

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.3.006

УДК 534.231.3

Жидкостный датчик на основе пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем, выполненного из пьезокерамики ЦТС

Б. Д. Зайцев ✉, **А. А. Теплых**, **И. А. Бородина**, **А. П. Семенов**

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН,
Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38

✉ zai-boris@yandex.ru

Аннотация

Экспериментально и теоретически исследовано влияние проводимости жидкости, контактирующей с пьезоэлектрическим резонатором с поперечным электрическим полем на основе пластины пьезокерамики ЦТС-19. В данном резонаторе поперечная компонента механического смещения, не приводящая к радиационным потерям при контакте с жидкостью, является преобладающей. Частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора показали наличие трех резонансов на частотах 68,7, 97,8 и 264 кГц со значениями коэффициента электромеханической связи 12,2, 14,7 и 6,5 % соответственно. Добротность каждого резонанса при контакте с жидкостью оказалась существенно выше добротности резонатора с продольной акустической волной на основе ниобата лития. Были получены зависимости максимального значения действительной части электрического импеданса такого резонатора от проводимости жидкости. Проведен теоретический анализ влияния проводимости жидкости на характеристики резонатора.

Ключевые слова

пьезоэлектрический резонатор с поперечным электрическим полем; резонанс; коэффициент электромеханической связи; проводимость жидкости; электрический импеданс

Для цитирования

Зайцев Б. Д., Теплых А. А., Бородина И. А., Семенов А. П. Жидкостный датчик на основе пьезоэлектрического резонатора с поперечным электрическим полем, выполненного из пьезокерамики ЦТС. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):296–305. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.006

Liquid sensor based on a piezoelectric resonator with a lateral electric field made of piezo-ceramics PZT

B. D. Zaitsev ✉, A. A. Teplykh, I. A. Borodina, A. P. Semyonov

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS,
38 Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia

✉ zai-boris@yandex.ru

Abstract

This paper demonstrates the results of the study of the sensor based on the resonator with the lateral electric field made of the ceramic PZT for measuring the conductivity of the contacting liquid. This sensor is made of the PZT ceramic plate of 3.54 mm thickness with shear dimension of 20×18 mm². Two electrodes with the gap width of 4 mm are deposited on one side of the plate. The sensor features the 4 ml plexiglass container, the bottom of which is a resonator. The measured frequency dependences of the real and imaginary parts of the electrical impedance shows three resonances at frequencies of 68.7, 97.8, and 264 kHz. Aqueous solutions of sodium chloride are prepared with different conductivities in the range 3.2 – 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. We have measured the frequency dependences of the real and imaginary parts of the sensor electric impedance with the liquid of different conductivity. The maximum value of the real part of the electric impedance monotonically decreases and reaches saturation for each resonance peak with increasing liquid conductivity. Theoretical analysis of influence of liquid conductivity on resonator impedance was also performed using equivalent circuit with two parallel branches. First branch included active and reactive resistors that corresponded to excitation of acoustic wave. The second branch includes the static capacitance of the resonator. We describe the presence of the conductive liquid by means of the leakage resistance connected with the capacitance in parallel. We underline that theoretical and experimental dependences are in a good agreement. Therefore the resonator with the lateral electric field based on the ceramic PZT shows high sensitivity to the changes in the conductivity of the liquid due to the high value of the coefficient of the electromechanical coupling. The sensor with liquid presence compared to the sensor made of lithium niobate with a longitudinal acoustic wave has a higher quality factor. We conclude that in the resonator made of piezoceramics, the shear component of the mechanical displacement is prevailing and does not lead to radiation losses.

