

О.О. ДМИТРЕНКО

ПРОТОКОЛИ ПАРАЛЕЛЬНОГО PRP ТА БЕЗПЕРЕРВНОГО HSR РЕЗЕРВУВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ МЕРЕЖ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЙ

В електричних мережах України функціонують автоматизовані системи керування технологічними процесами різних поколінь. Однією із вимог є забезпечення надійності, яка, значною мірою, забезпечується резервуванням обладнання, у тому числі і обладнання локальної мережі. Всі існуючі та перспективні покоління автоматизованих систем керування використовують та будуть використовувати в якості елементів нижнього (польового) рівня мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики, реєстратори аварійних процесів, синхронізатори часу, цифрові блоки входів-виходів, RTU. Інформаційні зв'язки між ними та обладнанням вищого рівня системи забезпечується обладнанням локальної мережі. Перші покоління таких систем керування, аналогові, існують вже більше 30 років. Такі системи не мали протоколу обміну інформацією IEC 61850, відповідно використовували існуючі в той час протоколи резервування STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring з ненульовим часом переконфігурування або могли працювати без жодного протоколу резервування. Вимоги щодо надійності з сучасної точки зору таких локальних мереж вже недостатні. З появою протоколу обміну інформацією IEC 61850 в проваджено автоматизовані системи керування другого покоління, до локальних мереж яких висуваються підвищені вимоги щодо надійності роботи локальних мереж, у тому числі і до резервування. Для таких систем керування будь-які затримки часу при переконфігуруванні мережі у випадку її несправності недопустимі. Тобто, недопустимо використовувати протоколи резервування STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring як в станційній шині, так і в шині процесу. Протокол IEC 61850 рекомендує використовувати протоколи з нульовим часом відновлення мережі – HSR або PRP. Завдання статті - провести порівняльний аналіз обох протоколів з нульовим часом відновлення мережі, визначити їх переваги та недоліки на сучасному етапі і на перспективу. Результати аналізу показали, що протокол резервування PRP однозначно рекомендується для використання в мережах автоматизованих систем керування електричних підстанцій 220-750 кВ. Може використовуватись в АСК ТП розподільних мереж до 110 кВ включно. А от для невеликих розподільних підстанцій до 110 кВ включно локальна мережа HSR може бути значно дешевша при достатній надійності, причому за рахунок невеликої кількості кінцевих пристроїв більшість недоліків HSR нівелюються.

Ключові слова: автоматизовані системи керування технологічними процесами електричної підстанції, релейний захист, цифрова підстанція, мікропроцесорний пристрій релейного захисту та автоматики, протоколи резервування.

О.О. ДМИТРЕНКО

PROTOCOLS OF PARALLEL REDUNDANCY PRP AND HIGH-AVAILABILITY REDUNDANCY HSR RESERVATION OF LOCAL NETWORKS OF AUTOMATED SYSTEMS OF CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF ELECTRIC SUBSTATIONS

In the electrical networks of Ukraine, automated control systems of technological processes of different generations operate. One of the requirements is to ensure reliability, which, to a large extent, is provided by the redundancy of equipment, including the equipment of the local network. All existing and promising generations of automated control systems use and will use as elements of the lower (field) level microprocessor devices of relay protection and automation, recorders of emergency processes, time synchronizers, digital input-output blocks, RTU. Information connections between them and the equipment of the higher level of the system are provided by the equipment of the local network. The first generations of such control systems, analog, have existed for more than 30 years. Such systems did not have the IEC 61850 information exchange protocol, respectively, they used the existing STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring redundancy protocols with non-zero reconfiguration time or could operate without any redundancy protocol. Reliability requirements from the modern point of view of such local networks are no longer sufficient. With the advent of the IEC 61850 information exchange protocol, second-generation automated control systems were introduced, the local networks of which are subject to increased requirements for the reliability of local networks, including redundancy. For such control systems, any time delays during network reconfiguration in the event of a failure are unacceptable. That is, it is unacceptable to use the STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring redundancy protocols both in the station bus and in the process bus. The IEC 61850 protocol recommends using protocols with zero network recovery time - HSR or PRP. The task of the article is to conduct a comparative analysis of both protocols with zero network recovery time, to determine their advantages and disadvantages at the current stage and in the future. The results of the analysis showed that the PRP redundancy protocol is clearly recommended for use in networks of automated control systems of electrical substations 220-750 kV. It can be used in ACS TP distribution networks up to 110 kV inclusive. But for small distribution substations up to 110 kV inclusive, the HSR local network can be much cheaper with sufficient reliability, and due to the small number of end devices, most of the disadvantages of HSR are eliminated.

Keywords: automated control systems of technological processes of an electrical substation, relay protection, digital substation, microprocessor device of relay protection and automation, redundancy protocols.

Вступ. В електричних мережах України функціонують автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП) різних поколінь. Перші з них побудовані більше 30 років тому. За цей час з'явилися нові стандарти по обміну інформацією, дистанційному керуванню комутаційним обладнанням, резервуванню в локальних мережах, значно зросла продуктивність мікропроцесорного обладнання, яке входить до складу системи. Відповідно, змінилися і вимоги до побудови та функцій як АСК ТП в цілому, так і до окремих її складових. Однією із вимог є забезпечення надійності, яка, значною мірою, забезпечується резервуванням обладнання АСК ТП, у т.ч. і обладнання

локальної мережі.

АСК ТП першого покоління (аналогові) вводились в експлуатацію протягом останніх 10 – 30 років та використовують мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики (МП РЗА), цифрові мультиметри, реєстратори аварійних процесів (РАП), цифрові блоки входів-виходів, RTU без протоколу обміну інформацією IEC 61850 або цей протокол використовується частково і дуже обмежено.

МП РЗА, мультиметри, блоки входів-виходів того часу – повністю автономні пристрої, отримували аналогову (від традиційних трансформаторів струму та напруги) та дискретну інформацію (від блок-контактів

© О.О. Дмитренко, 2026

комутаційних апаратів та інших пристроїв) по довгих мідних кабелях. Дистанційне керування комутаційними апаратами здійснювалось від цих же пристроїв по такій же кабельній мережі. Надійність функції керування підстанційним обладнанням забезпечувалась дублюванням ланцюгів керування. Часто застосовувалось резервування шляхом використання основної та резервної АСК ТП [1-3], кожна з яких використовувала власну оптично-кабельну мережу, комутатори та ін. Виконання функцій релейного захисту та автоматики МП РЗА абсолютно не залежало від працездатності локальної мережі, яка використовувалась існуючі в той час протоколи резервування STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring або могла працювати без жодного протоколу резервування [4].

