_3 (ВЧ), МГц
Чистое оливковое → Оливковое + 5% подсолнечного	50	80	130
Оливковое + 5% подсолнечного → Оливковое + 5% льняного	20	30	40
Чистое оливковое → Оливковое + 5% льняного	70	110	170

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования экспериментально подтверждена высокая эффективность трехчастотного микрополоскового датчика на основе трех концентрических CSRR для дифференциации растительных масел. Максимальная чувствительность (170 МГц), зафиксированная на резонаторе с радиусом 3.0 мм, позволяет детектировать примеси менее 5%. Представленные данные формируют базу для калибровки промышленных устройств контроля качества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жданов Д.Д., Бутина Е.А., Дубровская И.А., Ильинова С.А., Шаззо А.Ю. Выявление фальсификации оливкового масла путем разбавления рапсовым и подсолнечным маслами по триацилглицеридному профилю с использованием метода газовой хроматографии // Новые технологии. 2022. Т. 18, № 4. С. 60–77. DOI: 10.47370/2072-0920-2022-18-4-60-77
2. Егоров В.Н., Токарева Е.Ю., Туен Л.К. Измерение внутренних размеров сверхвысокочастотных объемных резонаторов // Измерительная техника. 2020. № 10. С. 65–72. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-10-65-72
3. Rashvand M., Omid M., Mobli H., Firouz S.M. Adulteration detection in olive oil using dielectric technique and data mining // Sensing and Bio-Sensing Research. 2016. Vol. 11. P. 33–36. DOI: 10.1016/j.sbsr.2016.10.005
4. Леонтьев А.С., Седышев Э.Ю. Синтез устройств СВЧ диапазона на основе микроволнового кольцевого эллиптического резонатора // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10, № 6. С. 26–33. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-6-26-33
5. Крылов В.П. Исследование связи собственной добротности объемного волнового резонатора с погрешностью определения диэлектрической проницаемости материала // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89, № 4. С. 45–49. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-45-49
6. Костин М.С., Ярлыков А.Д. Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии // Russian Technological Journal. 2021. Т. 9, № 1. С. 18–28. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28
7. Крылов В.П. Исследование влияния электродинамических параметров композиционного материала на характеристики отраженной от диэлектрического слоя волны // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86, № 5. С. 37–42. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-37-42
8. Геворкян В.М., Казанцев Ю.А., Шутов А.В. Способ измерения добротности миниатюрных открытых диэлектрических резонаторов на сверхвысоких частотах // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 29–36. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-6-29-36
9. Комаров В.В., Бушанский С.К. Исследование полосовых фильтров К-диапазона на прямоугольных концентрических резонаторах // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 63–69. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-63-69
10. Крылов В.П. Определение диэлектрической проницаемости материала в объемном резонаторе с учетом шероховатости поверхности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021. Т. 87, № 5. С. 43–46. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-43-46
11. Волков В.В., Суслин М.А., Думболов Д.У. Сверхвысокочастотный резонансный метод измерения микролитровых объемов свободной влаги авиационных топлив // Измерительная техника. 2020. № 3. С. 49–56. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-3-49-56
12. Лобекин В.Н., Бичурин М.И., Зуева Е.А. Применение метаструктуры на основе четырех сплит-кольцевых резонаторов // Вестник Новгородского государственного университета. 2021. № 4 (125). С. 43–46. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46
13. Xiao H., Yan S., Guo C., Chen J. A Dual-Scale CSRRs-Based Sensor for Dielectric Characterization of Solid Materials // IEEE Sensors Letters. 2022. Vol. 6, no. 12. P. 1–4. DOI: 10.1109/LSENS.2022.3224445
14. Martín F., Falcone F., Bonache J., Marqués R., Sorolla M. Equivalent-Circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005. Vol. 53, no. 4. P. 1451–1461. DOI: 10.1109/TMTT.2005.845211
15. Eiras J.N., Gavérina L., Roche J.-M. Durability Assessment of Bonded Piezoelectric Wafer Active Sensors for Aircraft Health Monitoring Applications // Sensors. 2024. Vol. 24, no. 2. Id. 450. DOI: 10.3390/s24020450

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КАИ), г. Казань

Контакты: Гайнутдинов Азат Маратович, kingintheshadow@gmail.com

Материал поступил в редакцию 26.06.2026

MULTI-RESONANT MICROSTRIP SENSOR BASED ON COMPLEMENTARY SPLIT-RING RESONATORS FOR DIELECTRIC SPECTROSCOPY OF LIQUID MEDIA

A. M. Gainutdinov, R. V. Farkhutdinov

*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KAI),
Kazan, Russian Federation*

