

УДК 681.518.5

<https://doi.org/10.47533/2024.1606-146X.60>

**А. А. САВОСТИН<sup>1</sup>, \* А. К. ТУЛЕШОВ<sup>2</sup>, Г. В. САВОСТИНА<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан;

<sup>2</sup>Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова,  
Алматы, Казахстан.

\*E-mail: [asavostin@ku.edu.kz](mailto:asavostin@ku.edu.kz)

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

**Савостин Алексей Александрович** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Энергетика и радиоэлектроника» Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан;

E-mail: [asavostin@ku.edu.kz](mailto:asavostin@ku.edu.kz), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5057-2942>

**Тулешов Аамандык Куатович** – доктор технических наук, профессор, научный руководитель Института механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, Алматы, Казахстан;

E-mail: [aman\\_58@mail.ru](mailto:aman_58@mail.ru), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

**Савостина Галина Владимировна** – доктор PhD, декан факультета инженерии и цифровых технологий Северо-Казахстанского университета им. М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан.

E-mail: [gvshubina@ku.edu.kz](mailto:gvshubina@ku.edu.kz), ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7042-4480>

*В статье рассматривается разработка системы диагностического мониторинга насосного оборудования с использованием технологии беспроводной передачи данных. В условиях современных требований к надежности промышленного оборудования, своевременная диагностика играет ключевую роль в предотвращении аварий и снижении затрат на ремонт. Применение беспроводных датчиков для сбора данных о вибрации и температуре насосов позволяет осуществлять удаленный контроль состояния оборудования, что снижает необходимость в остановке производственных процессов для проведения диагностики. Внедрение системы мониторинга, построенной на основе приложений с открытым исходным кодом, таких как *Telegraf*, *InfluxDB* и *Grafana*, обеспечивает гибкость настройки и интеграции с инфраструктурой предприятия. Тестирование системы подтвердило её эффективность в своевременном обнаружении неисправностей и повышении общей надежности работы насосного оборудования.*

**Ключевые слова:** насос, мониторинг, диагностика, вибрация, температура, LoRaWAN.

**А. А. САВОСТИН<sup>1</sup>\*, А. К. ТУЛЕШОВ<sup>2</sup>, Г. В. САВОСТИНА<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> М. Қозыбаев атындағы Солтүстік-Қазақстан университеті,  
Петропавл, Қазақстан;

<sup>2</sup> О.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты.,  
Алматы, Қазақстан.

\*E-mail: [asavostin@ku.edu.kz](mailto:asavostin@ku.edu.kz)

## СЫМСЫЗ ДЕРЕКТЕРДІ БЕРУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП СОҒЫ ЖАБДЫҚТАРЫНЫҢ ДИАГНОСТИКАЛЫҚ МОНИТОРИНГІ ЖҮЙЕСІН ӘЗІРЛЕУ

**Савостин Алексей Александрович** – техника ғылымдарының кандидаты, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің «Энергетика және радиоэлектроника» кафедрасының профессоры, Петропавл, Қазақстан;

E-mail: asavostin@ku.edu.kz, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5057-2942>

**Тулешов Амандық Куатович** – техника ғылымдарының докторы, профессор, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитетінің Ө.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институтының ғылыми жетекшісі, Алматы, Қазақстан;

E-mail: aman\_58@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

**Савостина Галина Владимировна** – PhD докторы, М. Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университетінің инженерия және цифрлық технологиялар факультетінің деканы, Петропавл, Қазақстан.

E-mail: gvshubina@ku.edu.kz, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7042-4480>

*Мақалада сымсыз деректерді беру технологиясын қолдана отырып, сорғы жабдықтарының диагностикалық мониторингі жүйесін әзірлеу қарастырылады. Өнеркәсіптік жабдықтың сенімділігіне қойылатын заманауи талаптар жағдайында уақтылы диагностика апаттардың алдын алуда және жөндеу шығындарын азайтуда шешуші рөл атқарады. Сорғылардың дірілі мен температурасы туралы деректерді жинау үшін сымсыз датчиктерді қолдану жабдықтың күйін қашықтан бақылауға мүмкіндік береді, бұл диагностиканы жүргізу үшін өндірістік процестерді тоқтату қажеттілігін азайтады. Telegraf, InfluxDB және Grafana сияқты ашық бастанқы бағдарламаларға негізделген бақылау жүйесін енгізу кәсіпорын инфрақұрылымымен теңшеу және интеграциялау икемділігін қамтамасыз етеді. Жүйені тестілеу оның ақаулықтарды уақтылы анықтаудағы және сорғы жабдықтарының жалпы сенімділігін арттырудағы тиімділігін растады.*

**Key words:** сорғы, бақылау, диагностика, діріл, температура, LoRaWAN.

**A. A. SAVOSTIN<sup>1\*</sup>, A. K. TULESHOV<sup>2</sup>, G. V. SAVOSTINA<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>M. Kozybayev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan;

<sup>2</sup>U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan.

