

Monitoring pasywnej infrastruktury telekomunikacyjnej

Krzysztof Borzycki

Paweł Gajewski

Stanisław Dziubak

Artykuł omawia zagrożenia dla pasywnej infrastruktury telekomunikacyjnych sieci kablowych oraz metody monitoringu technicznego linii kablowych i obiektów bezobsługowych, zwłaszcza wykrywania i lokalizacji uszkodzeń kabli. Szczegółowo przedstawiono ograniczenia zasięgu i dokładności lokalizacji uszkodzeń kabli miedzianych i światłowodowych oraz opracowane w Instytucie Łączności elementy sprzętowe scentralizowanego systemu monitoringu SMIT.

monitoring techniczny, linie kablowe, światłowody, obiekty, lokalizacja uszkodzeń, OTDR

Wprowadzenie

Ochrona infrastruktury sieciowej

Sieci telekomunikacyjne i teleinformatyczne zawierają różnorodną infrastrukturę techniczną, taką jak:

- a) linie kablowe światłowodowe i z przewodami miedzianymi,
- b) kanalizacja kablowa i studnie kablowe,
- c) szafy uliczne z zakończeniami kabli miedzianych lub światłowodowych w sieciach dostępowych, w tym światłowodowych FTTH (Fiber To The Home), oraz z urządzeniami aktywnymi hybrydowych sieci dostępowych FTTN (Fiber To The Node) i FTTC (Fiber To The Curb) oraz sieci TV kablowej,
- d) kontenery z wyniesionymi urządzeniami aktywnymi sieci dostępowych,
- e) szafki i pomieszczenia techniczne w budynkach mieszkalnych,
- f) stacje bazowe sieci bezprzewodowych: GSM, LTE, LTE-A, i innych.

Obiekty c) – f) są bezobsługowe. Dla linii kablowych a), które są obiektami rozległymi, o długości sekcji w sieci światłowodowej do 100–120 km, wymagane jest zachowanie ciągłości torów transmisyjnych oraz utrzymanie ich tłumienności w zakresie narzuconym przez budżet mocy współpracujących urządzeń aktywnych. W razie uszkodzenia niezbędne jest jego szybkie wykrycie i lokalizacja. Dla pozostałych obiektów, istnieje podstawowy zestaw wymagań:

- zachowanie fizycznej integralności,
- wykrywanie włamań i nieuprawnionych prac,
- wykrywanie sytuacji grożących przerwą w pracy lub uszkodzeniem, jak: pożar, zalanie wodą lub przekroczenie dopuszczalnego zakresu temperatur.

Zestaw ten może być uzupełniany o wymagania dodatkowe, specyficzne dla danego obiektu.

Podobne potrzeby jak firmy telekomunikacyjne mają operatorzy infrastruktury energetycznej, kolejowej czy przemysłowej, posiadający obiekty bezobsługowe oraz związane z nimi sieci kablowe sygnalizacyjne, informatyczne i sterownicze.

Aktywne urządzenia sieciowe są wyposażone w funkcje nadzoru łączy. Mogą wykryć uszkodzenie toru w linii kablowej monitorując moc sygnału na wejściu odbiornika, lecz bez jego lokalizacji. Niestety, właściciel sieci kablowej wynajmujący pary przewodów i „ciemne” włókna innym użytkownikom nie ma dostępu do tych danych. Pozostaje też problem nadzoru kabli i obiektów aktualnie nieużywanych. Dla zachowania określonych przez umowy z klientami i przez regulatorów parametrów jakości usług – zwykle dostępności (np. 99,99%) i czasu usunięcia uszkodzenia (np. 12 h), oraz sprawnego utrzymania infrastruktury, niezbędne jest ciągle monitorowanie jej elementów przez specjalizowany, autonomiczny system.

Rozpatrując opłacalność takiej ochrony, trzeba uwzględnić, że uszkodzenia sieci telekomunikacyjnych prowadzą często do zakłóceń i przerw w działaniu systemów ważnych dla gospodarki i bezpieczeństwa państwa: administracji, kolejowych, bankowych, kontroli ruchu lotniczego, policji, numerów alarmowych i innych. Związane z tym pośrednie straty są nieporównanie większe od kosztów naprawy przeciętego kabla lub rozbitej szafy z aparaturą.

W opinii autorów najważniejsza jest ochrona stale rozbudowywanych sieci światłowodowych, których łączna długość w Polsce osiągnęła w końcu 2014 r. 315 tys. km [2]. Równocześnie tracą znaczenie tradycyjne sieci dostępowe z parami przewodów miedzianych. Możliwości ich wykorzystania do świadczenia usług szerokopasmowych są ograniczone, natomiast liczba abonentów telefonii stacjonarnej w Polsce zmniejszyła się w latach 2010–2014 o 37% [3].

W artykule przedstawiono zasadnicze informacje o losowych i celowych uszkodzeniach pasywnych elementów infrastruktury telekomunikacyjnej i metodach ich wykrywania. Artykuł jest zilustrowany opisami opracowanych w Instytucie Łączności elementów systemu monitoringu i sposobem określania ich wymaganych parametrów.

Prace badawczo-rozwojowe

Przedstawione dalej rozwiązania techniczne stanowią wyniki następujących przedsięwzięć:

- opracowań własnych Instytutu Łączności: systemu ochrony sieci kablowych SMOK-2U (2005–2010) oraz metodyki i wyposażenia do monitoringu sieci światłowodowych (2015),
- projektu rozwojowego „Prototyp systemu perymetrycznej ochrony telekomunikacyjnej infrastruktury krytycznej – SPOT” (2010–2013),
- projektu rozwojowego „System Monitorowania Infrastruktury Telekomunikacyjnej – SMIT” (2012–2015).

Projekty rozwojowe były finansowane przez NCBR.

W artykule opisano elementy sprzętowe systemu SMIT powstałe w Instytucie Łączności. Oprogramowanie i inne elementy informatyczne systemu stworzone przez Asseco Poland nie są tu omawiane.

Zagrożenia dla infrastruktury telekomunikacyjnej

Uszkodzenia losowe i starzeniowe

Najczęściej spotykane przyczyny uszkodzeń telekomunikacyjnych linii kablowych to:

- a) roboty budowlane i drogowe: występują przecięcia lub zgniecenia kabli oraz uszkodzenia kanalizacji i studni kablowych,

- b) kradzieże kabli i osprzętu, dewastacje, włamania do obiektów i sabotaż,
- c) wypadki komunikacyjne powodujące uszkodzenia podpór linii napowietrznych i szaf ulicznych oraz uszkodzenia studni kablowych przez pojazdy,
- d) warunki zewnętrzne: wichury, szkody górnicze, osuwiska gruntu, oblodzenie, uszkodzenia linii napowietrznych przez złamane drzewa,
- e) błędy w trakcie prac przy utrzymaniu i eksploatacji sieci: przecięcia kabli, zwarcia przewodów, błędne przełączenia, nadmierne zginanie światłowodów,
- f) starzenie kabli, złączy i osprzętu pod wpływem zmian temperatury, wilgoci i wibracji,
- g) przegryzanie kabli przez szczury i inne zwierzęta.

W kraju dominują przyczyny a) i b). Większość kabli telekomunikacyjnych jest układana pod ziemią, w kanalizacji kablowej z bloków betonowych lub rur osłonowych z polietylenu o dużej gęstości (HDPE), bądź w mikrokanalizacji przeznaczonej dla mikrokabli światłowodowych o średnicy 1,5–9,5 mm. Typowe dla linii napowietrznych uszkodzenia d) i f) są względnie nieliczne.

Obiekty bezobsługowe z osprzętem kablowym i urządzeniami aktywnymi (studnie kablowe, szafy uliczne, kontenery) są narażone głównie na:

- działanie skrajnych temperatur zimą i latem,
- uszkodzenia mechaniczne przez pojazdy, złamane drzewa i wandalizm,
- wnikanie wilgoci i uszkodzenia korozyjne szaf o konstrukcji metalowej.

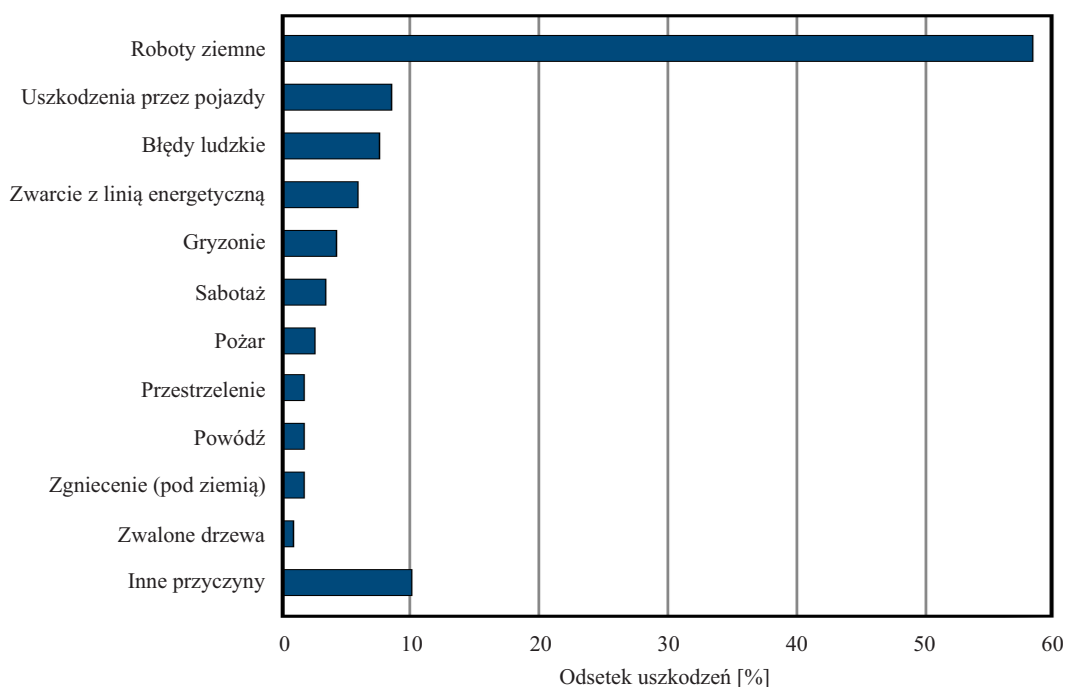
Klimat w Polsce odznacza się szerokim zakresem rocznych zmian temperatury, w porównaniu do większości krajów Europy. Elementy sieci napowietrznych i szafy uliczne muszą sporadycznie wytrzymać temperatury od -40°C zimą do $+70^{\circ}\text{C}$ latem, uwzględniając ich nagrzewanie wskutek nasłonecznienia. Temperatura w szafie z urządzeniami aktywnymi może przekroczyć $+80^{\circ}\text{C}$, co prowadzi do niestabilności parametrów, szybkiego starzenia i awarii urządzeń. Ratunkiem może być wyłączenie przegrzanych urządzeń. Natomiast w temperaturze poniżej -25°C dochodzi do trwałego uszkodzenia hermetycznych akumulatorów ołowiowo-kwasowych używanych do zasilania rezerwowego.

Kable zewnętrzne oraz ich osprzęt pasywny lepiej znoszą działanie zmiennych temperatur i warunków atmosferycznych, ale możliwe są stopniowo postępujące uszkodzenia:

- wnikanie wilgoci i soli oraz korozja złączy wewnątrz osłon złączowych i szaf,
- uszkodzenia kabli z przewodami metalowymi przez wyładowania atmosferyczne,
- korozja i uszkodzenia mechaniczne uchwytów kabli napowietrznych,
- migracja żelaza i włókien w kablach światłowodowych napowietrznych,
- kurczenie się tub w kablach światłowodowych po ekspozycji na wysokie temperatury latem i następnie spadku temperatury zimą poniżej np. -30°C . Włókna ulegają silnym mikrozgięciom wewnątrz skróconych tub, lub wysuwają się z końca kabla w osłonie złączowej, co prowadzi do wzrostu tłumienności [4],
- luzowanie włókien we wtykach złączy światłowodowych po degradacji kleju.

Awarie te są często wynikiem wadliwego montażu lub używania kabli i osprzętu niskiej jakości, bądź zaprojektowanych do pracy w odmiennych warunkach. Zmiany parametrów linii napowietrznych są często skorelowane ze zmianami temperatury lub siły wiatru.

W skali światowej, najczęściej uszkodzeń losowych kabli światłowodowych powodują roboty ziemne. Najlepsze dane statystyczne pochodzą z USA (rys. 1), ze względu na dużą skalę infrastruktury i liczbę raportowanych awarii. Raport Crawforda z 1993 r. [5], [6] dotyczy sieci, których 75% kilometrażu stanowiły kable podziemne, a 25% napowietrzne. Aż 71% uszkodzeń kabli podziemnych nastąpiło podczas robót ziemnych i budowlanych. 86% takich uszkodzeń kabli światłowodowych doprowadziło do przerwy wszystkich włókien.



Rys. 1. Najczęstsze przyczyny uszkodzeń kabli światłowodowych w USA. Dane dla 131 awarii kabli podziemnych i 29 napowietrznych [5]

Dane z kraju potwierdzają ten obraz, z dodatkiem częstych uszkodzeń kradzieżowych.