Keywords

piezoelectric resonator with lateral electric field; resonance; electromechanical coupling coefficient; liquid conductivity; electrical impedance

For citation

Zaitsev B. D., Teplykh A. A., Borodina I. A., Semyonov A. P. Liquid sensor based on a piezoelectric resonator with a lateral electric field made of piezo-ceramics PZT. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(3):296–305. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.006

1. Введение

Пьезоэлектрические резонаторы с поперечным электрическим полем широко используются в качестве различных датчиков [1–10]. Электроды таких резонаторов расположены на одной стороне пьезоэлектрической пластины и поэтому их характеристики зависят не только от изменения механических свойств контактирующей среды, но и от изменения ее электрических свойств. Поэтому на их основе можно создавать датчики для измерения проводимости и диэлектрической проницаемости жидкостей. Наиболее часто в качестве пьезоэлектрического материала для таких датчиков использовались ниобат и танталат лития, а также кварц. В работах [1–4, 7–10] достаточно подробно исследовано влияние вязких, диэлектрических и проводящих жидкостей на характеристики резонаторов из этих материалов. Здесь в качестве информативного параметра была выбрана резонансная частота, меняющаяся при изменении вязкости, диэлектрической проницаемости и проводимости жидкости. Однако изменения резонансной частоты были незначительными при изменении параметров жидкости в широких пределах. Более того, частотные зависимости реальных частей электрического импеданса вблизи резонанса могут оказаться сильно размытыми при контакте резонатора даже с невязкой и непроводящей жидкостью [5]. Было показано, что предпочтительнее использовать в качестве информативного параметра изменение реальной части электрического импеданса резонатора при изменении проводимости и диэлектрической проницаемости жидкости [5]. Однако добротность такого резонатора при контакте с жидкостью была невысокой, поскольку возбуждаемая продольная волна в таком резонаторе имела радиационные потери при контакте с жидкостью.

В данной работе приведены результаты исследования резонатора с поперечным электрическим полем на основе керамики ЦТС-19 для измерения проводимости контактирующей жидкости. В данном резонаторе поперечная компонента механического смещения, не приводящая к радиационным потерям при контакте с жидкостью, является преобладающей. Показано, что добротность резонатора, выполненного из керамики ЦТС-19 при контакте с жидкостью, значительно превышает добротность резонатора на основе ниобата лития с продольной акустической волной.

2. Описание датчика и методики эксперимента

Для проведения экспериментов был разработан датчик на основе резонатора с поперечным электрическим полем, изготовленный из пластины керамики ЦТС-19 толщиной 3,54 мм с попе-

речными размерами $20 \times 18 \text{ мм}^2$ (рис. 1). Одна сторона пластины была покрыта пленкой алюминия с зазором в центре шириной 4 мм, таким образом, обе половины покрытия представляли собой электроды.

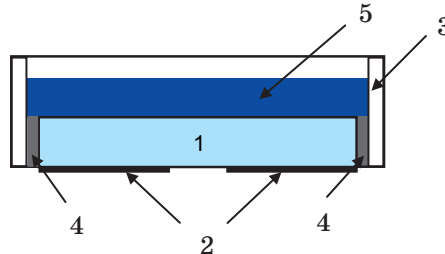


Рис. 1. Схема датчика:

1 – пластина из керамики ЦТС-19, 2 – электроды, 3 – контейнер для жидкости, 4 – герметик, 5 – исследуемая жидкость

Fig. 1. Scheme of the sensor:

1 – plate of ceramics PZT-19, 2 – electrodes, 3 – liquid container, 4 – sealant, 5 – liquid under study

Этот резонатор служил дном жидкостного контейнера из плексигласа объемом 4 мл. Щель между резонатором и контейнером была заполнена специальным герметиком. Резонатор подключался к анализатору импедансов E4990A (Keysight Technologies) и измерялись частотные зависимости реальной и мнимой частей электрического импеданса датчика в диапазоне частот 50–300 кГц. На частотной зависимости реальной части электрического импеданса (R) резонатора были обнаружены три параллельных резонанса на частотах 68,7, 97,8 и 264 кГц (рис. 2, I). Величины максимального значения реальной части электрического импеданса (R_{\max}) оказались равными 174, 199 и 17 кОм для этих частот. На рис. 2, II представлены частотные зависимости реальной (G) части электрического адмиттанса исследуемого резонатора. Здесь также видно наличие трех последовательных резонансов на частотах 65,3, 92,3 и 257 кГц. Значения частот параллельного и последовательного резонансов позволили оценить значения коэффициента электромеханической связи, которые оказались равными 12,2, 14,7 и 6,5 %.

