

Информационные технологии

Сенсорная сеть контроля состояния криогенного оборудования в промышленном кластере

Е.С. Солдатов

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлена структура оригинальной сенсорной сети контроля состояния криогенного оборудования в промышленном кластере. Охарактеризованы технологии дистанционного мониторинга состояния криогенного оборудования и обоснована целесообразность применения маломощных сенсорных сетей на базе модулей дальнего радиуса действия, предназначенных для отправки пакетов данных малого объема, работающих от аккумуляторов, не требующих подзарядки и технического обслуживания в течение нескольких лет. Разработана функциональная модель мониторинга состояния криогенного емкостного оборудования, показана декомпозиция процесса мониторинга по ключевым операциям. Описана реализация сетевого мониторинга стационарного и транспортного криогенного оборудования на основе маломощных автономных модулей телеметрии. Предложена принципиальная схема автономного устройства телеметрии криогенного транспортного танк-контейнера на базе модуля дальнего радиуса действия, использование которого позволяет решить задачу организации дистанционного мониторинга состояния транспортных криогенных сосудов на уровне промышленного кластера.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, танк-контейнер, LoRa, LoRaWAN, интернет вещей, бездренажное хранение.

DOI: 10.14357/20790279230404 **EDN:** WQCGLI

Введение

Для повышения безопасности хранения и перевозки опасных наливных грузов различными видами транспорта (автомобильным, железнодорожным, авиационным, речным или морским) используются системы дистанционного мониторинга технического состояния оборудования, хранения или перевозимого (транспортируемого) продукта. Наряду с этим, среди средств хранения и транспортировки сжиженных газов увеличивается доля контейнеров-цистерн и танк-контейнеров.

Для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) все чаще используются криогенные танк-контейнеры с высокоэффективной экранно-вакуумной теплоизоляцией. Эти танк-контейнеры пригодны как для длительного хранения СПГ на промышленной площадке, так и для использования в мультимодальных транспортных перевозках, обеспечивающих доставку одной партии жидкого продукта различными видами транспорта (сухопутным, воздушным, морским) без перезаправки и, соответственно, без промежуточных потерь [1].

С другой стороны, использование в процессе перевозки сжиженных газов разных транспортных средств и неоднократное выполнение погрузо-разгрузочных работ, являются причиной невозможности подключения оборудования контейнера к сети электропитания. Ограниченный доступ к сети электропитания можно обеспечить на этапе автомобильной перевозки или в процессе длительной стоянки заполненного продуктом танк-контейнера, тогда как для этого же танк-контейнера, размещенного на складе временного хранения или на морском судне-контейнеровозе, внешняя электросеть недоступна. Это обуславливает необходимость установки на контейнер модулей телеметрии, обладающих автономностью, пониженным энергопотреблением, но при этом имеющих большую дальность связи. При этом в научной литературе содержится крайне мало сведений по исследованию и разработкам средств телеметрии для мониторинга состояния транспортного криогенного оборудования [2].

Одной из ключевых проблем современных сетевых технологий является повышенное энергопотребление. Для практической реализации концепции IoT (Internet-of-Things или Интернет вещей) технология беспроводной сети передачи данных должна обеспечивать надежное покрытие для большого числа недорогих устройств телеметрии с низким энергопотреблением [3, 4]. Ожидается, что в ближайшее время применение устройств IoT будет только возрастать как для бытовых приборов («умный дом»), так и для широкого класса технических устройств в энергетике, машиностроении, сельском хозяйстве и здравоохранении [5-7].

Основными направлениями деятельности, в которых активно развиваются прикладные технологии IoT в настоящее время, являются [8–10]:

- реализация концепции «умного города» («умное» освещение, датчики парковки, пожарная сигнализация и пр.);
- мониторинг характеристик функциональных систем организма и обеспечения жизнедеятельности человека;
- контроль состояния промышленного оборудования;
- мониторинг состояния окружающей среды и климатических параметров;
- «умные» приборы учета потребления электроэнергии, воды и пр.;
- мониторинг теплофизических параметров среды в сельском хозяйстве;
- контроль состояния грузов и транспорта при грузоперевозках.

