

Вибір та оптимізація уніфікованого протоколу передачі результатів вимірювань в інформаційно-вимірювальних системах з адаптивним налаштуванням

Проблематика створення інформаційно-вимірювальних систем з адаптивним налаштуванням методів передачі та обробки даних, зокрема вибір уніфікованого протоколу передачі даних, який може адаптуватися до різноманітних каналів передачі даних, є актуальною та розглядається у статті. Виконано аналіз існуючих протоколів передачі даних, від застарілих до сучасних, з акцентом на їх здатність забезпечувати ефективність та високий рівень інтегральної достовірності передачі вимірювальної інформації. Ці показники є критично важливими на етапі проектування комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем. Основна увага приділяється завданням, пов'язаним з оптимізацією роботи системи, таким як буферизація та збереження інформаційних повідомлень, прив'язка подій до міток часу та використання отриманих рішень в автономних системах.

Розглядається важливість вибору уніфікованого протоколу для забезпечення сумісності компонентів різних виробників у інформаційно-вимірювальній системі та забезпечення ефективного використання каналу зв'язку. Аналізуються сучасні промислові телемеханічні протоколи передачі даних, такі як Modbus, IEC 61850, та інші, з огляду на їх сумісність, ефективність, інтегральну достовірність, захист інформації, а також їх придатність до різних каналів передачі даних. Особлива увага приділяється проблемам, які виникають під час використання протоколів без використання TCP/IP як мережевої моделі передачі даних, та вразливостям, пов'язаним із використанням лише циклічного надлишкового коду (CRC) TCP/IP на різних етапах передачі даних. В контексті цих проблем розглянуто протокол IEC 870-5-104 як оптимальний вибір для інформаційно-вимірювальних систем з адаптивним налаштуванням, завдяки його здатності передавати різні типи даних з високою достовірністю та інтеграцією в промислові системи. Додатково обговорюються питання буферизації, збереження інформації, синхронізації часу та використання динамічної апертури для ефективнішої передачі даних. Запропоновано алгоритми синхронізації та оптимізації передачі даних, що можуть значно покращити ефективність.

Ключові слова: протокол IEC 870-5-104; уніфікований протокол передачі результатів вимірювань; синхронізація часу в протоколах передачі даних; буферизація в протоколах передачі даних.

Актуальність теми. Актуальність розвитку та застосування протоколів передачі даних у контексті передачі вимірювань параметрів технологічних процесів є значною для багатьох галузей промисловості. З огляду на високі вимоги до безпеки та якості виробництва, точний та своєчасний моніторинг параметрів виробничих процесів є ключовим для попередження витоків небезпечних речовин, аварій та нестандартних ситуацій у виробничих процесах.

Застосування сучасних комунікаційних протоколів у цьому контексті забезпечує надійний збір, передачу та обробку даних у реальному часі, що відіграє важливу роль у веденні обліку, оптимізації використання ресурсів та дотриманні нормативних вимог і стандартів якості. Це в свою чергу сприяє підвищенню ефективності, надійності та безпеки виробничих процесів. Розвиток протоколів передачі даних також стикається з викликами, пов'язаними з необхідністю адаптації до різноманітних каналів зв'язку та середовищ передачі даних. Тому акцент робиться на виборі уніфікованих та ефективних комунікаційних рішень, які можуть бути інтегровані у різноманітні інформаційно-вимірювальні системи без втрати продуктивності та з мінімальними затратами на впровадження та обслуговування.

Використання сучасних уніфікованих протоколів передачі даних дозволяє реалізувати комплексні автоматизовані системи моніторингу та управління, що сприяє оптимізації процесів вимірювання та контролю, забезпечуючи високу точність даних та можливість їх оперативного аналізу. Такий підхід відіграє вирішальну роль у підтриманні сталості виробничих процесів, гарантуючи високий рівень безпеки та якості продукції.

Сучасний етап створення та введення в роботу інформаційно-вимірювальних систем з адаптивним налаштуванням методів передачі та обробки даних характерний переходом до використання для інформаційних обмінів між контрольованими пунктами (КП) та пунктом керування (ПК) різних уніфікованих протоколів (далі – УП). Мета застосування УП – можливість синтезу єдиної системи з

компонентів різних виробників. Поряд з уніфікацією структури інформаційних повідомлень УП має забезпечити ефективність використання пропускну здатності наданого каналу зв'язку та високий рівень інтегральної достовірності інформації.

Очевидно, що поставлена мета може бути досягнута шляхом використання УП з урахуванням наявної структури КП та ПК. Однак на практиці використання УП не пов'язується із розробкою чи доопрацюванням інформаційно-вимірювальних систем, тобто, з процедурами оптимізації системи використання УП. Навпаки, УП підганяється під можливості системи, що вже існує, незалежно від того, наскільки оптимально він може бути в ній реалізований. В результаті УП фактично перетворюється на набір спеціалізованих протоколів, які підтримуються інформаційно-вимірювальними системами. Причому така «підтримка» потребує узгодження великої кількості параметрів для реалізації УП у конкретній системі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Питання вибору та застосування уніфікованого протоколу передачі даних розглянуто в стандартах [1–5]. Для безпосереднього обґрунтування вибору протоколів передачі даних вимірювальної інформації за допомогою TCP/IP-стеку використовувалися публікації [6–9]. В цих публікаціях висвітлено основні проблеми проходження повідомлень через мережеве обладнання. Поліпшення синхронізації ґрунтується на стандарті SNMP [6]. Аналіз питань захищеності протоколу IEC 870-5-104 наведено в [10]. Аспектами оптимізації протоколів також присвячена публікація [11]. Але всі ці рішення потребують доопрацювання і удосконалення саме для випадку проектування інформаційно-вимірювальних систем, в яких необхідно забезпечити швидку та достовірну передачу вимірювальної інформації про стан контрольованого об'єкта.

Метою статті є ґрунтовний аналіз протоколів передачі даних в інформаційно-вимірювальних системах та вибір оптимального уніфікованого протоколу, який задовольняє типові критерії їх вибору під час проектування інформаційно-вимірювальних систем.

Вибір універсального протоколу

Вибір УП для інформаційно-вимірювальної системи на етапі створення є важливим аспектом для розширення та підтримки системи у майбутньому. Існує безліч протоколів передачі даних від застарілих, але ще актуальних, таких як Modbus, до сучасних складних протоколів, як IEC 61850, Protobuf. Розглянемо сучасні промислові телемеханічні протоколи передачі даних за встановленими критеріями.

Інформаційно-вимірювальні системи можуть використовувати широкий спектр різноманітних каналів для передачі даних (таких як виділена пара, ВЧ канали, радіоканал, GPRS, 3G, 4G, оптоволоконо) на різних ділянках шляху, тому всі протоколи що не використовують TCP/IP, як мережеву модель передачі даних не можуть забезпечити сумісність на всіх етапах проходження пакета інформації без перетворень, та порушують головну вимогу УП: інтегральну достовірність доставленої інформації від КП до ПК. Досягти високої достовірності інформації можливо за умови, що повідомлення сформоване на КП не буде перетворене чи спотворене під час проходження шляху, і ПК зможе ідентифікувати, що інформація є первинною і не була змінена будь-яким обладнанням чи перешкодою в каналі.

