



ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК СОЛЁНОСТИ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ВОДЫ

С.И. Янковский, М.А. Дурманов, И.Б. Широков

Севастопольский государственный университет,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: max.durmanov@gmail.com

В работе рассмотрена проблема измерения солёности морской воды, проведён анализ причин изменения солёности как одного из ключевых параметров воды, указывающих на изменение состава воды. В результате сравнительного анализа методов и средств измерения солёности предложен бесконтактный кондуктометрический метод. Рассмотрен принцип работы индуктивного датчика солёности и разработана структурная схема устройства. Получено выражение, связывающее выходной сигнал с датчика с электрической проводимостью анализируемой жидкости. Применение устройства планируется в качестве элемента, входящего в состав исследовательского зонда для задач мониторинга морской поверхности с помощью беспилотного надводного аппарата.

Ключевые слова: солёность, датчик, индуктивность, проводимость, измерение, гидросфера.

Поступила в редакцию 26.10.2023. После доработки: 23.11.2023.

Введение. Мировой океан (МО) — основная часть гидросферы, покрывающая почти 71 % поверхности планеты [1]. Отличительной особенностью морской воды является ее солёность. Под солёностью понимается отношение массы растворенного твердого вещества в морской воде к ее массе [1].

В океанах солёность воды почти повсеместно близка к 35‰, однако она не везде одинакова. На величину солёности влияют следующие факторы:

- испарение воды (при этом процессе соли с водой не испаряются);
- льдообразование;
- выпадение атмосферных осадков, понижающих солёность;
- сток пресных речных вод;
- таяние льдов.

Воды, солёность которых не превышает 0,5‰, считаются пресными [1].

Химический состав воды важен для изучения мирового океана, освоения природных ресурсов, а также контроля и охраны окружающей среды и предотвращения её загрязнения. Благодаря исследованиям изменений в сточных водах, можно зафиксировать выбросы вредных веществ, производимых крупными заводами и фабриками. Кроме то-

го, анализу подвергается и питьевая вода.

Состояние морской воды в прибрежной зоне имеет большое значение для экологии региона.

По данным общероссийской общественной организации «Зелёный патруль», за лето 2023 года в экологическом рейтинге Севастополь занимает 74 место среди 85 субъектов Российской Федерации [2]. Данный показатель является общей оценкой состояния загрязнения водной, воздушной и наземной среды. Анализируя предыдущие отчёты можно сделать вывод о том, что экологическая обстановка в регионе ухудшается.

В связи с этим, актуальной задачей является разработка инновационного датчика солёности бесконтактного типа, помещенного в герметичный корпус, предусматривающего применение в комплексе проточных автоматических измерителей [3].

Методы измерения солёности. Большинство методов измерения солёности воды основаны на физических свойствах «солёной» воды. Наиболее распространёнными являются ареометрия, кондуктометрия и рефрактометрия.

Однако ареометрия и рефрактомет-

рия имеют ряд существенных недостатков, такие как невысокая точность, низкая селективность и невысокая чувствительность, поэтому наибольшее распространение нашла кондуктометрия, при использовании которой исключаются недостатки вышеуказанных методов. Кондуктометрия, в числе которой находится индуктивный метод, основана на измерении электропроводности жидкости.

Способность воды проводить электрический ток напрямую связана с концентрацией ионов в воде. Проводящие ионы получают из растворенных солей и неорганических материалов, таких как щелочи, хлориды, сульфиды и карбонатные соединения – основных химических составляющих морской воды. Количество ионов прямо пропорционально величине удельной электропроводности жидкости.

Важно отметить, что проводимость зависит от температуры воды. Это связано с тем, что при повышении температуры уменьшается вязкость жидкости и усиливается тепловое движение молекул. Повышение температуры также может привести к увеличению числа ионов в растворе из-за диссоциации молекул. Зависимость электропроводности морской воды от солёности, с учетом её температуры, показана на рис. 1 [4].

Отметим факторы, которые могут влиять на электропроводность воды в водоёмах.

Электрическая проводимость воды в озерах и реках зависит, прежде всего, от геологии района, через который протекает вода. Потоки, протекающие через участки с гранитной породой, имеют тенденцию к снижению проводимости, так как гранит состоит из более инертных материалов, которые при промывке в воде не ионизируются (растворяются в ионных компонентах).

С другой стороны, потоки, протекающие через участки с глинистыми почвами, имеют тенденцию к более высокой проводимости, так как при промывке в воде присутствуют материалы, которые ионизируются (растворяются в ионных компонентах).