Имеющиеся концептуальные и аппаратные наработки в перечисленных направлениях могут быть успешно использованы, в том числе, и для решения проблем организации информационного взаимодействия между промышленными модулями телеметрии криогенного оборудования.

1. Технологии беспроводных сетей передачи данных в задачах промышленного мониторинга

Параметры сетей на базе различных технологий связи, используемых в IoT, приведены в табл. 1. Наиболее распространенной среди используемых в настоящее время технологий беспроводной связи является технология ZigBee [11]. Такое название имеет набор сетевых протоколов верхнего уровня, использующих небольшие радиопередатчики малой мощности, работающие по стандарту IEEE 802.15.4 и поддерживающие работу в трех нелицензируемых диапазонах частот (868 МГц в Европе; 928 МГц в Северной Америке; 2,4 ГГц в большинстве стран мира, в том числе в России) [12, 13]. Технология ZigBee используется в устройствах телеметрии, способных длительное время работать от батареи (до 2-х лет). При этом обеспечивается высокая безопасность передачи данных. Скорость передачи данных небольшая, а радиус действия стандартных устройств не превышает несколько десятков метров. Также существуют более дорогостоящие модули ZigBee Pro с заявленной дальностью действия – до 1500 метров [14].

Наиболее интересными средствами реализации концепции IoT для промышленности являются сети типа LPWAN (Low-Power Wide Area Networks). Энергоэффективная маломощная сеть LPWAN дальнего радиуса действия предназначена для отправки небольших по объему пакетов данных, имеет большое количество подключенных устройств, работающих от аккумуляторов, не требующих технического обслуживания и подзарядки в течение длительного периода времени [15].

Среди практических вариантов реализации сетей типа LPWAN наибольший интерес представляют технологии NB-IoT и LoRa. Узкополосный интернет вещей NB-IoT является стандартом сотовой связи, используемым для телеметрических устройств, что позволяет без проблем использовать его в существующих системах мобильной связи. Преимуществами технологии NB-IoT является огромная емкость сети (десятки тысяч подключенных устройств телеметрии), пониженное энергопотребление и низкая стоимость технических устройств [16].

Табл. 1

Параметры сетей на базе различных технологий связи, используемых в IoT

Технология IoT	Дальность связи	Скорость передачи данных	Максимальное число устройств в сети
Wi-Fi	100 м	10 Мбит/с	255
ZigBee	10-75 м	до 171,2 кбит/с	255
LoRa	5 км (до 15 км – вне городской черты)	от 0,1 до 27 кбит/с	200 000
NB-IoT	3 км	от 0,1 до 250 кбит/с	50 000

LoRa (сокращение от Long Range) – это технология беспроводной сети передачи данных, которая обеспечивает большую дальность связи для автономных устройств с низким уровнем энергопотребления, в которой используется протокол канального уровня LoRaWAN [17, 18]. Беспроводная сеть передачи данных LoRaWAN имеет сетевую архитектуру, развернутую в соответствии с топологией «звезда из звезд», в которой шлюзы передают сообщения между конечными устройствами и центральным сервером сети [19–21].

Технические устройства, использующие технологию LoRa, уже внедрены в качестве средств дистанционного мониторинга оборудования для заправки транспортных средств топливом на базе сжиженных углеводородных газов (СУГ) [22]. В частности, использование системы мониторинга позволяет получать информацию в режиме реального времени об уровне потребления топлива и об остатках топлива во всех подключенных к системе хранилищах, что помогает при планировании доставки СУГ, снижая при этом эксплуатационные расходы.

Технологию LoRa целесообразно использовать для средств хранения и транспортировки СПГ, при учете специфики хранения веществ при криогенных температурах.

