

Информационная поддержка принятия решений при мониторинге состояния криогенного оборудования

Е.С. Солдатов ¹✉¹ Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

Ссылка для цитирования

Солдатов Е.С. Информационная поддержка принятия решений при мониторинге состояния криогенного оборудования // Программные продукты и системы. 2024. Т. 37. № 1. С. 77–82. doi: 10.15827/0236-235X.142.077-082

Информация о статье

Группа специальностей ВАК: 2.3.1

Поступила в редакцию: 11.08.2023

После доработки: 25.08.2023

Принята к публикации: 07.09.2023

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы информационной поддержки принятия решений при мониторинге состояния криогенного оборудования в интересах повышения безопасности и снижения потерь криогенного продукта в процессе его эксплуатации. Современные системы поддержки принятия технических и организационных решений в процессе мониторинга состояния криогенного емкостного оборудования не лишены недостатков. Так, не решена проблема получения в режиме реального времени информации о прогнозируемом времени хранения криогенного продукта с учетом технического состояния сосудов, изменяющихся условий окружающей среды и режимов эксплуатации. Данное исследование выполнено с применением методов структурного системного анализа, программной инженерии, вычислительной гидродинамики и теории надежности. Основным результатом является архитектура системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного оборудования, подключенного к единой беспроводной сети передачи данных. Функционал системы заключается в обеспечении удаленного мониторинга состояния криогенного емкостного оборудования, в том числе с возможностью на основе результатов компьютерного моделирования и статистических данных прогнозировать время бездренажного хранения криогенного продукта. Диспетчерский центр мониторинга организован в соответствии с концепцией цифрового двойника. Такой двойник использует компьютерные модели криогенного оборудования при организации его двустороннего информационного взаимодействия с объектом мониторинга. С применением разработанной системы поддержки принятия решений обеспечиваются своевременное оповещение ответственных лиц о потенциально опасных и аварийных ситуациях, накопление статистической информации о процессе бездренажного хранения криогенного продукта. В работе представлена принципиальная схема автономного устройства телеметрии транспортного криогенного оборудования на базе модуля телеметрии дальнего радиуса действия и маломощных автономных модулей телеметрии стационарного и транспортного криогенного оборудования, используемых в современных сенсорных сетях. Практическая значимость полученных результатов заключается в обеспечении возможности своевременного принятия превентивных мер по предотвращению потерь криогенного продукта в процессе хранения с недопустимостью возникновения взрывопожароопасных ситуаций.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, мониторинг криогенного оборудования, информационная поддержка мониторинга, архитектура системы поддержки принятия решений, дистанционный мониторинг, LoRaWAN, цифровой двойник, беспроводная сенсорная сеть

Введение. Для обеспечения безопасности при хранении и перевозке опасных наливных грузов различными видами транспорта применяют системы дистанционного мониторинга технического состояния оборудования и текущих параметров хранимого или перевозимого продукта [1, 2]. При этом актуальной задачей является организация долговременного хранения криогенных продуктов (жидкого кислорода, жидкого азота, сжиженного природного газа и др.) в стационарных и транспортных системах, где срок их безопасного (бездренажного) хранения ограничен вследствие роста давления в сосуде из-за неизбежных теплопритоков из окружающей среды через вакуумную теплоизоляцию [3]. Проблема роста давления в стационарной *системе хранения (СХ)* усугуб-

ляется также за счет температурной стратификации продукта, возникающей в процессе естественной конвекции [4]. Время безопасного хранения криогенного продукта в СХ является максимальным (предельно допустимым) временем хранения, поэтому расчет его оценки – ключевой аспект мониторинга состояния криогенного оборудования (состояния СХ).

