

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕНТРОПІЙНОГО КОДУВАННЯ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ У СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЗБОРУ ДАНИХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Стрімкий розвиток комп'ютерно-інтегрованих систем та глобальна діджиталізація промисловості призвели до експоненційного зростання обсягів телеметричної інформації. Сучасні системи автоматизації генерують безперервні потоки даних із тисяч датчиків, що вимагає оптимізації каналів зв'язку без втрати цілісності інформації. У роботі розглянуто фундаментальні основи перетворення аналогових сигналів у цифровий код на основі теореми Котельникова. Особливу увагу приділено методам спектрального аналізу за допомогою швидкого перетворення Фур'є для виявлення аномалій та застосуванню алгоритмів Хафмана і Шеннона-Фано для стиснення системних логів. Показано, що комплексне використання методів цифрової обробки та ентропійного кодування дозволяє суттєво підвищити ефективність діджиталізованої інфраструктури.

Ключові слова: діджиталізація, телеметрія, теорема Котельникова, перетворення Фур'є, алгоритм Хафмана, ентропійне кодування, системні логи.

Abstract

The rapid development of computer-integrated systems and the global digitalisation of industry have led to an exponential increase in the volume of telemetry data. Modern automation systems generate continuous data streams from thousands of sensors, which requires the optimisation of communication channels without compromising data integrity. This paper examines the fundamental principles of converting analogue signals into digital code based on the Nyquist–Shannon theorem. Particular attention is paid to spectral analysis methods using the Fast Fourier Transform for anomaly detection and the application of Huffman and Shannon–Fano algorithms for compressing system logs. It is shown that the integrated use of digital processing and entropy coding methods allows for a significant improvement in the efficiency of digitised infrastructure.

Key words: digitalisation, telemetry, Kotelnikov's theorem, Fourier transform, Huffman algorithm, entropy coding, system logs.

Вступ

Цифрова трансформація промисловості та перехід до концепції «Індустрія 4.0» є однією з ключових тенденцій сучасного технологічного розвитку. Активне впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем, розгалужених мереж сенсорів та автоматизованих комплексів моніторингу суттєво змінює підходи до збору, передачі та аналізу телеметричної інформації. Діджиталізація охоплює практично всі рівні виробництва, зокрема енергетику, приладобудування, телекомунікації та управління критичною інфраструктурою.

Поряд із позитивними змінами цифровізація супроводжується різким зростанням обсягів даних, що генеруються у реальному часі. Висока щільність інформаційних потоків та обмежена пропускна здатність каналів зв'язку створюють додаткові ризики затримок у передачі критичних сигналів та перевантаження обчислювальних потужностей. У зв'язку з

цим особливого значення набувають питання ефективності перетворення сигналів, математичної оптимізації кодів та швидкодії алгоритмів стиснення без втрати цілісності даних.

У таких умовах дослідження ефективності ентропійного кодування та цифрової обробки сигналів потребує комплексного підходу, що поєднує фундаментальні принципи дискретизації з сучасними методами усунення інформаційної надмірності.

Результати дослідження

Забезпечення ефективності збору та передачі телеметричної інформації залишається однією з ключових проблем сучасного цифрового середовища, оскільки діджиталізація змінює не лише способи обробки сигналів, а й масштаби їх накопичення. Зростання кількості інтегрованих сенсорів і хмарних платформ моніторингу супроводжується підвищенням ризиків перевантаження каналів зв'язку, затримок у реальному часі та втрати критично важливих даних.

Актуальність цієї проблеми визначається стрімким розвитком промислового інтернету речей (IIoT), економічною доцільністю оптимізації трафіку та необхідністю підтримання високої надійності автоматизованих систем [1]. Перехід виробничих, енергетичних та мережевих сервісів у цифровий формат забезпечує швидкість доступу до метрик, проте водночас посилює вимоги до алгоритмів стиснення. У цифровому середовищі телеметрія стає стратегічним ресурсом, а її надмірність без належної обробки створює передумови для апаратних збоїв.