\*E-mail: asavostin@ku.edu.kz

## DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR DIAGNOSTIC MONITORING OF PUMPING EQUIPMENT USING WIRELESS DATA TRANSMISSION TECHNOLOGY

**Savostin Alexey** – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Power Engineering and Radioelectronics at M. Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan;

E-mail: asavostin@ku.edu.kz, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5057-2942>

**Tuleshov Amandyk Kuantovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Director of the U.A. Dzholdasbekov Institute of Mechanics and Machine Science of the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan;

E-mail: aman\_58@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

**Savostina Galina Vladimirovna** – PhD, Dean of the Faculty of Engineering and Digital Technologies of M. Kozybaev North Kazakhstan University, Petropavlovsk, Kazakhstan.

E-mail: gvshubina@ku.edu.kz, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7042-4480>

*The article deals with the development of diagnostic monitoring system for pumping equipment using wireless data transmission technology. In the conditions of modern requirements to the reliability of industrial equipment, timely diagnostics plays a key role in preventing accidents and reducing repair costs. Application of wireless sensors to collect data on vibration and temperature of pumps allows remote monitoring of equipment condition, which reduces the need to stop production processes for diagnostics. The implementation of a monitoring system based on open-source technologies such as Telegraf, InfluxDB and Grafana provides flexibility in customization and integration with the plant infrastructure. Testing of the system has confirmed its effectiveness in timely detection of faults and improving the overall reliability of pumping equipment.*

**Keywords:** pump, monitoring, diagnostics, vibration, temperature, LoRaWAN.

**Введение.** На современном этапе развития науки и техники использование насосного оборудования играет ключевую роль в различных отраслях промышленного производства, где его надежная и бесперебойная работа является критически важной. Очевидно, что для повышения надежности эксплуатации данного оборудования основной акцент должен делаться на своевременной и точной диагностике состояния насоса в процессе его работы. Однако текущие практики диагностики, используемые в нашем регионе, часто ограничены оценкой состояния насоса при вводе в эксплуатацию или после ремонта. Это объясняется нехваткой квалифицированных специалистов, ограниченностью доступа к насосным агрегатам и сложностью проведения мониторинга в реальном времени. Эти ограничения затрудняют раннее выявление неисправностей, что приводит к необходимости остановки оборудования для проведения дорогостоящего ремонта.

Эффективным решением описанных проблем является внедрение технологий автоматического контроля диагностических параметров, отражающих текущее состояние насосного оборудования. Причем особенности функционирования насосного агрегата позволяют ограничиться периодическим контролем состояния [1], тем самым снизив затраты на используемую инфраструктуру. Для задачи автоматического мониторинга могут использоваться разнообразные данные, среди которых наибольшую информативность имеют сигналы вибрации и температуры [2].

Вибрационные сигналы являются важным источником информации о состоянии насоса. Изменения в параметрах вибрации, таких как виброперемещение  $s$ , виброскорость  $v$  и виброускорение  $a$ , могут указывать на начало износа подшипников, разбалансировку ротора или другие механические неисправности.

Температурные сигналы, с другой стороны, дополняют вибрационный анализ, предоставляя информацию о тепловом состоянии подшипников и других узлов насо-

са. Повышенная температура может свидетельствовать о недостаточном охлаждении, неправильной смазке или износе компонентов. Данные о температуре используются для создания более комплексной картины работы насоса, учитывающей как механические, так и термические процессы.

Таким образом, в условиях сложившейся ситуации в области современного насосостроения, актуальной задачей будет являться разработка функциональной системы диагностического мониторинга насосного оборудования, использующей в качестве информативных признаков данные о вибрации и температуре. При этом к данной системе должно предъявляться требование по контролю комплекса параметров вибрационных сигналов по трем осям для формирования развернутой картины состояния оборудования.