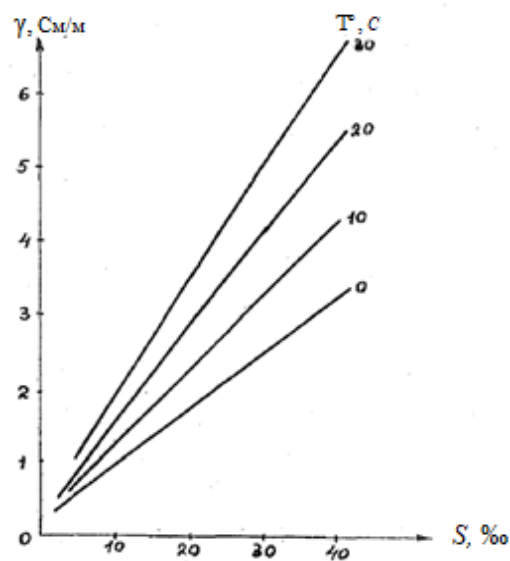


Рис. 1. Зависимость электропроводности морской воды от солёности при различных значениях температуры воды

Fig. 1. Dependence of electrical conductivity of sea water on salinity at different water temperatures

Приток грунтовых вод может иметь те же эффекты в зависимости от того, как они протекают.

Сбросы в реки могут изменять проводимость в зависимости от их состава. Неисправная система канализации увеличит проводимость из-за присутствия хлоридов, фосфатов и нитратов; разлив нефти снизит проводимость [5].

При применении контактного индуктивного метода электропроводность может быть измерена путем подачи переменного тока на два электрода, погруженных в раствор, и измерения результирующего напряжения. Однако этот метод имеет существенный недостаток, который заключается в прямом контакте с исследуемой средой, что приводит к загрязнению электродов, образованию на них окисных пленок и осадков.

Этот недостаток исключается при использовании бесконтактного индуктивного метода. Особенностью бесконтактных кондуктометров является отсутствие гальванического контакта электродов ячеек с анализируемой средой, что позволяет контролировать едкие, агрессивные и абразивные растворы, а также жидкости, склонные к прилипа-

нию электродов датчика. Это исключает отравление электродов, катализ электродных реакций в растворе и другие побочные процессы.

Принцип работы датчика. Датчик электропроводности такого типа состоит из двух индуктивно связанных трансформаторов (катушек индуктивностей), между которыми находится тестовая жидкость.

Принципиальная схема бесконтактного кондуктометра с жидкостным витком показана на рис. 2.

На каждом из сердечников Tr_1 и Tr_2 имеется по одной независимой обмотке с числом витков соответственно равным n_1 и n_2 , а сами сердечники связаны между собой витком исследуемой жидкости, проходящим через отверстие торов. Замкнутый жидкостный виток, выполняет функцию вторичной обмотки для трансформатора Tr_1 и первичной - для трансформатора Tr_2 . Напряжение U от генератора поступает на обмотку возбуждения питающего трансформатора Tr_1 . В результате электромагнитного взаимодействия в жидкостном витке индуцируется ЭДС

$$E_p = U \frac{n_2}{n_1},$$

и, как следствие, электрический ток, проводниками которого являются анионы и катионы

$$I = \frac{E_p}{R} = U \cdot \gamma \cdot \frac{n_2}{n_1},$$

где R – электрическое сопротивление жидкостного витка, а γ – удельная электропроводность.

Полученный ток создает в магнитопроводе измерительного трансформатора Tr_2 магнитный поток, вызывающий в ней ЭДС, значение которого пропорцио-

нально проводимости исследуемой жидкости.

Выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \mu_0 \mu_c (w_2/w_1) \times \\ \times 2\pi f_{\text{пит}} G_b (S_c/l_c),$$

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение на обмотке измерительного трансформатора; $U_{\text{пит}}$ – напряжение на обмотке питающего трансформатора; μ_0 – магнитная постоянная; μ_c – относительная магнитная проницаемость тороидального сердечника; G_b – электрическая проводимость витка воды; S_c – площадь поперечного сечения сердечника; l_c – длина магнитной силовой линии сердечника; $f_{\text{пит}}$ – частота питающего напряжения.

Удельная электропроводность и электрическая проводимость морской воды связаны соотношением

$$\gamma_{\text{уд}} = \frac{G_b}{l_T},$$

где l_T – эффективная длина линий тока, которые замыкаются вокруг датчика.

Значение электропроводности жидкости пересчитывается в солёность в соответствии с таблицей зависимости удельной проводимости морской воды от солёности и температуры.

Сопротивление нагрузки R_n необходимо для согласования измерительного трансформатора со схемой, детектирующей выходной сигнал, и оно должно быть больше максимального значения сопротивления жидкостного витка.

Реализация бесконтактного кондуктивного метода представлена в виде структурной схемы индуктивного датчика, которая показана на рис. 3.

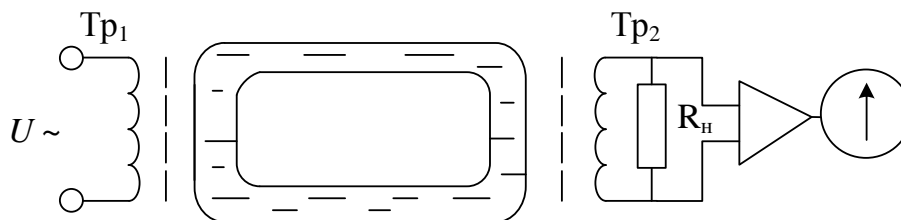


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема кондуктометра
Fig. 2. Simplified circuit diagram of a conductometer

Структурная схема состоит из следующих элементов: питающей (Tr1) и измерительной катушек (Tr2), формирующих первичный преобразователь; генератора (Г), формирующего низкочастотный сигнал для питания первичной катушки; усилителей сигнала (У1, У2); синхронного детектора (СД), предназначенного для преобразования переменного низкочастотного сигнала в постоянный сигнал, равный амплитуде переменного сигнала; термодатчика (ТД) для корректировки проводимости в зависимости от температуры исследуемой среды; источника питания (ИП), повышающего преобразователя (ПП); микроконтроллера (МК), предназначенного для обработки сигналов; индикаторного устройства (ИУ) для отображения результатов измерения.

Для функционирования рассмотренной схемы необходимо использовать генератор переменного напряжения с высокой стабильностью параметров сигнала, к которому подключается питающая катушка.

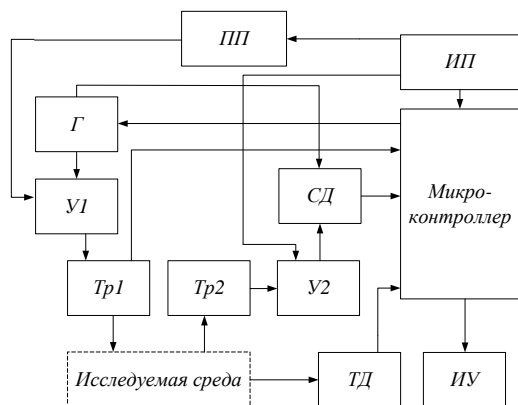


Рис. 3. Структурная схема индуктивного датчика

Fig. 3. Block diagram of the inductivity sensor

Проблемой реализации выбранного метода является относительно низкий КПД, причина которого заключается в бесконтактной передаче энергии в виток и обратно, при которой наблюдается резкое рассогласование активного сопротивления витка воды и индуктивного сопротивления [6]. Это значит, что

напряжение на обмотке измерительного трансформатора может находиться близко к порогу шумов приёмного усилителя, а значит для того, чтобы обеспечить достаточное отношение сигнал-шум, необходимо подать на обмотку питающего трансформатора напряжение порядка десятков вольт. Для этого перед трансформатором Tr1 и после трансформатора Tr2 необходимо включить усилители с достаточным коэффициентом усиления.

Метод бесконтактной кондуктометрии основан на принципе измерения проводимости, предложенном В. Кольраушем. Основным элементом предложенной им схемы является нуль-прибор, роль которого выполняет гальванометр, и потенциометр, сопротивление которого можно менять для уравнивания потенциалов в плечах схемы. При известных электрических параметрах схемы можно узнать неизвестное сопротивление элемента, помещенного в исследуемую жидкость и вычислить проводимость.

Однако благодаря введению в схему микроконтроллера можно отказаться от схемы уравнивания потенциалов. Тогда напряжение во вторичной катушке, после усиления можно подать на микроконтроллер. Это решение позволяет отказаться от крупногабаритного и дорогого узла — магазина индуктивностей и элемента сравнения. Также микроконтроллер может управлять генератором, поддерживая постоянными значения частоты и напряжения сигнала.

Заключение. Разработана структурная схема индуктивного датчика солёности, которая основана на принципе измерения проводимости жидкости, и последующем пересчете полученного значения в солёность.

Достоинства индуктивного датчика солёности:

- высокая чувствительность благодаря высокой разрядностью АЦП микроконтроллера и динамической регулировке диапазона измерения солёности;

– простота методики, так как выходное постоянное напряжение, подаваемое на АЦП микроконтроллера, напрямую зависит от значения солености анализируемой жидкости;

– доступность аппаратуры;

– возможность исследования окрашенных и мутных растворов;

– малое время на проведение анализов благодаря малой трудоемкости вычислений и использованию современных быстродействующих микроконтроллеров;

– отсутствие контакта с исследуемой средой, что исключает загрязнение электродов и образование на них окисных пленок и осадков, что является существенным для проведения экологического мониторинга с помощью исследовательского беспилотного надводного аппарата;

– устойчивость к едким, агрессивным и абразивным растворам.

Недостатки индуктивного датчика солености:

– низкая селективность;

– чувствительны к наводкам со стороны внешних электромагнитных полей той же частоты, что и питающее напряжение.

Предлагаемая схема индуктивного датчика солености имеет низкое энергопотребление и высокую точность измерения, благодаря использованию микроконтроллера и автоматической под

стройке диапазона измерения электрической проводимости среды, а также может быть интегрировано в многопараметрический исследовательский зонд для проведения экспериментальных исследований морской поверхности с помощью беспилотного надводного аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Львович М.И.* Вода и жизнь. М.: Мысль. 1986. 254 с.

2. Национальный экологический рейтинг. ООО «Зелёный патруль». - URL: <https://xn--80ajagmkdntlvn2hva.xn--p1ai/region?name=Sevastopol> (дата обращения 01.11.2023).

3. *Nikishin V., Skorik I., Durmanov M.* Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation «TransNav». Dec. 2020. Vol. 14. No. 4. P. 853–858.

4. *Доронин Ю.П., Степанюк И.А.* Электромагнитное поле океана: учеб. пособие. СПб.: РГГМИ. 1992. 87 с.

5. *Мейер Бурхард С., Ланди Лиан, Какабаев Ануарбек.* Интегрированное управление водными ресурсами в Казахстане: коллективная монография. Кокшетау: Мир печати. 2015. 356 с.

6. *Ковчин И.С.* Автономные океанографические средства измерений. Л.: Гидрометеоздат. 1991. 255 с.

INDUCTIVE SALINITY SENSOR FOR ENVIRONMENTAL SEA WATER MONITORING

S.I. Yankovskiy, M.A. Durmanov, I.B. Shirokov

Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The paper focuses on the problem of measuring the salinity of sea water and analysis of the reasons for changes in salinity, as one of the key water parameters indicating a change in water composition. As a result of a comparative analysis of methods and means for measuring salinity, a non-contact conductometric method is proposed. The operating principle of an inductive salinity sensor is considered and a block diagram of the device is developed. The relationship between the output signal from the sensor to the electrical conductivity of the analyzed water is determined. The device is to be used as an element included in a research probe for monitoring the sea surface using an unmanned surface vehicle.

Keywords: salinity, sensor, inductance, conductivity, measurement, hydrosphere.

REFERENCES

1. *L'vovich M.I.* Voda i zhizn' (Water and life). Moscow: Mysl', 1986, 254 p.
2. <https://xn--80ajagmkdntlvn2hva.xn--p1ai/region?name=Sevastopol> (November 01, 2023)
3. *Nikishin V., Skorik I., and Durmanov M.* Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation "TransNav"*, December, 2020, Vol. 14, No. 4, pp. 853–858.
4. *Doronin Ju.P. and Stepanjuk I.A.* Elektromagnitnoe pole okeana (Ocean electromagnetic field). Saint-Petersburg: RGGMI, 1992, 87 p.
5. *Mejer B.S., Landi L., and Kakabaev A.* Integrirovannoe upravlenie vodnymi resursami v Kazahstane (Integrated water resources management in Kazakhstan). Kokshetau: Mir pechati, 2015, 356 p.
6. *Kovchin I.S.* Avtonomnye okeanograficheskie sredstva izmerenij (Autonomous oceanographic measuring instruments). Leningrad.: Gidrometeoizdat, 1991, 255 p.