

Analizy wymagań niezawodnościowych i jakościowych układów i urządzeń transmisji danych we współczesnej elektroenergetyce

Streszczenie. Specyfika infrastruktury teleinformatycznej elektroenergetyki wymaga, aby elementy i urządzenia realizujące funkcje tejże infrastruktury były przygotowane do pracy w warunkach środowiskowych elektroenergetyki i nie pracowały w warunkach innych niż te, do których je zaprojektowano. W artykule dokonano wybranych analiz wymagań niezawodnościowych i jakościowych układów i urządzeń transmisji danych we współczesnej elektroenergetyce.

Abstract. The specificity of the power system infrastructure requires that the elements and devices performing the functions of such infrastructure should work in specific environments and should not work under any conditions other than those for which they were designed. The paper analyzes selected reliability and quality requirements for systems and data transmission equipment in the modern electric power system infrastructure. (Analysis of the requirements of reliability and quality for systems and data transmission equipment in modern power plants).

Słowa kluczowe: transmisja danych, system elektroenergetyczny, norma IEC 61850.

Keywords: teletransmission, electrical power system, IEC 61850 standard.

doi:10.12915/pe.2014.03.17

Wstęp

Współczesna elektroenergetyka obfituje w systemy teletransmisyjne i teleinformatyczne, które ze względu na specyficzne warunki użytkowania (środowiskowe, niezawodnościowe oraz „wydajnościowe”) wymagają odpowiedniego sprzętu i oprogramowania. I tak na przykład wymagania niezawodnościowe sieci transmisji danych dla potrzeb stacyjnych powinny być określone na podstawie standardu IEC 870-4 [2, 5, 6, 8]. Dla urządzeń realizujących takie transmisji decydujący charakter mają parametry MTBF (*Mean Time Between Failures*) i MTTR (*Mean Time To Recovery*). W sposób bezpośredni opisują one parametry związane z dyspozycyjnością sieci teleinformatycznej. Dla zapewnienia wysokiej niezawodności pracy takiej sieci koniecznym staje się więc spełnienie określonych norm jakościowych oraz niezawodnościowych. Specyfika infrastruktury teleinformatycznej elektroenergetyki wymaga, aby elementy i urządzenia realizujące funkcje tejże infrastruktury były z góry przygotowane do pracy w warunkach środowiskowych elektroenergetyki. Nie powinny też one pracować w warunkach innych niż te, do których je zaprojektowano. W artykule dokonano analizy warunków niezawodnościowych oraz jakościowych urządzeń transmisji danych, które przeznaczone są do pracy w infrastrukturze teleinformatycznej elektroenergetyki. Przeanalizowano przy tym zarówno wymagania sprzętowe jak i wybranych algorytmów mających wpływ na niezawodną i szybką wymianę informacji w takich układach.

Podstawowe wymagania urządzeń teleinformatycznych w układach stacyjnych

Urządzenia teleinformatyczne w stacjach elektroenergetycznych winny spełniać określone normy w zakresie:

- warunków środowiskowych (np. temperatury pracy czy wilgotności),
- warunków budowy (brak elementów ruchomych, brak kondensatorów elektrolitycznych, skuteczne odprowadzanie ciepła – pasywne, wytrzymałość mechaniczna, szeroki zakres napięcia zasilania),
- warunków funkcyjnych (możliwość wykorzystania szerokiej gamy protokołów komunikacyjnych, konwersja protokołów, różnorodność interfejsów komunikacyjnych, wydajne algorytmy, wysoka i możliwie stała efektywność niezależnie od obciążenia).

Patrząc na powyższe wymagania, z funkcjonalnego punktu widzenia, większość dobrych aktywnych urządzeń transmisji danych spełniałaby narzucone im wymagania. Jednak warunki pracy takich urządzeń skłaniają raczej do stosowania urządzeń w tzw. rozwiązaniach przemysłowych.

Wymagania dotyczące niezawodności sieci LAN określono w normie IEC870-4 między innymi za pomocą następujących parametrów:

- MTBF \geq 100 000 godzin,
- MTTR < 12 h.

Do niedawna wiele protokołów wykorzystywanych dotychczas do realizacji transmisji danych w systemach stacyjnych było funkcjonalnie ograniczonych. Wynikało to generalnie ze specyfiki tych protokołów oraz powszechnej tendencji producentów do tworzenia systemów transmisji danych opartych o własne rozwiązania. Dlatego często występowały/występują problemy ze wzajemną kompatybilnością poszczególnych rozwiązań. Niejednokrotnie transmisja danych wymaga stosowania koncentratorów sieciowych, umożliwiających dokonywanie konwersji różnych protokołów. W oczywisty sposób musi to na wpływać na wydajność takich systemów, a przede wszystkim na wydłużenie czasu transmisji danych. Biorąc pod uwagę ciągle rozwój systemów sterowania, zabezpieczeń i nadzoru urządzeń i obiektów elektroenergetycznych, problem ten długo narastał. Doprowadziło to do powstania nowej koncepcji komunikacji stacyjnej i międzystacyjnej. Pojawiła się idea stworzenia uniwersalnego standardu, którego spełnienie wymagań daje możliwość uzyskania pełnej kompatybilności rozwiązań proponowanych przez różnych producentów oraz zagwarantowania założonych z góry (i przewidywalnych) wysokich wymagań parametrów transmisji danych. W konsekwencji został opracowany standard IEC 61850.