Кроме этого, аппаратная реализация системы мониторинга должна отличаться удобством установки и обслуживания, гибкостью в размещении, пониженным риском механических повреждений, а также возможностью уменьшения затрат на монтаж и эксплуатацию. Следует минимизировать воздействие на производственный процесс, избегая необходимости остановки оборудования. Также необходимо обеспечить легкую интеграцию с современными инфокоммуникационными системами мониторинга и управления.

С учетом обозначенных требований в данном исследовании выполняется разработка системы диагностического мониторинга насосного оборудования.

#### **Методы исследования и достигнутые результаты**

*Критерии выбора аппаратного обеспечения.* Допустимость периодического контроля и требования к аппаратному обеспечению позволяют выбрать технологию беспроводной передачи данных как оптимальное решение для сбора диагностической информации. В этом случае отпадает необходимость в прокладке дополнительных кабельных линий и всех связанных с этим ограничений. Однако при выборе стандарта связи необходимо учитывать следующие факторы – доступный радиус действия сети, энергоэффективность приёмопередающего оборудования, а также степень помехозащищенности в условиях высокого уровня промышленных шумов.

Для выбора стандарта беспроводной связи анализировались следующие наиболее распространенные и развитые технологии передачи данных: IEEE 802.11 Wi-Fi, IEEE 802.15.1 Bluetooth, IEEE 802.15.4 Zigbee, LoRaWAN, LTE-M и др. Результаты анализа показали, что по совокупности признаков технология LoRaWAN [3] является оптимальным выбором для проектируемой системы мониторинга состояния насосного оборудования.

Например, большой радиус действия (до 15 км в сельской местности и до 5 км в городской среде) позволяет сетям LoRaWAN охватывать широкую территорию промышленных объектов и все труднодоступные места без необходимости в дополнительных ретрансляторах. Низкое энергопотребление делает данный стандарт идеальным для автономных датчиков, обеспечивая долгий срок работы без замены батарей, что особенно важно при ограниченном доступе к оборудованию. LoRaWAN поддерживает передачу небольших объемов данных с низкой скоростью, что соответствует потребностям периодического мониторинга, снижая эксплуатационные затраты. Кроме того, данная связь устойчива к помехам, что особенно важно в промышленных

условиях, и обеспечивает гибкость и масштабируемость системы, позволяя легко добавлять новые устройства по мере необходимости.

Из-за очевидного баланса между размером, стоимостью и функциональностью в качестве датчиков вибрации в современных измерительных преобразователях чаще всего применяются микроэлектромеханические (MEMS) акселерометры. С их помощью из сигнала виброускорения путем интегрирования получают сигналы виброскорости и виброперемещения [2].

На основании сказанного, для системы диагностического мониторинга в качестве сенсоров вибрации выгодно использовать MEMS-акселерометры с беспроводным каналом передачи данных LoRaWAN. Кроме этого, для повышения помехозащищенности преобразование и передача измерительных сигналов должна выполняться в цифровой форме. Использование цифровых систем также позволяет повысить степень интеграции компонентов и разместить в одном корпусе с акселерометром датчик температуры для контроля теплового режима подшипников.

*Выбор информативных характеристик вибрационных сигналов.* В существующих стандартах оценки вибрационного состояния насосного оборудования описаны два основных критерия, позволяющие оценить исправность установки [1]. По первому критерию выполняется сравнение значений абсолютных параметров вибрации в широкой полосе частот (обычно от 10 до 1000 Гц) с установленными пороговыми значениями среднеквадратического значения (СКЗ) виброскорости  $V_{RMS}$  и/или размаха виброперемещения  $S_{pp}$ . Во втором критерии производится оценка изменений параметров вибрации во времени в предположении о возможном отклонении этих параметров от изначальных нормальных значений.

Кроме этого, существуют рекомендации, предусматривающие использование вспомогательных параметров для альтернативного или дополнительного контроля вибрации [1]. В частности, в задачах диагностического мониторинга предлагается использовать показатель пик-фактора (*Crest Factor*), который рассчитывается по формуле:

$$CF = \frac{A_p}{A_{RMS}}, \quad (1)$$

где  $A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}$  – СКЗ виброускорения,  $A_p$  – его пиковое значение,  $N$  – число измерений.

Пик-фактор  $CF$  помогает оценить характер вибросигнала. Высокие значения данного коэффициента указывают на наличие острых пиков или импульсов в сигнале – вероятных признаков механических неисправностей.