2. Мониторинг состояния криогенного оборудования

Каждую из систем хранения криопродуктов (стационарную или транспортную), состояние которой требуется отслеживать в режиме реального времени, необходимо оборудовать средствами телеметрии. В настоящее время на многих объектах производства и потребления криопродуктов уже эксплуатируются телеме-

трические системы, использующие пересчет уровня жидкости на основе измерения разности давлений в паровой и жидкой фазах криогенного сосуда. Вычисление параметров производится с учетом поправки на изменение плотности, рассчитанной по показаниям датчика давления. Обеспечена возможность как местной индикации параметров, так и передачи данных на удаленное устройство для контроля процесса бездренажного хранения.

При этом для решения проблемы отсутствия информации для поддержки принятия решений по снижению потерь криопродуктов вследствие теплопритоков из окружающей среды, помимо прочего, необходимо совершенствование существующих средств телеметрии. Ключевой особенностью предложенных технических решений является возможность учета внешних условий хранения (например, температуры окружающей среды), а также ретроспективной информации о процессе хранения, что существенно повышает точность прогноза времени бездренажного хранения криопродукта [23, 24].

Предложенная схема процесса мониторинга состояния систем хранения представлена на рис. 1. Исходя из опыта эксплуатации, задачи по определению массива рабочих параметров хранения, а также их возможных прогнозируемых значений, определяющихся, как правило, при помощи компьютерного моделирования, и задачи вычисления текущих характеристик конкретного процесса в режиме реального времени решаются независимо.

По результатам моделирования производится накопление массива данных по времени хранения для конкретных значений давления и уровня жидкости СПГ, из элементов которого впоследствии в режиме реального времени определяется величина прогнозируемого времени его бездренажного хранения.

Информация о параметрах хранения продукта направляется посредством модуля приема-передачи данных в облачное хранилище данных и в диспетчерский центр (рис. 2).

Телеметрические модули стационарных систем хранения, включенные в сенсорную сеть передачи данных, служат промежуточными звеньями в цепи передачи данных от модулей танк-контейнеров, удаленных на значительное расстояние от базовой станции. Также сама сенсорная сеть для большого числа стационарных систем хранения криопродуктов является резервным каналом связи в случае отсутствия подключения к основной сети передачи данных (например, GPRS).

