

С. С. Пироженко¹, С. С. Даценко²

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ СЕМАНТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ У СЕРЕДОВИЩІ ПРОМИСЛОВОГО ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Анотація. Актуальність дослідження полягає у розробленні та впровадженні технології семантичного перетворення інформаційних повідомлень, яка підвищить ефективність обробки даних і сприятиме розвитку інтелектуальних систем управління промисловими процесами. **Мета дослідження:** розроблення технології семантичного перетворення інформаційних повідомлень у середовищі промислового Інтернету речей, яка забезпечує узгоджене представлення, інтерпретацію та обмін даними між гетерогенними пристроями і системами. **Результати.** У статті запропонована архітектура гетерогенного шлюзу промислового Інтернету речей. Доведена можливість реалізації технології семантичного шлюзу, який вирішує проблеми взаємодії різних прикладних технологій на рівні метаданих. У гетерогенному середовищі такий шлюз відповідає за перетворення протоколів промислового Інтернету речей. Проведений аналіз протоколів передачі даних, що використовуються в мережах IIoT з метою проведення семантичного перетворення. **Висновок.** Запропонований підхід дозволяє підвищити рівень інтероперабельності, зменшити інформаційні втрати під час трансляції повідомлень та створити основи для побудови інтелектуальних сервісів обробки даних у промислових кіберфізичних системах.

Ключові слова: промисловий Інтернет речей, семантичне перетворення, гетерогенний шлюз, протокол IIoT, інтероперабельність.

Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується інтенсивною інтеграцією кіберфізичних систем, сенсорних мереж і хмарних платформ у межах концепції промислового Інтернету речей (IIoT, Industrial Internet of Things). У цьому середовищі ключову роль відіграє ефективний обмін даними між гетерогенними пристроями, що мають різні протоколи, формати та семантику інформаційних повідомлень. Забезпечення узгодженого тлумачення даних є критичним для підвищення надійності, гнучкості та адаптивності виробничих процесів.

Однією з головних проблем у IIoT є семантична неоднорідність інформації, яка ускладнює автоматизовану взаємодію між системами управління, аналітичними платформами та сенсорними пристроями. Традиційні методи обміну повідомленнями не гарантують збереження змістового контексту, що призводить до втрати смислової узгодженості або помилок при обробці даних.

Технологія семантичного перетворення інформаційних повідомлень орієнтована на вирішення цієї проблеми шляхом формування спільного онтологічного простору, який дозволяє інтерпретувати зміст даних незалежно від їхнього джерела або формату представлення. Такі підходи забезпечують інтелектуальну інтеграцію інформаційних потоків, автоматичну адаптацію даних до вимог користувача та контексту застосування, а також створюють основу для побудови когнітивних виробничих систем.

Отже, актуальність дослідження полягає у розробленні та впровадженні технології семантичного перетворення інформаційних повідомлень, яка забезпечить інтероперабельність компонентів IIoT, підвищить ефективність обробки даних і сприятиме розвитку інтелектуальних систем управління промисловими процесами.

Метою статті є розроблення технології семантичного перетворення інформаційних повідомлень у

середовищі промислового Інтернету речей, яка забезпечує узгоджене представлення, інтерпретацію та обмін даними між гетерогенними пристроями і системами.

Запропонований підхід спрямований на підвищення рівня інтероперабельності, зменшення інформаційних втрат під час трансляції повідомлень та створення основи для побудови інтелектуальних сервісів обробки даних у промислових кіберфізичних системах.

1. Аналіз літературних джерел

Проблематика семантичної інтеграції даних у промисловому Інтернеті речей (IIoT) активно досліджується в останні роки, що пов'язано з необхідністю забезпечення узгодженого обміну інформацією між численними пристроями, системами управління та аналітичними платформами.

У роботах [1, 2] розглядаються підходи до формування семантичних моделей даних на основі онтологій, які дозволяють описувати структуру, взаємозв'язки та контекст інформаційних повідомлень. Зокрема, використання стандартів **OWL (Web Ontology Language)** і **RDF (Resource Description Framework)** забезпечує уніфіковане представлення знань і підтримку машинної інтерпретації.

