

**Г. В. Голубничая, А. Я. Кириченко, Е. В. Кривенко, В. И. Луценко**  
 Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
 12, ул. Ак. Проскуры, 61085, Харьков, Украина  
 E-mail: [lutsenko@ire.kharkov.ua](mailto:lutsenko@ire.kharkov.ua)

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХ ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВОДЫ ПРИРОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

Каждый из многочисленных диэлектрометрических методов имеет свои ограничения по использованию, а именно: агрегатное состояние вещества, диапазон электромагнитного спектра используемых частот, величины диэлектрической проницаемости и электромагнитных потерь в веществе и т. д. В частности, в настоящее время ограничены возможности экспресс-методов диэлектрометрии жидких веществ с большими потерями в миллиметровой (мм) области электромагнитного спектра. Новые возможности в этой области открываются при продвижении капиллярно-волноводного метода в коротковолновую область мм диапазона и при использовании предлагаемого метода колеблющейся струны. Показано, что эти методы позволяют проводить определение действительной составляющей диэлектрической проницаемости в сильно поглощающих жидкостях, которыми являются слабые водные растворы. Идентификационными параметрами в капиллярно-волноводном методе выбрана амплитуда измеряемого резонансного сигнала, а в методе колеблющейся струны – длина волны в исследуемой жидкости, в данном случае образцов воды, взятых из некоторых источников Харьковского региона. Установлено высокое значение корреляции идентификационных параметров этих двух методов, что подтверждает эффективность и достоверность использования этих экспресс-методов для идентификации жидкостей с высокими электромагнитными потерями в мм диапазоне длин волн. Показана возможность использования предлагаемых методов для экспресс-идентификации слабых водных растворов, например фармакологических препаратов, виноматериалов и т. д. Ил. 7. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** капиллярно-волноводный резонанс, метод колеблющейся струны, диэлектрическая проницаемость.

Для идентификации вещества часто применяют информацию о диэлектрической проницаемости вещества, которую получают из измерений коэффициентов отражения от вещества и прохождения через него. При этом, например, располагая тестируемый образец в волноводе или в резонаторе, приходится выполнять измерения на нескольких частотах либо на нескольких образцах, различающихся размерами. Кроме этого, определение диэлектрических характеристик жидкостей волноводным или резонаторным методом требует использования специально разработанных диэлектрических кювет-контейнеров. Все это усложняет методику измерений коэффициентов отражения и прохождения и особенно затрудняет решение обратной задачи по определению диэлектрических характеристик жидкостей [1–3].

В стремлении получить информацию о диэлектрических свойствах веществ в области более высоких частот исследователи пытаются отказаться от волноводных и резонаторных методов исследований и перейти к исследованиям вещества в свободном пространстве – методам, которые аналогичны используемым в оптике. При этом получили развитие различного рода интерферометрические схемы: интерферометр Фабри-Перо [4], интерферометр Майкельсона [5] и более сложные интерферометрические схемы [6].

Учитывая сложности самих измерительных схем и методов решения обратной задачи для извлечения диэлектрических характеристик жидких диэлектриков, особенно обладающих высоким поглощением электромагнитных волн милли-

метрового (мм) диапазона, в настоящей работе представлено два экспресс-метода измерения электрических характеристик слабых водных растворов.

### 1. Условия постановки эксперимента.

Рассмотрены особенности реализации этих двух экспресс-методов для идентификации водных растворов и проведено сравнение измеряемых электрических характеристик растворов, полученных при проведении измерений с помощью капиллярно-волноводного резонанса в коротковолновой области мм диапазона с измерениями, проведенными с помощью колеблющейся струны в длинноволновой области мм диапазона.