Wymagania środowiskowe

Zapisy standardu IEC 61850-3 odnoszą się do zapisów IEC 870-2-2 („*Telecontrol equipment and systems – Part 2: Operating conditions – Section 2: Environmental conditions (climatic, mechanical and other non-electrical influences)*”). Norma IEC 870-2-2 opisuje wymagania środowiskowe i definiuje cztery klasy umiejscowienia urządzeń [6 8 10]:

- Klasa A: miejsca klimatyzowane (wewnątrz),
- Klasa B: podgrzewane i/lub chłodzone zamknięte,
- Klasa C: miejsca osłonięte,
- Klasa D: plener.

Większość urządzeń IED (*Intelligent Electronic Device*) w stacjach zlokalizowana jest w klasie C. Klasa C dzieli się na cztery podklasy, w zależności od zakresów dopuszczalnych temperatur pracy [5, 6, 11]. W polskich warunkach najczęściej występuje konieczność spełnienia klas C2, C3 lub Cx. Dla wspomnianych wcześniej urządzeń wymagane jest to, aby do chłodzenia wykorzystywano wyłącznie układy pasywne (brak wentylatorów – ze względu na możliwość zatarcia i uszkodzenia urządzeń aktywnych). Ważne jest również, by urządzenie było zdolne do uruchomienia w najniższej z wymaganych temperatur. Nie dopuszcza się możliwości uruchamiania urządzeń w wyższej temperaturze otoczenia, które następnie można by przenieść w miejsca o temperaturze niższej.

Odporność na oddziaływania mechaniczne

Urządzenia transmisji danych muszą być odporne na wibracje lub wstrząsy (np. trzęsienia ziemi). Poziomy dopuszczalnych wstrząsów definiuje norma PN-EN 60870-2-2. Dla klasy Cm są one następujące [2, 9, 12]: słabe wibracje sinusoidalne:

- dla $2 < f \leq 9$ Hz amplituda przesunięcia 7 mm,
 - dla $9 < f \leq 200$ Hz amplituda przyspieszenia 20 m/s^2 ,
 - dla $f > 200$ Hz amplituda przyspieszenia 15 m/s^2 ,
- wibracje:
- czas trwania połowy sinusoidy 11 ms,
 - maksymalne przyspieszenie 300 m/s^2 ,
 - swobodny upadek z wysokości 0,25 m (dla $m \leq 20$ kg).

Wymagane funkcjonalności aktywnych urządzeń przełączających

Nowoczesne urządzenia przełączające sieci Ethernet, pracujące w warstwie drugiej i trzeciej, wyposażane są w funkcjonalności, które są kluczowe dla zapewnienia odpowiedniego poziomu transmisji danych. Zaliczyć do nich należy:

- funkcjonalności związane z realizacją standardu IEEE 802.3x: transmisja danych powinna następować w trybie *full-duplex*. Urządzenia, które mają możliwość realizacji transmisji w trybie IEEE 802.3x *full-duplex* nie generują „kolizji” połączeń, a przewidywany sposób pracy sieci staje się bardziej deterministyczny,
- funkcjonalności związane z realizacją standardu IEEE 802.1p (tzw. kolejka priorytetowa). Transmisja taka pozwala na przesyłanie ramek z *tagiem* (znacznikiem). Znacznik ten może być wykorzystywany w krytycznych sytuacjach do zmiany kolejności przesyłania ramek zdanymi w zależności od „wagi” informacji zawartej w danej ramce,
- funkcjonalności związane z realizacją standardu IEEE 802.1Q. Standard ten opisuje działanie tzw. sieci wirtualnych VLAN. Umożliwia to wykorzystanie jednego fizycznego łącza do tzw. przezroczystego przesyłania danych pochodzących z różnych sieci. W ten sposób można na przykład ograniczyć w znacznym stopniu możliwość powstania tzw. domen kolizyjnych,
- funkcjonalności związane z realizacją standardu IEEE 802.1w. Standard ten zapewnia krótszy czas przywracania sprawności połączeń po awarii występującej w strukturze sieci teleinformatycznej,
- IGMP Snooping / Multicast Filtering.

Łączne opóźnienie przesyłu informacji na trasie pomiędzy dowolnymi przełącznikami nie powinno przekraczać wartości 0,6 ms [6, 8].

W sieciach teletransmisyjnych można wyróżnić trzy podstawowe architektury: kaskadową, pierścienia i gwiazdy. Architektury te, w sposób bezpośredni bądź jako hybrydy, realizowane są powszechnie przy użyciu przełączników aktywnych. Każda z nich oferuje różny stosunek wydajności do kosztów potrzebnych na jej realizację.