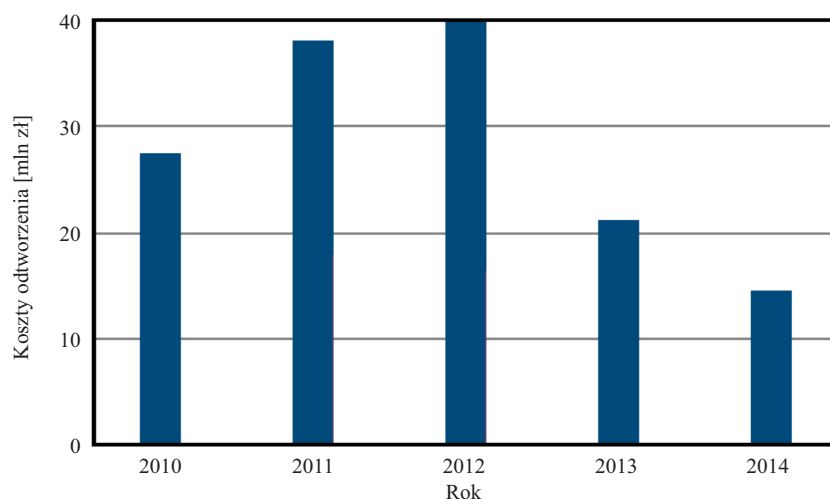
Uszkodzenia celowe

Poważnym zagrożeniem dla sieci kablowych są celowe, przestępcze działania:

- wandalizm, dywersja i sabotaż – przecięcie światłowodów w kilku punktach dla zablokowania mechanizmów protekcji w sieci szkieletowej lub metropolitalnej pozwala sparaliżować sieć obsługującą duże miasto, bank czy przedsiębiorstwo transportowe, bez używania broni palnej, materiałów wybuchowych lub specjalnego oprogramowania [7]. Danych o lokalizacji i funkcji kabli mogą dostarczyć aktualni lub byli pracownicy firm telekomunikacyjnych. W kraju zanotowano m.in. przecinanie kabli dla obniżenia reputacji konkurującego operatora w celu przejęcia jego klientów [8] oraz w wyniku sporów o opłaty za przejście przez nieruchomości [9] lub wynajem kanalizacji;

- kradzieże kabli z przewodami miedzianymi w celu sprzedaży miedzi na złom, a także usiłowania kradzieży, często połączone z uszkodzeniami studni kablowych, kanalizacji i kabli światłowodowych [10], [11]. Te ostatnie nie mają wartości jako surowiec wtórny, a są pracochłonne w naprawie;
- nielegalne korzystanie z kanalizacji kablowej – układanie kabli przez obce firmy bez zgody właściciela i opłat [12]. Możliwe jest uszkodzenie już istniejącej infrastruktury;
- instalowanie odgałęzień do przechwytywania danych, także ze światłowodów [13].

Kradzieże kabli są zwalczane np. przez Orange Polska różnymi metodami, w tym przez instalowanie zamków w pokrywach studni kablowych oraz monitoring techniczny kabli i studni, m.in. za pomocą systemów SMOK-2U i SMIT. Mimo zmniejszenia skali kradzieży po 2012 r. (rys. 2), w 2014 r. nadal zanotowano w Polsce 5130 kradzieży kabli i usiłowań kradzieży związanych z uszkodzeniami, a 200 tys. klientów zostało czasowo pozbawionych usług [10].



Rys. 2. Koszty odtwarzania infrastruktury uszkodzonej przez złodziei i wandalii [10], [11]

Przeciwdziałanie zagrożeniom

Przecięcie kabla w razie sabotażu lub kradzieży powoduje natychmiast trwałą przerwę wszystkich par przewodów lub włókien światłowodowych. Podobnie jest w przypadku ponad 80% uszkodzeń losowych. Również zesterzenie kabla, obciążenie nadmierną siłą rozciągającą wskutek oblodzenia lub wadliwej instalacji, czy skrajnie niska temperatura, powodują wzrost tłumienności wszystkich włókien, choć w niejednakowym stopniu. W takich przypadkach do wykrycia i lokalizacji uszkodzenia wystarcza nadzór jednego włókna lub pary przewodów w linii kablowej.

Nielegalne układanie kabli wymaga wejścia do studni kablowych. Można je wykryć monitorując włązy i drzwi w obiektach, natomiast nie ma wówczas zmian parametrów już istniejących kabli. Również większość aktów sabotażu i kradzieży rozpoczyna się od włamania do studni kablowej, bądź szaf, kontenerów lub pomieszczeń z osprzętem i aparaturą.

Dla przykładu: po pożarze Mostu Łazienkowskiego w Warszawie (14.02.2015), okazało się, że z 35 kabli światłowodowych ułożonych tam przez Wisłę, 15 zainstalowano bez wiedzy i zgody Zarządu Dróg Miejskich [12]. W interesie właścicieli infrastruktury leży więc kontrola dostępu umożliwiająca egzekwowanie wymaganych pozwoleń i opłat.

Tak więc system monitoringu musi umożliwiać:

- wykrywanie otwarcia obiektów i nadzorowanie warunków wewnątrz, np. temperatury,
- wykrywanie nagłych lub systematycznych zmian parametrów linii kablowych.

Podstawowa korzyść z monitoringu to możliwość szybkiej reakcji po wykryciu i lokalizacji włamania lub uszkodzenia, poprzez interwencję pracowników ochrony lub policjantów, a następnie wysłanie serwisantów. Interwencja w ciągu 5–10 minut od włamania prowadzi zwykle do zatrzymania lub spłoszenia złodziei zanim zdążą spowodować istotne uszkodzenia.

Przeznaczenie i funkcje systemu monitoringu sieci

Ochrona infrastruktury sieciowej

Zwalczanie zagrożeń wymienionych powyżej wymaga scentralizowanego rozwiązania do realizacji tzw. hermetyzacji (ochrony przed zagrożeniami z zewnątrz) sieci kablowej, obejmującego:

- pełną i stale aktualizowaną ewidencję elementów sieci (paszportyzację),
- fizyczne zabezpieczenia przed włamaniami: zamki, wzmocnione pokrywy studni, itp.,
- system monitoringu wykrywający, sygnalizujący, lokalizujący i rejestrujący uszkodzenia elementów sieci, nadmierne zmiany parametrów i włamania.

Systemy związane z eksploatacją i utrzymaniem infrastruktury powinny być ze sobą powiązane, m.in. przez wymianę danych i utworzenie zintegrowanego Centrum Nadzoru.

Zakres funkcji systemu SMIT

System SMIT, przeznaczony do ochrony pasywnej infrastruktury sieciowej, umożliwia:

- a) monitorowanie kabli z parami przewodów miedzianych,
- b) monitorowanie kabli światłowodowych z włóknami jednomodowymi,
- c) nadzór obiektów za pomocą czujników: otwarcia, temperatury, pożaru, zalania wodą,
- d) sygnalizację i lokalizację zdarzeń dotyczących kabli i obiektów,
- e) wchodzenie uprawnionych serwisantów do obiektów bez wywoływania alarmu,
- f) rejestrację zdarzeń w bazie danych i sygnalizowanie ich obsłudze Centrum Nadzoru,
- g) prezentację miejsca uszkodzenia lub zdarzenia na mapie,
- h) prezentację opisu obiektu lub linii kablowej i lokalnych danych kontaktowych (serwisanci, agencje ochrony, posterunki policji, itp.),
- i) tworzenie raportów z danymi selekcionowanymi według kryteriów wprowadzonych przez operatora (przedział dat, rodzaj obiektu, region, rodzaj zdarzenia itd.),
- j) eksport wybranych danych do pliku .csv lub.xls.

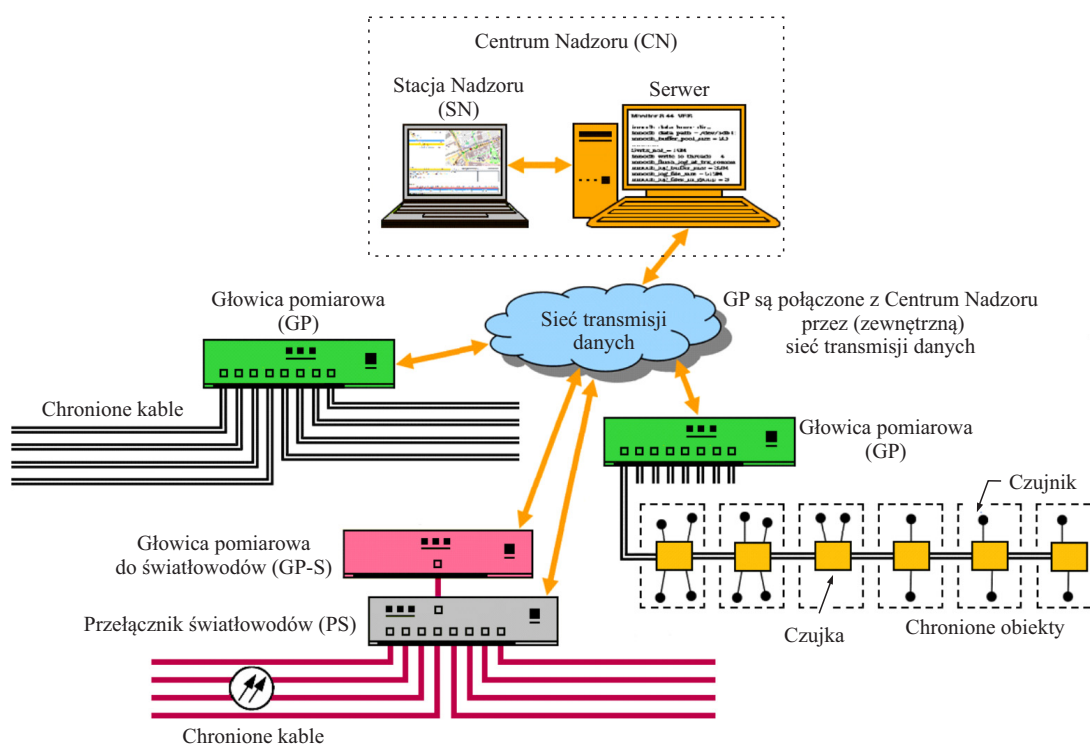
Monitoring linii kablowych polega na wykonywaniu cyklicznie przez system pomiarów parametrów wolnych par przewodów i włókien światłowodowych w każdej linii oraz porównywaniu aktualnych wyników z wynikami pomiarów wzorcowych wykonanych w trakcie kalibracji linii. Zmiana parametrów przekraczająca zaprogramowany zakres tolerancji powoduje alarm w Centrum Nadzoru (CN) i określenie przez oprogramowanie serwera CN miejsca uszkodzenia.

Zestaw funkcji systemu SMIT można adaptować do wymagań operatora sieci i charakterystyki chronionej infrastruktury przez dobór elementów sprzętowych i modułów oprogramowania. Opisy przedstawione dalej dotyczą funkcji a)–d).

Budowa systemu monitoringu SMIT

Scentralizowany system monitoringu nadzoruje linie kablowe za pomocą głowic pomiarowych do kabli miedzianych i czujek (GP) oraz do kabli światłowodowych (GP-S), połączonych z Centrum Nadzoru przez sieć transmisji danych (rys. 3). GP-S współpracują ze zdalnie sterowanymi przełącznikami światłowodów (PS). Głowice pomiarowe i PS są instalowane na obiektach, gdzie zapewniony jest dostęp do przełącznic z zakończeniami linii kablowych oraz zasilania i sieci transmisji danych.

Do ochrony obiektów służą czujniki połączone przewodowo z GP przez interfejsy – tzw. czujki, odpowiedzialne za przesyłanie wskazań z czujników. Elementy systemu rozmieszczone w chronionych obiektach muszą działać po zaniku napięcia zasilającego, stąd czujki są zasilane zdalnie z głowicy pomiarowej.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu monitoringu infrastruktury telekomunikacyjnej. System może zawierać tylko część pokazanych elementów

W dalszym ciągu przedstawiono metody nadzorowania linii kablowych i obiektów oraz przeznaczone do tego wyposażenie. Pominięto Centrum Nadzoru, sieć transmisji danych i specjalne metody monitoringu światłowodowych sieci dostępowych z pasywnym rozgałęzieniem włókien światłowodowych (*Passive Optical Network*).

Monitoring linii kablowych

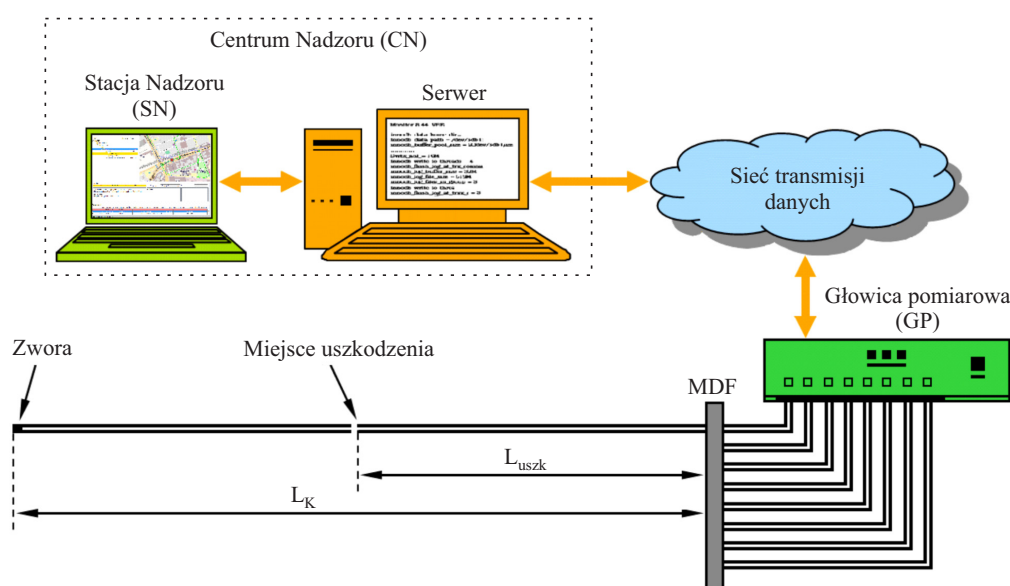
Poniżej przedstawiono zastosowane w systemie SMIT metody monitorowania linii kablowych i lokalizacji ich uszkodzeń: przerw, zwarcie lub wzrostu tłumienności, polegające na wyznaczaniu odległości od GP do miejsca uszkodzenia. Metody te oraz ograniczenia długości monitorowanej linii i dokładności lokalizacji uszkodzenia są odmienne dla kabli miedzianych i światłowodowych. System wykonuje pomiary:

- dla par przewodów miedzianych: rezystancji pętli R, pojemności między przewodami C i rezystancji między przewodami a ziemią (RZ),
- dla włókien światłowodowych: charakterystyk reflektometrycznych (amplituda echa w funkcji opóźnienia i odległości od GP) dla długości fali 1550 lub 1625 nm.

