

УДК 681.51:004.89

DOI: 10.20998/2411-0558.2026.01.04

І. Л. КРАСНІКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",

К. С. ГАЛЛЯМОВ, асп., НТУ "ХПІ"

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ПОТОКОВОЇ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДАНИХ У ПРОМИСЛОВИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розглянуто обробку зростаючих обсягів технологічних даних у промислових системах автоматизації та обмеження традиційного архівування в базах даних із відкладеним аналізом з огляду на часові вимоги й навантаження на інфраструктуру. Узагальнено поняття потокової обробки та адаптовано їх до технологічних вимірювань і подій в АСУТП. Подано багаторівневу модель, що поєднує рівні джерел даних, SCADA і підсистеми збереження. На тестовому стенді показано зменшення інтенсивності запису в реляційну базу даних за збереження характерних змін сигналу та близьких статистичних показників затримки. Табл.:2. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: промислова автоматизація, технологічні дані, потокова обробка даних, SCADA, реальний час.

Вступ. Сучасні автоматизовані системи керування технологічними процесами характеризуються зростанням обсягів технологічних даних, що формуються датчиками, програмованими логічними контролерами та інтелектуальними виконавчими пристроями. У межах цифровізації промисловості та Industry 4.0 ці дані використовуються не лише для диспетчерського контролю, а й для оперативного аналізу режимів роботи обладнання, виявлення відхилень і підтримки прийняття рішень [1, 2]. Поширена архітектура обробки в АСУТП передбачає передавання вимірювань до SCADA із подальшим архівуванням у реляційних базах даних або спеціалізованих historian-сховищах, після чого аналітика часто виконується у відкладеному режимі через звіти та перегляд трендів. За умов «розумного виробництва» дані дедалі частіше виконують функцію зворотного зв'язку та координації виробничих ресурсів, що збільшує частоту надходження вимірювань і подій та підвищує вимоги до часу їх опрацювання [1]. Оглядові праці з промислового Industrial IoT показують, що масштабування збору й опрацювання даних є типовою практичною проблемою у виробничих системах [2]. Дослідження з аналітики великих

© Красніков І.Л., Галлямов К.С., 2026

ІоТ даних додатково вказують, що зі зростанням швидкості надходження даних складніше забезпечувати прийнятні затримки обробки та зростає навантаження на інфраструктуру збереження і передавання [9]. Відповідно актуалізується пошук таких архітектурних рішень, у яких збору, обробці та збереженню даних надається узгоджене місце в промисловому аналітичному середовищі та кіберфізичній інфраструктурі [8, 13].

Стан питання та напрями подальших досліджень.

Альтернативою пакетній обробці є потокова обробка даних (stream processing), за якої вимірювання та події розглядаються як безперервні потоки, а обчислення виконуються під час їх надходження. У сучасних оглядах узагальнено еволюцію систем потокової обробки та типові механізми, зокрема керування станом, роботу з подіями, що надходять із порушенням порядку, а також відмовостійкість [3]. Теоретичні засади подання потоків і безперервних запитів описані в класичних працях, де потоки трактуються як потенційно необмежені послідовності, а обчислення реагують на нові елементи потоку в міру їх появи [10]. Питання керування потоками даних, обмеженості ресурсів і компромісів між точністю результатів та обчислювальними можливостями систематизовано в роботі [11]. Окремий напрям становить обробка складних подій, орієнтована на виявлення подій за правилами й шаблонами у потоці [12]. Для промислових сенсорних даних показано, що доменні властивості вимірювань, зокрема шум, пропуски та специфіка часової інтерпретації подій, впливають на вибір режимів обробки й потребують адаптації загальних поточкових підходів до виробничих застосувань [4]. З позицій промислових інформаційних архітектур підкреслюється доцільність виконання частини перетворень до етапу довготривалого збереження, оскільки це дає змогу керувати інтенсивністю запису та зменшувати навантаження на підсистеми збереження і передавання [8, 13].