The paper presents the experimental results of a three-frequency planar sensor implemented on the basis of a microstrip transmission line with three concentric complementary split-ring resonators (CSRRs) integrated into the ground layer of an FR-4 glass-fiber printed circuit board. The relevance of the work is due to the need for rapid and non-destructive quality control of olive oil, which is often adulterated by adding cheaper oils. The aim of the research is to develop a highly sensitive multi-frequency device for identifying the composition of vegetable oils based on the frequency shift of resonances. The methodology is based on recording changes in the magnitude of the transmission coefficient $|S_{21}|$ when the test liquid is placed into reservoirs located directly above each of the three concentric rings with radii of 6.3, 4.2, and 3.0 mm, tuned to frequencies of 1.5, 2.45, and 3.8 GHz, respectively. Pure olive oil (with a relative dielectric permittivity of ~ 2.5), as well as its mixtures with 5% sunflower oil (~ 2.8) and 5% linseed oil (~ 3.0), were used as model media. It was experimentally established that an increase in the dielectric permittivity of the tested samples causes a predictable synchronous low-frequency shift of all three resonant peaks. The highest sensitivity, amounting to 340 MHz per unit change in dielectric permittivity, is demonstrated by the small-sized high-frequency resonator (3.0 mm), which provides an absolute shift of up to 170 MHz when moving from pure oil to the linseed oil mixture. The results obtained indicate the prospects of using the developed sensor for express diagnostics and detection of impurities with a concentration of less than 5% in automated food quality control systems.

Keywords: complementary split-ring resonators, CSRR, microwave sensor, olive oil, dielectric permittivity, frequency shift

REFERENCES

1. Zhdanov D.D., Butina E.A., Dubrovskaya I.A., Il'inova S.A., Shazzo A.Yu. [Detection of falsification of olive oil by dilution with rapeseed and sunflower oils according to the triacylglyceride profile using the gas chromatography method]. *Novye technologii* [New technologies], 2022, vol. 18, no. 4, pp. 60–77. DOI: 10.47370/2072-0920-2022-18-4-60-77 (In Russ.).
2. Egorov V.N., Tokareva E.Yu., Tuen L.K. [Measurement of internal dimensions of microwave cavity resonators]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 2020, no. 10, pp. 65–72. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-10-65-72 (In Russ.).
3. Rashvand M., Omid M., Mobli H., Firouz S.M. Adulteration detection in olive oil using dielectric technique and data mining. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2016, vol. 11, pp. 33–36. DOI: 10.1016/j.sbsr.2016.10.005
4. Leont'ev A.S., Sedyshev E.Yu. [Microwave Ring Elliptical Resonator Synthesis]. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of educational institutions of communication], 2024, vol. 10, no. 6, pp. 26–33. (In Russ.). DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-6-26-33
5. Krylov V.P. [Study of the relationship between the intrinsic Q factor of a volume wave resonator and the error in determining the dielectric constant of a material]. *Proceedings of communication educational institutions. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Materials diagnostics], 2023, vol. 89, no. 4, pp. 45–49. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-45-49 (In Russ.).
6. Kostin M.S., Yarlykov A.D. [Radio wave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry]. *Russian Technological Journal*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 18–28. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28 (In Russ.).
7. Krylov V.P. [Study of the effect of electrodynamic parameters of the composite material on the characteristics of the wave reflected from the dielectric layer]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Materials diagnostics], 2020, vol. 86, no. 5, pp. 37–42. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-5-37-42 (In Russ.).
8. Gevorkyan V.M., Kazanzhev Yu.A., Shutov A.V. [Method of measuring Q-factor of miniature open dielectric resonators at ultrahigh frequencies]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 2021, no. 6, pp. 29–36. DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-6-29-36 (In Russ.).

9. Komarov V.V., Bushanskiy S.K. [Investigation of K-band bandpass filters on rectangular concentric resonators]. *Izvestiya vysshich uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika* [News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics], 2020, vol. 23, no. 1, pp. 63–69. DOI: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-63-69 (In Russ.).
10. Krylov V.P. [Determination of dielectric constant of the material in the cavity resonator taking into account surface roughness]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Materials diagnostics], 2021, vol. 87, no. 5, pp. 43–46. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-5-43-46 (In Russ.).
11. Volkov V.V., Suslin M.A., Dumbolov D.U. [Microwave resonance method for measuring microliter volumes of free moisture of aviation fuels]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technique], 2020, no. 3, pp. 49–56. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-3-49-56 (In Russ.).
12. Lobekin V.N., Bichurin M.I., Zueva E.A. [Application of metastructure based on four split ring resonators]. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Novgorod State University], 2021, no. 4 (125), pp. 43–46. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.4(125).43-46 (In Russ.).
13. Xiao H., Yan S., Guo C., Chen J. A Dual-Scale CSRRs-Based Sensor for Dielectric Characterization of Solid Materials. *IEEE Sensors Letters*, 2022, vol. 6, no. 12, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LENS.2022.3224445
14. Martín F., Falcone F., Bonache J., Marqués R., Sorolla M. Equivalent-Circuit models for split-ring resonators and complementary split-ring resonators coupled to planar transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, vol. 53, no. 4, pp. 1451–1461. DOI: 10.1109/TMTT.2005.845211
15. Eiras J.N., Gavérina L., Roche J.-M. Durability Assessment of Bonded Piezoelectric Wafer Active Sensors for Aircraft Health Monitoring Applications. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 2, id. 450. DOI: 10.3390/s24020450