Вместе с этим, проведение статистического анализа сложных вибрационных сигналов позволяет дать количественную оценку отклонения реального распределения исследуемого параметра от закона нормального распределения [2]. Отклонение от нормального распределения может свидетельствовать о присутствии в спектре сигнала доминирующих гармоник, вызванных, к примеру, ударными воздействиями. В этой связи также полезно контролировать симметрию распределения относительно среднего значения.

Для этого применяется коэффициент асимметрии (*Skewness*), который представляет собой третий центральный стандартизированный момент и рассчитывается по формуле

$$Skew = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^3}{\sigma^3}, \quad (2)$$

где  $\bar{a}$  – среднее арифметическое виброускорения, а  $\sigma$  – его среднеквадратическое отклонение [4].

Как следует из выражения (2)  $Skew \approx 0$  указывает на симметричное распределение выборки вибрационного сигнала и, вероятно, нормальную работу оборудования. В противном случае имеются большие выбросы в распределении, что свидетельствует о редких, но значительных вибрационных событиях.

Еще одним информативным показателем является коэффициент эксцесса (*Kurtosis*) – это четвертый центральный стандартизированный момент:

$$m'_4 = \frac{m_4}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a_i - \bar{a})^4}{\sigma^4}. \quad (3)$$

В связи с тем, что коэффициент эксцесса для нормального распределения равен трем [4], то формулу (3) модернизируют в следующем виде:

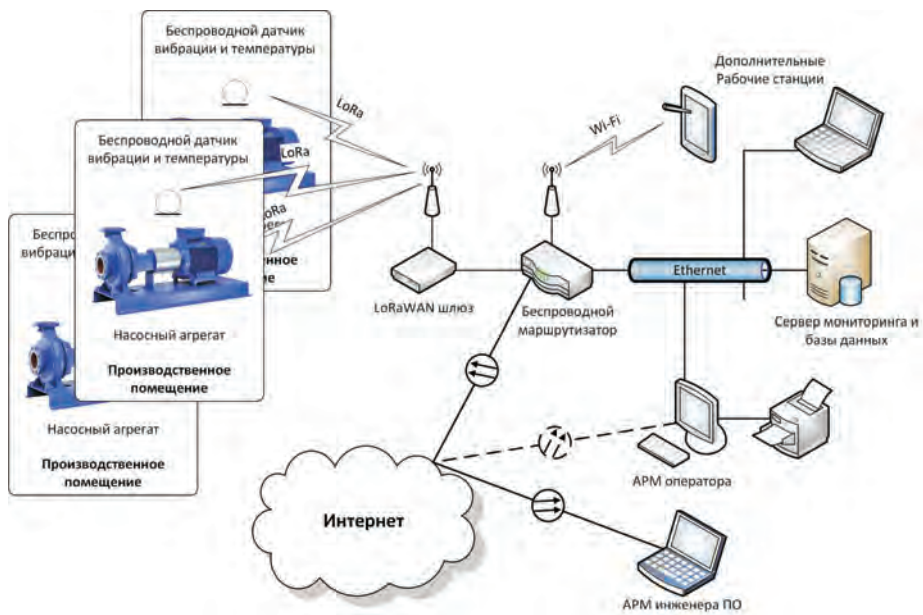
$$Kurt = m'_4 - 3. \quad (4)$$

Преимущество коэффициента эксцесса (4) состоит в том, что он позволяет оценить наличие выбросов в симметричном распределении, которые могут не проявляться в среднем значении или СКЗ. С точки зрения вибродиагностики значение  $Kurt > 3$  может указывать на кратковременные сильные вибрации или удары.  $Kurt < 3$  указывает на более плоское распределение, свидетельствующее о равномерных вибрациях.

Таким образом, не ограничиваясь лишь  $V_{RMS}$  и  $S_{PP}$ , использование комплекса предложенных вибрационных параметров ( $V_{RMS}$ ,  $S_{PP}$ ,  $A_{RMS}$ ,  $A_B$ ,  $CF$ ,  $Skew$ ,  $Kurt$ ) по трем осям и параметров температуры для диагностики состояния насосного оборудования позволит получить детализированную и развернутую картину работы системы. Каждый из описанных параметров предоставляет специфичную информацию, но их совместный мониторинг позволит более точно и полно оценить состояние оборудования.

