

Измерительная система на основе IoT-антенны для аналитического контроля

Л. Базарбай, Е. А. Алтай*, Ж. М. Досбаев

Satbayev University

* aeldos@inbox.ru

Аннотация. В данной статье представлены результаты созданной измерительной системы. Система оснащена IoT-антенной для дистанционной передачи данных совокупных измерений, полученных при аналитическом контроле пяти показателей воды по беспроводному каналу связи. В работе представлена и рассмотрена модель созданной измерительной системы, демонстрирующая работоспособность и состоятельность модели для контроля физических показателей при совокупных измерениях. Полученные результаты по беспроводному каналу связи выявили статистически значимую корреляционную взаимосвязь между весенними показателями воды, и наиболее влиятельным предиктором на кислотность, проводимость, мутность и окислительно-восстановительный потенциал является температура воды. Обнаруженная взаимосвязь между измеренными показателями в основном ассоциирована с влиянием предиктора на физические процессы, которые могут протекать в водной среде, а именно при повышении и понижении температуры проанализированных проб воды.

Ключевые слова: IoT-антенна, радиомодуль; измерительная система; датчики; обработка измерений; статистика; регрессионная модель

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной электронной базы и вычислительной техники привело к широкому распространению цифровых измерительных систем и управляющих устройств, а также цифровых каналов передачи данных, применяемых в системах интернета вещей (IoT), которая представляет собой сеть связанных интеллектуальных датчиков [1–7], размещенных на поверхности контролируемого объекта для измерения показателей и их передачи по беспроводной системе связи [5–7]. Сочетание измерительных систем с IoT-модулями дает значимое преимущество, заключающееся в возможности получать результаты измерений при дистанционном длительном контроле показателей для дальнейшего анализа данных. Последнее является актуальным не только для системы контроля жизненно важных физиологических показателей человека на основе интернета тел (IoB) [8–11], но и в системах аналитического контроля показателей воды [1–7].

Аналитический контроль физических показателей воды, согласно исследованиям [1–7], осуществляется измерением ряда показателей, базируясь на датчиках физических величин на современной элементной базе, а именно температуры (T), кислотности (pH), мутности по формазину (МПФ), кондуктивности (ЕС) и окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) воды [12–20]. Эти показатели способны наиболее полно охарактеризовать качество воды и могут выступить в качестве предикторов, отражающих именно физические

процессы, которые могут протекать в водной среде. Для измерения данных показателей в [12] создана измерительная система, которая, в отличие от известных аналогов, позволяет проводить именно совмещенное измерение отмеченных пяти показателей воды и в своей структуре сочетает модуль беспроводной передачи данных. Наличие именно модуля беспроводной передачи данных в структуре системы обеспечило осуществление дистанционного длительного контроля и выявление наиболее влиятельных предикторов на осенние показатели воды в акватории реки Алмалы на территории города Алматы.

Беспроводная передача данных при дистанционном контроле показателей воды может осуществляться на основе IoT-протоколов малого и среднего радиуса действия [2–7]: Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave и Bluetooth, а также протокола для дальнего радиуса действия LoRaWAN, который предназначен для передачи небольшого объема данных. Согласно последним опубликованным данным [2–7], при дистанционном контроле показателей воды широко применяемым IoT-протоколом является беспроводная сеть Wi-Fi, которая дает возможность передавать большие объемы данных измерений с более высокой пропускной способностью по сравнению с протоколом передачи данных LoRaWAN, предназначенным для дальнего радиуса действия, соответственно. В связи с этим во многих системах для дистанционного и длительного контроля показателей используется именно данная сеть, функционирование которой обеспечивают IoT-антенны в интеллектуальных системах.

