

Особенности и методы измерения электрических характеристик жидких диэлектриков

С. Ю. Красных¹, В. Т. Куанышев¹, Н. М. Барбин^{1,2}

¹Уральский технический институт связи и телекоммуникации

²Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России

Аннотация: В данной работе представлен обзор наиболее распространённых способов и методов измерений диэлектрической проницаемости для исследования жидких диэлектриков. Выделены достоинства и недостатки данных направлений. Рассмотрены факторы, которые необходимо учесть при выполнении исследования, и способы уменьшения их влияния. На основе анализа предложена конструкция ячейки и способ выполнения измерения.

Ключевые слова: комплексная диэлектрическая проницаемость, жидкие диэлектрики, кондуктометрия, диэлектрометрия, импедансометрия, методы измерения.

Для цитирования: Красных С. Ю., Барбин Н. М., Куанышев В. Т., Особенности и методы измерения электрических характеристик жидких диэлектриков // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 19, № 2. С. 10–24. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-10-24>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Красных С. Ю., Барбин Н. М.,
Куанышев В. Т., 2025

Статья поступила в редакцию 06.07.2024;
принята к публикации 14.10.2024.

1. Введение

При относительно нормальных условиях (температура в пределах от 0 до 70 °С и давление порядка 10^5 Па) некоторые вещества находятся в жидком агрегатном состоянии, т. е. могут принимать любую форму при постоянстве объема.

Примерами жидкостей, наиболее интересными с исследовательской точки зрения, являются:

- сложные углеводороды – прежде всего нефть и нефтепродукты (например, минеральные масла);
- жидкие органические соединения (например, спирты, альдегиды, эфиры, ацетон, растительные и животные жиры);
- вода и водные растворы (включая растворы электролитов).

Для каждого вещества можно выделить следующие характеристики:

- диэлектрическая проницаемость ϵ_a [Ф/м];
- магнитная проницаемость μ_a [Гн/м];
- удельное сопротивление ρ [Ом · м] или удельная проводимость σ [$1 / (\text{Ом} \cdot \text{м}) = \text{См} / \text{м}$].

Диэлектрическая проницаемость характеризует реакцию вещества на электрическое поле и тесно связана с таким явлением, как поляризация. Диэлектрическая проницаемость также характеризует способность вещества образовывать электрическую емкость. Магнитная

проницаемость характеризует реакцию вещества на магнитное поле и способность вещества образовывать индуктивность. Удельное сопротивление и проводимость являются величинами взаимнообратными и характеризуют преобразование энергии (потери) электрического и магнитного полей в веществе.

Поскольку весомыми магнитными свойствами рассматриваемые вещества не обладают, в дальнейшем эта характеристика не будет учитываться.

Удобно представлять характеристику в виде комплексной диэлектрической проницаемости: $\hat{\epsilon} = \epsilon' - i \epsilon''$, где действительная часть – диэлектрическая проницаемость, мнимая часть – фактор потерь (зависит от проводимости). Отношение мнимой и действительной частей комплексной диэлектрической проницаемости именуется углом диэлектрических потерь: $\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon$.

Комплексная диэлектрическая проницаемость зависит: от вида и структуры вещества (строение молекул, видов связей между ними, агрегатного состояния, формы кристаллической решетки, наличия дефектов и неоднородностей в структуре, включая наличия примесей); от физических характеристик (температура, давление, плотность); напряжения воздействия (частота, амплитуда, форма) [1–3].

Стоит отметить, что наиболее характерными являются исследования поиска зависимости $\hat{\epsilon}$ от частоты при фиксированной температуре и зависимость $\hat{\epsilon}$ от температуры на фиксированной частоте.

В соответствии с этим можно выделить следующие группы измерений:

- кондуктометрические;
- диэлькометрические;
- импедансометрические.

Под кондуктометрией подразумевается измерение проводимости вещества, к ней относятся, например, методы кондуктометрического титрования [4].

Под диэлькометрией подразумевается измерение диэлектрической проницаемости, импедансометрические методы объединяют в себе измерение диэлектрической проницаемости и проводимости.

Поэтому измерение комплексных диэлектрических характеристик имеет широкое практическое применение:

- фундаментальные физико-химические исследования, связанные с определением структуры и состава вещества [1, 2];
- контроль качества пищевых продуктов (в первую очередь, соки, вина, питьевые и минеральные воды, растворы и вытяжки других пищевых продуктов) [5];
- контроль состояния технических жидкостей во время эксплуатации (трансформаторные, трансмиссионные масла и тому подобное) [6–10];
- биологические жидкости для медицинских исследований [11, 2].

Целью работы является анализ особенностей измерения комплексных диэлектрических характеристик жидких диэлектриков в области радиочастот $\hat{\epsilon}(\omega)$ (порядка от 3 кГц до 300 ГГц) при постоянстве температур $t, ^\circ\text{C} = \text{const}$ для выбора метода при выполнении диссертационной работы.

Для этого необходимо рассмотреть:

- виды измерительных ячеек;
- представление измерительной ячейки в виде элемента электрической цепи;
- наиболее распространенные способы измерения электрических характеристик, область применения метода, достоинства и недостатки;
- выбор способа измерения для выполнения исследования.

Как было рассмотрено выше, диапазон измерительных частот лежит в пределах от 3 кГц до 300 ГГц; с физической точки зрения крайне сложно сделать прибор, который бы успешно работал во всем диапазоне, поэтому основная характеристика любого из рассматриваемого метода – диапазон используемых частот.

2. Виды измерительных ячеек и их эквивалентные электрические схемы

В случае, когда частотный диапазон исследования образца не превышает порядка 300 МГц, измерительная ячейка представляет собой элемент с сосредоточенной характеристикой. Выделяют следующие группы ячеек:

- 1) по виду элемента электрической цепи: емкостные, индуктивные;
- 2) по методу измерения: контактные, бесконтактные;
- 3) по способу размещения электродов: погружные, с фиксированным размещением электродов.

Бесконтактные ячейки бывают с внешним и внутренним расположением электродов.