*Разработка архитектуры системы мониторинга.* В качестве оборудования по сбору и передаче диагностических данных для системы мониторинга в работе используются LoRaWAN датчики вибрации и температуры WISE-2410 [5] в комплекте с беспроводным шлюзом WISE-6610 [6] от компании Advantech. По результатам проведенного исследования рынка данные продукты отвечают предъявляемым требованиям к аппаратному обеспечению и регистрируемым параметрам вибрации и температуры.

На рисунке 1 представлена разработанная архитектура беспроводной системы диагностического мониторинга насосного оборудования на базе технологии LoRaWAN.



**Рисунок 1** – Архитектура беспроводной системы диагностического мониторинга насосного оборудования

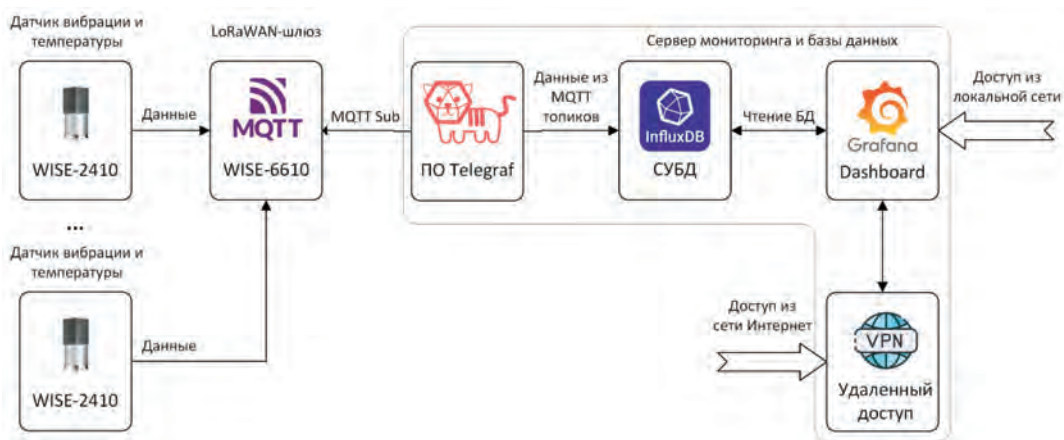
Цифровые датчики вибрации и температуры WISE-2410 устанавливаются на насосном оборудовании для сбора диагностических данных. Архитектура системы позволяет обслуживать несколько насосных установок, расположенных на значительном удалении от LoRaWAN-шлюза. Информация с датчиков по беспроводному каналу поступает на шлюз WISE-6610, который находится в локальной сети предприятия. При помощи технологии port forwarding клиентские устройства в сети предприятия получают доступ к порту 1883 шлюза (MQTT порт по умолчанию), на котором публикуются данные с датчиков. Беспроводной маршрутизатор обеспечивает функционирование локальной сети, организует доступ к данным на порту 1883 клиентским устройствам через проводное соединение или по сети Wi-Fi, а также доступ в Интернет.

На сервере мониторинга и базы данных (рисунок 1) аккумулируется информация с датчиков и сохраняется в специализированную базу данных, оптимизированную для хранения временных рядов. Также на сервере устанавливается программное обеспечение (ПО) в виде web-приложения для визуализации данных мониторинга и отправки уведомлений на электронную почту или в корпоративные чаты используемых мессенджеров.

Мониторинг насосного оборудования выполняется оператором на автоматизированном рабочем месте (АРМ оператора на рисунке 1). Мониторинг может осуществляться из локальной сети или через удаленный доступ, посредством сети Интернет. Кроме этого, беспроводной маршрутизатор позволяет обеспечить доступ к функционалу системы дополнительным рабочим станциям по Wi-Fi. Следует отметить, что подключение системы к сети Интернет является необязательным, но важным условием, расширяющим возможности ПО и территориальные границы зон расположе-

ния оборудования для мониторинга. Также подключение к глобальной сети позволяет обслуживать ПО сервера и конфигурировать сетевое оборудование удаленно с АРМ инженера ПО, как показано на рисунке 1.

На рисунке 2 показана структура разработанного ПО для мониторинга и визуализации данных.