В рассматриваемой работе, в отличие от ранее опубликованной статьи [12], представлены результаты статистической оценки совокупных измерений весенних показателей качества воды, полученных с помощью собранной экспериментальной установки, оснащенной специализированной IoT-антенной.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект системы аналитического контроля физических показателей воды, базируясь на принципах системного анализа, а именно формирования комплексного подхода к обработке измерительной информации, в структуру которой, как правило, включены датчики, как средства измерения физических величин, отражающих статистическую связь набора совокупных измерений, имеющих вид:

$$\begin{cases} T(t) = F(q_{1_T}, q_{2_T}, \dots, q_{n_T}, \xi), \\ pH(t) = F(q_{1_{pH}}, q_{2_{pH}}, \dots, q_{n_{pH}}, \xi), \\ МПФ(t) = F(q_{1_{МПФ}}, q_{2_{МПФ}}, \dots, q_{n_{МПФ}}, \xi), \\ ЕС(t) = F(q_{1_{ЕС}}, q_{2_{ЕС}}, \dots, q_{n_{ЕС}}, \xi), \\ e(t) = F(q_{1_e}, q_{2_e}, \dots, q_{n_e}, \xi), \end{cases} \quad (1)$$

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан "BR24993051 Разработка интеллектуальной городской системы на основе IoT и анализа данных"

где T – температура, рН – кислотность, МПФ – мутность по формазину, ЕС – кондуктивность, e – ОВП, q – число измерений при $i=1, 2, 3 \dots n$, ξ – погрешность измерения, F – функционал. Для решения задачи оценки связи необходимо разделить модель вида (1) на составляющие, отражающие зависимость показателей совмещенных измерений в виде функций. Будем полагать, что рассматриваемый объект системы контроля таков, что декомпозиция модели (1) возможна и примет вид:

$$\begin{cases} T(t) = F(\hat{S}_T, \xi), \\ ph(t) = F(\hat{S}_{ph}, \xi), \\ МПФ(t) = F(\hat{S}_{МПФ}, \xi), \\ ЕС(t) = F(\hat{S}_{ЕС}, \xi), \\ e(t) = F(\hat{S}_e, \xi), \end{cases} \quad (2)$$

где \hat{S} – разность между измеренными значениями S_1, S_2 параметров сигналов, сформированных на выходе датчиков физических величин, основанных на принципах потенциометрических и оптических измерений.

$$\begin{cases} \hat{S}_{T(t)} = (S_{2_T} + \xi) - (S_{1_T} + \xi) \Rightarrow S_{2_T} - S_{1_T} \\ \hat{S}_{ph(t)} = (S_{2_{ph}} + \xi) - (S_{1_{ph}} + \xi) \Rightarrow S_{2_{ph}} - S_{1_{ph}} \\ \hat{S}_{МПФ(t)} = (S_{2_{МПФ}} + \xi) - (S_{1_{МПФ}} + \xi) \Rightarrow S_{2_{МПФ}} - S_{1_{МПФ}} \\ \hat{S}_{ЕС(t)} = (S_{2_{ЕС}} + \xi) - (S_{1_{ЕС}} + \xi) \Rightarrow S_{2_{ЕС}} - S_{1_{ЕС}} \\ \hat{S}_{e(t)} = (S_{2_e} + \xi) - (S_{1_e} + \xi) \Rightarrow S_{2_e} - S_{1_e} \end{cases} \quad (3)$$

Если модель вида (1) может быть декомпозирована на набор нескольких одномерных измерений (2) и примет вид (3), то на первом этапе рассчитываются характеристики сформированного набора, а на втором этапе рассчитывается статистическая связь совокупных измерений, подтверждающая состоятельность модели, имеющей вид (4):

$$y(t) = F(T, \text{pH}, \text{МПФ}, \text{ЕС}, e) \quad (4)$$

Сформулируем цель рассматриваемого исследования, заключающегося в формировании набора совокупных измерений весенних показателей воды для оценки статистической связи показателей T , рН, МПФ, ЕС, e , полученных с помощью собранной экспериментальной установки, оснащенной IoT-антенной.

III. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, ОСНАЩЕННАЯ IoT-АНТЕННОЙ

Рассматриваемая измерительная система оснащена специальными датчиками физических величин, микроконтроллером ATmega2560 и радиомодулем, а именно IoT-антенной для дистанционной передачи данных по беспроводному каналу связи Wi-Fi. Датчики физических величин осуществляют измерение пяти показателей воды, при этом микроконтроллер ATmega2560 собранной системы обеспечивает аналого-цифровое преобразование данных в цифровой код для последующей передачи данных на IoT-антенну. Следует подчеркнуть, что в данной работе выбор именно IoT-антенны является обоснованным решением, учитывая ее высокую степень интеграции со встроенными антенными переключателями, а также радиочастотным усилителем мощности и адаптивными цифровыми

