

mgr inż. Paweł Skoczyłoda
mgr inż. Mirosław Sobczak
mgr inż. Sergiusz Trzcionka
Zakład Produkcyjny Aparatury Elektrycznej Sp. z o.o.
ul. Konopnickiej 13, 41-100 Siemianowice Śląskie

CYFROWA STACJA. STANDARDY NORMUJĄCE METODY PRZESYŁANIA PRÓBKOWANYCH WARTOŚCI PRĄDÓW I NAPIĘĆ POPRAZ SZYNĘ PROCESOWĄ A PRAKTYCZNE DOŚWIADCZENIA Z OPRACOWYWANIA JEDNOSTKI SCALAJĄCEJ TYPU TMU-11

Streszczenie

Niniejszy artykuł zawiera analizę rozwoju standaryzacji przesyłania danych przez szynę procesową w cyfrowej stacji elektroenergetycznej. Porównuje przesyłanie próbkowanych danych analogowych w ramce ethernetowej wg norm IEC61850 oraz normy IEC61869-9. Opisuje główne różnice sposobów strumieniowania danych oraz podaje przykład praktycznej realizacji w jednostce scalającej typu TMU-11.

1. Wstęp

Od samego początku urządzenia elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej są podłączane przewodami bezpośrednio do obwodów wtórnych przekładników pomiarowych. Indukowane w tych obwodach napięcia i prądy mierzone są przez urządzenia EAZ, które na tej podstawie podejmują odpowiednie decyzje. Połączenie takie ma wiele zalet, z których jedną z najważniejszych jest przejrzystość oraz łatwość diagnostyki, ponieważ każda mierzona wartość doprowadzona jest oddzielnymi przewodami. Zaleta ta, jest jednocześnie bardzo poważną wadą układu, ponieważ pociąga za sobą konieczność układania na obiektach dziesiątek kilometrów przewodów. W dobie rozwoju cyfrowej transmisji danych pojawiła się możliwość eliminacji tej wady. Pomysł w założeniu wydaje się bardzo prosty: przekładniki, będą wysyłać cyfrowo wartości prądów i napięć poprzez jedno połączenie do wspólnej sieci komputerowej. Urządzenia zabezpieczeniowe będą pobierać z tej sieci te informacje, których potrzebują. Do sieci tej mogłyby być podłączone i korzystać z dostępnych w niej informacji również inne urządzenia jak liczniki energii czy rejestratory. Rozwiązanie takie miało przede wszystkim ograniczyć koszty oraz zmniejszyć ilość zużytego materiału poprzez mniejszą ilość miedzianych przewodów i rdzeni przekładników. Problemem do rozwiązania pozostawało jednak ustalenie uniwersalnego formatu, w jakim te cyfrowe sygnały będą przesyłane.

2. Standaryzacja danych przesyłanych na szynie procesowej.

Dla ustandaryzowania zagadnienia przesyłania próbkowanych danych analogowych (Sampled Values - SV) w sieci informatycznej stacji elektroenergetycznej opracowano normę IEC61850-9, która opisuje sposób prezentacji danych SV ramce Ethernet. Ta wersja normy była bardzo otwarta i pozostawiała wiele zagadnień do indywidualnego rozwiązania przez producentów urządzeń. Nie były w niej określone tak podstawowe parametry jak częstotliwość próbkowania czy

ilość danych w jednej ramce Ethernet. Brak sprecyzowania tych parametrów powodował, że urządzenia pracujące w sieci musiały mieć ogromnie rozbudowane możliwości konfiguracyjne.

Jako przykład wskazać można częstotliwość próbkowania, która jest kluczowym parametrem w algorytmach zabezpieczeń. Ma ona wpływ na dokładność wyliczanych wielkości takich jak np. impedancja w funkcji odległościowej. Jeżeli algorytm jest zaprojektowany na otrzymywanie próbek z częstotliwością 4kHz, nie będzie działał poprawnie w sytuacji, gdy próbki będą do niego dostarczane z częstotliwością 3kHz. Można oczywiście wyobrazić sobie algorytmy które dzięki interpolacji są w stanie przeliczyć próbki 3kHz na 4kHz lecz wymaga to dodatkowej mocy obliczeniowej i tak już mocno obciążonych procesorów, oraz może generować dodatkowe błędy i zwłokę w działaniu zabezpieczeń. W rezultacie urządzenia różnych producentów miały bardzo utrudnioną wzajemną komunikację.

