

УДК 621.317.318

И. А. ПОСТЕЛЬНИК, С. П. ШАЛАМОВ

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРЕДГРОЗОВОЙ ОБСТАНОВКЕ

Приведен сравнительный анализ средств измерения напряженности электростатического поля в атмосфере Земли в предгрозовой обстановке. Рассмотрены физические основы метода измерения напряженности электростатического поля посредством электрической индукции. Указаны основные преимущества и недостатки средств измерения, использующих метод электрической индукции. Содержится описание технологии микромеханических средств измерения напряженности электростатического поля. Показана возможность локального мониторинга предгрозовой обстановки, для определения вероятности возникновения молниевых разрядов за счет измерения электростатического поля, возникающего между заряженным облаком и поверхностью земли.

**Ключевые слова:** электростатическое поле, роторный вольтметр, вибрационный вольтметр, МЭМС технология, молния, заряды, электрическая индукция.

**Введение.** В атмосфере Земли всегда существует электрическое поле, которое создается отрицательным зарядом Земли. Характеристикой этого поля в любой точке служит напряженность  $E_0$  или градиент потенциала ( $E_0$  – производная от потенциала по нормали к поверхности Земли). У поверхности Земли напряженность  $E_0$  в среднем имеет значение 130 В/м. Электрическое поле атмосферы зависит от множества факторов (облаков, осадков, грозовой деятельности, условий местности и т.п.) и поэтому очень изменчиво. Градиент потенциала может меняться от нескольких десятков до сотен тысяч вольт на метр [1]. Заряд грозового облака связан с его поляризацией – концентрацией водяных паров восходящих потоков влажного воздуха на положительных и отрицательных ионах (центрах конденсации) и разделением заряженных капелек влаги. Электрические заряды элементов облака сильно искажают «нормальное» электрическое поле атмосферы. Резкие изменения этих объемных зарядов (особенно в грозовых облаках) сказываются на изменении электрического поля у земной поверхности. Для возникновения молнии необходимо, чтобы в относительно малом объеме облака образовалось электрическое поле с напряженностью, достаточной для начала электрического разряда (1 МВ/м), а в значительной части облака существовало бы поле со средней напряженностью, достаточной для поддержания начавшегося разряда (0,1–0,2 МВ/м) [1]. Так как в грозовом облаке в процессе его электризации возникают электрические поля, напряженность которых достигает нескольких сотен киловольт на метр то между облаком и Землей возникает искровые разряды в виде молний.

Измерение электрического поля атмосферы Земли позволяет производить локальный мониторинг предгрозовой обстановки определяя вероятность возникновения молниевых разрядов.

**Целью работы** является проведение сравнительного анализа средств измерения электростатического поля в атмосфере Земли в предгрозовой обстановке.

**Принцип измерения.** Если между изолированным электродом  $H$  и двумя заземленными электродами  $SR$  и  $A$  (рис. 1) приложить разность потенциалов  $U$ ,

то возникнет электростатическое поле, которое создаст на поверхности измерительного электрода  $A$  напряженность  $E(f)$ , зависящую от элемента поверхности  $df$ . Если поле создается в газе с практически неполярными молекулами или вакууме, то на поверхности электрода  $A$  индуцируется заряд плотностью  $\sigma = \epsilon_0 E(f)$  и общий заряд на электроде площадью  $F$  [1]:

$$q(F) = \int_F \sigma df = \epsilon_0 \int_F E(f) df. \quad (1)$$

Заряд  $q(f)$  при формировании поля или изменении во времени напряжения  $U(f)$  вызывает ток, который должен проходить по соединительному проводнику к электроду  $A$ , и формулу (1) целесообразно записать в более общем виде