Паралельно розвиваються підходи, у межах яких частину обробки переносять ближче до джерел даних, тобто на периферію мережі (edge computing), а функції обробки розподіляють між рівнем безпосередньої взаємодії з обладнанням (edge), проміжним рівнем агрегації та попередньої обробки (fog) і централізованим рівнем збереження та аналітики (cloud). У відповідних оглядах зазначається, що такий розподіл

може зменшувати затримки передавання та мережеве навантаження, однак ускладнює узгодження поведінки компонентів і вибір місця виконання перетворень у межах промислової інфраструктури [6, 15]. Для промислової автоматизації визначальними є часові обмеження та передбачуваність роботи компонентів, тому в літературі розглядаються моделі реального часу для систем керування, зокрема підхід *weakly hard real-time*, що передбачає допустимість обмежених порушень часових обмежень у системах керування, а також підходи до оцінювання варіацій затримки (*jitter*) як характеристики нерівномірності часових затримок [16, 17]. Питання детермінованої передачі даних у промислових мережах і механізми *Time-Sensitive Networking (TSN)* систематизовано в оглядових роботах, у яких також розглядаються задачі планування та диспетчеризації трафіку [22, 23]. Додаткові обмеження формують вимоги кібербезпеки критичних інфраструктур, а потокові методи аналізу застосовують і для виявлення вторгнень та аномалій у промислових мережах [5, 7].

Окремо в літературі підкреслюється, що в умовах ІоТ зростає роль експериментальної оцінки часових характеристик програмної траси обробки та впливу нерівномірності затримок на якість роботи контурів керування. Паралельно огляди промислових протоколів і транспортних рішень для ІоТ фіксують, що вибір протоколу та спосіб інтеграції з рівнем SCADA і СУБД прямо впливають на досяжні затримки та стабільність передавання даних у практичних реалізаціях [21]. Це уточнює вимоги до побудови моделі потокової обробки в АСУТП і обґрунтовує необхідність подальшої формалізації часових характеристик та їх урахування під час розподілу функцій між рівнями системи.

Узагальнення наведених джерел дає підстави для такого висновку. Механізми потокової обробки та архітектурні підходи до розподілу функцій обробки в інфраструктурі описані достатньо повно, однак у прикладному вимірі промислової автоматизації потребують подальшого розвитку питання проектування обробки на рівні SCADA та суміжних компонентів з урахуванням допустимих значень затримки (*latency*) та варіацій затримки (*jitter*) для основних класів задач АСУТП. Окремим напрямом є методичне узгодження вибору потокових операторів і їх параметрів із показниками зменшення інтенсивності запису до бази даних та з вимогами до збереження технологічно значущих змін у сигналах. Саме ці напрями визначають підстави для подальшої постановки задачі та

формалізації моделі обробки технологічних даних у промислових системах автоматизації.

Постановка задачі. У роботі ставиться задача сформуванню узгоджену модель потокової обробки технологічних даних у межах архітектури АСУТП та визначити принципи розміщення і налаштування потокових операторів на рівні SCADA та суміжних компонентів так, щоб забезпечувати задані часові обмеження і водночас зменшувати інтенсивність запису до підсистем збереження.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є узагальнення та систематизація теоретичних засад потокової обробки технологічних даних у промислових системах автоматизації з урахуванням часових обмежень і практики зменшення інтенсивності запису до підсистем збереження. Для досягнення цієї мети уточнюються поняття потокової обробки в контексті технологічних вимірювань і подій АСУТП, визначаються типові класи задач потокової обробки, формується узагальнена багаторівнева модель обробки в ланцюгу "джерело–SCADA–збереження–споживач", формалізуються складові сумарної затримки та варіацій затримок уздовж траси обробки, а також демонструється ілюстративна доцільність підходу на тестовому стенді на прикладі зменшення інтенсивності запису за збереження характерних змін сигналу.

Теоретичні засади потокової обробки технологічних даних. Потоківі дані розглядають як потенційно необмежену в часі послідовність елементів, що надходять у систему обробки безперервно. На відміну від моделі реляційних баз даних, де запити виконуються над наперед накопиченими відношеннями, у системах потокових даних запити мають безперервний характер і реагують на нові елементи потоку в міру їх надходження [10]. У роботі [11] підкреслено проблеми керування потоками даних, зокрема обмеженість ресурсів і потребу узгоджувати точність результатів із доступними обчислювальними можливостями, що є суттєвим для безперервної обробки.

В автоматизованих системах керування потоки формуються технологічними вимірюваннями та подіями. Кожний елемент потоку містить часову мітку та значення параметра або тип події. Для промислових сенсорних даних характерні шум вимірювань і можливі

пропуски, що впливає на вибір методів попередньої обробки та на інтерпретацію результатів у режимі наближеному до реального часу [4]. Реальні потоки технологічних даних можуть надходити нерівномірно через варіації затримок передавання та внутрішньої обробки, що вимагає коректного трактування часової семантики подій у системі обробки [3]. Практика побудови промислових аналітичних середовищ показує доцільність виконання частини перетворень до етапу збереження, щоб зменшити навантаження на інфраструктуру і забезпечити керовану інтенсивність запису [8]. Саме тому обробка під час надходження може виконувати функції попереднього фільтрування, агрегування та виділення подій ще до запису в базу даних або використання даних на рівні SCADA.

Методичною основою потокової обробки є використання операторів перетворення потоків і механізмів вікон спостереження, які дають змогу виконувати агрегування над нескінченними потоками в обмеженому часовому або кількісному контексті [11]. Для технологічних даних часто застосовують часові вікна, що узгоджуються з фізичною природою процесів і регламентованими інтервалами контролю. До типових операцій потокової обробки в АСУТП належать фільтрація, перетворення вимірювань, агрегування у вікнах та виявлення подій. Підхід обробки складних подій розглядає їх формування на основі правил і часових та логічних взаємозв'язків між елементарними подіями [12]. У промислових мережах і критичних інфраструктурах потокові методи також застосовують для виявлення аномалій і підозрілих подій, що підкреслює практичну значущість подієвих механізмів у задачах моніторингу [5]. Узагальнення загроз і вимог кібербезпеки для критичних енергетичних систем додатково вказує на потребу своєчасного виявлення відхилень у промислових середовищах [7].

Сучасні праці з промислових інформаційних архітектур підкреслюють, що під час проєктування обробки даних у виробничих системах важливо враховувати не лише функціональні перетворення потоку, а й часові обмеження та передбачуваність роботи компонентів, зокрема в середовищі з підвищеними вимогами до надійності [6]. Це означає, що для технологічних даних необхідно узгоджувати вибір операторів і вікон не лише з задачами аналізу, а й з допустимими затримками, нерівномірністю надходження та обмеженнями інформаційної інфраструктури. З огляду на наведені положення під час

побудови моделі системи необхідно визначити, де саме формується потік, на якому рівні виконуються перетворення і виявлення подій, де здійснюється збереження та які часові характеристики мають забезпечуватися на кожному етапі.

Узагальнена модель системи потокової обробки в АСУТП.

Обробка технологічних даних у промислових системах автоматизації реалізується в межах багаторівневої архітектури, що охоплює рівні об'єкта керування, SCADA та систем збереження даних. У цій архітектурі потокова обробка виконує роль функціонального шару між збором і архівуванням інформації, забезпечуючи попереднє перетворення даних перед їх збереженням у корпоративних сховищах і системах аналітики, що узгоджується з підходами до побудови аналітичних середовищ у промислових кіберфізичних системах [8].

На рівні об'єкта та контролерів формуються первинні потоки вимірювань і подій, що можуть мати високу частоту надходження та обмежені ресурси обчислення. З огляду на обмеженість ресурсів і потребу швидкої реакції частину простих операцій доцільно виконувати поблизу джерела даних на контролерах, промислових комп'ютерах або локальних вузлах підприємства, що відповідає підходам до обчислень на периферії мережі [6]. Водночас основні оператори потокової обробки доцільно реалізовувати на рівні SCADA, де виконуються фільтрація, агрегування у часових вікнах і формування подій. У результаті зменшується інтенсивність передавання та запису даних до бази даних за збереження трендової складової, діапазону значень і характерних змін сигналу, які є технологічно значущими для диспетчерського контролю та подальшого аналізу [8]. Такий функціональний шар має працювати в межах допустимих затримок і варіацій затримок, оскільки часові характеристики визначають придатність обробки для задач моніторингу і сигналізації в АСУТП.