Aby tego uniknąć, grupa producentów zabezpieczeń opracowała dokument będący zaleceniem do sposobu prezentacji i przesyłania strumieni próbek: IEC61850-9-2LE. W przypadku częstotliwości próbkowania przyjęto dwa standardy: 80 próbek na okres dla celów zabezpieczeniowych oraz 256 próbek na okres dla celów pomiarowych. Standard ten dokładnie określił sposób prezentacji danych w ramach: 4 pomiary prądów (trzy fazowe, prąd $3I_0$), oraz 4 pomiary napięć (trzy fazowe, napięcie U_0), sprecyzował takie parametry jak nazwa strumienia, wskazuje rodzaj danych przesyłanych oraz określa liczbę struktur z próbkami (ASDU) w jednej ramce. Wdrożenie bardziej szczegółowych zaleceń znacząco uprościło nawiązanie komunikacji pomiędzy urządzeniami różnych producentów.

Równolegle do norm dotyczących urządzeń EAZ opracowana została norma o numerze IEC61869-9 dotycząca przekładników pomiarowych. Norma ta odnosi się częściowo, również do struktury strumieni SV wysyłanych przez przekładniki. Wytyczne w niej zawarte są jednak znacząco inne niż w obowiązującej ciągle normie IEC61850-9-2LE powodując kolejne problemy z kompatybilnością urządzeń.

Z uwagi na ten fakt, w normie IEC61869-9 pojawił się zapis, że urządzenie wysyłające strumienie SV powinno mieć możliwość skonfigurowania przynajmniej jednego strumienia dla zabezpieczeń wg „starszego” schematu zgodnie z IEC61850-9-2LE. W celu zobrazowania rozbieżności w Tablicy 1 zestawiono parametry preferowanych strumieni według obydwu norm. W tabeli zestawiono tylko strumienie dla systemu elektroenergetycznego 50 Hz, jaki występuje w Polsce. Przedstawiona poniżej Tablica 1 podsumowuje najważniejsze rozbieżności w koncepcji przesyłania spróbkowanych wartości prądów i napięć. Wprowadzane zmiany w wytycznych podyktowane są rozwojem wiedzy z zakresu problematyki przesyłu danych oraz próby zwiększenia uniwersalności norm. Przykładowo częstotliwość 4800Hz jest podzielna przez 50 i 60Hz dzięki czemu można uzyskać pełną liczbę próbek na okres zarówno w sieciach o niższej i wyższej częstotliwości. Zmiany takie, a w szczególności dualność przepisów pociąga za sobą konkretne wyzwania technologiczne dla urządzeń wysyłających dane, takich jak cyfrowe przekładniki oraz urządzenia typu Merging Unit.

Tablica 1. Parametry preferowanych strumieni zgodne z normą IEC61869-9.

| Przeznaczenie strumienia danych SV | Częstotliwość próbkowania Hz | Liczba struktur ADSU w ramce | Liczba ramek na sekundę | Opis tekstowy strumienia ¹ | Opis |
|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Zabezpieczenia | 4000 | 1 | 4000 | F4000S1I4U4 | 9-2 LE (najczęściej stosowany) |
| | 4800 | 2 | 2400 | F4800S2IiUu | Preferowany wg normy IEC61869-9 |
| Pomiary | 12800 | 8 | 1600 | F12800S8I4U4 | 9-2 LE |
| | 14400 | 6 | 2400 | F14400S6IiUi | Preferowany wg normy IEC61869-9 |
| Przetworniki pomiarowe wymagające dużego pasma przenoszenia | 96000 | 1 | 96000 | F96000S1IiUi | Preferowany wg normy IEC61869-9 |

Poniżej zostały przedstawione najważniejsze różnice w standardach:

- Częstotliwość próbkowania.