У праці [3] підкреслюється роль семантичних шлюзів (semantic gateways) у забезпеченні взаємодії між гетерогенними пристроями та платформами IIoT. Такі шлюзи виконують функції трансляції протоколів, нормалізації форматів даних і контекстної інтерпретації повідомлень, що надходять із сенсорних мереж. Автори наголошують, що ефективна робота семантичних шлюзів потребує застосування методів онтологічного узгодження (ontology alignment) та семантичного мапінгу (semantic mapping).

Дослідження [4, 5] фокусуються на інтеграції семантичних технологій із хмарними та периферійними обчисленнями. Така комбінація дає змогу реалізувати розподілену обробку даних у реальному часі

з урахуванням контексту та пріоритетів задач. Застосування **Semantic Web Services** і **Linked Data** забезпечує автоматизовану інтерпретацію запитів та оптимізацію маршрутів передачі інформації.

Окрему увагу приділено питанням безпеки та довіри в процесі семантичного обміну повідомленнями [6]. Дослідники пропонують використовувати механізми цифрових підписів, шифрування метаданих і контроль доступу на основі семантичних політик, що підвищує надійність IoT-комунікацій.

Таким чином, проведений аналіз показує, що основні напрями розвитку технологій семантичного перетворення в середовищі IoT пов'язані з онтологічним моделюванням, автоматичним узгодженням

даних, побудовою розподілених семантичних сервісів і забезпеченням кібербезпеки. Проте залишається відкритим питання створення комплексної технології, яка б поєднувала ці аспекти для ефективної адаптації повідомлень у динамічних промислових середовищах.

2. Структура гетерогенного шлюзу промислового Інтернету речей

Гетерогенний шлюз Інтернету речей – пристрій, що забезпечує взаємодію різних технологій Інтернету речей як між собою, так і з мережею зв'язку загального користування (МЗЗК) на всіх рівнях моделі OSI [7]. На рис. 1 зображено архітектуру гетерогенного шлюзу промислового Інтернету речей.

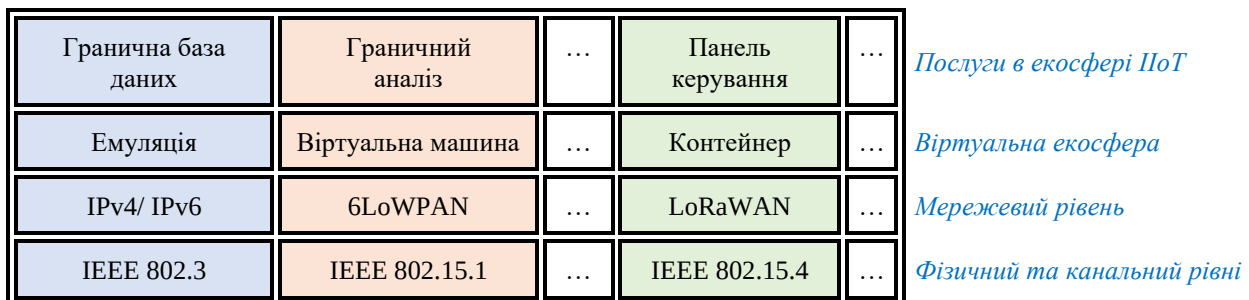


Рис. 1. Архітектура гетерогенного шлюзу промислового Інтернету речей

Дана система забезпечує взаємодію різних технологій фізичного, каналного та мережевого рівня та за допомогою спеціального програмного забезпечення (ПЗ), що функціонує у віртуальному оточенні, дозволяє перетворення даних між використовуваними технологіями на прикладному рівні. Таким чином, дана система складається з наступних компонентів:

- фізичні інтерфейси, що підтримують різні технології Інтернету;
- операційна система, системні драйвера, ПЗ, що дозволяють підтримувати функціонування протоколів фізичного, каналного, мережевого та транспортного рівнів на гетерогенному шлюзі;
- віртуальне оточення (емулятори, контейнери, віртуальні машини та ін.), що дозволяє додавати нові можливості та послуги для гетерогенного шлюзу;
- ПЗ, що функціонує у віртуальному оточенні та дозволяє гетерогенним шлюзам розширювати існуючу функціональність. Наприклад, це ПЗ дозволяє розширити можливості гетерогенного шлюзу за рахунок підтримки нових протоколів, послуг та технологій.

Гетерогенний шлюз складається з основної частини, що дозволяє підтримувати різні технології Інтернету речей, системи віртуалізації, і прикладної частини, що функціонує у віртуальному оточенні і дозволяє впроваджувати без зміни основного робочого оточення гетерогенного шлюзу нові технології та послуги. Однією з таких технологій є семантичний шлюз промислового Інтернету речей.

3. Завдання семантичного перетворення повідомлень для гетерогенного шлюзу IoT

Семантичний шлюз Інтернету речей – програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати пере-

творення прикладних протоколів ІВ між собою та забезпечує загальний адресний простір для всіх пристроїв, що взаємодіють із цим ПЗ. Таким чином, семантичний шлюз вирішує проблеми взаємодії різних прикладних технологій на рівні метаданих. Проблема перетворення даних між різними протоколами на семантичному рівні є актуальною для промислового Інтернету речей. При використанні різних промислових рішень виникає проблема стикування технологій як на фізичному, каналному, мережевому, транспортному рівнях, так і прикладному рівні. Для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати гетерогенний шлюз. Проблема взаємодії протоколів лише на рівні метаданих вирішується використанням спеціального ПЗ, що і буде промисловим семантичним шлюзом. Дане ПЗ виділяє ключову інформацію від кожного з пакетів даних, прикладний рівень яких заснований на одному з промислових протоколів, і перетворює на загальний проміжний формат Industrial Internet of Things Conversion Format (IIoTCF). У разі потреби використовуються функції ПЗ для перетворення отриманих даних у протоколи, що підтримуються, і подальшого їх відправлення в пункт призначення. На рис. 2 зображено структуру для перетворення протоколів IoT. Це ПЗ складається з таких основних функцій:

- «Отримання пакету» – відповідає за прийом та фільтрацію пакетів, заснованих на одному з протоколів IoT, що підтримуються. Дане ПЗ аналізує всі пакети, що приходять на активний мережевий інтерфейс і приймає ті пакети, формат яких заснований на одному з підтримуваних протоколів;
- «Черга 1..N» – черга пакетів, що надходять у програмне забезпечення, як для обробки, так і для відправлення;



Рис. 2. Структура семантичного шлюзу IIoT

- «В IICF» – перетворення пакетів, що надходять, у загальний формат IICF;
- «База даних IICF» – відповідає за зберігання пакетів. Може являти собою систему зберігання даних, що вбудовується в програмне забезпечення, обмежений буфер, програмний інтерфейс для взаємодії із зовнішніми системами зберігання даних та ін. Може зберігати інформацію про протокол, який підтримує пункт призначення, прописаний у конкретному пакеті;
- «IICF» – відповідає за перетворення даних із формату IICF у необхідний формат згідно з протоколом;
- «Надіслати пакет» – відповідає за відправку сформованого пакета до потрібного пункту призначення.

Як прикладне рішення для семантичного шлюзу промислового Інтернету речей пропонується використовувати гетерогенний шлюз IIoT, шлюз, що встановлюється в рамках одного рішення IIoT і відповідає за перетворення протоколів промислового Інтернету речей між собою.

На рис. 3 зображено приклад програмно-апаратного комплексу (ПАК), що поєднує різні підмережі, які функціонують на базі різних протоколів промислового Інтернету речей.