Ponadto, w sekcji „Nielegalne przechwytywanie danych z łączy światłowodowych” przedstawiono metody nielegalnego przechwytywania danych z łączy światłowodowych i możliwości wykrywania takich działań przez system monitoringu wykonujący pomiary reflektometryczne włókien światłowodowych.

Monitoring kabli z parami przewodów miedzianych

Monitorowana wolna para przewodów jest zwarta na końcu linii oddalonym od głowicy pomiarowej, co umożliwia pomiary rezystancji w pętli (rys. 4).



Rys. 4. Lokalizacja uszkodzenia kabla z parami przewodów miedzianych

Uszkodzenia par przewodów w kablach telekomunikacyjnych objawiają się zwykle [14] jako:

- a) zwarcie przewodów ze sobą,
- b) przerwa jednego lub obu przewodów,
- c) upływność izolacji między przewodami, widoczna jako rezystancja bocznikująca,
- d) wtrącenie dodatkowej rezystancji w obwód.

Objawy a) i b) są typowe dla uszkodzeń wywołanych przez nagłe czynniki zewnętrzne: roboty ziemne, budowlane i drogowe, uszkodzenia słupów i szaf kablowych przez pojazdy lub złamane drzewa, kradzieże kabli, błędy montażowe, sabotaż, itp.

Objawy c) i d) sygnalizują na ogół stopniowo rozwijające się uszkodzenie spowodowane korozją przewodów, degradacją złączy lub zawilgoceniem ośrodka kabla. Zawilgocenie ośrodka kabla powoduje też około trzykrotny wzrost pojemności między przewodami [15].

W wymienionych sytuacjach zmienia się widziana przez głowicę pomiarową (GP) rezystancja, która maleje w przypadkach a) i c), a rośnie w przypadkach b) i d). W sytuacji zupełnego zwarcia lub przerwy możliwa jest lokalizacja uszkodzenia na podstawie zmian parametrów elektrycznych pary – rezystancji i pojemności. System wybiera tryb pomiaru odległości w zależności od kierunku zmian (wzrost lub spadek) rezystancji pętli widzianej przez GP. Odległość od GP do miejsca zwarcia na linii zbudowanej z kabli o stałej średnicy przewodów wyznacza się z zależności:

$$L_{\text{uszk}} = L_K \cdot R_p/R_K, \quad (1)$$

gdzie: L_{uszk} – odległość do miejsca uszkodzenia, L_K – długość linii w chwili kalibracji, R_p – rezystancja pętli zmierzona po uszkodzeniu, R_K – rezystancja pętli zmierzona w trakcie kalibracji.

Odległość do miejsca uszkodzenia w przypadku przerwy wyznacza się na podstawie pojemności między przewodami:

$$L_{\text{uszk}} = L_K \cdot C_p/C_K, \quad (2)$$

gdzie: C_p – pojemność zmierzona po uszkodzeniu, C_K – pojemność zmierzona w trakcie kalibracji.

Właściwości kabli i wpływ temperatury

Kable dla sieci dostępowych produkowane w kraju od 1977 r. zawierają pary przewodów miedzianych o średnicy 0,4–0,8 mm w izolacji z polietylenu niskiej gęstości (LDPE), zwykle spienionego [16]. Kable dla innych zastosowań mają przewody o średnicach do 1,4 mm [17]. Dane kabli istotne dla pracy systemu monitoringu zestawiono w tabelicy 1.

Tabl. 1. Parametry par przewodów w kablach miejscowych w temperaturze +20°C [17]

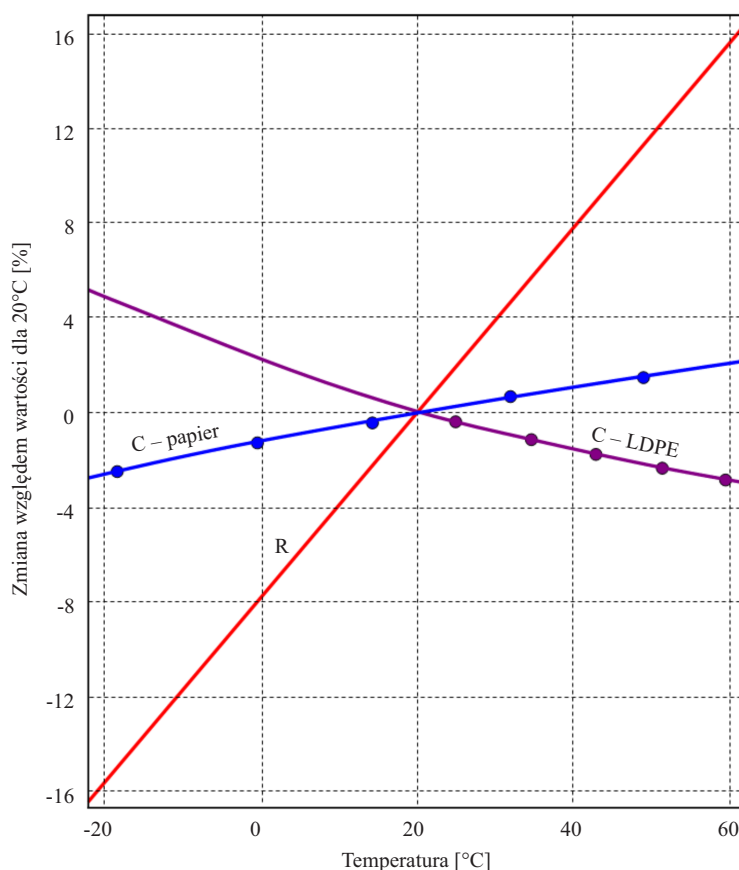
Średnica przewodu	mm	0,4	0,5	0,6	0,8
Rezystancja pętli maksymalna	Ω/km	300,0	191,8	133,2	73,6
Pojemność skuteczna maksymalna	nF/km	55	55	55	55

Tolerancja produkcyjna rezystancji i pojemności par w kablach telekomunikacyjnych wynosi odpowiednio około ±3% i ±10%, co sugeruje wyższą dokładność lokalizacji zwarcia niż przerwy. Niestety, przyłącza abonenckie często zawierają sekcje o różnych średnicach przewodów, których rezystancja jednostkowa zmienia się w stosunku aż 1:4 dla zakresu 0,4–0,8 mm, a zależność (1) daje prawidłowe wyniki tylko dla linii o budowie jednorodnej. Wyznaczenie dokładnej odległości do miejsca uszkodzenia jest możliwe przy znanej długości i średnicy przewodów w każdej sekcji, oczywiście jeśli dokumentacja sieci jest dokładna i kompletna. Problem ten nie występuje przy lokalizacji przerw kabli telekomunikacyjnych, gdyż pojemności jednostkowe między przewodami są nominalnie identyczne.

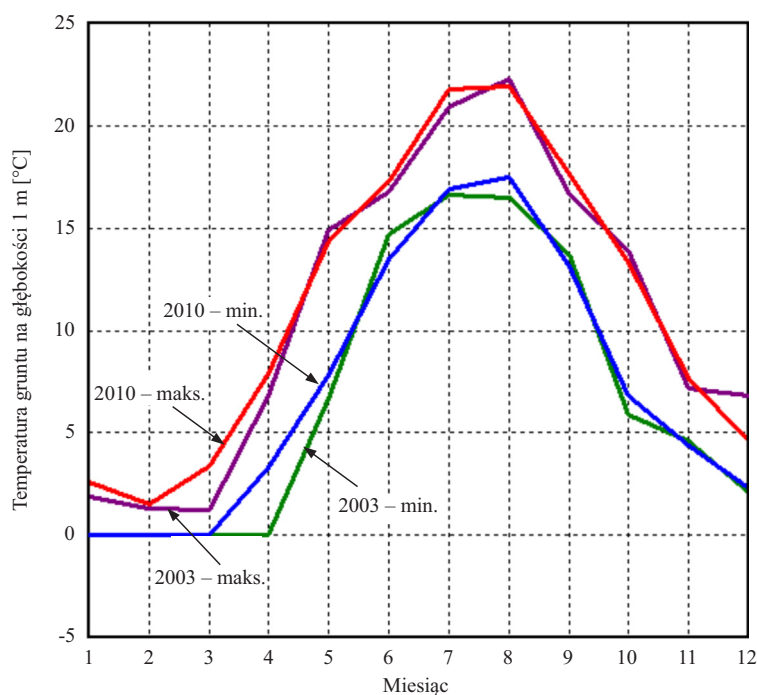
Złącza kablowe, normalnie rozmieszczone co około 100 m, wnoszą pomijalnie niską rezystancję ≤ 0,003 Ω [18] i małą pojemność, nie utrudniając lokalizacji uszkodzeń.

Istotne są natomiast zmiany parametrów par przewodów z temperaturą. Rezystancja przewodów miedzianych rośnie liniowo z temperaturą, w przybliżeniu o $0,393\%/^{\circ}\text{C}$. Zmiany pojemności zależą od izolacji (LDPE spieniony lub lity, papier), materiału wypełniającego ośrodek (żel, powietrze) i ciśnienia wywieranego przez powłokę kabla na ośrodek, od którego zależy proporcja objętości gazów i litego materiału izolacji [19], [20]. Zależności te przedstawia rys. 5. Dane dla pojemności są tylko przykładowe. Współczynnik temperaturowy pojemności może mieć dowolny znak i mieści się w zakresie $\pm 0,2\%/^{\circ}\text{C}$.

Zakres zmian parametrów kabla zależy od przedziału temperatur pracy. Pomiary temperatury gruntu na typowej dla układania kabli telekomunikacyjnych głębokości 1 m wykonane w kraju na terenach nizinnych: w Sobolewie w Wigierskim Parku Narodowym i w Białymstoku [21]–[23] wykazały, że roczna zmienność temperatury nie przekracza $\pm 12^{\circ}\text{C}$ w odniesieniu do średniej rocznej, która jest bliska $+10^{\circ}\text{C}$. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Zmiany rezystancji (R) i pojemności pomiędzy przewodami (C) dla par przewodów miedzianych: w izolacji papierowej w kablu z powłoką ołowianą [19] oraz w izolacji ze spienionego LDPE w kablu z ośrodkiem żelowanym i powłoką polietylenową [20]



Rys. 6. Roczne zmiany temperatury gruntu. Sobolewo, 2003/2010 r. [22], [23]

Stabilizacja temperatury w zimie na poziomie 0°C to skutek zamarzania i topnienia wody gruntowej, która odbiera i dostarcza ciepło. Szerszego przedziału temperatur można oczekiwać w gruncie suchym (piasek) lub w skalistym o wysokiej przewodności termicznej.

Zakres temperatur pracy kabli napowietrznych w Polsce należy do najszerszych na świecie. Rozciąga się od około -40°C, zanotowanych w 1913, 1939/40 i 1987 r. do około +70°C dla kabla nagrzewanego przez promieniowanie słoneczne latem przy bezwietrznej pogodzie.

Określone na podstawie powyższych danych warunki termiczne pracy linii kablowych oraz związane z nimi zmiany parametrów par przewodów w kablach miejscowych zestawiono w tabelicy 2. System monitoringu powinien tolerować te zmiany bez generowania fałszywych alarmów o uszkodzeniach lub przekroczenia zakresu pomiarowego.

Tabl. 2. Temperatury kabli miejscowych i zmiany parametrów par przewodów

Rodzaj kabla	Jedn.	Podziemny	Napowietrzny
Temperatura minimalna	°C	-5	-40
Temperatura maksymalna	°C	+25	+70
Temperatura średnia	°C	+10	+15
Zmienność temperatur	°C	±15	±55
Zmienność rezystancji pętli	%	±6,1	±21,6
Zmienność pojemności	%	±3,0	±11,0

Zasięg lokalizacji uszkodzenia

Parametry chronionej linii powinny mieścić się w zakresach pomiarowych, z marginesami na:

- wzrost rezystancji i pojemności pod wpływem temperatury (tablica 3),
- starzenie, naprawy i in. (10%).

Przy tych założeniach, rezystancja pętli i pojemność pary przewodów linii w temperaturze odniesienia nie powinny przekraczać odpowiednio 85% i 88% górnej granicy zakresu pomiarowego dla linii podziemnych oraz 75% i 82% dla napowietrznych.

Tabl. 3. Użyteczne zakresy pomiarowe głowicy pomiarowej

Rezystancji pętli (nominalny)	4095	%
Rezystancji (linie podziemne)	3508	Ω
Rezystancji (linie napowietrzne)	3061	Ω
Pojemności (nominalny)	1000	nF
Pojemności (linie podziemne)	882	nF
Pojemności (linie napowietrzne)	819	nF

Maksymalna długość nadzorowanej linii z przewodami o średnicy $\geq 0,5$ mm to 15–16 km (tablica 4). Długości przyłączy w Polsce zwykle nie przekraczają 8–10 km.