Zapewnienie zgodności z normą narzuca konieczność wysyłania próbek, wg nowego standardu, zgodnie z opisem F4800S2IiUu oraz próbek F4000S1I4U4 aby zapewnić kompatybilność wsteczną z 9-2LE. Urządzenie musi zatem próbować sygnały analogowe z częstotliwościami 4 kHz i 4,8 kHz. Praktyczne rozwiązanie tego niesie za sobą szereg wyzwań konstrukcyjnych, ponieważ trudno jest wykonać to za pomocą jednego przetwornika analogowo-cyfrowego. Najmniejsza wspólna wielokrotność obydwu liczb, która umożliwiłaby pobieranie danych dla obydwu częstotliwości wynosi 24000 Hz. Próbkowanie w tak wysokiej częstotliwości pociąga za sobą konieczność dodatkowych filtrów, aby uniknąć zjawiska aliasingu i w praktyce może okazać się niemożliwe do realizacji. Rozwiązaniem może być stosowanie dwóch torów przetworników analogowo – cyfrowych, co dodatkowo komplikuje konstrukcję urządzenia lub zastosowanie przetwornika z przełączaną częstotliwością próbkowania. To drugie rozwiązanie uniemożliwia jednoczesne wysyłanie strumieni 4 i 4,8kHz, a można wyobrazić sobie sytuację gdy oba strumienie z tych samych przekładników są obecne w sieci i wykorzystywane przez różne urządzenia, z których jedne wykorzystują strumienie wg 9-2LE a inne wg IEC61869-9.

- Struktura wysyłanych pomiarów.

Dość istotną różnicą w strumieniach w normie IEC61869-9 jest większa dowolność struktury wysyłanych pomiarów. Podczas gdy w zaleceniu 9-2LE w jednej ramce SV przesyłane są 4 prądy i 4 napięcia, norma IEC61869-9 określa tylko maksymalną liczbę mierzonych kanałów, która wynosi 24 (dla prędkości połączenia 100Mbit/s). Oba standardy różnią się liczbą struktur z danymi (ASDU) umieszczonymi w jednej ramce. Zalecenie 9-2 narzuca przesyłanie jednej struktury ASDU dla celów zabezpieczeniowych oraz ośmiu dla celów pomiarowych. Dla normy 61869-9 jest to odpowiednio dwie oraz sześć struktur.

¹ Norma IEC61869-9 wprowadza koncepcję nazwy strumienia, tak aby był on łatwiej rozpoznawalny przez człowieka.

Schemat tego opisu jest następujący: **Ff Ss li Uu**, gdzie poszczególne litery oznaczają:

f – częstotliwość próbkowania wyrażona liczbą próbek na sekundę,

s – liczba struktur ASDU (próbek) w jednej wiadomości,

i - liczba prądów mierzonych w jednej strukturze ASDU,

u – liczba napięć mierzonych w jednej strukturze ASDU.

Sprostanie obydwóm standardom jednocześnie stanowi dodatkowe wyzwanie technologiczne, gdyż różne częstotliwości próbkowania wraz z inną ilością danych oraz struktur ASDU zmieniają przedziały czasu, w których wysyłane są ramki, co z kolei wymaga przestawienia zegarów sterującymi układem przerwań całego systemu. Co z kolei jest niezbędne, aby spełnić wymagania czasowe pisane w punkcie poniżej.

- Maksymalny czas przetwarzania.

Norma IEC61869 w odróżnieniu od zalecenia 9-2LE wprowadza maksymalny czas przetwarzania tzn. czas od momentu, w którym próbka powinna być zapamiętana wynikający ze zsynchronizowanego zegara, do momentu gdy ramka z zarejestrowaną próbką zostanie wysłana przez urządzenie. Czasy zostały zestawione w Tabelicy 2.

