

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ НА ПАВ В СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

THE APPLICATION OF THE ACOUSTO-ELECTRONIC SAW SENSORS IN THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS FACILITIES MONITORING

V. Leontiev
A. Sorokin
V. Nenashev
G. Wattimena

Summary. This paper examines the application of the passive SAW sensors in industrial IOT systems. Modern industrial multisensor monitoring systems interrogate sensors of various physical quantities. Automatic monitoring systems should simultaneously interrogate several sensors in order to make received data more informative. It also improves the ability to timely response to emergencies. The number of monitored facilities could be large. The further the sensors interrogation should be wireless. The development of Industrial IoT systems based on SAW sensors is limited due to the problem of a signal collision that occurs during simultaneous interrogation under industrial noise conditions. The paper considers the designs and physical principles of passive acousto electronic sensors. It is shown that existing radio-frequency automatic and semi-automatic control systems built on the passive acoustoelectronic identification tags can use sensors whose response signal contains information about the physical quantities (temperature SAW sensors). The paper discusses the possibility of simultaneously reading the various types of passive acoustoelectronic sensors (temperature, humidity, tension) under conditions of the high probability of collision case.

The study was carried out with a grant from the Russian Science Foundation (project No. 19–79–00303).

Keywords: acousto-electronic devices, IIoT, monitoring systems, SAW, magnetic impedance, sensors, RFID, SAW tags.

Леонтьев Владимир Васильевич

Аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
volodya.leo@gmail.com

Сорокин Александр Васильевич

Ассистент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
aleksandr.sorokin.v@gmail.com

Ненасhev Вадим Александрович

К.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
nenashev.va@yandex.ru

Ваттимена Гисбертх Мауритс

Аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
mauritswattimena@yahoo.com

Аннотация. В статье рассматривается применение пассивных акустоэлектронных датчиков на поверхностных акустических волнах (ПАВ) в системах промышленного интернета вещей (IIoT). Современным промышленным мультисенсорным системам для мониторинга состояния техногенных объектов необходимо опрашивать датчики различных физических величин. При этом ряд автоматических систем контроля должны одновременно опрашивать несколько датчиков для повышения информативности мониторинга и возможности своевременного прогнозирования аварийных ситуаций, технического и эксплуатационного контроля. Количество контролируемых объектов может быть достаточно большим, а опрос должен осуществляться по радиоканалу. Показано, что развитие таких систем ограничено из-за проблемы коллизии сигналов, возникающей при одновременном опросе в условиях промышленных помех.

В статье показаны конструкции и физические принципы работы современных и перспективных пассивных акустоэлектронных датчиков, не использующих источников энергии для передачи измеренной физической величины.

Показано, что существующие известные радиочастотные системы автоматического и полуавтоматического контроля, построенные на использовании пассивных акустоэлектронных идентификационных меток способны опрашивать датчики, ответный сигнал которых содержит информацию о контролируемой физической величине (датчики температуры на ПАВ). В статье обсуждается возможность одновременного опроса пассивных акустоэлектронных датчиков различного типа (температура, влажность, растяжение) в условиях высокой вероятности коллизии сигналов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19–79–00303).

Ключевые слова: акустоэлектроника, IIoT, системы контроля, ПАВ, магнитный импеданс, датчики, РЧИД, ПАВ метки.

Введение

В настоящее время активно внедряются системы промышленного интернета вещей (IIOT) на различных техногенных объектах. Такие системы могут быть предназначены для контроля и прогнозирования аварийных ситуаций, таких как перегрев или обледенение проводов линий электропередач, мониторинга движения транспортных средств, контроля перемещений оборудования на производстве, мониторинга состояния основных узлов и агрегатов на производстве. При этом для обеспечения помехозащищенности каналов связи мощность излучаемых сигналов данной аппаратуры высока, так как ей приходится работать на фоне промышленных помех, сигналов, излучаемых мобильными телекоммуникационными системами и модемами. Задача обеспечения надежной идентификации и повышенной помехозащищенности, обладающими высоким быстродействием, низким уровнем мощности излучаемых сигналов и высокой надежностью и долговечностью при эксплуатации может быть решена с помощью систем, построенных на использовании IIOT систем мониторинга использующих ПАВ датчики. Современный уровень развития технологий устройств на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и микропроцессорных устройств обработки сигналов сверхвысокой частоты и малой мощности позволяет создать аппаратуру для решения поставленной выше задачи.