Емкостные ячейки представляют собой измерительный конденсатор – две плоскопараллельные пластины (плоский конденсатор) или два цилиндра, один в другом (коаксиальный конденсатор). Пластины и цилиндры выполняют роль токопроводящих электродов, пространство между ними заполняется исследуемым диэлектриком.

Стоит отметить, что коаксиальные измерительные ячейки обладают меньшими паразитными характеристиками, более устойчивы к внешним помехам и наводкам, но так же более сложны в изготовлении и эксплуатации.

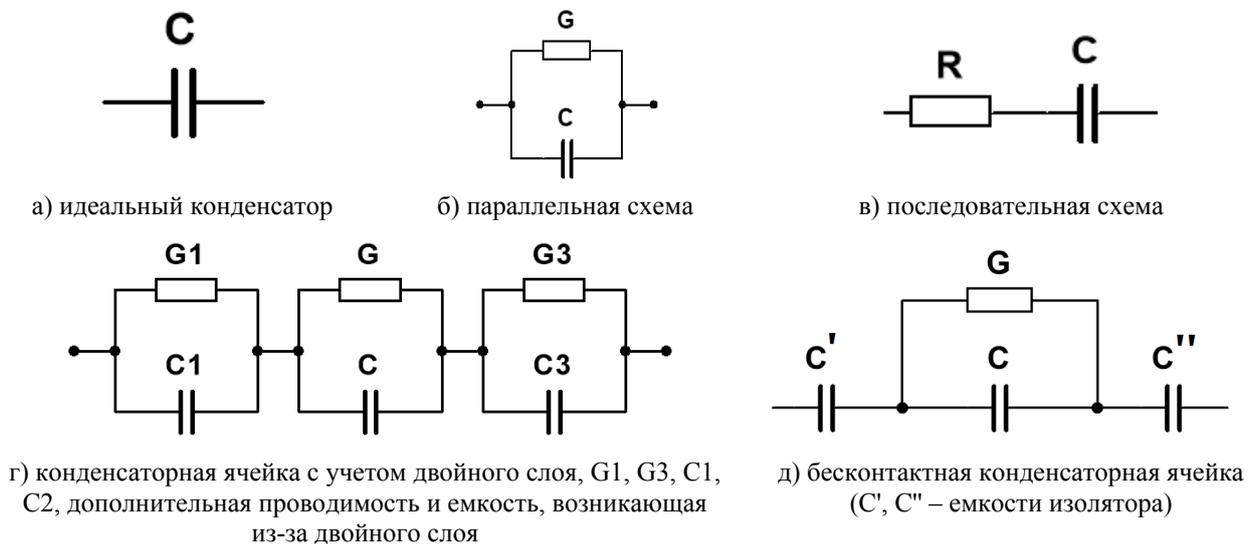


Рис. 1. Эквивалентные электрические схемы ячейки конденсаторного типа

Для такого подхода удобно ввести некоторый коэффициент – константу сосуда A , имеющую размерность длины и зависящую от формы ячейки. Тогда наблюдается прямая связь между емкостью, которую создает диэлектрик, и её характеристикой ε , данный подход справедлив и для нахождения сопротивления и проводимости.

$$C = \varepsilon \cdot A, \quad R = \rho / A, \quad G = \sigma \cdot A \quad (1)$$

Отсюда вытекает требование к постоянству A вне зависимости от объема исследуемой жидкости. С практической точки зрения константу сосуда определяют по калибровочной жидкости с известной характеристикой.

В идеальном диэлектрике проводимость отсутствует, тогда измерительную ячейку можно представить в виде идеализированного конденсатора (емкости) (рис. 1а), при наличии потерь (проводимости) электрическая схема примет вид на рис. 1б. В случае, если проводимость незначительна, удобно представлять схему в виде последовательной схемы (рис. 1в). В любом случае конденсатор с потерями приводит к тому, что сдвиг фазы φ между током и напряжением лежит в пределе от 0 до 90 градусов. Удобно представлять ячейку в виде комплексного сопротивления (проводимости):

$$\dot{Z} = R - j \frac{1}{\omega C} = |Z| e^{j\varphi}, \quad \dot{Y} = G + j\omega C = |Y| e^{j-\varphi}, \quad (2)$$

а тангенс угла потерь тогда равен

$$\delta = 90^\circ - \varphi, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{G}{\omega C}, \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C R. \quad (3)$$

Обычно измерения выполняются по следующей схеме: измерения емкости пустой ячейки C_0 и измерение емкости при заполнении C жидким диэлектриком, тогда

$$\varepsilon = C / C_0 \quad (3)$$

Для данного способа измерения необходимо учитывать, что измеряемый раствор представляет собой электролит, а следовательно, необходимо рассматривать все протекающие процессы с точки зрения электрохимии.

1. Под действием электрохимических реакции происходит разрушение измерительных электродов, поэтому они изготавливаются из химически стойких материалов: платины, серебра, никелированной или хромированной латуни или кислотоупорной стали. Лучшим, но вместе с тем и самым дорогим материалом, является платина. В целях экономии электроды изготавливают не полностью из платины, а лишь платинируют поверхность другого металла.

2. Смещение свободных ионов в жидкости под действием электрического поля приводит к образованию «обедненной области» зарядов возле электродов – двойной электрический слой, что приводит к появлению дополнительных емкостей и сопротивлений. Электрическая схема с учетом влияния двойного слоя приведена на рис. 1г.

Бесконтактные ячейки лишены первого недостатка, поскольку в этом случае металлические части электрода изолированы от электролита изолятором (чаще стекло). В этом случае необходимо учитывать электрическую емкость изолятора рис. 1д. В этом случае наблюдается нелинейность между измеренной емкостью и ε жидкостью.

На явление двойного слоя влияет частота воздействия напряжения, материал электродов, состав измеряемого раствора.

Емкостная измерительная ячейка имеет существенный недостаток: электрическое поле между обкладками имеет сложную форму из-за краевого эффекта, и часть энергии электрического поля выходит за пределы пространства между обкладками.