Tablica 2. Maksymalny czas przetwarzania próbkowanych sygnałów.

| Klasa urządzeń | Maksymalny czas przetwarzania |
|--|-------------------------------|
| Urządzenia do pomiaru jakości | 10 ms |
| Zabezpieczenia i urządzenia pomiarowe | 2 ms |
| Urządzenia kontroli DC, niskie pasmo przenoszenia, duże wymogi czasowe | 100 μ s |
| Urządzenia kontroli DC, duże pasmo przenoszenia | 25 μ s |

Zapewnienie czasu przetwarzania mniejszego niż 2 ms dla celów zabezpieczeniowych wymaga przemyślenia środowiska programowego przetwarzającego i wysyłającego strumienie. Nie jest możliwe wykorzystanie systemu operacyjnego np. Linux z powodu niezapewnienia jednakowego czasu wykonywania operacji. Rozwiązaniem może być zastosowanie systemu czasu rzeczywistego, jednak z powodu dużej ilości obliczeń konieczne jest dodatkowe wspomaganie sprzętowe. Można to osiągnąć przez układy logiki programowalnej np. FPGA.

- Sposób synchronizacji.

Różnicą między oboma standardami jest sposób synchronizacji. Zalecenie IEC61850-9-2LE proponowało synchronizację przez sygnał 1PPS doprowadzony łączem optycznym, natomiast norma IEC61869 jako źródło synchronizacji wskazuje zegar wykorzystujący protokół PTP, opisany w normie IEC 61588:2009 (zwany też IEEE1588). Drugie rozwiązanie ma tą zaletę, że ogranicza ilość przewodów między urządzeniami, gdyż do transmisji ramek zegara PTP wykorzystywana jest szyna procesowa. Urządzenie Merging Unit powinno mieć możliwość synchronizacji przez oba standardy z możliwością wyboru.

- Medium transmisyjne.

Norma IEC 61869-9 zaleca stosowanie, jako medium transmisyjne światłowodu o parametrach: 100Base-FX, full duplex, multimode, 1300nm. Dopuszcza jako rozwiązanie przyszłościowe technologię 1Gb/s (1000BASE-LX). Zalecanym jest złącze typu LC podczas gdy dokument 9-2LE zalecał złącze typu ST. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie uniwersalnych gniazd SFP do których można włożyć wkładkę o wymaganej prędkości i długości fali.

Ważnym aspektem, który należy uwzględnić przy projektowaniu sieci szyny procesowej jest przewidzenie rozdzielania strumieni dla konkretnych urządzeń odbiorczych. Wydaje się że najłatwiejszym rozwiązaniem jest „wrzucenie” wszystkich strumieni do jednej sieci. Jednak należy mieć na uwadze przepustowość sieci. Norma IEC61869 przewiduje do transmisji standard optyczny 100BASE-FX oraz dopuszcza, jako przyszłościowy 1000BASE-LX i nie odróżnia się tutaj od normy IEC-61850. Przyjmując, że pojedynczy strumień SV F4800S2I414 ma rozmiar około 220 Bajtów, wysyłany jest 2400 razy na sekundę, zajmuje on pasmo 4Mb/s. Stosując łącze o przepustowości 100Mb, możemy przesłać teoretycznie 25 strumieni. W praktyce jednak, z uwagi na pozostały ruch w sieci, mówi się o ośmiu strumieniach. Zakładając, że jeden strumień to jedno pole rozdzielni, możemy obsłużyć 8 pól, co jest wartością często niewystracającą. Rozwiązaniem jest fizyczne rozdzielanie sieci lub stosowanie wirtualnych podsieci VLAN oraz odpowiednie nadawanie