Також протоколи, які використовують тільки CRC (циклічний надлишковий код) протоколу TCP/IP, можуть бути вразливими на деяких етапах проходження пакетів:

- NAT (перетворення мережевих адрес): пристрої, що виконують NAT, модифікують IP-пакет, включаючи IP-адресу в IP-заголовку та потенційно номери портів у заголовках TCP. Оскільки ця модифікація змінює вміст пакета, пристрій має перерахувати CRC TCP;
- балансувальники навантаження та проксі: ці пристрої можуть модифікувати TCP-заголовки, вимагаючи перерахунку CRC TCP для забезпечення цілісності модифікованого пакета;
- VPN: коли пакети вставляються в нові IP-пакети для передачі через VPN, зовнішній пакет матиме власну CRC. Однак внутрішній пакет у деяких випадках може бути теж змінений;
- проксі для покращення продуктивності (PEPs): у деяких мережах, особливо в супутникових комунікаціях, використовуються PEPs для покращення продуктивності TCP через зв'язки з великою затримкою. Ці пристрої можуть налаштувати розміри вікна TCP або виконувати інші оптимізації, що вимагають перерахунку CRC TCP.

Для сучасних інформаційно-вимірювальних систем з адаптивним налаштуванням методів передачі та обробки даних найбільш вдалим вибором є протокол IEC 870-5-104 (табл. 1). Цей протокол може передавати широкий спектр різних типів даних з астрономічною міткою часу, має високу інтегральну достовірність та широко відомий у промисловості.

Стандарт IEC 870-5-104 описує структури, захист і способи передачі даних, але для забезпечення оптимальної роботи інформаційно-вимірювальних систем з різними каналами зв'язку та різним типом автономності КП мають бути розв'язані проблеми:

- буферизації та збереження інформаційних повідомлень, за відсутності каналу зв'язку чи створенні черг;
- прив'язки подій до міток часу з високою точністю без застосування GPS на КП. При передачі пакети в ІС можуть бути затримані на КП, вузлах шляху чи навіть на ПК, найбільш ефективним є

використання структур з астрономічною міткою часу, хоча це збільшує розмір повідомлень, але надасть точну інформацію, коли виникла та чи інша подія;

- використання в автономних системах з низькою частотою передачі повідомлень чи сесій зв'язку.

Алгоритм синхронізації

Формування всіх компонентів інформаційного повідомлення КП від джерела інформації передбачає реалізацію прив'язки подій до міток часу, тому синхронізація з ПК є однією з головних у передачі достовірної та актуальної інформації.

Таблиця 1

Протоколи передачі вимірювальної інформації в інформаційно-вимірювальних системах з адаптивним налаштуванням методів передачі та обробки даних

Характеристики протоколу передачі вимірювальної інформації	Протокол передачі вимірювальної інформації в інформаційно-вимірювальній системі					
	Modbus RTU	Modbus TCP	IEC 870-5-101	IEC 870-5-104	DNP3	IEC 61850
1. Існує як стандарт	Фактично		Так	Так	Так	Так
2. Інтерфейси передачі даних	RS232 RS485	TCP/IP	RS232 RS485	TCP/IP	RS232 RS485 TCP/IP	TCP/IP
3. Вид обміну повідомленнями	Циклічне опитування		Циклічне, спорадичне			
4. Типи інформаційних повідомлень	1 бітові дискретні сигнали, 16 бітові числа, інші формати є рішенням виробника і не передбачені стандартом		1, 2 бітові дискретні сигнали, 16 бітові і 32 бітові цілі числа, число з плаваючою комою 32 біта		1, 2 бітові дискретні сигнали, 16 бітові і 32 бітові цілі числа, число з плаваючою комою 32 і 64 біта	
5. Синхронізація і мітки часу	Ні		Астрономічні мітки часу			
6. Буферизація інформації	Ні		Не визначена стандартом, але може бути реалізована виробником		Так	Так
7. Поширеність протоколу	Більшість пристроїв та систем можуть працювати в цьому протоколі		Більшість пристроїв та систем можуть працювати в цьому протоколі, більшість промислових організацій в Україні вимагають цей протокол як основний		Протокол не набув популярності в Україні та Європі, в основному в Північній Америці	Досить новий протокол, багато систем його не підтримують, в основному використовується в енергетиці
8. Захист інформації	CRC	CRC протоколу TCP/IP	Контрольна сума	Власний CRC та CRC протоколу TCP/IP	Власний CRC та CRC протоколу TCP/IP	CRC протоколу TCP/IP

Протокол IEC 60870-5-104 має свій алгоритм синхронізації, який складається з двох етапів:

- ПК відправляє команду синхронізації часу КП з актуальним астрономічним часом;
- КП відправляє відповідь ПК з астрономічним часом після синхронізації, як правило, з часом, отриманим від ПК, але через затримки синхронізації на КП цей час може бути більшим.

Недолік такої синхронізації є непрогнозований час у різних каналах передачі даних, наприклад, в локальній мережі такий час може становити декілька мілісекунд, а для GPRS/3G – до 500 мілісекунд.

Одним з рішень є відмова від вбудованої синхронізації та використання протоколів NTP/SNTP, які можуть дати досить високу точність за рахунок збільшення кількості повідомлень синхронізації. Ця синхронізація проходить у декілька етапів:

- запит часу. Клієнт ініціює процес, надсилаючи запит до SNTP-сервера. Цей запит містить часову мітку відправлення запиту (T1) і нульові значення для інших міток часу;

- відповідь сервера. Коли SNTP-сервер отримує запит від клієнта, він зберігає часову мітку приймання (T2) і негайно відсилає пакет відповіді, зберігаючи часову мітку відправлення (T3). Сервер передає пакет відповіді клієнту, який містить всі часові мітки (T1, T2, і T3);

- обчислення затримки. Коли клієнт отримує пакет відповіді, він фіксує часову мітку приймання (T4). Використовуючи чотири часові мітки (T1, T2, T3, і T4), клієнт може обчислити затримку та зміщення часу. Клієнт використовує розраховані значення для корекції свого локального годинника;

- синхронізація годинника. Клієнт використовує зміщення для налаштування свого локального годинника та уточнення часу. Процес може повторюватися з певною періодичністю для утримання точності локального годинника.

Синхронізація відбувається до заданої точності. Під час проведення тестів в «польових» умовах в мережі GPRS/3G з заданою точністю 10 мілісекунд синхронізація могла проходити багато разів без досягнення бажаного результату, це обумовлено нестабільністю часу доставлення повідомлення і відповіді.

Після аналізу для підвищення точності було запропоновано проводити синхронізацію КП не по одній сесії синхронізації, а по X з Y, де Y – кількість сесій, а X – сесій, що задовольняють точність. Запропонований алгоритм кожного разу зберігає таймери, затримки та зміщення часу, і коли він отримує X результатів з Y, обчисливши середню затримку, проводить корекцію таймера КП. Це дозволило детермінувати кількість сесій і істотно знизити ймовірність відмов синхронізації та підвищити точність. Згідно з «польовими» дослідженнями оптимальна схема є 3 з 5.

Апертура і спорадична передача даних

Введення апертури (порога чутливості) у контексті вимірювань у налаштуваннях КП має ключове значення для ефективності передачі даних. Апертура визначає мінімальну різницю між поточним і попереднім вимірами, яка вважається значущою для передачі нового повідомлення. Цей механізм дозволяє перейти від циклічної передачі даних, коли повідомлення відсилаються за заздалегідь встановленим графіком, до спорадичної, заснованої на реальній потребі в оновленні інформації. Такий підхід значно зменшує навантаження на канали зв'язку та зберігає ресурси системи, оскільки дані передаються лише тоді, коли відбуваються значущі зміни.

Розмір апертури залежить від кількох факторів:

- очікувана точність вимірювань. Висока точність вимагає меншої апертури, оскільки навіть мінімальні зміни можуть бути важливими для загальної роботи системи;
- характеристики каналів зв'язку. Обмежені або перенавантажені канали можуть потребувати більшої апертури, щоб зменшити кількість передач;
- контроль інтенсивності передачі повідомлень. Управління потоком даних для запобігання перевантаження системи комунікацій.

Стандарт IEC 60870-5-104, який часто застосовується в промислових та інфраструктурних об'єктах для передачі телеметричної інформації, оригінально не передбачає механізму налаштування апертури для вимірів. Це створює обмеження для оптимізації передачі даних, особливо в умовах змінних навантажень на мережу або динамічних змін у процесах, які моніторяться.

Пропозиція введення динамічної апертури полягає у зміні порогу чутливості залежно від актуального стану системи передачі даних. Наприклад, при великій кількості повідомлень у черзі апертуру можна збільшити, щоб зменшити кількість переданих повідомлень, звільняючи тим самим пропускну здатність каналу. Навпаки, при низькому навантаженні апертуру можна зменшити для підвищення точності вимірювань та актуальності даних у системі.

Цей підхід дозволяє досягти гнучкого балансу між потребою в точності даних та необхідністю збереження ресурсів мережі та обчислювальних потужностей, автоматично адаптуючись до змін умов без значних втрат у точності вимірювань. Така модель може бути вкрай корисною для систем, де умови роботи швидко змінюються або де є велика різноманітність процесів, що вимагають моніторингу.

Буферизації та збереження інформаційних повідомлень

Виклик збереження повідомлень у контексті використання протоколу IEC 60870-5-104 відкриває важливе питання управління даними в автоматизованих системах контролю та збору даних (АСКД). Оскільки стандарт не надає чітких рекомендацій щодо процедур збереження повідомлень, це може призвести до втрати критично важливої інформації, особливо під час перебоїв у зв'язку. Це особливо критично для інформації про аварійні ситуації або зміни станів датчиків, коли зв'язок з контролюючим обладнанням втрачено.

Для вирішення цієї проблеми пропонується створення розділених буферів для різних типів повідомлень, що дозволить не тільки ефективніше використовувати обмежені ресурси пам'яті ПК, але й забезпечити пріоритетизацію обробки і відновлення критичних даних.

Пріоритети інформації та виділені буфери

Аварійні сигнали. Мають найвищий пріоритет через їхню критичну важливість для безпеки та стабільності роботи системи. Для них створюється окремий буфер, що забезпечує миттєве збереження та відновлення даних при відновленні зв'язку.

Телемеханічні сигнали (ТС). Володіють середнім пріоритетом і слугують для контролю станів об'єктів управління. Для ТС також варто виокремити окремий буфер, оптимізований під часті зміни стану.

Вимірювання. Мають найнижчий пріоритет і можуть зберігатися в буфері, оптимізованому для великого обсягу даних. Важливо, що для вимірювань можуть використовуватися різні стратегії збереження, що оптимізують використання пам'яті та пропускну здатність під час передачі.

Стратегії збереження даних для результатів вимірювань

Динамічна апертура. Адаптація порога чутливості до змін, що дозволяє зменшити кількість збережених та переданих повідомлень, фокусуючись лише на значущих змінах.

Збільшення часу між вимірюваннями. Зменшення частоти збору даних для менш критичних вимірювань може допомогти зберегти пам'ять та знизити навантаження на мережу.

Знаходження лише мінімальних і максимальних екстремумів. Ця стратегія дозволяє зберігати лише найважливіші дані про екстремальні значення, ігноруючи менш важливі коливання.

Ці підходи до збереження даних дозволяють не тільки оптимізувати використання ресурсів системи, але й забезпечують те, що критична інформація не буде втрачена навіть у випадку відсутності зв'язку чи інших збоїв у системі.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведено аналіз роботи інтерфейсів передачі даних та сформульовано пропозиції з удосконалення роботи контрольованого пункту. Застосування протоколу IEC 60870-5-104 для передачі вимірювальної інформації вказує на його значний потенціал для підвищення ефективності та точності інформаційно-вимірювальних систем. Використання динамічної апертури, розділених буферів для різних типів даних та інших оптимізаційних стратегій сприяє зменшенню навантаження на мережеву інфраструктуру, підвищенню надійності передачі критично важливої вимірювальної інформації та загалом поліпшенню управління передачею та зберіганням результатів вимірювань.

References:

1. IEC 60870-5-101 Transmission Protocols – Companion standards especially for basic telecontrol tasks, (2003).
2. IEC 60870-5-104 Transmission Protocols – Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles, (2016).
3. The Modbus Organization (2012), *MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION v1.3*.
4. IEEE Standard for Electric Power Systems Communications-Distributed Network Protocol (DNP3), (2012).
5. IEC TR 61850-90-2:2016 Using IEC 61850 for communication between substations and control centers, (2016).
6. RFC 4330 Simple Network Time Protocol (SNTP) (2006), Version 4.
7. Network Protocols Handbook (2005), 2 ed., Retrieved 2014, Javvin Technologies Inc., 27 p.
8. Frankel, S., Hoffman, P., Orebaugh, A. and Park, R. (2008), *Guide to SSL VPNs, Recommendations of the National Institute of Standards and Technology*, Special Publication 800-113.
9. Wing, D. (2010), «Network Address Translation: Extending the Internet Address Space», *IEEE Internet Computing*, Vol. 14, Issue 4, pp. 66–70, doi: 10.1109/MIC.2010.96.
10. Yang, Y., McLaughlin, K., Littler, T. et al. (2013), «Intrusion Detection System for IEC 60870-5-104 Based SCADA Networks», *IEEE Power and Energy Society (PES) General Meeting*, [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/259802840_Intrusion_Detection_System_for_IEC_60870-5-104_based_SCADA_networks
11. Portnov, Ye.M. and Ishchenko, O.S. (2006), «Systemotekhnika suchasnykh informatsiino keruiuchykh kompleksiv», *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, No. 1.

Подчашинський Юрій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-8344-6061>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання;
- інформаційні системи та технології.

Ищенко Олександр Сергійович – аспірант кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0009-0003-8626-8656>.

Наукові інтереси:

- комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи;
- цифрова обробка сигналів і відеозображень;
- метрологія, засоби вимірювання.

Podchashynskiy Yu.O., Ishchenko O.S.

**Selection and optimization of a unified protocol for transmitting measurement results
in information and measurement systems with adaptive settings**

The problem of creating information and measurement systems, systems with adaptive adjustment of data transmission and processing methods, in particular the choice of a unified data transmission protocol that can adapt to various data transmission channels, is relevant and is considered in this article. An analysis of existing data transfer protocols, from outdated to modern ones, was performed, with an emphasis on their ability to ensure efficiency and a high level of integral reliability of measurement information transfer. These indicators are critically important at the design stage of computerized information and measurement systems. The main attention is paid to the tasks related to the optimization of the system, such as buffering and saving of information messages, binding of events to time stamps and use of the obtained solutions in autonomous systems.

The importance of choosing a unified protocol to ensure the compatibility of components of different manufacturers in the information and measurement system and to ensure the effective use of the communication channel is considered. Modern industrial telemechanical data transmission protocols, such as Modbus, IEC 61850, and others, are analyzed for their compatibility, efficiency, integral reliability, information protection, and their suitability for various data transmission channels. Particular attention is paid to the problems that arise when using protocols without using TCP/IP as a carrier protocol, and the vulnerabilities associated with using only the Cyclic Redundancy Code (CRC) of TCP/IP at various stages of data transfer. In the context of these problems, the IEC 870-5-104 protocol is considered as the optimal choice for information and measurement systems with adaptive configuration, due to its ability to transmit different types of data with high reliability and integration into industrial systems. Additionally, issues of buffering, information storage, time synchronization, and the use of dynamic aperture for more efficient data transmission are discussed. Algorithms for synchronization and optimization of data transfer are proposed, which can significantly improve efficiency.

Keywords: protocol IEC 870-5-104; unified protocol for transmission of measurement results; time synchronization in data transfer protocols, buffering in data transfer protocols.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2024.