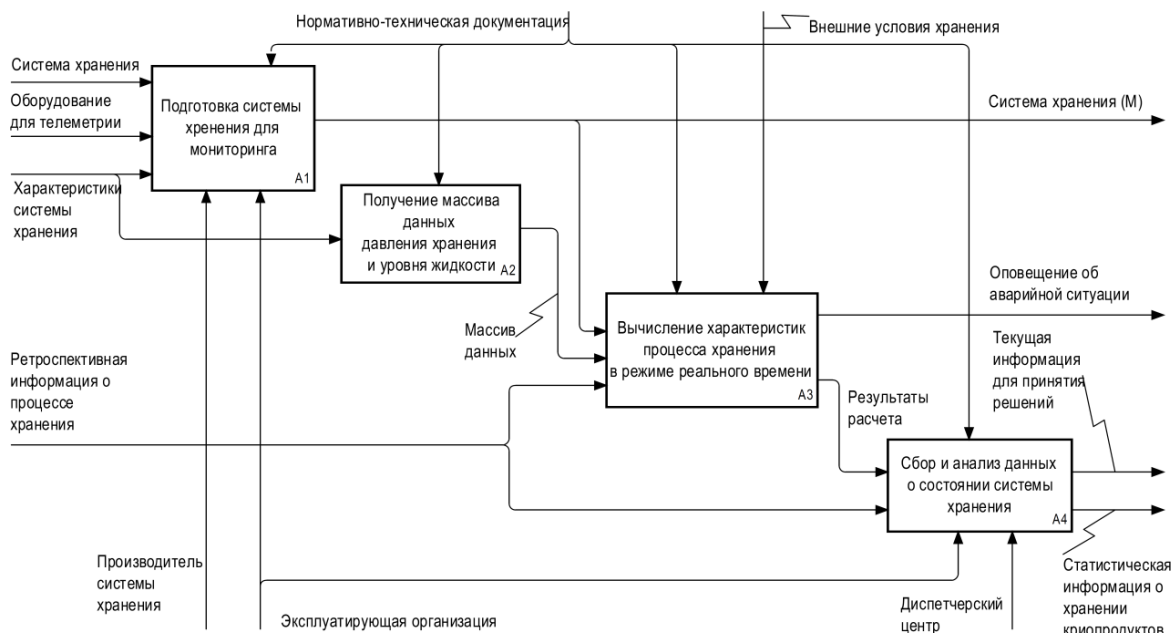


Рис. 1. Декомпозиция процесса мониторинга состояния системы хранения криопродуктов (индекс «М» относится к системе хранения после модернизации)

3. Автономные устройства телеметрии для криогенного оборудования

Принципиальная схема предлагаемого автономного устройства телеметрии на базе модуля LoRaWAN, предназначенная для мониторинга состояния транспортных танк-контейнеров различных типов, в том числе криогенных, приведена на рис. 3. Преимуществом предлагаемого решения является отсутствие необходимости подведения к нему внешнего питания, что категорически важно при перевозке одной партии груза в одном контейнере различными видами транспорта. Ин-

формационный обмен между блоками устройства и питание элементов осуществляется посредством системной шины.

В контроллер направляется информация от GPS/ГЛОНАСС-ресивера о текущих координатах и скорости движения объекта, а также информация с датчиков. На панели блока управления и индикации отображаются текущие параметры хранения: рабочее давление, уровень жидкости, прогнозируемое время безопасного хранения.

Устройство может работать на аккумуляторных батареях без обслуживания и подзарядки до двух лет. Дополнительно может быть организована подзарядка аккумуляторных батарей от солнечной

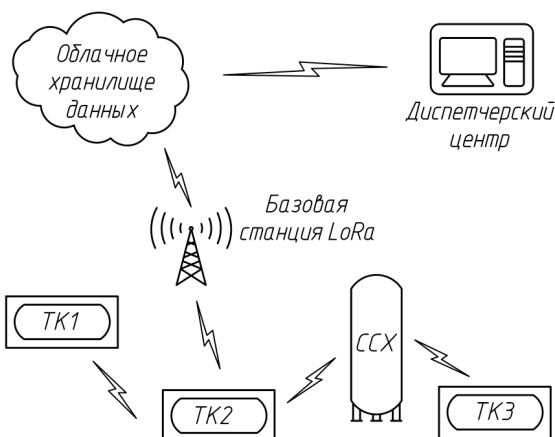


Рис. 2. Сенсорная сеть мониторинга состояния криогенного оборудования (TK1, TK2, TK3 – танк-контейнеры, ССХ – стационарная система хранения)

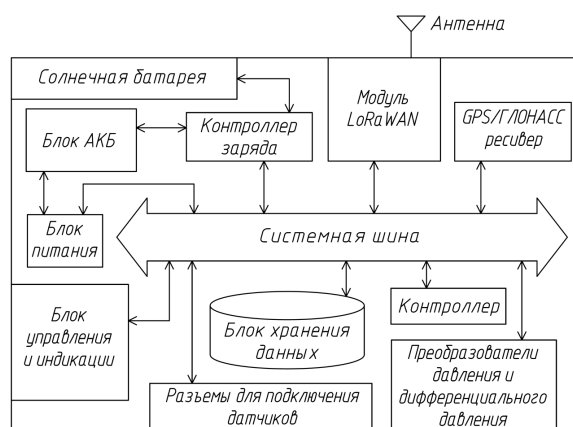


Рис. 3. Автономное устройство телеметрии на базе модуля LoRaWAN

батареи, размещенной на верхней поверхности корпуса, что дополнительно увеличит срок непрерывной работы модуля LoRaWAN на несколько лет.