Contacts: Gainutdinov Azat Maratovich,
kingintheshadow@gmail.com

The article was received by the editorial office on 26.06.2026

INTRODUCTION

Traditional methods, including gas chromatography, for identifying vegetable oil mixtures require extensive sample preparation [1]. Microwave dielectric spectroscopy offers a promising alternative, as the dielectric parameters of oils correlate with their fatty acid composition [2]. Modern metamaterial structures, particularly complementary split-ring resonators (CSRRs), enable strong localization of the electromagnetic field in gaps, ensuring high sensitivity to dielectric changes in the coating layer [3]. The aim of this study is to develop and characterize a three-frequency sensor based on three concentric CSRRs for quantitative analysis of oil composition. The novelty lies in the use of a multiresonance approach with reservoirs placed above each ring, which enables the acquisition of three independent parameters (frequency shifts) for a single sample [4].

MAIN PART

Sensor design and materials

The sensor structure is based on a double-sided printed circuit board made of FR-4 fiberglass. The substrate thickness is $h = 0.8$, the relative permittivity is $\epsilon' = 4.3$, and the loss tangent is $\tan \delta = 0.025$. The copper conductive layers have a thickness of $t = 35 \mu\text{m}$ and a conductivity of $\sigma = 5.8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$. A microstrip line with a width of $w = 1.5 \text{ mm}$ (impedance of 50Ω , length $L = 80 \text{ mm}$) is formed on the front side (Fig. 1).

Fig. 1. Electrodynamic model (top view)

Three concentric CSRRs are cut into the ground plane of the back side. The ring and gap width for all elements was 0.35 mm , and the distance between the centers of adjacent resonators was 20 mm to minimize coupling [5]. The geometric parameters were selected for operation at three frequencies: the low-frequency resonator (outer radius $R_{\text{out}1} = 6.3 \text{ mm}$) was tuned to 1.5 GHz , the mid-frequency resonator ($R_{\text{out}2} = 4.2 \text{ mm}$) was tuned to 2.45 GHz , and the high-frequency resonator ($R_{\text{out}3} = 3.0 \text{ mm}$) was tuned to 3.8 GHz . The choice of a concentric topology ensures a multi-frequency response without significant interference (Fig. 2) [6].

Fig. 2. Electrodynamic model (bottom view). Resonators: 1 — low-frequency, 2 — mid-frequency, 3 — high-frequency

The physical mechanism of frequency shift in this design is described by the equivalent LC circuit model [7]. When liquid is applied to the reservoirs above the rings, the field in the CSRR gaps interacts with the polar molecules, increasing the equivalent capacitance. The resonant frequency is inversely proportional to the square root of the product of inductance and capacitance, which causes the low-frequency shift [8].

Experimental procedure

Three samples were used as test media: pure olive oil, a mixture of olive oil with 5% sunflower oil, and a mixture of olive oil with 5% linseed oil. The transmission coefficient S_{21} was measured in the range from 0 to 10 GHz . The test samples were loaded into reservoirs located directly above each ring, with the liquid completely covering the CSRR region [9].

Results and analysis

Three distinct resonant dips were recorded during the experiment, corresponding to each CSRR (Fig. 3).

Fig. 3. Frequency dependence of the S_{21} transmission coefficient for the three oil samples studied. 1 — pure olive oil (test = 2.5, markers 1, 2, 3); 2 — mixture with sunflower oil (test = 2.8, markers 4, 5, 6); 3 — mixture with flaxseed oil (test = 3.0, markers 7, 8, 9)

Relative permittivity values (ϵ') of the test media were as follows: pure olive oil ($\epsilon' \approx 2.5$), a mixture with 5% sunflower oil ($\epsilon' \approx 2.8$), and a mixture with 5% linseed oil ($\epsilon' \approx 3.0$) [10, 11]. The experimental values are summarized in Tab. 1.

Tab. 1. Experimental values of resonant frequencies and transmission coefficient amplitudes

The data demonstrate a systematic frequency shift toward the low-frequency region. Absolute shifts are presented in Tab. 2. The largest shift (170 MHz) was recorded for the third resonator when moving from pure oil to the mixture with linseed oil.

Tab. 2. Analysis of resonance frequency shifts during sample transitions

This shift is explained by the different fatty acid compositions. Sunflower oil is rich in linoleic acid, while flaxseed oil is rich in alpha-linolenic acid, which has a higher polarity, increasing ϵ' [12].

The highest sensitivity of the high-frequency resonator ($R_{\text{out}3} = 3.0$ mm) is due to an increase in the field strength in the slots with decreasing resonator size [13, 14]. The depth of the resonant dips changes only slightly, indicating stable coupling. Comparison with published data demonstrates the advantage of the three-frequency approach over single-band analogs, as it allows for obtaining several independent parameters, reducing the influence of random errors [15].

CONCLUSION

This study experimentally confirmed the high efficiency of a three-frequency microstrip sensor based on three concentric CSRRs for differentiating vegetable oils. The maximum sensitivity (170 MHz), recorded on a resonator with a radius of 3.0 mm, enables detection of impurities below 5%. The presented data form the basis for calibrating industrial quality control devices.