**Рисунок 2** – Структура программного обеспечения для мониторинга и визуализации данных

В соответствии с рисунком 2, данные отправляются на шлюз WISE-6610, который имеет встроенный MQTT-брокер. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) — это легковесный протокол обмена сообщениями, оптимизированный для передачи данных в сетях с ограниченными ресурсами, такими как LoRa. Брокер публикует данные, полученные от датчиков, в виде MQTT-топиков. В данном случае, топик формируется как «Advantech/+data», где вместо подстановочного символа «+» выставляется уникальный идентификатор датчика вибрации и температуры.

ПО Telegraf [7] выступает в роли агента сбора данных, который используется для подписки на MQTT-топики. Telegraf характеризуется гибкостью конфигурации, легковесностью и возможностью работы в реальном времени. Полученные при помощи Telegraf данные затем передаются в систему управления базой данных (СУБД) InfluxDB [8] для хранения и последующего анализа (рисунок 2). InfluxDB — это высокопроизводительная СУБД, оптимизированная для хранения и анализа временных рядов данных.

В качестве web-приложения, предоставляющего графический интерфейс для мониторинга, используется платформа визуализации данных Grafana [9]. Grafana интегрируется с InfluxDB, предоставляя удобные инструменты для создания панели мониторинга.

Как видно из схемы рисунка 2, доступ к панели мониторинга в форме web-приложения Grafana может осуществляться из локальной сети предприятия или через Интернет с использованием VPN (Virtual Private Network).

Для развертывания ПО, изображенного на рисунке 2, используются технология контейнеризации Docker [10]. Данная технология позволяет упаковать приложение и



все его зависимости в единый контейнер, который может работать на любом сервере, поддерживающем Docker. Контейнеры изолированы друг от друга и от хост-системы, что обеспечивает предсказуемое и воспроизводимое поведение приложения, независимо от среды его выполнения. Это упрощает разработку, тестирование и развертывание приложений, позволяя быстро переносить их между различными средами и масштабировать при необходимости.

Важной отличительной особенностью предложенного ПО является то, что приложения (Telegraf, InfluxDB, Grafana), используемые для его построения, распространяются под лицензиями с открытым исходным кодом.

**Тестирование системы и полученные результаты.** Тестирование разработанной системы производилась на базе экспериментального стенда для оценки работы центробежного консольного насоса в ИММаш им. У.А. Джолдасбекова. Экспериментальный стенд представляет собой центробежный насос, соединенный с электродвигателем. Насос модели СНР 32-160 произведен в ТОО Karlskrona (Казахстан) и имеет следующие характеристики: 0,75 кВт, 1500 об/мин, напор 5 м, расход 8000 л/час. Также на стенде смонтированы панель управления с частотным регулятором скорости, расходомер воды, манометры и пр.

На рисунке 3 представлен насосный агрегат экспериментальной установки с закрепленным на корпусе датчиком температуры и вибрации WISE-2410 (показан стрелкой). Период измерений датчика был задан 10 секундным интервалом.



*Рисунок 3* – Экспериментальный стенд с установленным датчиком WISE-2410

Экспериментальная установка с измерительными сенсорами размещается в помещении цокольного этажа здания ИММаш им. У.А. Джолдасбекова. В ходе испытаний приемное оборудование размещалось на уровне первого этажа в достаточном удалении от насосного агрегата, так что на пути прохождения радиосигнала располагались несколько монолитных несущих стен и технических помещений. То есть намеренно создавались неблагоприятные условия для передачи сигнала.

Полученные параметры качества приема сигнала представлены на рисунке 4, демонстрирующем фрагмент разработанной панели web-приложения системы мониторинга.



Рисунок 4 – Панель мониторинга для контроля состояния датчиков и канала связи

На рисунке 4 видно, что параметр LSNR (LoRa Signal-to-Noise Ratio) равен 10 дБ, а RSSI (Received Signal Strength Indicator) равен -79 дБм, что соответствует требованиям стандарта LoRa. Кольцевая диаграмма показывает, что все 100% пакетов были получены.

Кроме этого, на панели (рисунок 4) отображается статусное состояние датчика Device Status (ОК – датчик функционирует в нормальном режиме), график изменения частоты канала передачи Frequency, тип и напряжение источника питания датчика Power Source (в данном случае от батареи – Battery), а также число переданных пакетов FCNT.

На рисунке 5 для примера показаны фрагменты панели мониторинга со следующей информацией: значения СКЗ виброскорости  $V_{RMS}$  по трем осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (верхний график Velocity RMS); состояние сигналов оповещения по трем осям при превышении заданного порога виброускорения  $A_{RMS}$  (средний блок Alarm Status и Alarm History); значения коэффициента эксцесса (4) (нижний блок Kurtosis).

Характеристики вибрации, показанные на рисунке 5, были получены на экспериментальной установке за 15-и минутный период времени. На графике СКЗ виброскорости можно четко отследить момент увеличения числа оборотов насоса с 900 до 1200 об./мин. (отметка времени 10:39:30). Виден рост  $V_{RMS}$  по всем трем осям. При этом  $V_{RMS}$  достигает максимального (Max) значения 0,770 мм/с, 1,66 мм/с и 0,950 мм/с по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно. Ориентируясь на совокупность рекомендаций, сформулированных в [11] можно сделать вывод, что насос работает в нормальном режиме. Это также подтверждает значения коэффициента эксцесса.

**Заключение.** В ходе апробации разработанной системы мониторинга были проведены несколько этапов тестирования, которые подтвердили её диагностические

возможности. Тестирование продемонстрировало эффективность используемого оборудования и разработанного программного обеспечения, а также их способность собирать данные с беспроводных датчиков и интегрироваться в существующую инфраструктуру предприятия. Простота монтажа оборудования и скорость развертывания ПО обеспечивают значительную экономию материальных и людских ресурсов при внедрении системы в производство. Заложенные коммуникационные возможности позволяют проводить мониторинг оборудования и обслуживание системы удаленно, с привлечением необходимых специалистов.

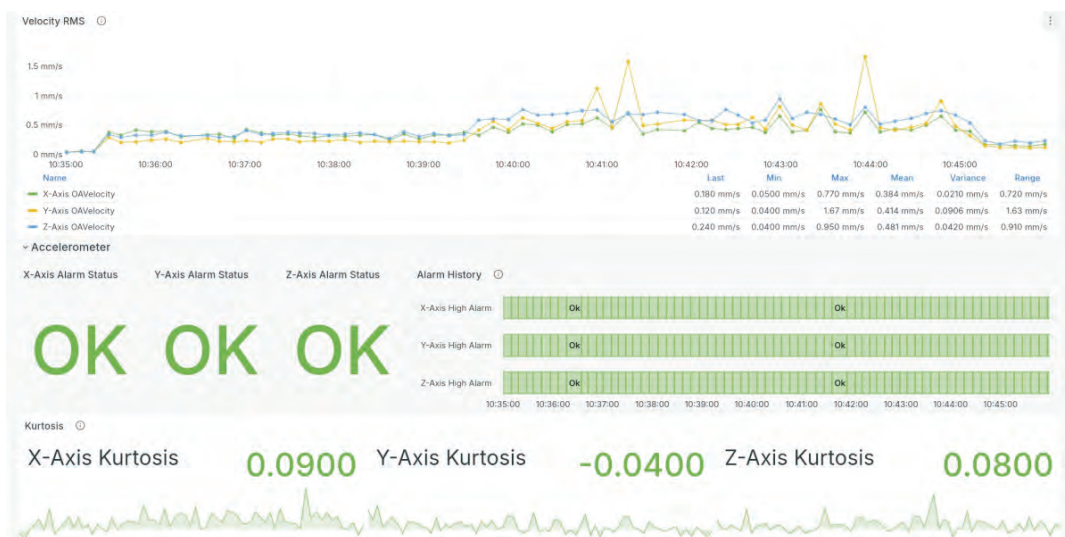


Рисунок 5 – Пример отображения информации на панели мониторинга

Главными преимуществами разработанной системы мониторинга являются возможность оценки состояния насосного оборудования не только по критериям, представленным в нормативных документах, но и с использованием дополнительных параметров, предложенных в данной работе. Система предоставляет гибкие возможности для установки пороговых значений параметров вибрации и температуры, адаптированных для различных типов насосов. Поддерживается индикация сигналов тревоги и отправка соответствующих уведомлений персоналу, что повышает оперативность реагирования на потенциальные неисправности.

Работа выполнена в рамках НТП BR18574035 «Разработка, развитие и применение научно-технологических методов и цифровых инструментов для повышения производительности и конкурентоспособности насосостроения в Казахстане на уровне Industry 4.0» по ПЦФ Комитета науки МНВО РК.

## ЛИТЕРАТУРА

1 ISO 10816-7:2009 Вибрация. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 7. Насосы динамические промышленные.

2 Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 7: В 2 кн. Кн. 1: В.И. Иванов, И.Э. Власов. Метод акустической эмиссии / Кн. 2: Ф.Я. Балицкий, А.В. Барков, Н.А. Баркова и др. Вибродиагностика. М.: Машиностроение, 2005. - 829 с.