В зависимости от типа перевозимого продукта, в контроллере производится вычисление плотности жидкости и ее уровня в сосуде в соответствии с текущими значениями давления паровой фазы и перепада давлений между паровой и жидкой фазами сосуда, с последующей записью в блок хранения данных. Дополнительно вычисляется прогнозируемое время безопасного хранения для текущих значений давления, уровня жидкости и режима (движение или стоянка). При превышении параметров хранения допустимых значений производится формирование и отправка аварийного сообщения специалистам, принимающим решение.

Заключение

Таким образом, за счет преимуществ маломощных сенсорных сетей LPWAN с модулями дальнего радиуса действия, обеспечена возможность включения транспортных криогенных танк-контейнеров в систему дистанционного мониторинга состояния промышленного оборудования. При этом существующие устройства телеметрии стационарных систем хранения, после оборудования их соответствующими модулями дальнего радиуса действия и включения в сенсорную мониторинговую сеть, служат промежуточными звеньями в цепи передачи данных от модулей танк-контейнеров, удаленных на значительное расстояние от базовой станции. Внедрение автономных модулей телеметрии в рамках определенного промышленного кластера, содержащего от нескольких сотен до нескольких тысяч единиц криогенного оборудования различного типа, позволит существенно повысить безопасность и эффективность производственных процессов.

Дополнительного исследования требуют проблемы, связанные с использованием в модулях телеметрии морозостойких аккумуляторов при работе оборудования в суровых климатических условиях, а также проблемы роуминга при переходе из одной сенсорной сети в другую, что актуально при отслеживании перевозок криопродуктов на большие расстояния.

Перспективным является использование сенсорных сетей при реализации концепции «цифрового двойника» криогенной системы, в рамках которой создаются высокоточные цифровые модели криогенного оборудования, развиваемые совместно с реальными изделиями посредством энергоэф-

фективного обмена информацией на протяжении всего жизненного цикла криогенной системы.

Литература

1. Soldatov E., Bogomolov A. 2022. Issues of Energy-Efficient Storage of Fuel in Multimodal Transport Units. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 232: 393-402.
2. Bo W., Ruoyin L., Hong C., et al. 2021. Characterization and Monitoring of Vacuum Pressure of Tank Containers with Multilayer Insulation for Cryogenic Clean Fuels Storage and Transportation. *Applied Thermal Engineering*. 187: 116569.
3. Kang H., Sung S., Hong J., Jung S., Hong T., Park H.S., Lee D.-E. 2020. Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. *Journal of Hazardous Materials*, 123483. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123483.
4. Santos Filho F.H.C. dos, Dester P.S., Stancanelli E.M.G., Cardieri P., Nardelli P.H.J., Carrillo D., Alves H. 2020. Performance of LoRaWAN for Handling Telemetry and Alarm Messages in Industrial Applications. *Sensors*, 20(11), 3061. DOI:10.3390/s20113061.
5. Luvisotto M., Tramarin F., Vangelista L., Vitturi S. 2018. On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 1–11. DOI: 10.1155/2018/3982646.
6. Ронжин А.Л., Зеленцов В.А., Богомолов А.В., Кулешов С.В. Технологии визуализации, обработки пространственных данных, мониторинга и проактивного управления развитием экосистем северо-западного региона. Материалы VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления». 2021. Хабаровск. С. 207-213.
7. Бойкова А.В., Самылина Ю.Н. Вопросы использования интернета вещей на промышленных предприятиях. Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Междисциплинарные исследования экономических систем». 2022. Тверь. С. 184-187.
8. Kirimtat A., Krejcar O., Kertesz A., Tasgetiren M. 2020. Future Trends and Current State of Smart City Concepts: A Survey. *IEEE Access*, 8, 86448–86467. DOI: 10.1109/access.2020.2992441.
9. Tuysuz M., Trestian R. 2020. From serendipity to sustainable green IoT: Technical, industrial and political perspective. *Computer Networks*, 107469. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107469.

