

Platforma komunikacyjna rozległego systemu czasu rzeczywistego

Streszczenie. Przewidywana w niedalekiej przyszłości ewolucja systemu energetycznego w kierunku Smart Grid pociąga za sobą konieczność stosowania najnowszych, ale jednak niestandardowych rozwiązań IT. Komercyjne technologie telekomunikacyjne nie sprawdzają się wobec konieczności sterowania w czasie rzeczywistym systemem przy odległościach setek /tysięcy km między węzłami, gdy jednocześnie muszą być zagwarantowane rygorystyczne zasady bezpieczeństwa. W artykule zaproponowano platformę telekomunikacyjną, która spełnia tak rygorystyczne wymagania.

Abstract. Transition of a standard power grids into smart grids, predicted in the near future, require application of non-standard IT solutions. Commercial telecommunication technologies are not sufficient when there is a need for a real-time control of a huge (hundreds of kilometers) distributed system while keeping high safety and security requirements. The paper presents a telecommunication platform that fulfills that rigorous requirements. (**Communication platform for a distributed real time system**).

Słowa kluczowe: czas rzeczywisty, synchronizacja, światłowód jednomodowy, Smart Grid.

Keywords: real-time, synchronization, fiber-optic, Smart Grid.

Wprowadzenie

Proponowana metoda i układ ją realizujący umożliwiają równoczesną synchronizację bardzo odległych (na skalę kontynentu) węzłów systemu pomiarowo-sterującego i jednoczesną transmisję danych pomiędzy nimi w twardym czasie rzeczywistym. W tym artykule przedstawione zostaną założenia platformy oraz podstawowa konfiguracja typu master-slave. Docelowa konfiguracja umożliwi zastosowanie architektury systemu typu "drzewo" z wieloma slave'ami oraz dedykowanymi switchami, w którym zegar zlokalizowany w węźle master jest ściśle zsynchronizowany z referencją czasu UTC. Taki kompletny system teletransmisyjny umożliwia zaoferowanie kilku unikalnych usług skierowanych do operatorów sieci energetycznej. Zapotrzebowanie na te usługi może pojawić się w niedalekiej przyszłości, w ślad za szybkim rozwojem Smart Grid. Dużym ułatwieniem realizacji proponowanej platformy jest istnienie niewykorzystanych "ciemnych" włókien światłowodowych pomiędzy stacjami systemu energetycznego. Dzięki temu, że nie jest wykorzystywana standardowa, powszechnie dostępna, infrastruktura telekomunikacyjna zapewnione jest zabezpieczenie całego systemu przed ingerencją osób niepowołanych, co jest niezwykle istotne w tej gałęzi gospodarki.

Proponowana platforma została skonfrontowana z innymi standardami udostępniania referencji czasu.

Geneza

Energetyczna sieć przesyłowa w wielu krajach rozciągnięta jest na bardzo duże odległości. Przykładem może tu być Skandynawia lub Ameryka Północna. W systemie energetycznym, który zawiera linie przesyłowe o długości kilku tys. km, na końcach których pracują elektrownie, mogą powstać oscylacje mocy o amplitudzie kilkuset MW i częstotliwości kilku Hz [1]. Aby zapobiec takiemu niebezpiecznemu zjawisku podejmuje się próby stabilizacji sieci przesyłowej przy wykorzystaniu PSS (Power System Stabilizer). Podstawą jego działania jest akwizycja wyników pomiarów z odległych od siebie o tysiące km węzłów sieci oraz przesyłanie komend sterujących do również odległych urzędów wykonawczych w ściśle określonych momentach czasu. Zastosowanie standardowego łącza internetowego do przesyłania komend może powodować drżenie (jitter) momentu dotarcia sterowania do odległego węzła, rzędu 150ms. Odpowiada to około połowie okresu oscylacji mocy o częstotliwości

3Hz. Oznacza to, że zamiast stabilizującego ujemnego sprzężenia zwrotnego może powstać destabilizujące dodatnie. W efekcie sterowanie, które powinno spowodować zmniejszenie oscylacji może spowodować ich wzmocnienie. Zatem o sprawności lub nawet bezpieczeństwie energetycznego systemu przesyłowego istotnie decyduje determinizm czasowy przesyłania komend sterujących. Aby zrealizować powyższe oczekiwania zaproponowano metodę synchronizacji i transmisji danych.

