

ОТЗЫВ

научного руководителя

**на диссертационную работу Швецова Александра Сергеевича «Резонаторы на
поверхностных акустических волнах в качестве чувствительных элементов
беспроводных пассивных датчиков температуры»**

Швецов А.С. работает на кафедре Основ радиотехники с 2001 года (с 2011 года по настоящее время в должности научного сотрудника). Настоящая диссертационная работа посвящена части работ, выполненных им за этот период, и отражает его вклад в исследования устройств микроволновой акустики и акустоэлектроники.

Актуальность темы диссертации. Датчики работают во всех отраслях промышленности и жизнедеятельности, для многих применений критически важно опрашивать датчики дистанционно, без проводов и иметь необслуживаемые, энергонезависимые и пассивные чувствительные элементы, со сроком службы, превышающим срок жизни объекта (при работе в жестких условиях эксплуатации объекта). Потребность в таких датчиках от энергетики (включая ядерную энергетику), транспорта (включая авиакосмическую отрасль), строительства и до медицины и биологии быстро растет. Возможность измерения физических и химических параметров в ранее недоступных объектах может позволить решать задачи безопасности, энергетической эффективности, мониторинга состояния здоровья. Причем измерения необходимо делать в реальном масштабе времени с использованием получаемых данных в цепи обратной связи систем мониторинга и управления объектами. В то же время, устройства микроволновой акустики и, в частности, устройства на поверхностных акустических волнах (ПАВ) достигли такого уровня развития, когда они вышли на уровень массового производства в десятки миллионов в день, и встречаются в большинстве мобильных телефонов в качестве антенных дуплексеров. На основе устройств на ПАВ очень удобно создавать системы беспроводного измерения механических напряжений, температуры и многих других физических параметров, а с дополнительными покрытиями звукопровода можно измерять и химические свойства (концентрацию веществ) жидкостей и газов. Выбор для темы диссертации именно резонаторов на ПАВ для чувствительных датчиков температуры был продиктован минимальными размерами таких устройств и удобством их беспроводного опроса электромагнитными волнами радиочастотного диапазона. Именно такие устройства потенциально применимы для имплантации в живые организмы, требующие контроля температуры в области имплантации, например, в области имплантируемого протеза и т.п. Для таких измерителей требуется максимальная температурная чувствительность датчика в ограниченном диапазоне температур в живом объекте. Для многих других применений в технике резонаторы на ПАВ являются также

предпочтительными и поэтому заслуживают тщательного исследования всех характеристик, влияющих на работоспособность беспроводных измерительных систем.

Основные научные результаты, лично полученные А.С. Швецовым, включают в себя анализ работы резонатора на ПАВ в цепи антенны с целью обеспечения максимума переизлученной энергии при импульсном методе опроса, что, в конечном итоге, определяет предельную дальность работы беспроводной измерительной системы. Полученные соотношения между параметрами антенны и резонатора на ПАВ оказались новыми и существенно уточнили, когда можно использовать традиционное согласование по равенству активных составляющих импеданса, а, когда для максимальной переизлученной энергии следует пользоваться полученными автором новыми соотношениями. При этом автор обосновал важное положение, почему недостаточно добиваться высокой добротности резонатора на ПАВ без определенных ограничений на минимальное значение коэффициента электромеханической связи.

На основании этого чисто радиотехнического результата автор подошел к анализу основных материалов пьезоэлектрических монокристаллов, применяемых в этой отрасли. Используя современные методы расчетов параметров возбуждения и распространения поверхностных акустических волн, он впервые провел всестороннее исследование всех параметров, определяющих возможность использования всех возможных ориентаций с упором на размещение на одной подложке пары резонаторов с противоположными знаками температурных коэффициентов частоты (ТКЧ). Такого полного исследования до него не проводилось. Особенность подхода заключается также и в анализе свойств волн Блюштейна-Гуляева-Шимизу (ВГБ) совместно с анализом волн Рэлея, которые до этого и применялись во всех основных вариантах датчиков по отдельности. Это нововведение позволило автору обнаружить уникальную ориентацию подложек пьезоэлектрического кварца, на которой резонаторы на ВГБ и на волне Рэлея имеют максимальную из всех возможных монокристаллических материалов разницу положительного и отрицательного ТКЧ. Однако, уникальность этой ориентации оказалась еще и в том, что групповые скорости резонаторов на обеих волнах совпали по направлению (при различии направлений фазовых скоростей до 10 градусов). Это свойство позволяет разместить оба резонатора на одной подложке параллельно, и тем самым в несколько раз сократить ширину кристаллического чипа, габариты и стоимость чувствительного элемента. Эта ориентация была испытана совместно с коллегами и защищена патентом РФ. Она особенно привлекательна для датчиков температуры живых объектов.

В работе выбрано и исследовано много новых ориентаций кварца для пар резонаторов, работающих в качестве чувствительных элементов датчиков температуры, и особенно ценно то, что для каждой из этих ориентаций были сконструированы резонаторы на ПАВ с учетом особенностей возбуждения и распространения ПАВ. Были выработаны конструкции всех перспективных пар резонаторов, которые использовались партнерами для их изготовления.

Тщательные измерения не только подтвердили правильность расчетов, но и дали возможность сделать выводы о достоинствах и недостатках различных ориентаций и предложить наиболее приемлемые с точки зрения обеспечения параметров измерительных систем варианты. Автор принял участие в измерениях и, в особенности, в обработке и толковании результатов, которые подтвердили достоверность всех расчетных и вычислительных подходов, грамотного проектирования и отбора комбинаций материалов.

Исследования ориентаций подложек из других пьезоэлектрических кристаллов позволили предложить ориентации для датчиков высоких температур (на лангасите) и оценить возможности получения различных уровней чувствительности к температуре с различными требованиями к параметрам резонаторов (на ниобате и танталате лития). Не все опубликованные по этому направлению материалы, на которые автор ссылается в тексте, были включены в диссертацию, ввиду экономии ее размера.

Практическая значимость работы. В результате полученных в диссертационной работе рекомендаций партнеры в рамках ОКР «Нерв» (государственный контракт № 12411.1006899.11.074 от 14.05.2012 г.) разработали аппаратуру систем измерения температуры и исследовали возможности разных подходов к измерениям, в том числе имплантируя беспроводные датчики в живые объекты. Ими были получены рекомендации о глубинах имплантации и дальности опроса датчиков на ПАВ в сравнении с датчиками на объемных акустических волнах (ОАВ). Также, в ОКР, проведенных по теме «Беспроводные сенсоры на поверхностных акустических волнах для контроля физических параметров в широком диапазоне температур» (государственный контракт от «12» мая 2009 г. № 02.527.12.0006 в рамках участия РФ в Седьмой Европейской Рамочной Программе), использованы результаты расчетов параметров ПАВ в лангасите для предварительного отбора перспективных ориентаций и конструирования резонаторов.

Список трудов Швецова А.С. (в соавторстве) превышает 40 наименований, из которых более 25 публикаций индексируются в Web of Science и одновременно в Scopus, из них 13 работ, входящих в перечень ВАК, непосредственно относятся к теме диссертации, а основные результаты опубликованы в 5 статьях.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на 4 международных конференциях за рубежом (2014 IEEE International Ultrasonics Symposium (Чикаго, США), 2014 SAW Symposium (Вена, Австрия), 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (Тайбэй, Тайвань), 2016 European Frequency and Time Forum (Йорк, Великобритания)) и на 2 международных конференциях в России (Перспективные системы и задачи управления (Красная Поляна, 2014), Электромагнитное поле и материалы (Москва, 2016)).

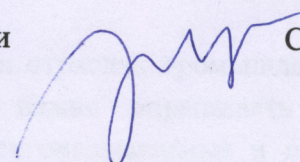
Диссертация написана строгим и ясным языком и отражает многолетний опыт автора в работе с устройствами на ПАВ. Структура диссертации отражает логичный подход автора к отбору конкретного материала для квалификационной работы из имеющихся у него работ. Работа характеризуется полнотой и законченностью исследования.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации

Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а Швецов Александр Сергеевич заслуживает присуждения степени кандидата технических наук

Заведующий лабораторией 08921 кафедры Основ радиотехники
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, 111250,
ул. Красноказарменная, д. 14
Тел. 8 (495) 362 72 12, e-mail: zhgoon@mpei.ru

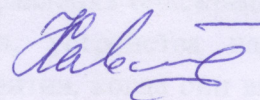
 С.А. Жгун

Жгун Сергей Александрович, кандидат технических наук по специальности 05.12.01 «Теоретические основы радиотехники», старший научный сотрудник

Подпись Жгуна С.А. удостоверяю

Начальник управления по работе с персоналом
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»



 Н.Г. Савин