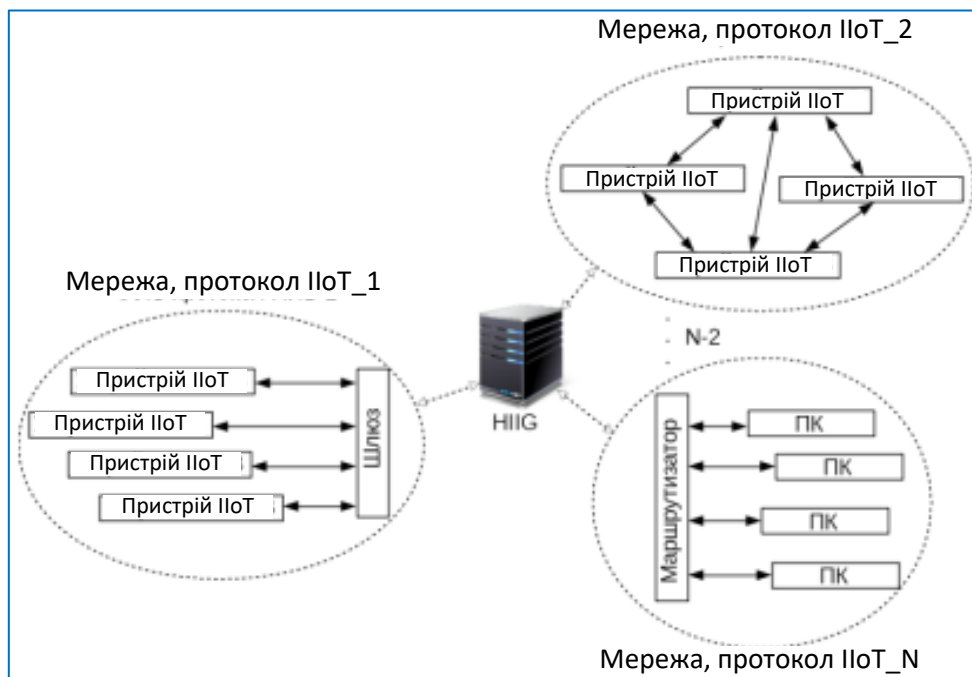


Рис. 3. Структура програмно-апаратного комплексу, що містить гетерогенний шлюз IIoT

4. Аналіз протоколів передачі даних, що використовуються в мережах IIoT

Для розробки структури системи, що відповідає за перетворення та формування пакетів на базі

Відомих форматів даних різних протоколів IIoT у форматі IICF, необхідно досліджувати формати даних різних промислових протоколів і виділити загальні поля даних. Для цього дослідження було обрано такі найпоширеніші протоколи: CoAP; MQTT; XMPP; ModBus RTU; ModBus TCP; OPC UA; HTTP.

Основні поля в протоколі CoAP є такими: версія CoAP (2 біти); тип повідомлення (2 біти); кількість додаткових опцій (4 біти); код – метод запиту даних або код запиту (8 біт), наприклад GET (1), POST (2), PUT (3), DELETE (4); ідентифікатор повідомлення (16 біт); опції та корисні дані повідомлення.

Основні поля в протоколі MQTT є такими: тип повідомлення (4 біти); прапор перезапиту повідомлення - DUP (1 біт); рівень QoS (2 біти); прапор збереження повідомлення (1 біт); довжина опціональної інформації (8 біт); довжина заголовка та даних.

Формат метаданих для протоколу XMPP такий: версія заголовка XML; тип повідомлення; ідентифікатор сесії; версія XML; ідентифікатори повідомлення, відправника, отримувача; мова повідомлення; адреса потоку; текст повідомлення.

Формат метаданих для протоколу ModBus RTU має такі основні поля: стартовий прапор; адресу ModBus (8 біт); функції ModBus (8 біт); поле даних.

Формат метаданих для протоколу HTTP орієнтований на такі основні поля: тип запиту; URI-домен, що запитується; версія HTTP-запиту; URI-адреса призначення; опції з'єднання; опції контролю кешу; дані про користувача клієнта; дані запиту; кодування даних; мова даних; дані про сервер; час.