Индуктивные измерительные ячейки лишены этого недостатка, однако в этом случае измерения диэлектрической проницаемости становятся опосредованными, измерение проводят по изменениям потерь в катушке. Индуктивную ячейку, так же, как и емкостную, можно изготовить бесконтактной (рис. 2).

При измерении также необходимо учитывать:

- паразитные параметры проводников (емкость, индуктивность, сопротивление) между измерительным прибором и измерительной ячейкой;
- емкость между проводниками (ячейкой) и землей;
- паразитные параметры, обусловленные конструкцией измерительной ячейки.

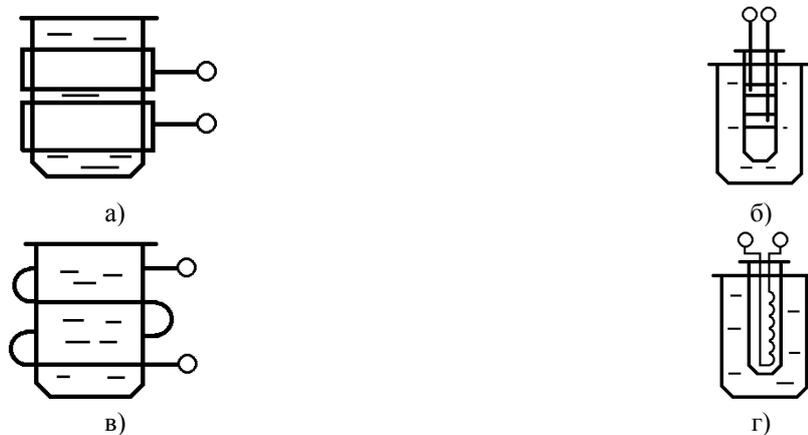


Рис. 2. Бесконтактные ячейки, (а) и (б) – емкостные ячейки, (в) и (г) – индуктивные; для внешнего (а) и (в) и внутреннего размещения (б) и (г)

Частичную компенсацию паразитных емкостей между схемой и землей можно обеспечивая с помощью заземления одной из обкладок конденсатора. Так же необходимо обеспечить заземленное экранирование всех элементов, желательно каждого блока по отдельности. Компенсацию паразитных параметров можно обеспечить методом Нернста. Конденсатор Нернста представляет собой ячейку с регулируемым расстоянием между обкладками. Расстояние регулируется с помощью специального винта, чей угол поворота можно контролировать благодаря специальной градуированной шкалы. В данном методе измерения выполняются четыре раза вместо двух:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_0' + C_{\text{П}}, & C_2 &= \varepsilon C_0' + C_{\text{П}}, \\ C_3 &= C_0'' + C_{\text{П}}, & C_4 &= \varepsilon C_0'' + C_{\text{П}}, \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{C_4 - C_2}{C_3 - C_1}, \quad (4)$$

где $C_{\text{П}}$ – паразитная емкость, C_0' – емкость ячейки в положении 1, C_0'' – емкость ячейки в положении 2 [13–14].

3. Методы измерения

3.1. Общие сведения

Как было рассмотрено выше, диэлектрическая проницаемость характеризует способность диэлектрика образовывать емкость, поэтому основной способ – это определение емкости (комплексное сопротивление) емкостной ячейки. Однако существуют и другие способы.

Основные методы измерения диэлектрической проницаемости включают [13–17]:

1) электростатические:

– метод, основанный на законе Кулона (метод, основанный на силе взаимодействия заряженных частиц);

– статистический метод измерения емкостей;

2) методы измерения емкости на переменном токе:

– мостовой;

– резонансный;

– метод биений;

– метод I-V (определение комплексного тока и напряжения);

3) СВЧ-методы:

– метод стоячих волн;

– метод объемного резонатора;

– метод отражения;

4) прочие методы:

– калориметрический метод – измерение тангенса угла потерь по степени нагрева материала.

Каждый метод имеет свою область применения, свои достоинства и недостатки.

3.2. Электростатические методы

Электростатические методы являются методами для измерения характеристик диэлектриков в постоянном электрическом поле, так же это были первые методы для измерения характеристик.

Метод, основанный на силе взаимодействия заряженных частиц – законе Кулона. Данный метод основывается на разработке механической системы, где в качестве зонда используется, чаще всего, эллипсоид из проводящего материала. Две пластины конденсатора создают электрическое поле в веществе, там же размещен зонд. По степени отклонения

(поворота) зонда делается вывод о силе электрического поля в веществе. Данный метод не позволяет измерять диэлектрические потери, обладает невысокой чувствительностью, результаты измерения зависят от вибрации и вязкости жидкости, поэтому данный метод фактически не используется.

Статистический метод основан на измерении электрической емкости измерительной ячейки с помощью баллистического гальванометра. Баллистический гальванометр – прибор, способный измерять количество тока, прошедшего через него. Зная напряжение конденсатора U , зная интеграл от тока – заряд Q , можно найти емкость $C = Q / U$. Сейчас вместо баллистического гальванометра можно использовать элементы вычислительной техники – АЦП, а интегрирование выполнять на ЭВМ. Метод пригоден лишь для диэлектриков с низкой проводимостью и не позволяет измерять диэлектрические потери, поэтому тоже не рекомендован к использованию.

3.3. Методы измерения на переменном токе

Методы измерения на переменном токе сводятся к определению комплексного сопротивления измерительной ячейки, к ним относятся мостовые методы, резонансные, метод комплексного тока и напряжения.

Мост представляет собой электрическую цепь, состоящую из нескольких ветвей (плеч) – два плеча (полумост), четыре плеча (мост), более четырех плеч (мост с несколькими плечами). В одно из плеч моста включают измеряемое сопротивление. Его определяют путем сравнения с эталонным сопротивлением (магазин сопротивлений). Сопротивление необходимо подобрать так, чтобы ток в диагонали отсутствовал. В качестве переменного сопротивления (плечо сравнения) берут из магазина сопротивлений и устанавливают близко к сопротивлению измеряемого объекта. Аналогично можно выполнить измерения электрической емкости, если в схеме заменить резисторы на конденсаторы, а измерения выполнять на переменном токе. Если измеряемый конденсатор содержит проводимость, тогда фаза тока в диагонали не будет совпадать, и определить нуль станет невозможно, поэтому в изменяемое плечо, помимо магазина емкостей, параллельно включают магазин сопротивлений (если параллельная проводимость мала, то магазин сопротивлений включают последовательно). Теперь для определения комплексного сопротивления необходимо выполнить настройку моста по двум параметрам.

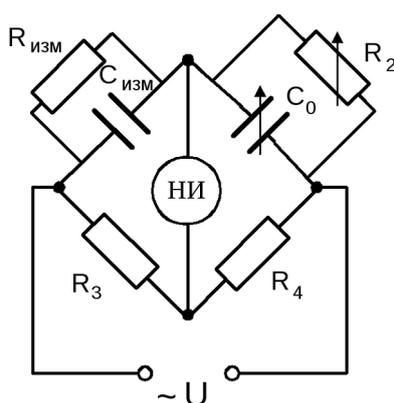


Рис. 3. Схема четырехплечевого моста

$R_{изм}$ и $C_{изм}$ – измеряемое плечо, R_2 и C_0 – перестраиваемое плечо, R_3 и R_4 – постоянные сопротивления

К достоинствам мостовых схем относится высокая чувствительность: в лучшем случае, когда сдвиг фазы между плечами составляет 180 градусов (индуктивно-емкостные плечи), точность измерения зависит только от допуска элементов в магазине емкостей/сопротивлений.

В целях организации автоматических измерений применяют небалансный метод измерения, то есть вывод о величине комплексного сопротивления в измеряемой ветви делается не только по значениям комплексного сопротивления/емкости в других ветвях, но и по уровню и фазе потенциалов в диагонали схемы.

Данный метод является одним из основных способов измерений комплексной диэлектрической проницаемости. В частотной области данный метод применим до единиц МГц, так как наличие большого числа проводников и системы коммутации приводит к появлению значимых паразитных параметров, которые усугубляются с ростом частоты.

Отдельно можно отметить трансформаторные мосты (мосты с индуктивно связанными плечами), которые обладают высокой защитой от паразитных связей и более высоким верхним диапазоном рабочих частот (около 100 МГц) [19].

Резонансные методы основываются на измерении характеристик резонансной кривой колебательного контура. Схема измерения представляет собой чаще всего параллельную RLC цепь с известными параметрами (рис. 4), параллельно контуру подключается измерительный конденсатор. Данный контур является нагрузкой генератора. В качестве измеряемой величины выбирается АЧХ контура по напряжению (току). При достаточно высокой добротности $Q > 3$, по полученной АЧХ можно определить частоту резонанса и добротность, что в свою очередь позволят вычислить характеристики ячейки.

Соответственно, измерения выполняют до включения измеряемой ячейки и после. Иногда во время измерения схемы с включенной ячейкой выполняют компенсацию с помощью градуированного подстроечного конденсатора, до тех пор, пока характеристики контура не станут такими же, как до включения ячейки, соответственно значения емкости определяют из разницы емкости подстроечного резистора до и после компенсации. Такая компенсация позволяет добиться большей стабильности работы схемы, так как измерения выполняются на одной частоте [14].

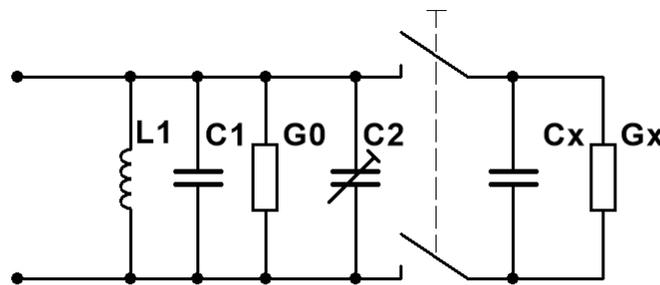


Рис. 4. Схема параллельного колебательного контура, C_x , G_x – измеряемые величины, L_1 , C_1 – известные индуктивность и емкость контура, C_2 – подстроечный конденсатор

Другой способ измерения характеристик колебательного контура заключается в установке данной цепи в выходную цепь генератора, тогда выходная частота генератора будет равняться ω_0 , а измерения выполняют с помощью частотомера.

Третий способ измерения заключается в использовании двух синхронизированных генераторов, нагруженных на одну нагрузку. Выходные колебательные контура таких генераторов одинаковы, измерительную ячейку подключают к одному из контуров, в результате сложения двух колебаний наблюдаются биения. Частота следований биений определяется разностью между частотами генераторов, но чаще биения используются для индикации разности характеристик контуров при компенсации.

В [20] приводятся схемы организации резонансных измерений. Метод отличается высокой помехоустойчивостью (благодаря избирательным свойствам контура), высокой чувствительностью: измерение характеристик контура по чувствительности примерно равно мостовому методу, для фазогенераторных схем примерно в 100–200 раз выше. По частотной области – довольно сложно организовать измерения на низкой частоте вследствие требования больших емкостей и индуктивностей, с другой стороны, отсутствует верхняя

граница по частоте. При повышении частоты больше 100-300 МГц измерительная ячейка и колебательный контур изготавливаются на элементах с распределенными параметрами (например, на коаксиальных [21], полосковых (микроросковок) линиях), то есть в СВЧ диапазоне и выше данный метод становится методом объемного резонатора.

Метод измерения комплексного тока и напряжения (в иностранной литературе встречается название «метод I – V») заключается в определении амплитуды и фазы входного тока и напряжения на исследуемой ячейке. Тогда комплексное сопротивление можно определить как $\dot{Z} = \dot{U} / \dot{I}$, по формуле (2) определить активную и реактивную составляющую.

Амплитуда (действующее значение) тока и напряжения определяется с помощью амперметра и вольтметра соответственно. Сдвиг фазы определяется отдельно с помощью фазоизмерительной цепи [22, 23].

Из интересного можно отметить метод измерения амплитуды и сдвига фаз на высокой частоте (до 3 ГГц) с помощью квадратурно-амплитудного демодулятора [24], но фактически измерения проводят на фиксированных частотах – 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц, реже выше.

Данный метод находит широкое практическое применение в измерительных устройствах, к достоинствам можно отнести возможность организации автоматического измерения, малый объем и вес прибора за счет использования элементов вычислительной техники. Точность измерения, однако, порядка 0.1 %.

3.4. Методы измерения на сверх высоких частотах (СВЧ методы)

При измерении выше 300 МГц (фактически, выше 100 МГц), длина волны электромагнитного поля λ становится соизмеримой с линейными размерами электрических цепей и, соответственно, все элементы рассматриваются с точки зрения теории длинных линий.

Метод стоячих волн заключается в измерениях распределения напряжения (или тока) в длинной линии, окруженной (заполненной) измеряемым диэлектриком в режиме стоячих волн. Чаще всего режим стоячих волн задают с помощью режима короткого замыкания на одном из концов линии (режим холостого хода менее предпочтителен, так как линия начинает работать как антенна, и в ней возрастают потери).

В качестве измерительного прибора достаточно использовать вольтметр с диодным детектором. Предпочтительнее измерять расстояние между узлами напряжения, чем пучностями, поскольку у них более резкая зависимость от расстояния. Расстояние между двумя ближайшими узлами равно $\lambda/2$. Фактическая длина электромагнитной волны в веществе меньше длины волны λ_0 в свободном пространстве (вакууме):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} = \frac{c_0}{f \sqrt{\epsilon}} \quad (5)$$

где c_0 – скорость света ($\approx 3 \cdot 10^8$ м/с), f – частота [Гц].

В качестве измерительной линии можно использовать двухпроводную линию, однако здесь имеет место быть зависимость (ошибка) результата измерения от объема сосуда, в котором размещена линия (поскольку линия открытая) и высокое затухание.

Коаксиальная линия представляет собой проводящую трубку с сердечником и разрезом в верхней стороне для доступа зонда. Для удобства на нее монтируется передвижной механизм и градуированная шкала для точного измерения расстояния. Линейные размеры линии должны вмещать по крайней мере 1–2 длины волны.

Аналогично можно изготовить и волноводную измерительную линию. Частотный диапазон измерений лежит в пределе от 300 МГц до примерно 10 ГГц для воздуха и в девять раз меньше для, например, воды [13, 14].

На частотах свыше 6 ГГц целесообразно переходить к объемным резонаторам, поскольку на таких коротких волнах погрешность измерения уже существенна. Резонаторы можно изготовить в виде коаксиальной линии, в виде волноводной линии, или полосковой линии.

Резонатор представляет собой некоторую длинную линию (чаще всего волноводную), частотные свойства которой зависят, прежде всего, от линейных размеров (относительно длины электромагнитной волны), поэтому резонаторы могут выполняться с подвижными элементами (например, поршень) для изменения размера. Резонатор является эквивалентом колебательного контура, поэтому методика измерения характеристик вещества аналогична: измерение частотных характеристик резонатора без вещества, измерение характеристик резонатора с веществом, либо определяется зависимости мощности сигнала от положения поршня (зависимость мощности от длины) либо зависимость мощности от частоты.

Резонаторы могут выполняться также на коаксиальных и полосковых линиях.

$$\frac{\varepsilon - 1}{2} = \frac{f_0 - f_1}{f_0}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_0}, \quad (6)$$

где Q_0 и f_0 – добротность и частота пустого резонатора, Q_1 и f_1 – добротность и частота заполненного резонатора [2, 15, 25].

Стоит отметить, что полосковые резонаторы обладают наименьшей добротностью, но значительно более просты в изготовлении. Более предпочтительны резонаторы на волноводных линиях с круглым сечением. Иногда применяется частичное заполнение волновода исследуемым веществом (такой способ более характерен для твердых веществ), однако это приводит к неоднородности со скачкообразным изменением диэлектрической проницаемости, что приводит к возбуждению электромагнитных волн сложных типов. Для жидкостей и газов предпочтительно полное заполнение резонатора.

Методы отражения заключается в измерении характеристик измеряемого объекта (измерительной ячейки, резонансной системы и т.п.) основываясь на коэффициенте отражения (прохождения) от него в линии или свободном пространстве.

В случае если исследуемая ячейка подключена к линии, коэффициент отражения можно измерять с помощью векторного анализатора цепей. Тогда комплексное сопротивление ячейки определяется из соотношения:

$$\dot{P} = \frac{\dot{Z} - Z_0}{\dot{Z} + Z_0}, \quad (9)$$

где P – коэффициент отражения, Z_0 – волновое сопротивление линии.

Использование векторных анализаторов цепей имеет ряд преимуществ:

- высокие метрологические характеристики: широкий частотный диапазон измерений от десятков МГц до сотен ГГц, высокий динамический диапазон порядка 100 дБ, низкий уровень шумов;
- высокая интегрированность с ЭВМ, что упрощает организацию автоматических измерений;

Из недостатков: крайне высокая цена, во всем мире существуют лишь несколько производителей подобного оборудования (Anritsu – Япония, Agilent Technologies – США, Rohde & Schwarz – Германия), и все они находятся за рубежом [26].

Второй подход – измерение характеристик на основании отражения/прохождения электромагнитной волны в свободном пространстве. Измерение выполняется следующим образом: ёмкость из радиопрозрачного материала известных геометрических размеров и формы заполняется исследуемой жидкостью, по две стороны от нее размещаются две антенны (приемная и передающая) подключенные к приемнику и генератору соответственно. По известным геометрическим размерам составляется расчетная модель. Диэлектрическая проницаемость находится из полученного коэффициента прохождения. Антенны должны быть направлены, мощность излучения и чувствительность приемника известна. Антенны можно размещать с одной стороны емкости и измерять коэффициент отражения.

Частотный диапазон измерений лежит в сантиметровом – миллиметровом диапазоне (по частоте от 3 ГГц), так как измеряемый объект должен находиться в дальней зоне от антенн, длина волны должна меньше линейных размеров емкости. Для исключения влияния помех и переотражений измерения выполняются в безэховой камере или на открытой местности.

4. Заключение и выводы

Из практических соображений используются следующие методы: мостовой, резонансный, метод комплексных токов и напряжений, метод объемного резонатора и отражения.

Мостовой метод, как указано выше, обладает высокой чувствительностью, но обладает низкими частотными характеристиками (фактически до единиц МГц), требует наличия поверенных образцовых пассивных элементов, сложную систему коммутации (настройка по двум параметрам), поэтому затруднительно организовать автоматизацию измерений.

Резонансные методы (включая метод объемного резонатора) работают в широком частотном диапазоне (верхняя граница ограничена лишь линейными размерами и длиной волны в измеряемом веществе). Измерения можно выполнять как генераторными методами, так и снятием АЧХ, при этом точность измерения соизмерима с мостовыми методами. Так же относительно легко организовать автоматизацию измерения, поскольку современная промышленность освоила выпуск недорогих генераторов с фазовой подстройкой частоты и программным управлением. В качестве индикатора можно использовать диодный детектор, подключенный к вольтметру постоянного напряжения.

Существующие приборы, измеряющие методом комплексных токов-напряжений, несмотря на высокую автоматизацию, работают на фиксированных частотах, а они редко превышают 1 МГц, поэтому данный метод в первую очередь направлен для измерения значений характеристик пассивных радиокомпонентов.

Метод отражения (для векторного анализатора цепи) имеет слишком высокую цену и проблемы с экспортом из других стран.

Из всего рассмотренного наиболее перспективным, с точки зрения организации измерения в рамках института и диссертационной работы, является резонансный метод.

В качестве резонатора можно использовать полосковую линию [28], поскольку она значительно проще в изготовлении, чем коаксиальная линия и волноводная, обладает высокой степенью повторяемости при изготовлении.

В качестве полосковой линии выберем симметричную полосковую линию, которая по сравнению с несимметричной обладает более сложной конструкцией, но является более закрытой линией и обеспечивает симметричное распределение электрического поля. Таким образом, данная линия будет обладать большей добротностью и меньшим уровнем помех.

Центральный проводник можно изготовить из двухстороннего фольгированного текстолита, поскольку медь обладает хорошей проводимостью и отлично поддается пайке. Текстолит обеспечит механическую прочность. Поскольку его толщина незначительна, по сравнению с толщиной всей линии, диэлектрическая проницаемость мала (порядка 2.3), а сам текстолит отделен медными экранами, то можно пренебречь его наличием в линии. Индикацию обеспечивается диодным детектором, в качестве генератора можно выбрать генератор с фазовой подстройкой частоты (например, серии ADF от Analog Device).

В качестве неоднородности в линии примем скачок ширины, тогда эквивалентная электрическая схема резонатора будет представлять собой последовательный колебательный контур. Длина элементов подбирается исходя из рабочей длины волны (частоты), примерное количество элементов от 2 до 5. Полагается изготовление нескольких линий с различными параметрами и рабочими частотами, для дальнейшей научной работы.

Литература

1. *Тареев Б. М.* Физика диэлектрических материалов, Москва, : Энергоиздат, 1982, 320 с.
2. *Борисова М. Э., Койков С.Н.* Физика диэлектрических материалов, учебное пособие, Ленинград, : 1979, 240 с.

3. *Андреев В. С., Попичителев Е.П.* Лабораторные приборы для исследования жидких сред, Ленинград,: Машиностроение, 1981, 312 с.
4. *Андреев В. С.* Кондуктометрические методы и приборы в биологии и медицине, Москва,: Медицина 1973, 335 с., С. 90–93, 105.
5. *Бабич А. А., Одарченко Н. С., Поддубный В. В., Штых С. В., Сорокопудов В. Н., Мячикова Н. И.* Электрофизические свойства культивируемых грибов // Пищевая промышленность, декабрь, 2013, С. 42-43.
6. *Григоров А. Б.* Диэлектрические свойства моторных масел // Автомобильный транспорт №25, 2009.
7. *Григоров А. Б., Наглюк И. С.* Диэлектрические свойства трансмиссионных масел, // Автомобильный транспорт. №26, 2010.
8. *Никифоров И. К.* Обзор различных факторов, влияющих на эксплуатационные параметров трансформаторных масел. Контроль параметров трансформаторных масел, // Приборостроение и средства автоматизации. №5, 2021, С. 43–46.
9. *Абдуназаров А. А. Хамидов Б. Н. Кучкаров Х. О.* Способ измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь трансформаторного масла // Universum: химия и биология, №10 (64), 2019.
10. *Григоров А. Б., Наглюк И. С.* Влияние состава нефти на ее диэлектрические свойства // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит, №7 (89) 2011, С. 21–24.
11. *Косинова А. А., Ковалев А. В., Гринштейн Ю. И., Суховольский В. Г., Савченко А. А.* Диэлектрические характеристики крови и ее компонентов у больных стабильной стенокардией // Сибирское медицинское обозрение, №4, 2013, С. 24–28.
12. *Вавилов А. Ю., Чирков В. Е., Поздеев А. Р., Плешакова Н. П.* О возможности применения метода измерения электрического сопротивления при исследовании биологических сред // Проблемы экспертизы в медицине, № 1 (Том 4) 2004, С. 21–23.
13. *Надь Ш. Б.* Диэлектрометрия: перевод с венгерского В. Д. Калашников, под редакцией В.В. Малова, Москва: Энергия, 1976, 200 с, С. 11–15, 21–28, 53–58, 66–70.
14. *Смайс Ч. Ф.* Диэлектрическая постоянная и структура молекул: перевод с английского В.Г. Васильева, Я.Г. Сыркина, Москва: ОНТИ, главная редакция химической литературы, 1937, 304 с., С. 44–76.
15. *Эме Ф.* Диэлектрические измерения для количественного анализа и для определения химической структуры: перевод с немецкого Штиллер Б.Н. под редакцией Заславского И.И. Москва, Химия, 1967, 223 с.
16. *Карандеев К. Б.* Специальные методы электрических измерений, Москва–Ленинград, Государственное энергетическое издание, 1963, 344 с.
17. *Карандеев К. Б.* Методы электрических измерений (дифференциальные, мостовые и компенсационные), Москва, Ленинград, Государственное энергетическое издательство, 1952, 335 с.
18. *Ермаков В. И., Колесников В. А., Щербаков В. В.,* под редакцией Лидоренко Н. С. Растворы электролитов в электромагнитных полях, Москва, 2009, 435 с.
19. Трансформаторные измерительные мосты, под общей редакцией К.Б. Карандеева, Москва, Энергия, 1970, 280 с.
20. *Полулях К. С.* Резонансные методы измерений, Москва, Энергия, 1980, 120 с.
21. *Рудаков В. В., Коробко А. А.,* Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора // Электротехника і Електромеханіка. 2016. №5.
22. Приборы для измерения импеданса, иммитанса и сопротивления. Обзор, Keysight, // Контрольно-измерительные решения, 2019, С. 176-183.

23. Измерение фазового сдвига двух повторяющихся сигналов, [Электронный ресурс]. URL: <https://usilitelstabo.ru/izmerenie-fazovogo-sdviga.html> (дата обращения: 01.06.2024).
24. Райан Карран, Квай Луу, Маитил Паччигар: перевод Михаил Вьюгин, Точное определение фазы амплитуды РЧ-сигнала для проведения анализа материалов // Компоненты и технологии, № 12, 2014.
25. Семенов Н. А. Техническая электродинамика: учебное пособие для вузов, Москва, Связь, 1973, 480 с. С. 255–259.
26. Дьяконов В. П. Современные цифровые векторные анализаторы цепей // Компоненты и технологии № 2, 2014.
27. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах, Москва, АН СССР, 1957, 503 с.
28. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств под ред. В. И. Вольман, Москва, Радио и связь, 1982, 328 с.

Красных Сергей Юрьевич

аспирант кафедры инфокоммуникационных технологии и мобильной связи, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: seregakrasnyh@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334.

Куанышев Валерий Таукенович

к.ф.-м.н., доцент кафедры высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15), e-mail: kuan06@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9744-684X.

Барбин Николай Михайлович

д.т.н. профессор кафедры высшей математики и физики, Уральский технический институт связи и информатики (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге (УрТИСИ СибГУТИ, 620109, Екатеринбург, ул. Репина, 15); профессор Уральского института Государственной противопожарной службы МЧС (620002, Екатеринбург, ул. Мира, 22), e-mail: nmbarbin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

Features and methods of measuring the electrical characteristics of liquid dielectrics

Sergey Y. Krasnykh¹, Valery T. Kuanyshev¹, Nikolai M. Barbin^{1,2}

¹Ural Technical University Institute of Communications and Telecommunications

²Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia

Abstract: This paper provides an overview of the most common methods and methods of measuring dielectric permittivity for the study of liquid dielectrics. The advantages and disadvantages of these directions are highlighted. The factors that need to be taken into account when performing the study and ways to reduce their impact are considered. Based on the analysis, the cell design and the method of measurement are proposed.

Keywords: complex permittivity, liquid dielectrics, conductometry, dielectrometry, impedance measurement methods.

For citation: Krasnykh S. Yu., Barbin N. M., Kuanyshev V. T., Features and methods of measuring the electrical characteristics of liquid dielectrics // *Vestnik SIBGUTI*, 2025, vol. 19, no. 2, pp. 10–24. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2025-19-2-10-24>.



Content is available under the
license
Creative Commons Attribution
4.0 License

© Kosov D. L. Belov V. M., 2025

The article was submitted: 06.07.2024;
accepted for publication 14.10.2024.

References

1. *Tareev B. M.* *Phisica dielectricheskikh materialov* [Physics of dielectric materials], Moscow, : Energoizdat, 1982, 320 p.
2. *Borisova M. E., Koikov S. N.* *Phisica dielectricheskikh materialov* [Physics of dielectric materials], Leningrad, 1979, 240 p.
3. *Andreev V. S., Popichitelev E.P.* *Laboratory`e pribory` dlya issledovaniya zhidkix sred* [Laboratory devices for the study of liquid media], Leningrad, : Mashinostroenie, 1981, 312 p.
4. *Andreev V. S.* *Konduktometricheskie metody` i pribory` v biologii i medicine* [Conductometric methods and devices in biology and medicine], Moscow, : Medicine 1973, 335 p., pp. 90-93, 105.
5. *Babich A. A., Odarchenko N. S., Poddubny V. V., Shtykh S. V., Sorokopudov V. N., Myachikova N. I.* *Elektrofizicheskie svoystva kultiviruemyx gribov* [Electrophysical properties of cultivated mushrooms] // *Food industry*, December, 2013, pp. 42-43.
6. *Grigorov A. B.* *Dielectric properties of motor oils* // *Automotive transport* No.25, 2009.
7. *Grigorov A. B., Naglyuk I. S.* *Die`lektricheskie svoystva motorny`x masel* [Dielectric properties of transmission oils], // *Automobile transport*. No.26, 2010.
8. *Nikiforov I. K.* *Die`lektricheskie svoystva transmissionny`x masel*, [An overview of various factors affecting the operational parameters of transformer oils]. *Control of parameters of transformer machines*, // *Instrumentation and automation tools*. No.5, 2021, pp. 43-46.
9. *Abdunazarov A. A. Khamidov B. N. Kuchkarov H. O.* *Obzor razlichny`x faktorov, vliyayushhix na e`kspluatatsionny`e pa-rametrov transformatorny`x masel* [Method of measuring dielectric permittivity and dielectric losses of transformer oil] // *The Universe: chemistry and biology*, №10 (64), 2019.
10. *Grigorov A. B., Naglyuk I. S.* *Vliyanie sostava nefi na ee die`lektricheskie svoystva* [Influence of oil composition on its dielectric properties] // *Energy saving, Power engineering, energy audit*, No.7 (89) 2011, pp. 21-24.
11. *Kosinova A. A., Kovalev A. V., Grinstein Yu. I., Sukhovolsky V. G., Savchenko A. A.* *Die`lektricheskie karakteristiki krovi i ee komponentov u bol`ny`x stabil`noj stenokardiej* [Dielectric characteristics of blood and its components in patients with stable angina pectoris] // *Siberian Medical Review*, No. 4, 2013, pp. 24-28.

12. *Vavilov A. Yu., Chirkov V. E., Pozdeev A. R., Pleshakova N. P.* O vozmozhnosti prime-neniya metoda izmereniya e`lektricheskogo soprotivleniya pri issledovanii biolo-gicheskix sred [On the possibility of using the method of measuring electrical resistance in the study of biological media] // Problems of expertise in medicine, No. 1 (Volume 4) 2004, pp. 21-23.
13. *Nagy Sh. B.* Die`lektrometriya [Dielectrometry]: translated from Hungarian by V.D. Kalashnikov, edited by V.V. Malov, Moscow: Energia, 1976, 200 s., p. 11-15, 21-28, 53-58, 66-70.
14. *Smythe C. F.* Die`lektricheskaya postoyannaya i struktura molekul [Dielectric constant and the structure of molecules]: translated from English by V.G. Vasilyev, Ya.G. Syrkina, Moscow: ONTI, main editorial office of chemical literature, 1937, 304 p., pp. 44-76.
15. *Aime F.* Die`lektricheskie izmereniya dlya kolichestvennogo analiza i dlya opredele-niya ximicheskoy struktury` [Dielectric measurements for quantitative analysis and for the determination of chemical structure]: translated from German by Stiller B.N. edited by Zaslavsky I.I. Moscow, Chemistry, 1967, 223 p.
16. *Karandeev K. B.* Special`ny`e metody` e`lektricheskix izmerenij [Special methods of electrical measurements], Moscow–Leningrad, State Energy Publication, 1963, 344 p.
17. *Karandeev K. B.* Metody` e`lektricheskix izmerenij (differencial`ny`e, mostovy`e i kompensacionny`e) [Methods of electrical measurements (differential, bridge and compensation)], Moscow, Leningrad, State Energy Publishing House, 1952, 335 p.
18. *Ermakov V. I., Kolesnikov V. A., Shcherbakov V. V.*, edited by Lidorenko N. S. Rastvory` e`lektrolitov v e`lektromagnitny`x polyax [Solutions of electrolytes in electromagnetic fields], Moscow, 2009, 435 p.
19. Transformatorny`e izmeritel`ny`e mosty` [Transformer measuring bridges], under the general editorship of K. B. Karandeev, Moscow, Energia, 1970, 280 p.
20. *Polulyakh K. S.* Rezonansny`e metody` izmerenij [Resonant measurement methods], Moscow, Energia, 1980, 120 p.
21. *Rudakov V. V., Korobko A. A.*, Vy`sokochuvstvitel`ny`j SVCh izmeritel` vlagosoder-zhaniya v nepolyarny`x die`lektricheskix zhidkostyax na osnove stupenchatogo neodno-rodnoogo koaksial`nogo rezonatora [A highly sensitive microwave moisture absorption meter in nonpolar dielectric liquids based on a stepped non-homogeneous coaxial resonator] // Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2016. No.5.
22. Pribory` dlya izmereniya impedansa, immitansa i soprotivleniya. Obzor [Devices for measuring impedance, immitance and resistance]. Review, Keysight, // Intellectual Research, 2019, pp. 176-183.
23. Izmerenie fazovogo sdviga dvux povtoryayushhixsya signalov [Measurement of the phase shift of two repeated signals], [Electronic resource]. available at: <https://usilitelstabo.ru/izmerenie-fazovogo-sdviga.html> (accessed: 06/01/2024).
24. *Ryan Curran, Kwai Luu, Maitil Pacchigar*: translated by Mikhail Vyugin, Tochnoe opredelenie fazy` amplitudy` RCh-signala dlya provedeniya analiza materialov [Precise determination of the phase of the amplitude of the RF signal for analyzing materials] // Components and Technologies, No. 12, 2014.
25. *Semenov N. A.* Texnicheskaya e`lektrodinamika [Technical electrodynamics]: a textbook for universities, Moscow, Svyaz, 1973, 480 p. pp. 255-259.
26. *Dyakonov V. P.* Sovremenny`e cifrovyye vektorny`e analizatory` cepej [Modern digital vector circuit analyzers] // Components and technologies No. 2, 2014.
27. *Brekhovskikh L. M.* Volny` v sloisty`x sredax [Waves in layered media], Moscow, USSR Academy of Sciences, 1957, 503 p.
28. Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovy`x ustrojstv [Handbook on the calculation and design of microwave strip devices], edited by V.I. Volman, Moscow, Radio and Communications, 1982, 328 p.

Sergey Y. Krasnykh

postgraduate student of the Department of Infocommunication Technology and Mobile Communications, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics in Yekaterinburg (UrTISI SibGUTI, 620109, Russia, Yekaterinburg, Repina str., 15), e-mail: seregakrasnyh@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334.

Valery T. Kuanyshev

PhD, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics in Yekaterinburg (UrTISI SibGUTI, 620109, Russia, Yekaterinburg, Repina str., 15), e-mail: kuan06@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-9744-684X.

Nikolai M. Barbin

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Higher Mathematics and Physics, Ural Technical Institute of Communications and Informatics (branch) of the Siberian State University of Telecommunications and Informatics in Yekaterinburg (UrTISI SibGUTI, 620109, Russia, Yekaterinburg, Repina str., 15), Professor of the Ural University Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 22) e-mail: nmbarbin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-6709-4334.