

УДК 681.586.37

DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.44-52

ELECTRONIC GAS-ANALYZERS FOR UNMANNED SHIPS**ЭЛЕКТРОННЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СУДОВ**

S.A. Mikhailov, *DSc, professor*, **I.M. Vikulin**, *DSc, professor*, **N.S. Mikhailov**, *PhD student*
С.А. Михайлов, *д.т.н., профессор*, **И.М. Викулин**, *д.ф.-м.н., профессор*, **Н.С. Михайлов**,
аспирант

National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

Principles of action of electronic analyzers of gas environment, the sensors of that are realized on the basis of the field transistors with a structure «metal-dielectric-semiconductor», optronic gas sensors and magnetic electronic sensors, are described. Charts over of measuring, construction of sensors are brought and basic application domains are indicated. Experimental descriptions over of pre-production models of electronic analyzers of gas environment and flow diagrams of measuring devices are brought.

A task of creation fully of electronic automatic measuring devices for control of composition of gas environment is especially actual for autonomous unmanned ships without a crew. The feature of realization of such task is that output signals of measuring devices must be all-electric, electronic, consonant with the systems of transmission of these coastal control centers.

Known devices, measuring of composition of gas environment, executed on the basis of the semiconductor thin-films inflicted on ceramic basis, have a high energy consumption and limited tenure of employment from the necessity of their heating to the temperatures 200 - 500 °C.

Perspective are the measuring systems on the basis of the field transistors executed on a structure «metal-dielectric-semiconductor». Such devices can be used for control of maintenance of hydrogen. Application of bridge chart of measuring on four such transistors allowed to promote a sensitiveness in 10-15 times.

The optronic measuring systems differ in an enhanceable fast-acting and stability of testimonies due to absence of contact of gas atoms with the electric chains of sensor. A chart is offered for control of maintenance of ammonia in the gas environment of ship.

Magnetic electronic sensors gas analyzer on the basis of twocollectors magnetic transistor can be applied for measuring of concentration of oxygen in a gas environment on a ship. He allows to control maintenance of gas and measure his concentration on electrophysics descriptions of gas. In particular, measuring take place by control of size of relative permeance of gas mixture.

Quite obviously, that the electronic analyzers of gas environment for the different types of gases will become the obligatory attribute of future autonomous unmanned ships without a crew. They will be able not only to replace classic gas analyzers but also will allow, in real-time, operatively to inform the operators of coastal control centers about a current situation for the acceptance of necessary decisions on providing of safety of navigation.

Keywords: automatic ships, electronics data transmit, gas-analyzer, safety of navigation, navigation, unmanned ships.

РЕФЕРАТ

Описані принципи дії електронних аналізаторів газового середовища, датчики яких реалізовані на основі польових транзисторів із структурою «метал-діелектрик-напівпровідник» з газочутливим затвором, оптоелектронних газових датчиків і

магнітоелектронних датчиків. Наводяться схеми вимірювальних пристроїв, конструкції датчиків і вказані основні сфери застосування. Наводяться експериментальні характеристики дослідних зразків електронних аналізаторів газового середовища і структурні схеми вимірювальних пристроїв.

Завдання створення повністю електронних автоматичних вимірювальних пристроїв для контролю складу газового довкілля є особливо актуальним для автономних суден без екіпажу. Особливістю реалізації такого завдання є те, що вихідні сигнали вимірювальних пристроїв мають бути виключно електричними, електронними, сумісними з системами передачі даних берегових центрів, що управляють автономними суднами.

Відомі пристрої виміри складу газового середовища, виконані на основі тонких напівпровідникових плівок, нанесених на керамічну основу, мають високе енергоспоживання і обмежений термін служби із-за необхідності їх нагріву до температур 200 - 500 °С.

Перспективними є вимірювальні системи на основі польових транзисторів, виконаних по структурі «метал-діелектрик-напівпровідник» (МДП). Такі пристрої можуть використовуватися для контролю змісту водню. Застосування мостової схеми виміру на чотирьох таких транзисторах дозволило підвищити чутливість в 10-15 разів.

Оптоелектронні вимірювальні системи відрізняються підвищеною швидкістю і стабільністю показів за рахунок відсутності контакту атомів газу з електричними ланцюгами датчика. Запропонована схема для контролю вмісту аміаку в газовому середовищі судна.

Магнітоелектронний газоаналізатор на основі магніточутливого двоколекторного магнітотранзистора може бути застосований для вимірів концентрації кисню в газовому довкіллі на судні. Він дозволяє контролювати зміст газу і вимірювати його концентрацію за електрофізичними характеристиками самого газу. Зокрема, виміри відбуваються шляхом контролю величини відносної магнітної проникності газової суміші.

Абсолютно очевидно, що електронні аналізатори газового середовища для різних типів газів стануть обов'язковим атрибутом майбутніх автономних судів без екіпажа. Вони зможуть не лише замінити класичні газоаналізатори, але і дозволять, в режимі реального часу, оперативно інформувати операторів берегових центрів управління судами про поточну обстановку для ухвалення потрібних рішень по забезпеченню безпеки судноплавства.

Ключові слова: автоматизація судів, електронна передача даних, газоаналізатори, безпека судноводіння, навігація, судна без екіпажа.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Контроль состояния газовой среды на морских судах всегда был актуальной задачей, как с целью обеспечения безопасности для груза и судоходства в целом, живучести самого судна, так и в смысле охраны жизни и здоровья членов экипажа. Между тем, в связи с разработкой и созданием полностью автономных автоматизированных судов без людей на борту, эта задача становится ещё более актуальной. Особенность реализации анализаторов газовой среды для автономных судов заключается в том, что их информация должна быть представлена не в визуальной форме – в виде показаний стрелочных приборов, а полностью в электронном формате, желательно цифровом, для её передачи, в режиме реального времени, на береговой центр – оператору, контролирующему текущую обстановку и управляющему данным судном [1].

По этой причине устройствам, осуществляющим контроль газовой среды на морских судах, предстоит реновация и модернизация, начиная от первичных датчиков и схем измерения, до преобразователей информации и каналов передачи данных.

Предлагаемые и обсуждаемые в данной статье устройства реализуют запатентованные авторами новые принципы и схемы измерений, для различных типов газовых сред: аммиака, кислорода, водорода. Сигналы в этих устройствах являются исключительно и полностью

электронными. Такое оборудование представляется востребованным и актуальным для полностью автоматизированных автономных судов без экипажей.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В настоящее время в сфере морских информационных технологий (ИТ) происходят изменения, связанные с появлением новых беспилотных судов, с усилением конкуренции среди провайдеров связи, применением новых телекоммуникационных технологий как по каналам связи «судно-берег-судно», так и внутри судна. Наиболее перспективными направлениями применения ИТ в этой сфере считаются Е-навигация и безэкипажное судовождение. Известен проект Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN), который координируется Центром морской логистики Фраунгофера[2]. В рамках MUNIN, консорциум научных и промышленных организаций разработал концепцию безэкипажного судна, управляемого бортовой электроникой под контролем берегового центра. Были предложены технические решения для автономного мостика и машинного отделения, берегового центра и коммуникации судна с ним [2, 3].

Для автономных судов без экипажа особая и ответственная роль возлагается на сенсоры и датчики безэкипажного судна. Назначение сенсоров, например, для безопасного судовождения, это выявление плавающих на поверхности воды объектов, которые представляют опасность для движения, и передача соответствующей информации в центр управления. В случае полностью автономного судна алгоритмы системы управления должны принимать решение о способе безопасного расхождения с такими объектами из прогноза их поведения. Аналогичные системы нужны для выявления и анализа световых и звуковых сигналов, которые подаются другими участниками движения, а также маячных огней, навигационных знаков и буев. Понятно, такие системы принесут пользу и для традиционного судовождения с экипажем на борту судна.

Отдельная самостоятельная и важная задача – это мониторинг состояния механизмов и узлов автономного или малоэкипажного судна, осуществляемый с помощью датчиков, которые определяют не только стандартные технические параметры оборудования, но и непрямые, например, звуки и вибрацию (на обычном судне это дополнительная информация может стать важным обстоятельством для принятия управленческого решения опытным судовым инженером) [4]. Полученные данные должны передаваться в береговой центр управления, а также служить входными данными для системы управления автономным судном. Для автономных судов актуальны технологии мониторинга помещений на предмет наличия воды, дыма, нештатного изменения температуры и влажности, степени загазованности и определении типа постороннего газа.

Принцип действия известных полупроводниковых газовых датчиков основан на изменении сопротивления тонких полупроводниковых пленок вследствие адсорбции газов. Однако такая адсорбция происходит при повышенных температурах порядка 200 – 500 °С. Для этого полупроводниковая плёнка с двумя контактами размещается на поверхности керамической трубки с нагревателем внутри. Максимальная чувствительность сопротивления плёнки к определённому газу зависит от состава плёнки и от температуры нагревателя. В измерительной схеме такой газочувствительный плёночный резистор включается в мостовую схему измерения вместе с тремя пассивными постоянными прецизионными резисторами (мост Уитстона), выходное напряжение с которого является функцией концентрации измеряемого газа. Необходимость нагревателя и высоких температур увеличивают энергопотребление и ограничивают срок службы таких полупроводниковых газочувствительных элементов.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является разработка принципиально новых электронных газочувствительных датчиков и устройств, измеряющий количественный и качественный

состав газовой среды. Эти схемы измерения и устройства не имеют подвижных механических частей и механизмов, их выходные сигналы являются полностью электронными.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

1. Газочувствительные полевые транзисторы

Перспективным является построение газовых датчиков на основе полупроводниковых транзисторов, один из элементов которого является газочувствительным. Примером такого датчика является полевой МДП – транзистор (структура металл – диэлектрик – полупроводник) с индуцированным каналом, показанный на рис. 1 [2].

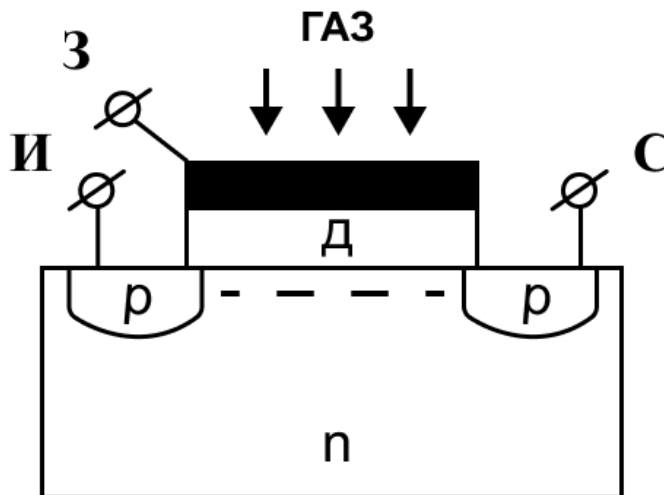


Рис.1. Конструкция газочувствительного МДП – транзистора

Входной цепью является цепь исток (И) – затвор (З), а выходной цепью исток (И) – сток (С). При подаче на затвор отрицательного напряжения U_3 , электроны отталкиваются от поверхности и на ней образуется канал р-типа (пунктирная линия), соединяющий р-области истока и стока. При изменении U_3 изменяется толщина канала и выходной ток I_{nc} . В качестве затвора используется тонкая плёнка металла, адсорбирующая атомы измеряемого газа, вследствие чего изменяется контактная разность потенциалов I_k между металлом и диэлектриком, являющаяся частью последовательной цепи исток–затвор и U_3 . Соответственно, изменяется выходной ток I_{nc} пропорционально концентрации измеряемого газа. Чувствительность к определённому газу определяется составом металлической плёнки затвора, например, затвор из никеля и палладия чувствителен к водороду.

В транзисторе с базой р-типа и истоком и стоком n-типа при этом же металле затвора знак изменения ΔI_{nc} будет противоположный. Обычно при использовании таких транзисторов в качестве датчиков они включаются как двухполюсник (затвор замкнут с истоком). Из двух пар МДП–транзисторов с противоположными знаками газовой чувствительности можно составить мост Уитстона, выходной сигнал ψ которого пропорционален концентрации измеряемого газа. Газочувствительность датчика из четырёх МДП–транзисторов более чем на порядок выше чувствительности резистивных датчиков. Одновременно с увеличением чувствительности достигается большая температурная стабильность выходного сигнала, так как ток всех транзисторов одинаково зависит от температуры.

Опытные образцы таких, чувствительных к водороду, МДП–транзисторов изготавливались на основе кремния с платиновым затвором. Взаимодействие всех четырёх транзисторов в описываемой схеме измерения приводит к увеличению чувствительности газоанализатора в 10-15 раз по сравнению со схемой на одном МДП–транзисторе.

2. Оптоэлектронные газовые датчики

Общим недостатком рассмотренных выше датчиков является наличие электрического поля в чувствительном элементе, что приводит к электромиграции атомов и снижению стабильности показаний датчика. Нестабильность этого типа устраняется в оптоэлектронных газовых датчиках, где чувствительным элементом служит полупрозрачная плёнка, коэффициент прозрачности которой зависит от концентрации окружающего газа. Датчик состоит из светодиода и фотоприемника, между ними находится стеклянная пластина, на поверхность которой наносится газочувствительная плёнка. Свет проходит от светодиода через плёнку и попадает на фотоприемник, ток которого является выходным параметром датчика. С ростом концентрации измеряемого газа коэффициент пропускания света плёнки уменьшается, что приводит к уменьшению тока через фотоприемник. На рис. 2 приведена схема такого датчика, где сигнал с фотодиода подается на усилитель и регистрируется вольтметром.

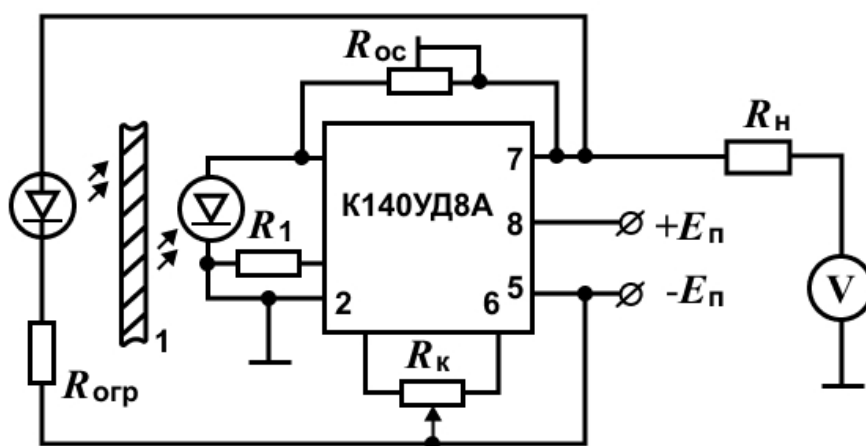


Рис.2. Электрическая схема газового датчика аммиака (1 – газочувствительная пленка)

В опытных образцах датчиков аммиака использовались светодиоды типа АЛ336, фотодиоды ФД256 и усилитель К140УД8А. Газочувствительная плёнка на основе солей фталевой кислоты с различными компонентами толщиной ~ 10 мкм наносилась на стеклянную пластину толщиной 1мм [3]. Максимальное поглощение света плёнкой происходит на длине волны 625 нм. При увеличении концентрации аммиака в воздухе от 0 до 30 мг/м^3 выходной сигнал изменяется на 0,85 В (рис. 3). Время адсорбции аммиака составляет около 15 с, десорбции – минуты.

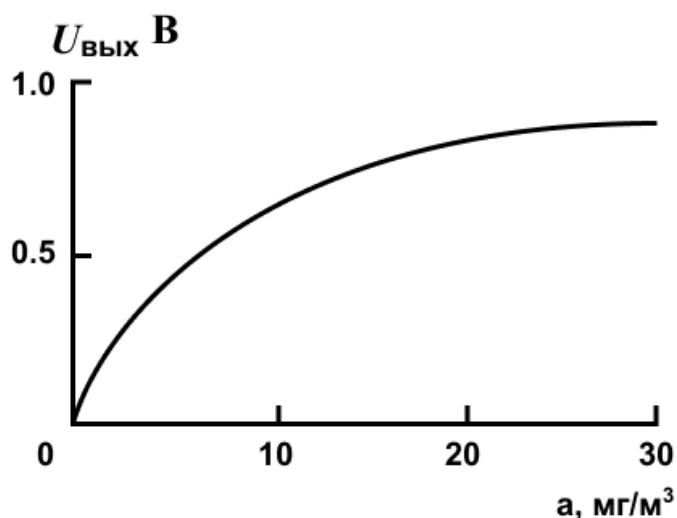


Рис 3. Зависимость выходного сигнала газового датчика от объемной доли аммиака в окружающей среде

В оптоэлектронных газовых датчиках нет контакта атомов газа с электрическими цепями датчика, что повышает их стабильность и быстродействие.

3. Магнитоэлектронный газоанализатор

В рассмотренных датчиках концентрация газа измеряется по изменению характеристик другого вещества, на которое действует газ. Более интересна возможность измерения концентрации газа по электрофизическим характеристикам самого газа. Одно из таких характеристик является относительная магнитная проницаемость газа μ , которая определяет величину магнитной индукции B в газе, помещенном в магнитное поле напряженностью

$$B = \mu_0 \mu H, \quad (1)$$

где постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ГН/м.

В вакууме $\mu = 1$, все газы относятся либо к парамагнитным $\mu > 1$ либо к диамагнитным $\mu < 1$. В неоднородном магнитном поле на тело, внутри которого находится газ, действует сила либо втягивающая тело в область с большей напряженностью H ($\mu > 1$), либо выталкивающая его $\mu < 1$. По величине этой силы можно определять концентрацию окружающего тело газа [5]. Для этого нужен сложный электромеханический преобразователь, преобразующий механическую силу в электрический сигнал.

Гораздо проще определять концентрацию газа по величине магнитной индукции внутри газа. Как известно, внутри тела, помещенного в магнитное поле, линии индукции магнитного поля сгущаются ($\mu > 1$) или ослабляются ($\mu < 1$). Наибольшей величиной ($\mu > 1$) характеризуется кислород. Следовательно, если кислород поместить в магнитное поле, величина индукции B внутри его будет увеличиваться пропорционально концентрации кислорода. На этой основе действует электронный газоанализатор кислорода [6]. При притоке газа в промежуток между острыми полюсами магнита (рис.4) линии индукции магнитного поля сгущаются, и величина индукции B растёт пропорционально концентрации газа. Величина индукции B регистрируется магниточувствительным датчиком, выходное напряжение которого является величиной, по которой определяется концентрация газа.

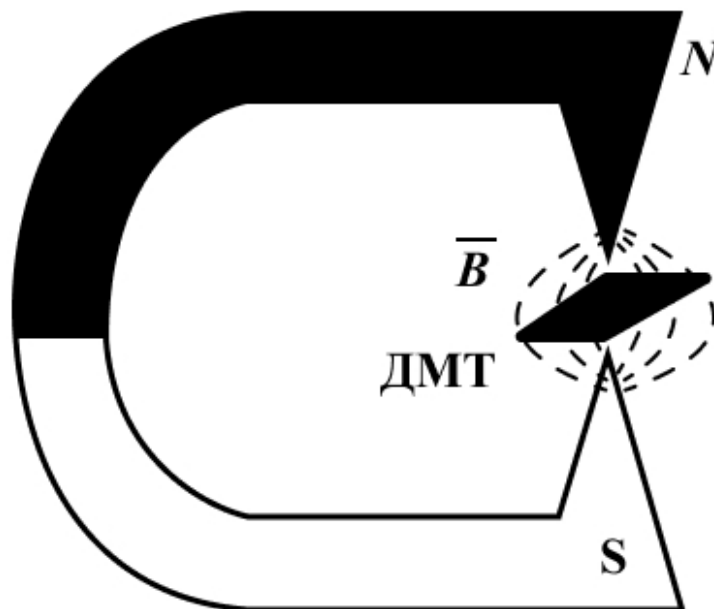


Рис 4. Структура электромагнитного датчика кислорода

Наибольшей магниточувствительностью из всех полупроводниковых датчиков магнитного поля характеризуются двухколлекторный магнитотранзистор (ДМТ), схема которого показана на (рис.5) [7]. Он состоит из полупроводниковой пластины п-типа, на которой размещен эмиттер р-типа, два коллектора р-типа и базовый контакт п⁺-типа.

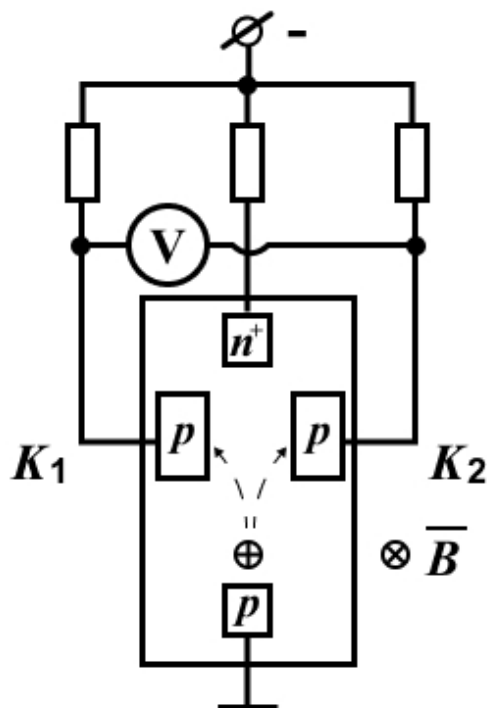


Рис 5. Схема двухколлекторного магнитотранзистора

В отсутствие магнитного поля инжектированные из эмиттера дырки поровну распределяются между коллекторами, их токи равны и напряжение между коллекторами $V = 0$. В магнитном поле указанной полярности сила Лоренца \vec{V} отклоняет дырки к коллектору K_1 , его ток увеличивается, а ток K_2 уменьшается, что приводит к росту величины электрического напряжения между коллекторами транзистора.

$$V = V_{K2} - V_{K1} = cB, \quad (2)$$

где c - постоянная, определяемая конструктивными параметрами ДМТ.

Газоанализатор такого типа наиболее применим к кислороду, так как большинство газов диамагнитные, а кислород не только H парамагнитный, но и величина его относительной магнитной проницаемости наибольшая из всех парамагнитных газов. Площадь кремневых образцов ДМТ порядка $500 \times 500 \text{ мкм}^2$ чувствительность опытных образцов газоанализаторов кислорода порядка 0,1 - 0,2 мВ на каждый процент объема [8].

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Задача создания полностью электронных автоматических измерительных устройств для контроля состава окружающей газовой среды является особенно актуальной для автономных судов без экипажа. Особенностью реализации такой задачи является то, что выходные сигналы измерительных устройств должны быть исключительно электрическими, электронными, совместимыми с системами передачи данных береговых управляющих центров [9-17].

Известные устройства измерения состава газовой среды, выполненные на основе тонких полупроводниковых пленок, нанесенных на керамическую основу, имеют высокое энергопотребление и ограниченный срок службы из-за необходимости их нагрева до температур 200 – 500 °С.

Перспективными являются измерительные системы на основе полевых транзисторов, выполненных по структуре «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП). Такие устройства могут использоваться для контроля содержания водорода. Применение мостовой схемы измерения на четырех таких транзисторах позволило повысить чувствительность в 10-15 раз.

Оптоэлектронные измерительные системы отличаются повышенным быстродействием и стабильностью показаний за счет отсутствия контакта атомов газа с электрическими цепями датчика. Предложена схема для контроля содержания аммиака в газовой среде судна.

Магнитоэлектронный газоанализатор на основе магниточувствительного двухколлекторного магнитотранзистора может быть применен для измерений концентрации кислорода в окружающей газовой среде на судне. Он позволяет контролировать содержание газа и измерять его концентрацию по электрофизическим характеристикам самого газа. В частности, измерения происходят путем контроля величины относительной магнитной проницаемости газовой смеси.

Совершенно очевидно, что электронные анализаторы газовой среды для разных типов газов станут обязательным атрибутом будущих автономных судов без экипажа. Они смогут не только заменить классические газоанализаторы, но и позволят, в режиме реального времени, оперативно информировать операторов береговых центров управления судами о текущей обстановке для принятия нужных решений по обеспечению безопасности судоходства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викулин И.М. Электронный компас для автономных судов без экипажа. / И.М. Викулин, Н.С. Михайлов, С.А. Михайлов // Судноводіння: Зб. наук. праць. / НУ «ОМА», Вип. 30. с. 43-51. – Одеса: «ВидавІнформ», 2020. DOI: <https://doi.org/10.31653/2306-5761.29.2020.43-51>
2. Burmeister H. C. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN perspective/ H. C. Burmeister, W. Bruhn, O. J. Rodseth, T. Porathe // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2014. — Vol. 1. — pp. 1–13. DOI: [10.1016/j.enavi](https://doi.org/10.1016/j.enavi).
3. Jokioinen E. Remote and Autonomous Ships — The next steps / E. Jokioinen, J. Poikonen, M. Hyvönen, A. Kolu, [etc.]. — London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2016. — 88 p.
4. Vikulin I.M. Combined semiconductor injection magnetic field sensors for wireless information networks. / I.M. Vikulin, L.F.Vikulina, V.E.Gorbachev, N.S.Mikhailov // Radioelectronics and Communication Systems, 2020, Vol. 63, № 7, pp. 368-375. – Allerton Press. – N.-Y. – 2020.
5. Park B., Nah J., Choi J., Yoon I. “Robust Wireless Sensor and Actuator Networks for Networked Control Systems,” Sensors (Basel), Vol. 19, No. 7:1535, p. 1–28, 2019. DOI: [10.3390/s19071535](https://doi.org/10.3390/s19071535).
6. Chen Z., Deng F., Fu Z., Wu X. “Design of an Ultra-low Power Wireless Temperature Sensor Based on Backscattering Mechanism,” Sensing and Imaging An International Journal, Vol. 19, No. 1, pp. 19–24, 2018. DOI: [10.1007/s11220-018-0207-x](https://doi.org/10.1007/s11220-018-0207-x).
7. Luong V. S.; Lu C.C.; Yang J.W.; Jeng J.T. “A novel CMOS transducer for giant magnetoresistance sensors” Review of Scientific Instruments, Vol. 88, No. 2:025004, 2017 DOI: [10.1063/1.4976025](https://doi.org/10.1063/1.4976025).
8. Luong V. S., Tuan N.A., Tue N.A. “Exchange Biased Spin Valve-Based Gating Flux Sensor,” Measurement, Vol. 115, p. 173–177, 2018. DOI: [10.1016/j.measurement.2017.10.038](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.10.038).
9. Li Z.R., Mi W.B., Bai H.L. “The contribution of distinct response characteristics of Fe atoms to switching of magnetic anisotropy in Fe₄N/MgO heterostructures,” Applied Physics Letters, Vol. 113, No. 13:132401, 2018. DOI: [10.1063/1.5048317](https://doi.org/10.1063/1.5048317).
10. Jibiki Y., Goto M., Tsujikawa M. et al. “Interface resonance in Fe/Pt/MgO multilayer structure with large voltage controlled magnetic anisotropy change,” Applied Physics Letters, Vol. 114, No. 8:082405, 2019. DOI: [10.1063/1.5082254](https://doi.org/10.1063/1.5082254).

11. Bichurin M.I., Petrov V.M., Petrov R.V., Tatarenko A.S. “Magnetolectric Magnetometers,” in: Grosz A., Haji-Sheikh M., Mukhopadhyay S. (eds) High Sensitivity Magnetometers. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Vol 19. Cham: Springer, 2017. pp 127–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34070-8>.
12. Ding J., Huang L., Luo G. et al. “A resonant microcantilever sensor for in-plane multi-axis magnetic field measurements,” Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 29, No. 6:065010, 2019. DOI: [10.1088/1361-6439/ab18ed](https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab18ed).
13. Ichkitidze L., Selishchev S., Telyshev D. “Combined Magnetic Field Sensor with Nanostructured Elements,” Journal of Physics Conference Series, Vol. 1182:012015, p. 1–9, 2019. DOI: [10.1088/1742-6596/1182/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1182/1/012015).
14. Luong V. S., Tuan N. A.; Tue N. A. et al. “Application of the flux bending effect in an active flux-guide for low-noise planar vector tmr magnetic sensors,” Vietnam Journal of Science and Technology, Vol. 56, No. 6, p. 714–722, 2018. DOI: [10.15625/2525-2518/56/6/12652](https://doi.org/10.15625/2525-2518/56/6/12652).
15. Zhang Y., Hao Q., Xiao G. “Low-Frequency Noise of Magnetic Sensors Based on the Anomalous Hall Effect in Fe-Pt Alloys,” Sensors, Vol. 19, No. 16:3537, p. 1–6, 2019. DOI: [10.3390/s19163537](https://doi.org/10.3390/s19163537).
16. Singh R., Luo Z., Lu Z., et al. “Thermal stability of NDR-assisted anomalous Hall effect based magnetic device,” Journal of Applied Physics, Vol. 125, No. 20:203901, 2019. DOI: [10.1063/1.5088916](https://doi.org/10.1063/1.5088916).
17. Luong V.S., Tuan N.A., Hoang Q.K. “Resolution Enhancement in Measuring Low-frequency Magnetic Field of Tunnel Magnetoresistance Sensors with AC-Bias Polarity Technique,” Measurement, Vol. 127, p. 512–517, 2018. DOI: [10.1016/j.measurement.2018.06.027](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.06.027).