Drugim potencjalnym obszarem zastosowania prezentowanej metody jest możliwość wykrywania źródeł zakłóceń propagujących wzdłuż linii przesyłowych. Wykonywany synchronicznie i z wysoką rozdzielczością czasową pomiar napięć chwilowych na końcach linii przesyłowej pozwoli na dokładne określenie na skali czasu charakterystycznych przebiegów zakłóceń. Im większa rozdzielczość czasu obu zsynchronizowanych węzłów pomiarowych tym lepsza precyzja identyfikacji miejsca, w którym wygenerowane zostało zakłócenie.

Proponowany system telemetryczny może być również zastosowany do weryfikacji metod wyznaczania impedancji sieci elektroenergetycznej, przykładowo opisanych w [2].

Dotychczas stosowane metody synchronizacji

Najsilniejszą pozycję wśród urzędów do uzyskiwania referencyjnego sygnału czasu na dużym obszarze ma odbiornik wykorzystujący komunikaty generowane przez satelity systemów nawigacji np. GPS. Takie rozwiązanie ma istotną zaletę, gdyż sygnały z satelitów odbierane są prawie wszędzie na powierzchni Ziemi. Dla odbiorników najwyższej klasy niepewność określenia referencji czasu jest szacowana na poziomie 15 ns [3]. Jednakże w praktycznych zastosowaniach na precyzję określenia czasu przez odbiornik mają wpływ bieżące warunki propagacji sygnału radiowego przez warstwę atmosfery otaczającej Ziemię oraz chwilowy układ satelitów, który bezustannie się zmienia.

Kolejnym źródłem referencyjnego sygnału czasu są nadajniki naziemne, pracujące na falach długich. Przykładem może być obejmujący Europę Zachodnią i Środkową standard DCF77 [4]. Praktyczna niepewność określenia referencji czasu przy jego zastosowaniu szacowana jest na 2ms. Ten standard nie umożliwi przeprowadzenia korekcy opóźnienia propagacji sygnału od stacji nadawczej, która jest zlokalizowana w Mainflingen (GER). Jest również wrażliwy na odbicia odbieranego

sygnału radiowego. Niektóre kraje jak np. USA, Francja, Wielka Brytania, Chiny, Japonia, Kanada nadal utrzymują swoje instalacje podobnego standardu w pełnej sprawności. Jednakże Szwajcaria zaprzestała w 2012 r. emisji referencyjnego sygnału czasu.

W grupie przewodowych metod udostępniania referencyjnego sygnału czasu należy wyróżnić sposób i światłowodowy układ zastosowany do przesyłania referencji czasu pomiędzy GUM w Warszawie, a grupowym wzorcem czasu zlokalizowanym w Borowcu w okolicy Poznania. Odległość pomiędzy tymi ośrodkami przekracza 200km. Uzyskana niepewność odtworzenia referencji czasu w odległej lokalizacji jest rzędu 10ps [5], jednakże nie jest to rozwiązanie dostępne na szerzą skalę.

Rozproszone systemy pomiarowe, które bazują na powyżej wspomnianych metodach pozyskiwania referencyjnego sygnału czasu nie mogą wykorzystać zastosowanego łącza do przekazania informacji pomiędzy swoimi węzłami.

Innymi spotykanymi metodami synchronizacji i równoczesnej transmisji komunikatów pomiędzy węzłami są rozwiązania (IEC 61850, White Rabbit) [6][7] bazujące na standardzie IEEE 1588. Jednak ich zasięg jest ograniczony do kilku km i w energetyce znajdują zastosowanie głównie do rozprowadzania wzorca czasu wewnątrz pojedynczego obiektu, np. rozdzielni. Wykorzystują one zmodyfikowaną infrastrukturę i protokoły Internetu. Wadą tych rozwiązań jest odtwarzanie kopii zegara węzła poprzedzającego, przy zastosowaniu PLL, w każdym z kolejnych węzłów. Skutkuje to kumulacją błędów przekazywanej referencji czasu wnoszonych przez kolejne węzły.