Wymagania EMI

Dosyć istotnym wymaganiem w infrastrukturze teleinformatycznej elektroenergetyki jest zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej EMC (*electromagnetic compatibility*). Urządzenia w takiej strukturze mogą być w wielu przypadkach mocno narażone na uszkodzenia z powodu wysokiego poziomu zakłóceń elektromagnetycznych EMI (*electromagnetic interference*). Zakłócenia elektromagnetyczne EMI, na które narażone są elementy sieci teletransmisyjnych, opisywane są w normie IEC 61850-3 „*Communication Networks and Systems in Substations – Part 3: General Requirements*”. Sekcja 5.7 przytoczonej tej normy określa wymagania EMI dotyczące sprzętu odpowiedzialnego za łączność, przeznaczonego do montażu w stacjach elektroenergetycznych. Odwołuje się przy tym również do innych norm, np. IEC 61000-6-5 „*Generic Standards – Immunity for power station and substation environments*”, czy też IEC 61000-4-x.

Warto podkreślić, że w miejscach szczególnie narażonych na zakłócenia elektroenergetyczne transmisja pomiędzy urządzeniami powinna być realizowana wyłącznie za pośrednictwem światłowodów. Wynika to z ich wysokiej odporności na zakłócenia elektromagnetyczne. Powinno się to przewidzieć na etapie projektowania zarówno stacji elektroenergetycznych jak też innych obiektów, pracujących w infrastrukturze elektroenergetyki.

Wymagania w zakresie fizycznej realizacji połączeń

Typowymi zakłóceniami w pracy sieci teleinformatycznych w stacjach elektroenergetycznych są przede wszystkim zakłócenia, które powstają podczas zwarć. Mogą one powodować niepożądane stany przejściowe w takich sieciach. W 1997 roku EPRI (*Electric Power Research Institute*) przeprowadziło testy dla kabli typu UTP i STP celem zbadania ich odporności na zakłócenia określone przez normę IEC61000-4-4. Z badań tych wynika, że kable te nie mogą być stosowane dla sieci LAN o założonych silnie deterministycznych właściwościach. Sieć stacyjna, choćby z uwagi na komunikaty GOOSE (opisane w dalszej części), musi minimalizować opóźnienia jak i pozostałe możliwe do wystąpienia problemy w transmisji danych. Stąd ponownie uczuła się na stosowanie praktycznie wyłącznie techniki światłowodowej. Z oczywistych względów wymusza to stosowanie odpowiedniego osprzętu sieciowego (pasywnego i aktywnego). W niewielkim stopniu powinno dopuszczać się połączenia z wykorzystaniem telekomunikacyjnych kabli miedzianych. Mogą być one stosowane jedynie w niektórych restrykcyjnie wskazanych przypadkach i miejscach.

Algorytmy trasowania

Główną funkcją warstwy sieciowej protokołu transmisyjnego jest przesył pakietów z urządzenia nadającego do urządzenia docelowego. W przypadku sieci rozległych, nim pakiety dotrą do celu, wymagają przejścia przez wiele punktów będących węzłami takiej sieci. Algorytmy wyboru optymalnej trasy oraz używane przez nie struktury są bardzo ważnym obszarem projektowania i analizowania pracy sieci. Dla aktywnych urządzeń przełączających algorytmy tzw. trasowania to część oprogramowania, realizowanego w warstwie sieciowej, która odpowiedzialna jest za decyzję, której „linii wyjściowej” przekazać przychodzący pakiet. Od algorytmu routingu (trasowania) oczekuje się kilku właściwości: poprawności realizacji funkcji trasowania, odporności na zakłócenia w pracy, stabilności i szybkości realizacji optymalnego wyboru trasy przesyłu danych. Algorytmy te można podzielić na dwie główne klasy:

- algorytmy nieadaptacyjne. Algorytmy takie nie bazują w procesie wyboru trasy na pomiarach i szacunkach bieżącego poziomu ruchu w sieci jak też jej aktualnej topologii. Wybór trasy jest wyliczany z góry. Informacje o możliwych trasach ładowane są do routerów przy starcie sieci (tzw. routing statyczny),
- algorytmy adaptacyjne. Algorytmy takie zmieniają trasy przesyłu danych zależnie od zmian w topologii sieci oraz poziomu jej obciążenia na poszczególnych możliwych trasach. Różnią się pomiędzy sobą sposobem pobierania informacji, momentem obliczania nowej trasy i parametrami używanymi do optymalizacji. Takie trasowanie nazywane jest routingiem dynamicznym.

Jako przykłady powyższych typów algorytmów można wskazać np. algorytmy RIP i OSPF. Pierwszy z nich wykorzystuje tzw. tablicę wektorów odległości, utrzymywaną przez router [1, 2, 4, 7]. Tablice są aktualizowane za pomocą wymiany informacji między sąsiednimi routerami. Każdy router utrzymuje tablicę routingu indeksowaną po każdym routerze w podsieci i zawierającą po jednym wpisie na router. Podstawowym założeniem tego algorytmu jest to, że router zna odległość do sąsiedniego routera. Jeśli miarą „odległości” są konieczne „przeskoki” poprzez węzły sieci, wtedy „odległość” do sąsiedniego routera wyniesie jeden przeskok. Miarą może być też opóźnienie, które router wyznacza używając do tego celu specjalnych pakietów.