Мониторинг состояния любой СХ (стационарной или транспортной) в режиме реального времени требует применения средств телеметрии [5, 6]. На многих объектах производства и потребления криогенных продуктов уже эксплуатируются телеметрические системы, реализующие мониторинг уровня жидкости внутри криогенного сосуда на основе измерения разности давлений в паровой и жидкой фазах

с учетом поправки на изменение плотности, рассчитанной по показаниям датчика давления [7]. К настоящему времени обеспечена возможность индикации параметров на мониторе, встроенном в криогенный сосуд, с передачей данных на удаленное устройство контроля процесса бездренажного хранения [8, 9]. При этом для повышения точности прогнозирования максимального времени хранения криогенного продукта необходимо совершенствование системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного оборудования.

Приоритетами такого совершенствования должны быть

- обеспечение учета внешних условий хранения (температуры окружающей среды, вибраций, атмосферного давления и т.п.);
- обеспечение учета ретроспективной информации о процессе хранения;
- применение технологий автономной телеметрии.

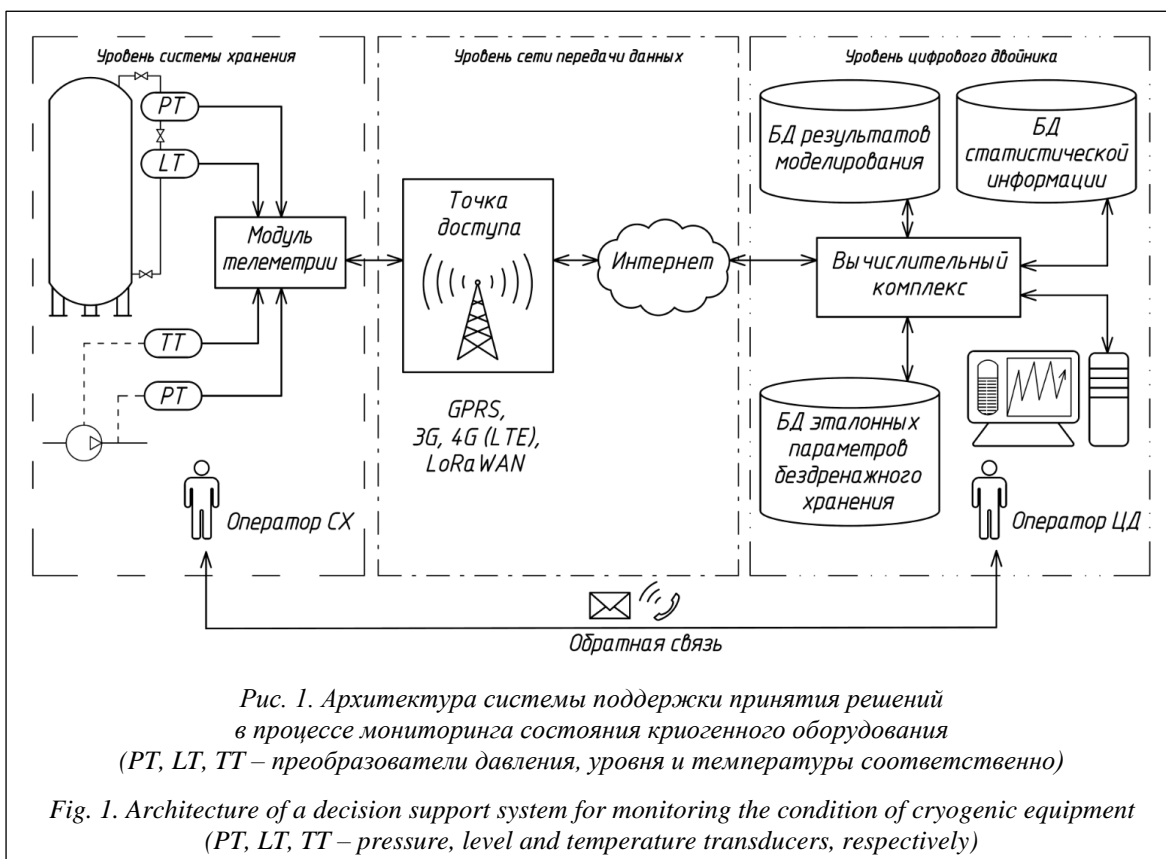
В связи с этим целью исследования являлась разработка архитектуры системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного оборудования, ориентированной на учет названных приоритетов.