Tabl. 4. Maksymalne długości monitorowanych linii kablowych

Średnica przewodu	mm	0,4	0,5	0,6	0,8
Rezystancja pętli maksymalna	Ω/km	300,0	191,8	133,2	73,6
Pojemność skuteczna maksymalna	nF/km	55	55	55	55
Zasięg dla $R = 3508 \Omega$ (linie podziemne)	km	11,69	18,29	26,33	47,66
Zasięg dla $R = 3061 \Omega$ (linie napowietrzne)	km	10,20	15,96	22,98	41,59
Zasięg dla $C = 882 \text{ nF}$ (linie podziemne)	km	16,04			
Zasięg dla $C = 819 \text{ nF}$ (linie napowietrzne)	km	14,89			

Niepewność lokalizacji uszkodzenia

Kalibracja linii obejmuje pomiary R_K i C_K oraz wprowadzenie długości L_K . Dane te służą do wyznaczenia odległości między GP a miejscem uszkodzenia zgodnie ze wzorami (1) i (2). Wyznaczanie odległości na podstawie stosunku wartości R lub C z pomiarów przed i po uszkodzeniu eliminuje niektóre źródła błędów, jak tolerancje produkcyjne parametrów kabli (pod warunkiem ich jednorodności) i niedokładność kalibracji głowicy pomiarowej. Dla ograniczenia wpływu temperatury, pożądane jest przeliczenie R_K i C_K do temperatury odniesienia, uwzględniające charakterystyki z rys. 5. Przy prawidłowej kalibracji, błąd pomiaru odległości do miejsca uszkodzenia ΔL_{uszk} w linii o stałej średnicy przewodów zależy głównie od temperatury kabla podczas pomiaru po uszkodzeniu. Zmiany temperatury prowadzą do względnych zmian parametrów par w kablu: rezystancji $R_W = \Delta R/R_{20^\circ\text{C}}$ i pojemności $C_W = \Delta C/C_{20^\circ\text{C}}$. Odpowiednie charakterystyki pokazano na rys. 5.

Błąd pomiaru odległości do miejsca zwarcia określa zależność:

$$\Delta L_{\text{uszk}} = L_{\text{uszk}} \cdot R_W \quad (3)$$

lub w przybliżeniu:

$$\Delta L_{\text{uszk}} = L_{\text{uszk}} \cdot 0,00393 (T_P - T_K), \quad (4)$$

gdzie: R_W – względna zmiana rezystancji z temperaturą, T_K – temperatura kabla w czasie kalibracji, T_P – temperatura kabla w czasie pomiaru po uszkodzeniu.

Podobnie, maksymalny błąd pomiaru odległości do przerwy określa wzór:

$$\Delta L_{\text{uszk}} = L_{\text{uszk}} \cdot 0,002 (T_P - T_K) . \quad (5)$$

Drugie źródło błędów to tolerancje parametrów kabli. W najgorszym przypadku linii złożonej z dwóch segmentów identycznej długości o skrajnych odchyłkach parametrów w przeciwnych kierunkach, z uszkodzeniem pośrodku, względny błąd pomiaru odległości ($\Delta L_{\text{uszk}} / L_{\text{uszk}}$) jest równy tolerancji mierzonego parametru. Do obliczeń przyjęto tolerancje: rezystancji $\pm 2\%$ i pojemności $\pm 5\%$, zakładając że maksymalne odchyłki katalogowe, odpowiednio $\pm 3\%$ i $\pm 10\%$ występują rzadko. Wyniki zestawiono w tabelicy 5, wyróżniając dane dla linii podziemnych.

W szerokim zakresie temperatur lokalizacja przerwy jest dokładniejsza niż zwarcia. Lokalizacja uszkodzenia linii podziemnej z niepewnością równą podwójnej odległości między studniami kablowymi (około 200 m) jest możliwa w zakresie do 3–3,5 km. Wpływ temperatury można zmniejszyć, korygując wyniki pomiarów do wartości w temperaturze odniesienia zgodnie z charakterystykami z rys. 5.

Podczas lokalizacji uszkodzeń na trasie linii należy uwzględnić rozmieszczenie zapasów kabli (20–0 m), a dla linii napowietrznych także nadmiar długości kabla wprowadzany przez zwis i odcinki pionowe na zejściach ze słupów (5–8%).

Tabl. 5. Niepewność lokalizacji uszkodzenia w linii jednorodnej

$T_K - T_P$ [°C]	$\Delta L_{\text{uszk}} / L_{\text{uszk}}$ zwarcie [%]	$\Delta L_{\text{uszk}} / L_{\text{uszk}}$ przerwa [%]
-30	-14,0	$\pm 11,3$
-15	-8,2	$\pm 8,1$
0	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$
15	+8,2	$\pm 8,1$
30	+14,0	$\pm 11,3$

Dla uniknięcia fałszywych alarmów, zaprogramowane na stałe zmiany rezystancji pętli sygnalizowane jako uszkodzenie muszą być większe niż podane w tabelicy 5, np. $\pm 20\%$. Wadą tego rozwiązania jest brak sygnalizacji zwarcia blisko odległego końca linii, na przykład podczas kradzieży ostatnich 100 m kabla, kiedy rezystancja linii długości 2 km spada o tylko o 5%. Problem ten można usunąć przez porównywanie wyników pomiarów w krótkim przedziale czasu, przykładowo 15 minut, z mniejszym zakresem tolerancji.

Monitoring kabli światłowodowych

Do nadzoru sieci światłowodowych wybrano metodę reflektometryczną impulsową (*Optical Time Domain Reflectometry* – OTDR) ze względu na to, że:

- umożliwia lokalizację uszkodzenia,
- pozwala określić jego rodzaj (przerwa, wzrost tłumienności, odbicie),
- nie wymaga dostępu do obu końców linii.

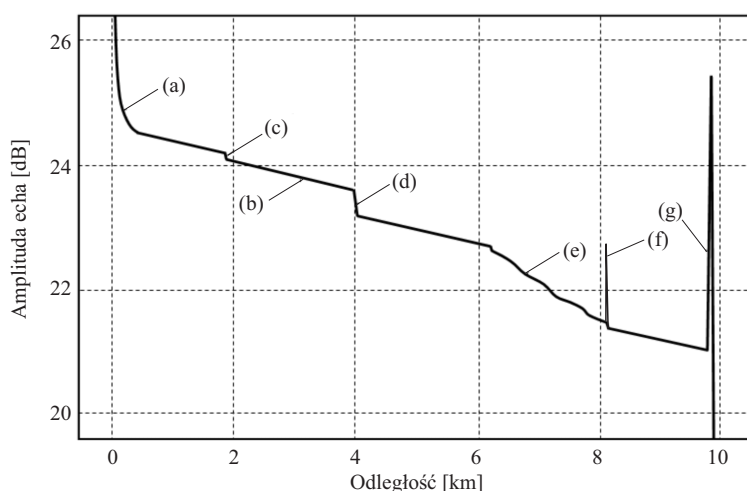
Natomiast wady tej metody, to:

- wysoki koszt OTDR,
- długi czas pomiaru, przeważnie w granicach 10–120 s,
- skomplikowana interpretacja charakterystyk reflektometrycznych.

Zasady wykonywania pomiarów metodą OTDR i interpretacji ich wyników są znormalizowane [24], [25] i jest ona powszechnie stosowana do pomiarów i diagnostyki włókien, kabli, sieci i podzespołów światłowodowych. Dlatego poniższy opis ograniczono do zagadnień istotnych dla systemu monitoringu.

Podczas pomiarów włókien jednomodowych OTDR wysyła cyklicznie impulsy optyczne o mocy ok. 40 mW i odbiera powracające echo. Impuls odbija się częściowo od nieciągłości takich jak złącza i koniec włókna. Ponadto we włóknie zachodzi rozproszenie wsteczne (Rayleigha) wywołane przez niejednorodności szkła o wymiarach ≤ 1 nm, a część promieniowania rozproszonego do tyłu (ok. 0,1%) jest przechwytywana przez włókno i wraca do OTDR. Sygnał rozproszenia wstecznego pozwala określić długość i tłumienność włókna, ale jest słaby: przy długości fali 1550 nm z włókna jednomodowego o długości 1 m wraca echo słabsze o ponad 70 dB od wysłanego impulsu [26], [27]. Zginanie włókna powoduje ucieczkę części lub całości promieniowania na zewnątrz i wprowadza tłumienie bez odbicia.

Elementy wnoszące straty (włókna, złącza, zgięcia, defekty) powodują osłabienie echa odbieranego z odcinków włókna znajdujących się za nimi o podwójną wartość strat, gdyż echo zostaje po drodze z powrotem do OTDR sflumione ponownie. Także opóźnienie pomiędzy wysłaniem impulsu a odbiorciem echa jest równe czasowi potrzebnemu na dwukrotne przebycie przez światło odległości do danego miejsca. Wynikiem pomiaru jest wykres amplitudy echa w skali logarytmicznej w funkcji odległości (rys. 7). Wskazania amplitudy i odległości odpowiadają propagacji sygnału w jedną stronę.



Rys. 7. Charakterystyka reflektometryczna linii kablowej (symulacja)

Elementy charakterystyki z rys. 7:

- a) odbicie od złącza w OTDR i strefa martwa (jej długość rośnie z szerokością impulsu),
- b) jednorodny odcinek włókna (linia o nachyleniu proporcjonalnym do tłumienności),
- c) złącze spawane o niskich stratach (0,1 dB),
- d) złącze spawane o wysokich stratach (0,4 dB) lub zgięcie włókna,
- e) odcinek włókna o wysokiej i niejednorodnej tłumienności,
- f) złącze rozłączalne wprowadzające odbicie (PC),
- g) odbicie od końca włókna (intensywność zależy od rodzaju zakończenia).

Echo, zwłaszcza od rozproszenia wstecznego, jest słabe, stąd OTDR wysyła cyklicznie kolejne impulsy i uśrednia odebrane echa, co podwyższa stosunek sygnału do szumu. Podobny efekt daje wydłużenie impulsu i wzrost jego energii. W przybliżeniu, podwojenie szerokości impulsu podwyższa zakres dynamiki, określanej jako maksymalna tłumienność mierzonego włókna, o 1,5 dB, a podwojenie czasu pomiaru o 0,75 dB. Pierwszy sposób jest okupiony wydłużeniem czasu pomiaru i detekcji uszkodzenia, drugi – pogorszeniem zdolności rozdzielczej OTDR.

Długość włókna światłowodowego pomiędzy złączem OTDR, a miejscem z którego pochodzi echo określona na podstawie opóźnienia powracającego echa, wyraża się zależnością:

$$L = Tc/2n_{\text{eff}}, \quad (6)$$

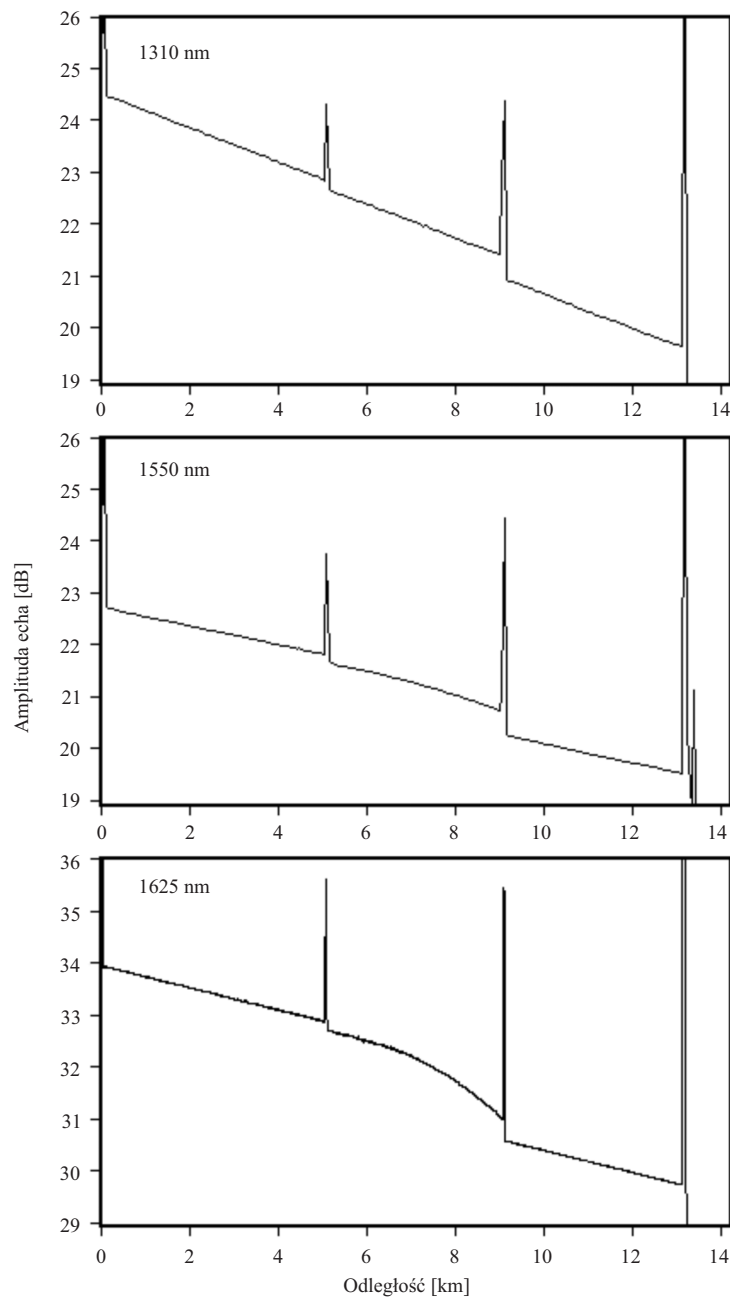
gdzie: L – odległość do miejsca odbicia lub rozproszenia, T – czas oczekiwania na echo, c – prędkość światła w próżni ($299,793 \cdot 10^6$ m/s), n_{eff} – efektywny współczynnik załamania włókna światłowodowego (1,46–1,52).

Wykrywanie uszkodzeń

Typowe objawy uszkodzeń obserwowane w czasie pomiarów za pomocą OTDR to:

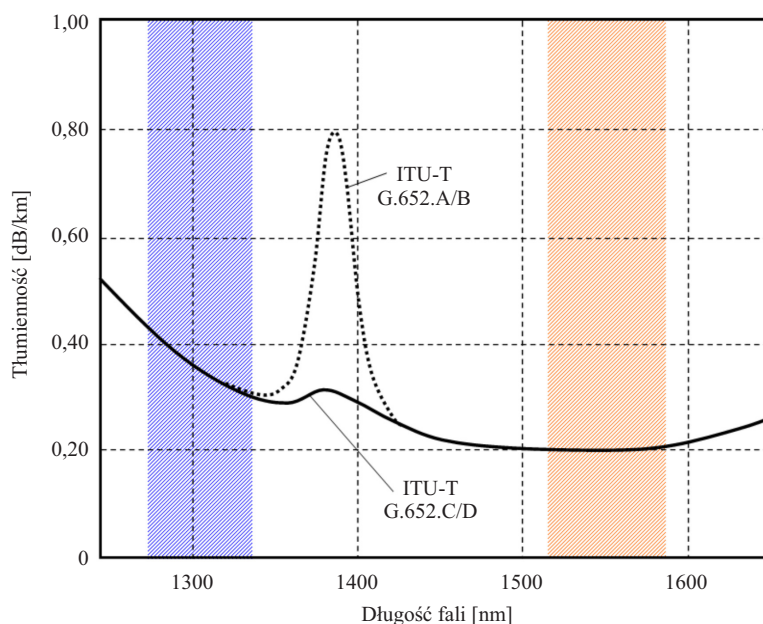
- a) zanik części charakterystyki położonej za miejscem uszkodzenia (przecięcie kabla, rozłączenie, pęknięcie włókna, uszkodzone złącze),
- b) straty skupione w jednym miejscu (zgięcie włókna, zamarzająca woda w osłonie złączowej, uszkodzone złącze, zgniecenie lub silne zgięcie kabla),
- c) wzrost tłumienności na dłuższym odcinku, zwykle niejednorodny (zestarzenie kabla, bardzo niska temperatura, działanie nadmiernej siły rozciągającej na kabel, osiadanie gruntu wokół kabla, migracja włókien w kablu napowietrznym).

Zmiany tłumienności w sytuacjach b) i c) silnie rosną z długością fali i są nawet 10-krotnie większe przy długości fali 1625–1650 nm niż przy 1310 nm (rys. 8). Zatem pomiary przy 1625 nm pozwalają wykryć uszkodzenie jeszcze nie wpływające na transmisję w zakresie 1310 nm.



Rys. 8. Charakterystyki reflektometryczne linii jednomodowej przy różnych długościach fal. Włókno w środkowej sekcji jest poddane mikrozgięciom, jak w zdegradowanym kablu

Długości fal 1625 i 1650 nm nie są używane w systemach transmisyjnych (rys. 9) i w związku z tym są zalecane dla systemów monitoringu [28]. System nadzorujący wolne włókna może pracować także na długości fali 1550 nm, przy której mają one najniższą tłumienność: 0,18–0,25 dB/km [26], [27], co pozwala uzyskać największy zasięg.



Rys. 9. Charakterystyki spektralne tłumienności włókien jednomodowych. Wyróżniono zakresy normalnie wykorzystywane przez systemy transmisyjne

Nadzorowanie światłowodowej linii kablowej obejmuje:

- wykonanie pomiaru sprawnej linii (kalibracja linii); jego wynik służy za wzorzec,
- okresowe pomiary linii w identycznych warunkach jak podczas kalibracji,
- wyznaczenie różnicy między nową charakterystyką reflektometryczną, a wzorcową i ocena, za pomocą algorytmów w oprogramowaniu Centrum Nadzoru, czy różnica ta mieści się w zaprogramowanych granicach tolerancji, zwykle ustalanych na 0,5–2 dB zależnie od rodzaju i długości nadzorowanej linii kablowej,
- w razie nadmiernych zmian: określenie odległości od GP (lub innego punktu odniesienia, jak przełącznica na obiekcie) do początku strefy wykazującej niedozwolone zmiany parametrów, rejestrację zdarzenia i wygenerowanie alarmu,
- opcjonalną analizę charakterystyk reflektometrycznych przez operatora Stacji Nadzoru, szczególnie kiedy objawy uszkodzenia są nietypowe.

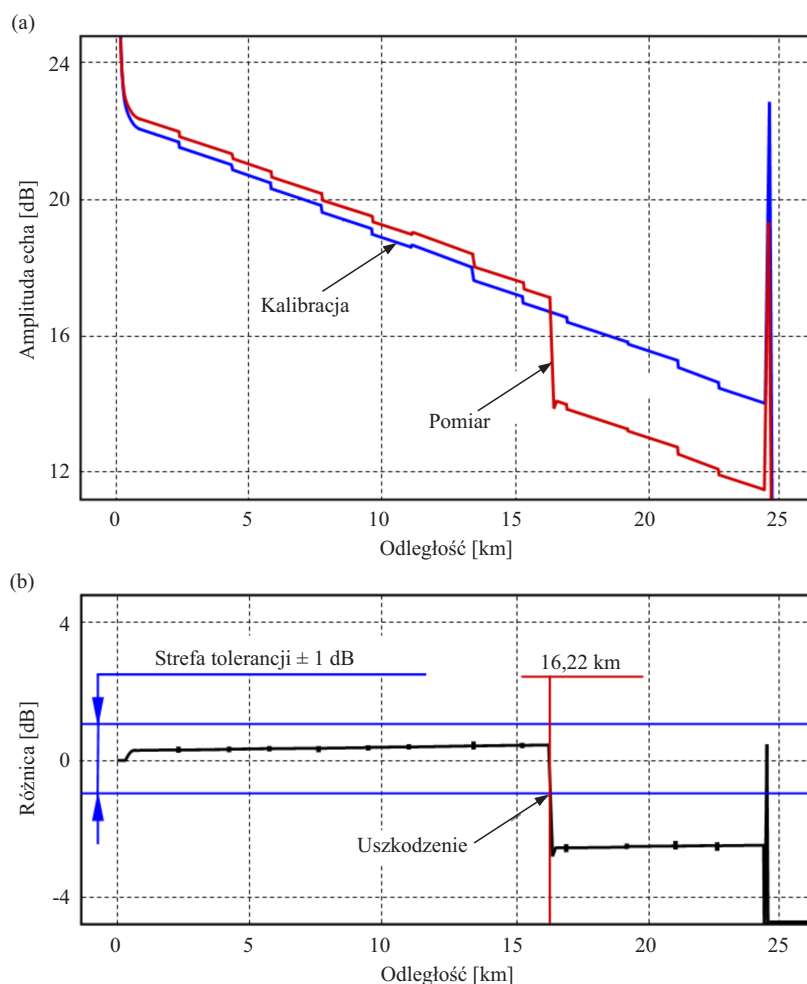
Podstawowy tryb pracy to sekwencyjne pomiary jednego wolnego („ciemnego”) włókna w każdej nadzorowanej linii kablowej. Odstęp czasu między pomiarami danego włókna (i gwarantowany czas detekcji uszkodzenia) jest proporcjonalny do liczby nadzorowanych kabli i mieści się w zakresie 5–30 min [1]. Drugim wariantem jest pomiar na żądanie dowolnego włókna wybranego przez operatora SN.

Wykrywanie uszkodzenia bazuje na ocenie zmian parametrów linii w stosunku do stanu podczas kalibracji i błędy systematyczne są nieistotne. Detekcja uszkodzeń jest natomiast utrudniona przez losowe zmiany charakterystyk reflektometrycznych wywołane przez:

- zmiany strat połączeń między OTDR a linią i zmiany mocy nadajnika OTDR. Efektem jest zmiana amplitudy echa i przesunięcie całej charakterystyki w pionie (rys. 10);

- zmiany długości fali promieniowania wysyłanego przez nadajnik OTDR, głównie pod wpływem zmian temperatury. Następuje zmiana obserwowanej tłumienności włókien, zgodnie z ich charakterystyką spektralną (rys. 9), ale nie strat złączy;
- zmiany stanu polaryzacji promieniowania wzdłuż światłowodu oraz z czasem, prowadzące do zmian wskazań amplitudy z powodu zależności strat włókien, złączy oraz sprzęgacza w OTDR od polaryzacji (*Polarization Dependent Loss* – PDL). Obserwowana w czasie prób laboratoryjnych niepewność wskazań OTDR w wyniku efektów polaryzacyjnych wynosiła około 0,3 dB.

Rysunek 10 pokazuje wyniki pomiarów i ich analizę dla uszkodzenia wprowadzającego skupione straty 3,7 dB, oraz skutki niestabilnego sprzężenia OTDR z linią (przesunięcie charakterystyki w górę) i zmiany długości fali nadajnika (spadek tłumienności włókien).



Rys. 10. a) charakterystyki linii kablowej przed i po uszkodzeniu, b) różnica tych charakterystyk j.w. i prosty mechanizm lokalizacji uszkodzenia (symulacja)

Niepewność lokalizacji uszkodzenia

Producenci włókien podają ich współczynnik załamania n_{eff} z dokładnością do 4 cyfr po przecinku [26], [27]. Co więcej n_{eff} zmienia się z długością fali i typowe wartości dla standardowego włókna jednomodowego [25] to 1,4674 (1310 nm), 1,4679 (1550 nm) oraz 1,4682 (1625 nm).

Wpływ temperatury na dokładność lokalizacji uszkodzeń kabli światłowodowych za pomocą OTDR jest znacznie mniejszy niż w przypadku lokalizacji uszkodzeń kabli z przewodami miedzianymi na podstawie pomiarów rezystancji, ponieważ współczynnik temperaturowy rozszerzalności wzdłużnej włókna telekomunikacyjnego w pokryciu pierwotnym wynosi zaledwie $2,0\text{--}2,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a opóźnienia transmisyjnego standardowego włókna jednomodowego około $-0,75 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [29].

Silniejsza jest wzdłużna rozszerzalność termiczna kabla liniowego: $\alpha_K = 0,5\text{--}10 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Niską rozszerzalność termiczną mają samonośne kable napowietrzne (ADSS i OPGW). Ponadto, standardowe (pełnowymiarowe) kable liniowe mają na ogół ośrodek o konstrukcji luźnej i zmiany długości kabla praktycznie nie są przenoszone na włókna światłowodowe.

Natomiast szeroko używane w sieciach miejskich i dostępowych mikrokable światłowodowe, oznaczające się cienkim elementem wytrzymałościowym i ciasnym upakowaniem włókien w tubach, wykazują największe zmiany długości z temperaturą oraz przenoszenie naprężeń z powłoki na włókna światłowodowe wewnątrz. W najgorszym przypadku mikrokabla o współczynniku temperaturowym rozszerzalności wzdłużnej $\alpha_K = 1 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$, przy pełnym przenoszeniu zmian długości kabla na włókna światłowodowe, współczynniku elastooptycznym włókien 0,80 i zakresie zmian temperatury pod ziemią $\pm 15^{\circ}\text{C}$, zmiany długości oraz opóźnienia transmisyjnego (z którego wyznacza się odległość) wynoszą odpowiednio $\pm 0,015$ i $\pm 0,012\%$. Wynikający z tego błąd w lokalizacji uszkodzenia odległego o 80 km wynosi 9,6 m i nie ma praktycznego znaczenia.

Wskazywana przez OTDR długość włókna światłowodowego jest większa od długości kabla. Różnica wynika z nadmiaru długości włókien w kablu (*Helix Factor*), który zależy od budowy ośrodka kabla i wynosi orientacyjnie:

- 0,05–0,4% w kablach kanałowych z tubą centralną,
- 0,4–0,8% w kablach napowietrznych ADSS i przewodach OPGW z tubą centralną,
- 1,5–2,5% w kablach kanałowych i przewodach OPGW z tubami skręcanymi,
- 2,5–4% w kablach napowietrznych ADSS z tubami skręcanymi.

Korekta wyników pomiarów jest możliwa przy znajomości wymienionego parametru, normalnie niepodawanego przez producentów kabli.

Dalsze źródła zawyżonych wskazań odległości to zapasy kabli w pobliżu złączy (20–40 m), a w liniach napowietrznych dodatkowo nadmiar długości kabla względem trasy linii spowodowany przez zwis kabla i zejścia ze słupów, który może osiągnąć 10% w linii energetycznej wysokiego napięcia z przewodami OPGW.

Związane błędy ogranicza się wyznaczając odległość do miejsca uszkodzenia od ostatniego widocznego złącza, która nie przekracza 2–3,5 km. Przy typowej dla linii podziemnych długości sekcji 2 km, nadmiar długości włókien równy 2,5% wprowadza błąd nie przekraczający 50 m.

Budżet tłumienności i zasięg

Długość monitorowanych linii kablowych ogranicza budżet tłumienności optycznej T:

$$T = D - 5 \text{ [dB]}, \quad (7)$$

gdzie D to określony dla $S/N = 1$ zakres dynamiki OTDR, zależny od modelu przyrządu, długości fali, długości impulsu, czasu pomiaru i metod filtracji danych. Istnieje kompromis między zakresem dynamiki, a czasem pomiaru i zdolnością rozdzielczą, definiowaną jako minimalna odległość między dwoma rozróżnianymi zdarzeniami, zależna od długości impulsu zgodnie ze wzorem (6) – patrz tablica 8.

Tabl. 6. Parametry OTDR Anritsu MN9077A2 (1625 nm): dane katalogowe [30] i wyniki pomiarów wykonanych w Instytucie Łączności (czas pomiaru 60 s)

Długość impulsu	Zdolność rozdzielcza	Zakres dynamiki D (S/N = 1)	Budżet tłumienności T
20 μ s	2000 m	37,0 dB	32,0 dB
10 μ s	1000 m	35,0 dB	30,0 dB
3 μ s	300 m	32,0 dB	27,0 dB
1 μ s	100 m	29,5 dB	24,5 dB
300 ns	30 m	22,0 dB	17,0 dB
100 ns	10 m	16,0 dB	11,0 dB
30 ns	3 m	13,0 dB	8,0 dB
10 ns	1 m	11,0 dB	6,0 dB

Tłumienność obwodu optycznego pomiędzy portem OTDR a końcem linii musi mieścić się w budżecie tłumienności, zgodnie z zależnością:

$$L_M \alpha + N S_P + (2N+1) S_Z \leq T, \quad (8)$$

w której: L_M – długość monitorowanej linii kablowej [km], α – tłumienność włókna w kablu ze złączami spawanymi [dB/km], N – liczbą stopni przełączania (1 lub 2), S_P – straty wnoszone przez przełącznik optyczny [dB], S_Z – straty złączy światłowodowych w sznurach [dB].

Założono, że między OTDR a przełącznicą znajdują się dwa sznury światłowodowe, a przy przełączniku wyniesionym trzeci. Typowe parametry dla długości fal 1550 i 1625 nm:

$$\alpha = 0,25\text{--}0,33 \text{ dB/km (włókno: } 0,20\text{--}0,25 \text{ dB/km [24], [25], złącza: } 0,1\text{--}0,2 \text{ dB co } 2 \text{ km),}$$

$$S_P = 1,5\text{--}2,0 \text{ dB,}$$

$$S_Z = 0,3\text{--}0,6 \text{ dB.}$$

Przykłady budżetu strat i maksymalnej długości nadzorowanych linii pokazano w tablicy 7. Wariant 1 dotyczy monitoringu sieci strefowej (N = 1), 2 – dużej sieci miejskiej (N = 2), 3 – mniejszej sieci miejskiej (N = 1), ze względnie dokładną lokalizacją uszkodzenia.

Tabl. 7. Przykłady budżetu tłumienności systemu pomiarowego i maksymalnej długości nadzorowanych linii kablowych

Wariant	Jedn.	1	2	3
Zdolność rozdzielcza	m	300	100	30
Budżet tłumienności brutto (T)	dB	27,0	24,5	17,0
Liczba stopni przełączania (N)	-	1	2	1
Straty przełącznika (S_p)	dB	$1 \times 1,2$	$2 \times 1,2$	$1 \times 1,2$
Straty sznurów (S_z)	dB	$2 \times 0,4$	$3 \times 0,4$	$2 \times 0,4$
Budżet tłumienności netto	dB	25,0	20,9	15,0
Tłumienność linii kablowej (α)	dB/km	0,28	0,28	0,32
Maksymalna długość linii	km	89	75	47

Monitoring czynnych łączy światłowodowych

Czynne łącza jednomodowe można monitorować na zasadzie zwielenienia falowego (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM) przy użyciu OTDR pracującego poza zakresami widma wykorzystywanymi przez urządzenia transmisyjne, w przybliżeniu 1260–1360 nm i 1520–1580 nm (rys. 9), na długości fali bliskiej 1650 nm. Nadzorowany tor światłowodowy należy wyposażyć na końcach w sprzęgacze WDM, separujące spektralnie ODTR od urządzeń aktywnych (rys. 11). Sprzęgacze te wprowadzają straty około 2,5 dB [31], które trzeba uwzględnić w budżecie mocy łącza.

Równoczesna propagacja w jednomodowym włóknie światłowodowym o małym przekroju czynnym rdzenia $A_{\text{eff}} = 50\text{--}90 \mu\text{m}^2$ impulsów z reflektometru i nadajnika łącza prowadzi do ich intermodulacji w wyniku wymuszonego rozproszenia Ramana [32], [33]. Zjawisko to jest najsilniejsze, kiedy długość fali OTDR jest o 70–120 nm dłuższa niż ta na której pracuje łącze, na przykład 1550 nm, a praktycznie nie występuje w przypadku łącza 1310 nm. Podczas propagacji obu sygnałów w tym samym kierunku obserwuje się:

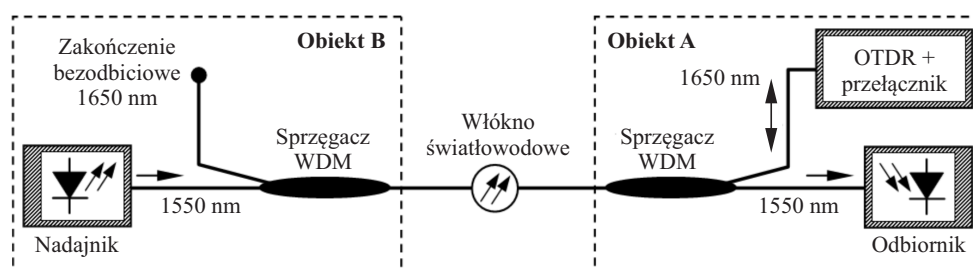
- tłumienie sygnału w łączy w takt impulsów OTDR,
- wzmocnienie sygnału z OTDR wzdłuż linii i zaniżenie wskazań tłumienności,
- wzrost szumów na charakterystykach reflektometrycznych.

Wzajemne zakłócenia można ograniczyć przez:

- propagację sygnałów w przeciwnych kierunkach,
- zmniejszenie mocy impulsów z OTDR wprowadzanych do włókna.

Przeciwbieżna propagacja impulsów z OTDR i nadajnika łącza w układzie z rys. 11 redukuje szkodliwą modulację amplitudy i zniekształcenia charakterystyk reflektometrycznych, gdyż maksymalny poziom sygnału w łączy, od którego zależy niepożądane wzmocnienie impulsów i ech OTDR występuje

na oddalonym od GP końcu linii kablowej. Przedstawione rozwiązanie nie nadaje się do monitoringu łączy DWDM ze wzmacniaczami EDFA o wysokiej mocy sygnału i łączy analogowych spotykanych w sieciach TV kablowej. Ze względu na różne charakterystyki nadzorowanych łączy, bywa konieczna redukcja mocy impulsów OTDR za pomocą tłumika, kosztem spadku zakresu dynamiki i zasięgu.

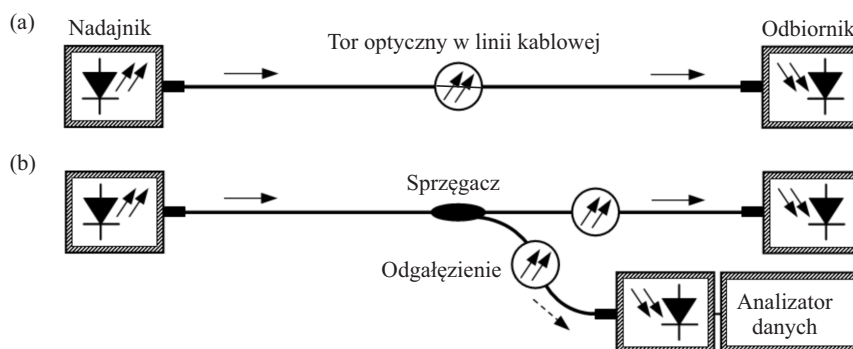


Rys. 11. Schemat monitoringu czynnego włókna jednomodowego

Monitoring czynnych włókien ogranicza się do łączy o specjalnym znaczeniu.

Nielegalne przechwytywanie danych z łączy światłowodowych

Budżety mocy większości łączy zawierają się w granicach 10–30 dB, w związku z tym przy instalacji nielegalnego odgałężenia blisko nadajnika lub wzmacniacza (rys. 12) i rezerwie mocy 3 dB, do analizatora danych trzeba odgałęzić 0,2–20% mocy sygnału. Montaż sprzęgacza powoduje wzrost tłumienności o sumę strat sprzęgacza i dwóch złączy spawanych: 0,5–1,5 dB (tablica 8).



Rys. 12. Odgałężenie sygnału ze światłowodu za pomocą sprzęgacza: (a) łącze w oryginalnej konfiguracji, (b) łącze z odgałężeniem

Tabl. 8. Parametry odgałęzienia światłowodu jednomodowego w układzie z rys. 11
Dane sprzęgacza 1×2 z katalogu [34]. Straty złącza spawanego: 0,10 dB.

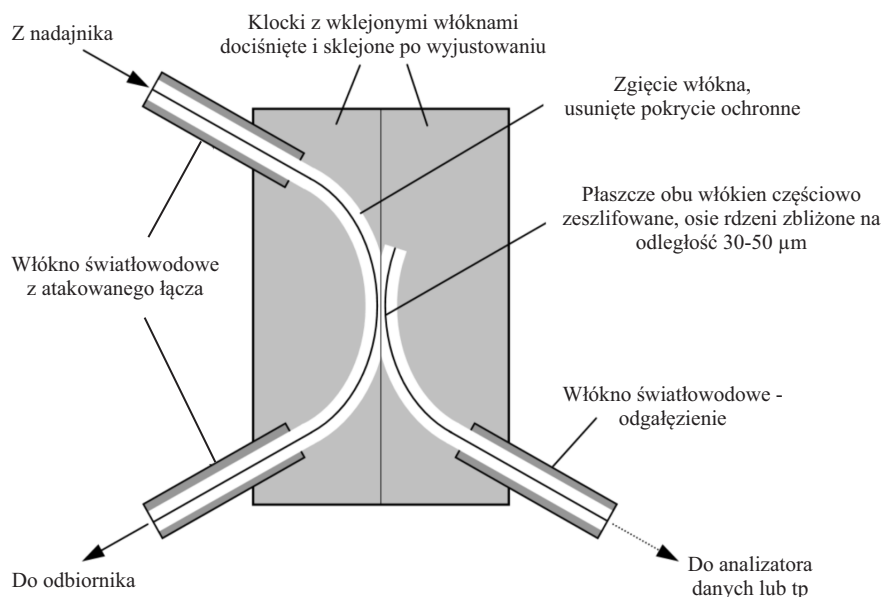
Stopień podziału [%]	Straty sprzęgacza w linii [dB]	Straty sprzęgacza w odgałęzieniu [dB]	Straty wtrącone w łącze* [dB]	Straty odgałęzienia* [dB]
1–99	0,25	23,0	0,45	23,2
2–98	0,30	19,0	0,50	19,2
5–95	0,45	15,0	0,65	15,2
10–90	0,65	11,3	0,85	11,5
20–80	1,25	7,85	1,45	8,05

* suma strat sprzęgacza i dwóch złączy spawanych

Odgałęziona część sygnału trafia do analizatora danych, najczęściej wyszukującego i rejestrującego pakiety zawierające określone słowa kluczowe. Istnieją systemy głębokiej inspekcji pakietów przesyłanych w sieciach Ethernet, SDH i OTN, zdolne do analizowania na bieżąco strumieni cyfrowych o przepływności do 40 Gbit/s [35]. Urządzenia te wymagają zasilania i ukrycia w niedostępnym dla osób postronnych miejscu oraz zorganizowania transferu danych do organizatora podsłuchu, na ogół przez sieć IP.

Jeśli wspólny port sprzęgacza zostanie włączony od strony odbiornika, odwrotnie niż na rys. 12, odgałęzienie umożliwia zagłuszanie lub wprowadzenie fałszywych danych.

Przerwa włókna podczas montażu sprzęgacza trwa 2–4 minut i system monitoringu wykonujący pomiary za pomocą OTDR, co np. 15 minut, może jej nie wykryć. Identyfikatory czynnych włókien [36], [37], zakładane na włókno lub kabel stacyjny bez ich przecinania, pozwalają ustalić kierunek transmisji oraz kiedy pracuje OTDR, wysyłający promieniowanie w kierunku odwrotnym (rys. 11) i wykonać montaż w przerwie między pomiarami.

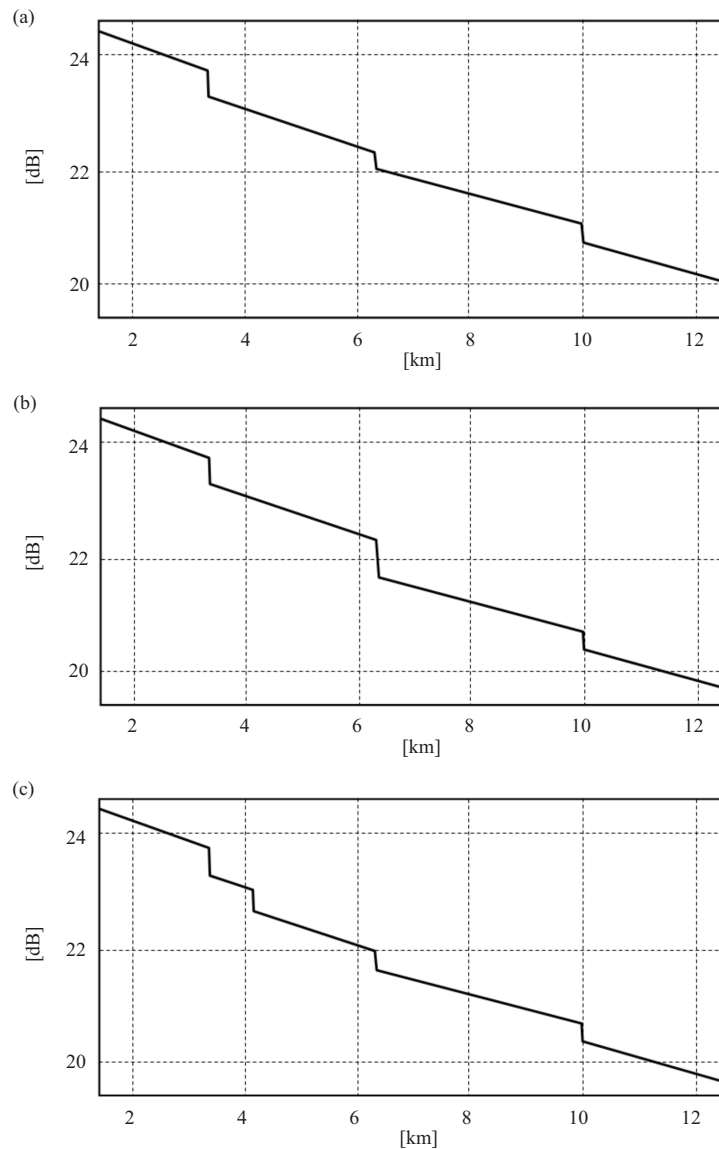


Rys. 13. Sprzęgacz ze zgięciem i zbliżeniem rdzeni włókien jednomodowych

Łącza światłowodowe mogą normalnie posiadać odgałęzienia, służące do:

- nadzoru i serwisu urządzeń i wzmacniaczy optycznych w sieciach DWDM,
- analizy ruchu i przechwytywania danych przez służby bezpieczeństwa publicznego [38].

Dogodnym miejscem instalacji sprzęgaczy są osłony złączowe i przełącznice światłowodowe o wysokich pojemnościach, gdzie dodatkowe łącza i włókna nie rzucają się w oczy. Sprzęgacze są dostępne w małych gabarytowych obudowach cylindrycznych o wymiarach niewiele większych od osłonek złączy spawanych, mieszczących się w kasetach dla tych ostatnich. Sprzęgacz zaopatrzony w łącza rozłączne można włączyć w tor optyczny na przełącznicy bez potrzeby spawania, ale wprowadzone wtedy straty są nieco wyższe.



Rys. 14. Charakterystyki reflektometryczne linii światłowodowej (1550 nm): a) stan początkowy, b) z odgałęzieniem 98/2% obok złącza w odległości 6,35 km od początku, lub zamiast niego, c) z odgałęzieniem jw. pośrodku sekcji w odległości 4,15 km (symulacja)

Odgałęzienie można wykonać bez przerwy włókna [13], jako sprzęgacz dyfrakcyjny (*evanescent coupler*) przez: zgięcie włókna ($R = 8\text{--}20\text{ mm}$), częściowe zeszlifowanie płaszcza i sklejenie z identycznie przygotowanym drugim włóknom prowadzonym do analizatora danych (rys. 13). Sprzężenie następuje dzięki rozchodzeniu się pola elektromagnetycznego poza rdzeń włókna jednomodowego o średnicy $6\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$. Proporcja odgałęzionej mocy i straty wtrącone w łączu rosną z długością fali i odgałęzienie można pomylić ze zgięciem włókna.

Wykonanie odgałęzienia jest pracochłonne oraz wymaga czystego otoczenia i dobrego oświetlenia. Ta metoda jest zarezerwowana dla ataków na łącza o wyjątkowym znaczeniu przy braku możliwości instalacji sprzęgaczy w sposób opisany wcześniej. Do wklejania, szlifowania i polerowania włókien światłowodowych nadają się materiały i narzędzia używane do oprawiania wtyków złączy światłowodowych.

Trudno wykryć odgałęzienie wykonane obok złącza między sekcjami kablowymi lub zamiast niego, gdyż zamiast nowego zdarzenia w torze optycznym, które zwraca uwagę, nastąpił tylko pewien wzrost strat już istniejącego (rys. 14). Odgałęzienie na początku linii może znaleźć się w martwej strefie pomiaru za pomocą OTDR i pozostać niezauważone.

Elementy sprzętowe systemu monitoringu

Poniżej opisane elementy sprzętowe systemu SMIT opracowano w Instytucie Łączności.

Głowica pomiarowa do kabli miedzianych i czujek (GP)

GP jest przyłączana do zakończeń par z nadzorowanych kabli na przełącznicy (MDF, SDF). Ma 8 uniwersalnych portów do obsługi czujek lub pomiarów kabli oraz 8 portów przeznaczonych wyłącznie do pomiarów kabli. Określona para przewodów może służyć tylko do jednego z wymienionych celów. GP zbiera dane o stanie monitorowanych obiektów przez sekwencyjne zbieranie danych z czujek. Przy 30 czujkach na linii odbywa się to co około 2 s. Wygląd urządzenia przedstawiono na rys. 15, a dane techniczne w tablicy 9.

Tabl. 9. Dane techniczne głowicy pomiarowej do kabli miedzianych i czujek

Liczba portów dla pomiarów kabli	8/16
Liczba portów dla linii z czujkami	8
Zakres pomiaru rezystancji pętli	0–4095 Ω
Zakres pomiaru pojemności	20–1000 nF
Zakres pomiaru rezystancji izolacji	0–500 k Ω
Napięcie zasilania GP	48 V (stałe)
Pobór mocy	$\leq 10\text{ W}$ (pomiar 16 par) $\leq 125\text{ W}$ (8 linii z czujkami i pomiar 8 par)*
Wymiary GP (szer. \times wys. \times głęb.)	260 x 290 x 125 mm
Masa GP	$\leq 3,5\text{ kg}$
Napięcie zasilania czujek z portu GP	62 V (stałe)
Przepływność transmisji danych z czujek	3,5 kbit/s
Zakres temperatur pracy GP	$-20\text{...}+70^\circ\text{C}$
Zakres temperatur pracy czujki	$-30\text{...}+70^\circ\text{C}$
Protokoły transmisji danych	TCP-IP, UDP
Interfejs transmisji danych (wymieniony)	Ethernet 10/100 Mbit/s, 2 Mbit/s E1, modem V.32bis
* pobór mocy jest w przybliżeniu proporcjonalny do liczby czujek	



Rys. 15. Głowica pomiarowa do kabli miedzianych i obsługi czujek

W czasie eksploatacji próbnej dwóch głowic pomiarowych w latach 2012–2015, w tym jednej zainstalowanej w szafie ulicznej z urządzeniami sieci dostępowej DSL w Brwinowie, nie odnotowano ich uszkodzeń.

Czujki i czujniki

Czujka jest interfejsem elektronicznym, do którego można przyłączyć 4 czujniki rozmieszczone w jednym obiekcie, zapewniający przesyłanie danych do GP. Czujki i czujniki często pracują w trudnych warunkach. Przykładowo, środowisko w podziemnych studniach kablowych cechuje bliska 100% wilgotność oraz wnikanie roztworu soli używanej zimą do odładzania ulic, błota i piasku. Obwód drukowany czujki znajduje się w obudowie z tworzywa sztucznego o wymiarach 90×65×32 mm, uszczelnionej zalewą silikonową (rys. 16 i 17).

W wersji demonstracyjnej systemu zastosowano komercyjne czujniki kontaktronowe używane w systemach zabezpieczenia budynków. Podczas dwuletniej eksploatacji systemu ochrony podziemnych studni kablowych w sieci dostępowej Orange Polska w Lublinie i Brwinowie (2012–2014), zanotowano szereg uszkodzeń, w tym:

- złuszczenie powłoki niklu oraz korozję i pęknięcia obudów czujników ze stopu ZnAl,
- korozję i przerwy przewodów w powłoce poliuretanowej łączących czujniki z czujkami,
- wnikanie błota do wnętrza czujek niecałkowicie wypełnionych zalewą silikonową,
- uszkodzenia mechaniczne czujników i przewodów podczas prac w studni,

- korozję ocynkowanych wkrętów stalowych mocujących czujki i czujniki.

Po analizie tych doświadczeń zdecydowano o:

- opracowaniu nowych czujników (rys. 16) i czujki zintegrowanej z czujnikiem (rys. 17),
- używaniu elementów metalowych ze stali nierdzewnej i stopów aluminium,
- stosowaniu kabli wzdłużnie uszczelnionych w powłoce HDPE.



Rys. 16. Czujka i dwa czujniki otwarcia obiektu



Rys. 17. Czujka zintegrowana z czujnikiem kontaktronowym

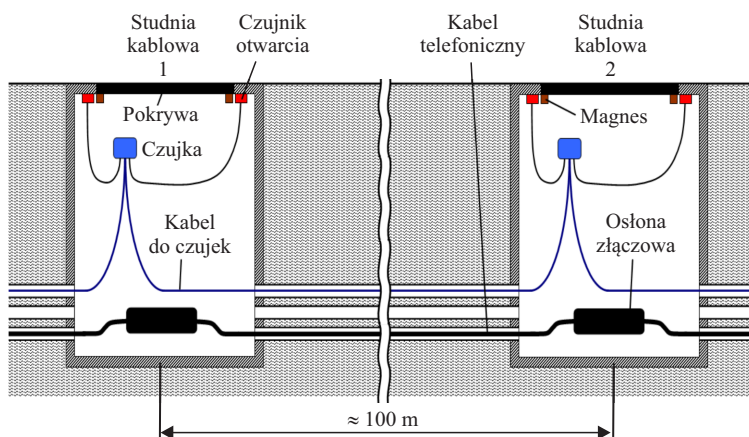
Do ochrony studni kablowej, do jej pokrywy mocowane są od spodu, po przeciwnych stronach, dwa magnesy neodymowe, współpracujące z czujnikami kontaktronowymi przymocowanymi do ścian studni (rys. 18 i 19). Zastosowanie pary czujników pozwala wykryć próbę otwarcia studni przez odchylenie pokrywy z dowolnej strony.

Do połączenia GP z czujkami zastosowano kabel wzdłużnie uszczelniony (żelowany), typu XTKMXpw 2x2x0,8 lub XzTKMXpw 2x2x0,8 [17] z dwoma parami przewodów o średnicy 0,8 mm, łączonymi równolegle (rys. 18). Doświadczenia z używaniem do tego celu wolnych par z kabli telefonicznych były negatywne:

- konieczne było pracochłonne otwieranie wszystkich osłon złączowych wzdłuż linii,
- występowały zakłócenia indukowane z innych par w kablu.

Oszczędność na kosztach montażu z nadwyżką pokrywa koszt kabla do czujek, który:

- uniezależnia system monitoringu od dostępności wolnych par przewodów w kablach przechodzących przez nadzorowane obiekty i pozwala na ochronę studni, szaf ulicznych, itd. w sieci zawierającej tylko kable innych użytkowników lub kable światłowodowe,
- dzięki względnie małej średnicy (10,5 mm) i masie (49 kg/km) może być zaciągnięty do otworów kanalizacji pierwotnej i wtórnej zajętych przez inne kable,
- umożliwia nadzór linii o długości do 6,5 km; w razie używania jednej pary przewodów o średnicy 0,4–0,6 mm, typowej w sieci telefonicznej, zasięg spada do 3–4 km.



Rys. 18. Rozmieszczenie czujek i czujników do ochrony studni kablowych



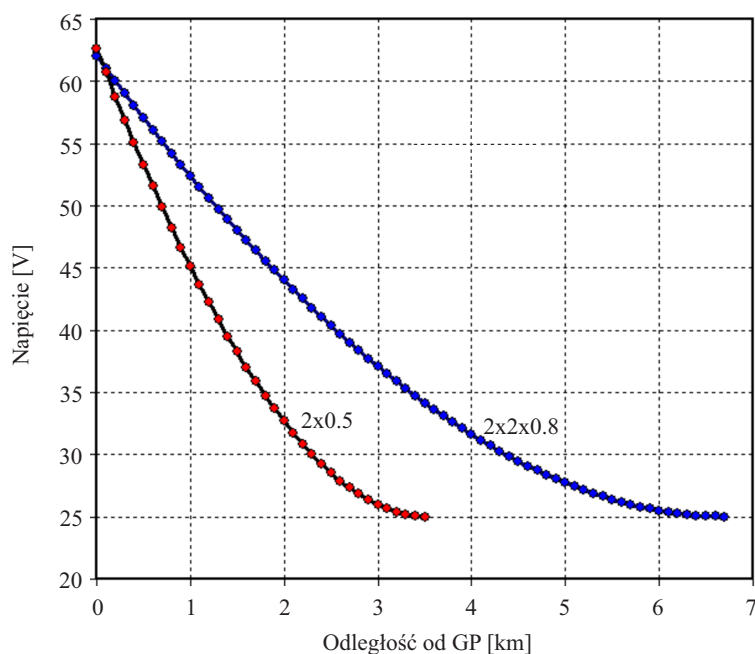
Rys. 19. Czujka i czujnik kontaktronowy w studni kablowej (Brwinów, wrzesień 2013)

Zasilanie czujek i długość nadzorowanej linii kablowej

Maksymalna długość linii kablowej z czujkami, np. w studniach kablowych (rys. 3) jest ograniczona spadkiem napięcia zasilającego na rezystancji pary przewodów łączących czujki.

Minimalna wartość napięcia zasilającego czujkę, z rezerwą na stany nieustalone wynosi 25 V, a pobór prądu przez czujkę zmienia się w zależności od napięcia. Obliczenia rozkładu napięcia i prądu wzdłuż linii z czujkami, w których uwzględniono spadek napięcia na przewodach i rezystancji wewnętrznej czujki wykazały, że:

- maksymalne długości linii z parami przewodów: pojedynczą 0,5 mm i dwiema 0,8 mm wynoszą odpowiednio 3,5 km i 6,7 km (rys. 20),
- pobór prądu i mocy z portu GP w drugim przypadku osiąga 0,18 A i 11 W,
- połączenie czujek kablem 2×2×0,8 mm umożliwia nadzór linii kablowych w sieci dostępowej w zakresie długości spotykanych na obszarach miejskich i podmiejskich.



Rys. 20. Rozkład napięcia wzdłuż linii z czujkami zamontowanymi co 100 m, połączonymi parami przewodów: pojedynczą 0,5 mm i dwiema spiętymi równolegle 0,8 mm

Współpracę GP z czujkami wypróbowano pomyślnie na liniach o długości do 5,5 km.

Czujka RFID

Ponieważ czujniki kontaktronowe mogą zostać zablokowane za pomocą silnego magnesu neodymowego. Potrzebne jest bardziej bezpieczne, choć droższe rozwiązanie do ochrony ważnych obiektów.

Do tego celu opracowano czujkę współpracującą z bezstykową kartą identyfikacyjną RFID przez sprzężenie indukcyjne na częstotliwości 13,6 MHz. Karta jest mocowana do monitorowanego elementu ruchomego na obiekcie: drzwi, pokrywy wjazdu, itp.

Wyposażenie do monitorowania kabli światłowodowych

Do pomiarów kabli światłowodowych z włóknami jednomodowymi służy reflektometr (OTDR) pracujący na długości fali 1625 nm. Wysoki koszt OTDR wyklucza używanie w głowicy pomiarowej do kabli światłowodowych (GP-S) wielu modułów OTDR pracujących równolegle. Dlatego GP-S zawiera jeden OTDR, przyłączany do wybranego włókna za pomocą przełącznika światłowodów (PS), pracującego w konfiguracji 1 : N (N = 4, 8, 16, 32, 64, 128). Ponieważ koszt elektromechanicznego modułu przełącznika światłowodów jest proporcjonalny do liczby portów, pojemność PS dobiera się do przewidywanej liczby nadzorowanych przez GP-S kabli. PS stanowi urządzenie niezależne od GP-S, zdalnie sterowane z Centrum Nadzoru (rys. 3).

Dane techniczne i wygląd urządzeń przestawiono w tablicach 10 i 11 oraz na rys. 21. Ponieważ zakończenia większej liczby kabli światłowodowych występują na dużych obiektach, GP-S i PS dostosowano do instalacji w stojakach 19-calowych.

Tabl. 10. Dane techniczne głowicy pomiarowej do światłowodów (GP-S)

Rodzaj włókna światłowodowego	Jednomodowe (ITU-T G.652, G.655, G.657)
Liczba portów pomiarowych	1
Długość fali	1625 ±20 nm
Szerokość impulsu (zmienna)	10 ns – 20 μs
Zakres dynamiki (S/N = 1)	11–37 dB (tablica 6)
Napięcie zasilania	48 V (stałe), 230 V – 50 Hz (przemienne)
Pobór mocy	≤ 25 W
Wymiary (szer. × wys. × głęb.)	480 × 90 × 200 mm
Masa	3,6 kg
Zakres temperatur pracy	0...+40°C
Protokoły transmisji danych	TCP-IP, UDP
Interfejsy transmisji danych	Ethernet 10/100 Mbit/s lub 2 Mbit/s E1, RS232, USB

Tabl. 11. Dane techniczne przełącznika światłowodów (PS)

Rodzaj włókna światłowodowego	Jednomodowe (ITU-T G.652, G.655, G.657)
Konfiguracja	1 : N
Liczba portów dla światłowodów (N)	8, 16, 32, 64, 128
Długość fali	1550 nm lub 1625 nm
Straty wtrącone*	≤ 1,0 dB
Czas przełączania	≤ 20 ms
Napięcie zasilania	48 V (stałe), 230 V – 50 Hz (przemienne)
Pobór mocy*	≤ 15 W
Wymiary (szer. x wys. x głęb.) *	480 x 130 x 200 mm
Masa*	4,8 kg
Zakres temperatur pracy	-10...+50°C
Protokoły transmisji danych	TCP-IP, UDP
Interfejsy transmisji danych	Ethernet 10/100 Mbit/s lub 2 Mbit/s E1, RS232, USB
* dane dla PS z 16 portami	



Rys. 21. GP do kabli światłowodowych (na górze) i przełącznik światłowodów 1:16 (na dole)

Podsumowanie

Systemy monitoringu są efektywnym narzędziem do ochrony infrastruktury telekomunikacyjnej przed zagrożeniami stwarzanymi przez warunki naturalne, wypadki losowe i działalność przestępczą, ograniczając straty spowodowane przez uszkodzenia, skracając średni czas naprawy i zapobiegając obniżaniu jakości usług telekomunikacyjnych.

Opracowany w Instytucie Łączności system ochrony sieci kablowych z przewodami miedzianymi SMOK-2U został wdrożony w sieci Orange Polska w 2006 r. We współpracy z tym samym operatorem wykonano ponadto próby eksploatacyjne systemu do ochrony studni kablowych, zawierającego GP, czujki przewodowe i czujniki otwarcia obiektu. Opracowano nowe modele czujek i czujników oraz metody ich instalacji, sprawdzone z pozytywnym wynikiem w sieci podziemnej (2014–2015).

Urządzenia pomiarowe do kabli światłowodowych przetestowano w laboratorium, a przygotowanie współpracującego oprogramowania jest w toku. Ze względu na wysokie koszty wyposażenia, efektywny ekonomicznie monitoring sieci światłowodowych wymaga starannego rozmieszczenia głowic pomiarowych dla maksymalizacji liczby linii nadzorowanych przez jedną głowicę oraz objęcia ochroną segmentów sieci o szczególnym znaczeniu lub najwyższej awaryjności.

Bibliografia

- [1] Borzycki K., Gajewski P., Dziubak S., Jabłoński M.: *System ochrony sieci kablowych SPOT*. Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, nr 1–2/2013, s. 18–43.
- [2] Raport pokrycia terytorium Rzeczypospolitej Polskiej istniejącą infrastrukturą telekomunikacyjną oraz budynkami umożliwiającymi kolokację. UKE, Warszawa, 10/2015, http://www.uke.gov.pl/files/?id_plik=21058
- [3] *Łączność – wyniki działalności w 2014 r.*. GUS, Warszawa, 2015.
- [4] Gebizlioglu O. S.: *Time- and Temperature-Dependent Material Behavior and Its Impact on Low-Temperature Performance of Fiber Optic Cables*. Materials Research Society Symposium Proceedings, vol. 531, pp. 333–345, Symposium DD: Reliability of Photonics Materials and Structures, San Francisco, CA, USA, 13–16.04.1998.
- [5] Crawford D.: *Fiber Optic Cable Dig-Ups – Causes and Cures*. Network Reliability and Interoperability Council, Chicago, IL, USA, 1993.
- [6] Dutta R., Rouskas G.: *CSC/ECE 791B – Survivable Networks Introduction*. Department of Computer Science, North Carolina State University, 2008.
- [7] Borzycki K., Dziubak S., Gajewski P., Sobolewski A., Szulik W.: *System monitoringu infrastruktury telekomunikacyjnej (SMIT)*. VI Konferencja Łączności „Ewolucja wojskowych systemów teleinformatycznych oraz Lessons Learned w świetle misji pokojowych i stabilizacyjnych”, Siemradz, 22–23.04.2015.
- [8] Wojciechowska A.: *Wandale masowo tną kable internetowe na dużych osiedlach*. Polskie Radio Wrocław, 30.10.2014.
- [9] Mazurkiewicz M.: *Jak opolanin odciął łączność policji, sądu i wojska*. Nowa Trybuna Opolska, 18.08.2015.
- [10] Jaślan M.: *Operatorzy skuteczniejsi w walce ze złodziejami kabli*. 29.07.2015. <http://ki.polskaszerokopasmowa.pl/aktualnosci/operatorzy-skuteczniejsi-w-walce-ze-zlodziejami-kabli.html>
- [11] Urząd Komunikacji Elektronicznej, Urząd Regulacji Energetyki, Urząd Transportu Kolejowego: *Memorandum w sprawie współpracy na rzecz przeciwdziałania zjawiskom kradzieży i dewastacji infrastruktury – statystyki i plany*. Warszawa, 27.08.2014.

- [12] Zasada K.: *Nielegalne kable odkryte na moście Łazienkowskim*. RMF 24, 18.02.2015. <http://www.rmfm24.pl/news-nielegalne-kable-odkryte-na-moscie-lazienkowskim>
- [13] Shaneman K., Gray R.: *Optical network security: technical analysis of fiber tapping mechanisms and methods for detection & prevention*. MILCOM 2004 – 2004 IEEE Military Communications Conference, Monterey, CA, USA, 31.10–3.11.2004, vol. 2, pp. 711–716.
- [14] *Identifying Basic Faults on Cable Pairs and Station Wiring*. dB Levels, Inc., i.H.E.L.P., 2007/2012.
- [15] Valencia R.: *Outside Plant Telephone Cable Testing & Fault Locating*. 3M Test & Measurement Systems, Austin, TX, USA (01/1999).
- [16] ZN-96/TP S.A.-029: *Telekomunikacyjne sieci miejscowe. Telekomunikacyjne kable miejscowe o izolacji i powłoce polietylenowej, wypełnione. Wymagania i badania*. Telekomunikacja Polska S.A.
- [17] *Kable i przewody telekomunikacyjne*, Tele-Fonika Kable S.A. (03/2006).
- [18] ZN-05/TP S.A.-030: *Telekomunikacyjne sieci miejscowe. Łączniki żył. Wymagania i badania*. Telekomunikacja Polska S.A.
- [19] Hebbert C. M.: *The Transmission Characteristics of Toll Telephone Cables at Carrier Frequencies*. Bell System Technical Journal, vol. 20, 3 Jul. 1941, pp. 293–330.
- [20] USA Patent 5461195 (1995): *Filled telecommunications cable having temperature stable mutual capacitance*. C. S. Freeman, L. E. Davis, Waterguard Industries Inc.
- [21] Biernacka B.: *Półempiryczne równanie opisujące naturalne pole temperatury gruntu w rejonie Białegostoku*. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Nr 1/2010, s. 5–9.
- [22] Krzysztofiak L., Mackiewicz A., Danilewicz J., Krzysztofiak A., Romański M.: *Ocena stanu środowiska Stacji Bazowej Wigry za rok 2003*. Wigierski Park Narodowy – Wigierska Stacja Bazowa Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, <http://www.wigry.win.pl/monit2003/index.htm>
- [23] Krzysztofiak L., Mackiewicz A., Danilewicz J., Krzysztofiak A., Romański M.: *Raport o stanie środowiska przyrodniczego Stacji Bazowej Wigry w roku hydrologicznym 2010*. Wigierski Park Narodowy – Stacja Bazowa Wigry – Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, <http://www.wigry.win.pl/monit2010/tytul.htm>
- [24] Zalecenie ITU-T G.650.1: *Transmission media characteristics – Optical fibre cables: Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable* (07/2010).
- [25] IEC 62316 TR Ed. 2.0: *Guidance for the interpretation of OTDR backscattering traces* (01/2007).
- [26] *Corning SMF-28+ Optical Fiber*. Product Information PI1463, Corning Inc (07/2014).
- [27] *Corning LEAF Optical Fiber*. Product Information PI1107, Corning Inc. (07/2014).
- [28] Zalecenie ITU-T L.41: *Maintenance wavelength on fibres carrying signals* (05/2000).
- [29] Shibata N., Katsuyama Y., Mitsunaga Y., Tateda M., Seikai S.: *Thermal characteristics of optical pulse transit time delay and fiber strain in a single-mode optical fiber cable*. Applied Optics, vol. 22, no. 7, pp. 979–84, 1983.

- [30] *MW9077A/A1/A2/B OTDR Module: 1.31 μm (SM)/1.55 μm (SM)/1.625 μm (SM) Compact and High-performance OTDR Module for Optical Fiber Monitoring Systems*. Anritsu Corp., 2010.
- [31] *OTDR-WDM Filter 1625 nm or 1650 nm*. FOC Fibre Optical Components GmbH (08/2011).
- [32] Scheerer C.: *OTDR pulse power limit in on-line monitoring of optical fibres owing to stimulated Raman scattering*. Electronics Letters, vol. 32, no. 7, pp. 679–680, 1996.
- [33] Chen H., Leblanc M., Plomteux O.: *Live-Fiber OTDR Testing: Traffic and Measurement Impairments*. Technical Note 022, EXFO Electro-Optical Engineering Inc., 2007.
- [34] *Technika Światłowodowa*. Optomer, katalog 2014.
- [35] *Bivio 8000i Series Advanced Cyber Security Application Platform*. Bivio Networks, 2015.
- [36] *OFI-400 Series Optical Fiber Identifiers*. AFL, karta katalogowa, 2014.
- [37] *FI-60 Live Fiber Identifier with Integrated Optical Power Meter*. JDSU, karta katalogowa (03/2011).
- [38] Singel R.: *Whistle-Blower Outs NSA Spy Room*. Wired, 07.04.2006.

Krzysztof Borzycki



Dr inż. Krzysztof Borzycki – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (1982), doktor nauk technicznych (2006, IŁ), długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1982), pracownik laboratorium badawczo-rozwojowego firmy Ericsson Telecom w Szwecji (2001–2002) i specjalista w zakresie badań i standaryzacji kabli, włókien i pasywnych podzespołów światłowodowych oraz osprzętu kablowego. Ekspert od szerokopasmowych światłowodowych sieci dostępowych (FTTx). Uczestnik europejskich programów badawczych, m.in. COST-270, COST-299, COST TD1001 i NEMO. Od 1999 r. wykładowca oraz instruktor w zakresie telekomunikacji optycznej, sieci FTTx i DWDM oraz miernictwa światłowodowego; przedstawiciel IŁ w Polskim Komitecie Normalizacyjnym (kable światłowodowe). Od 2010 r. zaangażowany w opracowanie systemów monitoringu technicznego dla telekomunikacyjnych sieci kablowych, prowadząc projekty rozwojowe SPOT i SMIT oraz prace statutowe IŁ dotyczące monitoringu sieci światłowodowych.

Autor 70 publikacji i 2 patentów i tłumacz techniczny języka angielskiego. Zainteresowania naukowe: telekomunikacja optyczna, kable i włókna światłowodowe, miernictwo optyczne, badania techniczne kabli i osprzętu światłowodowego, światłowodowe sieci dostępowe.

e-mail: k.borzycki@itl.waw.pl

Paweł Gajewski



Mgr inż. Paweł Gajewski – absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (1983) i długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1983). Zainteresowania: projektowanie oraz oprogramowanie urządzeń i systemów pomiarowych, kontrolnych itp. Od wielu lat zajmuje się projektowaniem i oprogramowaniem systemów i urządzeń mikroprocesorowych zwłaszcza w zastosowaniach do pomiarów i sterowania w różnych dziedzinach techniki. Opracowywał między innymi systemy monitorowania pracy central telefonicznych ASM, monitorowania infrastruktury telekomunikacyjnej SMOK, SPOT i SMIT, urządzenia do pomiaru jakości energii elektrycznej oraz przełączania i pomiarów światłowodów. Jest autorem 4 patentów oraz autorem lub współautorem 30 publikacji.

e-mail: p.gajewski@itl.waw.pl

Stanisław Dziubak



Mgr inż. Stanisław Dziubak – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej (1975); długoletni pracownik naukowy Instytutu Łączności w Warszawie (od 1976); współautor wielu wniosków racjonalizatorskich i patentów; zainteresowania naukowe: projektowanie i wdrażanie systemów informatycznych, szczególnie kontrolno-pomiarowych oraz do monitoringu sieci kablowych i energetycznych. Współautor systemów: badania łączności międzymiastowych ABUS, rozliczania abonentów AST, monitorowania pracy central telefonicznych ASM oraz monitorowania infrastruktury telekomunikacyjnej SMOK i SPOT.

e-mail: s.dziubak@itl.waw.pl