

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Швецова Александра Сергеевича

«Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

Современный этап развития общества характеризуется широким внедрением в повседневную жизнь человека различных высокотехнологичных радиотехнических устройств и систем, таких как системы телевидения, связи и глобального позиционирования (навигации). В последние годы значительный интерес проявлен к системам телеметрии, качествообразующими компонентами которых являются датчики различных физических величин – давления, температуры, перемещения, состава газовых и жидкостных сред и т.д. Оптимальными чувствительными элементами для таких устройств являются резонаторы, выполненные по технологии поверхностных акустических волн (ПАВ). Таким образом, диссертация Швецова А.С., посвященная развитию теории ПАВ-резонаторов и их оптимизации с целью обеспечения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика в заданном температурном диапазоне, является актуальной, и ее результаты будут иметь практическое применение в различных отраслях народного хозяйства.

В первой главе диссертации проведен анализ публикаций, касающихся темы диссертации, в т.ч. описана структура и типы систем измерения температуры с беспроводными пассивными датчиками на основе различных ПАВ-устройств. Проведено сравнение функциональных возможностей таких систем при использовании в качестве чувствительных элементов линий задержки и ПАВ-резонаторов. Показано, что последнее схемотехническое решение является предпочтительным, поскольку ПАВ-резонаторы могут быть реализованы на более широком спектре пьезоэлектрических подложек, существенно различающихся по температурному коэффициенту частоты (ТКЧ) и коэффициенту электро-механической связи.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическим исследованиям влияния параметров ПАВ-резонатора и входного импеданса радиотехнического тракта на энергию отклика при импульсном опросе датчика. Математический анализ ПАВ-резонаторов выполнен на основе двух методов – модели колебательного контура и теории связанных мод, которая является на сегодняшний день наиболее точным методом синтеза ПАВ-устройств с ненулевым уровнем отражения в электродных структурах. Показано, что данные модели

Вход. № 96/17  
«27» 07 2017 г.  
подпись Ваш

имеют хорошую сходимость вблизи частоты акустического синхронизма, однако различаются при отстройке от основного резонансного пика. Поэтому модель колебательного контура может быть использована на начальном этапе проектирования ПАВ-резонатора для выявления основных тенденций влияния параметров резонатора и радиотехнического тракта на эффективность переизлучения энергии резонатором при импульсном опросе.

Основным результатом второй главы являются рекомендации по выбору соотношения параметров ПАВ-резонатора и входного сопротивления радиотехнического тракта и определение влияния параметров резонатора на максимально достижимую эффективность переизлучения энергии.

В третьей главе проведены теоретические исследования влияния ориентации пьезоэлектрической подложки на основные параметры ПАВ-резонаторов, определяющие эффективность работы беспроводных датчиков температуры. Проанализированы два варианта конструктивного исполнения датчиков – при расположении резонаторов на единой пьезоэлектрической подложке и при изготовлении ПАВ-резонаторов на двух разных пьезоэлектрических материалах.

Установлено, что для первого варианта конструктивного исполнения датчиков температуры наиболее эффективными являются пьезоподложки кварца, ориентация которых находится в диапазоне от  $60^\circ Y$ -среза до  $85^\circ Y$ -среза. При этом может быть достигнута максимально достижимая разность ТКЧ двух резонаторов ( $150 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ). Для второго варианта конструктивного исполнения предложено использовать совокупность пьезоэлектрических подложек кварца  $70^\circ Y$ -среза и ниобата лития с ориентацией  $(0, 70^\circ, 90^\circ)$ , которая обеспечивает разность ТКЧ до  $188 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ .

Четвертая глава посвящена разработке и экспериментальным исследованиям ПАВ-резонаторов с целью подтверждения результатов, полученных во втором и третьем разделах диссертационной работы. Верификация проведена для различных срезов кварца и лангасита. Полученные результаты подтвердили корректность используемых математических моделей и конструктивных решений.

Исследования, выполненные в диссертационной работе Швецова А.С. и их результаты обладают научной новизной, заключающейся прежде всего в разработке метода расчета отклика ПАВ-резонатора при его импульсном опросе как для установившегося, так и для динамического режима. Представляет большой практический интерес предложенный метод выбора оптимального пьезоэлектрика для реализации ПАВ-резонатора, позволяющий существенно сократить количество итераций и стоимость разработки. Особого внимания заслуживает новая конструкция чувствительного элемента датчика температуры для систем телеметрии, реализованная на единой пьезоэлектрической подложке кварца с

различной поляризацией волн, которая обеспечивает не только большую разницу ТКЧ, а, следовательно, и чувствительность датчика к изменению температуры, но и имеет существенно меньшие габариты, что является одним из основных требований к современной электронной компонентной базе (ЭКБ).

Достоверность результатов диссертации Швецова А.С. подтверждается корректным использованием современного математического аппарата, совпадением их в частных или предельных случаях с известными ранее, а также экспериментальными измерениями и данными, полученными с помощью статистического моделирования на ЭВМ. Диссертация Швецова А.С. написана четким доступным языком. Содержание автореферата правильно отражает содержание диссертации, а ее основные результаты с необходимой полнотой опубликованы в научной печати.

Вместе с тем диссертация Швецова А.С. не лишена недостатков. К ним следует отнести:

1. Сформулированная цель работы не в полной мере отражает название и суть диссертации – нет привязки к использованию в составе беспроводных пассивных датчиков температуры.

2. При расчете проводимости ПАВ-резонатора не уделено внимания анализу паразитных элементов конструкции (емкости подводящих шин, контактных площадок, выводов корпуса, индуктивности проволочных перемычек и т.д.), что снижает точность и достоверность полученных расчетных характеристик.

3. Вызывает сомнение практическая реализуемость рекомендованных ориентаций пьезоэлектрических подложек танталата лития и ниобата лития с ненулевым углом  $\varphi$ , поскольку при такой ориентации требуется на порядок более высокая точность изготовления подложек с целью обеспечения повторяемости электрофизических параметров.

4. Отсутствует экспериментальное подтверждение по рекомендованным для реализации ПАВ-резонаторов срезам танталата лития и ниобата лития.

Однако отмеченные недостатки носят, в основном, частный характер и существенно не снижают научной и практической ценности диссертации в целом. Диссертация Швецова А.С. является законченной научно-исследовательской работой, содержащей новое решение актуальной задачи – развитию теории ПАВ-резонаторов и их оптимизации с целью обеспечения максимальной энергии отклика и максимальной чувствительности информационного параметра отклика в заданном температурном диапазоне. Диссертация Швецова А.С. «Резонаторы на поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов беспроводных пассивных датчиков температуры» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям,

ее содержание соответствует специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», а Швецов Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Синицына Татьяна Викторовна,  
Главный конструктор ООО «БУТИС»,  
начальник конструкторско-технологического  
отдела, к.т.н.

Синицына Т.В.

«25» 07 2017 г.

Рабочий телефон: +7(495) 411-96-08. Электронная почта: [sinicina59@mail.ru](mailto:sinicina59@mail.ru).

Подпись Синицыной Т.В. заверяю  
Генеральный директор ООО «БУТИС»,  
к.т.н.



Машинин О.В.

Сведения об организации – Общество с ограниченной ответственностью «БУТИС»,  
121357 Москва, ул. Верейская д.29, стр.135; тел. (495) 411-96-08; [www.butis-m.ru](http://www.butis-m.ru); e-mail:  
[butis.m@ru.net](mailto:butis.m@ru.net).

Сведения о специальности, по которой защищался автор отзыва: Специальность 01.04.01 –  
Приборы и методы экспериментальной физики.