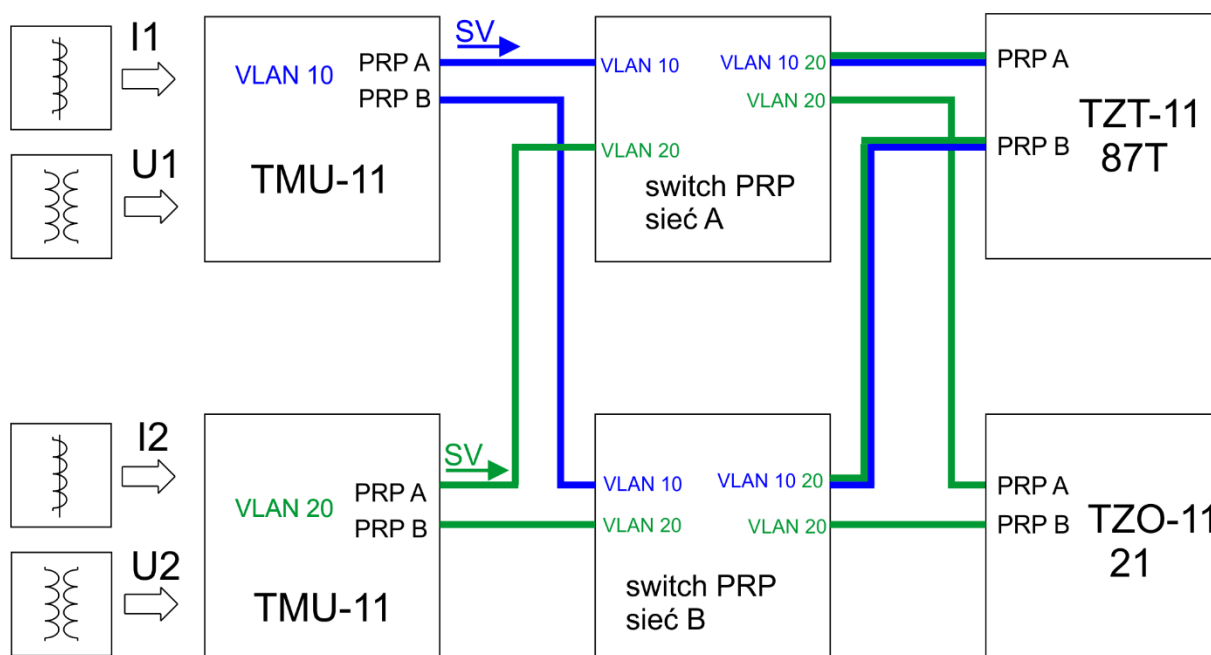
strumieniom indywidualnych adresów MAC i unikalnych numerów APPID. Urządzenia odbiorcze muszą posiadać sprzętowe filtrowanie odbieranych ramek, gdyż analiza każdej ramki pod kątem „czy jest ona adresowana do mnie” przekroczyłaby moce obliczeniowe procesorów.

W celu zapewnienia większej niezawodności zaleca się budowę sieci redundantnych. Stosuje się powszechnie dwie metody PRP i HSR.

Metoda PRP polega na budowie dwóch niezależnych sieci i każde urządzenie jest podłączone jednocześnie do obu sieci. Ramki Ethernetowe są oznaczone specjalnym znacznikiem i licznikiem, aby urządzenie, które odbiera ramkę eliminowało duplikat przychodzący z drugiej sieci.

W metodzie HSR urządzenia podłączone są ze sobą w pierścień (ring) i podobnie jak w sieci PRP, ramki oznaczone są znacznikiem i licznikiem. Urządzenie odbiera ramkę jednym portem i natychmiastowo przesyła drugim (wymaga wspomagania sprzętowego). Gdy jedno z urządzeń odbierze ramkę na obu portach, to znaczy że ramka przebyła cały pierścień w obu kierunkach i urządzenie to przerywa dalszą propagację ramki. Urządzenia podłączone do szyny procesowej stacji elektroenergetycznej powinny zapewniać komunikację w obu tych standardach.

Na Rys.1 przedstawiono przykładowy fragment sieci przesyłającej strumienie Sampled Values. Sieć jest zbudowana w architekturze PRP, tzn. jest rozdzielona na dwie sieci oznaczone literami A i B. Urządzenia Merging Unit wysyłają próbkowane wartości prądów i napięć i oznaczają wysyłane ramki znacznikiem VLAN, w tym przypadku o identyfikatorach 10 i 20. Przełączniki sieciowe rozdzielają ramki na podstawie nadanych im identyfikatorów VLAN (pracują w trybie Trunk) i kierują strumienie próbek do urządzeń odbiorczych. Urządzenie TZT-11 pełniące funkcję zabezpieczenia różnicowego dostaje próbki z obydwu jednostek Merging Unit. Urządzenie TZO-11 nie potrzebuje wartości prądów i napięć z pierwszego Merging Unit, dlatego są one filtrowane w przełączniku sieciowym na podstawie identyfikatora VLAN.



Rys.1 Przykładowy fragment sieci przesyłającej sygnały SV wykorzystującej PRP oraz VLAN.

W Tabelicy 3 przedstawiono zestawienie standardów i protokołów, które musi obsługiwać urządzenie Merging Unit obsługujące szynę procesową, które wysyła próbkowane sygnały analogowe oraz zdarzenia stacyjne GOOSE.

Tablica 3. Zestawienie standardów obsługiwanych przez Merging Unit w szynie procesowej.

| Nazwa standardu | Norma | Funkcja / Opis |
|-------------------------------------|---|--|
| HSR | PN-EN 62438-3 | Zapewnienie redundancji w postaci ringu |
| PRP | PN-EN 62438-3 | Zapewnienie redundancji w postaci podwójnej sieci |
| VLAN | IEEE802.1Q | Tworzenie wirtualnych podsieci, do rozdzielenia strumieni do różnych odbiorców |
| Cyfrowy interfejs dla przekładników | PN-EN IEC 61869-9 | Norma opisuje strukturę danych Sampled Values w ramce Ethernet, częstotliwość próbkowania |
| Cyfrowy interfejs, zalecenie | IEC 61850-9-2LE | Jeden z wariantów normy PN-EN IEC 61869-9 dodany w celu zapewnienia kompatybilności wstecznej. |
| Przesyłanie wartości próbkowanych | IEC 61850-9-2 | Ogólne zasady przesyłania próbkowanych sygnałów analogowych |
| GOOSE | PN-EN 61850-8-1 | Przesyłanie zdarzeń stacyjnych GOOSE |
| Ethernet | IEEE802.3 | Warstwa łącza modelu ISO/OSI, ramka Multicast |
| PTP | IEC 61588:2009 / IEEE1588 IEC 61850-9-3 | Synchronizacja czasu Power Profile |

3. Praktyczna realizacja urządzenia typu merging unit.

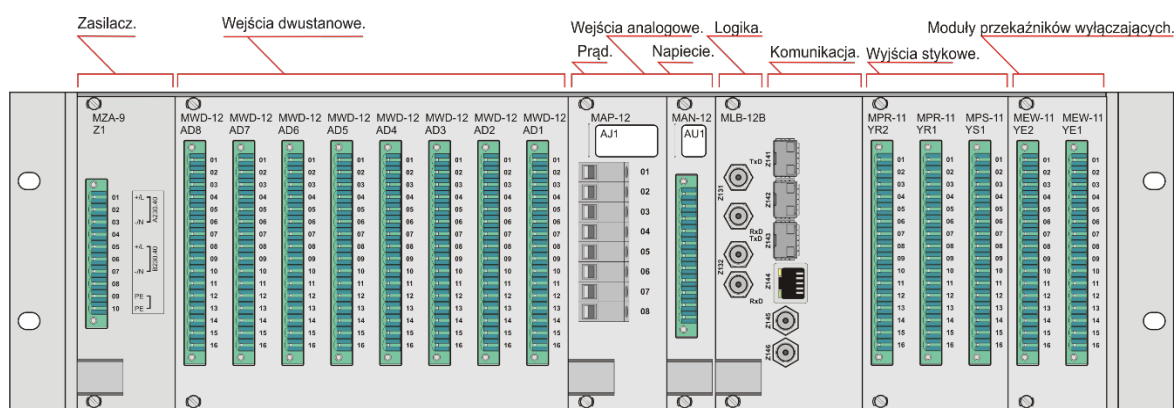
Projektując urządzenie Merging Unit, które poprzez zgodność z wieloma standardami będzie w stanie zasilić szynę procesową w uniwersalne komunikaty, czytelne dla wszystkich, zgodnych z normami, urządzeń konieczne było zmierzenie się z opisanymi powyżej problemami. Wiązało się to często z koniecznością opracowania koncepcyjnego rozwiązania, którego wybór rzutować będzie na strukturę sieci i urządzeń w cyfrowej stacji elektroenergetycznej. Możliwość wysyłania próbek z częstotliwościami 4kHz i 4,8kHz w urządzeniu TMU-11 została rozwiązana przez zastosowanie przetwornika z przełączaną częstotliwością próbkowania. Rozwiązanie takie daje stabilny i nieopóźniony strumień danych, uniemożliwia jednak jednoczesne wysyłanie obydwu strumieni. W sytuacji kiedy architektura sieci będzie wymagała zasilenia jej równolegle w strumienie wg 9-2LE oraz wg IEC61869-9 konieczne będzie zastosowanie dodatkowej jednostki scalającej skonfigurowanej wg drugiego standardu.