АСК ТП другого покоління (цифрові без шини процесу) вводились в експлуатацію протягом останніх 10 років та використовують МП РЗА, цифрові мультиметри, реєстратори аварійних процесів (РАП), синхронізатори, цифрові блоки входів-виходів, які підтримують протокол обміну інформацією IEC 61850, але не мають шини процесу. Тобто, аналогова інформація (з традиційних трансформаторів струму та напруги) вводиться в пристрої по тих же довгих мідних кабелях. Так же виконується керування комутаційними апаратами. А от дискретна інформація між пристроями передається вже по станційній шині в цифровому вигляді. З'явилися цифрові блоки керування вимикачами, які містять всі бланки перемикачів, реалізують блокування та формують команди керування за допомогою GOOSE. Виконання функцій релейного захисту та автоматики МП РЗА також не залежить від працездатності локальної мережі, за винятком тих випадків, де в алгоритмі захисту присутня дискретна інформація від зовнішнього пристрою. А от для функції керування будь-які затримки часу на переконфігурування мережі у випадку якоїсь одиночної несправності за протоколами резервування STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring будуть критичними [4]. За час простою мережі цілком можлива втрата GOOSE, що може привести до невиконання комутаційної операції або навпаки, втрата команди блокування може привести до неправильного включення з подальшим аварійним режимом.

АСК ТП другого покоління (цифрові з шиною процесу). Новітній підхід. В Україні – поодинокі випадки впровадження. Відрізняється від попереднього варіанту тим, що процеси вимірювання, отримання дискретної інформації про стан комутаційного обладнання, відправлення команд керування цим обладнанням територіально переноситься на відкритий розподільний пристрій (ВРП). На ВРП застосовуються новітні перетворювачі аналогових сигналів (оптичні трансформатори, катушки Роговського) з цифровими виходами або перетворювачі аналогових сигналів напруги та струму від традиційних вимірювальних трансформаторів у цифрові дані (merging unit (MU)), локальні цифрові блоки входів-виходів. Отримані «відліки» або цифрові коди миттєвих значень (SV, sample value) передаються в МП РЗА, РАП, цифрові мультиметри по ще одній локальній мережі – шині процесу. Втрата інформації в результаті занадто тривалого

переконфігурування цієї мережі може привести до втрати спрацювання високошвидкісних захистів із подальшим відключенням пошкодженого обладнання з витримкою часу після відновлення мережі. Що, в деяких випадках, може привести до виходу з ладу, наприклад, дорогого силового трансформатора або генератора. Тому вимоги до протоколу резервування переносяться і на шини процесу.

Для обох варіантів АСК ТП другого покоління будь-які затримки часу при переконфігуруванні мережі у випадку її несправності недопустимі. Тобто, недопустимо використовувати протоколи резервування STP, RSTP, MRP, G.8032, ERPS, Turbo Ring як в станційній шині, так і в шині процесу. Рекомендовано використовувати протокол з нульовим часом відновлення мережі – HSR або PRP.

Головною метою роботи є - проведення порівняльного аналізу обох протоколів з нульовим часом відновлення мережі, визначити їх переваги та недоліки на сучасному етапі і на найближче майбутнє. Визначити перспективи використання протоколів резервування HSR та PRP в АСК ТП електричних підстанцій України.

Протоколи резервування з ненульовим часом відновлення. Для забезпечення надійності функціонування АСК ТП необхідно забезпечити надійність функціонування її локальної мережі/мереж, що передбачає не тільки резервування мережевого обладнання, а й каналів зв'язку – маршрутів проходження сигналу між кінцевими пристроями. Це суперечить вимозі стандартного Ethernet – відсутність замкнених контурів в мережі, де можуть зациклюватись пакети даних з подальшим різким наростанням трафіку, перевантаженням мережі з наступним її колапсом. Стандартна технологія передбачає підключення до єдиного мережевого комутатора (МК) в системі передачі даних АСК ТП ділянки з, наприклад, кінцевими пристроями МП РЗА. Вихід з ладу цього МК або його основного мережевого кабелю приводить до втрати в системі функції моніторингу та керування частини електричної підстанції. Якщо ж цей МК дубльований іншим, то вихід з ладу першого не приведе до втрати функціональності системи. Тому для промислового використання Ethernet, у т.ч. і для мереж АСК ТП електричних підстанцій були розроблені спеціальні протоколи резервування, які узгоджують протиріччя між стандартними протоколами Ethernet та резервними каналами передачі даних. Задача протоколів резервування – це моніторинг дубльованих каналів зв'язку з метою недопущення колізій та перерозподілу трафіку в аварійних ситуаціях. Протокол резервування повинен гарантувати логічне існування лише одного шляху доставки повідомлення в конкретний момент часу за фізичної наявності кількох. З існуючих фізичних каналів зв'язку один вибирається основним, інші чекають у резерві [4].

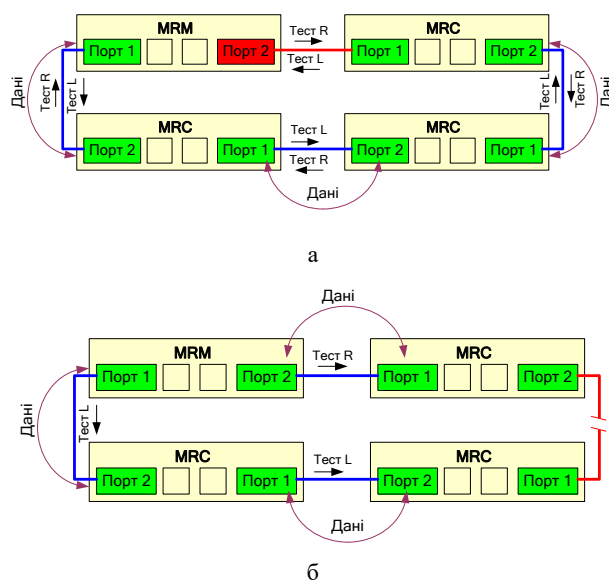
STP (Spanning Tree Protocol). Перший протокол резервування, розроблений у 1990 р. інститутом IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) та викладений у стандарті 802.1D. Даний протокол передбачає постійний моніторинг стану каналів зв'язку. При появі обриву в структурі мережі пренаправляється

трафік з пошкодженого каналу зв'язку на резервний. Тобто, потрібний час на ряд послідовних дій: виявлення факту обриву, пошук альтернативного обхідного маршруту, деактивації пошкодженого каналу, активації нового каналу. В залежності від топології мережі, час відновлення процесу передачі інформації може бути різним, але стандартно складає від кількох до десятків секунд. STP в подальші роки зазнав деяких змін, на його основі розроблено ряд інших протоколів резервування, найбільше поширення з яких здобув RSTP.

RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol). Розроблено у 2004 р. та описано у стандарті IEEE 802.1D-2004. Протокол базується на тому, що з усієї різноманітності топологій даної локальної мережі будується логічне дерево з'єднань. Активне дерево з'єднань передбачає, що у будь-який момент часу між будь-якими вузлами мережі існує тільки один лінійний маршрут передачі даних. Всі інші альтернативні маршрути блокуються на МК шляхом програмних блокувань певних портів. Принцип організації наступний - обирається кореневий комутатор (root switch), потім кожен комутатор, що бере участь у побудові дерева, шукає найкоротший маршрут (з урахуванням пропускнуої спроможності каналу) до кореневого комутатора через сусідні комутатори (або безпосередньо). Лінії, які не потрапили в маршрут, переводяться в режим очікування і не використовуються для передачі даних, поки працюють основні лінії. У разі виходу з ладу основних ліній, лінії, що знаходяться в резерві, використовуються для побудови альтернативної топології, після чого одна з ліній стає активною, а решта продовжують перебувати в режимі очікування. Логічне дерево базується на BPDU (мости з'єднання, Bridge Protocol Data Units), які будуються від кореневого комутатора по схемі «зірка». Будь яка зміна в структурі BPDU приводить до розсилки спеціального BPDU-кадру по вузлах мережі, після чого активуються резервні маршрути для трафіку. Всі комутатори в мережі утримують у своїй пам'яті активну карту дерева і у випадку зміни кожний з них може генерувати BPDU-кадр. В залежності від топології мережі, час відновлення процесу передачі інформації може бути різним, але стандартно складає від 100 мс до кількох секунд. Протокол RSTP в наш є найбільш поширеним, причому може використовуватись і в кільцевих мережах. При цьому кільця програмно розриваються, утворюючи ту ж саму деревовидну структуру.

MRP (Media Redundancy Protocol). Розроблено у 2010 р. та описано у стандарті IEC 62439-2. MRP підтримує лише кільцеву топологію мережі з кількістю МК не більше 50, гарантуючи заздалегідь певний час відновлення зв'язку у разі виникнення збою. Один з МК бере на себе роль ведучого (MRM – Media Redundancy Manager), програмно блокує один з двох своїх кільцевих портів для будь-якої інформації, окрім тестового кадру, утворюючи фактично лінійну топологію мережі (рис. 1а). MRM контролює цілісність кільця, передаючи по кільцю тестові кадри даних в одну сторону і отримуючи їх по ланцюжку з іншого боку. Якщо MRM не отримує тестових кадрів, це означає розрив кільця, в такому випадку він розблокує другий кільцевий порт і відновлює передачу даних (рис. 1б). Інші комутатори

в кільці ведені (MRC – Media Redundancy Clients) і передають тестові кадри по ланцюжку з одного кільцевого порту до іншого. Час відновлення залежить від вибраних параметрів протоколу MRP і може становити від 10 до 500 мс.



а – в режимі замкнутого кільця, б – в режимі розімкнутого кільця

Рис. 1. Приклад логічного блокування сегменту мережі за протоколом MRP

Стандарт IEC 61850 сам по собі не встановлює конкретні вимоги до часу відновлення мережі, а визначає принципи зв'язку та архітектуру для автоматизації підстанцій, включаючи:

- вимоги до швидкодії протоколу GOOSE, який повинен забезпечувати передачу даних в межах 4 мс для критично важливих функцій;
- вимоги до частоти передачі SV, яка може бути в межах 4 – 8 кГц. Що відповідає проміжкам часу між двома сусідніми відліками не більшими 0,125 мс;
- вимоги до передачі сигналу синхронізації за стандартом PTPv.2 (Precision Time Protocol). В залежності від виробника МП РЗА проміжок часу між двома сусідніми мітками синхронізації може становити менше 100 мс.

Очевидно, що час відновлення мережі для АСК ТП 2-го покоління повинен бути меншим за вказані вище проміжки, тобто бути меншим 0,125 мс на шині процесу та менше 4 мс в станційній шині. Інакше у випадку будь-якої несправності в мережі обов'язково будуть втрачатись SV та, можливо, GOOSE. Що рівно сильно втраті функціональності АСК ТП в даний момент часу. При певній співпадіннях це може привести до аварійної ситуації в мережі. Тобто, швидкодії розглянутих вище протоколів резервування недостатньо для роботи в мережах АСК ТП 2-го покоління.

Протоколи резервування з нульовим часом відновлення. PRP (Parallel Redundancy Protocol) – протокол паралельного резервування, описаний у стандарті IEC 62439-3 [5-9]. Розроблено у 2010 р., зміни до стандарту у 2016, 2022 рр. PRP реалізує активне

резервування мережі шляхом дублювання пакетів через дві незалежні мережі, які працюють паралельно і обидві є одночасно активними. Мережі можуть мати будь-яку топологію (з кільцями чи без), причому і різну. Кожна з цих мереж може використовувати власні протоколи резервування, наприклад, MRP або RSTP. Кожний з дубльованих пакетів від кінцевого пристрою рухається до адресату по своєму маршруту в кожній з активних резервованих мереж. За умови виникнення/невиникнення одиночного дефекту тільки в одній з резервованих мереж, як мінімум один з дубльованих пакетів дійде до адресату. Таким чином, принципова перевага PRP полягає у його «безшовному» резервуванні з відсутністю навіть будь-якого малого часу перемикавання з основного на резервний канал зв'язку, так як саме перемикавання фактично відсутнє.