Рівень баз даних орієнтований на довготривале збереження та аналітику у відкладеному режимі. За наявності потокової обробки на попередніх рівнях до бази даних надходять узагальнені та відфільтровані дані, що зменшує навантаження на систему збереження і спрощує подальший аналіз у задачах виробничої аналітики [2]. Доцільність такого розподілу функцій обробки між рівнями інфраструктури узгоджується

також із підходами, де частина обчислень виконується на локальних вузлах підприємства для зменшення затримок і мережевого навантаження [6].

Формалізація потокової обробки в моделі "джерело-обробка-споживач". Подальшу формалізацію наведено для одного каналу технологічних даних, який подається як послідовність подій $x_i = (v_i, ts_i)$, де v_i є значенням параметра, а ts_i є часовою міткою джерела. Такий опис узгоджується з класичними підходами до подання потоків у системах поточкових даних, де елементи надходять у часі та обробляються інкрементно [10, 11]. Для опису часових властивостей траси обробки введено моменти часу:

t_0 – виникнення фізичної події на об'єкті;

t_1 – дискретизація та формування вимірювання;

t_2 – завершення локальної обробки поблизу джерела;

t_3 – завершення потокової обробки на рівні SCADA;

t_4 – фіксація результату в базі даних;

t_5 – момент використання даних прикладним модулем, зокрема керуванням, діагностикою або формуванням звітності.

Загальна затримка між появою події та її використанням визначається як: $L = t_5 - t_0$ і подається сумою складових

$$L = (t_1 - t_0) + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2) + (t_4 - t_3) + (t_5 - t_4) \quad (1)$$

Для задач реального часу коректність функціонування визначається не лише логічною правильністю результату, а й отриманням результату в межах допустимої затримки $L \leq L_{req}$, що узгоджується з підходами *weakly hard real-time* до формалізації допустимих порушень часових вимог у системах керування [16]. Окрім середнього значення затримки, критичною характеристикою є тремтіння як варіація затримки або інтервалів надходження подій. у роботах з оцінювання тремтіння для систем реального часу показано, що зростання варіацій затримок може погіршувати синхронізацію та впливати на якість керування [17]. Мережевий аспект обмеження затримок і тремтіння в промисловій автоматизації пов'язаний із детермінованими мережами, зокрема *Time-Sensitive Networking*, для яких узагальнено механізми забезпечення

часової передбачуваності [22], а також підходи до планування, що визначають практичні межі досяжних часових характеристик [23].

У потоковій системі обробка задається композицією операторів F_k , наприклад фільтрації, агрегування у вікнах і виявлення подій, що відповідає загальним принципам потокової обробки та обробки подій [10, 12]. Для кожного оператора F_k визначаються часові характеристики, зокрема середня затримка \overline{T}_k та максимальна затримка T_k^{max} . Аналогічні характеристики задаються для мережевих сегментів у вигляді затримки передавання та її варіації. У такому поданні вимоги задачі задаються як обмеження на затримку і тремтіння, а на рівні синтезу архітектури виникає задача розподілу операторів між рівнями так, щоб часові обмеження виконувалися з урахуванням ресурсних обмежень обчислень. Цей підхід узгоджується з архітектурними принципами edge computing в Industrial IoT, де частина обробки переноситься ближче до джерела для зменшення затримок і навантаження на магістральні канали [6], а також із підходами промислової аналітики даних, що передбачають узгоджене проектування збору, обробки та збереження [13]. Інтегровані моделі розподілу обчислень між fog і cloud компонентами також опираються на поняття часових бюджетів для окремих ланок траси обробки та класів задач [20].

У межах експериментального стенда оцінювалась інтегральна метрика $latency = ts_{ingest} - ts$, яка відповідає інтервалу від формування події на рівні SCADA до її фіксації в СУБД під час операції запису.

Ілюстративна апробація підходу. Для демонстрації практичної доцільності потокової обробки використано тестовий стенд на базі SCADA-платформи Ignition та реляційної СУБД MySQL. Джерелом даних є програмний емулятор технологічного сигналу з додаванням шумової складової та короткочасних відхилень. Усі компоненти стенда розгорнуто на одній фізичній машині з метою мінімізації мережевих затримок і відокремлення часових характеристик програмної траси обробки від впливу мережевої топології.

Апаратну платформу стенда становив персональний комп'ютер з процесором AMD Ryzen 7 5800X, 32 ГБ оперативної пам'яті DDR4, дисковою підсистемою M.2 SSD Samsung 980 PRO ємністю 512 ГБ та збудованим мережевим інтерфейсом 1 Гбіт/с. Програмне середовище

включало операційну систему Microsoft Windows 11 Pro 25H2, SCADA-систему Ignition версії 8.3.0 та СУБД MySQL версії 8.4.7.

Експериментальний стенд побудовано відповідно до узагальненої моделі "джерело–обробка–споживач", де джерело формує послідовність подій $x_i = (v_i, ts_i)$. Сигнал формувався програмно з періодом дискретизації 100 мс. Значення сигналу задавалось як сума гармонічної компоненти та малої високочастотної добавки:

$$v(t) = 50 + 10 \sin(0.2t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

де $\varepsilon(t) \in [0, 0.95]$ – детермінована мікродобавка, що імітує вплив перешкод вимірювання.

Часова мітка ts фіксувалась у момент генерації значення на шлюзі SCADA, а ts_{ingest} визначалася у момент запису події в СУБД MySQL.

Обробку реалізовано оператором `deadband` із порогом Δ , який виконує порогову фільтрацію сигналу: подія x_i передається далі за умови $|v_i - v_{last}| \geq \Delta$, де v_{last} є останнім переданим значенням. У проведених випробуваннях прийнято $\Delta=0.5$.

Споживачем виступала СУБД, яка приймала відібрані події та здійснювала їх збереження разом із ts_i і часовою міткою прийому ts_{ingest} . Взаємодію між шлюзом SCADA та СУБД MySQL реалізовано через стандартний стек TCP/IP за локального розміщення компонентів на одному фізичному вузлі, що дозволяє ізолювати програмну складову латентності від мережевого впливу. Затримку обробки та доставки події оцінювали інтегральною метрикою:

$$latency_i = ts_i^{ingest} - ts_i \quad (3)$$

де ts_i є часом формування події на шлюзі, а ts_i^{ingest} є часом її фіксації в базі даних під час виконання операції запису.

Мережевий внесок у $latency_i$ залежить від конкретної топології та в межах даної роботи окремо не декомпонувався; порівняння режимів потокової обробки виконувалося за однакових умов транспортного та програмного середовища.

У режимі прямого запису потоку, режим 0, за 5-хвилинне вікно отримано 2785 записів. Після застосування потокової фільтрації за

критерієм deadband, режим 1, кількість записів зменшилась до 747, що відповідає зниженню інтенсивності запису приблизно на 73.18 відсотка. Кількісне порівняння інтенсивності запису та часових показників операції запису для обох режимів наведено в табл. 1. Як видно з табл. 1, зменшення кількості записів супроводжується незначною зміною розподілу *latency*: середнє значення збільшується приблизно на 1.4 мс, а перцентилі p95 та p99 збільшуються приблизно на 2 мс.

Діапазон значень сигналу в обох режимах зберігається практично без змін, водночас у режимі deadband зростає середній модуль приросту між сусідніми відкликами, що відображає селекцію більших змін параметра після відсікання дрібних коливань. Порівняння мінімального та максимального значень сигналу, а також середнього модуля приросту $avg |\Delta value|$ для 5-хвилинного вікна наведено в табл. 2. Як видно з табл. 2, у режимі 1 середній модуль приросту збільшується приблизно у 2.3 раза, що свідчить про переважання у потоці технологічно значущих змін після фільтрації.

Таблиця 1
Порівняння часових показників і інтенсивності запису
(вікно 5 хв, $\Delta=0.5$)

Режим	0 (baseline)	1 (deadband)
п, записів/5хв	2785	747
Зменшення п, %	-	73.18
Середнє latency, мс	102.41	103.83
p50, мс	102	103
p95, мс	109	111
p99, мс	111	113
Максимальне latency, мс	315	318
Стандартне latency, мс	4.84	8.34

Таблиця 2.
Показники діапазону значень і змінності сигналу (вікно 5 хв)

Режим	$min(value)$	$max(value)$	$avg \Delta value $
0 (baseline)	40.00237	60.94574	0.3173
1 (deadband)	40.00294	60.94574	0.7242

Висновки. У статті узагальнено теоретичні засади потокової обробки технологічних даних у промислових системах автоматизації та подано узгоджену модель потокової обробки в багаторівневій архітектурі АСУТП з виділенням рівнів джерел, SCADA та збереження. Наведено формалізацію складових сумарної затримки та варіацій затримок уздовж траси "джерело – споживач", що дає змогу враховувати часові обмеження під час вибору місця виконання перетворень. Ілюстративна апробація на тестовому стенді показала, що потокова фільтрація типу deadband може істотно зменшувати інтенсивність запису до реляційної бази даних за незначної зміни статистичних показників затримки, що підтверджує доцільність застосування потокової обробки як проміжного функціонального шару між збором даних і їх довготривалим збереженням. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших експериментальних досліджень і розроблення практичних рекомендацій щодо налаштування поточкових операторів у промислових SCADA середовищах.

References.

1. Wang, S., Wan, J., Zhang, D., Li, D. and Zhang, C. (2016) "Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination", *Computer Networks*, Vol. 101, pp. 158-168.
2. Farooq, M.U., Riaz, S., Malik, I. et al. (2023) "A survey on the role of Industrial IoT in manufacturing for implementation of smart industry", *Sensors*, Vol. 23, Art. 6078.
3. Fragkoulis, M., Carbone, P., Kalavri, V. and Katsifodimos, A. (2024) "A survey on the evolution of stream processing systems", *The VLDB Journal*, Vol. 33, No. 2, pp. 507-541.
4. Kammerer, K., Pryss, R., Hoppenstedt, B., Sommer, K. and Reichert, M. (2020) "Process-driven and flow-based processing of industrial sensor data", *Sensors*, Vol. 20, No. 18, Art. 5245.
5. Butun, I., Almgren, M., Gulisano, V. and Papatriantafidou, M. (2020) "Intrusion detection in industrial networks via data streaming", in Butun, I. (Ed.), *Industrial IoT: Challenges, Design Principles, Applications, and Security*, Springer, Cham, Switzerland, pp. 213-238.
6. Qiu, T., Chi, J., Zhou, X., Ning, Z., Atiquzzaman, M. and Wu, D.O. (2020) "Edge computing in Industrial Internet of Things: architecture, advances and challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 22, No. 4, pp. 2462-2488.
7. Sun, C.-C., Hahn, A. and Liu, C.-C. (2018) "Cyber security of a power grid: a review", *Electric Power Systems Research*, Vol. 154, pp. 126-135.
8. Hinojosa-Palafox, E., Martinez-Flores, J.L., Garcia-Alcaraz, J.L., Sanchez-Ramirez, C. and Sanchez-Lizarraga, M. (2021) "An analytics environment architecture for industrial cyber-physical systems: big data solutions", *Sensors*, Vol. 21, Art. 3108.

9. Marjani, M., Nasaruddin, F., Gani, A., Karim, A., Hashem, I.A.T., Siddiqa, A. and Yaqoob, I. (2017) "Big IoT data analytics: architecture, opportunities and open research challenges", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 5247-5261.
10. Babcock, B., Babu, S., Datar, M., Motwani, R. and Widom, J. (2002) "Models and issues in data stream systems", *Proceedings of the 21st ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems (PODS 2002)*, ACM, New York, NY, USA, pp. 1-16.
11. Golab, L. and Ozsu, M.T. (2003) "Issues in data stream management", *ACM SIGMOD Record*, Vol. 32, No. 2, pp. 5-14.
12. Luckham, D. (2002) *The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise Systems*, Addison-Wesley Professional, Boston, MA, USA.
13. Santos, M.Y., Oliveira e Sa, J., Costa, C., Galvao, J., Andrade, C., Martinho, B., Lima, F.V. and Costa, E. (2017) "A big data analytics architecture for Industry 4.0", *World Conference on Information Systems and Technologies (WorldCIST)*, Springer, Cham, pp. 175-184.
14. Kumar, R. and Agrawal, N. (2023) "Analysis of multi-dimensional Industrial IoT (IIoT) data in edge-fog-cloud based architectural frameworks: a survey on current state and research challenges", *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 35, 100504.
15. Gkonis, P., Giannopoulos, A., Trakadas, P., Masip-Bruin, X. and D'Andria, F. (2023) "A survey on IoT-edge-cloud continuum systems: status, challenges, use cases and open issues", *Future Internet*, Vol. 15, No. 12, Art. 383.
16. Salamun, K., Pytel, K., Gierz, M. and Bujok, P. (2023) "Weakly hard real-time model for control systems: a survey", *Sensors*, Vol. 23, No. 10, Art. 4652.
17. Camps, M.L., Lluesma, M., Ripoll, I. and Crespo, A. (2006) "Jitter evaluation of real-time control systems", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 391-396.
18. Didic, A. (2015) *Real-Time Control in Industrial IoT*: Master's thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
19. Kuchuk, H., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ponochovnyi, Y. (2024) "Integration of IoT with cloud, fog and edge computing technologies: current state and challenges", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 5-19.
20. Munir, A., Kansakar, P. and Khan, S.U. (2017) "IFCIoT: integrated fog cloud IoT architectural paradigm for future Internet of Things", *Future Internet*, Vol. 9, No. 4, Art. 4.
21. Sarasola, T.F.D.B. et al. (2024) "IIoT protocols for edge/fog and cloud computing in industrial automation", *International Journal of Cloud Applications and Computing*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-23.
22. Zhang, T., Lu, C., Patt-Shamir, B. and Schmid, S. (2024) "Time-sensitive networking (TSN) for industrial automation", *ACM Computing Surveys*, Vol. 56, pp. 1-36.
23. Stuber, T., Steffens, A., Nayak, N. and German, R. (2023) "A survey of scheduling in time-sensitive networking (TSN)", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 25, pp. 1-28.

Статтю представив д-р технічних наук, професор НТУ "ХПІ" Качанов П.О.

Поступила (received) 15.01.2026

Стаття прийнята до друку 14.01.2026

Опублікована 27.02.2026

Krasnikov Igor, PhD, Associate Professor, "Kharkiv Polytechnic Institute",

Курпичова стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel: +38 (057) 70-76-687. E-mail: igor.krasnikov@khipi.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7663-1816>

Halliamov Kyrylo, PhD, "Kharkiv Polytechnic Institute",

Курпичова стр., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel: +38 (095) 56-97-535. E-mail: kyrylo.halliamov@infiz.khipi.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8762-4885>

УДК 681.51:004.89

Теоретичні засади потокової обробки технологічних даних у промислових системах автоматизації / Красніков І.Л., Галлямов К.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2026. – № 1 (15). – С. 69 – 82.

Розглянуто обробку зростаючих обсягів технологічних даних у промислових системах автоматизації та обмеження традиційного архівування в базах даних із відкладеним аналізом з огляду на часові вимоги й навантаження на інфраструктуру. Узагальнено поняття потокової обробки та адаптовано їх до технологічних вимірювань і подій в АСУТП. Подано багаторівневу модель, що поєднує рівні джерел даних, SCADA і підсистеми збереження. На тестовому стенді показано зменшення інтенсивності запису в реляційну базу даних за збереження характерних змін сигналу та близьких статистичних показників затримки. Табл.: 2. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: промислова автоматизація, технологічні дані, потокова обробка даних, SCADA, реальний час.

UDC 681.51:004.89

Theoretical Foundations of Streaming Processing of Technological Data in Industrial Automation Systems / Krasnikov I.L., Hallyamov K.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2026. – № 1 (15). – P. 69 – 82.

The processing of growing volumes of technological data in industrial automation systems, as well as the limitations of traditional archiving in databases with deferred analysis, are considered, taking into account time requirements and infrastructure load. The concepts of stream processing are generalized and adapted to technological measurements and events in automated control systems. A multi-level model is presented that combines data source levels, SCADA, and storage subsystems. A test bench demonstrates a reduction in the intensity of writing to a relational database while preserving characteristic signal changes and similar statistical delay indicators. Tabl.: 2. Refs.: 23 items.

Keywords: industrial automation, technological data, stream processing, SCADA, real time.