Założenia i zasady budowy systemu

Ten artykuł przedstawia działanie podstawowej struktury platformy, złożonej z pojedynczego węzła nadrzędnego (master), pojedynczego węzła podrzędnego (slave) oraz pojedynczego włókna jednomodowego światłowodu pomiędzy nimi. Przyjęto, że długość jednego przęsła łącza komunikacyjnego pomiędzy dwoma węzłami może osiągać 140 km. Odległość ta wynika z parametrów komercyjnie dostępnych nadajników i odbiorników światłowodowych. Większe odległości, rzędu 1000km, uzyskiwane są przez szeregowe łączenie przęsła przy wykorzystaniu powtarzaczy (repeaterów). Przyjęto jako podstawowy cel działania platformy komunikacyjnej, że bez względu na odległość pomiędzy węzłami powinna zostać zapewniona wysoka i samoczynnie realizowana precyzyjna synchronizacja zegarów w tych węzłach oraz jednocześnie powinna być możliwa dwukierunkowa transmisja (duplex) informacji pomiędzy tymi węzłami w czasie rzeczywistym.

U podstaw prawie wszystkich systemów synchronizacji leży zasada, że czas propagacji informacji w obie strony przez łącze typu duplex jest identyczny. Aby to zapewnić wykorzystuje się pojedyncze włókno światłowodowe i parę cyrkulatorów. Dzięki temu transmisja informacji w obie strony jest realizowana przy zastosowaniu tej samej długości fali. W związku z tym efekty dyspersji lub zmiany prędkości światła, która jest zależna od temperatury światłowodu, będą jednakowo wpływać na czas transmisji w obie strony. Najważniejszą cechą proponowanej metody synchronizacji jest jej niewrażliwość na długość łącza między węzłami. Zrealizowano to przy zastosowaniu indywidualnego dialogu węzła master z węzłem slave, podczas którego mierzone są czasy propagacji ramek między parą urządzeń. Szczegółowy opis stosowanej procedury przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

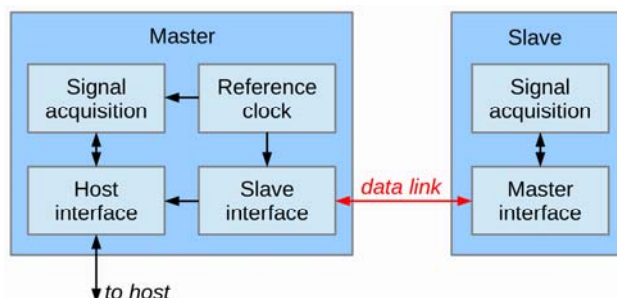
Przyjęto także zasadę, że transmisja informacji na granicy kolejnych przęsła łącza odbywa się bez jej magazynowania i interpretowania. Każdy odebrany bit jest

natychmiast przesyłany do następnego przęsła, bez kompletowania ramki. Istotne jest, aby realizacja sprzętowa powtarzacza między przęsłami zapewniała jednakowy czas propagacji sygnału w obie strony.

Synchronizacja układu czasowego slave'a do zegara mastera powinna odbywać się cyklicznie i bezustannie. Dzięki temu stan łączny jest permanentnie sprawdzany.

Sposób synchronizacji pary węzłów

Schemat blokowy podstawowej struktury systemu (układ master/slave) przedstawia rysunek 1. Węzeł master komunikuje się z komputerem nadzorującym pracę systemu (host). W kierunku do komputera przekazywane są wyniki pomiarów obu węzłów, a w przeciwną stronę przesyłane są dane konfiguracyjne. Komputer nie bierze udziału w procedurze synchronizacji. Zegar mastera pełni funkcję referencyjną w odniesieniu do uniwersalnego zegara slave, który bezwarunkowo podporządkowuje się zegarowi mastera.