Первый метод, рассматриваемый здесь, основан на измерении параметров резонанса поглощения, возникающего при размещении капилляра, заполненного водой, в прямоугольном волноводе. Измерительный резонатор получил название капиллярно-волноводный. Он впервые был описан в работе [7] и использовался для измерения лекарственных препаратов и водных растворов в диапазоне частот 26...33 ГГц. Позже была показана возможность реализации капиллярно-волноводного резонанса в коротковолновой части мм диапазона [8], а появление этого резонанса объяснено эффективным возбуждением радиально-двухслойного диэлектрического резонатора в виде капилляра из фторопласта с жидким раствором. Собственные частоты такого резонатора определяются его размерами и комплексными значениями диэлектрических проницаемостей фторопласта и раствора. При совпадении собственной частоты радиально-двухслой-

ного диэлектрического резонатора с частотой волны, распространяющейся в прямоугольном волноводе, может происходить резонансный отбор энергии волноводной моды собственными колебаниями диэлектрического резонатора [9].

В качестве капиллярно-волноводного резонатора, использовался прямоугольный волновод сечением  $3,6 \times 1,8 \text{ мм}^2$  и диэлектрический капилляр из фторопласта с внешним диаметром 1,5 мм и внутренним 1,1 мм. Капилляр проходил через середину широких стенок волновода (рис. 1). Для измерения затухания волноводной моды  $H_{10}$ , проходящей через резонатор, использовался измеритель стоячей волны типа P2-69, работающий в диапазоне 54...78 ГГц. Для измерения высокого уровня поглощения измерительная установка была дополнительно оснащена усилителем. Предварительно находилось затухание сигнала, проходящего по волноводу с воздушным заполнением капилляра. На фоне затухания  $\sim 1 \text{ дБ}$  заметных амплитудно-частотных изменений во всем диапазоне анализируемых частот не обнаруживалось. Заполнение капилляра водой приводило к появлению резонанса поглощения с ослаблением сигнала до 50 дБ. При резонансе производились измерения частоты и величины затухания. Применение в измерительном тракте эталонного поляризационного аттенюатора позволило снизить погрешность измерения затухания до уровня 0,5 дБ.

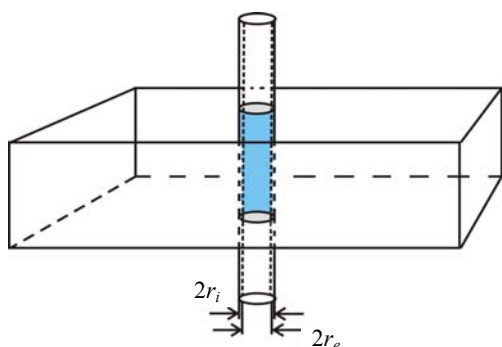


Рис. 1. Капиллярно-волноводный резонатор

Предварительно находилось затухание  $A$  на резонансной частоте с воздушным заполнением капилляра, когда затухание составляло  $\sim 1 \text{ дБ}$ . Для описания частотной нормированной характеристики резонансного поглощения электромагнитной энергии  $K(f)$  можно использовать соотношение [10]

$$K(f) = \left[ 1 + \left| \frac{f - f_0}{\Delta f / 2} \right|^q \right]^{-1},$$

которое при феноменологическом параметре резонансной характеристики  $q = 2$  совпадает с час-

тотной характеристикой одиночного резонансного контура, где  $f_0$  – частота резонанса, а  $\Delta f$  – его ширина. По известным значениям частот и коэффициентов передачи капиллярно-волноводного резонатора оценивается параметр резонансной характеристики  $q$ . Во всех проводимых экспериментах  $q$  равнялось  $\sim 2$ . Таким образом, капиллярно-волноводный резонатор по своим частотным свойствам эквивалентен одиночному резонансному контуру.

Для воды и водных растворов наблюдалось резонансное поглощение на частотах 63...66 ГГц с шириной области потерь 20–65. Для примера на рис. 2 приведены частотные зависимости ослабления сигнала для нескольких образцов воды. Наибольшая глубина провала резонансной кривой поглощения электромагнитной энергии наблюдалась для дистиллята двойной перегонки и составляла  $\sim 43 \text{ дБ}$  (кривая 1), для дистиллята однократной перегонки она уменьшилась до 41 дБ (кривая 2), а для артезианской воды составила 37 дБ (кривая 3).