$$q(F, t) = \epsilon_0 \int_F E(f, t) df. \quad (2)$$

Вместо напряженности  $E(f, t)$  для конкретной конфигурации поля можно записать напряжение  $U(f)$ , рассчитываемое как интеграл  $\int E(s) ds$  по пути между электродами  $H$  и  $A$ . Заряд  $q$  определяется с использованием частичной емкости  $C'$ , которая обусловлена потоком силовых линий, заканчивающихся на площади электрода  $A$ , заключенного в объеме, ограниченном штриховыми линиями на рис. 1:

$$q(F, t) = C'(F) \int_s E(s, t) ds = C'(F) U(t). \quad (3)$$

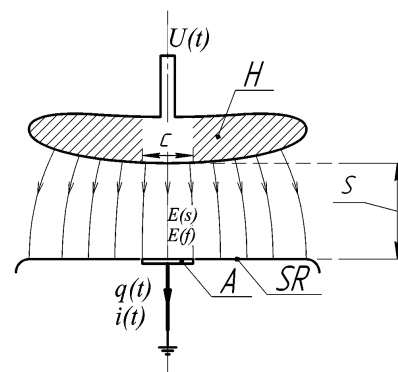


Рисунок 1 – Электродная система индукционного вольтметра

Из (2) и (3) получаем

$$C'(F) = \frac{q(F, t)}{U(t)}. \quad (4)$$

Если между электродами имеется однородное поле, то из (4) получается известная формула для плоского конденсатора

$$C'(F) = \epsilon_0 \frac{F}{s}. \quad (5)$$

Следовательно, наведенный заряд  $q(f, t)$  может быть использован для измерения как напряженности, так и напряжения. Если в дальнейшем иметь в виду (3), то легко показать, что изменение заряда во времени происходит как за счет изменения напряжения  $U(t)$ , так и за счет изменения площади электрода во времени  $F(t)$ . При однократном изменении, например, при включении или отключении источника напряжения или открытии и закрытии электрода  $A$  заземленной металлической пластиной, как это делал Вильсон при измерении напряженности поля земли [2], трудно измерить индуцированный заряд. Однако при непрерывном изменении соответствующим прибором можно измерить непрерывный ток:

$$i(F, t) = \frac{dq}{dt}. \quad (6)$$

Все разновидности приборов, основанных на индукционном принципе, описываются приведенными исходными уравнениями (1) – (6). Они отличаются друг от друга лишь тем, какое напряжение (или напряженность) измеряется: постоянное, синусоидальное переменное или изменяющееся во времени по любому закону. Реализуемое конструктивным путем изменение во времени емкости  $C'$  представляет собой очень результативное вспомогательное средство улучшения характеристик устройства, что будет продемонстрировано некоторыми примерами.

**Роторный вольтметр.** Роторный вольтметр основан на принципе индукции зарядов. Все измерительные приборы, работающие по принципу индукции, не потребляют от источника измеряемого напряжения активной мощности, если электрическое поле является чисто электростатическим или создается в газовом пространстве при слабой напряженности поля, когда не возникают частичные разряды и объемный заряд. Это условие должно выполняться всегда, так как заряд, необходимый для измерения, создается за счет индукции, а не движения свободных носителей зарядов в электрическом поле. Поскольку при измерении не потребляется активной мощности, то эти приборы следует отнести к категории приборов с высоким входным сопротивлением, не свойственным даже самым совершенным электронным приборам. Роторные вольтметры достаточно широко применялись для измерения высокого напряжения в генераторах Ван де Графа [2]. В этих вольтметрах использовался компенсационный принцип измерения. Этот принцип требует наличия двух вращающихся крыльчаток и дополнительного электрода, на который необходимо подать компенсирующее напряжение.

Обычно величина этого напряжения составляет

несколько киловольт. Для минимизации размеров и упрощения конструкции можно отказаться от компенсационного принципа, так как требуемая точность заведомо обеспечивается и прямыми методами.

Конструкция, использованная уже в 1937 г. для измерения постоянного напряжения до 2,16 МВ, показана на рис. 2. [2].

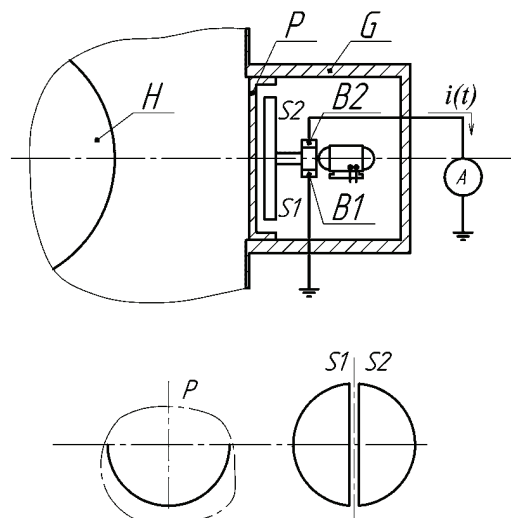


Рисунок 2 – Роторный вольтметр [2]

При постоянной частоте вращения двигателя две металлические секторные шайбы  $S_1$  и  $S_2$ , изолированные между собой, попеременно вводятся в область электрического поля, создаваемого приложенным к электроду  $H$  постоянным напряжением. Непрерывное изменение емкости создается за счет металлической пластины  $P$ , закрепленной на корпусе прибора  $G$  и имеющей полукруглый вырез. Обе секторные шайбы  $S_1$  и  $S_2$ , служащие в качестве измерительных электродов, образуют с коммутатором и его щетками  $B_1$  и  $B_2$  изолированную от вала двигателя, но находящуюся под потенциалом земли систему. Амперметром измеряется ток, возникающий между секторными шайбами. Используемые в данном устройстве вращающиеся секторные шайбы, служащие измерительными электродами, обладают недостатком, связанным с необходимостью применения вращающегося коммутатора. Поэтому гораздо чаще встречаются конструкции, где электрод, на котором наводится заряд неподвижен, а над ним вращается заземленная секторная шайба необходимой конфигурации, периодически закрывающая и открывающая измерительный электрод, причем секторная шайба полностью перекрывает измерительный электрод. Измерение переменного тока, проходящего между измерительным и заземленным электродами, временная зависимость которого обусловлена формой электродов и изменением емкости, а значение – измеряемым напряжением, не вызывает трудностей.

Так как индуцированный на секторных шайбах заряд при постоянной частоте вращения двигателя увеличивается или уменьшается по линейному закону (рис. 3), то при постоянном напряжении согласно (6) в измерительной цепи проходит постоянный ток:

$$I = U \frac{\Delta C}{T_c/2} = 2f_c \Delta C U. \quad (7)$$

Частота изменения емкости:

$$f_c = 1/T_c = n/60, \quad (8)$$

где  $n$  – количество оборотов в минуту.

Линейная связь между током и напряженностью позволяет достигать высокой разрешающей способности устройства.

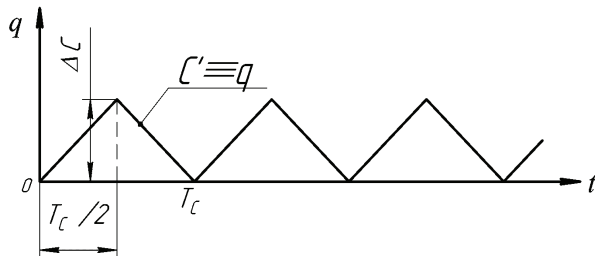


Рисунок 3 – Изменение во времени индуктированного заряда на измерительной пластине роторного вольтметра

В автономной системе мониторинга грозовой активности трудности применения роторного вольтметра для измерения электростатического поля в атмосфере связано с высокой потребляемой мощностью от источника автономного питания и наличием механических частей. Но низкая стоимость и простота конструкции отчасти компенсируют эти недостатки.

**Вибрационный вольтметр.** В системе металлических электродов с электрическим полем между ними можно изменять емкость за счет периодического изменения пути интегрирования. На этом и основан принцип работы вибрационных вольтметров. Электрод совершает синусоидальные колебания, при этом меняется емкость. При каждом изменении емкости через сопротивление  $R$  протекает заряд  $\Delta C U$ , что дает на частоте колебаний  $f_c$  среднее значение тока:

$$i = \frac{dq}{dt} = f_c \Delta C U. \quad (9)$$

**Измерения электростатического поля на базе МЭМС технологии.** Следующим этапом развития роторного или вибрационного вольтметра является реализация подобных конструкций в микро масштабе. Технология микро электромеханических сенсоров (МЭМС) позволяет разработать вибрационный вольтметр в виде кристалла микросхемы размером 5 x 5 мм. Функциональная схема и внутренняя структура микро механического электростатического МЭМС вольтметра изображена на рис. 4 и рис. 5 [6].

Эта система использует тот же принцип измерения электростатического поля что и роторный вольтметр – закон электрической индукции [7]. При вибрационном движении подвижной части микро механической структуры, при воздействии электростатического поля происходит индукция зарядов на поверхность пластины переменного конденсатора который соединен через интерфейсную часть микросхемы со схемой усиления.

Емкостная МЭМС структура продуцирует ток,

который пропорциональный амплитуде и полярности приложенного внешнего электрического поля. Ток усиливается и преобразовывается в напряжение схемой усиления для дальнейшей оцифровки и обработки полученных данных. На рис. 6 представлено изображение реального микро механического вольтметра электростатического поля.

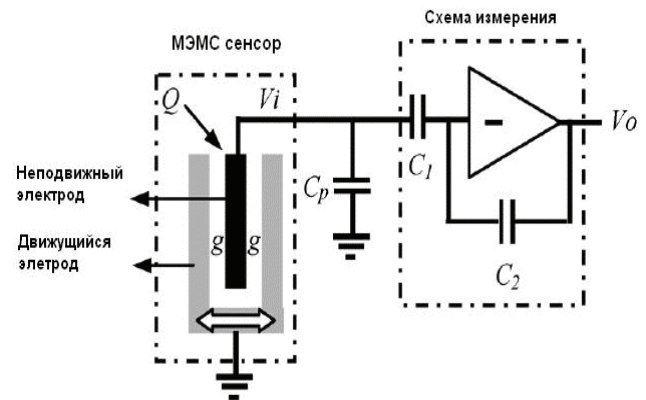


Рисунок 4 – Функциональная схема микро механического вольтметра

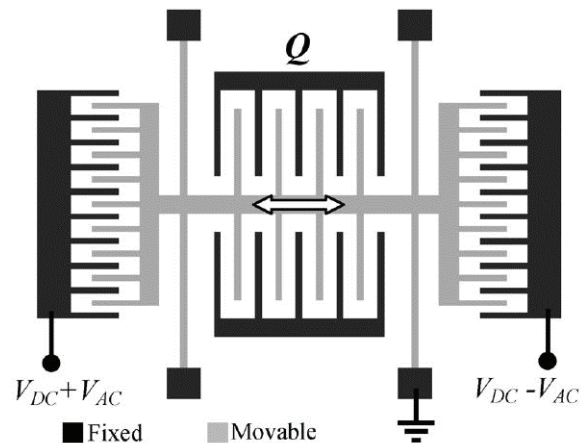


Рисунок 5 – Внутренняя структура микро механического вольтметра

Вибрация подвижных частей создается путем прикладывания переменного напряжения к актуатору, который создает движущую силу. Для максимальной амплитуды вибрации необходимо, чтобы частота приложенного напряжения соответствовала резонансной частоте актуатора. Частота генерируемого тока на выходе емкостной структуры пропорциональна частоте напряжения приложенного к актуатору.

Данная МЭМС конструкция преобладает рядом преимуществ в отношении к роторным и вибрационным вольтметрам описанным в [2]. Основное достоинство МЭМС вибрационных вольтметров заключается в микронных размерах их конструкции. Это повышает уровень износостойкости микро механических движущихся частей; снижает энергопотребление, что дает возможность использовать аккумуляторное питание без частой подзарядки, а измерительная часть устройства имеет гораздо меньшие габариты, и представляет собой микросхему в малогабаритном корпусе, а сле-



довательно обладает высокой разрешающей способностью [7].

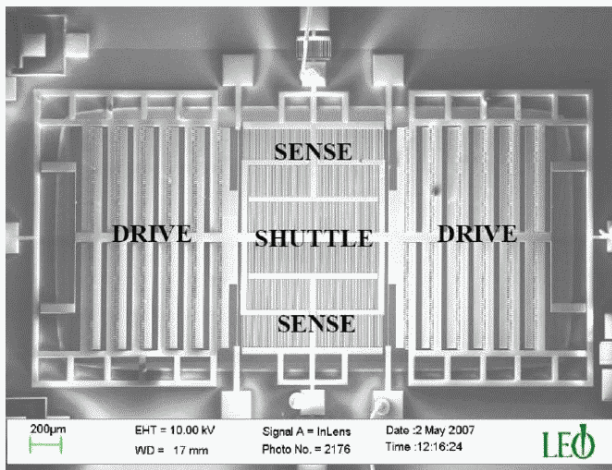


Рисунок 6 – Фото микроскопической структуры реального микромеханического вольтметра

**Реализация роторного вольтметра.** На рис. 7 представлен внешний вид роторного вольтметра для измерений электростатического поля атмосферы Земли в предгрозовой обстановке. Данная конструкция позволяет производить измерения электрического поля атмосферы Земли напряженностью от 100 В/м и регулированием чувствительности за счет изменения частоты вращения экранирующего электрода. В конструкции роторного вольтметра неподвижный диск и вращающаяся заземленная металлическая крыльчатка установлены соосно и перпендикулярно линиям напряженности электрического поля. Измерительные пластины изготовлены из проводящего материала и изолированы от заземленных поверхностей. Зазор между измерительными пластинами и экранирующим электродом достигает 1 мм. Для увеличения чувствительности роторного вольтметра зазор можно уменьшить. Крыльчатка имеет четыре крыла. Вращаясь, они либо открывают, либо экранируют обкладки от действия электрического поля. Для обеспечения процентной точности измерений необходимо поддерживать скорость вращения крыльчатки не хуже, чем с 20 %-й погрешностью.

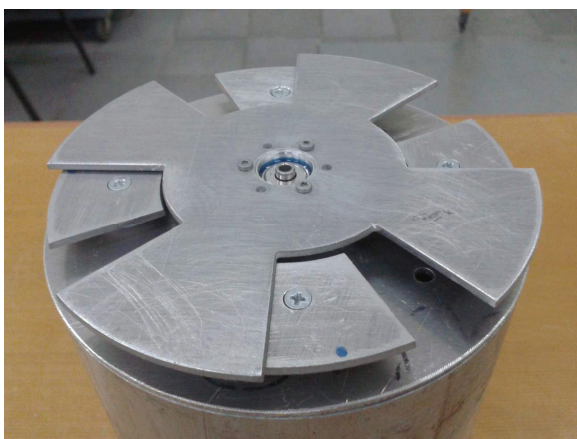


Рисунок 7 – Внешний вид конструкции роторного вольтметра

Роторный вольтметр реализован на основе малогабаритного, высокооборотного, прямоприводного электродвигателя (такие двигатели применяются в приводах винчестерских дисков и в видеомагнитофонах). Его применение позволило разработать вольтметр с малыми размерами.

**Выводы.** В статье показана возможность локального мониторинга предгрозовой обстановки, определяя вероятность возникновения молниевых разрядов за счет измерения электростатического поля, возникающего между заряженным облаком и землей. Приведен принцип измерения электростатического поля. Описана конструкция роторного и вибрационного вольтметра. Также в статье приведен метод измерения электростатических полей на базе MEMS технологии. На основе проведенного анализа, сделаны следующие выводы. Роторный вольтметр, при его использовании в качестве измерителя электростатического поля атмосферы в предгрозовой обстановке, обладает рядом преимуществ, например низкая стоимость, простота конструкции, регулирование чувствительности. К недостаткам можно отнести следующее: необходимость обслуживания в связи с наличием механических частей конструкции, так как устройство находится под воздействием атмосферных факторов, высокая потребляемая мощность от источника питания. Основные преимущества MEMS технологии для измерения электростатических полей, как развитие вибрационных вольтметров, следующие: высокая чувствительность, износостойкость, низкая потребляемая мощность от источника питания, малогабаритная конструкция. Недостатки: слабая помехоустойчивость к сильным импульсным электромагнитным полям, высокая стоимость. В результате сравнительного анализа преимуществ и недостатков средств измерения электростатического поля, был реализован роторный вольтметр.

**Список литературы:** 1. Кравченко В. И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства / В. И. Кравченко // Х.: Изд-во «НТМТ», 2010. – С. 22-28. 2. Бейер М. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / М. Бейер, В. Бек, К. Меллер, В. М. Цангль // Энергоатомиздат, 1989. – С. 438-441. 3. Кириллов В. Ю. Технические средства испытаний электромагнитной совместимости: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – С. 29-31. 4. Henderson J. E. The Use of the Rotary Voltmeter for Measurements up to 830 kilovolts / J. E. Henderson, W. H. Goss, J. E. Rose // Review of Scientific Instruments. – 1992. – Vol. 6. – P. 63–65. 5. Куксанов Н. К. Малогабаритный роторный вольтметр, используемый в системах измерения и стабилизации ускоряющего промышленных ускорителей электронов / Н. К. Куксанов, П. И. Немытов, Ю. И. Голубенко // Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, 2010. 6. Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology, 1st Edition / B. Bhattacharyya / Production Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata, 2015. 7. Riehl P. S. High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor solidstate sensor / P. S. Riehl, K. L. Scott, R. S. Muller, R. T. Howe // Proc. Actuator and Microsystem Workshop. – 2002. – P. 305–308. 8. Zhaoying Z. Microsystems and nanotechnology / Z. Zhaoying, W. Zhonglin, L. Liwei // Tsinghua University Press. – Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. – P. 221-228.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kravchenko V. I. Molniya. Elektromagnitnyye faktory i ih porazhayushee vozdeystvie na tehicheskoye sredstva. Kravchenko V. I. Kharkiv: Izd-vo «NTMT». 2010. 22-28 Print.

2. Bejer M. Tehnika vysokih naprjazhenij: teoreticheskie i prakticheskie osnovy primenenija. Bejer M., Bjok V., Mjoller K., Caengl' V M. Jenergoatomizdat, 1989. 438-441 Print. 3. Kirillov V. Ju. Tehnicheskie sredstva ispytanij jelektromagnitnoj sovmestivosti: Uchebnoe posobie. Moscow: Izd-vo MAI, 2007. 29-31 Print. 4. Henderson J. E. The Use of the Rotary Voltmeter for Measurements up to 830 kilovolts. Henderson J. E., Goss W. H., Rose J. E. Review of Scientific Instruments. 1992. Vol. 6. 63-65 Print. 5. Kuksanov N. K. Malogabaritnyj rotornyj vol'tmetr, ispol'zuemij v sistemah izmerenija i stabilizacii uskorjajushhego promyshlennyh uskoritelej jelektronov. N. K. Kuksanov, P. I. Nemytov, Ju. I. Golubenko. Institut jadernoj fiziki im. G. I. Budkera SO RAN, 2010

Print. 6. Bhattacharyya B. Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology, 1st Edition. Bhattacharyya B. Production Engineering Department, Jadavpur University, Kolkata, 2015 Print. 7. Riehl P. S. High-resolution electrometer with micromechanical variable capacitor solidstate sensor. Riehl P. S., Scott K. L., Muller R. S., and Howe R. T. Proc. Actuator and Microsystem Workshop, 2002. 305-308 Print. 8. Zhaoying Z. Microsystems and nanotechnology. Zhaoying Z., Zhonglin W., Liwei L. Tsinghua University Press, Beijing and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012. 221-228 Print.

Поступила (received) 8.10.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Постельник Игорь Александрович**, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния», аспирант; тел.: (097) 166-33-59; email: gor132@i.ua.

**Postilnyk Igor Aleksandrovich**, Scientific Research & Design Institute «Molnia», postgraduate student; tel.: (097) 166-33-59; email: gor132@i.ua.

**Шаламов Станислав Павлович**, Научно-исследовательский проектно-конструкторский институт «Молния», инженер; тел.: (066) 62-60-187; email: shalamov.stas@mail.ru.

**Shalamov Stanislav Pavlovych**, Scientific Research & Design Institute «Molnia», engineer; tel.: (066) 62-60-187; email: shalamov.stas@mail.ru

УДК 621.317.39.084.2

**В. В. РУДАКОВ, А. А. КОРОБКО**

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВИДЕ СТУПЕНЧАТОГО КОАКСИАЛЬНОГО НЕОДНОРОДНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ДИЭЛЬКОМЕТРИИ ЖИДКИХ СРЕД В СВЧ ДИАПАЗОНЕ**

Проведены исследования электромагнитных процессов в ступенчатом неоднородном коаксиальном резонаторе. Исследования проведены для случая идеальных линий, по которым распространяется исключительно электромагнитные волны Т-типа. Получено обобщенное выражение для спектра резонансных частот, которое позволяет определить частоты резонанса при любых сочетаниях геометрических параметров и электрических характеристик элементов резонатора. Усовершенствована конструкция резонатора с целью получения минимального значения первой резонансной частоты при его минимальных размерах. Получено точное выражение для первой резонансной частоты исследуемого резонатора. Показано полное совпадение результатов исследований с полученными ранее результатами имитационного моделирования. Определена метрологическая характеристика резонатора – зависимость частоты первого резонанса от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, что позволяет применять его для диэлькометрии жидких сред в СВЧ диапазоне.

**Ключевые слова:** ступенчатый неоднородный резонатор, электромагнитные волны Т-типа, резонанс, спектр, резонансная частота, волновое сопротивление, диэлектрическая проницаемость.

**Введение.** Необходимость проведения диэлькометрических измерений жидких сред в СВЧ диапазоне обусловлена расширением номенклатуры жидких сред, для которых актуально определение влагосодержания.

Одним из методов измерений влагосодержания в жидких средах является диэлькометрический метод, суть которого заключается в измерении диэлектрической проницаемости исследуемой обводненной жидкости и сравнения этой величины с диэлектрической проницаемостью обезвоженной жидкости.

Разность этих диэлектрических проницаемостей, которая характеризует влагосодержание исследуемой жидкости, увеличивается как при увеличении влагосодержания, так и при увеличении разности диэлектрических проницаемостей самой обезвоженной жидкости и воды. Диэлектрическая проницаемость воды есть величина постоянная, что приводит к тому, что

чувствительность диэлькометрического метода при использовании низких частот радиодиапазона (до 3МГц) [1] максимальна при измерениях этим методом влагосодержания неполярных жидких сред.

В случае применения диэлькометрического метода на низких частотах для измерения влагосодержания полярных жидкостей его чувствительность резко уменьшается из-за уменьшения разницы диэлектрических проницаемостей исследуемой полярной жидкости и воды.

Расширение области применения диэлькометрического метода измерения влагосодержания на полярные жидкости требует перехода частот измерения в области СВЧ диапазона.

При этом частота измерений выбирается из следующих соображений. Максимальное значение частоты измерений ограничено дисперсионными свойствами воды как диэлектрика. Эти частота составляет ве-