Następcą algorytmu RIP jest algorytm OSPF (*Open Shortest Path First*). RIP sprawdza się dobrze tylko w stosunkowo niewielkich sieciach. W 1990 roku OSPF stał się standardem, przez co większość producentów routerów zapewnia jego obsługę. Dodatkowo jest protokołem otwartym, co z natury rzeczy daje możliwość jego znacznie szybszego i ciągłego rozwoju. Używa on hierarchicznej struktury sieci z podziałem na obszary, w tym tzw. obszarem zerowym, który uczestniczy w wymianie tras między wszystkimi obszarami w domenie OSPF. W ramach obszaru każdy z routerów zna całą topologię obszaru, w jakim się znajduje.

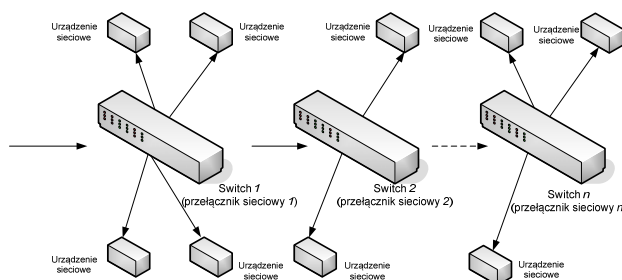
Protokół IGMP

Zdecydowanie największą część ruchu w sieci stanowią transmisje typu unicast. W takiej transmisji dokładnie jeden punkt wysyła pakiety do dokładnie jednego punktu – istnieje tylko jeden nadawca i tylko jeden odbiorca takiej informacji. Mniejszą część ruchu w sieci stanowi ruch typu rozgłoszeniowy (broadcast). Jest to jednokrotne wysłanie pakietu, który adresowany jest do wszystkich odbiorców (hostów). Hosty przetwarzają u siebie pakiet rozgłoszeniowy. Sprawdzają czy dany pakiet był czy też nie był adresowany do niego. Z oczywistych przyczyn powoduje to spowolnienie działania sieci i często jest w różny sposób ograniczane.

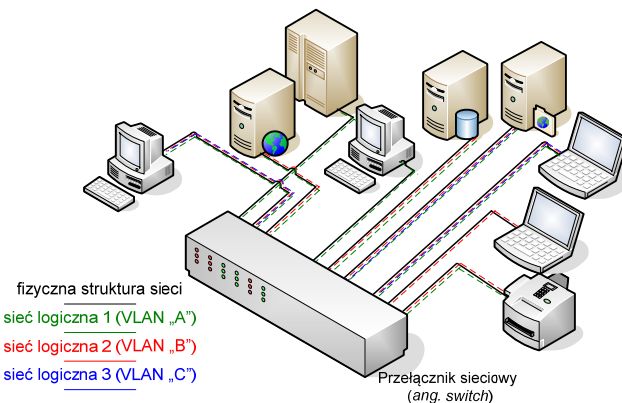
Obciążenie sieci teleinformatycznych ciągle wzrasta wraz z dodatkowymi aplikacjami i ich zapotrzebowaniem na pasmo przepustowości. Coraz częściej pojawia się konieczność dostępu różnych urządzeń do wspólnych informacji. Jak już wspomniano wcześniej, przesyłanie tych informacji za pomocą rozgłoszeń wiąże się z koniecznością przetwarzania tych pakietów przez wszystkie routery, nawet te, które nie należą do zamierzonych adresatów. Alternatywą są oczywiście transmisje unicastowe. W takim przypadku informacje należałoby przesyłać do każdego urządzenia odbiorczego z osobna. W sieciach o oczekiwanych wysokich wymaganiach co do szybkości i przewidywalności krótkiego czasu transmisji informacji obydwie wspomniane wcześniej rozwiązania nie będą się sprawdzać. Komunikacja rozgłoszeniowa angażuje za dużo zasobów sieciowych, ponieważ rozgłaszanie „zalewa” sieć

danymi. Z kolei transmisje kierunkowe (unicast) powodują konieczność wielokrotnej transmisji tych samych danych.

Możliwym rozwiązaniem powyższego problemu są transmisje grupowe (multicasting). Takie transmisje przewidują możliwość rejestrowania się w grupie wszystkim tym klientom, którzy potrzebują określonych informacji. Grupa ta identyfikowana jest jako odbiorca określonych danych dla wybranej aplikacji. Dzięki temu nadawca wyśle dane tylko raz, a dane odbiorą tylko urządzenia należące do grupy (rysunek 1). Czyni to transmisje grupowe dużo bardziej wydajnym sposobem komunikacji z grupą odbiorców niż transmisje kierowane i rozgłoszenia. Funkcje przyłączania i opuszczania grup multicastowych realizowane są poprzez protokół IGMP. Protokół ten, zaimplementowany w aktywnych urządzeniach sieciowych, pozwala na śledzenie obszarów sieci, do których należy wysłać transmisje grupowe, definiując je na podstawie przynależności określonych urządzeń do grup. IGMP snooping to podstawowe mechanizmy wspomagające rozsyłanie komunikatów GOOSE, opisanych w dalszej części artykułu.