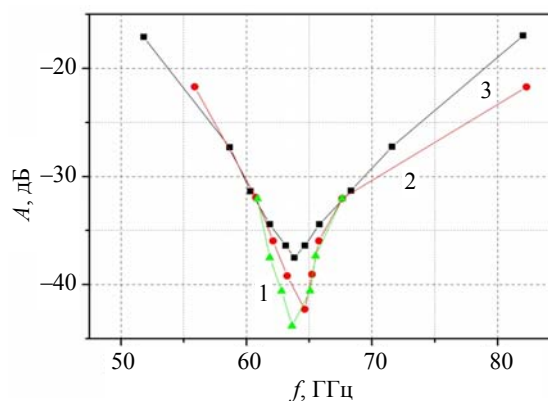


Рис. 2. Характеристики резонансного поглощения различных типов воды: 1 – вода минеральная 721; 2 – дистиллят; 3 – бидистиллят

Второй из рассматриваемых в работе методов используется для прямого измерения постоянной составляющей показателя преломления  $n$  жидкости. Он предполагает использование образцов жидкости, размеры которых превышают или сравнимы с длиной волны в свободном пространстве, на которой проводятся исследования, без применения специальных контейнеров, в которых заключен измеряемый образец. При этом непосредственно измеряется длина волны  $\lambda$  в жидкости на выбранной частоте  $f$ , а следовательно, и реальная часть коэффициента преломления  $n = \lambda_0 / \lambda$  ( $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве на частоте  $f$ ).

Устройство, позволяющее реализовать предложенную методику измерения коэффициента преломления, приведено на рис. 3.

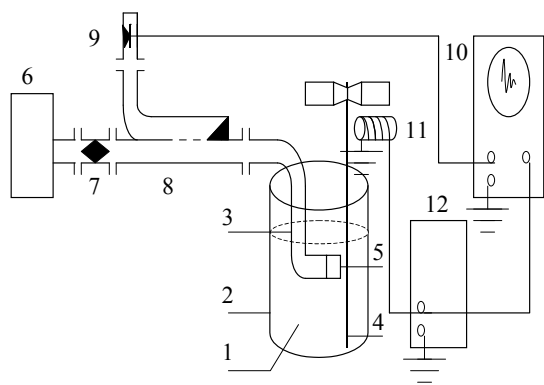


Рис. 3. Блок-схема измерительного стенда для определения диэлектрических свойств жидкостей

Жидкость 1, характеристики которой измеряются, располагается в контейнере в форме стакана 2. Непосредственно в жидкости располагается открытый конец волновода 3, прямоугольного поперечного сечения, излучающий сигнал частотой  $\omega = 2\pi f$ , принадлежащий области мм диапазона длин волн, и колеблющаяся стальная струна 4. Открытый конец волновода погружается в жидкость на глубину порядка длины волны в свободном пространстве. Чтобы исключить попадание измеряемой жидкости в волноводный излучатель, его открытый конец заполнен фторопластом 5. Излучатель запитывается от СВЧ-генератора 6. В цепь питания излучателя включены установочный аттенюатор 7 и направленный ответвитель 8. В ответвитель поступает сигнал, отраженный от открытого конца волновода (излучателя) и металлической струны, расположенной перед ним. Измерительное плечо направленного ответвителя нагружено кристаллическим детектором 9, сигнал с которого подается на вертикально отклоняющие пластины измерительного осциллографа 10. Стальная струна 4 приводится в колебательное движение в  $E$ -плоскости излучателя (то удаляясь, то приближаясь к излучателю) электромагнитом 11, питаемым сигналом звукового генератора 12. Поэтому интерференционный сигнал от двух отражателей – открытого конца волновода и струны – отражает изменение разности фаз сигналов от этих объектов. Для синхронизации сигнала, наблюдаемого на осциллографе, на его горизонтально-отклоняющие пластины подается синхронизирующий сигнал звукового генератора 12. Толщина колеблющейся струны составляет несколько десятых долей миллиметра, и амплитуда  $\tilde{A} = B(1 + m \cos \Omega t)e^{i(\omega t + \theta)}$  отраженного от нее сигнала на детекторе в измерительном плече направленного ответвителя во много раз меньше амплитуды сигнала  $A_0 = A_1 e^{i\omega t}$ , отраженной от открытого конца волновода. Таким образом,