Структура системы

Точное прогнозирование времени хранения криогенного продукта в криогенном сосуде при помощи компьютерного моделирования представляет собой сложную задачу, решение которой для всего спектра вероятных термодинамических состояний продукта пока не представляется возможным [1, 10]. Поэтому для расчета оценки времени бездренажного хранения продукта с точностью, достаточной для практических целей, целесообразно применение эвристических вычислительных алгоритмов [11, 12]. При этом задачей системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного оборудования будет являться обеспечение сбора и обработки информации при удаленном мониторинге состояния такого оборудования, в том числе с возможностью на основе результатов компьютерного моделирования вычислять резервное время бездренажного хранения продукта для каждой конкретной СХ.

Структурная схема разработанной системы приведена на рисунке 1.

Информация от датчиков и преобразователей передается в модуль телеметрии. За счет наличия у каждой из СХ, состояние которой



контролируется в режиме реального времени, индивидуального телеметрического модуля в систему мониторинга могут быть дополнительно включены различные СХ независимо от объема криогенного хранилища или удаленности СХ друг от друга [13, 14].

Сервер цифрового двойника СХ содержит вычислительный комплекс обработки информации, поступающей от модулей телеметрии каждой из подключенных к системе мониторинга стационарных и транспортных СХ. Ключевой информацией являются данные о давлении и уровне жидкого криогенного продукта внутри криогенного сосуда. На информационной картине цифрового двойника также отображаются режим хранения в конкретный момент времени (стационарный или транспортный) и основной расчетный параметр – время безопасного хранения криогенного продукта.

Базой для вычисления оценки времени безопасного хранения криогенного продукта является массив данных по времени хранения, полученных по результатам компьютерного моделирования, сопряженный с БД результатов моделирования. Текущая информация о процессе хранения дополнительно записывается в БД статистической информации, которая подлежит последующему анализу в интересах уточнения прогноза по времени хранения для конкретной СХ [15] при изменении статуса системы с «ОК» на «ВНИМАНИЕ» (статус изменяется в том случае, если значение времени хранения становится меньше 24 часов). Незамедлительное информирование оператора СХ производится при изменении статуса на «ОПАСНО», например, при достижении давления в криогенном сосуде значения $0,98p_m$, где p_m – предельно допустимое рабочее давление в сосуде, или в случае, когда прогнозируемое значение времени хранения становится меньше 2 часов, а также при получении аварийного сообщения (значение давления в сосуде превышает $1,15p_m$, значение уровня жидкости в хранилище превышает 98 %, отсутствует вакуум в теплоизоляционной полости и т.п.). Для поддержки принятия решений могут применяться технологии сбора и обработки экспертной информации с учетом территориальной удаленности экспертов [16, 17].

Автономная телеметрия криогенного емкостного оборудования

Одним из ключевых компонентов архитектуры системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного

оборудования (рис. 1) являются модули автономной телеметрии. Такие модули стационарных СХ, интегрированные в сенсорную сеть передачи данных, могут служить промежуточными звеньями в цепи передачи данных от модулей транспортных СХ, удаленных на значительное расстояние от базовой станции. Также сама сенсорная сеть для большого числа стационарных СХ является резервным каналом связи в случае отсутствия подключения к основной сети передачи данных (например, GPRS).