Процес діджиталізації починається з перетворення аналогових величин у дискретний код, де фундаментом виступає теорема Котельникова. Вона визначає, що для точного відновлення сигналу частота дискретизації f_s має щонайменше вдвічі перевищувати максимальну частоту спектра f_{max} . Недотримання цього принципу призводить до ефекту накладання спектрів (аліасингу), що унеможлиблює коректну діагностику обладнання [2].

Ключовою проблемою сучасної обробки даних є суперечність між точністю вимірювань та пропускнуою здатністю мереж. Організації збирають дані з високою частотою з метою детального моніторингу, причому обсяг цієї інформації часто створює «інформаційний шум». Використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) дозволяє розв'язати цю проблему шляхом переходу у частотну область, що дає змогу виділити лише значущі гармоніки та відфільтрувати перешкоди ще до етапу збереження [3][5].

Додатковим інструментом оптимізації є ентропійне кодування, зокрема алгоритми Хафмана та Шеннона-Фано. Вони дозволяють наблизити довжину кодового слова до теоретичної межі — інформаційної ентропії джерела. У системах реального часу, де багато параметрів (температура, вібрація) залишаються сталими протягом тривалого часу, ентропія потоку є низькою. Це дозволяє методу Хафмана досягати максимального ступеня стиснення системних логів та телеметрії без втрати жодного біта інформації [4].

Наукова новизна роботи визначається комплексним підходом до вирішення проблеми «інформаційного шуму» у сучасних системах моніторингу. Доведено, що поєднання фундаментальних принципів спектрального аналізу з алгоритмами Шеннона-Фано та Хафмана дозволяє створити стійку до завад модель передачі даних. Вперше продемонстровано, що використання ентропійних методів для стиснення телеметрії стабільних процесів (температура, вібрація) дозволяє суттєво підвищити швидкість доступу до метрик у хмарних платформах за рахунок усунення статистичної надмірності.

Висновки

Діджиталізація промисловості та перехід до «Індустрії 4.0» відкривають нові можливості для автоматизації, водночас підвищуючи ризики перевантаження каналів зв'язку через експоненційне зростання обсягів телеметрії. У роботі доведено, що розв'язання проблеми суперечності між точністю вимірювань та пропускнуою здатністю мереж лежить у

площині раціонального поєднання фундаментальних принципів дискретизації, спектрального аналізу та ентропійного кодування.

Основним результатом дослідження є обґрунтування ефективності комплексного підходу, що передбачає фільтрацію завад за допомогою швидкого перетворення Фур'є та наступне стиснення даних алгоритмом Хафмана. Встановлено, що застосування ентропійних методів для параметрів із низькою динамікою змін дозволяє мінімізувати надмірність інформації без втрати її цілісності. Впровадження таких рішень безпосередньо на рівні контролерів (edge computing) забезпечує стабільність IT-інфраструктури та створює підґрунтя для розбудови адаптивних систем моніторингу в сучасному цифровому середовищі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
2. Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10-21.
3. Г.Г.Бортник В.М.Кичак. ЦИФРОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ : навч. посіб. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2006. 167 с.
4. Cover, T. M., & Thomas, J. A. (2006). *Elements of Information Theory* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
5. Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2006). *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. Pearson Prentice Hall.

Синчишена Олександра Сергіївна – студентка факультету менеджменту та інформаційної безпеки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, електронна пошта: synchyshena@gmail.com

Науковий керівник: **Грицак Анатолій Васильович** – кандидат технічних наук з IT та кібербезпеки Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, електронна пошта: grytsak.a.v@gmail.com

Synchyshena Oleksandra S. – Department of Information Systems Management and Security, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: synchyshena@gmail.com

Supervisor: **Hrytsak Anatoliy V.** – candidate of Technical Sciences in IT and Cybersecurity, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: grytsak.a.v@gmail.com