

10. Korenev A. V., Goshin G. G. Accounting of the parasitic effects during measurement of the effective permittivity using the quarter-wavelength resonator method. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(3):272–284. (In Russ.)

11. Dunsmore J. P. *Handbook of microwave measurements: with advanced VNA techniques*, John Wiley & Sons, 2012. ISBN 9781119979555

12. *Southwest Microwave, Utilizing Time Domain*. Test Methods For Maximizing Microwave Board Performance, available at: <https://mpd.southwestmicrowave.com/wp-content/uploads/2018/07/Utilizing-Time-Domain-TDR-Test-Methods-For-Maximizing-Microwave-Board-Performance.pdf> (accessed 17.03.2023).

Информация об авторах

Корнев Андрей Викторович — аспирант Томского университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; инженер-электроник АО «Иркутский релейный завод», Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Байкальская, 239.

Information about the authors

Andrey V. Korenev — Postgraduate Student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, prospect Lenin, 634050, Tomsk, Russia; Electronics Engineer, JSC “Irkutskiy Releyniy Zavod”, 239, Bajkalskaya Str., 664074, Irkutsk, Russia.

Поступила / Received: 07.12.2022

Принята в печать / Accepted: 10.02.2023

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2023.7.1.003

УДК 542.8; 621.317.341.3

Анализ электрических параметров жидкостей в коаксиальной камере при изменении температуры

В. Н. Невежин ✉, **А. В. Бусыгина**, **М. Е. Комнатнов**Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

✉ vitalayzerman@mail.ru

Аннотация

Определение электрофизических свойств материалов актуально для многих областей жизнедеятельности человека. Совершенствуются методы, подходы и устройства, использование которых позволяет оценить электрофизические свойства жидкостей в зависимости от разных параметров. В работе представлен анализ электрических параметров жидкостей с различным химическим составом в коаксиальной камере в широком диапазоне частот при изменении температуры. Анализ выполнен на основе измеренных векторным анализатором цепей S -параметров жидкостей в диапазоне частот до 12 ГГц, размещенных внутри коаксиальной камеры, температура которых задавалась камерой «тепло-холод» в диапазоне от 0 до 50 °С. Выявление изменения частотных зависимостей S -параметров жидкостей с разным химическим составом в зависимости от температуры с использованием коаксиальной камеры позволило выявить их характерные особенности, возникающие на определенных частотах. Применен метод главных компонент для исследования влияния температуры жидкостей на изменение их электрофизических параметров, позволивший выявить связь между химическим составом жидкостей и представлением их в пространстве главных компонент.

Ключевые слова

жидкости, химические компоненты, коаксиальная камера, СВЧ-измерения, S -параметры.

Для цитирования

Невежин В. Н., Бусыгина А. В., Комнатнов М. Е. Анализ электрических параметров жидкостей в коаксиальной камере при изменении температуры. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(1):37–55. DOI 10.15826/urej.2023.7.1.003.

© Невежин В. Н., Бусыгина А. В., Комнатнов М. Е., 2023

Analysis of Electrical Parameters of Liquids in a Coaxial Cell at Varying Temperatures

V. N. Nevezhin ✉, A. V. Busygina, M. E. Komnatnov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 40, Lenina pr., 634050, Russia

✉ vitalayzerman@mail.ru

Abstract

Determination of the electrophysical properties of materials is relevant to many areas of human activity. Methods, approaches and devices are improving, the use of which makes it possible to estimate the electrophysical properties of liquids depending on different parameters. This work presents the analysis of the electrical parameters of liquids with different chemical composition in a coaxial cell in a wide frequency range when the temperature changes. The analysis is based on the S -parameters of liquids measured with a vector circuit analyzer in the frequency range up to 12 GHz, placed inside the coaxial cell, which temperature is set by the heat-cold chamber in the range from 0 to 50 °C. The changes in frequency dependences of liquids S -parameters detected using the above approach indicate their characteristic features occurring at certain frequencies. To investigate the influence of liquids temperature on changes in their electrophysical parameters, we have applied the method of principal components. This method has revealed the relationship between chemical composition of liquids and their representation in the space of principal components.

Keywords

liquids, chemical compounds, coaxial cell, microwave measurement, S -parameters.

For citation

Nevezhin V. N., Busygina A. V., Komnatnov M. E. Analysis of Electrical Parameters of Liquids in a Coaxial Cell at Varying Temperatures. *Ural Radio Engineering Journal*. 2023;7(1):37–55. (In Russ.) DOI 10.15826/urej.2023.7.1.003.

Введение

В настоящее время повышенный интерес вызывает использование СВЧ-устройств для изучения различных свойств жидкостей. Учитывая изменения частотных зависимостей S -параметров СВЧ-устройств с объектом исследования в виде жидкости, можно определить наличие и концентрацию химических и биологических объектов (БО) в ее составе, не прибегая к использованию сложных и дорогостоящих установок. В основном в качестве

СВЧ-устройств используют микрополосковые и волноводные резонаторы, а также линии передачи. Преимуществами их использования являются удобство и простота конструкции.

Отсутствие необходимости предварительной подготовки исследуемых материалов, связанной с конструктивными особенностями устройств, позволяет довольно просто получить частотные зависимости электрофизических параметров БО различного происхождения. Так, используя прямоугольный резонатор, можно определить содержание антибиотиков и концентрацию бактерий в жидкостях за счет измерения модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ и смещения резонансной частоты резонатора [1]. Используя кольцевой резонатор, возможно оценить концентрацию различных микроорганизмов в пробе, размещенной на его поверхности, за счет изменения амплитуды и частоты резонатора вблизи 2,5 ГГц [2]. Аналогичное устройство позволяет определить наличие вируса Денге в крови человека, а также оценить тяжесть заболевания [3].