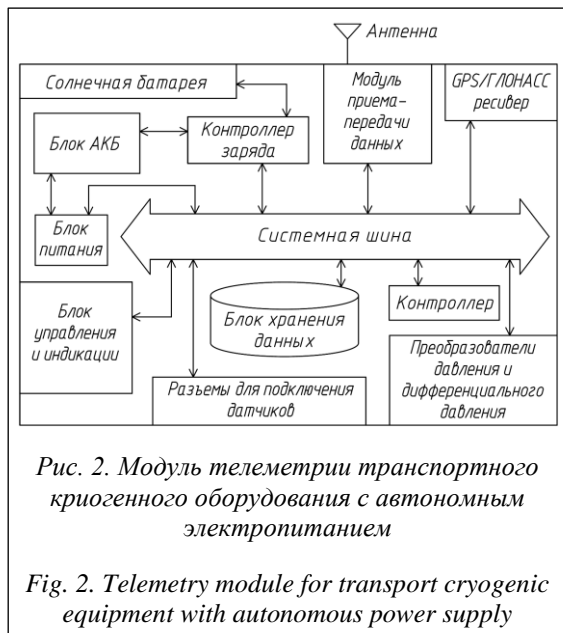
При этом для современных транспортных СХ, в частности, для модулей криогенных танк-контейнеров, перевозимых разными транспортными средствами и неоднократно переустанавливаемых в процессе перевозки одной партии криогенного продукта, не представляется возможным классическое подключение к мобильной сети передачи данных. Это обуславливает необходимость установки на контейнер модулей телеметрии, обладающих автономностью, пониженным энергопотреблением, но при этом имеющих большую дальность связи.

При практической реализации концепции сети передачи данных для транспортных СХ выбираемая технология должна обеспечивать надежное покрытие для большого числа недорогих устройств телеметрии с низким энергопотреблением. Для этого целесообразно использовать сенсорные сети передачи данных на базе модулей дальнего радиуса действия, например, модулей ZigBee Pro, NB-IoT или LoRaWAN [18, 19].

Принципиальная схема автономного устройства телеметрии на базе модуля LoRaWAN, предназначенная для мониторинга состояния транспортных танк-контейнеров различных типов, в том числе криогенных, приведена на рисунке 2.

Информационный обмен между блоками устройства осуществляется посредством системной шины. В контроллере производится обработка информации, поступающей от ресивера GPS/ГЛОНАСС, о текущих координатах и скорости движения объекта.

На информационной панели блока управления и индикации отображаются текущие значения параметров хранения: рабочее давление, уровень жидкости, рассчитанная оценка времени безопасного бездренажного хранения криогенного продукта. Устройство может работать на аккумуляторных батареях без обслуживания и подзарядки от 1 года до 2 лет. До-



полнительно может быть организована подзарядка аккумуляторных батарей от солнечной батареи, размещенной на верхней поверхности корпуса, что увеличит срок непрерывной работы модуля LoRaWAN еще на несколько лет.

В зависимости от типа перевозимого продукта в контроллере производится вычисление плотности жидкости и уровня жидкости в сосуде и последующая запись результатов в блок хранения данных. После этого вычисляется время безопасного хранения криогенного про-

дукта для текущих значений давления, уровня жидкости и режима (движение или стоянка). При превышении параметров хранения допустимых значений автоматически происходят формирование и отправка аварийного сообщения.

Заключение

В результате исследования разработана архитектура системы поддержки принятия решений в процессе мониторинга состояния криогенного оборудования, обеспечивающая возможность такого мониторинга с применением автономных энергоэффективных модулей телеметрии. Использование системы, реализующей предложенную архитектуру, обеспечивает возможность сбора и обработки информации, позволяющей в режиме реального времени рассчитать безопасное время бездренажного хранения криогенных продуктов с учетом текущего технического состояния и режимов эксплуатации сосудов, а также динамически изменяющихся условий окружающей среды. Это, в свою очередь, обеспечивает своевременное распознавание потенциально опасной ситуации и принятие превентивных мер, направленных на предотвращение потерь криогенного продукта в процессе хранения и недопущение возникновения пожаровзрывоопасной ситуации.

