

Повышение чувствительности резонансного датчика для измерения диэлектрической проницаемости посредством подключения отрицательной ёмкости

Ю.Д. Сафонов, А.Д. Леонтьев, Д.В. Холодняк

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: Показана возможность увеличения чувствительности резонансного датчика для измерения относительной диэлектрической проницаемости, представляющего собой последовательный колебательный контур на квазисосредоточенных элементах, резонансная частота которого изменяется в зависимости от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, заполняющей канал между обкладками конденсатора. Последовательное подключение к датчику нефостеровской отрицательной ёмкости приводит к увеличению крутизны зависимости резонансной частоты от диэлектрической проницаемости, т. е. повышает чувствительность датчика, что важно для повышения точности идентификации жидкостей с высокими значениями диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: резонансный датчик, диэлектрическая проницаемость, отрицательная ёмкость.

1. Введение

Резонансные методы измерения диэлектрической проницаемости материалов получили распространение благодаря высокой точности, возможности проводить измерения на высоких частотах и использовать для этого образцы небольших размеров. В мегагерцовом диапазоне для измерения диэлектрической проницаемости резонаторным методом используют колебательные контуры на квазисосредоточенных элементах. Измеряемый образец помещается между обкладками конденсатора, ёмкость которого при этом изменяется, что, в свою очередь, приводит к смещению резонансной частоты контура, позволяющему судить о значении диэлектрической проницаемости образца.

Резонансные методы пригодны для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей, что необходимо при проведении медицинских и биологических исследований, в фармацевтике, химии, в области охраны окружающей среды и т. п. В [1] представлен микрофлюидный резонансный датчик для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей. Выполненный по многослойной керамической технологии (LTCC) датчик использует конденсатор, между обкладками которого располагается встроенный канал для прокачки исследуемой жидкости. При изменении относительной диэлектрической проницаемости жидкости от 3 до 80 резонансная частота контура изменялась со 134,2 МГц до 75,5 МГц. Данный датчик использовался для идентификации различных органических жидкостей и определения концентрации глюкозы в водном растворе [1]. Недостатком такого датчика является тот факт, что в области высоких значений диэлектрической проницаемости чувствительность датчика заметно снижается, т.к. значительному изменению диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости соответствует относительно небольшой сдвиг резонансной частоты, в результате чего в измерениях присутствует большая неопределённость.

В настоящей работе с целью повышения чувствительности резонансного датчика для измерения диэлектрической проницаемости предлагается использовать нефостеровскую цепь, реализующую отрицательную ёмкость, которая включается последовательно с конденсатором датчика. Приведены результаты разработки и моделирования

характеристик резонансного датчика, работающего в гигагерцовом диапазоне. Показано, что применение нефостеровской отрицательной ёмкости позволяет повысить чувствительность датчика в области высоких значений относительной диэлектрической проницаемости.

2. Датчик для измерения диэлектрической проницаемости жидкостей

Рассматриваемый датчик для измерения диэлектрической проницаемости представляет собой последовательный колебательный контур, включенный параллельно в линию передачи с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом (рисунок 1, а). Для повышения чувствительности датчика последовательно с контуром включается нефостеровская отрицательная ёмкость, реализуемая при помощи конвертора отрицательного импеданса (КОИ) – активной цепи, которая преобразует импеданс нагрузки во входной импеданс противоположного знака [2].

Модельное представление резонансного LC-контура на квазисосредоточенных элементах, которое использовалось для численного электродинамического моделирования характеристик датчика при различных значениях диэлектрической проницаемости жидкости, заполняющей пространство между обкладками конденсатора, приведено на рисунке 1, б. Резонансная структура выполнена на двух подложках из материала Arlon AD255C с параметрами $\epsilon_r = 2,55$, $\text{tg}(\delta) = 0,0013$, $h = 1,524$ мм. На одной подложке размещены верхняя обкладка конденсатора с размером стороны $a = 6,5$ мм и меандрирующая индуктивность. Заземлённый экран микрополосковой структуры, который также является нижней обкладкой конденсатора выполнен в слое металлизации другой подложки. Канал для протекания исследуемой жидкости, который имеет ширину $w = 1,6$ мм, высоту 1 мм и занимает 70% площади конденсатора, сформирован при помощи выборки в диэлектрике первой подложки.

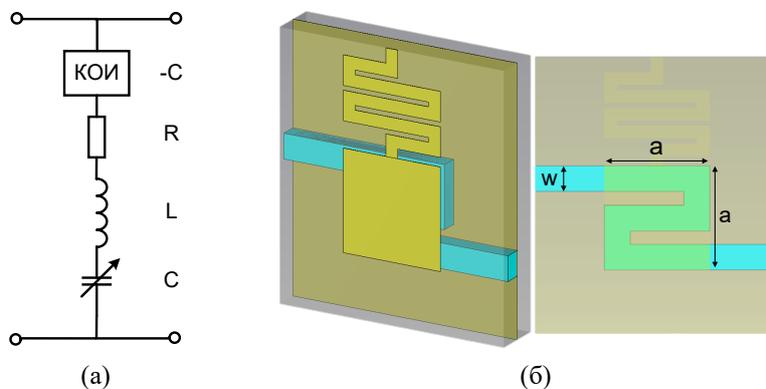


Рисунок 1. Датчик для измерения диэлектрической проницаемости жидкости: (а) – эквивалентная схема; (б) – модельное представление резонансного контура датчика с каналом для исследуемой жидкости между обкладок конденсатора.

Эффективная диэлектрическая проницаемость заполнения конденсатора находится методом, описанным в [1], [3]. При относительной диэлектрической проницаемости заполнения канала, лежащей в пределах от 1 до 80, эффективная диэлектрическая проницаемость конденсатора принимает значения от 1,8 до 5,2. В отсутствие отрицательной ёмкости, при воздушном заполнении канала, ёмкость конденсатора датчика составляет 1 пФ.

При увеличении диэлектрической проницаемости заполнения ёмкость конденсатора изменяется от 1 до 2,56 пФ (рисунок 2, а), что приводит к сдвигу резонансной частоты контура с 1,76 до 1,09 ГГц (рисунок 2, б). Для настройки контура на верхнюю резонансную частоту значение индуктивности составило $L_0 = 5,8$ нГн. На резонансной

частоте входное сопротивление контура стремится к нулю, в результате чего вся входная мощность отражается. В передаточной характеристике датчика на резонансной частоте имеет место минимум, по смещению которого относительно исходного положения можно судить об изменении ёмкости конденсатора, и следовательно, об изменении диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости. Изменение добротности контура, в свою очередь, позволяет судить о тангенсе угла диэлектрических потерь жидкости. Для упрощения при проведении моделирования характеристик датчика изменялось только значение диэлектрической проницаемости заполнения канала, в то время как тангенс угла потерь оставался равным 0,002. В эквивалентной схеме датчика (рисунок 1, а) суммарные потери в проводящих и диэлектрических материалах описываются сопротивлением $R = 5$ Ом. Характеристики датчика до подключения отрицательной ёмкости представлены на рисунке 2 штриховыми линиями.

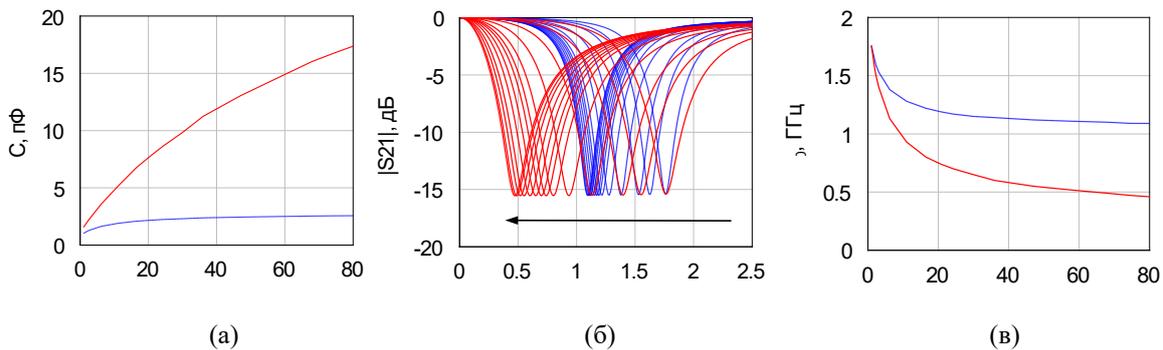


Рисунок 2. Характеристики датчика до подключения отрицательной ёмкости (штриховые линии) и после (сплошные линии): (а) – зависимость ёмкости конденсатора от диэлектрической проницаемости заполнения канала; (б) – спектр резонансных частот; (в) – зависимость резонансной частоты от диэлектрической проницаемости.

В [4] показано, что диапазон перестройки резонансной частоты последовательного колебательного контура с переменным конденсатором может быть существенно расширен путем подключения отрицательной ёмкости. Применительно к датчику, расширение диапазона перестройки резонансной частоты при фиксированном диапазоне изменения диэлектрической проницаемости означает увеличение крутизны зависимости $f_0 = f(\epsilon_r)$, показанной на рисунке 2, в, которая определяет чувствительность датчика.

Подключаемая отрицательная ёмкость C_n по абсолютной величине должна быть близка к максимальной ёмкости конденсатора $C(\epsilon_{r,max})$, но превосходить её, чтобы результирующая ёмкость для всех состояний датчика оставалась положительной:

$$C'(\epsilon_r) = \frac{C(\epsilon_r)C_n}{C(\epsilon_r) + C_n}. \quad (1)$$

Для рассматриваемого датчика отрицательная ёмкость выбрана равной -3 пФ.

При последовательном подключении к датчику такой отрицательной ёмкости, его результирующая ёмкость $C'(\epsilon_r)$ принимает значения $1,53 \dots 17,37$ пФ. Для настройки датчика с отрицательной ёмкостью на ту же верхнюю резонансную частоту, что и до подключения отрицательной ёмкости, использовалась индуктивность 3 нГн. Характеристики датчика после подключения идеальной отрицательной ёмкости представлены на рисунке 2 сплошными линиями.

Чувствительность датчика, $K = df_0/d\epsilon_r$, показывает на сколько изменяется резонансная частота при изменении относительной диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости на единицу. Чем выше чувствительность, тем больше расстояние между соседними резонансными частотами, и тем точнее можно различить жидкости

с различной диэлектрической проницаемостью. Повышение чувствительности датчика при подключении отрицательной ёмкости иллюстрирует рисунок 3, а. До её подключения максимальная чувствительность составляла 72,30 МГц (при $\varepsilon_r = 1$), а минимальная – 0,12 МГц (при $\varepsilon_r = 80$). После подключения отрицательной ёмкости чувствительность возросла до 109,25 МГц (при $\varepsilon_r = 1$) и 0,21 МГц (при $\varepsilon_r = 80$), соответственно.

На рисунке 3, б показано относительное изменение чувствительности:

$$\left| \frac{\Delta K}{K} \right| = \left| \frac{K'(\varepsilon_r) - K(\varepsilon_r)}{K(\varepsilon_r)} \right| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $K'(\varepsilon_r)$ – чувствительность датчика после подключения отрицательной ёмкости, $K(\varepsilon_r)$ – чувствительность датчика до её подключения. Изменение чувствительности составило от 50 до 75 %. Наибольшее изменение чувствительности (>70 %) имеет место в области высоких значений относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon_r > 20$).

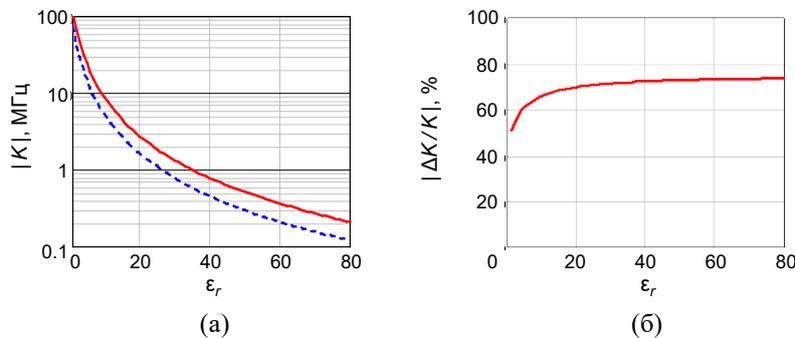


Рисунок 3. Чувствительность датчика для измерения диэлектрической проницаемости: (а) – абсолютная чувствительность до подключения отрицательной ёмкости (штриховые линии) и после (сплошные линии); (б) – относительное изменение чувствительности.

3. Реализация отрицательной ёмкости

Для реализации отрицательной ёмкости –3 пФ с малым отклонением в диапазоне изменения резонансных частот датчика (0,46...1,76 ГГц) был разработан КОИ на биполярных транзисторах Infineon BFR840L3RHESD (рисунке 4, а). Назначение отдельных элементов схемы и аспекты проектирования КОИ подробно рассмотрены в [2]. Требуемое значение отрицательной ёмкости реализуется в полосе частот 0,2...2 ГГц с точностью $\pm 3\%$ (рисунке 4, б и в) при следующих параметрах цепи КОИ: $C_n = 4,2$ пФ, $R_n = 18$ Ом, $L_n = 0,6$ нГн, $R_{ст} = 40$ Ом, $U = 40$ В, $R = 4,3$ кОм, $C = 10$ нФ.

Характеристики датчика при подключении отрицательной ёмкости на основе КОИ представлены на рисунке 5 в сравнении со случаем идеальной отрицательной ёмкости. Во всём диапазоне изменения диэлектрической проницаемости заполнения канала ($\varepsilon_r = 1...80$) спектр резонансных частот (рисунке 5, а) и зависимость резонансной частоты от диэлектрической проницаемости (рисунке 5, б) для обоих случаев совпадают. Это позволяет сделать вывод о том, что чувствительность датчика с отрицательной ёмкостью на основе КОИ возрастает так же, как и при подключении идеальной отрицательной ёмкости (рисунке 3).

Анализ устойчивости датчика с отрицательной ёмкостью на основе КОИ по критерию нормированной детерминантной функции (НДФ) [5] показал, устойчивое поведение датчика во всём диапазоне рассматриваемых значений диэлектрической проницаемости, поскольку изменение фазы НДФ не превышает 360 градусов (рисунке 5 в).

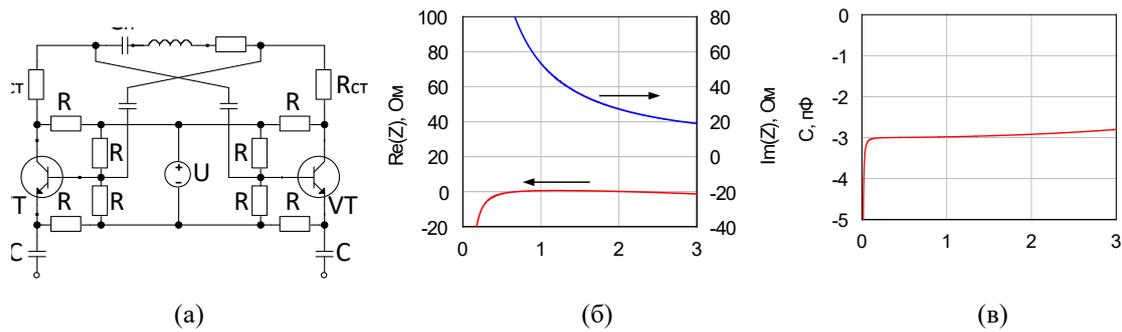


Рисунок 4. Отрицательная ёмкость на основе КОИ: (а) – эквивалентная схема; (б) – зависимость входного импеданса от частоты; (в) – зависимость отрицательной ёмкости от частоты.

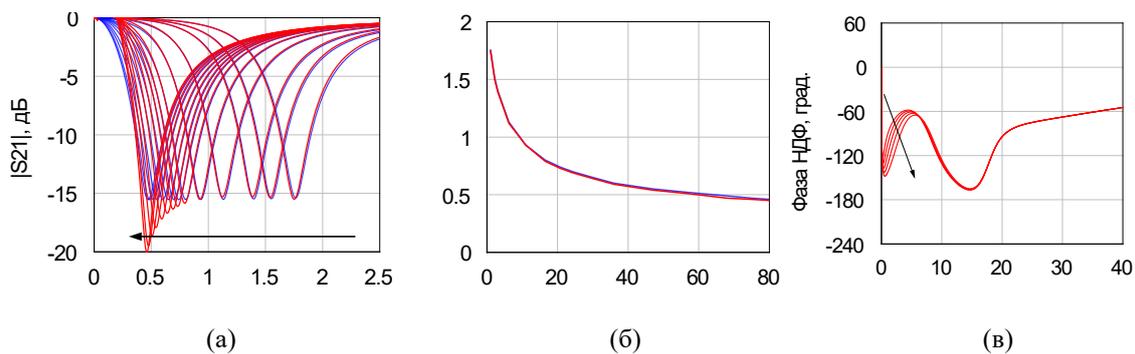


Рисунок 5. Характеристики датчика при подключения идеальной отрицательной ёмкости (штриховые линии) и отрицательной ёмкости на основе КОИ (сплошные линии): (а) – спектр резонансных частот; (б) – зависимость резонансной частоты от диэлектрической проницаемости; (в) – фаза нормированной детерминантной функции.

5. Заключение

Чувствительность резонансного датчика для измерения диэлектрической проницаемости повышается при последовательном подключении отрицательной ёмкости, реализуемой в виде КОИ. Наибольшее увеличение чувствительности имеет место в области высоких значений относительной диэлектрической проницаемости, что позволяет устранить недостаток датчика, не использующего отрицательную ёмкость, и точнее различать жидкости с разными значениями диэлектрической проницаемости.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-00991, <https://rscf.ru/project/23-29-00991/>.

Список литературы

1. Liang Y. et al. An LC wireless microfluidic sensor based on low temperature co-fired ceramic (LTCC) technology // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – N. 5. – P. 1189 (1-11).
2. Buiantuev, B., Kalmykov, N., Kholodnyak, D., Brizic, A., Vincelj, L., Hrabar, S. Physically oriented design of negative capacitors based on Linvill's floating impedance converter // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2021. – V. 70. – N. 1. – P. 139-154.
3. Bergman D. J. The dielectric constant of a composite material—a problem in classical physics // *Physics Reports*. – 1978. – V. 43. – N. 9. – P. 377-407.
4. Leontyev A., Kalmykov N., Kholodnyak D. Varactor Diode Tunability Enhancement by Means of a Non-Foster Negative Capacitor on Linvill's NIC // *2023 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT)*. – IEEE, 2023. – P. 70-72.
5. Jimenez-Martin J. L. et al. Full conditions for the stability analysis of negative impedance converters // *6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. – IEEE, 2012. – P. 135-138.