Микрополосковые резонаторы и линии передачи также используются для определения концентрации различных типов жидкостей. Особенностью их использования является возможность вычисления частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости жидкости на основе измеренных S -параметров [4], а также возможность определения содержания различных химических веществ в ее составе, в том числе в воде. Используя копланарную линию передачи, определяют содержание и концентрацию глюкозы в растворах и в крови человека [5]. Обнаружение антибиотиков [6] и микроорганизмов [7] в жидкостях в режиме реального времени и без необходимости дополнительной обработки образцов позволяет выявить взаимосвязи между измеренными значениями $|S_{11}|$ и концентрацией антибиотика [6], а также отличить микроорганизмы друг от друга [7]. Объемный резонатор и резонатор со встречно штыревой структурой позволяют оценить концентрацию свинца в жидкости на рабочих частотах в режиме реального времени [8]. Выявленная взаимосвязь между частотной зависимостью $|S_{11}|$, концентрацией органических веществ и NO_3 в воде показала, что чем выше их концентрация, тем ниже амплитуда значений $|S_{11}|$ [9]. Аналогично определяют содержание метанола в воде, используя устройство на основе микрополосковой линии передачи, а также вычисляют диэлектрическую проницаемость жидкостей в диапазоне частот 1–20 ГГц [10].

При изучении жидкостей органического происхождения учитывают их химические особенности. Так, при оценке содержания глюкозы в крови человека с помощью СВЧ-резонатора обна-

ружен сдвиг резонансной частоты и изменение значений $|S_{11}|$, что позволяет выявить ее концентрацию [11]. Аналогичные результаты получены и для неинвазивного способа измерения глюкозы в крови человека. Использование кольцевого резонатора с замкнутым внешним контуром и разомкнутым внутренним для неинвазивного измерения глюкозы в крови человека дало схожие результаты, что и при инвазивном измерении [12]. Кроме того, известно, что жидкие масла обладают сложной химической структурой, с множеством химических соединений, что отличает один тип масла от другого. При смешивании нескольких масел, выявление химического состава требуемого масла является достаточно сложной процедурой, особенно когда содержание другого масла в общей смеси незначительно. Одним из возможных способов определения типа масла и его примесей является использование объемного резонатора. Измерение и анализ частотных зависимостей S -параметров чистых образцов и их различных смесей при помощи объемного резонатора позволило определить процентное содержание примесей в масле [13, 14].

Таким образом, изучение частотных зависимостей S -параметров жидкостей с использованием различных СВЧ-устройств актуально для определения свойств и концентрации веществ в жидкостях. В [15] установлены изменения частотных зависимостей S -параметров в жидкостях. Показано, что химические свойства и растворимость химических соединений в жидкостях зависят от температуры, а следовательно, влияют на ее электрические свойства. В этой связи целесообразен анализ измеренных частотных зависимостей S -параметров жидкостей в широких диапазонах частот и температур, который позволит выявить изменения электрических свойств жидкостей в зависимости от температуры. Целью работы является выявление изменения частотных зависимостей S -параметров жидкостей с разным химическим составом в зависимости от температуры с использованием коаксиальной камеры.

1. Материалы и методы

В качестве исследуемых материалов выбраны наиболее доступные и химически различные жидкости: стерильная вода (H_2O), раствор кальция хлорида (10 % $CaCl_2$), физиологический раствор (0,9 % -й раствор $NaCl$), раствор глюкозы (5 % $C_6H_{12}O_6$), питьевая лечебная минеральная вода «Ессентуки 4» с содержанием 1 % различных солей, раствор сульфата натрия (30 % Na_2SO_4) и препарат «Папаверин» (2 % $C_{20}H_{21}O_4$). Указанные материалы в основном применяются в фармацевтической и пищевой промышленности, а также в медицинской практике. Так, раствор

кальция хлорида применяется для нормализации прохождения нервных импульсов и сократительной функции скелетных и гладких мышц, деятельности миокарда, а также необходим для восстановления костной ткани человека. Физиологический раствор применяется для промывания ран и слизистых оболочек, а также используется для поддержания водно-солевого баланса человека. Раствор глюкозы используется в качестве источника углеводов, для разведения других лекарственных веществ. Питьевая лечебная минеральная вода «Ессентуки 4» назначается при профилактике заболеваний желудочно-кишечного тракта и общего укрепления организма. Раствор сульфата натрия используется при ослаблении последствий влияния на организм токсичного воздействия тяжелых металлов и других токсичных веществ. Препарат «Папаверин» обладает сосудорасширяющим и спазмолитическим действием. Измерение частотных зависимостей S -параметров чистых жидкостей и с добавлением в них различных химических веществ в коаксиальной камере при изменении температуры позволит определить изменение их электрофизических свойств, а также установить связь частотных зависимостей электрических параметров с изменением температуры.

Исследование жидкостей проводилось внутри коаксиальной камеры [15] с диапазоном рабочих частот до 12 ГГц (рис. 1а). Для размещения жидкостей внутри коаксиальной камеры, создан контейнер (рис. 1б) цилиндрической формы из тефлона ($\epsilon_r = 2,1$). Тефлон оказывает минимальное влияние на измеряемые S -параметры исследуемых жидкостей, размещаемых в коаксиальной камере, и обладает упругими свойствами по сравнению со вспененным пенопластом ($\epsilon_r = 1,8-2,0$). Конструкция контейнера выполнена с минимальной толщиной основания стенок ($t = 1$ мм)



Рис. 1. Коаксиальная камера (а)
с размещенным внутри контейнером (б)

Fig. 1. Coaxial cell (a) with a plastic container inside (b)

и крышки ($t = 2$ мм), необходимой для плотного закрытия контейнера с исследуемой жидкостью. Измеренный объем контейнера составлял 2,5 мл.

Измерения частотных зависимостей S -параметров коаксиальной камеры с исследуемыми жидкостями проводились в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц, используя векторный анализатор цепей (ВАЦ) Rohde & Schwarz ZVA 40. При измерениях частотных зависимостей S -параметров камеры с исследуемыми жидкостями их температура изменялась от 50 до 0 °С с шагом 5 °С. Изменение температуры проводилось с использованием камеры «тепло-холод» ESPEC SU-262. Схема установки (рис. 2) содержит внешний (1) и центральный (2) проводники коаксиальной камеры с размещенным внутри нее контейнером (3), содержащим исследуемую жидкость (4), при этом коаксиальная камера размещалась внутри камеры «тепло-холод» (5).

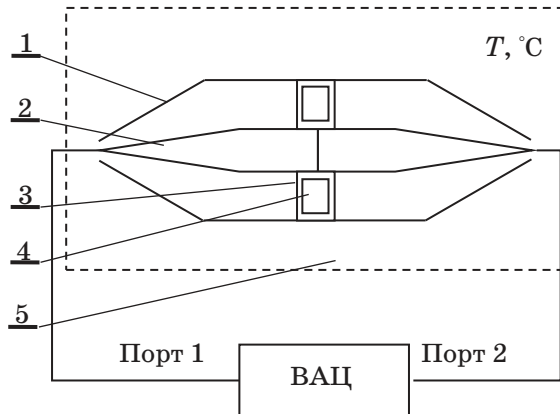


Рис. 2. Схема измерительной установки частотных зависимостей S -параметров при изменении температуры исследуемых жидкостей

Fig. 2. Diagram of the experimental setup for measuring the frequency dependences of S -parameters when the liquid temperature changes

Внешний вид установки для измерения частотных зависимостей S -параметров при изменении температуры показан на рис. 3.

Стабилизация температуры коаксиальной камеры и исследуемых жидкостей осуществлялась выдерживанием временного интервала в 600 с, перед каждым измерением частотной зависимости S -параметров. Перед началом и после окончания измерения контролировался объем помещенной внутрь контейнера жидкости (2 мл). Оценка влияния температуры на жидкости с разным химическим составом, помещаемые в коаксиальную камеру, заключалась в последовательном анализе измеренных значений

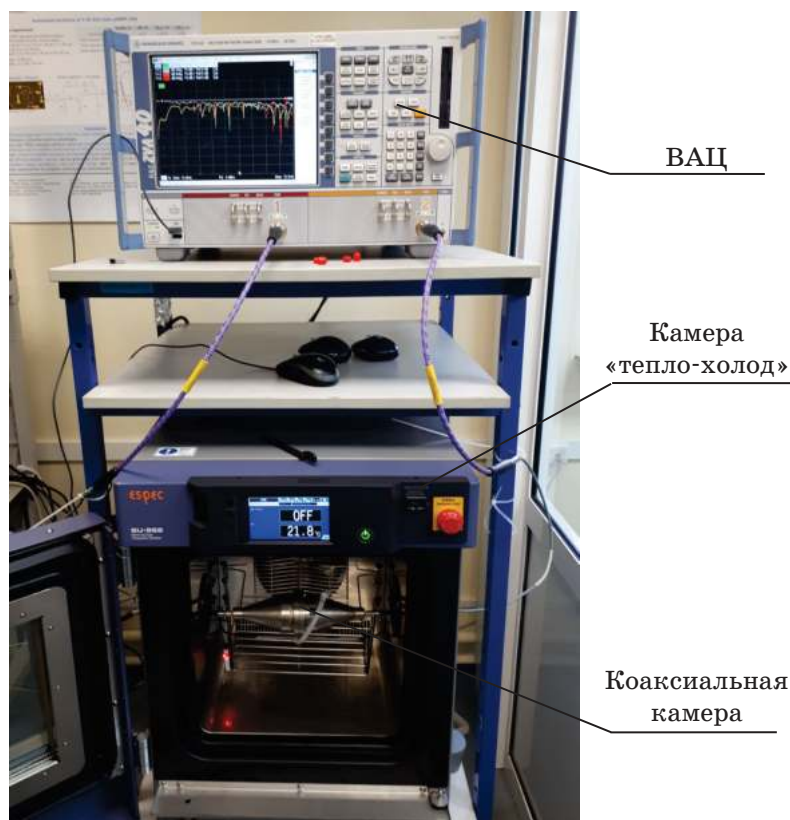


Рис. 3. Экспериментальная установка для измерения частотных зависимостей S -параметров при изменении температуры исследуемых жидкостей

Fig. 3. Experimental setup for measuring the frequency dependences of S -parameters when the liquid temperature changes

S -параметров несколькими методами. Изначально измеренные частотные зависимости S -параметров исследуемых жидкостей анализировались методом главных компонент (МГК). Данный метод позволяет наглядно представить изменения частотных зависимостей S -параметров в пространстве главных компонент (ГК). Определение ГК сводилось к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы измеренных S -параметров. Далее значения обрабатывались методом упругих карт для визуализации в пространстве ГК. Анализ этих данных позволил оценить влияние температуры, оказываемой на изменение электрофизических свойств жидкостей, тем самым выявив наиболее зависимую от температуры жидкость, что в дальнейшем позволит выделить растворитель для исследуемой жидкости.

2. Результаты измерений

Выполнены измерения 11 частотных зависимостей S -параметров для пустой камеры и с исследуемыми жидкостями в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц при изменении температуры от 0 до 50 °С с шагом 5 °С. Ниже приведены частотные зависимости S -параметров (рис. 4) при нормальной температуре (25 °С) для пустой коаксиальной камеры с пустым контейнером и контейнером, заполненным чистой водой. Влажность воздуха внутри камеры «тепло-холод» изменялась от 20 до 25 %.

V. N. Nevezhin, A. V. Busygina, M. E. Kornatnov | Analysis of Electrical Parameters of Liquids in a Coaxial Cell at Varying Temperatures

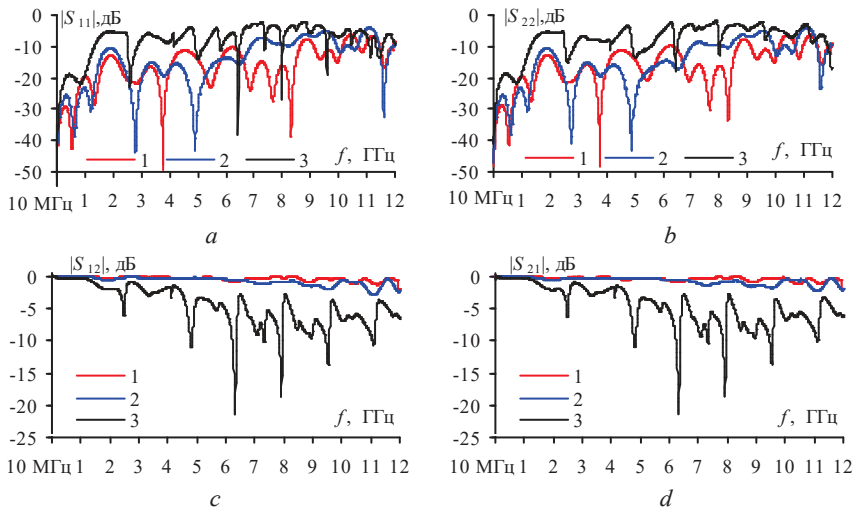


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (a); $|S_{22}|$ (b); $|S_{12}|$ (c); $|S_{21}|$ (d) для пустой камеры (1), с пустым контейнером (2) и заполненным водой (3)

Fig. 4. Frequency dependences of $|S_{11}|$ (a), $|S_{22}|$ (b), $|S_{12}|$ (c), $|S_{21}|$ (d), for an empty cell (1), with a hollow container (2) and filled with water (3)

На рис. 4 видно, что размещение пустого контейнера внутри коаксиальной камеры оказывает незначительное влияние (для $|S_{21}|$ до $\pm 1,0$ дБ) на измеренную частотную зависимость S -параметров, при этом добавление чистой воды в контейнер значительно ее изменяет.

Проведено сравнение измеренных частотных зависимостей S -параметров при $T = 0$ °С, 25 и 50 °С (рис. 5) для исследуемых жидкостей H_2O (1), $CaCl_2$ (2), $NaCl$ (3), $C_6H_{12}O_6$ (4), «Ессентуки 4» (5), Na_2SO_4 (6), $C_{20}H_{21}O_4$ (7).

На рис. 5 видно, что чистая (дистиллированная) вода обладает свойствами диэлектрика, а добавление солей и различных химических соединений оказывает влияние на ее электрические параметры, что приводит к их изменению S -параметров

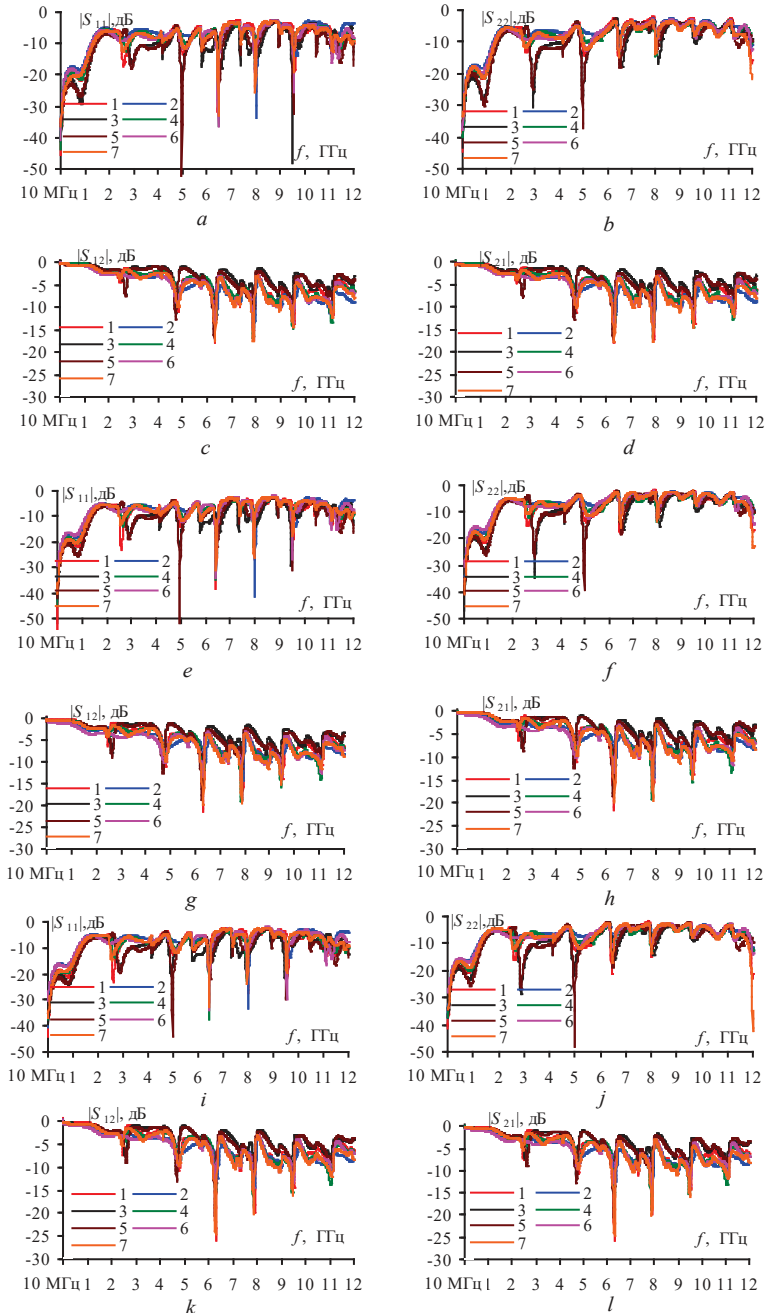


Рис. 5. Частотные зависимости $|S_{11}|$ (a, e, i); $|S_{22}|$ (b, f, j); $|S_{12}|$ (c, f, i); $|S_{21}|$ (d, h, m) при $T = 0^\circ\text{C}$ (a–d); 25°C (e–h); 50°C (i–l) исследуемых жидкостей

Fig. 5. Frequency dependences of $|S_{11}|$ (a, e, i), $|S_{22}|$ (b, f, j), $|S_{12}|$ (c, f, i), $|S_{21}|$ (d, h, m), at $T = 0^\circ\text{C}$ (a–d), 25°C (e–h), 50°C (i–l) of the liquids

для каждой исследуемой жидкости. При этом повышение температуры оказывает влияние на растворенные в воде химические вещества, что приводит к изменению значений S -параметров. Для оценки этого влияния выполнено сравнение максимальных и минимальных значений, а также изменения этих значений с частотой. Так, в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц для измеренных жидкостей наблюдается множество локальных минимумов в трех диапазонах частот: 2–3,5 ГГц, 6–7 ГГц и 7,5–8,5 ГГц. Температура выбрана из условия того, что при минимальном, среднем и максимальном ее значениях, изменения, происходящие с электрофизическими параметрами жидкостей, наиболее наглядны.

Выполнено сравнение значений частотных зависимостей S -параметров при изменении температуры растворов. Анализ частотных зависимостей S -параметров H_2O показал множество выраженных узлов и пучностей в диапазоне частот от 10 МГц до 12 ГГц. Значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для H_2O близки к значениям раствора $C_6H_{12}O_6$ (разница 2 дБ на частотах до 6 ГГц, с увеличением частоты разница возрастает до 4 дБ), за исключением узлов и пучностей S -параметров. Значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ в узлах для H_2O минимальны относительно других растворов. Увеличение температуры H_2O приводит к повышению разницы $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ до 2 дБ, а для $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ не более 0,5 дБ, особенно вблизи частоты 2,4 ГГц.

Из анализа значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для 10 %-го раствора $CaCl_2$ видно, что они максимальны по сравнению с другими растворами до частоты 6 ГГц. Изменение температуры в диапазоне 0–50 °C незначительно (до 1 дБ), оказало влияние на значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$, а также на $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ (до 0,5 дБ) до частоты 6 ГГц. С повышением частоты разница между $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ уменьшается до 0,2 дБ.

Для 0,9 %-го раствора $NaCl$ и жидкости «Эссендуки 4» сравнение значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ выявило их разницу (до 3 дБ) между собой, за исключением значений в узлах и пучностях. Значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ близки (до 1 дБ) во всем измеренном диапазоне частот. Изменение температуры для 0,9 %-го раствора $NaCl$ незначительно (до 0,05 ГГц) смещает частоту узлов и пучностей $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$, но для $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ это смещение увеличивается (до 0,1 ГГц). Изменение температуры в диапазоне 0–50 °C для 0,9 %-го раствора $NaCl$ уменьшает значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ до 8 дБ, а для $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ — до 2 дБ. Значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для жидкости «Эссендуки 4» значительно изменяются в зависимости от температуры (до 7 дБ). Увеличение температуры для жидкости «Эссендуки 4» уменьшает значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ до 3 дБ и смещает частоты узлов и пучностей (до 0,1 ГГц).

Анализ значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для 5 %-го раствора $C_6H_{12}O_6$ выявил, что они находятся между значениями $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ растворов с высокой и низкой концентрацией разных веществ. Значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для 5 %-го раствора $C_6H_{12}O_6$ и H_2O близки между собой (до 1 дБ), но вблизи узлов и пучностей они отличаются (до 5 дБ) до частоты 6 ГГц, с ростом частоты эта разница снижается до 2 дБ. Изменение температуры в диапазоне 0–50 °С для 5 %-го раствора $C_6H_{12}O_6$ смещает частоты (до 0,05 ГГц) и изменяет амплитуды (до 3 дБ) частотных зависимостей S -параметров во всем измеренном диапазоне частот.

Сравнение значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для 30 %-го раствора Na_2SO_4 показало, что они меньше (до 3 дБ), чем значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для 10 %-го раствора $CaCl_2$. Это может свидетельствовать о влиянии концентрации на значения S -параметров. Аналогично разница в значениях $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для растворов с 30 %-м Na_2SO_4 и 10 %-м $CaCl_2$ не превышает 2 дБ. Изменение температуры оказывает схожее влияние на значения частотной зависимости S -параметров для 30 %-го раствора Na_2SO_4 , как и для 10 %-го раствора $CaCl_2$.

Анализ значений $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для 2 %-го раствора $C_{20}H_{21}O_4$ показал, что они меньше (до 3 дБ), чем значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ для H_2O , за исключением узлов и пучностей (до 10 дБ). Разница значений $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для 2 %-го раствора $C_{20}H_{21}O_4$ и H_2O не превышает 1 дБ до частоты 6 ГГц, с повышением частоты значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для 2 %-го раствора $C_{20}H_{21}O_4$ становятся близкими к значениям $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ для 30 %-го раствора Na_2SO_4 . Изменение температуры в диапазоне 0–50 °С для 2 %-го раствора $C_{20}H_{21}O_4$ незначительно уменьшает (до 2 дБ) значения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$, но значения $|S_{12}|$ и $|S_{21}|$ уменьшаются (до 3 дБ) и смещаются по частоте (до 0,1 ГГц).

Таким образом, температура оказывает существенное влияние на частоты и амплитуды значений S -параметров, что говорит об изменении значений электрических параметров жидкостей. Вычислена разница между минимальными и максимальными значениями S -параметров. Проведен анализ сдвига частот в зависимости от концентрации и состава химических веществ в воде, а также при изменении их температуры (таблица 1).

Из данных таблицы 1 видно, что при изменении температуры разница по частоте максимальна и достигает 0,45 ГГц в диапазоне частот 2–3,5 ГГц. Также наблюдается максимальная разница (13,5 дБ) значений $|S_{21}|$ в диапазоне частот 6–7 ГГц, а в диапазоне частот 7,5–8,5 ГГц изменения по частоте минимальны и не превышают 0,11 ГГц.

Таблица 1. Разница значений S -параметров по частотам и амплитудам для исследуемых жидкостей

Table 1. Difference between the frequency and amplitude values of S -parameters for the liquids under study

T , °C	$\Delta S_{11} $, дБ	Δf , ГГц	$\Delta S_{22} $, дБ	Δf , ГГц	$\Delta S_{12} $, дБ	Δf , ГГц	$\Delta S_{21} $, дБ	Δf , ГГц
Частотный диапазон от 2 до 3,5 ГГц								
0	9,59	0,45	22,3	0,31	4,7	0,88	4,6	0,88
25	14,96	0,44	24,94	0,31	5,12	0,95	5,18	0,95
50	15,12	0,41	21,22	0,3	5,27	1	5,35	1,04
Частотный диапазон от 6 до 7 ГГц								
0	21,39	0,15	10,07	0,13	6,17	0,09	6,17	0,09
25	23,73	0,05	10,87	0,12	9,91	0,1	9,92	0,08
50	22,04	0,09	13,45	0,08	13,47	0,07	13,49	0,07
Частотный диапазон от 7,5 до 8,5 ГГц								
0	21,39	0,08	9,28	0,1	7,87	0,05	7,85	0,05
25	27	0,08	6,12	0,05	8,93	0,05	8,92	0,05
50	18,92	0,08	5,31	0,11	10,9	0,05	10,86	0,05

3. Анализ методом главных компонент

Выполнен комплексный анализ измеренных частотных зависимостей S -параметров для всех исследуемых жидкостей с использованием МГК [16]. Результаты вычисления ГК представлены на трехмерном графике, на котором по оси OX отображены значения для групп точек, соответствующих ГК 1, по OY — ГК 2 и по OZ — ГК 3. Расположение точек для всех измеренных значений S -параметров представлено в пространстве ГК 1 (OX) и ГК 3 (OZ) (рис. 6). Выделены области для пустой коаксиальной камеры (1), камеры с пустым контейнером (2), а также для всех жидкостей, содержащихся в контейнере, помещенном в коаксиальную камеру (3).

На рис. 6 видно, что изменение расположения точек на плоскости в большинстве случаев линейно для всех исследуемых жидкостей. Длину отрезка, на котором точки располагаются в виде линии, можно интерпретировать как влияние T °C на электрические параметры жидкости. Сравнение результатов измерения пустой коаксиальной камеры и с размещенным в ней контейнером с жидкостями показало, что температура оказывает существенное влияние на значения частотных зависимостей S -параметров. Проекция частотных зависимостей S -параметров на пространст-

во ГК для пустой коаксиальной камеры и с размещенным в ней пустым контейнером представлены на рис. 7.

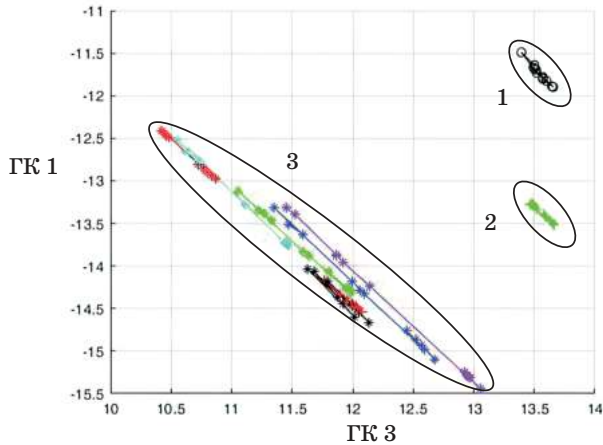


Рис. 6. Проекция частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для пустой коаксиальной камеры (1), камеры с пустым пластиковым контейнером (2) и всех исследуемых жидкостей, размещенных в контейнере, расположенном внутри коаксиальной камеры (3)

Fig. 6. Projections of frequency dependences of S -parameters on the PC area for the empty coaxial cell (1), the cell with an empty plastic container (2) and all the liquids in the container in the coaxial cell (3)

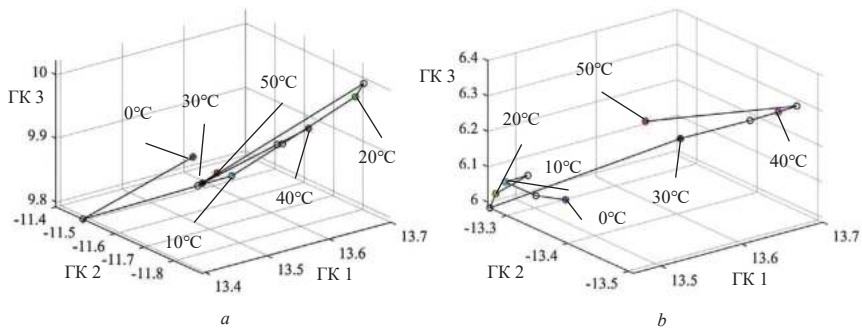


Рис. 7. Проекция частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для пустой коаксиальной камеры (а) и с размещенным в ней пустым контейнером (б)

Fig. 7. Projections of frequency dependences of S -parameters on PC area for an empty coaxial cell (a) and with a container placed in it (b)

На рис. 7а видно, что изменение температуры приводит к небольшим изменениям в распределении каждого значения ГК. Отклонение не превышает $\pm 0,4$ ГК2, а для ГК1 и ГК3 не более $\pm 0,3$.

На рис. 7*b* видно, что внесение пустого контейнера в коаксиальную камеру оказывает влияние на расположение точек S -параметров в пространстве ГК, а именно наблюдается сдвиг по осям ГК 2 на 1,8 и ГК 3 на 3,5. При этом по оси ГК 1 смещение минимально. При этом для каждой частотной зависимости S -параметров разница между значениями не превышает $\pm 0,5$ для ГК3, а для ГК1 и ГК2 $\pm 0,25$.

Проведен анализ представленных проекций частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для каждой исследуемой жидкости. Расположение точек проекции S -параметров в пространстве ГК для чистой воды (H_2O), растворов $CaCl_2$, $NaCl$, $C_6H_{12}O_6$, Na_2SO_4 и жидкости «Ессентуки 4» в зависимости от изменения температуры в диапазоне $0-50^\circ C$ приведено на рис. 8.

На рис. 8*a* видно, что расположение точек S -параметров в проекции ГК для H_2O отличается, по сравнению с пустым контейнером. При этом разница ГК для H_2O не превышает $\pm 0,4$ для ГК1 и ГК2, а для ГК3 не более $\pm 0,3$. На рис. 8*b* видно, что для раствора $CaCl_2$ максимальное значение по оси X различается на 0,5 в пространстве групп точек ГК для температуры $0-25^\circ C$ и $30-50^\circ C$, что говорит о влиянии температуры на изменение электрофизических свойств жидкости. Отклонение между значениями ГК не превышает $\pm 0,6$ для ГК2, и не выше $\pm 0,5$ для ГК1 и ГК3. На рис. 8*c* видно, что температура оказывает влияние на распределение значений проекции частотных зависимостей S -параметров в пространстве ГК, при этом наблюдается группа точек в пространстве ГК при температуре от $0^\circ C$ до $20^\circ C$, что говорит о минимальном изменении значений частотных зависимостей S -параметров, а в диапазоне температуры $25-50^\circ C$ они увеличиваются. При этом разница для всех значений не превышает ± 2 для ГК2 и ГК3, а для ГК1 $\pm 1,5$. На рис. 8*d* видно, что проекции частотных зависимостей S -параметров в пространстве ГК изменяются под влиянием температуры, а именно выделяются значения для диапазонов температуры $0-30^\circ C$ и $35-50^\circ C$. При этом разница между значением ГК не превышает $\pm 1,5$ для ГК2 и ± 1 для ГК1 и ГК3. На рис. 8*e* видно, что группируются проекции частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для трех диапазонов температуры: $0-10^\circ C$, $15^\circ C$, $20-50^\circ C$. При этом значения ГК не превышает ± 1 для ГК1 и ГК3, $\pm 1,5$ для ГК2. На рис. 8*f* видно, что группируются проекции частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для трех диапазонов температуры: $0-20^\circ C$, $25-35^\circ C$ и $40-50^\circ C$. При этом значения ГК не превышают $\pm 1,5$ для ГК1 и ГК2, и ± 1 для ГК3. Проекция ГК частотных зависимостей S -параметров, измеренных для раствора $C_{20}H_{21}O_4$, показаны на рис. 9.

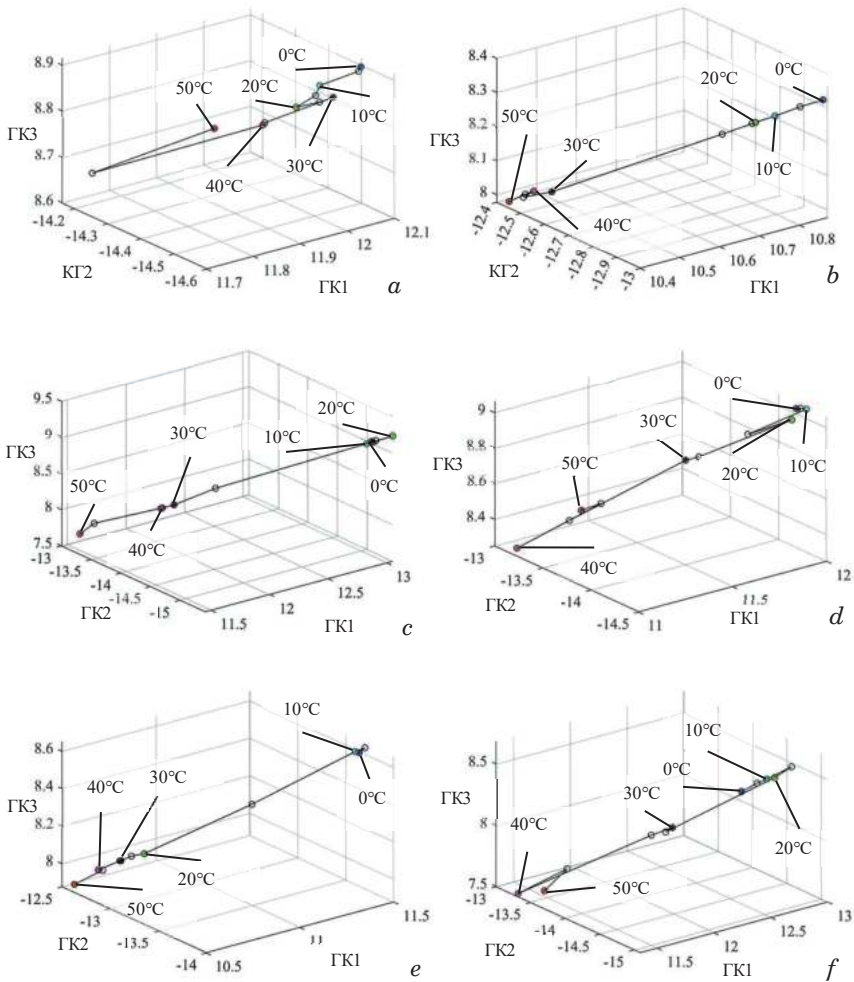


Рис. 8. Проекция частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для коаксиальной камеры с размещенными внутри контейнера жидкостями: H_2O (a); CaCl_2 (b); NaCl (c); $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (d); Na_2SO_4 (e) и «Ессентуки 4» (f)

Fig. 8. Projections of frequency dependences of S -parameters on the PC area for the coaxial cell with the following liquids in the container: H_2O (a), CaCl_2 (b), NaCl (c), $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (d), Na_2SO_4 (e) and “Essentuki 4” (f)

На рис. 9 видно, что проекции частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК не группируются при изменении температуры, а только меняют свое значение по оси ГК 3. Возможно, это связано с тем, что раствор $\text{C}_{20}\text{H}_{21}\text{O}_4$ обладает сложным строением растворенного в нем химического соединения. При этом значения для ГК 2 не превышает $\pm 0,5$, для ГК3 $\pm 0,6$, для ГК1 $\pm 0,8$.

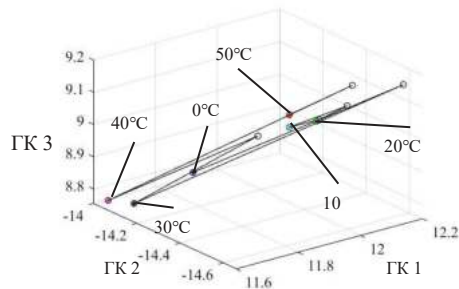


Рис. 9. Проекция частотных зависимостей S -параметров на пространство ГК для коаксиальной камеры с размещенным внутри контейнером с раствором $C_{20}H_{21}O_4$
Fig. 9. Projections of frequency dependences of S -parameters on the PC area for the coaxial cell with $C_{20}H_{21}O_4$ inside in the container

Таким образом, использование МГК дает дополнительную информацию о влиянии температуры на изменение значений частотных зависимостей S -параметров. Анализ распределения точек в пространстве ГК показал, что выделяются четыре группы исследуемых образцов по значениям всех трех ГК. Так, для группы 1 все три $GK \leq 0,5$, для группы 2 $GK \leq 1$, для группы 3 $GK \leq 1,5$ и для группы 4 $GK \leq 2$. К первой группе (со значениями $GK \leq 0,5$) относятся такие объекты, как пустая коаксиальная камера и камера с размещенным внутри пустым пластиковым контейнером, а также контейнером содержащим H_2O . Ко второй группе (со значениями $GK \leq 1$) относятся растворы $CaCl_2$ и $C_{20}H_{21}O_4$. К третьей группе (со значениями $GK \leq 1,5$) относится жидкость «Эссенулки 4» и растворы $C_6H_{12}O_6$ и Na_2SO_4 . К четвертой группе (со значениями $GK \leq 2$) относится единственный раствор $NaCl$, имеющий максимальное отличие в значениях по всем трем ГК. Таким образом, при изучении влияния температуры на растворы и жидкости необходимо учитывать значения всех трех ГК, за счет чего возможно будет оценить электрофизические свойства исследуемых образцов. Отклонение всех трех ГК более чем на 0,5 при анализе электрофизических параметров жидкостей в широком диапазоне температуры позволяет сделать вывод о наличии в них примесей.

Заключение

Выполнены измерения частотных зависимостей S -параметров разных жидкостей в широком диапазоне частот и температуры. Проведен анализ и вычислена разница значений по частоте и амплитуде для S -параметров. Показано, что в диапазоне частот

2–3,5 ГГц разница по частоте максимальна и достигает 0,45 ГГц. В диапазоне частот 6–7 ГГц температура оказывает наибольшее влияние на разницу значений $|S_{21}|$ и составляет 13,5 дБ. При этом в диапазоне частот 7,5–8,5 ГГц изменения по частоте минимальны и не превышают 0,11 ГГц. Это показывает неодинаковое влияние температуры в разных диапазонах частот для исследуемых жидкостей. Использование МГК позволило определить четыре группы объектов, значения которых по трем ГК не превышали заданную величину. Выявлено, что сложное строение химического вещества в растворе приводит к отличающемуся расположению проекций его измеренных частотных зависимостей S -параметров в пространстве ГК в зависимости от температуры. Кроме того, выявлено, что обладающий наименьшей концентрацией вещества раствор NaCl обладает максимальной разницей значений ГК, что позволило сделать вывод о том, что данный раствор наиболее зависим от температуры.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда проект № 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of Russian Science Foundation grant 19-79-10162 in TUSUR University <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

Список литературы / References

1. Guliy O. I., Zaitsev B. D., Smirnov A. V. et al. Sensor for ampicillin based on a microwave electrodynamic resonator. *Biosensors and Bioelectronics*. 2019;130: 95–102. DOI: 10.1016/j.bios.2019.01.030
2. Narang R., Mohammadi S., Ashani M. M. et al. Sensitive, real-time and non-intrusive detection of concentration and growth of pathogenic bacteria using microfluidic–microwave ring resonator biosensor. *Scientific reports*. 2018;8(1):1–10. DOI: 10.1038/s41598-018-34001-w
3. Asghar Qureshi S., Zainal Abidin Z., Majid H. A. et al. Double-Layered metamaterial resonator operating at millimetre wave for detection of dengue virus. *International Journal of Electronics and Communications*. 2022;146:1–9. DOI: 10.1016/j.aee.2022.154134
4. Abduljabar A. A., Hamzah H., Porch A. Multi-resonators, microwave microfluidic sensor for liquid characterization. *Microwave and optical technology letters*. 2021; 63(4):1042–1047. DOI: 10.1002/mop.32675

5. Mason A., Korostynska O., Ortoneda-Pedrola M. A resonant co-planar sensor at microwave frequencies for biomedical applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013;202:170–175. DOI: 10.1016/j.sna.2013.04.015

6. Soprani M., Korostynska O., Amirthalingam A., et al. Real-Time Microwave, Dielectric, and Optical Sensing of Lincomycin and Tylosin Antibiotics in Water: Sensor Fusion for Environmental Safety. *Journal of Sensors*. 2018; Vol.2018:1–11. DOI: 10.1155/2018/7976105

7. Nakouti I., Korostynska O., Mason A. et al. Detection of Pathogenic Bacteria in Aqueous Media: Assessing the Potential of Real-Time Electromagnetic Wave Sensing. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*. 2014;5: 1–6. DOI:10.21307/ijssis-2019-132

8. Frau I., Korostynska O., Mason A. et al. Comparison of Electromagnetic Wave Sensors with Optical and Low frequency Spectroscopy Methods for Real-time Monitoring of Lead Concentrations in Mine Water. *Mine Water and the Environment*. 2018;37:617–624. DOI: 10.1007/s10230-018-0511-7

9. Korostynska O., Mason A., Ortoneda-Pedrola M. et al. Electromagnetic wave sensing of NO₃ and COD concentrations for real-time environmental and industrial monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2014;198:49–54. DOI: 10.1016/j.snb.2014.03.030

10. Abdulkarim Y. I., Deng L., Karaaslan M. et al. Novel Metamaterials-Based Hypersensitized Liquid Sensor Integrating Omega-Shaped Resonator with Microstrip Transmission Line. *Sensors*. 2020;20(943):1–18. DOI:10.3390/s20030943

11. Seungwan K., Harutyun M., Jongchel K. et al. Noninvasive in vitro measurement of pig-blood d-glucose by using a microwave cavity sensor. *Diabetes research and clinical practice*. 2012;96(3):379–384. DOI: 10.1016/j.diabres.2012.01.018

12. Kandwal A., Igbe T., Li J. et al. Highly Sensitive Closed Loop Enclosed Split Ring Biosensor With High Field Confinement for Aqueous and Blood-Glucose Measurements. *Scientific Reports*. 2020;10(4081):1–9. DOI:10.1038/s41598-020-60806-9

13. Cataldo A., Piuze E., Cannazza G. et al. Quality and anti-adulteration control of vegetable oils through microwave dielectric spectroscopy. *Measurement*. 2010;43(8):1031–1039. DOI: 10.1016/j.measurement.2010.02.008

14. Praveen Kumar A. V., Goel A., Ritish Kumar, et al. Dielectric characterization of common edible oils in the higher microwave frequencies using cavity perturbation. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 2019;53:48–56. DOI: 10.1080/08327823.2019.1569899

15. Nevezhin V., Busygina A., Komnatnov M. Analysis of Electrical Parameters of Various Liquids in a Coaxial Cell. *2022 Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information*