Розглянемо, за рахунок яких апаратних та програмних нововведень досягається такий ефект.

Склад апаратного забезпечення мережі при роботі з протоколом PRP (рис. 2):

- Кінцеві пристрої (вузли). DAN (Dual Attached Node) – вузол, який підключається до обох мереж, відправляє/приймає дубльовані фрейми з міткою PRP. В АСК ТП електричної підстанції це можуть бути МП РЗА, РАП, МУ, цифрові мультиметри, синхронізатори. Вимоги до DAN – наявність не менше 2-х незалежних Ethernet портів з підтримкою IEC 61850, ДСТУ EN IEC 62439-3 (PRP) та ДСТУ EN 62351-8.

- SAN (Single Attached Node) – кінцевий пристрій, який не приймає участі в PRP-резервуванні. SAN підключається тільки до одної мережі (або А або В) і відправляє/приймає звичайні фрейми без мітки PRP. Вимога - не менше 1-го Ethernet порту з підтримкою IEC 61850. У випадку відсутності підтримки IEC 61850 підключаються через конвертор протоколу.

- VDAN (Virtual DAN). Будь-які інші кінцеві пристрої, що повинні резервуватись і які можуть підтримувати IEC 61850, але мають один порт. Або у випадку відсутності підтримки IEC 61850 підключені через конвертор протоколу. Для VDAN використовується підключення в обидві мережі через RedBox.

- RedBox (Redundancy Box). RedBox дублює пакет від VDAN, додає мітку PRP і передає в обидві мережі начебто від DAN. Всі пристрої, які знаходяться у внутрішній локальній мережі RedBox сприймаються іншими пристроями DAN як такі ж самі DAN.

- Мережеве обладнання. Згідно СОУ НЕК 33.200.0-35:2025 «Загальні технічні вимоги до автоматизованих систем керування технологічними процесами підстанцій 220-750 кВ ОЕС України» [3] комунікаційне обладнання для створення технологічної мережі має підтримувати електричні та оптичні порти, багатомодове та одномодове волокно, бути сертифіковане для роботи з ДСТУ EN IEC 62439-3, ДСТУ EN IEC 61850-8-1 та у разі необхідності – ДСТУ EN 61850-9-2. Відповідність ДСТУ EN IEC 61850 має бути підтверджена сертифікатами CESI(КЕМА), або іншими лабораторіями, що сертифіковані CESI(КЕМА). Маршрутизатори мають підтримувати можливість налагоджування їх роботи по TCP, а також VLAN для забезпечення технологічного розподілу трафіку по мережах. Для

створення кільцевих схем мереж необхідна підтримка RSTP. Кінцеве обладнання підключається у дві мережі RSTP одночасно за стандартом ДСТУ EN IEC 62439-3 (PRP). Для синхронізації часу мережеве обладнання має підтримувати протокол PTP v2.

- Lan A, Lan B (мережі А та В). Мережі А та В можуть мати різну топологію, швидкість і не повинні мати спільних прямих з'єднань. Максимальна швидкість передачі даних – до 10 Гб/с.

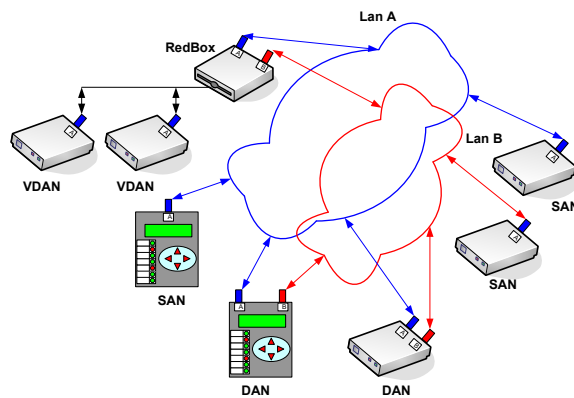


Рис. 2 Структура мережі PRP

Програмні особливості мережі при роботі з протоколом PRP:

- Обидва порти DAN повинні мати однакові MAC-адреси та одну і ту ж IP-адресу.

- DAN-відправник формує два однакові інформаційні фрейми з міткою PRP (RST). RST майже однакові, мають однаковий номер фрейму в послідовності відправок на певний DAN-адресат, відрізняються лише номером мережі (А чи В) та, відповідно, контрольною сумою. У внутрішню таблицю пристрою додається запис про відправку фрейму на певний DAN-адресат. Номер послідовності збільшується на 1.

- Lan А та її мережеве обладнання пропускає фрейм без змін до DAN-адресату. Те ж саме відбувається в Lan В.

- DAN-адресат отримує фрейм, з якої мережі, неважливо. Перевіряє контрольну суму, номер фрейму в послідовності для певного DAN-відправника. Якщо цей номер ще не зустрічався, то прибирається мітка RST, у відповідну таблицю вноситься запис про отримання фрейму, і фрейм направляється або в мережу верхнього рівня, або залишається для обробки в DAN-адресаті. При надходженні цього ж фрейму з другої мережі DAN-адресат його ліквідує (режим Duplicate discard).

- При обміні інформацією DAN-відправника з VDAN-адресатом все відбувається так само, але функцію DAN-адресату бере на себе RedBox, переправляючи перший отриманий фрейм до VDAN-адресату, і навпаки.

- Складніше при обміні інформації DAN з SAN. SAN, включений в одну з мереж, не має підтримки PRP і, відповідно, не може обробити фрейм з міткою PRP. Можна задіяти складний досить спосіб, де DAN буде відправляти фрейм без мітки PRP тільки в одну

мережу. Або розмішувати всі пристрої SAN, на які буде передаватись інформація, в локальній мережі RedBox.

Структура фрейму PRP. Ідентифікація дублюючих кадрів здійснюється за спеціальною міткою PRP - RCT (Redun-dancy Control Trailer), який включається у фрейм DAN-відправником (рис. 3).