Rys. 1. Zasada działania multiplikacji pakietów zgodnie z IGMP (transmisja z multiplikacją) [2]



Rys. 2. Wydzielanie struktur VLAN w strukturze sieciowej

VLAN

Wprowadzenie do sieci Ethernet „aktywnych” koncentratorów (switche) umożliwiło konfigurowanie takich sieci nie tylko poprzez fizyczną strukturę topologii sieci. Dodatkowe funkcjonalności takich jednostek umożliwiają bowiem tworzenie logicznych połączeń (sieci wirtualnych VLAN) w ramach konkretnej fizycznej struktury sieciowej. Uzyskuje się przez to separację ruchu między określonymi grupami portów przełącznika, zwiększając przy tym efektywność działania urządzeń w ramach konkretnych sieci logicznych oraz ograniczając liczbę domen kolizyjnych (rysunek 2). Komunikacja między wirtualnymi sieciami jest możliwa w sieciach z wykorzystaniem przełączników warstwy trzeciej. W takich przełącznikach administrator może wyznaczyć grupę portów i przyłączonych do nich urządzeń, tworząc pomiędzy nimi połączenie logiczne. Bez dodatkowych mechanizmów ruch w takiej sieci logicznej jest niewidoczny dla pozostałych urządzeń podpiętych do urządzenia przełączającego. VLAN omija więc pewne

ograniczenia fizycznie istniejącej sieci. Daje też możliwość optymalnego zarządzania strukturą sieciową. Urządzenia, które zostały przypisane do jednej sieci logicznej mogą jednocześnie znajdować się w innych takich sieciach. Mogą również posiadać różne mechanizmy bezpieczeństwa transmisji danych.

Komunikaty GOOSE

W sieci LAN stacji elektroenergetycznej znajduje się zazwyczaj kilka do kilkunastu aktywnych urządzeń przełączających, pracujących typowo w redundantnych pierścieniach światłowodowych. Dla układów zgodnych z IEC 61850 szybka transmisja danych, niezawodność i nadmiarowość połączeń jest bardzo istotna. Szczególne znaczenie ma to dla komunikatów GOOSE. Mają one charakter komunikatów o znaczeniu krytycznym, a ich niezawodne przesyłanie wymaga stosowania transmisji typu multicast oraz ustalenia odpowiednich priorytetów w urządzeniach przełączających.

GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*) jest mechanizmem, w którym każdy rodzaj danych różnego formatu (status, wartość) zostaje pogrupowany w zbiory danych i przekazywany w czasie nie dłuższym niż 4 milisekundy. Uzyskuje się przez to możliwość szybkiego i pewnego przesyłania komunikatu o zdarzeniu do wielu urządzeń fizycznych. Dla zapewnienia wymaganej prędkości transmisji i niezawodności stosuje się następujące mechanizmy [2, 3, 8]:

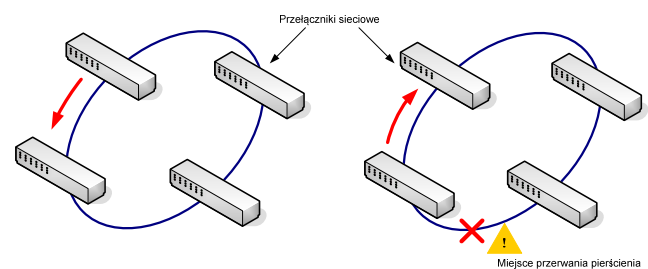
- komunikaty GOOSE „umieszcza” się bezpośrednio w pakietach Ethernet. Wykorzystują one mechanizm „wydawca-subskrybent” oraz transmisję typu multicast lub broadcast,
- tworzy się wirtualne sieci VLAN oraz korzysta z priorytetów transmisji (standard IEEE 802.1Q). Uzyskuje się w ten sposób odseparowane logicznie kanały transmisyjne o różnych poziomach priorytetów przesyłanych informacji,
- komunikat GOOSE jest retransmitowany ze zmiennym i rosnącym odstępem retransmisji,

Najbardziej surowe wymagania czasowe mają informacje z zabezpieczeń i próbki sygnałów pomiarowych [5, 6, 11, 12]. Zabezpieczenia i sterowniki polowe przesyłają między sobą komunikaty GPPSE. Minimalizację opóźnienia powstającego w wyniku przejścia informacji przez poszczególne warstwy stosu protokołów, wiadomości te są wysyłane bezpośrednio w ramce protokołu Ethernet. Modyfikuje się jednocześnie pole „EtherTypes”. Wprowadzane są również specjalne etykiety, które wpływają na sposób przełączania ramki przez infrastrukturę sieciową. Ponieważ warstwy wyższe nie biorą udziału w tym procesie, konsekwencją staje się zastosowanie charakterystycznych mechanizmów związanych z zarządzaniem ruchem w sieci. Zaimplementowane są one głównie w warstwie trzeciej (IGMP/IGMP snooping) i wyższych. Wykorzystywanie mechanizmów warstwy drugiej ogranicza ilość możliwych rozwiązań tylko do paru standardów (tj. np. VLAN 802.1Q, priorytety zgodne z 802.1p). Należy pamiętać, że Ethernet nie oferuje mechanizmu potwierdzeń otrzymania informacji przez stację odbiorczą i żądań retransmisji. (są to funkcjonalności warstw wyższych). Dlatego komunikaty GOOSE muszą być wysyłane są cyklicznie ze zmiennym czasem retransmisji. Cykle i wspomniany wcześniej interwał czasowy jest zależny od stanu pracy stacji (stan pracy normalny, zdarzenie, alarm, po alarmie).