Список литературы

1. Lee S., Haskins C., Paltrinieri N. Digital twin concept for risk analysis of oil storage tanks in operations: A systems engineering approach. *CET*, 2022, vol. 90, pp. 157–162.
2. Mourtzis D., Angelopoulos J., Panopoulos N. Intelligent predictive maintenance and remote monitoring framework for industrial equipment based on mixed reality. *Front. Mech. Eng.*, 2020, vol. 6, art. 578379. doi: 10.3389/fmech.2020.578379.
3. Рязских В.И., Сумин В.А., Хвостов А.А., Журавлев А.А., Семенихин О.А. Численное моделирование термоконвекционной конвекции в криогенных резервуарах // *ММТТ*. 2020. Т. 5. С. 17–20.
4. Dinardo G., Fabbiano L., Vacca G. A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario. *Measurement*, 2018, vol. 126, pp. 1–12. doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.041.
5. Short M., Twiddle J. An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 17, art. 3781. doi: 10.3390/s19173781.
6. Орехов В.А., Бобков В.И., Панченко С.В. Разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов // *Программные продукты и системы*. 2022. Т. 35. № 3. С. 502–508. doi: 10.15827/0236-235X.139.502-508.
7. Soldatov A.S., Soldatov E.S. Controlling the equipment state throughout the industrial life cycle of the product using digital twin. In: *LNNS. Proc. CSOC*, 2023, vol. 722, pp. 624–631. doi: 10.1007/978-3-031-35311-6_60.
8. Рязских А.В., Хвостов А.А., Соболева Е.А., Рязских В.И. Температурное поле однородной квадратной области с движущимися без ускорения смежными сторонами при граничных условиях первого рода // *Вестн. ЮУрГУ. Сер.: Математика. Механика. Физика*. 2023. Т. 15. № 1. С. 55–62. doi: 10.14529/mmph230106.
9. Солдатов Е.С. Вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криопродуктов в стационарных и транспортных сосудах // *Науч. ведомости БелГУ. Сер.: Экономика. Информатика*. 2019. Т. 46. № 3. С. 485–495. doi: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.

10. Soldatov E., Bogomolov A. Decision support models and algorithms for remote monitoring of the equipment state. CEUR Workshop Proc. Proc. ITIDMS, 2021, vol. 2843, pp. 1–8.
11. Soldatov E., Bogomolov A. Issues of energy-efficient storage of fuel in multimodal transport units. In: Electromechanics and Robotics. SIST, 2022, vol. 232, pp. 393–402. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_34.
12. Larkin E.V., Akimenko T.A., Bogomolov A.V. The swarm hierarchical control system. In LNCS. Proc. ICSI, 2023, vol. 13968, pp. 30–39. doi: 10.1007/978-3-031-36622-2_3.
13. Tobin D., Bogomolov A., Golosovskiy M. Model of organization of software testing for cyber-physical systems. In Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application. SSDC, 2022, vol. 418, pp. 51–60. doi: 10.1007/978-3-030-95120-7_5.
14. Golosovskiy M., Bogomolov A., Balandov M. A model of continuous integration and deployment of engineering software. In LNNS. Proc. CoMeSySo, 2021, vol. 231, pp. 789–796. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_64.
15. Golosovskiy M., Bogomolov A. Fuzzy inference algorithm using databases. In LNNS. Proc. CSOC, 2023, vol. 724, pp. 444–451. doi: 10.1007/978-3-031-35314-7_39.
16. Тобин Д.С., Голосовский М.С., Богомолов А.В. Технология обеспечения достоверности информации при проведении сетевых экспертиз // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2020. Т. 16. № 3. С. 623–632.
17. Богомолов А.В., Климов Р.С. Автоматизация обработки информации при проведении коллективных сетевых экспертиз // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 11. С. 509–512.
18. Kim D.-S., Tran-Dang H. Wireless sensor networks for industrial applications. In: Industrial Sensors and Controls in Communication Networks. CCN, 2019, pp. 127–140. doi: 10.1007/978-3-030-04927-0_10.
19. Niles K., Ray J., Niles K., Maxwell A., Netchaev A. Monitoring for analytes through LoRa and LoRaWAN technology. Procedia Computer Science, 2021, vol. 185, pp. 152–159. doi: 10.1016/j.procs.2021.05.041.