Struktura wysyłanych danych została przyjęta taka sama dla obu strumieni. Wynika ona z przeznaczenia urządzenia do obsługi jednego pola rozdzielni, w którym standardowo mierzone są cztery prądy i cztery napięcia.

Obsługa Ethernetu wykonywana jest przez niezależny dedykowany moduł procesora, który dodatkowo umożliwia sprzętowe filtrowanie ramek Ethernetowych oraz umożliwia nadawanie ramkom znacznika VLAN. Zapewnienie odpowiednio szybkiego czasu przetwarzania osiągnięto poprzez zastosowanie układu programowalnego FPGA współpracującego z procesorem DSP. Program obsługujący procesor napisany został bezpośrednio, tzn. bez systemu operacyjnego. Opracowane rozwiązania hardwareowe wraz z zastosowanymi algorytmami obliczeniowymi pozwoliły na znaczące ograniczenie czasu przetwarzania. Wykonane niezależne pomiary czasu przetwarzania wykazały czas mniejszy niż 1ms, zapewniający zgodności z wymogami normy.

Urządzenie TMU-11 może realizować synchronizację według dwóch sposobów, dzięki czemu jest zgodne zarówno ze starszymi urządzeniami synchronizowanymi sygnałem 1PPS oraz nowszymi urządzeniami synchronizowanymi wg protokołu PTP. W urządzeniu zastosowano gniazda SFP, dzięki czemu można zastosować dowolną wkładkę obsługującą prędkości 100Mbps lub 1Gbps o długości fali dopasowanej do urządzenia odbiorczego, a wbudowany przełącznik sieciowy

zapewnia obsługę redundantnych protokołów HSR i PRP. Na Rys. 2 przedstawiono wygląd urządzenia TMU-11 od strony złącz.



Rys.2. Widok urządzenia TMU-11 od strony złącz.

Dzięki powyższym rozwiązaniom udało się opracować urządzenie Merging Unit spełniające przyjęte założenia i normy będące jednocześnie na tyle uniwersalne, aby zapewnić współpracę z urządzeniami innych producentów, które pracują zgodnie z wytycznymi 9-2LE oraz IEC61869-9. W fazie testowania urządzenia wykonane zostały próby nawiązania komunikacji i przesyłania strumieni danych do urządzeń odbiorczych różnych producentów. Próby te potwierdziły nie tylko pełną kompatybilność opracowanego urządzenia, ale dowiodły jednocześnie, że spełnienie zasad opisanych w obu normach gwarantuje możliwość współpracy urządzeń różnych producentów.

4. Literatura

- [1] PN-EN 61850-9-2:2012 Systemy i sieci telekomunikacyjne do automatyzacji przedsiębiorstw energetycznych - Część 9-2: Specjalne odwzorowanie usługi komunikacyjnej (SCSM) -- Wartości próbkowane przesyłane zgodnie z ISO/IEC 8802-3
- [2] IEC 61850-9-2 LE, Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument transformers Using IEC 61850-9-2, UCA International UsersGroup
- [3] PN-EN IEC 61869-9:2019-10 - wersja angielska Przekładniki -- Część 9: Cyfrowy interfejs dla przekładników
- [4] IEC/IEEE International Standard - Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation