

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.868.3

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ СПОСОБОМ**

©2025 г. Е. Б. Атутов^{а,*}, Е. Ю. Коровин^а, Б. З. Гармаев^а,
А. В. Базаров^а, Ю. Б. Башкуев^а

^а *Институт физического материаловедения Сибирского отделения
Российской академии наук*

Россия, 670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

**e-mail: evgeniy_atutov@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2025 г.

После доработки 01.07.2025 г.

Принята к публикации 18.09.2025 г.

В рамках разработки программно-аппаратного комплекса бесконтактного способа определения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей предложена и реализована система автоматизации измерений интерференционного характера поведения модуля коэффициентов отражения в зависимости от толщины исследуемого слоя. Под бесконтактным способом подразумевается, что антенно-фидерные элементы не соприкасаются с исследуемой жидкостью. Представленное техническое решение предназначено для измерений в K_a -диапазоне для диэлектриков со слабым поглощением (не более 0.3). Приведены частотные зависимости модуля коэффициентов отражения трансформаторного и растительного масел в диапазоне 26–40 ГГц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Методы определения комплексных магнитных и диэлектрических проницаемостей веществ условно можно разделить на два типа: контактные [1–4] (когда приемо-передающие пункты непосредственно соприкасаются с веществом) и бесконтактные [5–7]. В целом развитие бесконтактных способов определяется теми случаями, когда нельзя нарушать структуру вещества, определяющую электрофизические свойства, например, при измерении электрофизических параметров почв для целей дистанционного зондирования Земли [8], если существует необходимость получить температурные зависимости, а также в случае работы с химически-активными веществами, что затратно в случае дорогостоящего оборудования.

К существующим техническим решениям по измерению комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей контактным способом относятся радиоспектроскопы компаний Agilent Technologies [9] и Rohde & Schwarz [10]. Авторы работ [11] неоднократно сообщали о высокой цене на эту продукцию и необходимости поиска более доступных решений по измерению комплексной проницаемости жидкостей.

Ранее мы в работах [12, 13] представили бесконтактный способ определения комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей со слабым поглощением. Представленный способ не уступает в точности определения искомых параметров, но в то же время является малозатратным – для проведения измерений достаточно скалярного анализатора цепей или стандартного измерителя коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН). Суть метода заключается в определении вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости из положений максимумов и минимумов интерференционной картины модуля коэффициентов отражения в зависимости от толщины слоя жидкости, заключенной между воздухом и металлом. Затем мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости подбирается до максимального совпадения положений, рассчитанного и измеренного самых глубоких минимумов в интерференционной зависимости модуля коэффициента отражения от толщины слоя.

В приведенных публикациях представлены инструментальные ошибки метода и показано, что более частые измерения толщины слоя значительно расширяют как частотный диапазон, так и интервал значений искомых величин. С другой стороны, частые измерения приводили, прежде всего, к значительным затратам по времени и накоплению ошибок в получаемых данных, что приводило к потребности разработки автоматизации процесса измерений. Целью работы является представление автоматизированного программно-аппаратного комплекса по измерению комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей со слабым поглощением.

2. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Автоматизация измерений заключается в использовании шаговых двигателей для перемещения металлической пластины в слое жидкости, ограничивающей слой диэлектрика, их синхронизации с анализатором цепей с последующей записью результатов измерений модуля коэффициентов отражения в текстовые файлы и вычислением значений комплексной диэлектрической проницаемости. Автоматизация процесса измерения модуля коэффициентов отражения была проведена на платформе виртуального программирования LabView. Связь и обмен данными осуществлялись по протоколу VISA с использованием стандартных библиотек для анализаторов цепей PNA фирмы Agilent Technologies.

Экспериментальная установка изображена на рис. 1. Шаговые двигатели 1 вращают направляющие 2 и задают положение металлической пластины 3. Рупорные антенны 4 излучают и принимают линейно поляризованную электромагнитную волну по нормали к поверхности жидкости, находящейся в стеклянном резервуаре размером $50 \times 50 \times 50 \text{ см}^3$.

Рис. 1.

Валы шаговых двигателей с помощью переходной втулки 5 соединяются с ходовыми винтами 2 с шагом резьбы 2 мм, к которым прикреплена подвижная пластина размерами $255 \times 215 \text{ мм}^2$. Также для придания параллельности перемещению и исключения люфта с каждой стороны параллельно ходовым винтам установлены гладкие направляющие 6, которые перемещаются в подшипниках скольжения 7.

В качестве приводов использовались шаговые двигатели серии 17HS, подключенные к контроллеру ТВ6600. Цифровые входы контроллера (Ena, Dir, Pul) подключены к цифровым портам 5, 6, 7 платформы Arduino Nano, концевые выключатели SP138 подключены к цифровым входам 3 и 4 (рис. 2). Платформа Arduino Nano, в свою очередь, подключена к компьютеру через провод mini-USB – USB-A.

Рис. 2.

Во время измерений было установлено, что оптимальное время задержки между включениями шагового двигателя составляет 1 мс. Меньшая задержка приводила к тому, что двигатель пропускал некоторые шаги и присутствовала неточность установки угла поворота, это можно было наблюдать по отметкам на втулке 5, соединяющей ротор шагового двигателя с ходовым винтом. Большая задержка приводила к видимым рывкам при вращении.

В разработанном аппаратно-программном комплексе СВЧ-мощность от векторного анализатора цепей PNA-X N5247A фирмы Agilent Technologies [14], использованного в режиме скалярного анализатора, посредством высокочастотных кабельных сборок и волноводно-коаксиальных переходов ПКВ1А-14 [15] подается на антенны, расположенные на расстоянии 7.5 см от поверхности жидкости.

На рис. 3 представлены размеры изготовленных рупорных антенн в миллиметрах и результаты моделирования КСВН в CST STUDIO. Видно, что в рабочей полосе частот КСВН не превышает 1.3, что свидетельствует о хорошем согласовании антенны.

Рис. 3.

Для оценки влияния дифракционных эффектов на краях металлической пластины проведено моделирование диаграммы направленности антенны на максимальном расстоянии 30 см в крайних частотных точках стандарта WR-22. Результаты представлены на рис. 4.

Рис. 4.

На рисунке видно, что на выбранном расстоянии пластина полностью перекрывает диаграмму направленности. Таким образом, выбранные геометрические размеры могут быть применены в данной конструкции.

На рис. 5 представлен интерфейс пользователя программы в среде LabView для настройки количества проводимых измерений, времени задержки после движения, шага изменения толщины слоя жидкости и направления движения. Также здесь расположены кнопки для быстрого перемещения пластины и для проведения измерений в ручном режиме с использованием иных анализаторов цепей.

Рис. 5.

3. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ Тестируемых жидкостей

Результаты измерений модуля коэффициента отражения для трансформаторного (марка ВК II А) и растительного масел с помощью разработанной установки представлены на рис. 6 и 7. Графики построены по 2492 значениям частоты облучающей волны и 455 значениям положений металлической пластины.

Рис. 6.

Рис. 7.

Полученные результаты устанавливают функциональную связь частотной зависимости модуля коэффициентов отражения, которые имеют интерференционный характер. Видно эквидистантное положение максимумов и минимумов при фиксированной частоте излучения в зависимости от положения пластины. Кроме того, на графике для растительного масла с увеличением толщины слоя наблюдается появление глубокого минимума, что свидетельствует о поглощающей способности выбранной жидкости.

Способ определения вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости основан на алгоритме поиска минимумов модуля коэффициентов отражения в зависимости от толщины слоя жидкости. Разность положений толщины слоя при минимумах

модуля коэффициента отражения позволяет определить вещественную часть комплексной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_2' = \left(-\frac{c}{2f(d_{\min 1} - d_{\min 2})} \right)^2, \quad (1)$$

где c – скорость света, f – частота облучающего поля, $d_{\min 1}$ и $d_{\min 2}$ – толщины слоев, при которых наблюдаются рядом стоящие минимумы, количество которых зависит от толщины слоя исследуемой жидкости.

Подставляя полученное по формуле (1) значение вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости ε_2' в формулу коэффициента отражения для трех слоев [16],

$$V^2 = \left[\frac{V_{12} + V_{23} \exp(-2ik_2d)}{1 + V_{12}V_{23} \exp(-2ik_2d)} \right]^2, \quad (2)$$

путем совмещения до максимального совпадения расчетного положения самого глубокого минимума с экспериментальным, определяем теперь уже мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости. Здесь

$$V_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}, \quad V_{23} = \frac{k_2 - k_3}{k_2 + k_3}$$

– коэффициенты отражения от границ “воздух-жидкость” и “жидкость-металл” соответственно,

$$k_1 = \frac{\omega}{c}, \quad k_2 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_2' - i\varepsilon_2''}, \quad k_3 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_3}$$

– волновые числа в средах, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, ε_3 – комплексная диэлектрическая проницаемость металлической пластины, определяемая по формуле Друде, d – толщина зондируемого слоя, i – мнимая единица.

Для примера расчета комплексной диэлектрической проницаемости растительного масла по формулам (1) и (2) на рис. 8 приведен результат сравнения экспериментальной и расчетной зависимостей модуля коэффициента отражения на частоте 40 ГГц.

Рис. 8.

Физическая интерпретация представленной зависимости тривиальна. Когда металлическая пластина находится на поверхности жидкости, падающая волна полностью отражается от нее, и коэффициент отражения равен единице. Затем с погружением пластины в жидкость мы наблюдаем результат наложения двух волн: падающей волны и волны, которая движется от верхней границы жидкости к пластине и обратно. Вследствие изменения расстояния, пройденного волной во второй среде, ее фаза изменяется и принимает всевозможные значения. В результате мы наблюдаем как максимумы, так и минимумы, которые, в общем, и определяют осциллирующее поведение модуля коэффициента отражения.

При глубине пластины, равной 30.5625 мм, амплитуды волн становятся сравнимыми и наблюдается самый глубокий минимум интерференционной картины. С дальнейшим увеличением толщины слоя прошедшая волна ослабевает, и мы наблюдаем затухание осцилляций, которые должны свестись к уровню отражения от полубесконечного пространства, состоящего из исследуемой жидкости.

В расчетах было положено $\epsilon_2 = 2.41 - i 0.089$. Вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости является результатом усреднения по 33 значениям, определяемых по расстояниям между соседними минимумами.

Количество минимумов в интерференционной картине определяется действительной частью диэлектрической проницаемости, длиной волны и толщиной слоя. Для выбранных жидкостей может быть найдено от 11 (на частоте 26.5 ГГц) до 34 минимумов (на частоте 40 ГГц). Полученные ансамбли значений диэлектрической проницаемости для каждой частотной точки позволяют установить, что среднеквадратичное отклонение не превышает 8% для растительного масла и 19% для трансформаторного масла.

Для увеличения точности количество измерений для слоев разной толщины необходимо увеличивать, т.е. данных может стать еще больше. Ручной сбор и обработка данных при таких объемах трудоемки, поэтому процессы измерений и вычисления комплексной диэлектрической проницаемости автоматизированы с помощью программы управления системой измерений в среде LabView и программы обработки сигналов в среде MatLab.

Частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости тестируемых жидкостей представлены на рис. 9.

Рис. 9.

Определить мнимую часть диэлектрической проницаемости трансформаторного масла не удалось ввиду отсутствия глубокого минимума и тенденции его появления в коэффициенте отражения (рис. 6).

Скачкообразное поведение мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости растительного масла в первой половине частотного диапазона обусловлено неоднозначностью определения самого глубокого минимума в интерференционной картине. Рост инструментальной погрешности с возрастанием проводимости вещества подробно описан в работе [13].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлен программно-аппаратный комплекс по измерению комплексной диэлектрической проницаемости жидкостей. Найденные с его помощью данные

диэлектрической проницаемости тестовых веществ хорошо согласуются с результатами, полученными с помощью метода открытого волновода и опубликованными нами в работах [12, 17, 18].

Представленный способ обладает как преимуществами, так и недостатками: способ малоприменим при изучении сред с большим поглощением (более 0.3), в данной конфигурации из-за используемых антенно-фидерных элементов способ ограничен K_a -диапазоном (26–40 ГГц). Тем не менее этот метод может оказаться весьма полезным в нескольких ситуациях, а именно: в случае малости мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости; при ограниченном бюджете на исследования; тогда, когда необходимо исследовать химически активные вещества или температурные зависимости жидкостей (например, при изучении свойств нефтяных флюидов, или в создании влагомеров товарной нефти, так как в рассматриваемом диапазоне значения комплексной диэлектрической проницаемости нефтяных фракций и воды значительно отличаются друг от друга).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gómez E.S.H., Olvera-Cervantes J.L., Vásquez B.C., Chávez A.C., Flores L.S.P., Kataria T.K.* // J. Microwave Power Electromagn. Energy. 2020. V. 54. № 1. P. 52. <https://doi.org/10.1080/08327823.2020.1714106>
2. *Wiltshire B.D., Zarifi T., Zarifi M.H.* // IEEE Sensors Journal. 2020. V. 20. № 4. P. 1904. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2950912>
3. *Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan V.K.* Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. John Wiley & Sons, 2004. <http://dx.doi.org/10.1002/0470020466>
4. *Дмитриев М.С., Дьяконов М.В., Гучкин А.С, Краснокутский Р.А.* // ПТЭ. 2018. № 3. С.51. <https://doi.org/10.7868/S0032816218030229>
5. *Weiss M., Knochel R.* // IEEE Trans Instrum. Meas. 2003. V. 49. № 3. P. 488. <https://doi.org/10.1109/19.850381>
6. *Баикуев Ю.Б.* Электрические свойства природных слоистых сред. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1996.
7. *Golden K.M., Cheney M., Ding Kung-Hau et al.* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1998. V. 36. № 5. P. 1655. <https://doi.org/10.1109/36.718637>
8. *Mironov V.L., Karavayskiy A.Y., Lukin Y.I., Molostov I.P.* // Int. J. Remote Sens. 2020. V. 41. № 10. P. 3845. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1708506>

9. Dielectric Probe Kit.
<https://www.keysight.com/ru/ru/product/85070E/dielectric-probe-kit.html>
10. Measurement of Dielectric Material Properties. Application Note. Rohde & Schwarz. 2012.
https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/00aps_undefined/RAC-0607-0019_1_5E.pdf
11. *Piuzzi E., Merla C., Cannazza G. et al.* // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2013. V. 62. № 5. P. 1034. <https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2236791>
12. *Атутов Е.Б., Гармаев Б.З., Коровин Е.Ю., Басанов Б.В., Базаров А.В., Цыдыпов Б.Г.* // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 8–9. С. 650.
<https://doi.org/10.1007/s11141-022-10167-2>
13. *Коровин Е.Ю., Гармаев Б.З., Базаров А.В., Базарова А.С., Атутов Е.Б.* // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 12. С. 129. <https://doi.org/10.18127/j00338486-202312-14>
14. Keysight 2-Port and 4-Port PNA-X Network Analyzer. URL:
<https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-04525/technical-specifications/9018-04525.pdf>
15. Переходы коаксиально-волноводные.
https://www.micran.ru/productions/IIS/accessory/KW_connectors/kw_connectors/
16. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. Москва: Наука, 1973.
17. *Basanov B., Bazarov A., Bazarova A., Garmaev B., Korovin E., Atutov E.* // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Tomsk. 2022. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/SIBCON56144.2022.10002959>.
18. *Атутов Е. Б., Коровин Е.Ю., Гармаев Б. З., Басанов Б. В., Базаров А. В., Башкуев Ю.Б.* РФ Патент 2766059, 2023.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 – шаговые двигатели, 2 – ходовые винты, 3 – металлическая пластина, 4 – рупорные антенны, 5 – втулка, соединяющая ротор шагового двигателя с ходовым винтом, 6 – дополнительные направляющие, 7 – подшипники скольжения.
- Рис. 2.** Схема подключения Arduino Nano, контроллера ТВ6600, концевого выключателя SP138 и шаговых двигателей серии 17HS.
- Рис. 3.** Модель и результаты моделирования КСВН для разработанной антенны.
- Рис. 4.** Диаграмма направленности, спроецированная на плоскость металлической пластины при частотах 26ГГц (а) и 40ГГц (б).
- Рис. 5.** Пользовательский интерфейс.
- Рис. 6.** Частотная зависимость коэффициентов отражения трансформаторного масла.
- Рис. 7.** Частотная зависимость коэффициентов отражения растительного масла.
- Рис. 8.** Зависимость коэффициента отражения от глубины погружения металлической пластины в растительное масло для частоты 40ГГц.
- Рис. 9.** Дисперсионные свойства тестируемых жидкостей.

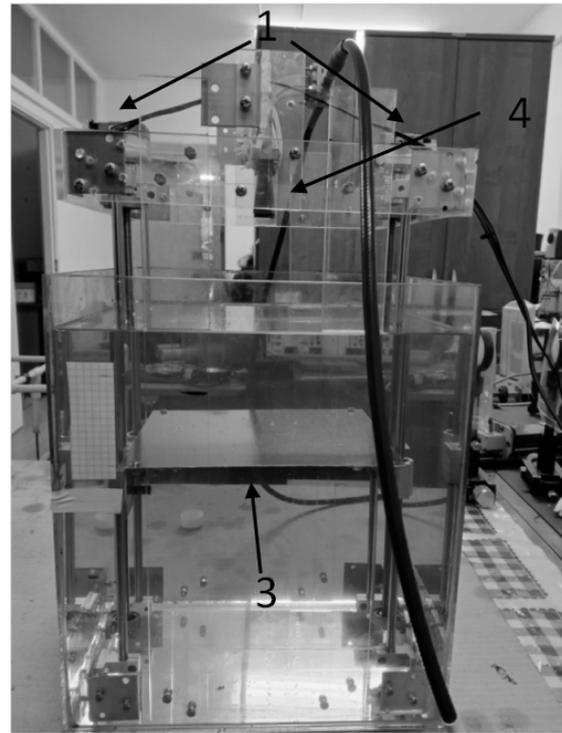
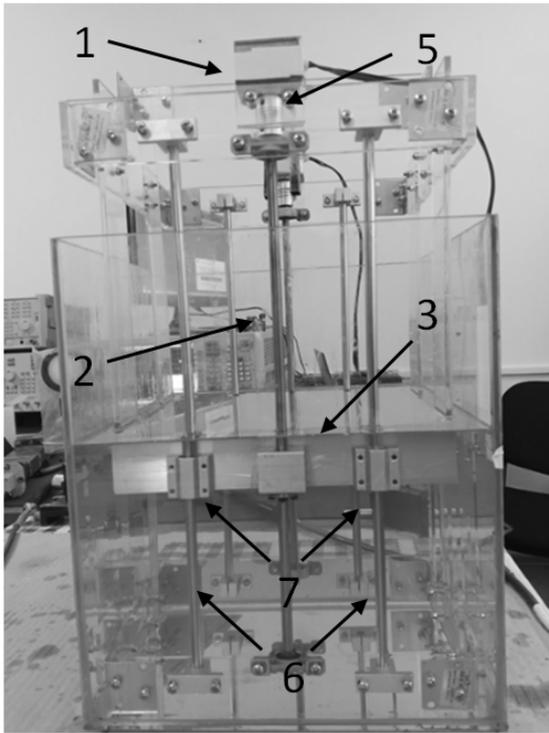


Рис. 1.

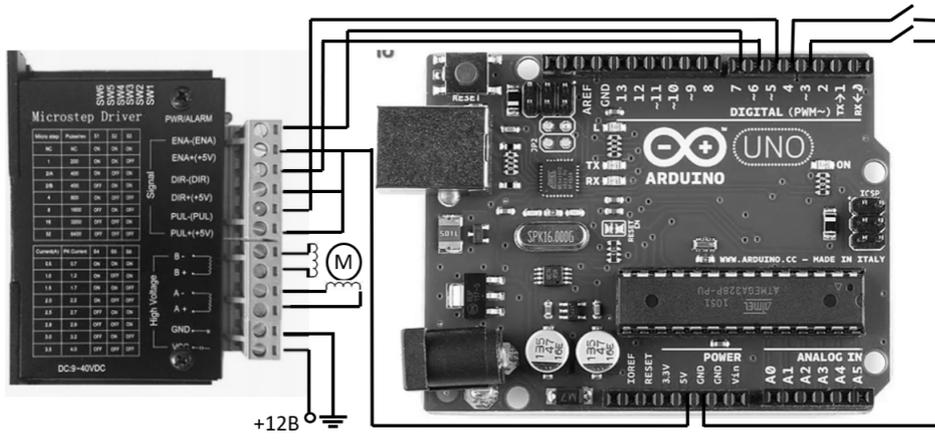


Рис. 2.

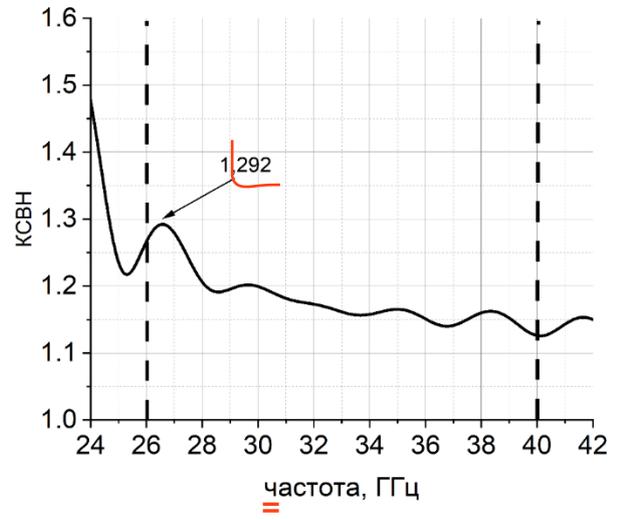
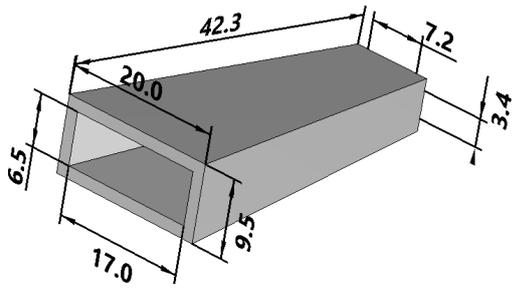


Рис.3

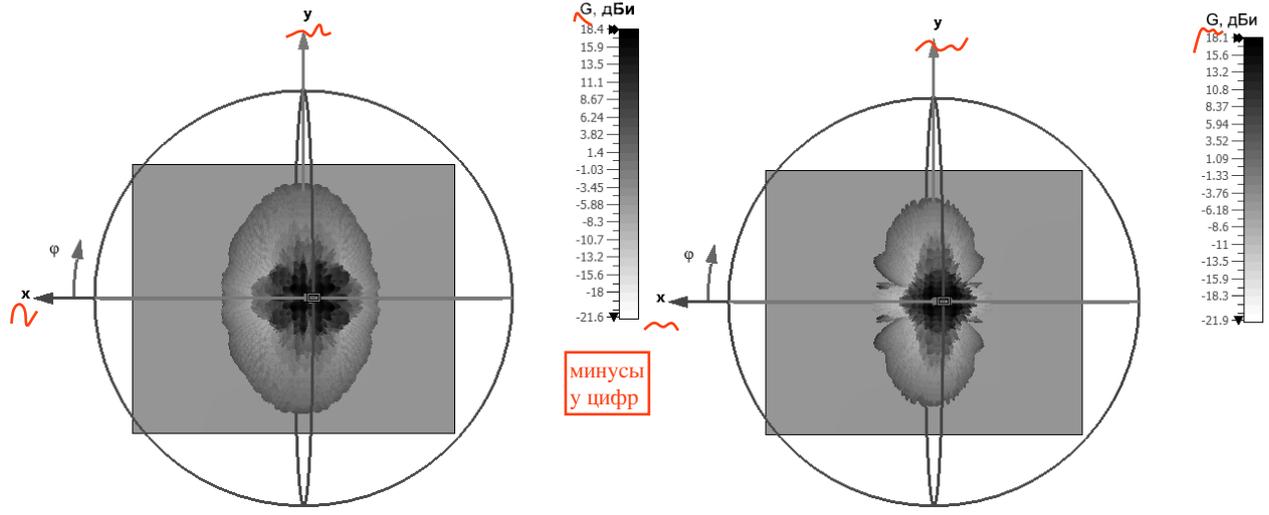


Рис. 4.

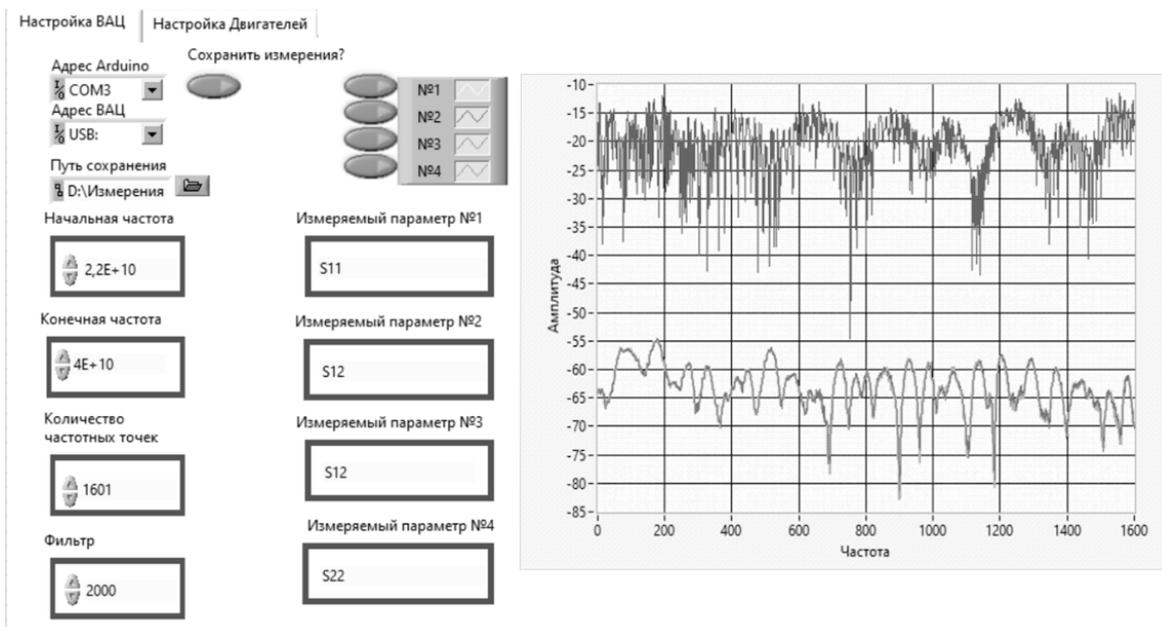


Рис. 5.

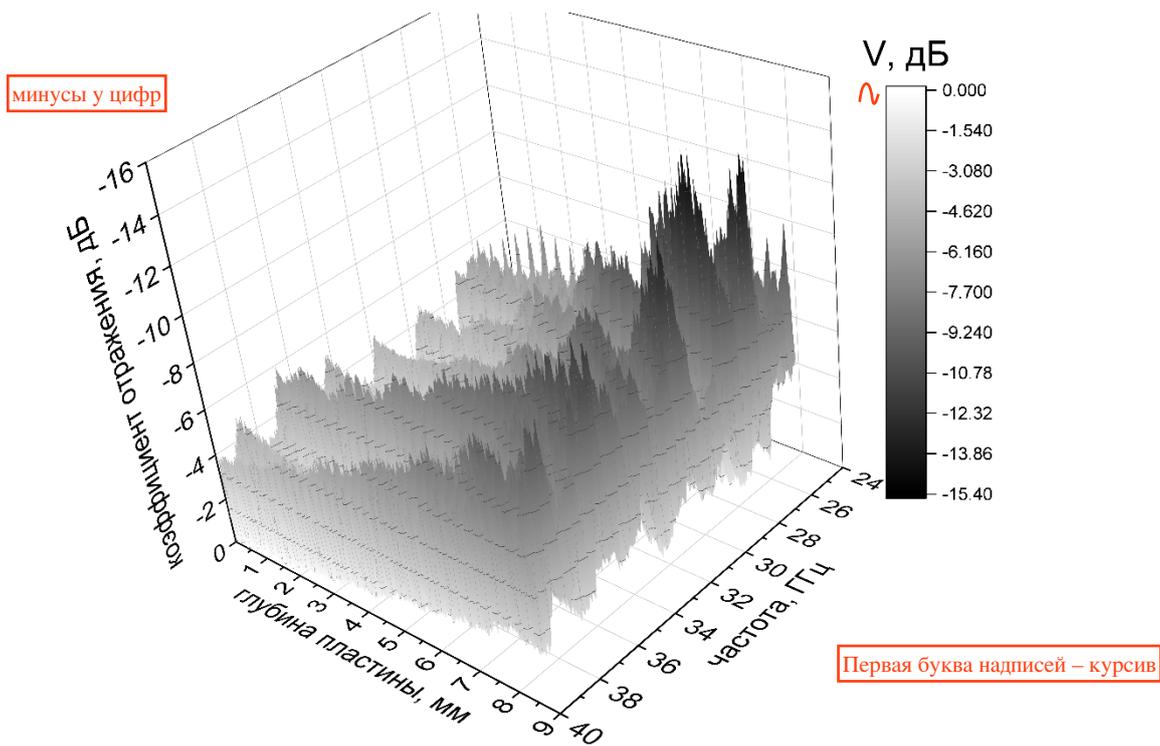


Рис.6

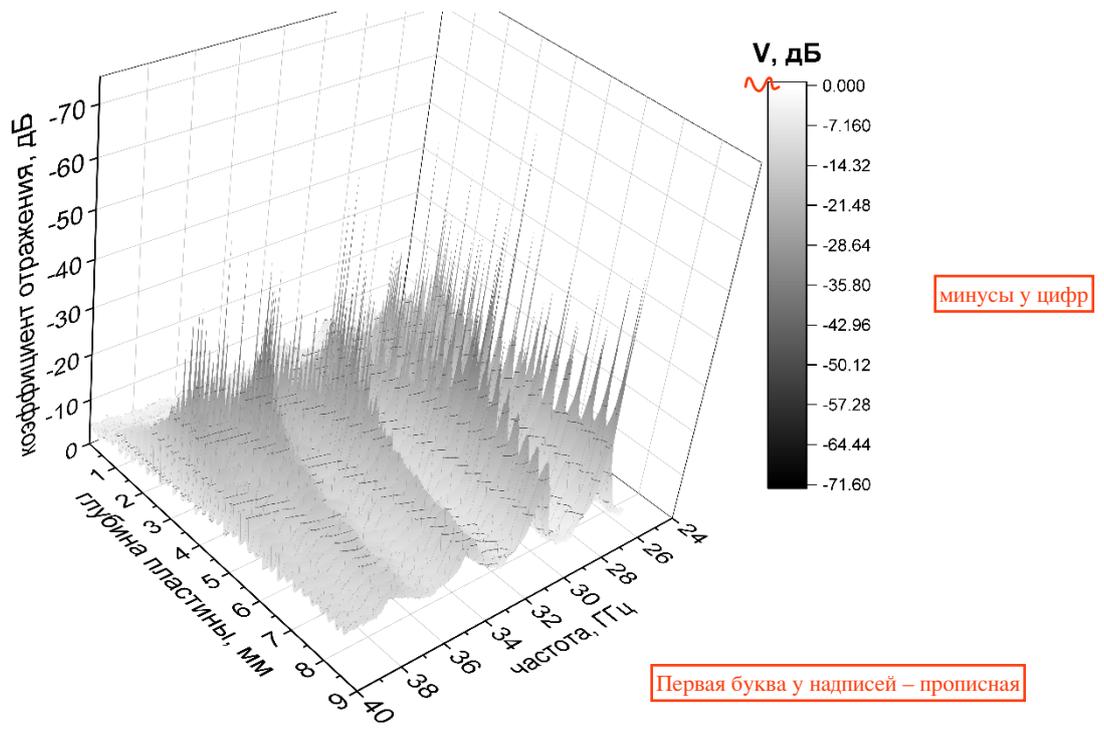


Рис. 7

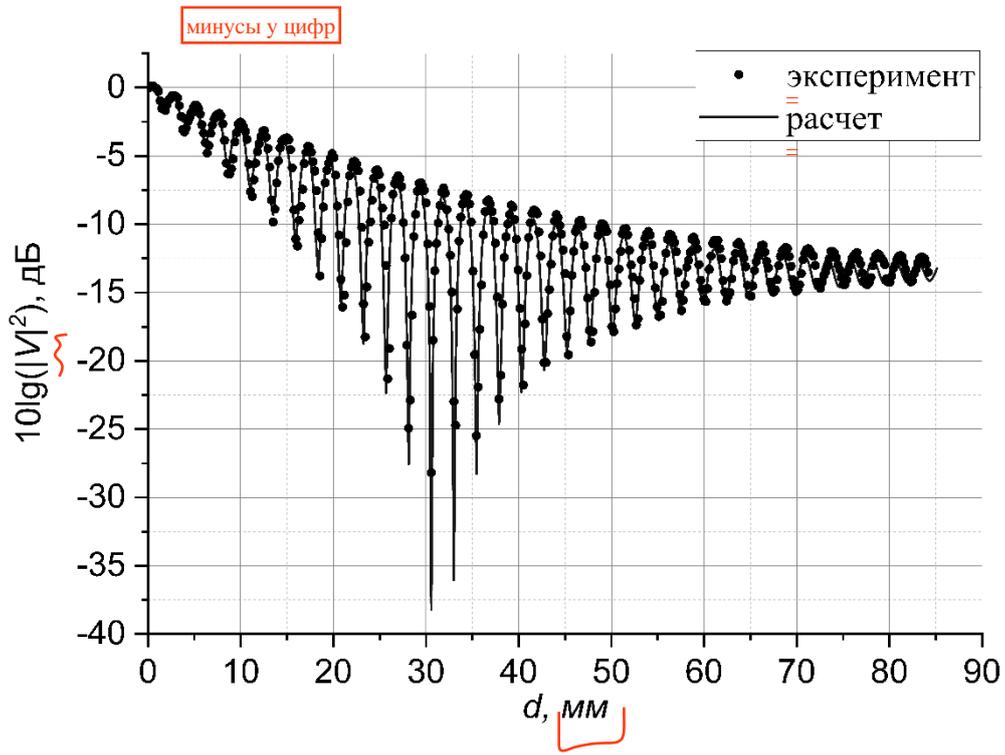


Рис. 8.

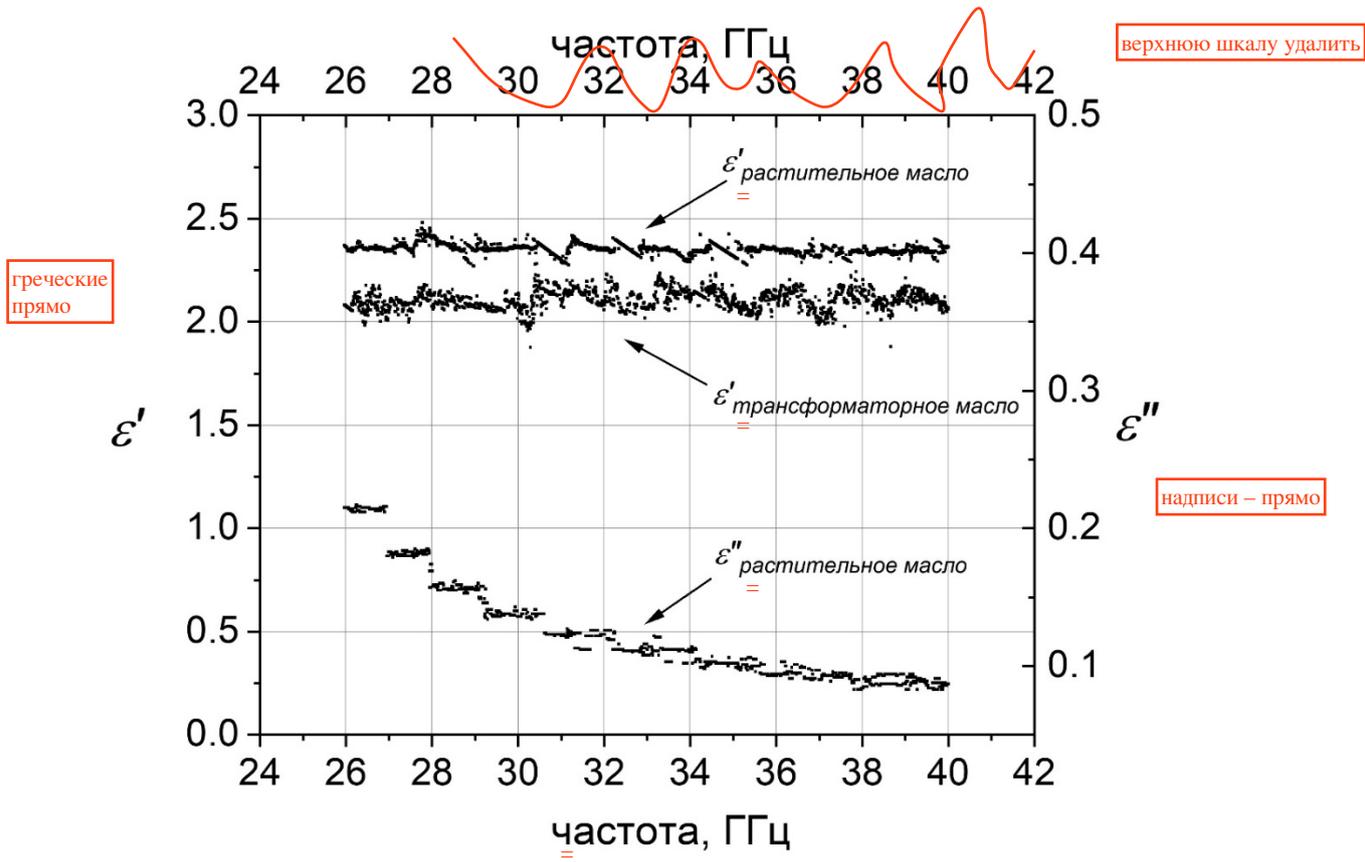


Рис. 9.