высокочастотная часть макета представляет собой гомодинную систему [11], применяемую для приема слабых сигналов, в частности, при изучении газоразрядной плазмы [12], и в некоторой мере напоминает метод раздвигания отражений [13]. Однако абсолютная величина модуля коэффициента отражения от неоднородностей и точность ее измерения не имеет в предлагаемом методе существенного значения, так как в измерениях используется лишь разность фаз коэффициентов отражения от двух неоднородностей, одна из которых перемещается. Для стальной струны диаметром 0,3 мм и длиной 120 мм собственная частота механических колебаний составляла  $\Omega \sim 30$  Гц. Эта частота выбиралась для возбуждения колебаний струны с помощью звукового генератора. Для измерения длины волны в жидкости струна 4 вместе с электромагнитом 11 закреплялись на подвижной в направлении оси волноводного излучателя каретке, месторасположение которой фиксировалось микрометром. Осциллограмма интерференционного сигнала, отраженного от открытого конца волновода и колеблющейся струны, представляет собой симметричную относительно точки максимального приближения к излучателю гармоническую кривую, амплитуда которой возрастает при приближении струны к излучателю и спадает, когда струна удаляется от излучателя.

Для примера на рис. 4, а представлена осциллограмма части интерференционного сигнала, полученная при отклонении струны в воздухе на четверть периода частоты  $\Omega$  ее колебания при удалении струны от излучателя. Часть осциллограммы, соответствующая приближению струны к излучателю, симметрична этой части и на рисунке не приведена. Осциллограммы для толуола и бензола представлены для полного периода колебаний струны как при приближении ее к излучателю, так и при ее удалении. При сравнении рис. 4, б, в с рис. 4, а видно, что в жидкости амплитуда колебаний струны уменьшается за счет вязкости жидкости, а амплитуда интерференционного сигнала уменьшается с перемещением струны быстрее, чем в воздухе за счет поглощения в жидкости. Так как амплитуда колебания струны в толуоле и ацетоне была примерно равной и составляла  $\sim 1,5$  мм, можно заключить, что при перемещении струны на такое расстояние сигнал в ацетоне поглощается полностью, в то время как в толуоле сигнал распространяется и за пределы этого расстояния. Из этих осциллограмм следует, что для измерения электрических характеристик жидкостей с электромагнитными потерями, сравнимых с потерями в ацетоне, желательно иметь большую мощность СВЧ-источника (или большую чувствительность приемной аппаратуры), а для жидкостей с высокой вязкостью, но

с электромагнитными потерями, сравнимыми с потерями в бутаноле, необходимо увеличить амплитуду колебаний струны.