10. *Голосовский М.С., Богомолов А.В., Тобин Д.С.* Алгоритм настройки систем нечёткого логического вывода на основе статистических данных. Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2023. №1. С. 1-9. DOI: 10.36535/0548-0027-2023-01-1.
11. *Vitturi S., Zunino C., Sauter T.* 2019. Industrial Communication Systems and Their Future Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 1–18. DOI: 10.1109/jproc.2019.2913443.
12. *Augustin A., Yi J., Clausen T., Townsley W.* 2016. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. DOI: 10.3390/s16091466.
13. *Al-Fuqaha A., Guizani M., Mohammadi M., Aledhari M., Ayyash M.* 2015. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. DOI: 10.1109/comst.2015.2444095.
14. *Hasan N., Kadhim F.* 2019. Solving Isolated Nodes Problem in ZigBee Pro for Wireless Sensor Networks. *Cihan University-Erbil Scientific Journal* 3(2): 31-36. DOI: 10.24086/cuesj.v3n2y2019.pp31-36.
15. *Эбрахим А., Иванов И.А., Али А.* Обзор технологий LPWAN в России и в мире. Труды XIX Международной научно-практической конференции «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии». М., 2022. С. 155-162.
16. *Михайлов П.Г., Зикирбай К., Базарбай Л., Бактыбаев М.К., Алимбаев Ш.* Интернет энергетических вещей на основе беспроводного LPWAN. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10. № 3 (55). С. 47-52. DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0008.
17. *Tramarin F., Mok A., Han S.* 2019. Real-Time and Reliable Industrial Control Over Wireless LANs: Algorithms, Protocols, and Future Directions. *Proceedings of the IEEE*, 1–26. DOI: 10.1109/jproc.2019.2913450.
18. *Fedullo T., Morato A., Peserico G., Trevisan L., Tramarin F., Vitturi S., Rovati L.* 2022. An IoT Measurement System Based on LoRaWAN for Additive Manufacturing. *Sensors* 2022, 22(15), 5466. DOI: 10.3390/s22155466.
19. *Hoang, Q.L., Jung, W.-S., Yoon, T., Yoo, D., Oh H.* 2020. A Real-Time LoRa Protocol for Industrial Monitoring and Control Systems. *IEEE Access*, 8: 44727–44738. DOI: 10.1109/access.2020.2977659.
20. *Faber M., Zwaag K., Dos Santos W., Rocha H., Segatto M., Silva J.* 2020. A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. DOI: 10.1109/jsen.2020.2987776.
21. *Niles K., Ray J., Niles K., Maxwell A., Netchaev A.* 2021. Monitoring for Analytes through LoRa and LoRaWAN Technology. *Procedia Computer Science*, 185: 152–159. DOI: 10.1016/j.procs.2021.05.041.
22. Optimize Petroleum Gas Management with Lora Devices. Доступен по ссылке: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-aiut-optimize-petroleum-gas-management-with-lora-devices> (дата обращения: 18.07.2023).
23. *Soldatov A.S., Soldatov E.S.* 2023. Controlling the Equipment State throughout the Industrial Life Cycle of the Product Using Digital Twin. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) *Software Engineering Research in System Science. CSOC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 722, pp. 624–631. DOI: 10.1007/978-3-031-35311-6_60.
24. *Soldatov E., Bogomolov A.* 2021. Decision support models and algorithms for remote monitoring of the equipment state. *CEUR Workshop Proceedings*. Iss. “ITIDMS 2021 - Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems””: 1–8.

Солдатов Евгений Сергеевич. Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия. Научный сотрудник. Кандидат технических наук. Область научных интересов: системный анализ, криогенная техника, вычислительная гидродинамика.
E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru.