Software & Systems

doi: 10.15827/0236-235X.142.077-082

2024, 37(1), pp. 77–82

Information support for decision making when monitoring the condition of cryogenic equipment

Evgeny S. Soldatov ¹✉¹ St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation

Soldatov, E.S. (2024) 'Information support for decision making when monitoring the condition of cryogenic equipment', *Software & Systems*, 37(1), pp. 77–82 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.142.077-082

Article info

Received: 11.08.2023

After revision: 25.08.2023

Accepted: 07.09.2023

Abstract. The article discusses the issues of information support for decision making when monitoring the condition of cryogenic equipment to increase safety and reduce cryogenic product losses during its operation. The main disadvantage of technical and organizational decision-making support systems, which are currently used in monitoring the condition of cryogenic capacitive equipment, is an inability to obtain real-time information about the predicted storage time of a cryogenic product taking into account the technical condition of the vessels, changing environmental conditions and operating modes. During this study, the author used methods of structural systems analysis, software engineering, computational fluid dynamics and reliability theory. The main result is the architecture of a decision support system for monitoring the condition of cryogenic equipment connected to a unified wireless data transmission network. The functionality of the system is to provide remote monitoring of the condition of cryogenic capacitive equipment, including the ability to predict the time of non-drainage storage of a cryogenic product based on the results of computer modeling and statistical data. The monitoring control center is organized according to the digital twin concept, which uses computer models of cryogenic equipment to organize two-way information interaction between a digital twin and a monitoring object. The developed decision support system ensures timely notification of responsible persons about potentially dangerous and emergency situations, as well as the accumulation of statistical information about the process of drainless storage of a cryogenic product. The paper presents a schematic diagram of an autonomous telemetry device for transport cryogenic equipment based on a long-range telemetry module and low-power autonomous telemetry modules for stationary and transport cryogenic equipment used in modern sensor networks. The practical significance of the results obtained is to ensure the possibility of timely adoption of preventive measures to prevent cryogenic product losses during storage and to prevent fire and explosion hazards.

Keywords: condition of cryogenic equipment, monitoring of cryogenic equipment, information support for monitoring, decision support system, architecture decision support system, remote monitoring, drainless storage of cryogenic product, LoRaWAN, digital twin, wireless sensor network