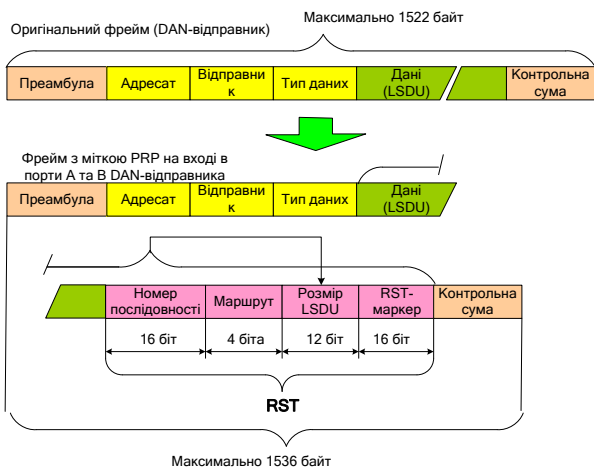


Рис. 3 Структура RST

RST містить наступні параметри:

- 16-бітний номер фрейму в послідовності послілок;
- 4-бітний ідентифікатор локальної мережі, по якій здійснюється передача послілки (1010 (0xA) для локальної мережі А та 1011 (0xB) для локальної мережі В);
- розмір фрейму даних (LSDU) (12 біт).
- RCT-маркер – для резервування PRP рівний 88FBH.

Максимальний розмір тегового Ethernet фрейму згідно IEEE 802.11q становить 1522 байта. Вставка RST може привести до перевищення максимального розміру, в максимумі 1536 байт. Стандарт IEC 62439-3 не висуває особливих вимог до МК в мережі PRP. Але стандартні комутатори можуть не пропускати фрейми з розмірами більшими від 1522 байт. Що для АСК ТП підстанції може означати не тільки втрату частини інформації, а й можливі відмови або хибні спрацювання релейного захисту або виникнення аварійного режиму. Тому слід використовувати сертифіковані МК з підтримкою стандарту IEC 62439-3 в частині PRP. А з урахуванням складу обладнання АСК ТП повинна бути ще й підтримка стандартів IEC 61850 та EN 62351-8 [10, 11].

Переваги протоколу PRP у порівнянні з RSTP:

- Час на відновлення мережі у випадку одиночної несправності рівний нулю. Відповідно, відсутня втрата інформації, у т.ч. і критичної.
- Вихід з ладу будь-якого кінцевого пристрою (DAN, RedBox) або виведення його на обслуговування на тривалий час, у т.ч. і в основній мережі 1-10 Гб, не приводить до втрати резервування з нульовим часом відновлення на цей же час.
- Резервування каналів зв'язку навіть для однопортових пристроїв за рахунок застосування RedBox.

- Недоліки протоколу PRP у порівнянні з RSTP:
- Наявність двох локальних мереж з дублюванням (за незначним винятком) як комунікаційного обладнання, так і оптично-кабельної мережі. Що приводить до значного зростання вартості АСК ТП.
- Необхідність використання дорожчих кінцевих пристроїв (МП РЗА та ін.) з 2-ма Ethernet-портами з підтримкою PRP.
- Необхідність використання дорожчих МК та іншого мережевого обладнання з підтримкою PRP.

Як наслідок – значне здорожчання АСК ТП. Але саме вказані переваги дають можливість побудувати локальну мережу, які відповідають всім вимогам до цифрової підстанції.

HSR (High-availability Seamless Redundancy) – протокол безперервного резервування, описаний у стандарті IEC 62439-3 [9, 12-14]. Розроблено у 2010 р., зміни до стандарту у 2016, 2022 рр. Подальший розвиток протоколу PRP, на відміну від якого реалізує не резервування мережі, а резервування з'єднань. HSR використовує тільки кільцеву топологію мережі. В протоколі HSR активне резервування мережі також забезпечується шляхом дублювання пакетів. Але на відміну від PRP передача їх йде не по двох незалежних мережах, а по одній кільцевій, причому один фрейм рухається за годинниковою стрілкою, другий – проти. Пристрій адресат отримує обидва фрейми, але обробляє і залишає тільки перший, а другий знищує. За умови виникнення / невиникнення одиночного дефекту в мережі HSR, як мінімум один з дубльованих пакетів дійде до адресату. Таким чином, принципова перевага HSR над протоколами RSTP та MRP полягає у його «безшовному» резервуванні з відсутністю навіть будь-якого малого часу перемикавання з основного на резервний канал зв'язку, так як саме перемикавання фактично відсутнє.

Розглянемо, за рахунок яких апаратних та програмних нововведень досягається такий ефект. Склад апаратного забезпечення мережі при роботі з протоколом HSR майже той же, що і для протоколу PRP (рис. 4):

- DAN, RedBox. Вимоги ті ж, що і для PRP, тільки пристрій повинен підтримувати стандарт HSR;
- VDAN. Вимоги ті ж, що і для PRP. Однопортові пристрої SAN в мережу HSR не включаються, а можуть бути під'єднані тільки через RedBox;
- Мережа тільки одна – кільцевої топології. Додається додатковий мережевий елемент – QuadBox – пристрій, який має 4 Ethernet-порти з підтримкою HSR. Цей пристрій дозволяє об'єднати два HSR-кільця. В кожному кільці QuadBox виконує роль DAN та може пересилати дані з одного кільця в інше. Максимальна швидкість передачі даних – до 100 Мб/с.
- Мережеве обладнання. Комунікаційне обладнання для створення технологічної мережі має бути сертифіковане для роботи з ДСТУ EN IEC 62439-3 (HSR), ДСТУ EN IEC. Для синхронізації часу мережеве обладнання має підтримувати протокол PTP v2.

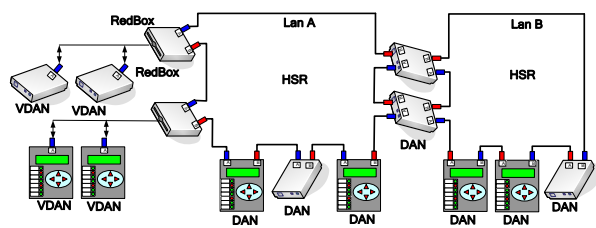


Рис. 4 Структура мережі HSR

Програмні особливості мережі при роботі з протоколом HSR:

- Обидва порти DAN повинні мати однакові MAC-адреси та одну і ту ж IP-адресу.

- DAN-відправник формує два однакові інформаційні фрейми з міткою HSR (HSR-тег). HSR-теги майже однакові, мають однаковий номер фрейму в послідовності відправок на певний DAN-адресат, відрізняються лише номером порту (А чи В, тобто напрямом передачі) та, відповідно, контрольною сумою. У внутрішню таблицю пристрою додається запис про відправку фрейму на певний DAN-адресат. Номер послідовності збільшується на 1. DAN-відправник відправляє один фрейм на порт А (по годинниковій стрілці), другий - на порт В (проти годинникової стрілки).

- Наступний за напрямом DAN приймає фрейм, перевіряє адресацію, і якщо адресат не він, перенаправляє через свій другий порт фрейм без зміни в мережу і без затрат часу на обробку. Так продовжується, поки фрейм не досягне DAN-адресату. З фреймом іншого напрямку відбувається те ж саме.

- DAN-адресат отримує фрейм, з якого напрямку, неважливо. Перевіряє контрольну суму, номер фрейму в послідовності для певного DAN-відправника. Якщо цей номер ще не зустрічався, то прибирається мітка HSR-тегу, у відповідну таблицю вноситься запис про отримання фрейму, і фрейм направляється або в мережу верхнього рівня, або залишається для обробки в DAN-адресаті. При надходженні цього ж фрейму з іншої сторони мережі DAN-адресат його ліквідує без обробки.

- При обміні інформацією DAN-відправника з VDAN-адресатом все відбувається так само, але функцію DAN-адресату бере на себе RedBox, переправляючи перший отриманий фрейм до VDAN-адресату, і навпаки.

Структура фрейму HSR. Ідентифікація дублюючих кадрів здійснюється за спеціальною міткою HSR-tag, який включається у фрейм DAN-відправником (рис. 5).

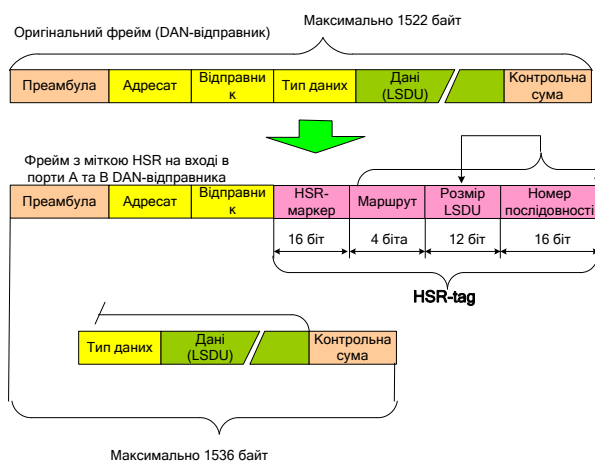


Рис. 5 Структура фрейму HSR

HSR-tag містить наступні параметри:

- HSR-маркер – для резервування HSR рівний 8928H;

- 4-бітний ідентифікатор джерела та напрямку передачі фрейму. Самий молодший розряд вказує на порт – 0 (порт А) або 1 (порт В). Три старші розряди вказують на місцезнаходження джерела – 0 (кільце HSR), від 1 до 6 – номер зовнішньої мережі PRP, під'єднаної до кільця HSR через RedBox;

- розмір фрейму даних (LSDU) (12 біт);

- 16-бітний номер фрейму в послідовності посилок.

Аналогічно до PRP, максимальний розмір тегового Ethernet фрейму може перевищити стандартні 1522 байта. Тому слід використовувати сертифіковані МК з підтримкою стандарту IEC 62439-3 в частині HSR.

На необхідність використання сертифікованих МК з підтримкою стандарту IEC 62439-3 в частині HSR впливає не тільки розмір фрейму. Жоден комутатор або кінцевий пристрій в мережі без підтримки HSR не зможе обробити та пропустити на наступний пристрій фрейм HSR, на відміну від фрейму PRP. Причина - у структурі фреймів PRP та HSR. Мітка PRP включається DAN-відправником в кінець існуючого фрейму в поле додаткової інформації. Комутатор без підтримки PRP прочитає всю інформацію, мітку PRP проігнорує та пропустить фрейм далі за маршрутом. Мітка HSR включається DAN-відправником на початку існуючого фрейму (після адрес відправника та адресату). Комутатор або пристрій без підтримки HSR не може розібрати мітку і сприймає даний фрейм як пошкоджений, блокуючи його подальшу передачу. Але таке розміщення мітки дозволяє значно підвищити швидкість передачі фрейму по мережі.

Переваги протоколу HSR у порівнянні з RSTP:

- Час на відновлення мережі у випадку одиночної несправності рівний нулю. Відповідно, відсутня втрата інформації, у т.ч. і критичної.

- Резервування каналів зв'язку навіть для однопортових пристроїв за рахунок застосування RedBox.

- Відсутність або мінімальна присутність дорогих МК у кільці.

Недоліки протоколу HSR у порівнянні з RSTP:

- Необхідність використання дорожчих кінцевих пристроїв (МП РЗА та ін.) з 2-ма Ethernet-портами з підтримкою HSR.

- Швидкість передачі сигналів у кільці обмежена 100 Мб/с.

- Максимальна кількість кінцевих пристроїв (DAN) в кільці обмежена 50 пристроями – із-за необхідності дотримання вимог до часу передачі GOOSE та SV. Загальну кількість пристроїв в АСК ТП можна збільшити за рахунок використання кількох кілець та QuadBox.

- Кількість під'єднаних до кільця через RedBox мереж обмежена 6-ма (обмеження по ідентифікатору в HSR-tag).

- Збільшений вдвоє трафік передачі даних по мережі.

- Відсутність гнучкості і, як наслідок, складна переконструкція мережі.

Як наслідок – незначне здорожчання АСК ТП або навіть здешевлення. Але саме вказані переваги дають можливість побудувати локальні мережі, які відповідають всім вимогам до відносно невеликої цифрової підстанції.

Придатність до використання протоколів резервування HSR та PRP в АСК ТП електричних підстанцій України. На основі розглянутого вище порівняємо переваги та недоліки кожного зі стандартів.

Спільні «плюси» для обох протоколів резервування:

- Час на відновлення мережі у випадку одиночної несправності рівний нулю. Відповідно, відсутня втрата інформації, у т.ч. і критичної.

- Резервування каналів зв'язку навіть для однопортових пристроїв за рахунок застосування RedBox.

Спільні «мінуси» для обох протоколів резервування:

- Необхідність використання дорожчих кінцевих пристроїв (МП РЗА та ін.) з 2-ма Ethernet-портами з підтримкою PRP/HSR.

- Необхідність використання дорожчих МК та іншого мережевого обладнання (QuadBox) з підтримкою PRP/HSR.

Недоліки протоколу PRP у порівнянні з HSR:

- Наявність двох локальних мереж з дублюванням (за незначним винятком) як комунікаційного обладнання, так і оптично-кабельної мережі. Що приводить до значного зростання вартості АСК ТП.

- Необхідність використання дорогих МК, які в кільцях HSR практично відсутні.

Недоліки протоколу HSR у порівнянні з PRP:

- Максимальна кількість кінцевих пристроїв (DAN) в кільці обмежена 50 пристроями – із-за необхідності дотримання вимог до часу передачі GOOSE та SV. Загальну кількість пристроїв в АСК ТП можна збільшити за рахунок використання кількох кілець та QuadBox.

- Кількість під'єднаних до кільця через RedBox мереж обмежена 6-ма (обмеження по ідентифікатору в HSR-tag).

- Збільшений вдвоє трафік передачі даних по мережі.

- Відсутність гнучкості і, як наслідок, складна

переконструкція мережі.

- Вихід з ладу будь-якого кінцевого пристрою (DAN, RedBox) або виведення його на обслуговування на тривалий час приводить до втрати резервування з нульовим часом відновлення на цей же час.

- Швидкість передачі сигналів у кільці обмежена 100 Мб/с.

Видно, що обидва протоколи основну вимогу, нульовий час відновлення мережі, забезпечують. Обидва використовують відносно дорогі кінцеві пристрої з 2-ма портами Ethernet. Відповідно обидва можуть використовуватись в АСК ТП останнього покоління (цифровій підстанції). Окрім того, фірми-виробники МП РЗА (Siemens, ABB та ін.), комунікаційного обладнання з усіма необхідними сертифікатами (MOXA, GE, TP, Hirschmann (Belden), KYLAND) рекомендують обидва протоколи для використання в АСК ТП. Інколи виробники зазначають, що протокол HSR краще використовувати на невеликих підстанціях з незначною кількістю кінцевих пристроїв. Дійсно, пп. 1, 1 недоліків HSR та PRP це підтверджують. На таких підстанціях при кількох суб-кільцях HSR швидкість проходження критичної інформації (GOOSE, SV) буде достатньою, а вартість мережі АСК ТП відносно невеликою.

Які ж протоколи резервування і на яких підстанціях рекомендовано для застосування вітчизняними галузевими стандартами?

В СОУ НЕК 03.100.0-22:2021 «Загальні технічні вимоги до підсистем релейного захисту та протиправильної автоматики у складі автоматизованих систем управління підстанцій 220 – 750 кВ ОЕС України» [16] для організації підстанційної шини АСК ТП допускається використовувати обидва протоколи резервування. А от для шини процесу рекомендується PRP, HSR може використовуватись тільки у варіанті подвійного кільця з повним дублюванням всіх кінцевих пристроїв. Таке обмеження щодо HSR – наслідок п. 5 недоліків HSR, який нівелюється при застосуванні подвійного кільця. Але в цьому випадку повне дублювання дорогих кінцевих пристроїв приводить до значного зростання вартості.

В більш пізньому СОУ НЕК 33.200.0-35:2025 «Загальні технічні вимоги до автоматизованих систем керування технологічними процесами підстанцій 220-750 кВ ОЕС України» [15] використання протоколу HSR взагалі не допускається. Очевидно, що прийнято до уваги те, що всі підстанції 220-750 кВ – це великі та середні підстанції, де HSR неефективний.

Висновки. Для організації локальної мережі сучасних АСК ТП другого покоління (як з шиною процесу, так і без) застосовується обладнання, яке повинно мати не менше 2-х незалежних Ethernet портів з підтримкою IEC 61850, ДСТУ EN IEC 62439-3 (PRP/HSR) та ДСТУ EN 62351-8. Обладнання, яке не підтримує хоча-б один із цих стандартів або має тільки один порт, повинно включатись в мережу через RedBox.

Однією з основних вимог до локальної мережі АСК ТП другого покоління є підтримка стандарту IEC 62439-3. Тобто забезпечення нульового часу відновлення мережі при виходу з ладу одного з її компонентів. Обидва протоколи резервування HSR та PRP

забезпечують цю вимогу та додатково за допомогою RedBox забезпечують резервування каналів зв'язку навіть для однопортових пристроїв.

Кожний з протоколів має ряд переваг та серйозних недоліків.

Недоліки протоколу PRP пов'язані з наявністю дубля локальної мережі з дубльованим дорогим комунікаційним обладнанням. Відповідно, єдиним кінцевим недоліком є значна вартість мережі АСК ТП. По всіх інших параметрах протокол PRP переважає HSR. PRP однозначно рекомендується для використання в мережах АСК ТП електричних підстанцій 220-750 кВ. Може використовуватись в АСК ТП розподільних мереж до 110 кВ включно.

Перевага протоколу HSR одна – відсутність дорогих комутаторів в кільці і, як наслідок – значно менша вартість. Недоліки пов'язані з послідовною передачею інформації по кільцю і не дають можливості застосувати його для великих та середніх підстанцій. Ці недоліки стали основою для заборони використання HSR в АСК ТП підстанцій 220-750 кВ (великих і середніх). А от для невеликих розподільних підстанцій до 110 кВ включно прямої заборони немає. На цих об'єктах локальна мережа HSR може бути значно дешевша, причому за рахунок невеликої кількості кінцевих пристроїв більшість недоліків HSR нівелюються.

Список літератури

1. О. С. Яндальський, О. О. Дмитренко, та В. В. Заколяжний, «Сумісне використання автоматизованих систем MicroSCADA та АСЗІ МП АРГОН в АСУ ТП» Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, № 1 (35), с. 64-68, 2016.
2. О. С. Яндальський, О. О. Дмитренко, та В. В. Заколяжний, «Сумісне використання автоматизованих систем MicroSCADA та АСЗІ МП АРГОН в АСУ ТП» Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, № 1 (35), с. 64-68, 2016.
3. Дмитренко О.О., Заколяжний В.В. Автоматичне введення резерву магістралі резервного живлення власних потреб атомної електростанції // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2018. № 2 – С. 44 – 49.
4. P. Kreutzer, J. Oliveira, and V. Nogueira, (2022, Aug.), "Virtualization as an enabler for digital substation deployment," Presented at CIGRE Paris Session 2022, [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b5-10675-2022-virtualization-as-an-enabler-for-digitalsubstation-deployment.html>
5. Kirmann, Hubert; Dzung, Dacfe. Selecting a Standard Redundancy Method for Highly Available Industrial Networks, 2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 27 June 2006 Page(s): 386–390
6. Kirmann, Hubert Seamless redundancy - bumpless Ethernet redundancy for substations with IEC 61850 ABB review special report, 2013
7. Pustynnik, Michael; Zafirovic-Vukotic, Mira; Moore, Roger Performance Of The Rapid Spanning Tree Protocol In Ring Network Topology Archived 6 February 2017 at the Wayback Machine, RUGGEDCOM
8. IEC 62439-2: "Industrial communication networks: High availability automation networks" – Part 2: Media Redundancy Protocol
9. IEC 62439-3:2022 Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR) (IEC 62439-3:2022 Промислові комунікаційні мережі - Мережі автоматизації високої доступності - Частина 3: Протокол паралельного резервування (PRP) та безперервне резервування високої працездатності (HSR)
10. H. Kirmann, M. Hansson, P. Muri; "IEC 62439 PRP: Bumpless recovery for highly available, hard real-time industrial networks"; ETFA 2007, Patras, Greece

11. M. Rentschler, P. Laukemann; "Towards a Reliable Parallel Redundant WLAN Black Channel"; WFCS 2012, Lemgo, Germany
12. H. Heine, O. Kleineberg; "The High-Availability Seamless redundancy protocol (HSR): Robust fault-tolerant networking and loop prevention through duplicate discard", WFCS 2012, Lemgo, Germany
13. Hubert Kirmann, Karl Weber, Oliver Kleineberg, Hans Weibel. HSR: Zero recovery time and low-cost redundancy for Industrial Ethernet (High availability seamless redundancy, IEC 62439-3) // 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. — IEEE, 2009-09.
14. Mira Zafirovic-Vukotic, Roger Moore, Michael Leslie, Rene Midence, Marzio Pozzuoli. Secure SCADA network supporting NERC CIP // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. — IEEE, 2009-07
15. COY HEK 33.200.0-35:2025 «Загальні технічні вимоги до автоматизованих систем керування технологічними процесами підстанцій 220-750 кВ ОЕС України», 2025. – 52 с.
16. COY HEK 03.100.0-22:2021 Загальні технічні вимоги до підсистем релейного захисту та протинаварійної автоматики у складі автоматизованих систем управління підстанцій 220 - 750 кВ ОЕС України. ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО», 2021. – 37 с.

References (transliterated)

1. O. S. Yandulsky, O. O. Dmytrenko, and V. V. Zakolodyazhnyi, "Combined use of automated systems MicroSCADA and ASZI MP ARGON in automated process control systems" Information Technologies and Computer Engineering, No. 1 (35), pp. 64-68, 2016.
2. O. S. Yandulsky, O. O. Dmytrenko, and V. V. Zakolodyazhnyi, "Combined use of automated systems MicroSCADA and ASZI MP ARGON in automated process control systems" Information Technologies and Computer Engineering, No. 1 (35), pp. 64-68, 2016.
3. Dmytrenko O.O., Zakolodyazhny V.V. Automatic introduction of reserve of the main line of backup power supply for the own needs of a nuclear power plant. Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute. - 2018. No. 2 – P. 44 – 49.
4. P. Kreutzer, J. Oliveira, and V. Nogueira, (2022, Aug.), "Virtualization as an enabler for digital substation deployment," Presented at CIGRE Paris Session 2022, [Online]. Available: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/b5-10675-2022-virtualization-as-an-enabler-for-digitalsubstation-deployment.html>
5. Kirmann, Hubert; Dzung, Dacfe. Selecting a Standard Redundancy Method for Highly Available Industrial Networks, 2006 IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 27 June 2006 Page(s): 386–390
6. Kirmann, Hubert Seamless redundancy - bumpless Ethernet redundancy for substations with IEC 61850 ABB review special report, 2013
7. Pustynnik, Michael; Zafirovic-Vukotic, Mira; Moore, Roger Performance Of The Rapid Spanning Tree Protocol In Ring Network Topology Archived 6 February 2017 at the Wayback Machine, RUGGEDCOM
8. IEC 62439-2: "Industrial communication networks: High availability automation networks" – Part 2: Media Redundancy Protocol
9. IEC 62439-3:2022 Industrial communication networks - High availability automation networks - Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR) (IEC 62439-3:2022
10. H. Kirmann, M. Hansson, P. Muri; "IEC 62439 PRP: Bumpless recovery for highly available, hard real-time industrial networks"; ETFA 2007, Patras, Greece
11. M. Rentschler, P. Laukemann; "Towards a Reliable Parallel Redundant WLAN Black Channel"; WFCS 2012, Lemgo, Germany
12. H. Heine, O. Kleineberg; "The High-Availability Seamless redundancy protocol (HSR): Robust fault-tolerant networking and loop prevention through duplicate discard", WFCS 2012, Lemgo, Germany
13. Hubert Kirmann, Karl Weber, Oliver Kleineberg, Hans Weibel. HSR: Zero recovery time and low-cost redundancy for Industrial Ethernet (High availability seamless redundancy, IEC 62439-3) // 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. – IEEE, 2009-09.
14. Mira Zafirovic-Vukotic, Roger Moore, Michael Leslie, Rene Midence, Marzio Pozzuoli. Secure SCADA network supporting

- NERC CIP. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – IEEE, 2009-07
15. SOU NEK 33.200.0-35:2025 “General technical requirements for automated control systems for technological processes of 220-750 kV substations of the Unified State Electric Power System of Ukraine”, 2025. – 52 p.
16. SOU NEK 03.100.0-22:2021 General technical requirements for relay protection subsystems and emergency automation as part of automated control systems for 220 - 750 kV substations of the Unified State Electric Power System of Ukraine. SE NEK UKRENERGO, 2021. – 37 p.

Надійшла (Received) 10.03.2026
Прийнята (Accepted) 21.03.2026
Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Дмитренко Олександр Олександрович (Oleksandr Dmytrenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри автоматизації енергосистем, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6687-4523>; e-mail: dmytrenko_a@ukr.net