В настоящее время существуют примеры использования радиочастотных систем на ПАВ для мониторинга техногенных объектов. При мониторинге состояния техногенных объектов, осуществляемого группой беспилотных летательных аппаратов, предполагается использование датчиков на основе пассивных радиочастотных меток, позволяющих контролировать температуру объектов, химические и радиоактивные выбросы, а также механические напряжения, которые могут привести к разрушению объектов, например мостов.

Для таких систем предполагается разработка алгоритмов обнаружения датчиков, информирующих о состоянии техногенных объектов.

Решение данной задачи является чрезвычайно важным, в связи с тем, что на территориях РФ находятся много потенциально опасных техногенных объектов, кроме того, в летний период возникают лесные пожары, а зимой соответствующим службам приходится довольно часто спасать рыбаков — любителей подводного лова. Этот подход осуществляет мониторинг в полностью автоматизированном режиме, что позволит своевременно выявлять загрязнения морской и земной поверхностей (нефть, грязь), своевременно обнаруживать очаги возгорания в лесных массивах, выявлять опасное состояние

техногенных объектов (возможность возгорания, возможного разрушения из-за возрастания механического напряжения и т.п.).

Создание подобного комплекса позволит своевременно информировать соответствующие службы о возможных экологических катастрофах, разрушениях техногенных объектов, что в свою очередь позволит принимать превентивные меры предотвращения подобных катастроф.

Современные мультисенсорные системы используют несколько датчиков для мониторинга объектов. Как правило в системах IIOT считывающее устройство постоянно опрашивает датчики.

В системах контроля электроэнергетических объектов [1] показано, что применяемые системы для автоматического мониторинга могут использовать несколько одновременно опрашиваемых датчиков температуры для контроля одной ячейки комплектно-распределительного устройства (КРУ).

При автоматизации высокотехнологичных производств большое внимание уделяется контролю перемещения изделий и их комплектующих между цехами, а также контролю качества изготавливаемых технических систем. При этом зачастую требуется, чтобы информация о процессе производства автоматически передавалась в центральный пункт управления и контроля, что позволяет оперативно вмешиваться в процесс производства, предотвращая простои из-за нехватки или ошибки комплектующих и сбои производства, приводящие к браку. Для решения проблемы автоматического контроля в последнее время все чаще используются радиочастотные акустоэлектронные метки, обладающие высокой устойчивостью к экстремальным условиям производства (высокая температура, влажность, давление и т.п.), что позволяет надежно определять индивидуальные номера меток и следовательно идентифицировать соответствующие изделия.

Одной из проблем, сдерживающей широкое использование радиочастотных идентификационных меток (РЧИД меток), являющихся акустоэлектронными устройствами, при их использовании для автоматизации процессов управления производством, является проблема коллизий. В работе рассматривается один из возможных подходов к решению этой проблемы.

1. Виды датчиков на ПАВ и их физические принципы работы

В типовых радиочастотных системах, применяющих акустоэлектронные датчики, считывающее устройство

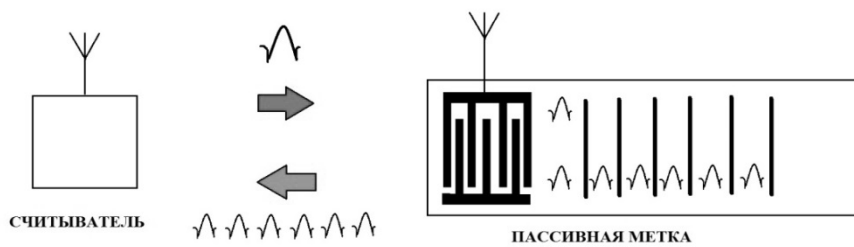


Рис. 1. Упрощенная конструкция типowego пассивного акустоэлектронного датчика.