References

1. Lee, S., Haskins, C., Paltrinieri, N. (2022) 'Digital twin concept for risk analysis of oil storage tanks in operations: A systems engineering approach', *CET*, 90, pp. 157–162.
2. Mourtzis, D., Angelopoulos, J., Panopoulos, N. (2020) 'Intelligent predictive maintenance and remote monitoring framework for industrial equipment based on mixed reality', *Front. Mech. Eng.*, 6, art. 578379. doi: 10.3389/fmech.2020.578379.
3. Ryazhskikh, V.I., Sumin, V.A., Khvostov, A.A., Zhuravlev, A.A., Semenikhin, O.A. (2020) 'Numerical simulation of thermoconcentration convection in cryogenic tanks', *Math. Methods in Eng. and Tech.*, 5, pp. 17–20 (in Russ.).
4. Dinardo, G., Fabbiano, L., Vacca, G. (2018) 'A smart and intuitive machine condition monitoring in the Industry 4.0 scenario', *Measurement*, 126, pp. 1–12. doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.041.
5. Short, M., Twiddle, J. (2019) 'An industrial digitalization platform for condition monitoring and predictive maintenance of pumping equipment', *Sensors*, 19(17), art. 3781. doi: 10.3390/s19173781.
6. Orekhov, V.A., Bobkov, V.I., Panchenko, S.V. (2022) 'Information system for calculation, information accumulation and certification of phosphorite thermophysical properties', *Software & Systems*, 35(3), pp. 502–508 (in Russ.). doi: 10.15827/0236-235X.139.502-508.
7. Soldatov, A.S., Soldatov, E.S. (2023). 'Controlling the equipment state throughout the industrial life cycle of the product using digital twin', in: *LNNS. Proc. CSOC*, 722, pp. 624–631. doi: 10.1007/978-3-031-35311-6_60.
8. Ryazhskikh, A.V., Khvostov, A.A., Soboleva, E.A., Ryazhskikh, V.I. (2023) 'The temperature pattern of a homogeneous square area with adjacent sides moving without acceleration under boundary conditions of the first kind', *Bull. of the SUSU. Ser.: Math. Mech. Phys.*, 15(1), pp. 55–62 (in Russ.). doi: 10.14529/mmph230106.
9. Soldatov, E.S. (2019) 'Computational algorithm for predicting the time of non-drain cryoproducts storage in stationary and transport vessels', *Sci. Bull. of the BSU. Economics. Inform. Tech.*, 46(3), pp. 485–495 (in Russ.). doi: 10.18413/2411-3808-2019-46-3-485-495.
10. Soldatov, E., Bogomolov, A. (2021) 'Decision support models and algorithms for remote monitoring of the equipment state', *CEUR Workshop Proc. Proc. ITIDMS*, (2843), pp. 1–8.
11. Soldatov, E., Bogomolov, A. (2022) 'Issues of energy-efficient storage of fuel in multimodal transport units', in: *Electromechanics and Robotics. SIST*, 232, pp. 393–402. doi: 10.1007/978-981-16-2814-6_34.
12. Larkin, E.V., Akimenko, T.A., Bogomolov, A.V. (2023) 'The swarm hierarchical control system', in: *LNCS. Proc. ICSI*, 13968, pp. 30–39. doi: 10.1007/978-3-031-36622-2_3.
13. Tobin, D., Bogomolov, A., Golosovskiy, M. (2022) 'Model of organization of software testing for cyber-physical systems', in: *Cyber-Physical Systems: Modelling and Industrial Application. SSDC*, 418, pp. 51–60. doi: 10.1007/978-3-030-95120-7_5.
14. Golosovskiy, M., Bogomolov, A., Balandov, M. (2021) 'A model of continuous integration and deployment of engineering software', in: *LNNS. Proc. CoMeSySo*, 231, pp. 789–796. doi: 10.1007/978-3-030-90321-3_64.
15. Golosovskiy, M., Bogomolov, A. (2023) 'Fuzzy inference algorithm using databases', in: *LNNS. Proc. CSOC*, 724, pp. 444–451. doi: 10.1007/978-3-031-35314-7_39.
16. Tobin, D.S., Golosovskiy, M.S., Bogomolov, A.V. (2020) 'Technology for ensuring the reliability of information during network examinations', *Modern Information Technologies and IT-Education*, 16(3), pp. 623–632 (in Russ.).
17. Bogomolov, A.V., Klimov, R.S. (2017) 'Automation of information processing during collective network expert examinations', *Automation. Modern Technologies*, 71(11), pp. 509–512 (in Russ.).
18. Kim, D.-S., Tran-Dang, H. (2019) 'Wireless sensor networks for industrial applications', in: *Industrial Sensors and Controls in Communication Networks. CCN*, pp. 127–140. doi: 10.1007/978-3-030-04927-0_10.
19. Niles, K., Ray, J., Niles, K., Maxwell, A., Netchaev, A. (2021) 'Monitoring for analytes through LoRa and LoRaWAN Technology', *Procedia Computer Science*, 185, pp. 152–159. doi: 10.1016/j.procs.2021.05.041.

Авторы

Солдатов Евгений Сергеевич¹, к.т.н.,
старший научный сотрудник,
volshebnoekoltso@mail.ru

Authors

Evgeny S. Soldatov¹, Cand. of Sci. (Engineering),
Senior Researcher,
volshebnoekoltso@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский федеральный
исследовательский центр РАН,
г. Санкт-Петербург, 199178, Россия

¹ St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation