

2. Bejer M. Tehnika vysokih naprjazenij: 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 КООКСИАЛЬНОГО 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-

личину до 2 ГГц (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  воды на этой частоте очень незначительно отличается от величины  $\epsilon = 81$ , соответствующей низкочастотному радиодиапазону).

С другой стороны, на частоте измерений полярная жидкость должна иметь диэлектрические характеристики неполярной ( $\epsilon \leq 3$ ), то есть должны проявляться инерционные эффекты ее поляризации.

Для большинства полярных жидкостей эта частота составляет величину  $\approx 10 \dots 200$  МГц.

На этих частотах измерительные преобразователи (ИП) для диэлькометрии с сосредоточенными параметрами имеют большие значения паразитных параметров, что делает их совершенно непригодными. Единственным выходом является применение ИП с распределенными параметрами. Но геометрические размеры традиционных ИП с распределенными параметрами (например, четвертьволнового резонатора) слишком велики для использования в указанном диапазоне частот. Именно задача разработки и исследования ИП с распределенными параметрами с уменьшенными размерами является первоочередной для реализации диэлькометрического метода измерения влагосодержания полярных жидких сред в СВЧ диапазоне.

В работе [2] было предложено использовать в качестве ИП ступенчатый неоднородный коаксиальный резонатор (СНКР), исследованию характеристик которого посвящается данная работа.

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Электромагнитным процессам и определению основных характеристик неоднородных резонаторов на отрезках регулярных линий передачи посвящено достаточно большое количество работ [3-13]. В этих работах был проведен теоретический анализ электромагнитных процессов в неоднородных резонаторах на основе нерегулярных линий коаксиального типа, а также освещены вопросы их инженерного расчета.

Вышеперечисленные работы ориентированы, в основном, на выполнение основных требований к резонансным системам, которые работают в радиотехнических устройствах генерации, передачи и приема электромагнитных колебаний [14]:

- частотная диапазонность;
- высокие значения добротности;
- хорошие фильтрующие свойства;
- высокая надежность и т.д.

В работе [2] были исследованы характеристики СНКР методом имитационного моделирования в среде MicroCap 8.

Полученные результаты позволили считать целесообразным использование СНКР в качестве ИП для целей определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне в силу выявленных преимуществ ИП в виде СНКР перед другими типами ИП:

- нулевые значения «слепой» емкости;
- существенное уменьшение первой резонансной частоты;
- существенное увеличение разброса частот пер-

вого и последующих резонансов.

Однако, имитационный метод дает численные решение и не позволяет провести оптимизацию СНКР, а также определить аналитическую зависимость основной метрологической характеристики СНКР для задач диэлькометрии – зависимость частоты от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости.

**Цель работы** – определение основной метрологической характеристики СНКР: зависимость его резонансной частоты от диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости, а также анализ применимости СНКР в качестве ИП для целей диэлькометрии жидких сред.

**Методика исследований.** В работе исследовался СНКР, типовое конструктивное исполнение которого представлено на рис 1.

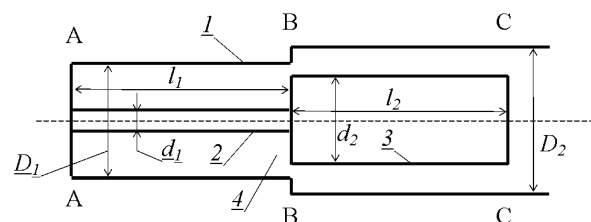


Рисунок 1 – Конструктивное исполнение ИП на базе СНКР в обобщенном виде: 1 – внешний цилиндрический электрод; 2 – внутренний электрод высокоимпедансной коаксиальной линии; 3 – внутренний электрод низкоимпедансной коаксиальной линии; 4 – исследуемая диэлектрическая среда

Конструкция СНКР представляет собой коаксиальную конструкцию из двух отрезков линий с различными волновыми сопротивлениями. Линия с максимальным волновым сопротивлением образованная наружным электродом 1 и внутренним электродом 2, закорочена с одной стороны и нагружена на линию с минимальным волновым сопротивлением, образованную электродами 1 и 3 и работающую в режиме холостого хода. Между наружным и внутренними электродами находится исследуемая жидкость с неизвестной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

Схема замещения для анализа ИП в виде СНКР приведена на рис.2.

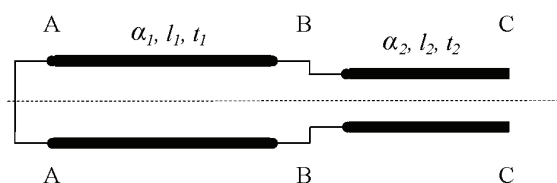


Рисунок 2 – Обобщенная схема замещения СНКР:  $Z_1, Z_2$  – волновое сопротивление;  $l_1, l_2$  – геометрические длины;  $t_1, t_2$  – времена пробега по линиям 1 и 2 соответственно

Волновые сопротивления линий 1 и 2 определяются следующими соотношениями соответственно:

$$Z_1 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} 60 \ln \left( \frac{D_1}{d_1} \right); \quad Z_2 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} 60 \ln \left( \frac{D_2}{d_2} \right), \quad (1)$$

где  $D_1, D_2$  – диаметры внешнего электрода;  $d_1, d_2$  –

диаметры внутреннего электрода.

Геометрические длины линий  $l_1$  и  $l_2$  связаны со временами распространения  $t_1, t_2$  соответственно:

$$t_{1,2} = \frac{l_{1,2}}{c\sqrt{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света.

Анализ метрологических характеристик был проведен на основе рассмотрения характеристик линий на участках А – В и В – С, а также стыка линий по сечению В – В.

В процессе анализа были сделаны следующие допущения:

- линии 1 и 2 идеальны и не имеют потерь;
- в линиях 1 и 2 основным типом волны является плоская Т волна.

Анализ показывает, что место стыка линий по сечению В – В есть место соединения регулярной короткозамкнутой линии 1 и регулярной разомкнутой на конце линии 2.

Входные сопротивления  $Z_K$  и  $Z_X$  этих идеальных линий чисто реактивные и определяются следующими соотношениями [11]:

$$Z_K = jZ_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right); \quad (3)$$

$$Z_X = -jZ_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\lambda$  – длина волны;  $Z_K$  – входное сопротивление линии 1 (короткозамкнута на конце);  $Z_X$  – входное сопротивление линии 2 (разомкнута на конце).

При резонансе  $Z_K + Z_X = 0$ , что приводит к следующему соотношению:

$$Z_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) = Z_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right). \quad (5)$$

Значение  $Z_1, Z_2$  и  $l_1, l_2$  целиком определяются конструкцией ИП в виде СНКР, значение  $\lambda$  неизвестно.

При  $Z_2 = mZ_1$  ( $0 < m < 1$ ) и  $l_2 = nl_1$  ( $n > 0$ ) соотношение (5) принимает следующий вид:

$$Z_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) = mZ_1 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right). \quad (6)$$

Уравнение (6) относительно  $\lambda$  не имеет точных аналитических решений, поэтому дальнейший анализ оптимальных величин  $Z_1, m$ , и  $n$  был проведен исходя из того, что  $Z_K$  в выражении (3) представляет собой реактивный импеданс некой эквивалентной индуктивности  $L_{\text{Э}}$ , а  $Z_X$  в выражении (4) представляет реактивный импеданс некой эквивалентной емкости  $C_{\text{Э}}$ .

То есть:

$$j\omega L_{\text{Э}} = Z_K = jZ_1 \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right); \quad (7)$$

$$\frac{1}{j\omega C_{\text{Э}}} = Z_X = -jZ_2 \operatorname{ctg}\left(\frac{2\pi l_2}{\lambda}\right), \quad (8)$$

где  $\omega$  – циклическая частота ( $\omega = 2\pi c/\lambda$ ).

При этом

$$L_{\text{Э}} = \frac{Z_1 \cdot \lambda \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right)}{2\pi c}; \quad (9)$$

$$C_{\text{Э}} = \frac{\lambda \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right)}{2\pi c Z_1 m}. \quad (10)$$

Задача конструирования ИП на основе СНКР – это сочетание максимальной величины  $\lambda$  и минимальной величины ( $l_1 + l_2$ ) в выражении (6).

Максимальной величине  $\lambda$  (минимальной частоте резонанса  $f$ ) соответствует максимальная величина произведения  $L_{\text{Э}}$  и  $C_{\text{Э}}$  при фиксированных значениях  $m$ .

То есть

$$L_{\text{Э}} C_{\text{Э}} \sim \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1}{\lambda}\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi l_1 n}{\lambda}\right). \quad (11)$$

Анализ выражения (11) относительно величины  $n$  показывает, что  $L_{\text{Э}} \cdot C_{\text{Э}}$  имеет максимум при  $n = 1$ , то есть при одинаковой длине линий ( $l_1 = l_2$ ).

Подставляя оптимальное значение  $n = 1$  в выражение (6) можно определить частоту первого (основного) резонанса СНКР:

$$f = \frac{c \cdot \operatorname{arctg}\sqrt{m}}{2\pi\sqrt{\varepsilon} \cdot l_1}. \quad (12)$$

Формула (12) – это выражение, описывающее основную метрологическую характеристику ИП в виде СНКР: зависимость частоты основного (первого) резонанса  $f$  от относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  исследуемой жидкости.

Анализ этого выражения показывает, что при фиксированных значениях  $l_1 = l_2$  (минимизация ИП) максимальный вклад в уменьшение величины  $f$  дает значение  $m = Z_2/Z_1$ .

Значение величин частот первого резонанса из выражения (12) было сопоставлено с результатами, полученными методом имитационного моделирования из работы [2] при  $t_1 = t_2 = 1$  нс;  $\varepsilon = 1$ .

Результаты сопоставления приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения первых резонансных частот для различных  $Z_1, Z_2$ .

№ п/п	$Z_1/Z_2$ , Ом	Первая резонансная частота ИП [1]/ формула (12), ГГц
1	50/50	0,125/0,125
2	50/120	0,09/0,0897
3	125/50	0,09/0,0897
4	50/10	0,067/0,0669
5	250/50	0,067/0,0669
6	250/10	0,031/0,03141

Сопоставление полученных значений частот показывает, что полученные результаты практически совпадают, небольшое их отличие обусловлено ограниченной точностью имитационного моделирования в среде MicroCap 8.

Дополнительной проверкой формулы (12) является случай  $n = 1, m = 1$  (классический четвертьволновой резонатор).

Как видно из строки 1 табл. 1, формула (12) рабо-

тает точно и в этом случае.

Частоты резонансов более высокого порядка могут определяться из соотношения (6), так как формула (12) справедлива только для частоты первого резонанса.

В табл. 2 приведены сравнительные данные по резонансным частотам с номерами 2-8, полученные средствами имитационного моделирования [2] и из соотношения (6).

Сопоставление данных имитационного моделирования и расчетных данных показывает их полное совпадение.

Дополнительно проверкой является случай  $Z_1 = Z_2$ ;  $n = 1$ ;  $m = 1$  (классически четвертьволновой резонатор), при котором также наблюдается полное совпадение результатов.

Как уже отмечено выше, данный анализ и его результаты справедливы только для случая Т – приближения, то есть тогда когда поперечные размеры СНКР существенно меньше длины волны колебаний в нем. Для случая, когда длина волны колебаний в СНКР становится соизмеримой с его поперечными размерами, данный подход является некорректным.

Таблица 2 – Распределение резонансных частот.

Номер резонанса	Частоты резонансов: имитационное моделирование / расчет по (6), ГГц					
	$Z_1/Z_2$ , Ом					
	50/50	50/20	125/50	50/10	250/50	250/10
2	0,374/ 0,374	0,41/ 0,41	0,408/ 0,408	0,432/ 0,432	0,482/ 0,482	0,462/ 0,462
3	0,623/ 0,623	0,588/ 0,588	0,584/ 0,584	0,565/ 0,565	0,556/ 0,556	0,542/ 0,542
4	0,868/ 0,868	0,903/ 0,903	0,887/ 0,887	0,925/ 0,925	0,859/ 0,859	0,873/ 0,873
5	1,111/ 1,111	1,078/ 1,078	1,054/ 1,054	1,05/ 1,05	1,011/ 1,011	1,003/ 1,003
6	1,352/ 1,352	1,383/ 1,383	1,328/ 1,328	1,404/ 1,404	1,252/ 1,252	1,253/ 1,253
7	1,591/ 1,591	1,56/ 1,56	1,523/ 1,523	1,541/ 1,541	1,489/ 1,489	1,5/1,5
8	1,831/ 1,831	1,86/ 1,86	1,779/ 1,779	1,877/ 1,877	1,743/ 1,743	1,742/ 1,742

В этом случае в СНКР будут распространяться волны высших типов (Е- и Н-типов), критические частоты которых соответственно равны [5]:

$$f_E = \frac{2c}{\pi(D_{1,2} + d_{1,2})\sqrt{\epsilon}}; \quad (13)$$

$$f_H = \frac{c}{(D_{1,2} - d_{1,2})\sqrt{\epsilon}}. \quad (14)$$

Следовательно полученные результаты корректны для частот, которые существенно меньше критических (13) и (14) для конкретного СНКР.

**По результатам** исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получено соотношение, описывающее весь спектр резонансных частот в зависимости от волновых сопротивлений длин составных частей и диэлектрической проницаемости среды.

2. Рассмотренная конструкция ИП ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора эффективна для получения минимального значения частоты первого резонанса при заданных минимальных размерах ИП.

3. Получено точное аналитическое выражение для частоты первого резонанса оптимизированного ИП.

4. Проведенное сравнение аналитических результатов, полученных в данной работе с результатами имитационного моделирования, полученными ранее, показало их полное совпадение и корректность полученных результатов.

5. Полученные результаты дают основания для применения СНКР в виде ИП для диэлькометрии жидких сред в диапазоне СВЧ.

**Список литературы:** 1. Рудаков В.В. Диэлектрический метод определения влагосодержания в эмульсиях типа минеральное масло – вода с использованием электрофизической модели эмульсии инженерного типа / В.В.Рудаков, А.И.Коробко, Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009. – № 39. – С. 154-158. 2. Рудаков В.В. Резонансные спектры неоднородных коаксиальных резонаторов для определения диэлектрической проницаемости жидких сред в СВЧ диапазоне / В.В.Рудаков, А.А.Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20. – С.129-137. 3. Радионов А.А. Резонаторы на основе отрезков продольно-нерегулярных волноводов / А.А.Радионов, Л.Г.Рудоюсова // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1996. – № 2. – С.58. 4. Joly R. Wide band cavity tuned G a As FET oscillators / R.Joly // IEEE MTT-S International microwave symposium. Digest. – Los Angeles. – June 1981. – P. 70-78. 5. Whinnery J.R. Coaxial-line discontinuities Proc / J.R.Whinnery, H.W.Jamieson, J.E.Robbins // IRE. – Vol. 32. – 1944. – P. 695-709. 6. Козловский В.В. Схемы резонаторов на отрезках неоднородных линий, имеющих одинаковые резонансные частоты / В.В.Козловский // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т.20, № 2. 7. Somlo P.I. The computation of coaxial line step capacitances / P.I.Somlo // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1967. – Vol. MTT-15, vol. 1. 8. Stracca G.B. Unloaded Q-factor of stepped-impedance resonators / G.B.Stracca, A.Panzeri // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1986. – Vol. MTT-34, vol. 1. 9. Бородаев В.А. Инженерный расчет ступенчатых коаксиальных резонаторов / В.А.Бородаев и др. // Радиотехника. – 1990. – № 12. – С. 89-91. 10. Рыжаков С.М. Ступенчатый резонатор / С.М. Рыжаков, Т.С.Рыжакова // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. – 1999. – Т. 7, № 2. – С. 181-182. 11. Захаров А.В. Входные функции отрезков неоднородных линий / А.В.Захаров // Радиотехника и электроника. – 1985. – Т. 30, № 7. – С. 1373-1380. 12. Hameg G. Glass cavity resonators for low microwave frequencies / G. Hameg // Electron. Lett. – 1995. – Vol. 31. № 10. – P. 811-812. 13. Рыжаков С.М. Ступенчатый резонатор СВЧ диапазона / С.М.Рыжаков, Т.С.Рыжакова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1998. – Т. 1, № 2-3. – С. 49-51. 14. Рыжакова Т.С. Расчет и исследование СВЧ резонаторов на основе цилиндрических ступенчатых структур: дис. к-та тех. наук. / Т.С.Рыжакова. – Ниж. Нов. 2002. – 129 С.

**Bibliography (transliterated):** 1. Rudakov V.V., Korobko A.I., Korobko A.A. "Dielektricheskiy metod opredeleniya vlagosoderzhaniya v emul'siyakh tipa mineral'noye maslo – voda s ispol'zovaniyem yelektrofizicheskoy modeli emul'sii inzhenernogo tipa" // Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «Kharkiv's'kiy politekhnichniy institut». Zbirknik naukovikh prats'. Tematichniy vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU «KHPÍ». 2009. No 39. 154-158. Print. 2. Rudakov V.V., Korobko A.A. Rezonansnye spektry neodnorodnykh koaksial'nykh rezonatorov dlja opredelenija dijelektricheskoy pronaemosti zhidkikh sred v SVCh diapazone. Visnik NTU "HPÍ". Zbirknik naukovikh prac'. Tematichnij vipusk: Tekhnika i yelektrofizika visokikh naprug. Kharkiv: NTU "HPÍ", 2015. No 20. 129-137. Print. 3. Radionov A.A., Rudojasova L.G. Rezonatory na osnove otrezkov prodol'no-nereguljarnykh volnovodov. Jelektrodinamika i tehnik SVCh i KVCh., 1996. No 2. 58. Print. 4. Joly R. Wide band cavity tuned G a As

FET oscillators. IEEE MTT-S International microwave symposium. Digest. Los Angeles. June 1981. 70-78. Print. **5.** Whinnery J.R., Jamieson H.W., Robbins J.E. Coaxial-line discontinuities Proc. IRE. Vol.32. 1944. 695-709. Print. **6.** Kozlovskij V.V. Shemy rezonatorov na otrezkah neodnorodnyh linij, imejushih odinakove rezonansnye chastoty. Radiotekhnika i jelektronika. Vol. 20, No 2. 1975. Print. **7.** Somlo P.I. The computation of coaxial line step capacitances. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. MTT-15. vol. 1. 1967. Print. **8.** Stracca G.B., Panzeri A. Unloaded Q-factor of stepped-impedance resonators. IEEE Transactions on microwave theory and techniques. Vol. MTT-34, vol. 1. 1986. Print. **9.** Borodaev V.A. i dr. Inzhenernyj raschet stupenchatyh koaksial'nyh rezonatorov. Radiotekhnika. No 12, 1990. 89-

91. Print. **10.** Ryzhakov S.M., Ryzhakova T.S. Stupenchatyj rezonator. Jelektrodinamika i tehnika SVCh i KVCh. 1999. Vol. 7. No 2. 181-182. Print. **11.** Zaharov A.V. Vhodnye funkcii otrezkov neodnorodnyh linij. Radiotekhnika i jelektronika. Vol. 30. 1985. No 7. 1373-1380. Print. **12.** Nateg G. Glass cavity resonators for low microwave frequencies. Electron. Lett, 1995. 31, No 10. 811-812. Print. **13.** Ryzhakov S.M., Ryzhakova T.S. Stupenchatyj rezonator SVCh diapazona. Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy. Vol. 1. No 2-3. 1998. 49-51. Print. **14.** Ryzhakova T.S. Raschet i issledovanie SVCh rezonatorov na osnove cilindricheskih stupenchatyh struktur.: dis. k-ta teh. nauk. Nizh. Nov. 2002. 129. Print.

Поступила (received) 26.06.2015

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

**Рудаков Валерій Васильевич**, Национальный технический университет «ХПИ», доктор технических наук, профессор; тел.: (050) 533-79-31; e-mail: valrudakov@kpi.kharkov.ua.

**Rudakov Valeriy Vasilyevich**, National Technical University "KhPI", Doctor of Technical Science, professor; tel.: (050) 533-79-31; e-mail: valrudakov@kpi.kharkov.ua.

**Коробко Александр Анатольевич**, Национальный технический университет «ХПИ», аспирант; тел.: (093) 650-80-88; email: bigmenworld@gmail.com.

**Korobko Aleksandr Anatolievich**, National Technical University "KhPI", Postgraduate Student; tel.: (093) 650-80-88; email: bigmenworld@gmail.com.

УДК 621.391 : 51(075)

**А. А. СЕРКОВ, С. А. НИКИТИН, В. И. КРАВЧЕНКО В. В. КНЯЗЕВ**

### СИСТЕМА РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ

Систематический контроль над состоянием и тенденциями развития грозовой активности определенного региона обусловлен необходимостью минимизации ущерба, наносимого разрядами молнии. При этом особое внимание уделяется достоверности прогноза грозовой активности и времени его формирования. Так малый временной диапазон между формированием достоверного прогноза о грозовой опасности и наступлением неблагоприятных событий не позволяет своевременно принять меры по минимизации наносимого ущерба. Особое внимание уделено достоверности формируемого прогноза. Таким образом, неразрывное сочетание и реализация этих требований позволяет решить задачу оптимального синтеза системы раннего предупреждения грозовой опасности (РПГО).

**Ключевые слова:** мониторинг грозовой опасности; разряд молнии; интеллектуальный анализ данных; визуализация; автономный модуль.

**Введение.** В начальной стадии развития грозовых явлений внутриоблачные разряды носят мелко-масштабный характер. При этом длительность пакета импульсов составляет 10–15 мс. с частотой следования 3–4 импульса в минуту. По мере развития конвективного облака происходит постепенный рост плотности объемных зарядов и усиление грозовой активности. Продолжительность предгрозового состояния по времени может достигать 16 минут, со средним значением 8 минут [1, 2]. В 75 % случаев продолжительность предгрозового состояния облака находится в интервале от 3 до 10 минут. И если за 14–16 минут облако не переходит в грозовое состояние, то оно, как правило, распадается [3]. Таким образом, регистрация и идентификация межоблачных разрядов позволяет обеспечить временной интервал в 10 мин. до первого опасного разряда типа «облако-земля», что дает возможность реализовать систему раннего предупреждения о грозовой опасности.

**Постановка проблемы.** Повышение достоверно-

сти прогноза грозовой опасности требует обработки разнородной информации, отличающейся как по форме, так и содержанию. Обычно такие данные поступают в результате съема оперативной информации о результатах инструментальных измерений с последующей ее обработкой в реальном масштабе времени. При этом осуществляют пространственную привязку получаемых данных, что обеспечивает полноту, наглядность и оперативность их представления. Сопряжение разнородной информации из одного или нескольких однотипных / разнотипных источников в каждой точке заданного региона является исходным массивом данных и начальным этапом комплексного анализа информации, в котором применимы различные методы математической обработки данных. Формальная постановка задачи оптимального синтеза системы РПГО заключается в том, что необходимо найти такой вектор параметров  $\vec{z}_{opt}$ , при котором

$$\vec{z}_{opt} = \underset{\vec{z} \in Z_{don}}{extr} E(\vec{z})$$