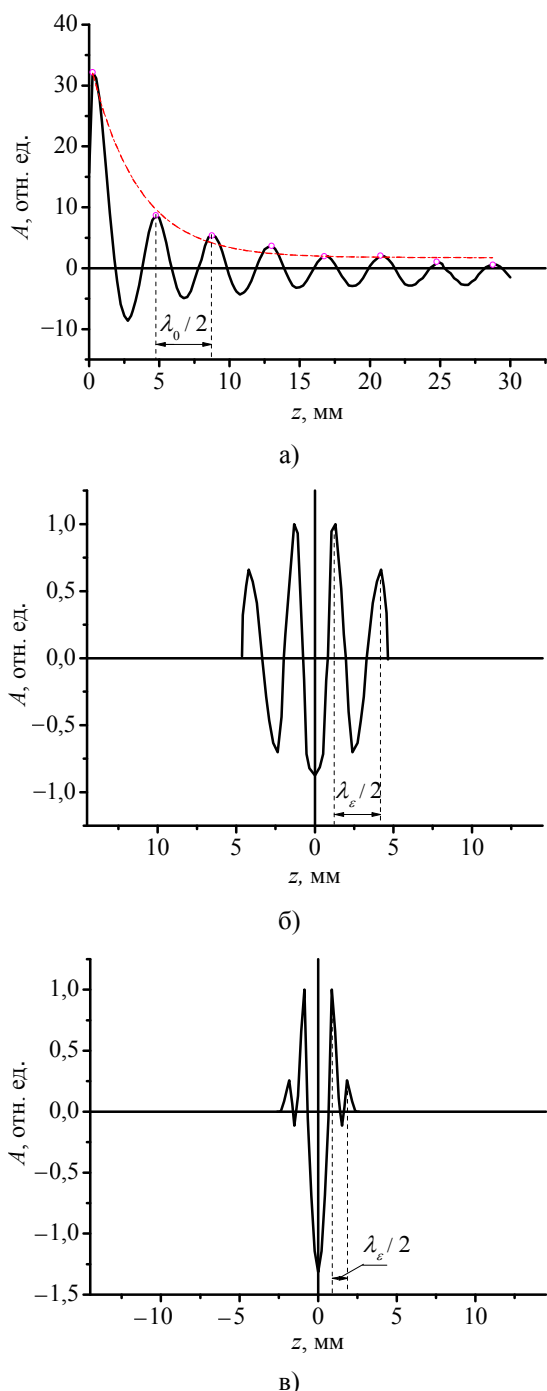


Рис. 4. Осциллограмма интерференционного сигнала, отраженного от среза волновода и колеблющейся струны: а) – в воздухе; б) – в толуоле; в) – в ацетоне

Следует отметить, что расстояние в пространстве между максимумами интерференционного сигнала или между минимумами соответствует синфазному или противофазному совпадению сигналов, отраженных от открытого конца

волноводного излучателя и струны. При этом важным является эквидистантное расположение изофазных значений излучаемого сигнала в пространстве [14]. Снижение амплитуды волны, отраженной от струны, и интерференционного сигнала не влияет на расстояние между максимумами или минимумами осциллограммы. Факторы изменения амплитуды сигнала, отраженного от струны, могут влиять лишь на измерения коэффициента отражения от нее, что для фазовых измерений в интерференционной картине не имеют значения. Собственная резонансная частота струны, естественно, зависит от вязкости измеряемой жидкости, поэтому для установления устойчивых колебаний струны частота звукового генератора требует соответствующей корректировки.

Для определения геометрического расстояния между максимальными или минимальными значениями интерференционной зависимости используется следующий прием. Микрометром фиксируется положение подвижной каретки, на которой закреплена струна с возбуждаемой индукционной катушкой 11, при расположении струны на максимальном расстоянии до излучателя (т. е. в центре симметрии осциллограммы) с синфазным или противофазным значением сигнала интерференции. Затем осуществляется передвижение каретки в направлении излучения волны в положение, при котором фиксируется очередное положение струны, соответствующее синфазному или противофазному значению сигнала в точке максимального ее приближения к излучателю (т. е. в центре симметрии осциллограммы). Это положение указывает на перемещение струны на величину, кратную четверти или половине длины волны, которое и фиксируется микрометром. Таким способом длина волны в жидкости непосредственно измеряется с точностью до десятой доли миллиметра, без каких-либо решений обратной задачи диэлектromетрии.

**2. Результаты исследований.** Для сравнения качественного поведения измеряемых характеристик слабых водных растворов этими двумя методами были взяты образцы четырех источников минеральных вод харьковского региона («Шатиловская» – I, «Шестаковская» – II, «Роганская» – III и «Рай-Еленовская» – IV), а также дистиллированная вода – V и вода из водопроводной сети – VI (рис. 5). Проведено сопоставление результатов измерений длин волн, полученных для взятых образцов воды, двумя методами – колеблющейся струны в жидкости (кривая 1), и по частоте поглощения при капиллярно-волноводном резонансе (кривая 2). Показано, что коэффициент парной корреляции этих зависимостей составляет  $\sim 0,7$ , а при исключении результатов измерений воды из водопроводной сети, которая была взята из разных кранов, достигает 0,9.

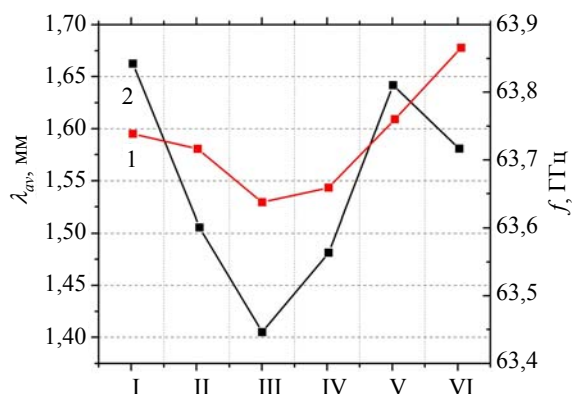


Рис. 5. Длина волны в воде и частота резонанса поглощения для разных типов воды: 1 – длина волны  $\lambda_{ав}$ , измеренная методом колеблющейся в жидкости струны; 2 – частота  $f$ , ГГц резонанса поглощения, измеренная методом капиллярно-волноводного резонанса

**Выводы.** Проведенными исследованиями установлена возможность экспресс-идентификации в мм диапазоне волн слабых водных растворов с использованием капиллярно-волноводного резонанса и метода колеблющейся струны. Важно, что измеренные характеристики при исследовании образцов различных типов воды разными методами на различных длинах волн мм диапазона указывают на неплохое качественное соответствие поведения измеряемых электрических характеристик жидкостей. Особенностью метода колеблющейся струны в жидкости является несложная аппаратура, используемая при измерениях, простота получения данных о длине волны в жидкости, отсутствие необходимости в сложной математической обработке результатов измерений электрических характеристик жидкости.

Отличительной особенностью обоих методов является достаточная чувствительность к наличию в воде микропримесей, что позволяет производить экспресс-анализ питьевой воды.

Предлагаемые методы для экспресс-идентификации слабых водных растворов, могут найти широкое применение в медицине, в фармакологической и пищевой промышленности для анализа биоматериалов, фармакологических препаратов, виноматериалов и т. д.

#### Библиографический список

1. Dielectric plug-loaded two-port transmission line measurement technique for dielectric property characterization of granular and liquid materials / K. J. Bois, L. F. Handjojo, A. D. Benally et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1999. – 48, N 6. – P. 1141–1148.
2. Accurate microwave resonant method for complex permittivity measurements of liquids / B. Yu. Kapilevich, S. G. Ogourtsov, V. G. Belenky et al. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2000. – 48, N 11. – P. 2159–2164.
3. Afsar M. N. Permittivity measurement of low and high loss liquids in the frequency range of 8 to 40 GHz using waveguide transmission line technique / M. N. Afsar, N. Suwanvi-

- san, Y. Wang // Microwave and Optical Technology Letters. – 2006. – 48, N 2. – P. 275–281.
4. Данылюк Ю. Л. Интерферометр Фабри-Перо миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов / Ю. Л. Данылюк, Ф. А. Коледа, О. Н. Трубицына // Приборы и техн. эксперимента. – 1970. – № 6. – С. 149–151.
5. Лубяко Л. В. Исследование электрических и магнитных свойств веществ в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн / Л. В. Лубяко // Изв. вузов. Радиофизика. – 1971. – 14, № 1. – С. 133–137.
6. Фурашов Н. И. Исследование диэлектрических свойств воды в диапазоне частот 75–120 ГГц / Н. И. Фурашов, В. Е. Дудин, Б. А. Свердлов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – 49, № 6. – С. 489–501.
7. Беляков Е. В. Резонансный КВЧ-диэлектриметр для поглощающих жидкостей / Е. В. Беляков // Электронная техн. Сер. Электрон. СВЧ. – 1987. – Вып. 7(401). – С. 51–53.
8. The resonant method for water solution complex permittivity measurement / Yu. F. Filippov, A. Ya. Kirichenko, E. V. Krivenko et al. // The Fifth Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies (MSMW'2004): Proc. – Kharkov, 2004. – Vol. 1. – P. 859–861.
9. Резонансный метод измерения комплексной диэлектрической проницаемости водных растворов / А. Я. Кириченко, Е. В. Кривенко, В. И. Луценко и др. // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – 11, № 9. – С. 34–41.
10. Температурно-диэлектрическая спектроскопия водных растворов с использованием метода капиллярно-волноводного резонанса / А. Я. Кириченко, Е. В. Кривенко, В. И. Луценко и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – 51, № 8. – С. 711–716.
11. King R. J. A homodine system for the measurement of microwave reflection coefficients / R. J. King, R. I. Christopherson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1970. – 18, N 9. – P. 658–660.
12. Голант В. Е. Сверхвысокочастотные исследования плазмы / В. Е. Голант. – М.: Наука, 1968. – С. 74.
13. Рейзенкинд Я. А. Состояние и перспективы развития методов измерения параметров двухполосников и четырехполосников на СВЧ / Я. А. Рейзенкинд, В. А. Следков // Зарубеж. радиоэлектрон. – 1988. – № 8. – С. 30–60.
14. Field distribution in a flanged parallel-plate waveguide / K. Hongo, Y. Ogawa, T. Itoh, K. Ogusu // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1975. – AP-23, N 4. – P. 558–560.

Рукопись поступила 31.10.2014.

G. V. Golubnichaya, A. Ya. Kirichenko,  
E. V. Krivenko, V. I. Lutsenko

#### THE USE OF TWO EXPRESS METHODS OF IDENTIFICATION OF WATER FROM THE NATURAL SOURCES IN MILLIMETER-WAVE RANGE

Each of the numerous dielectric methods has its limitations on use, namely, the aggregate state of the substance, the range of electromagnetic spectrum of used frequencies, the quantities of dielectric permittivity and electromagnetic losses in the substance, etc. In particular, the opportunities of express-methods of dielectrometry of liquid substances with high losses in the millimeter (mm) range of the electromagnetic spectrum are currently limited. New features in this area are opened when advancing the capillary-waveguide method to shorter wavelengths mm range and when using the proposed method of the vibrating string. It is shown that these methods allow to conduct the determination of the real component of the permittivity in the strongly absorbing liquids (weak aqueous solutions). As

identification parameters in the capillary-waveguide method, the amplitude of measured resonance signal is selected, and in the method of the vibrating string the wavelength in the test liquid is selected (in this case, the water samples were taken from some sources of the Kharkov region). The high value of correlation of the identification parameters of these two methods, which confirms the efficiency and authenticity of the use of these express-methods for identification of liquids with high electromagnetic losses in mm wavelength range is set. It is shown that the proposed methods for rapid identification of weak aqueous solutions, for example, pharmacological preparations, wine materials, etc can be applied.

**Key words:** capillary-waveguide resonance, method of vibrating string, permittivity.

Г. В. Голубничая, О. Я. Кириченко,  
О. В. Кривенко, В. І. Луценко

### ВИКОРИСТАННЯ ДВОХ ЕКСПРЕС-МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВОДИ ПРИРОДНИХ ДЖЕРЕЛ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ХВИЛЬ

Кожен з численних діелектрометричних методів має свої обмеження з використання, а саме: агрегатний стан

речовини, діапазон електромагнітного спектра частот, що використовуються, величини діелектричної проникності й електромагнітних втрат в речовині і т. д. Зокрема, на сьогодні обмежено можливості експрес-методів діелектрометрії рідких речовин з великими втратами в міліметровій (мм) області електромагнітного спектра. Нові можливості в цій області відкриваються при просуванні капілярно-хвилеводного методу в короткохвильову область мм діапазону та при використанні запропонованого методу струни, що коливається. Показано, що ці методи дозволяють проводити визначення дійсної складової діелектричної проникності в сильно поглинаючих рідинах, якими є слабкі водні розчини. Ідентифікаційними параметрами в капілярно-хвилеводному методі обрано амплітуду вимірюваного резонансного сигналу, а в методі струни, що коливається, – довжину хвилі в досліджуваній рідині, в даному випадку зразків води, взятих з деяких джерел Харківського регіону. Встановлено високе значення кореляції ідентифікаційних параметрів цих двох методів, що підтверджує ефективність і вірогідність використання цих експрес-методів для ідентифікації рідин з високими електромагнітними втратами в мм діапазоні довжин хвиль. Показано можливість використання пропонуваного методу для експрес-ідентифікації слабких водних розчинів, наприклад фармакологічних препаратів, виноматеріалів і т. д.

**Ключові слова:** капілярно-хвилеводний резонанс; метод струни, що коливається; діелектрична проникність.