Затем жидкостной контейнер заполняли жидкостью с известной проводимостью и проводили измерение характеристик резонатора. Для изучения влияния проводимости жидкости на характеристики резонатора использовались водные растворы хлористого натрия. Проводимость жидкости, изменяющаяся в пределах 3,2–9000 мкСм/см, контролировалась кондуктометром HI8733 («Hanna», USA).

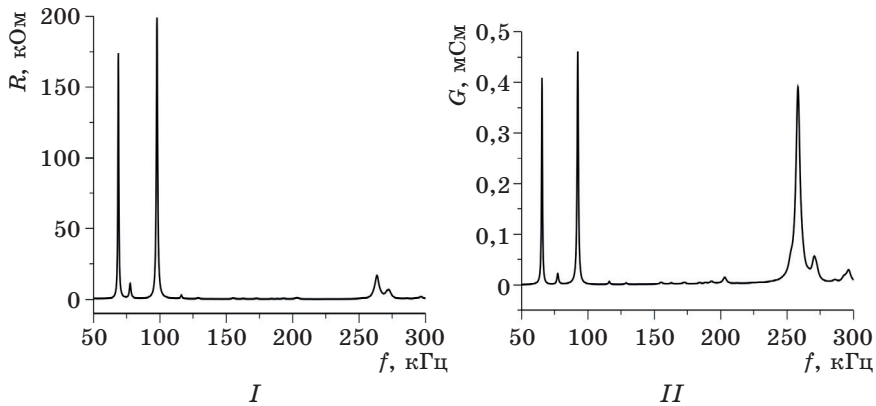


Рис. 2. Частотные зависимости реальной части электрического импеданса (*I*) и адмиттанса (*II*) с пустым жидкостным контейнером
Fig. 2. Frequency dependencies of the real parts of electrical impedance (*I*) and admittance (*II*) of the sensor with empty container

3. Полученные результаты

На рис. 3 представлены частотные зависимости реальной части электрического импеданса резонатора вблизи резонансов на частотах 68,7 кГц (*I*) и 264 кГц (*II*) при добавлении в контейнер жидкости с различной проводимостью. Данные для резонансного пика с частотой 97,8 кГц не приводятся, поскольку они практически не отличались от характеристик пика на частоте 68,7 кГц.

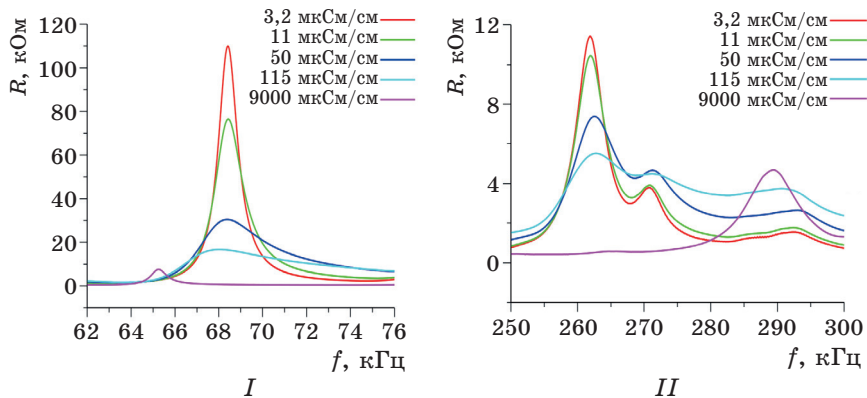


Рис. 3. Частотные зависимости реальной части электрического импеданса резонатора для резонансных пиков на частотах 68,7 кГц (*I*) и 264 кГц (*II*) при контакте резонатора с жидкостью с проводимостью 3,2; 11; 50; 115 и 9000 мкСм/см

Fig. 3. Frequency dependencies of the real part of the electrical impedance of the sensor for resonant peaks on the frequencies 68.7 kHz (*I*) and 264 kHz (*II*) at the contact of the resonator with liquid with the conductivity 3.2, 11, 50, 115 and 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Представленные зависимости показывают, что при увеличении проводимости жидкости наблюдалось уменьшение R_{\max} на частотных зависимостях реальной части электрического импеданса для обоих резонансных пиков.

На основе полученных частотных зависимостей реальной части электрического импеданса были построены зависимости R_{\max} от проводимости жидкости для каждого резонансного пика. На рис. 4 представлены указанные зависимости для двух резонансов 68,7 (I) и 264 (II) кГц. Видно, что для этих резонансов величина R_{\max} уменьшается и достигает насыщения при значениях проводимости ~ 750 мкСм/см и ~ 10000 мкСм/см.

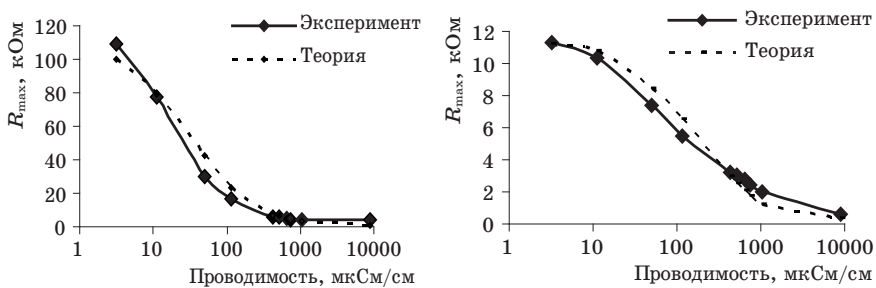


Рис. 4. Теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (сплошная линия) зависимости максимального значения реальной части электрического импеданса R_{\max} для резонансных пиков на частотах 68,7 кГц (I) и 264 кГц (II) от проводимости жидкости

Fig. 4. Theoretical (dotted line) and experimental (solid line) dependences of the maximum value of the real part of the electrical impedance R_{\max} for resonant peaks on the frequencies 68.7 kHz (I) and 264 kHz (II) on liquid conductivity

Был также проведен теоретический анализ объясняющий поведение резонансной частоты и активного сопротивления резонатора с поперечным электрическим полем при изменении проводимости жидкости. Анализ проводился с помощью эквивалентной схемы Мэсона [11], в которой механическая часть пересчитывалась в электрическую стандартным методом [12]. Таким образом, эквивалентная схема состояла из двух параллельно соединенных ветвей. Первая ветвь представляла собой последовательно соединенные активный и реактивный резисторы, характеризующие возбуждение акустической волны в резонаторе. Вторая ветвь включала статическую емкость резонатора, которая была измерена с помощью анализатора импедансов E4990A (Keysight Technologies). Значения активного и реактивного резисторов, зависящие от частоты, были рассчитаны исходя из измеренных частотных зависимостей реальной и мнимой частей электрического импеданса резонатора.

Присутствие жидкости описывалось сопротивлением утечки, которое учитывало проводимость жидкости и глубину проникновения электрического поля резонатора из пьезокерамики PZT в прилегающую среду. Как было установлено в [13], эта глубина проникновения оказалась равной $\sim 0,3$ мм. Были рассчитаны частотные зависимости реальной (R) и мнимой (X) частей импеданса всего резонатора для каждого резонансного пика и для каждого исследуемого образца жидкости. На этой основе были построены теоретические зависимости R_{\max} от проводимости жидкости для этих резонансных пиков, которые представлены на рис. 4 пунктирными линиями. Видно, что теоретическая и экспериментальная зависимости хорошо соответствуют друг другу.

Заключение

Таким образом, датчик на основе резонатора с поперечным электрическим полем на основе керамики ЦТС-19 показал высокую чувствительность к изменению проводимости жидкости. Это связано с высоким значением коэффициента электромеханической связи для трех наблюдаемых резонансных пиков резонатора. Кроме того, показано, что в присутствии жидкости датчик из керамики ЦТС-19 имеет более высокую добротность по сравнению с датчиком на основе резонатора с поперечным электрическим полем с продольной акустической волной из ниобата лития. Это связано с тем, что в резонаторе из пьезокерамики поперечная компонента механического смещения является преобладающей, что значительно уменьшает радиационные потери акустической волны при контакте поверхности резонатора с жидкостью. Был также проведен теоретический анализ, объясняющий поведение резонансной частоты и активного сопротивления резонатора с поперечным электрическим полем при изменении проводимости жидкости. Анализ проводился методом эквивалентных схем. Полученные теоретические зависимости электрического импеданса резонатора оказались в хорошем соответствии с экспериментальными зависимостями. Полученные результаты показали перспективность использования резонатора из керамики ЦТС-19 в качестве датчика для определения проводимости жидкости. Информативным параметром о величине проводимости жидкости может служить реальная часть электрического импеданса резонатора.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-07-00300, № 19-07-00304.

Acknowledgments

This research is supported by grant No. 19-07-00300, No. 19-07-00304 from the Russian Foundation for basic research.

Список литературы

1. McCann D. F., McCann J. M., Parks J. M., Frankel D. J., Pereira da Cunha M., Vetelino J. F. A lateral-field-excited LiTaO₃ high frequency bulk acoustic wave sensor. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2009;56(4):779–787. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1100
2. Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Qian Z., Zhang Z., Zhang C. Lateral-field-excited bulk acoustic wave sensors on langasite working on different operation modes. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2013;60(4):864–867. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2637
3. Winters S., Bergardt G., Vetelino J. A dual lateral – field – excited bulk acoustic sensor array. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2013;60(3):573–578. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2598
4. Ma T., Wang J., Du J., Yang J. Resonances and energy trapping in AT-cut quartz resonators operating with fast shear modes driven by lateral electric fields produced by surface electrodes. *Ultrasonics*. 2015;59:14–20. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.01.004
5. Zaitsev B. D., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A., Kuznetsova I. E. Liquid sensor based on a piezoelectric lateral electric field-excited resonator. *Ultrasonics*. 2015;638:179–183. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.07.009
6. Vetelino J. F. A lateral field excited acoustic wave sensor platform. In: *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* 2010, pp. 2269–2272.
7. Hu Y., French L. A., Jr., Radecsky K., Pereira da Cunha M., Millard P., Vetelino J. F. A lateral field excited liquid acoustic wave sensor. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*. 2004;51(11):1373–1379. DOI: 10.1109/tuffc.2004.1367475
8. Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neivandt D., Vetelino J. A lateral field excited acoustic wave sensor for the detection of saxitoxin in water. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2007, 28–31 Oct.* New York: IEEE; 2007, pp. 1217–1220. DOI: 10.1109/ULTSYM.2007.306
9. Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., Feng G. Pseudo-LFE sensors with different electrode configurations on X-cut LiNbO₃. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2009, 20–23 Sept.* Rome: IEEE; 2009, pp. 655–658. DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441673
10. Ma T., Zhang Z., Wang W., Zhang C., Feng G. (yx1)21.82° LiNbO₃ pseudo-LFE acoustic wave sensors. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2009, 20–23 Sept.* Rome: IEEE; 2009, pp. 2511–2514. DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441874
11. Royer D., Dieulesaint E. *Elastic Waves in Solids I. Free and Guided Propagation*. Berlin: Springer-Verlag; 2000.
12. Зеленка И. *Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах*. М.: Мир; 1990.

13. Zaitsev B. D., Semyonov A. P., Teplykh A. A., Borodina I. A. The effect of the conductivity of a film located near piezoelectric resonator with a lateral electric field based on the PZT ceramics on its characteristics. *Ultrasonics*. 2019;94:169–173. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.016

References

1. McCann D. F., McCann J. M., Parks J. M., Frankel D. J., Pereira da Cunha M., Vetelino J. F. A lateral-field-excited LiTaO₃ high frequency bulk acoustic wave sensor. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2009;56(4):779–787. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1100
2. Ma T., Wang J., Du J., Yuan L., Qian Z., Zhang Z., Zhang C. Lateral-field-excited bulk acoustic wave sensors on langasite working on different operation modes. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2013;60(4):864–867. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2637
3. Winters S., Berngardt G., Vetelino J. A dual lateral – field – excited bulk acoustic sensor array. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2013;60(3):573–578. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2598
4. Ma T., Wang J., Du J., Yang J. Resonances and energy trapping in AT-cut quartz resonators operating with fast shear modes driven by lateral electric fields produced by surface electrodes. *Ultrasonics*. 2015;59:14–20. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.01.004
5. Zaitsev B. D., Shikhabudinov A. M., Teplykh A. A., Kuznetsova I. E. Liquid sensor based on a piezoelectric lateral electric field-excited resonator. *Ultrasonics*. 2015;638:179–183. DOI: 10.1016/j.ultras.2015.07.009
6. Vetelino J. F. A lateral field excited acoustic wave sensor platform. In: *Proc. IEEE Ultrasonics Symp.* 2010, pp. 2269–2272.
7. Hu Y., French L. A., Jr., Radecky K., Pereira da Cunha M., Millard P., Vetelino J. F. A lateral field excited liquid acoustic wave sensor. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*. 2004;51(11):1373–1379. DOI: 10.1109/tuffc.2004.1367475
8. Wark M., Kalanyan B., Ellis L., Fick J., Connel L., Neivandt D., Vetelino J. A lateral field excited acoustic wave sensor for the detection of saxitoxin in water. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2007, 28–31 Oct.* New York: IEEE; 2007, pp. 1217–1220. DOI: 10.1109/ULTSYM.2007.306
9. Zhang Z., Wang W., Ma T., Zhang C., Feng G. Pseudo-LFE sensors with different electrode configurations on X-cut LiNbO₃. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2009, 20–23 Sept.* Rome: IEEE; 2009, pp. 655–658. DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441673
10. Ma T., Zhang Z., Wang W., Zhang C., Feng G. (yxl)21.82° LiNbO₃ pseudo-LFE acoustic wave sensors. In: *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium. 2009, 20–23 Sept.* Rome: IEEE; 2009, pp. 2511–2514. DOI: 10.1109/ULTSYM.2009.5441874
11. Royer D., Dieulesaint E. *Elastic Waves in Solids I. Free and Guided Propagation*. Berlin: Springer-Verlag; 2000.
12. Zelenka J. *Piezoelectric Resonators and their Applications (Studies in Electrical and Electronic Engineering)*. North Holland; 1986.

13. Zaitsev B. D., Semyonov A. P., Teplykh A. A., Borodina I. A. The effect of the conductivity of a film located near piezoelectric resonator with a lateral electric field based on the PZT ceramics on its characteristics. *Ultrasonics*. 2019;94:169–173. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.09.016

Информация об авторах

Зайцев Борис Давыдович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Теплых Андрей Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Бородина Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Семенов Александр Павлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Россия, 410019, г. Саратов, ул. Зеленая, 38.

Information about the authors

Boris D. Zaitsev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, chief researcher, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38 Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia.

Andrey A. Teplykh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38 Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia.

Irina A. Borodina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38 Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia.

Alexander P. Semyonov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, Saratov Branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, 38 Zelyonaya Str., Saratov, 410019, Russia.

Поступила / Received: 30.09.2019

Принята в печать / Accepted: 10.10.2019