фильтрами, что позволяет подстраивать свои весовые коэффициенты под характеристики передаваемой измерительной информации, тем самым обеспечивая защищенность канала к помеховым воздействиям. Более того, наличие в данной IoT-антенне специальных криптографических алгоритмов на основе RSA, SHA, AES, обеспечивает защиту измерительной информации путем хеширования и шифрования, что позволяет безопасный обмен и передачу информации, проверить целостность данных и обнаруживать все возможные изменения. Рассматривая отмеченные особенности и низкое энергопотребление, данная IoT-антенна на основе модуля ESP32 сегодня широко применяется в таких областях, как здравоохранение [8–10], умное сельское хозяйство [21], аудиоустройства и распознавание речи [22–24]. Это подтверждает перспективность применения выбранной данной IoT-антенны в структуре экспериментальной установки, обладающей характеристиками, представленными в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Предикторы	Характеристики		
	Рабочий диапазон [2]	Погрешность измерения [2]	Время, затрачиваемое на измерение показателей, с
$T, ^\circ\text{C}$	- 55 - 125	$\pm 0,5$	$27 \cdot 10^{-4}$
рН	0 - 14	$\pm 0,1$	$29 \cdot 10^{-4}$
ЕС, В	0 - 20	$\pm 0,5$	$26 \cdot 10^{-4}$
МПФ, мг/л	0 - 1000	$\pm 0,3$	$12 \cdot 10^{-4}$
e (ОВП), В	-2 - 2	± 1	$11 \cdot 10^{-3}$

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ IoT-АНТЕННЫ

Предикторы	Характеристики	
	Рабочий диапазон [5]	Рабочая мощность [5]
Рабочая температура	От -40°C до $+125^\circ\text{C}$	-
Приемник	2,4 ГГц	+20,5 дБм
Передачик	2,4 ГГц	+18 дБм

Характеристики экспериментальной установки, обеспечивающей измерение пяти показателей воды и дистанционную передачу данных по беспроводному каналу связи на основе IoT-антенны, представлены в табл. 1 и 2. При контроле показателей качества воды необходимость обработки и передачи данных измерений в реальном масштабе времени (онлайн) предъявляет высокие требования, как к быстродействию системы, так и к ее программному обеспечению. Это связано с тем, что получение сенсорной информации осуществляется на выходе пяти датчиков физических величин и обрабатывается только на одном микроконтроллере ATmega2560, что существенно увеличивает время (t), затрачиваемое на измерение показателей. В связи с этим в табл. 1 представлены результаты оценки времени, затрачиваемого на измерение пяти показателей воды, которые на рис. 1 проиллюстрированы в виде линейной зависимости через скатерограмму.

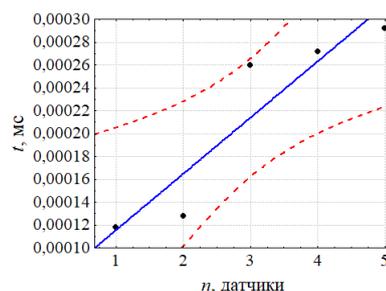


Рис. 1. Время, затрачиваемое на измерение пяти показателей

В скатерограмме продемонстрировано, что время, затрачиваемое для измерения пяти показателей между датчиками физических величин, статистически значимо различается и имеет тенденцию к линейному росту, что подтверждается высокой корреляцией между временем и количеством датчиков на уровне $r=0,9269$ при коэффициенте надежности (значимости) $p=0,0235$ для интервала вероятности $P=0,97$. В целом время измерения показателей между датчиками не превышает 60 секунд, а составляет менее $t=1$ мс, что не превышает времени отклика датчиков $t=60$ секунд при измерении того или иного показателя. Таким образом, с учетом всех особенностей разработки системы, была собрана экспериментальная установка, реализующая совокупное измерение показателей воды и передачу данных по беспроводному каналу связи на мобильное приложение системы Blynk, иллюстрация которой представлена на рис. 2.