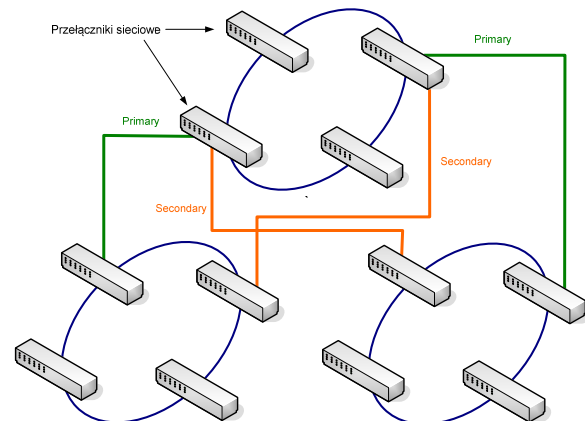
STP, RSTP i FRNT

Sieciami teletransmisyjnym, którym stawia się duże wymagania i zapewnia należyte redundancje połączeń, należy postawić również warunek by czas rekonfiguracji

struktury był możliwie jak najkrótszy. Za rekonfigurację struktury sieci odpowiedzialne są przełączniki (switche), a to oznacza, że takie urządzenie musi być zdolne do identyfikacji przerwy w połączeniu. Można to osiągnąć za pomocą ustandaryzowanych rozwiązań. Są nimi np. IEEE Spanning Tree Protocol (STP) lub Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP) [3, 15]. Eliminacja przerw w połączeniach jest konieczna z punktu widzenia zmniejszenia „błądzenia” pakietów po sieci. W sieci Ethernet tzw. zamknięte trasy pakietów skutkowałyby powstawaniem tzw. sztormów rozgłoszeniowych, czyli przeciążeń powstających wskutek niekończącego się krążenia pakietów w sieci. Gdy któraś z wcześniej ustalonych dróg przesyłu nie może być osiągnięta, sieć jest rekonfigurowana za pomocą algorytmu drzewa rozpinnającego. Rekonfiguracja sieci przy użyciu protokołu STP powinna trwać nie dłużej niż 30 sekund. Czas rekonfiguracji jest zależny od złożoności i określoności struktury sieci. RSTP jest rozwiniętym protokołem STP. Zapewnia on szybszą rekonfigurację. Czas rekonfiguracji może być w tym przypadku skrócony do około 5 sekund.



Rys. 3. Rekonfiguracja topologii pierścienia, algorytm FRNT0



Rys. 4. Rekonfiguracja topologii pierścienia, algorytm FRNT1

W praktyce można spotkać również specjalnie opracowane rozwiązania, które stanowią alternatywę dla RSTP. Jednym z nich jest Fast Recovery Network Topology (FRNT). FRNT jest opatentowanym rozwiązaniem, a producent zapewnia, iż czas rekonfiguracji sieci jest mniejszy niż 30 ms. Rekonfiguracja w takim trybie jest wydarzeniem kontrolowanym. Każde z urządzeń w ringu (pierścieniu) sprawdza czy pozostałe urządzenia pracują prawidłowo. W przypadku wykrycia usterki natychmiast przekazywana jest informacja do switcha skonfigurowanego jako tzw. „focal point”, który wykonuje rekonfigurację sieci. Switche korzystające z FRNT dostępne są w dwóch wariantach, dla podstawowych sieci pierścieniowych i połączonych ze sobą pierścieni. Modele mogą być wyposażone w inne oprogramowanie do rekonfiguracji sieci, tj. FRNT0 i FRNT1. W FRNT0 (rysunek 3) – istnieją zawsze dwa alternatywne kierunki ruchu na pierścieniu, prawostronny lub lewostronny.

W FRNT1 (rysunek 4) niektóre przełączniki mają zdolność łączenia ze sobą kilku pierścieni, by zapewnić jeszcze większą niezawodność transmisji. Pierścienie te są połączone za pomocą pierwszego (*primary*) i drugiego (*secondary*) łącza wraz z innymi pierścieniami. Rekonfiguracja sieci i użycie łącza „secondary” pozwala na funkcjonowanie sieci bez przerw w transmisji [3, 15].

Kształtowanie i zapewnienie jakości usług teleinformatycznych – QoS

Zapewnienie odpowiedniego poziomu jakości usług teleinformatycznych (QoS - *Quality of Service*) realizowanych przez infrastrukturę sieciową powinno być podstawowym kryterium, które jest rozpatrywane przy projektowaniu takich struktur. Aby można było rozważać w jaki sposób należy projektować struktury sieciowe i zarządzać ruchem w sieci teleinformatycznej, konieczne jest wcześniejsze zdefiniowanie podstawowych parametrów decydujących o zapewnieniu odpowiedniego poziomu usług sieciowych.

Jednym z podstawowych parametrów jest parametr prędkości transmisji danych, czyli tzw. przepustowość (*throughput*). Z punktu widzenia podstawowych wymagań automatyki stacyjnej nie jest to parametr szczególnie krytyczny. Przepustowości podstawowych mediów oraz urządzeń aktywnych, tworzących szkielet takiej sieci, są wielokrotnie większe od wymagań, jakie stawiają urządzenia pomiarowe, sterujące i zabezpieczeniowe. Może mieć on jednak duży wpływ na jakość transmisji w systemach pomiarów rozproszonych oraz wpływać na wahania czasów transmisji danych w takich układach.

Jeżeli łącze współdzielone jest wykorzystywane przy rosnącym obciążeniu sieciowym, może dojść do tworzenia się sporych kolejek pakietów danych w aktywnych urządzeniach sieciowych. Urządzenia te mają oczywiście zaimplementowane odpowiednie algorytmy do obsługi takich sytuacji. Jednak po pewnym czasie może dochodzić w nich nawet do odrzucania kolejnych pakietów danych, czyli tzw. straty pakietów (*packet loss*). Wzrost tego parametru w szczególności zostanie zanotowany w przypadku obserwacji punktów styku sieci o różnych przepustowościach. Z oczywistych względów, przy dużym obciążeniu sieciowym, po stronie szybszego łącza pojawia się więcej pakietów danych, które nie mogą być – po przekroczeniu pewnego poziomu – przenoszone na segment sieci o niższym poziomie przepustowości. Takie krytyczne miejsca określane są mianem wąskich gardeł, a w literaturze angielskiej – *bottleneck*. Dla ważnych funkcjonalności elektroenergetyki, np. z punktu widzenia działania automatyki elektroenergetycznej, krytycznym parametrem jest opóźnienie transmisji (*transmission delay*), mające wpływ na całkowity czas przesyłu danych i informacji, oraz powiązaną z nim zmienność opóźnienia (*jitter*). Opóźnienie to oznacza czas w jakim pakiety wędrują w sieci w obrębie danej ścieżki sieciowej. Część opóźnień związana jest z fizycznymi parametrami łączy transmisyjnych, interfejsów komunikacyjnych oraz z wykorzystywanymi protokołami. Do całości dochodzą opóźnienia wynikające z tworzących się kolejek pakietów danych oczekujących na „obsługę” w aktywnych urządzeniach sieciowych.

Synchronizacja czasowa

Precyzyjną synchronizację czasu realizuje się poprzez scalenie funkcji przełączników sieciowych i serwera SNTP w elektronice jednego urządzenia. Jest to rozwiązanie typowo sprzętowe. W celu zapewnienia determinizmu transmisji przełączniki sieciowe mają zaimplementowane mechanizmy, które zapewniają dobre właściwości czasowe

transmisji, przy minimalnych opóźnieniach dla krytycznych danych. Znacznikowanie czasowe pakietów odbywa się na różnych warstwach. Dla niższych warstw uniezależniamy się od poszczególnych opóźnień, zapewniając tym samym lepsze rozdzielczości czasowe.

Synchronizacja czasowa w sieci to skomplikowane zadanie. Wpływa na to np. trudność w oszacowaniu opóźnień poszczególnych tras i komponentów, jako zależnych w dużej mierze od obciążenia sieci, przepustowości łączy, medium transmisyjnego, architektury sieci, ilości kolejek priorytetów, itp. Rozdzielczość synchronizacji czasowej uzależniona jest od warstwy modelu OSI, w której znakowane są przychodzące i wychodzące pakiety danych oraz od opóźnień w sieci. Mniejsze znaczenie ma sam protokół synchronizacji czasowej. Rekomendowane są rozwiązania oparte na protokołach SNTP/NTP (RFC2030 / RFC1305), P1588 (IEEE 1588) oraz C17.118 (tzw. synchrofazory).

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano i poddano analizie wymagania niezawodnościowe i jakościowe stawiane współczesnym urządzeniom i układom transmisji danych w infrastrukturze teleinformatycznej elektroenergetyki. W pierwszej części skupiono się głównie na wymaganiach sprzętowych takich układów. W drugiej części wykazano, że istotne znaczenie dla niezawodności i jakości pracy takich sieci mają również algorytmy zawarte i realizowane w aktywnych urządzeniach sieciowych.

Z punktu widzenia pracy sieci teleinformatycznej i jej przewidywalności istotna jest struktura tej sieci oraz właściwy dobór jej urządzeń [13]. W wielu przypadkach analizy ogranicza się jedynie do podstawowych parametrów sieciowych takich jak np. przepustowość czy skalowalność danego rozwiązania. Pomijane są jednak często parametry „ukryte”, które są narzucane poprzez wybór konkretnej topologii, medium transmisyjnego, użytego protokołu czy też rozwiązania sprzętowego. Mówi się też o dopuszczalnych opóźnieniach, kiedy znacznie bardziej istotnym parametrem jest wspomniana już wcześniej zmienność opóźnienia (*jitter*). Ma ona szczególne znaczenie w transmisjach typu izochronicznego, gdzie wymagana jest stała wartość szybkości przesyłu danych niezależnie od obciążenia sieciowego. Dlatego struktury przesyłu danych i wymiany informacji w elektroenergetyce nie powinny być projektowane tylko i wyłącznie na bazie stałych wytycznych. Należy również pamiętać o zapewnieniu odpowiedniego bezpieczeństwa i poufności przesyłanych danych [14]. W każdym przypadku powinno analizować się je pod kątem konkretnego obiektu elektroenergetycznego mając na uwadze nie tylko niezawodność i jakość transmisji danych, ale również perspektywiczne wykorzystanie danej struktury do realizacji przyszłych funkcjonalności o znacznie wyższych wymaganiach.

LITERATURA

- [1] Andrew S. Tanenbaum: Sieci komputerowe, *Helion*, 2004
- [2] Marzio P. Pozzuoli: The Need for “Substation Hardened” Ethernet Switches
- [3] Scrimger R., LaSalle P., Leitzke C., Parihar M., Gupta M.: Biblia TCP/IP, *Helion*, 2004
- [4] Simmonds A.: Wprowadzenie do transmisji danych, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa 1999
- [5] Wieczorek Z.: Sieć Ethernet LAN w stacjach elektroenergetycznych zgodnych z IEC61850 – podstawy projektowania, *Urządzenia dla energetyki 8/2009*
- [6] Wieczorek Z.: Komunikacja zgodna z IEC61850, *elektro.info 5/2010*
- [7] Tarlochan S. Sidhu, i inni: Implementation Issues with IEC 61850 Based Substation Automation

- [8] Tekniska S.A.: IEC61850, *biuletyn wewnętrzny*
- [9] IEC 61850-3: "Communications networks and systems in substations – Part 3: General Requirements"
- [10] IEC 61000-6-5 "Generic Standards – Immunity for power station and substation environments"
- [11] Specyfikacja funkcjonalna PSE - Operator S.A.: Standardowa specyfikacja funkcjonalna dla sieci LAN stacji
- [12] Specyfikacja funkcjonalna PSE - Operator S.A.: Standardowe wymagania funkcjonalne dla systemów telekomunikacyjnych obiektów stacyjnych PSE - Operator S.A.
- [13] Szewczyk M., Halinka A.: Media transmisyjne w automatyce elektroenergetycznej, *Materiały Sympozjum Naukowo-Technicznego pod patronatem honorowym Komitetu Automatyki Elektroenergetycznej SEP "Zabezpieczenia elektroenergetyczne w zakładach górniczych"*, ISBN 978-83-60837-04-7, Gliwice, 3 kwietnia 2007, s. 43 - 61
- [14] Halinka A., Szewczyk M.: Bezpieczeństwo przesyłu informacji oraz algorytmy szyfrujące możliwe do wykorzystania w infrastrukturze teleinformatycznej energetyki, *Wiadomości Elektrotechniczne*, ISSN 0043-5112, 6/2008, s. 3-8.
- [15] www.westermo.com
- Autor:** dr inż. Michał Szewczyk, Politechnika Śląska w Gliwicach, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-Mail: Michal.Szewczyk@polsl.pl



XI Sympozjum Pomiarów Magnetycznych Częstochowa/Czarny Las, 20-22 października 2014

*ze specjalnymi sesjami dla młodych naukowców i doktorantów
pod auspicjami Międzynarodowych Warsztatów Doktoranckich
OWD*

Organizatorzy:

- Polskie Towarzystwo Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Oddział Częstochowski
- oraz:
- Wydział Elektryczny Politechniki Częstochowskiej
- Instytut Elektrotechniki, Warszawa
- Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa
- Ariel University, Izrael
- Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu

Tematyka Sympozjum obejmuje teoretyczne i praktyczne aspekty pomiarów magnetycznych:

- pomiary wielkości magnetycznych,
- struktura i właściwości materiałów magnetycznych,
- pośrednie pomiary właściwości z wykorzystaniem pomiarów magnetycznych,
- nieniszczące badania materiałów,
- sensory i aktuatory,
- promieniowanie elektromagnetyczne,
- techniki pomiarowe w zakresie wysokich częstotliwości,
- modelowanie zjawiska histerezy oraz predykcja strat,
- obwody magnetyczne w urządzeniach elektrycznych,
- komputerowo wspomaganą wizualizację pola elektromagnetycznego w projektowaniu systemów mechatronicznych,
- bioelektromagnetyzm.

Ważne daty:

- 15.06.2014 r. – przesłanie karty zgłoszeniowej oraz streszczenia referatu,
 30.06.2014 r. – wniesienie opłaty konferencyjnej,
 15.09.2014 r. – przesłanie pełnego tekstu referatów,
 10.10.2014 r. – podanie programu Sympozjum,
 20-22.10.2014 r. – XI Sympozjum Pomiarów Magnetycznych.

Szczegóły: <http://spm.el.pcz.pl>

Kontakt i informacje:

Przewodniczący Komitetu Organizacyjnego: dr hab. inż. Jan Szczygłowski, prof. PCz.,
 e-mail: jszczyg@gmail.com
 Sekretarz: dr inż. Mariusz Najgebauer, e-mail: najgebauer@el.pcz.czest.pl