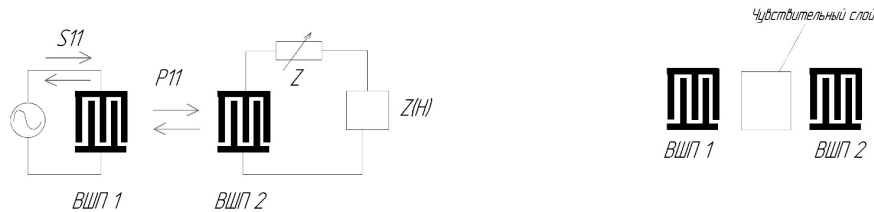


Рис. 2. Гибкий магнитный датчик на ПАВ: а) — структурная схема; б) — функциональная схема

осуществляет опрос пассивного датчика по радиоканалу. Опросный сигнал от приемо-передающего устройства приходит на антенну, расположенную на поверхности датчика. Топология содержит последовательно расположенные встречно-штыревой преобразователь (ВШП) и отражающие структуры (рефлекторы) [2,3,4]. ВШП преобразует электромагнитную волну в ПАВ, которая распространяется вдоль подложки из ниобата лития $LiNbO_3$ или танталата лития $LiTaO_3$. В момент, когда ПАВ встречает неоднородность в виде рефлектора, часть ее отражается в ВШП, а часть распространяется далее вдоль поверхности, отражаясь от последующих рефлекторов. Таким образом, ответный сигнал представляет собой ряд задержанных во времени импульсов. Время задержки между импульсами определяется топологией РЧИД ПАВ датчика. Полученный сигнал обрабатывается в приемо-передающем устройстве и преобразуется в идентификационный код датчика и информацию о температуре [4].

Получение уникального идентификационного кода называется ее кодированием [2,3]. Необходимо отметить, что кодирование, применяемое к подобным конструкциям, является временным, так как получаемый идентификационный код определяется, как правило, относительно временных задержек между ответными импульсами. Получение информации считывающим устройством об измеряемой величине контролируемого объекта возможно только при облучении опросным сигналом в зоне действия считывателя.

Существуют различные варианты акустоэлектронных датчиков на ПАВ. В датчиках тока на ПАВ применяется магнетострикционный материал на тонкой плёнке.

Резонансная частота такого устройства изменяется в ответ на изменение внешнего магнитного поля. На этом явлении основан метод детектирования магнитного поля.

На рисунке 2 представлена схема тонкоплёночного датчика магнитного импеданса на ПАВ, содержащего в себе приёмопередатчик с ВШП, чувствительную часть и согласующую цепь [5].

Датчик магнитного импеданса представляет собой структуру, имеющую один проводящий слой, расположенный между двух слоёв ферромагнетика. Магнитный импеданс, измеряемый датчиком, определяется по выражению 1:

$$Z = R_{dc} (\xi x_1 + x_2) \left[\frac{\coth(x_1) \cdot \coth(x_2) + \xi}{\coth(x_1) + \xi \cdot \coth(x_2)} \right] \quad (1)$$

$$\text{где } R_{dc} = \frac{l}{t_1 w \cdot k_1 + 2t_2 w \cdot k_2}$$

значение сопротивления по постоянному току, в выражении которой коэффициенты k_1 и k_2 , являются величинами проводимости металлического и магнитного слоев соответственно, t_1 и t_2 — толщины слоев, l — длина подложки датчика, w — апертура датчика.

$$\text{При этом } x_1 = \frac{(i-1)t_1}{\delta_1}, x_2 = \frac{(i-1)t_2}{\delta_2}, \text{ где}$$

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{2}{k_1 w \cdot \mu_0}}, \delta_2 = \sqrt{\frac{2}{k_2 w \cdot \mu_0}}$$

Датчики температуры на ПАВ подробно описаны в [4,6]. На рисунках 3а и 3б показаны возможные конструкции датчиков, состоящие из пьезоэлектрической

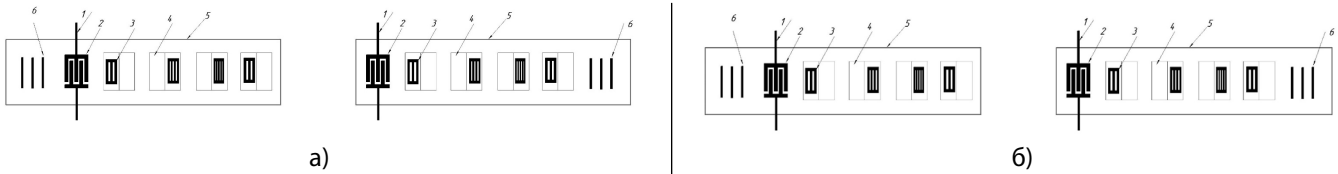


Рис. 3 а,б. Конструкции ПАВ меток, используемых в качестве датчиков температуры

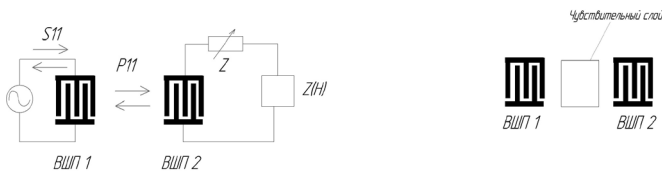


Рис. 4. Акустоэлектронный датчик химических веществ

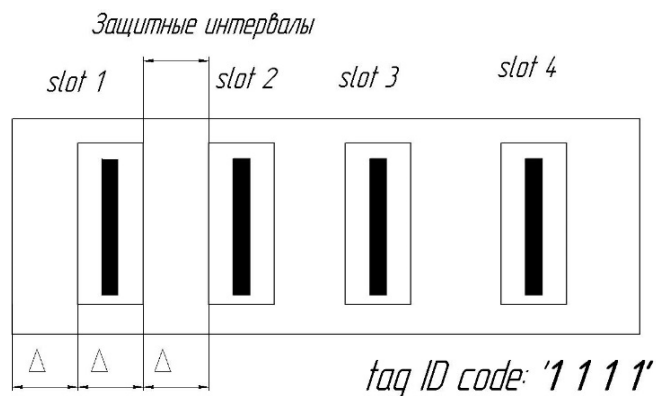


Рис. 5. Вариант расположения рефлекторов во временных слотах.

подложки 5, на поверхности которой последовательно расположены однонаправленный широкополосный встречно-штыревой преобразователь 2 с антенной 1, ортогонально-частотно кодированные отражающие структуры 3, расположенные в условных временных слотах 4, положение в которых определяет идентификационный код датчика температуры, рефлекторы 6, позволяющие получить сигнал, при обработке которого определяется величина температуры.

Приведенные конструкции отличаются местоположением и типом ВШП. На рис. 3б ВШП позволяет отражать ПАВ волны, как в правую часть подложки, так и в левую, что усложняет конструкцию, но позволяет уменьшить затухание сигнала, несущего информацию о температуре.

Принцип работы датчика концентрации химических веществ в воздухе основан на фиксации изменений количества частиц, попадающих в устройство. Структурная схема датчика химических испарений представлена на рисунке 5.

Устройство состоит из двух ВШП, нанесенных на пьезоэлектрическую подложку. Область между двумя ВШП покрыта чувствительным слоем, взаимодействующим с химическими парами или газами. Молекулы химических веществ, попадая на чувствительную плёнку, способны возбудить поверхностные электрические волны в подложке.

В основе конструкции датчиков как правило, лежит конструкция линии задержки. Для формирования индивидуального кода датчика возможно использование конструкции, показанной на рисунке 6.

Конструкция, условно показанная на рисунке, отличается от предлагаемой конструкции в работах [7]. Как правило, отражающие структуры располагаются в условных временных слотах [2,3]. В каждом слоте может располагаться только одна структура. В работе [7] описаны конструкции, содержащие две возможные позиции отражающей структуры в каждом из четырех слотов. Идентификация каждого датчика, основывается как правило, на получении ответных импульсов, временные задержки между которыми определяются расстояниями между отражающими структурами. Анализируется наличие отражающей структуры в заданном месте топологии.

В предлагаемом подходе, реализуемом с помощью показанной конструкции, уменьшаются энергетические потери сигнала, за счет сокращения расстояния распространения акустической волны вдоль поверхности пьезоэлектрической подложки. Относительные энергетические соотношения сигналов меток для временного, частотного и частотно-временного антиколлизционных алгоритмов подробно описаны в [7].

Соотношения вероятностей правильной идентификации меток с временным кодированием, описанной

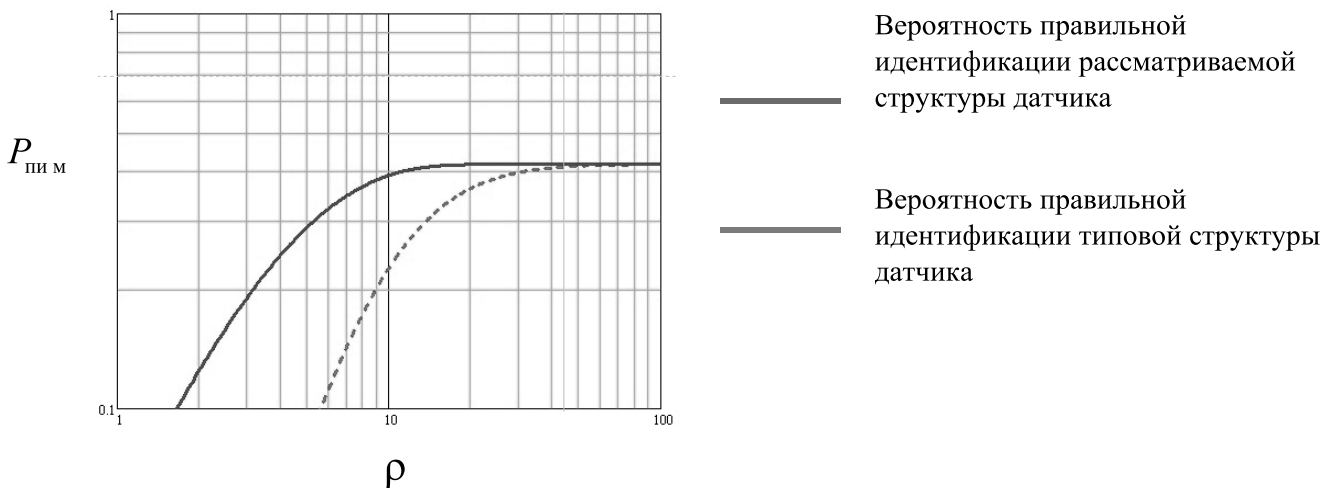


Рис. 6. Вероятность идентификации акустоэлектронных датчиков, при $P_{лт м} = 10^{-2}$ в зависимости от соотношения сигнал/шум ρ

в работе [7] и предлагаемой моделью конструкции, позволяют оценить эффективность рассматриваемого решения.

Для рассмотрения правильной идентификации различных моделей меток введены понятия ложной тревоги на слот, на обнаружитель и на метку. Эти понятия, а также их выражения описаны в работах [7]. В отличие от подхода описанного в статье [7] для предлагаемой конструкции, вероятность появления ложной тревоги в слоте $P_{лт с i}$ возможно четыре возможных события: появление рефлектора в одном из двух положений в слоте, а также ситуации отсутствия рефлектора в заданный промежуток времени и возникновение ложного импульса.

Код метки определяется правильно, если во всех m слотах, определяющих двоичный m разрядный код метки, происходит правильная идентификация разрядов. Вероятность правильной идентификации кода метки $P_{пн м}$ вычисляется по формуле

$$P_{пн м} = \prod_{i=1}^m P_{пн с i} = (1 - P_{лт})^m \prod_{i=1}^m P_{по i}, \quad (2)$$

где $P_{пн с i}$ — вероятность правильной идентификации двоичного разряда i -го кода метки, $P_{по i}$ — вероятность правильного обнаружения информационного импульса от i -го разряда кода метки.

Сокращение возможных вариантов положения рефлекторов в слотах приводит к уменьшению энергетических потерь, и к увеличению вероятности правильной идентификации метки в условиях промышленных помех. При промышленной помехе, носящей случайный характер, идентификация кода метки происходит при

приеме пачки радиоимпульсов размером $n_e = n/M$, где M количество одновременно опрашиваемых меток, находящихся в зоне опроса. Что делает используемый подход более помехоустойчивым по сравнению с традиционными подходами.

Результаты моделирования

Рассматриваются M датчиков, имеющих описанную выше конструкцию. При оптимизированных коэффициентах отражения мощность $P_{э i}$ информационного сигнала, обусловленного рефлектором i -го разряда метки, на входе излучающего ВШП равна

$$P_{\hat{a} i} = P_{\hat{a}} = P_0 \cdot e^{-3\alpha\Delta} \cdot \frac{e^{6\alpha\Delta} - 1}{e^{6\alpha m\Delta} - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (3)$$

В выражении (3) принято, что защитные интервалы и полуслоты имеют одинаковый размер Δ , как показано на рисунке 1, коэффициент отражения от последнего слота равен 1, во всех слотах записана «1» двоичного разряда.

Идентификация кода метки происходит при приеме пачки радиоимпульсов размером $n_e = n/M$, где M количество одновременно опрашиваемых меток, находящихся в зоне опроса.

Расчеты выполнены для следующих значений параметров антиколлизционных алгоритмов: количество слотов $m=4$; количество меток в зоне опроса $M=4$;

В данной статье в расчетах мы ограничились вероятностью ложной тревоги на метку $P_{лт м} = 10^{-2}$; количеством

опросов меток $n_g=8$; пороги цифровых компараторов $k_g=4$; затухание акустической волны при распространении в подложке метки на интервале между крайними рефлекторами принято равным — 20 Дб.

При накоплении N пачек вероятность правильной идентификации, равная $P_{\text{ни мн}}=1-(1-P_{\text{ни м}})^N$, стремится к единице «1» для всех трех алгоритмов при любой ложной тревоге $P_{\text{лт м}} < 1$.

Заключение

В статье рассмотрены несколько типов акустоэлектронных датчиков: датчики температуры, концентрации химических веществ и др., построенные на принципах линии задержки, ограничены в применении из-за проблем коллизии. Некоторые работы предлагают различ-

ные решения данной проблемы. Например, для датчика температуры целесообразно использовать ортогонально-частотное кодирование. Однако получение импульсной характеристики таких устройств в классическом смысле ограничено и требует особых условий опроса и обработки информации. Использование частотно-временного метода способно существенно снизить риск возникновения коллизии. Показано, что использование предлагаемой конструкции в датчиках позволяет, как показано на графике увеличить вероятность правильной идентификации датчика за счет уменьшения энергетических потерь при распространении ПАВ волны.

Рассмотренное решение возможно использовать в системах промышленного интернета вещей (IIOT) для датчиков с частотно-временным методом кодирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marek Budyn, Harsh Karandikar, M G Urmsom. Switchgear Condition Monitoring. Conference: CIGRÉ Conference on Power Systems, Vancouver, October 17–19, 2010
2. Plesky V., Reindl L. Review on SAW RFID tags. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2010.
3. Дмитриев В. Ф. Устройства интегральной электроники: Акустоэлектроника. Основы теории, расчета и проектирования: учеб. пособие/ ГУАП. — СПб., 2006. С. 3–6.
4. Malocha C., Gallagher M., Fisher B., Humphries J., Gallagher D., Kozlovski N. A Passive Wireless Multi-Sensor SAW Technology Device and System Perspectives. Electrical Engineering & Computer Science Department, University of Central Florida, Orlando, FL 32816, USA. 2013. P. 10–14.
5. Li. B. Advanced Magnetoimpedance Sensors. /B. Li// Computer, Electrical and Mathematical Sciences and Engineering (CEMSE) Division. — 2015. P. 35–38, 48–51, 98–100.
6. Sorokin, A. V. Wireless SAW passive tag temperature measurement in the collision case / A. V. Sorokin, A. P. Shepeta, M. G. Wattimena //Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Т. 1008. — № . 1. — С. 012015.
7. Sorokin, A. V. Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves / A. V. Sorokin, A. P. Shepeta, V. A. Nenashev, G. M. Wattimena //Информационно-управляющие системы, 2019, No 1, с. 48–56. doi:10.31799/1684–8853–2019–1–48–56

© Леонтьев Владимир Васильевич (volodya.leo@gmail.com), Сорокин Александр Васильевич (aleksandr.sorokin.v@gmail.com),
Ненасhev Вадим Александрович (nenashev.va@yandex.ru), Ваттимена Гисбертх Мауритс (mauritswattimena@yahoo.com).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»