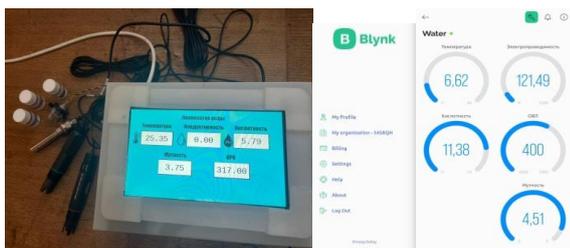


Рис. 2. Измерительная система, оснащенная IoT-антенной

Измерительная система, представленная на рис. 2 в отличие от известных аналогов, позволяет проводить совмещенное измерение пяти показателей воды из различных объектов контроля. При апробации данной системы сбор данных измерений осуществлялся на основе трехмесячного наблюдения за показателями воды в акватории реки Алмалы на территории города Алматы. Важно отметить, что первое наблюдение проводилось с 1 марта по 31 марта, второе наблюдение проводилось с 1 апреля по 30 апреля, а третье наблюдение проводилось с 1 мая по 31 мая. Каждое из наблюдений состоит более чем $n = 10000$ измерений. Результат обработки и анализа совокупных измерений представлен в следующем разделе данной статьи.

IV. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данном разделе статьи представлены результаты совокупных измерений показателей, полученных через систему Blynk на выходе IoT-антенны. Для статистической обработки результатов измерений и дальнейшей оценки связи показателей разрабатывается регрессионная модель. Важно отметить, что среди множества методов разработки моделей выбор именно регрессионной модели обоснован тем, что она не требует специального и специфического обучения результатов совокупных измерений [1, 25, 26]. Вместе с тем существующие методы, основанные на гибридной реализации регрессионного анализа с методами эмпирической модовой декомпозиции при разложении измеренных данных показателей воды [1], могут вызвать эффект смешивания мод, обусловленный «краевыми эффектами» [27]. Это существенно усложняет процесс разработки модели оценки.

Известно, что при разработке регрессионных моделей из числа измерений, превышающих $n = 10000$, наиболее чувствительным и прогностическим показателем

процесса изменения свойств веществ и материалов является среднее значение результатов измерений [25].

Модель оценки показателей воды при регрессионном анализе в зависимости от результатов измерения совмещенных показателей разделяют на линейный, нелинейный и логистический анализ [1]. Перечисленные методы анализа дают возможность разработать модель оценки совокупных показателей воды с определенной степенью достоверности, которая также может быть количественно охарактеризована. В соответствии с результатами исследования [26],[28], достоверность модели при анализе может быть охарактеризована через коэффициент детерминации R^2 , уровень значимости p -value и связь между наблюдаемой и прогнозируемой величинами через коэффициент корреляции r .

Результаты расчета продемонстрировали, что среднее значение трехмесячных весенних показателей воды линейно возрастает в зависимости от их качества. Таким образом, исходя из полученных результатов, выбор именно линейной регрессии для построения регрессионной зависимости и оценки ассоциации показателей методом наименьших квадратов считается обоснованным. На рис. 3 и 4 представлены результаты регрессионной зависимости показателей качества воды.

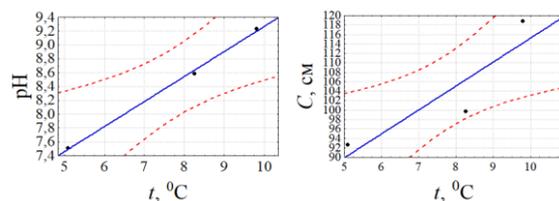


Рис. 3. Зависимость, характеризующая влияние температуры на кислотность (слева) и проводимость (справа)

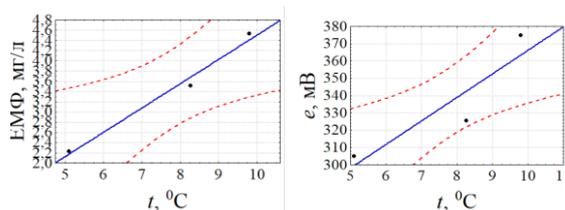


Рис. 4. Зависимость, характеризующая влияние температуры на мутность (слева) и ОВП (справа)

Из представленных результатов зависимостей на рис. 3 и 4 следует, что в силу повышения температуры анализируемых проб воды повышается значения показателей кислотности, проводимости, мутности воды и окислительного восстановительного потенциала воды в зависимости от времени наблюдения.