3 LoRa Alliance. (n.d.). LoRaWAN Standard. Semtech. Retrieved August 23, 2024, from <https://www.semtech.com/lora/lorawan-standard>. (23.08.2024).

4 Турчин В. Н. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебник для студентов высших учебных заведений. — Днепр, Издательство "Лира". — 2018. 752 с.

5 WISE-2410 LoRaWAN Smart Vibration Sensor. [https://www.advantech.com/en/products/b7e2306f-d561-4ca9-b0e3-33f7057e185f/wise-2410/mod\\_25018dc7-355c-40b4-bf9b-c93f6c73f1a0](https://www.advantech.com/en/products/b7e2306f-d561-4ca9-b0e3-33f7057e185f/wise-2410/mod_25018dc7-355c-40b4-bf9b-c93f6c73f1a0) (19.08.2024).

6 Industrial LoRaWAN Gateway WISE-6610 V2. [https://www.advantech.com/ru-ru/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-6610-v2/mod\\_95986887-f989-40d0-9d47-5c8cf8b83cbd](https://www.advantech.com/ru-ru/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-6610-v2/mod_95986887-f989-40d0-9d47-5c8cf8b83cbd). 19 августа 2024 (19.08.2024).

7 Telegraf. <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/> (19.08.2024).

8 InfluxDB. <https://www.influxdata.com/> (19.08.2024).

9 Grafana. <https://grafana.com/> (19.08.2024).

10 Docker. <https://www.docker.com/> (19.08.2024).

11 Pump vibration standards guidelines. European association of pump manufacturers. First edition - 15 July 2013. <https://www.europump.net/files/Publications/Guides/Guidelines%200n%20Pump%20Vibration%20First%20edition%20Final%20July%202013.pdf> (19.08.2024).

## REFERENCES

1 ISO 10816-7:2009 Vibraciya. Ocenka sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashchayushchihsya chastyah. CHast' 7. Nasosy dinamicheskie promyshlennye.

2 Nerazrushayushchij kontrol': Spravochnik: V 7 t. Pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 7: V 2 kn. Кн. 1: V.I. Ivanov, I.E. Vlasov. Metod akusticheskoy emissii / Кн. 2: F.YA. Balickij, A.V. Barkov, N.A. Barkova i dr. Vibrodagnostika. M.: Mashinostroenie, 2005. - 829 s.

3 LoRa Alliance. (n.d.). LoRaWAN Standard. Semtech. Retrieved August 23, 2024, from <https://www.semtech.com/lora/lorawan-standard>. (23.08.2024).

4 Turchin V. N. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. Uchebnik dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij. — Dnepr, Izdatel'stvo "Lira". — 2018. 752 s.

5 WISE-2410 LoRaWAN Smart Vibration Sensor. [https://www.advantech.com/en/products/b7e2306f-d561-4ca9-b0e3-33f7057e185f/wise-2410/mod\\_25018dc7-355c-40b4-bf9b-c93f6c73f1a0](https://www.advantech.com/en/products/b7e2306f-d561-4ca9-b0e3-33f7057e185f/wise-2410/mod_25018dc7-355c-40b4-bf9b-c93f6c73f1a0) (19.08.2024).

6 Industrial LoRaWAN Gateway WISE-6610 V2. [https://www.advantech.com/ru-ru/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-6610-v2/mod\\_95986887-f989-40d0-9d47-5c8cf8b83cbd](https://www.advantech.com/ru-ru/products/23ed4776-1633-4901-a776-8532a23ea8b4/wise-6610-v2/mod_95986887-f989-40d0-9d47-5c8cf8b83cbd). 19 avgusta 2024 (19.08.2024).

7 Telegraf. <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/> (19.08.2024).

8 InfluxDB. <https://www.influxdata.com/> (19.08.2024).

9 Grafana. <https://grafana.com/> (19.08.2024).

10 Docker. <https://www.docker.com/> (19.08.2024).

11 Pump vibration standards guidelines. European association of pump manufacturers. First edition - 15 July 2013. <https://www.europump.net/files/Publications/Guides/Guidelines%200n%20Pump%20Vibration%20First%20edition%20Final%20July%202013.pdf> (19.08.2024).