Sensor network for monitoring the state of cryogenic equipment in an industrial cluster

E.S. Soldatov

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article presents the structure of the original sensor network for monitoring the state of cryogenic equipment in an industrial cluster, implemented on the basis of the concept of the Internet of Things, which implements advanced achievements in the field of technologies for energy-efficient wireless data networks used in industrial monitoring systems. The technologies for remote monitoring of the state of cryogenic equipment are characterized and the expediency of using low-power sensor networks based on long-range modules designed to send small data packets powered by batteries that do not require recharging and maintenance for several years is substantiated. A functional model for monitoring the state of cryogenic capacitive equipment has been developed, and the decomposition of the monitoring process into key operations has been shown. The implementation of network monitoring of stationary and transport cryogenic equipment based on low-power autonomous telemetry modules is described. A schematic diagram of an autonomous telemetry device for a cryogenic transport tank container based on a long-range module is proposed, the use of which allows solving the problem of organizing remote monitoring of the state of transport cryogenic vessels at the level of an industrial cluster.

Keywords: *remote monitoring, tank container, LoRa, LoRaWAN, Internet of Things, non-drainage storage.*

DOI: 10.14357/20790279230404 **EDN:** WQCGLI

References

1. Soldatov, E., Bogomolov, A. 2022. Issues of Energy-Efficient Storage of Fuel in Multimodal Transport Units. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 232: 393-402.
2. Bo, W., Ruoyin, L., Hong, C., et al. 2021. Characterization and Monitoring of Vacuum Pressure of Tank Containers with Multilayer Insulation for Cryogenic Clean Fuels Storage and Transportation. *Applied Thermal Engineering*. 187: 116569.
3. Kang, H., Sung, S., Hong, J., Jung, S., Hong, T., Park, H. S., Lee, D.-E. 2020. Development of a real-time automated monitoring system for managing the hazardous environmental pollutants at the construction site. *Journal of Hazardous Materials*, 123483. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123483.
4. Santos Filho, F. H. C. dos, Dester, P. S., Stancanelli, E. M. G., Cardieri, P., Nardelli, P. H. J., Carrillo, D., Alves, H. 2020. Performance of LoRaWAN for Handling Telemetry and Alarm Messages in Industrial Applications. *Sensors*, 20(11), 3061. DOI:10.3390/s20113061.
5. Luvisotto, M., Tramarin, F., Vangelista, L., Vitturi, S. 2018. On the Use of LoRaWAN for Indoor Industrial IoT Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018, 1–11. DOI: 10.1155/2018/3982646.
6. Ronzhin, A.L., Zelentsov, V.A., Bogomolov, A.V., Kuleshov, S.V. Tekhnologii vizualizatsii, obrabotki prostranstvennykh dannykh, monitoringa i proaktivnogo upravleniya razvitiyem ekosistem severo-zapadnogo regiona [Technologies for visualization, processing of spatial data, monitoring and proactive management of the development of ecosystems in the northwestern region]. In: *Information technology and high performance computing. Materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Khabarovsk, 2021. 207-213.
7. Boykova, A.V., Samylina, Yu.N. Voprosy ispol'zovaniya interneta veshchey na promyshlennykh predpriyatiyakh [Issues of using the Internet of things in industrial enterprises]. In: *Interdisciplinary studies of economic systems. Materials of the All-Russian scientific-practical conference*. Tver, 2022. 184-187.
8. Kirimtat, A., Krejcar, O., Kertesz, A., Tasgetiren, M. 2020. Future Trends and Current State of Smart City Concepts: A Survey. *IEEE Access*, 8, 86448–86467. DOI: 10.1109/access.2020.2992441.
9. Tuysuz, M., Trestian, R. 2020. From serendipity to sustainable green IoT: Technical, industrial and political perspective. *Computer Networks*, 107469. DOI: 10.1016/j.comnet.2020.107469.
10. Golosovsky, M.S., Bogomolov, A.V., Tobin, D.S. Algoritm nastroyki sistem nechotkogo logicheskogo vyvoda na osnove statisticheskikh dannykh [Algorithm for setting fuzzy inference systems based on statistical data]. *Scientific and technical information. Series 2: Information Processes and Systems*. 2023. 1: 1-9. DOI: 10.36535/0548-0027-2023-01-1.
11. Vitturi, S., Zunino, C., Sauter, T. 2019. *Industrial Communication Systems and Their Future*