Висновки

У статті запропоновано технологію семантичного перетворення інформаційних повідомлень у

середовищі промислового Інтернету речей, яка забезпечує узгоджене представлення, інтерпретацію та обмін даними між гетерогенними пристроями і системами. Розроблена архітектура гетерогенного шлюзу промислового Інтернету речей. Доведена можливість реалізації технології семантичного шлюзу, який вирішує проблеми взаємодії різних прикладних технологій на рівні метаданих. У гетерогенному середовищі такий шлюз відповідає за перетворення протоколів промислового Інтернету речей. Проведений аналіз протоколів передачі даних, що використовуються в мережах ІоТ з метою проведення семантичного перетворення.

Запропонований підхід дозволяє підвищити рівень інтероперабельності, зменшити інформаційні втрати під час трансляції повідомлень та створити основи для побудови інтелектуальних сервісів обробки даних у промислових кіберфізичних системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang, X., Huang, J., Ao, F. and Yin, J. (2023), "Ontology-based Semantic Data Model for Command and Control", 2023 9th Int. Conf. on Big Data and Inf. Analytics Bigdia Proc., pp. 330–335, doi: <https://doi.org/10.1109/BigDIA60676.2023.10429478>
2. Chalapathi, G.S.S., Chamola, V., Vaish, A. and Buyya, R. (2022), "Industrial internet of things (IIoT) applications of edge and fog computing: A review and future directions", *Advances in Information Security*, vol. 83, pp. 293–325, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-57328-7_12
3. Zuev, A., Karaman, D. and Olshevskiy, A. (2023), "Wireless sensor synchronization method for monitoring short-term events", *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 33–40, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.4.04>
4. Gramoli, V. (2020), "From blockchain consensus back to Byzantine consensus", *Future Generation Computer Systems*, vol. 107, pp. 760–769, doi: <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.09.023>
5. Kovalenko, A. and Kuchuk, H. (2022), "Methods to Manage Data in Self-healing Systems", *Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 425, pp. 113–171, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96546-4_3
6. Kuchuk, H. and Malokhvii, E. (2024), "Integration of IIoT with Cloud, Fog, and Edge Computing: A Review", *Advanced Information Systems*, vol. 8(2), pp. 65–78, doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.08>
7. Decker, C. and Wattenhofer, R. (2014), "Bitcoin transaction malleability and MtGox", *European symposium on research in computer security*, pp. 313–326, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11212-1_18

Received (Надійшла) 25.07.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Пироженко Сергій Станіславович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Serhii Pyrozhenko – PhD candidate of Department of Electronic Computers, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: serhii.pyrozhenko@nure.ua; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0006-4209-2144>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59675302400&origin=resultslist>.

Даценко Сергій Сергійович – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Serhii Datsenko – PhD candidate of Department of Electronic Computers, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Serhii.Datsenko@gmail.com; ORCID Author ID: <http://orcid.org/0009-0004-4372-1913>.

Technology of semantic transformation of information messages in the Industrial Internet of Things environment

Serhii Pyrozhenko, Serhii Datsenko

Abstract. The relevance of the research is the development and implementation of the technology of semantic transformation of information messages, which will increase the efficiency of data processing and promote the development of intelligent industrial process control systems. **The purpose of the research:** the development of the technology of semantic transformation of information messages in the industrial Internet of Things environment, which provides a consistent representation, interpretation and exchange of data between heterogeneous devices and systems. **Results.** The article proposes the architecture of a heterogeneous gateway for the industrial Internet of Things. The possibility of implementing the technology of a semantic gateway, which solves the problems of interaction of various applied technologies at the metadata level, is proven. In a heterogeneous environment, such a gateway is responsible for the transformation of industrial Internet of Things protocols. An analysis of data transmission protocols used in IIoT networks for the purpose of semantic transformation is carried out. **Conclusion.** The proposed approach allows to increase the level of interoperability, reduce information losses during message transmission, and create a basis for building intelligent data processing services in industrial cyber-physical systems.

Keywords: industrial Internet of Things, semantic transformation, heterogeneous gateway, IIoT protocol, interoperability.