Регрессионная модель, характеризующая влияния предиктора – температуры на показатели кислотности, проводимости, мутности и ОВП анализируемых проб речной воды описана линейным уравнением регрессии и рассчитаны коэффициенты детерминации R^2 и корреляции r , а также уровня значимости p модели, как:

$$pH = 0,3622 \cdot t + 5,6456; R^2 = 0,9968; r = 0,9984; p = 0,0360 \text{ (рис. 3 слева);}$$

$$C = 5,064 \cdot t + 64,5691; R^2 = 0,8063; r = 0,8980; p = 0,2901 \text{ (рис. 3 справа);}$$

$$МПФ = 0,4754 \cdot t + 0,2491; R^2 = 0,9831; r = 0,9915; p = 0,0831 \text{ (рис. 4 слева);}$$

$$e = 13,6082 \cdot t + 230,1194; R^2 = 0,8253; r = 0,9085; p = 0,2745 \text{ (рис. 4 справа).}$$

Полученный результат регрессионного анализа позволяет спрогнозировать о том, что при увеличении температуры анализируемых проб речной воды на 1 градус Цельсия следует ожидать повышение кислотности воды на 99,68 %, кондуктивности на 80,63 %, мутности на 98,31 %, а также повышение ОВП на 82,53 %, соответственно. Установленная ассоциация совокупных показателей воды довольно близка к линейному изменению и устойчива к влиянию весенней температуры речной воды. Важно отметить, что на долю влияющих прочих факторов при построении регрессионной модели, а именно для кислотности приходится – 0,32 %, кондуктивности – 19,37 %, мутности 1,69 %, ОВП – 17,47 %, соответственно.

Важно отметить, что величина коэффициента детерминации R^2 разработанной модели объясняет наблюдаемую дисперсию предиктора (показателя в фокусе данного исследования) при контроле показателей качества воды. Полученные коэффициенты модели с p -значением, меньше, чем для $p = 0,05$, следовательно, считается статистически значимыми для доверительного интервала с надежностью $P=0,95$, соответственно. Статистически связанные предикторы, полученные при дистанционном контроле показателей воды на основе IoT-антенны, могут быть значимыми предикторами контролируемых процессов, происходящих в воде, с вероятностью надежности доверительного интервала.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассматриваемой статье представлены результаты реализации собранной измерительной установки, оснащенной IoT-антенной для аналитического контроля, демонстрирующие надежные результаты совокупных измерений при контроле физических показателей воды. Результаты статистической обработки показали, что по мере увеличения весенней температуры пробы воды наблюдается тенденция к повышению корреляционной взаимосвязи между кислотностью, кондуктивностью и мутностью при коэффициенте корреляции от $r = 0,8980$ до $r = 0,9984$. Также следует отметить, что по мере возрастания весенней температуры анализируемой пробы воды повышается значение показателя ОВП при коэффициенте корреляции $r = 0,940$. Полученные результаты частично согласуются с результатами зарубежных исследований, в которых дистанционные измеренные показатели на основе IoT-антенной, конкурировали за роль наиболее влиятельных предикторов для модели оценки качества воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Essamlali I., Nhaila H., El Khaili M. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review // Heliyon. 2024.
- [2] de Camargo E.T. Low-cost water quality sensors for IoT: A systematic review // Sensors. 2023. № 9. P. 4424.
- [3] Bogdan R. Low-cost internet-of-things water-quality monitoring system for rural areas // Sensors. 2023. № 8. P. 3919.
- [4] Lakshmikantha V. IoT based smart water quality monitoring system // Global Transitions Proceedings. 2021. № 2. P. 181-186.
- [5] Chowdury M.S. IoT based real-time river water quality monitoring system // Procedia computer science. 2019. № 155. P. 161-168.
- [6] Sabari M. Water quality monitoring system based on IoT // 2020 IEEE 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems. 2020. P. 279-282.
- [7] Geetha S., Gouthami S. Internet of things enabled real time water quality monitoring system // Smart Water. 2016. № 2. P. 1-19.
- [8] A. Celik, A.M. Eltawil, "The internet of bodies: The human body as an efficient and secure wireless channel," IEEE Internet of Things Magazine, 2022, vol. 3, pp. 114-120.
- [9] N. Mäkitalo, "The internet of bodies needs a human data model," IEEE Internet Computing, 2020, vol. 5, pp. 28-37.
- [10] A. Celik, K.N. Salama, A.M. Eltawil, "The internet of bodies: A systematic survey on propagation characterization and channel modeling," IEEE Internet of Things Journal, 2021, vol. 1, pp. 321-345.
- [11] Altay Y.A., Uskenbayeva R.K., Fedorov A.V. Method for Improvement of Biosignal Measurement Accuracy in the IoB System // 2024 XXVII International Conference on Soft Computing and Measurements. 2024. P. 26-29.
- [12] Altay Y. A., Bazarbay L. Artificial Intelligence-Assisted Water Quality Model: Long-Term Follow-Up Data // 2024 V International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies. 2024. P. 1-3.
- [13] Zhao Y. Retrieval of water quality parameters based on near-surface remote sensing and machine learning algorithm // Remote Sensing. 2022. № 21. P. 5305.
- [14] Tariq M. O. An Open Source Water Quality Measurement System for Remote Areas // Engineering Proceedings. 2021. № 1. P. 50.
- [15] Wood R. Implementation of the WHO core components of an infection prevention and control programme in two sub-saharan African acute health-care facilities: a mixed methods study // Antimicrobial Resistance and Infection Control. 2024. № 1. P. 4.
- [16] Mathur R. Modeling of two-stage anaerobic onsite wastewater sanitation system to predict effluent soluble chemical oxygen demand through machine learning // Scientific Reports. 2024. № 1. P. 1835.
- [17] Wang Z. Research on water environmental indicators prediction method based on EEMD decomposition with CNN-BiLSTM // Scientific Reports. 2024. № 1. P. 1676.
- [18] Shah M. I., Javed M. F., Abunama T. Proposed formulation of surface water quality and modelling using gene expression, machine learning, and regression techniques // Environmental Science and Pollution Research. 2021. № 28. P. 13202-13220.
- [19] Fadel A. A., Shujaa M. I. Water Quality Monitoring System Based on IOT Platform // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 3. P. 032054.
- [20] Shah M. I., Javed M. F., Abunama T. Proposed formulation of surface water quality and modelling using gene expression, machine learning, and regression techniques // Environmental Science and Pollution Research. 2021. № 28. P. 13202-13220.
- [21] Ali G. A Survey on Artificial Intelligence in Cybersecurity for Smart Agriculture: State-of-the-Art, Cyber Threats, Artificial Intelligence Applications, and Ethical Concerns // Mesopotamian Journal of Computer Science. 2024. № 28. P. 71-121.
- [22] Smailov N.K., Dosbayev Zh.M., Omarov N.S., Sadykova B.M., Zhekambayeva, M.N. A novel deep CNN-RNN approach for real-time impulsive sound detection to detect dangerous events // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2023. № 4. P. 271-280.
- [23] Momykulov, Z., Dosbayev, Z., Suliman, A., Abduraimova, B., Smailov, N., Zhekambayeva, M., & Zhamangarin, D. Fast Detection and Classification of Dangerous Urban Sounds Using Deep Learning //cmc-computers materials & continua. 2023. T. 75. № 1. C. 2191-2208.
- [24] Altay Y.A. Improving the efficiency of noise resistance processing of speech signal. Proceedings of the IEEE conference Russian young researchers in electrical and electronic engineering. Saint Petersburg, Russia, 2017, pp. 618-620.
- [25] Altay Y.A., Kuzivanov D.O. Descriptive Analysis and Acoustic Emission Signals Parameters Assessments: Signal Processing Data //2023 Seminar on Signal Processing. 2023. P. 7-12.
- [26] Fedorov A.V., Altay Y.A., Stepanova K.A., Kuzivanov D.O. The effect of signal-to-noise-ratio value on the error in measuring acoustic emission parameters: statistical assessment. Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics, 2022, V. 22, pp. 1205-1215.
- [27] Altay Y.A. Cascade Notch Filter with a Unity Feedback and Improved Transient Response // V International Conference on Control in Technical Systems. 2023. P. 217-220.
- [28] Y.A. Altay, A.S. Kremlev, "On the use of the statistical methods for biomedical signals and data processing" in Proc. EIConRus, 2019, paper 19.04.03, pp. 1129-1134.