Rys.1 Schemat blokowy podstawowej struktury systemu

Pomiędzy węzłami master a slave przesyłane są cyklicznie ramki o strukturze przedstawionej w tabeli 1. Struktura ramek jest identyczna niezależnie od kierunku, w którym przesyłana jest ramka. Ramka zaczyna się preambułą wyróżnioną jako nieprzerwany ciąg co najmniej 18 bitów o jednakowej wartości logicznej n . Następnie przesyłane są pola informacyjne o rozmiarze 18-bitów. To pole zawsze rozpoczyna się bitem $\sim n$ o wartości przeciwnej niż zawierała preambuła a kończy zawsze bitem n o wartości identycznej jak bity preambuły. Pełnią one funkcję bitów startu i stopu. Pomiędzy tymi stałymi bitami przesyłana jest 16-bitowa dana. Po przesłaniu wszystkich pól danych ramka uzupełniana jest bitami o wartości identycznej jak w preambule. To wypełnienie miejsca na niewykorzystane pola ramki płynnie przechodzi w preambułę kolejnej ramki. Taka konstrukcja ramki pozwala na zdefiniowanie momentu wystąpienia zbocza pomiędzy ostatnim bitem preambuły a bitem startu, który rozpoczyna pierwsze pole informacyjne, jako znacznika czasu określanego symbolem SYNC.

Tabela 1. Struktura ramki komunikacyjnej systemu

Nazwa	Długość	Komentarz	
Preambuła	$\geq 18b$	Jednakowe znaki n	
Pole inf. 0	Bit startu	1b	$\sim n$
	Dane	16b	
	Bit stopu	1b	n
Pole inf. 1	18b	Jak pole inf. 0	
...			
Pole inf. i	18b	Jak pole inf. 0	
Zakończenie ramki	zmienna	n	

Węzeł master – nadawanie

Wszystkie zależności czasowe pomiędzy zdarzeniami zachodzącymi w układzie węzła master i w odległym urządzeniu slave nadzoruje zegar węzła master. Określa on momenty rozpoczęcia emisji kolejnej ramki przez ten węzeł. W momencie wyemitowania końca preambuły, czyli znacznika SYNC, zerowany i uruchamiany jest licznik, który ma określić moment odebrania odpowiedzi od węzła slave. Znacznik SYNC jest impulsem synchronizującym system, co oznacza że w momencie jego wystąpienia węzeł master powinien wykonać swoje zadanie (np. uruchomić przetwornik A/C). W ramach wysyłanych przez master kolejne pola informacyjne zawierają poprawkę czasu dla slave. Poprawka ta jest wyliczana przez licznik na podstawie poprzednio odebranych odpowiedzi. Z tego powodu pierwsza skuteczna synchronizacja pary węzłów uzyskiwana jest dopiero po skompletowaniu pierwszego dialogu, który umożliwia zmierzenie czasu propagacji ramki pomiędzy parą węzłów. W następnych cyklach pomiar czasu propagacji ramki jest aktualizowany. Założono, że czas propagacji nie zmienia się istotnie pomiędzy kolejnymi cyklami synchronizacji. W kolejnym polu transmitowany jest indeks ramki, aby master mógł dokonać parowania pytania z odpowiedzią. Pozostałe 16-to bitowe pola ramki służą do przesłania informacji użytkowych.

Węzeł slave

Odbierany przez węzeł slave ciągły strumień bitów poddawany jest nieustannej, realizowanej sprzętowo, analizie w celu wykrycia nieprzerwanego jednorodnego ciągu o długości co najmniej 18 bitów. Wykrycie zmiany wartości bitu na końcu takiej sekwencji identyfikowane jest przez slave jako odebranie znacznika czasu SYNC, który rozpoczyna kolejny cykl pracy węzła slave i uruchamia jego lokalny uniwbibrator. To zdarzenie równocześnie rozpoczyna odczyt pól informacyjnych z szeregowo odbieranych bitów. Ponadto inicjalizuje ono bezzwłoczną emisję odpowiedzi Echo do węzła master. Odczytany indeks ramki odebranej od węzła master jest natychmiast sprzętowo wkomponowywany w ramkę Echo. Poprawka korekcji czasu zawarta w kolejnym polu informacyjnym odebranej od mastera ramki przekazywana jest do lokalnego uniwbibratora węzła slave. Określa ona przedział czasu po jakim w slave ma zostać wygenerowany impuls TRIG, determinujący moment wykonania zadania (np. uruchomienie lokalnego przetwornika A/C) od momentu wykrycia SYNC. Zatem moment wykonania pomiarów przez węzeł master i odległy slave są ze sobą zsynchronizowane. W cyfrowej realizacji uniwbibratora występuje błąd zliczania, typowy dla cyfrowych metod pomiaru czasu i jest on zależny od okresu lokalnego oscylatora. Jest on podstawowym źródłem drżenia. Wynik pomiaru A/C może być bezpośrednio wkomponowany do ramki Echo wysyłanej do mastera lub poddany analizie przez lokalną procedurę numeryczną i dopiero jej wynik, np. fazor, będzie wysyłany.

Węzeł master - odbiór

W odbieranej ramce Echo master wykrywa koniec preambuły w taki sam sposób jak slave wykrywa SYNC. Detekcja końca preambuły zatrzymuje licznik, którego wartość określa czas propagacji sygnału w obie strony. Połowa tej wartości przesyłana jest w następnej ramce do węzła slave jako nastawa uniwbibratora. Do określenia pełnego czasu propagacji sygnału niezbędne jest określenie różnicy indeksów pomiędzy bieżącą wysyłaną ramką a odebraną oraz uwzględnienie okresu cyklu powtarzania dialogu.

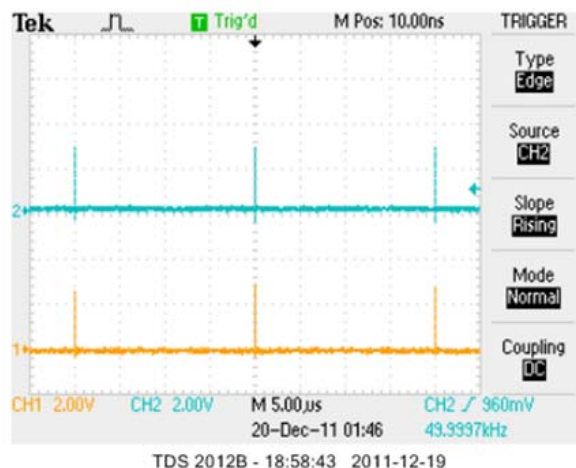
Z odebranej ramki Echo master odczytuje jej indeks oraz zawartość pól informacyjnych otrzymanych od slave.

Eksperyment

Do utworzenia laboratoryjnego stanowiska testowego zastosowano następującą aparaturę oraz podzespoły.

Węzły master i slave zrealizowano przy wykorzystaniu dwóch komputerów przemysłowych NI sbRIO-9602 z układami FPGA Xilinx Spartan-3, w których zaimplementowano algorytm synchronizacji. Główny oscylator układów FPGA ustawiono na 80MHz, tak więc okres realizacji elementarnej pętli algorytmu wynosi 12.5 ns. Światłowodowy układ nadawczy i odbiorczy zrealizowano przy wykorzystaniu nadajników/odbiorników Fiberxon o nominalnym zasięgu do 160 km. Jednomodowe światłowody były ułożone na terenie kampusu AGH (3 km w warunkach rzeczywistych) lub nawinięte były na szpulę (40 km w warunkach laboratoryjnych). Przyjęto, że czas trwania jednego bitu wynosi 100ns.

Rysunek 2 przedstawia oscylogram, na którym kolorem żółtym i niebieskim (odpowiednio CH1 i CH2) pokazane są przykładowe zarejestrowane impulsy SYNC i TRIG w węzłach odpowiednio master i slave odległych od siebie o 3km. Operacja synchronizacji jest powtarzana co 20 μ s. Ścisła synchronizacja obu węzłów zachodziła również dla światłowodów o innych długościach. Wyniki tego eksperymentu potwierdzają zdolność do równoczesnej synchronizacji odległych węzłów oraz przesyłania informacji pomiędzy nimi.



Rys.2 Impulsy SYNC w master (niebieski) i TRIG w slave (żółty) przy długości łącza 3 km.

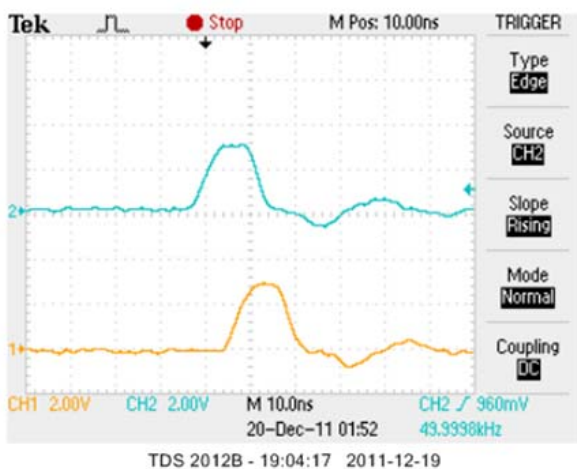
Rysunki 3 i 4 pokazują odpowiednio minimalne i maksymalne opóźnienie pomiędzy impulsami SYNC i TRIG jakie zaobserwowano w układzie testowym. Różnica pomiędzy wartościami tych opóźnień określa maksymalny jitter. Jego wartość odpowiada okresowi zegara 80MHz zlokalizowanego w węzle slave, czyli 12,5 ns. Jitter o zbliżonej wartości zaobserwowano dla 40 km łącza.

Dalszy rozwój systemu

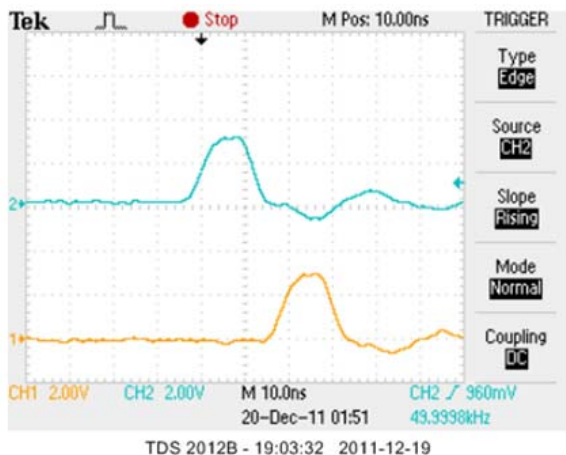
Uzyskanie konfiguracji systemu w postaci drzewa z jednym masterem i wieloma slave'ami wymaga zastosowania dedykowanych i sprzętowo zrealizowanych przełączników (switchy), które spełnią założenia pracy systemu. Muszą one jednocześnie spełniać wymogi stawiane powtarzaczom oraz powinny być zdalnie sterowane przez mastera przy zastosowaniu ramek o strukturze przedstawionej w tabeli 1. Budowa przełączników oraz organizacja pracy całego rozbudowanego systemu zostaną przedstawione w oddzielnej publikacji.

W systemach, od których niezawodności działania zależy bardzo ważna gałąź gospodarki, konieczne jest utworzenie redundancji, która musi natychmiast przejąć

obowiązki podstawowej struktury w przypadku wykrycia niesprawności podstawowego łącza. Tak więc w prezentowanym systemie telekomunikacyjnym uszkodzone łącze lub węzeł muszą być natychmiast wyłączone i zastąpione rezerwą. Dlatego każdy węzeł musi mieć przynajmniej zdwojone porty komunikacyjne, do których przyłączone są inne węzły niż te, które tworzą podstawową konfigurację systemu. Każdy przełącznik lub slave musi zatem monitorować ruch na łączu podstawowym od mastera i w przypadku wykrycia braku cyklicznego nadsyłania ramek synchronizacyjnych węzeł musi natychmiast przełączyć się na ich odbiór z łącza zapasowego. Tak samo musi kierować ramki Echo do łącza zapasowego. Po wykryciu reaktywacji łącza podstawowego może powrócić do podstawowej konfiguracji. W bardziej zaawansowanych wersjach systemu, węzeł w przypadku wykrycia braku transmisji na wszystkich łączach od mastera, powinien sam przejąć jego funkcje do czasu usunięcia awarii.



Rys.3 Minimalne zarejestrowane opóźnienie pomiędzy impulsami z rys.2



Rys. 4 Maksymalne zarejestrowane opóźnienie pomiędzy impulsami z rys.2

W zbudowanym modelu laboratoryjnym zastosowano zegar 80MHz, który określa okres realizacji jednego cyklu przez układ FPGA. Gdy algorytm realizowany przez węzły master i slave zostanie zaimplementowany w układzie ASIC, to jego okres pracy i związane z nim drżenie zostaną skrócone przynajmniej do 1 ns. Wtedy przepustowość łącza podczas realizacji protokołu synchronizacji może wzrosnąć ponad 10 krotnie. Zatem procedura synchronizacyjna może

wykorzystywać tylko część zdolności transmisyjnych łącza, albo do systemu można dołączyć większą liczbę węzłów.

W zastosowaniach komercyjnych przedstawianego systemu zawsze stawiana jest kwestia ekonomiczna. Przeznaczenie jednego włókna światłowodowego wyłącznie do zadań synchronizacyjnych oznacza brak możliwości przyszłego wykorzystania tego włókna do komercyjnej komunikacji.

Ze względu na bezpieczeństwo systemu energetycznego nie powinno się stwarzać możliwości ingerencji w jego działanie przez osoby niepowołane. Dlatego łącza wykorzystywane do sterowania tym systemem powinny być wydzielone i niedostępne dla ruchu komercyjnego i wszelkie operacje na wydzielonych światłowodach powinny być ograniczone do dozorowanych podstacji systemu. Próby ingerencji z zewnątrz w konfigurację łączy będą niemożliwe do zrealizowania. Każdy atak typu 'man in the middle' będzie generował alarm z powodu gwałtownej zmiany charakterystyki łącza. Jedynym miejscem, z którego można przejąć kontrolę nad systemem jest stacja, w której zlokalizowany jest master. Jest ona zazwyczaj objęta ścisłą kontrolą dostępu.

Zastosowanie radia USRP [8] czyni prawdopodobnym tworzenie na obszarze, gdzie nie są dostępne światłowody, lokalnych systemów czasu rzeczywistego ad hoc lub nawet zawierających mobilne węzły.

Obszary innych zastosowań

Możliwość bardzo precyzyjnego synchronizowania węzłów pomiarowych, które są odległe od siebie o setki km może pozwolić na wykorzystanie opisywanego systemu do weryfikacji precyzji działania innych systemów synchronizacji. Uzyskanie wysokiej jakości synchronizacji wielu węzłów systemu obejmującego kontynent pozwala na niezależną weryfikację jakości pracy systemów satelitarnych np. GPS.

Rozwijający się standard LTE może wykorzystać referencję czasu o bardzo wysokiej dokładności do synchronizacji stacji BTS.

Autorzy: dr inż. Jerzy Nabielec, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział EAIIB, Katedra Metrologii i Elektroniki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków. E-mail: jena@agh.edu.pl; dr inż. Andrzej Wetula, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział EAIIB, Katedra Metrologii i Elektroniki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: wetula@agh.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Chow J. H., Ghiocel S. G., An Adaptive Wide-Area Power System Damping Controller using Synchrophasor Data, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4614-1605-0_17
- [2] Borkowski D., A new method for noninvasive measurement of grid harmonic impedance with data selection, *Int. Trans. on Electrical Energy Systems* 25(12), February 2015 DOI: 10.1002/etep.2068
- [3] <http://www.trimble.com/timing/resolution-t.aspx>
- [4] <http://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt4/fb-44/ag-442/dissemination-of-legal-time/DCF77.html>
- [5] Śliwczyński Ł., Krehlik P., Buczek Ł., Lipiński M., Active Propagation Delay Stabilization for Fiber-Optic Frequency Distribution Using Controlled Electronic Delay Lines, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, VOL. 60, NO. 4, April 2011, str. 1480-1488
- [6] <https://webstore.iec.ch/publication/6028>
- [7] <http://www.ohwr.org/projects/white-rabbit>
- [8] <http://www.ni.com/newsroom/release/national-instruments-introduces-usrp-rio-next-generation-wireless-prototyping-platform/pl>