- Challenges: Next-Generation Ethernet, IIoT, and 5G. *Proceedings of the IEEE*, 1–18. DOI: 10.1109/jproc.2019.2913443.
12. *Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., Townsley, W.* 2016. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), 1466. DOI: 10.3390/s16091466.
 13. *Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., Ayyash, M.* 2015. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. DOI: 10.1109/comst.2015.2444095.
 14. *Hasan, N., Kadhim, F.* 2019. Solving Isolated Nodes Problem in ZigBee Pro for Wireless Sensor Networks. *Cihan University-Erbil Scientific Journal* 3(2): 31-36. DOI: 10.24086/cuesj.v3n2y2019.pp31-36.
 15. *Ebrakhim, A., Ivanov, I.A., Ali, A.* Обзор технологий LPWAN в России и в мире [Overview of LPWAN technologies in Russia and in the world]. In: Innovative, information and communication technologies. *Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference*. S.U. Uvaysov (ed.). Moscow. 2022. 155-162.
 16. *Mikhaylov, P.G., Zikirbay, K., Bazarbay, L., Baktybayev, M.K., Alimbayev, S.* Internet energeticheskikh veshchey na osnove besprovodnogo LPWAN [Internet of energy things based on wireless LPWAN]. *XXI century: results of the past and problems of the present plus*. 2021. Vol. 10. No. 3 (55). 47-52. DOI: 10.46548/21vek-2021-1055-0008.
 17. *Tramarin, F., Mok, A., Han, S.* 2019. Real-Time and Reliable Industrial Control Over Wireless LANs: Algorithms, Protocols, and Future Directions. *Proceedings of the IEEE*, 1–26. DOI: 10.1109/jproc.2019.2913450.
 18. *Fedullo, T., Morato, A., Peserico, G., Trevisan, L., Tramarin, F., Vitturi, S., Rovati, L.* 2022. An IoT Measurement System Based on LoRaWAN for Additive Manufacturing. *Sensors* 2022, 22(15), 5466. DOI: 10.3390/s22155466.
 19. *Hoang, Q. L., Jung, W.-S., Yoon, T., Yoo, D., Oh, H.* 2020. A Real-Time LoRa Protocol for Industrial Monitoring and Control Systems. *IEEE Access*, 8: 44727–44738. DOI: 10.1109/access.2020.2977659.
 20. *Faber, M., Zwaag, K., Dos Santos, W., Rocha, H., Segatto, M., Silva, J.* 2020. A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology. *IEEE Sensors Journal*, 1–1. DOI: 10.1109/jsen.2020.2987776.
 21. *Niles, K., Ray, J., Niles, K., Maxwell, A., Netchaev, A.* 2021. Monitoring for Analytes through LoRa and LoRaWAN Technology. *Procedia Computer Science*, 185: 152–159. DOI: 10.1016/j.procs.2021.05.041.
 22. Optimize Petroleum Gas Management with Lora Devices. Доступен по ссылке: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-aiut-optimize-petroleum-gas-management-with-lora-devices> (дата обращения: 18.07.2023).
 23. *Soldatov, A.S., Soldatov, E.S.* 2023. Controlling the Equipment State throughout the Industrial Life Cycle of the Product Using Digital Twin. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) *Software Engineering Research in System Science. CSOC 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 722. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-35311-6_60.
 24. *Soldatov, E., Bogomolov, A.* 2021. Decision support models and algorithms for remote monitoring of the equipment state. *CEUR Workshop Proceedings*. Iss. “ITIDMS 2021 - Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems””: 1–8.

Soldatov Evgeny Sergeevich. St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint. Petersburg, Russia. Researcher, candidate of technical sciences. Number of publications: 24. Research interests: systems analysis, cryogenic engineering, computational fluid dynamics. E-mail: volshebnoekoltso@mail.ru.