

System ochrony sieci kablowych SPOT

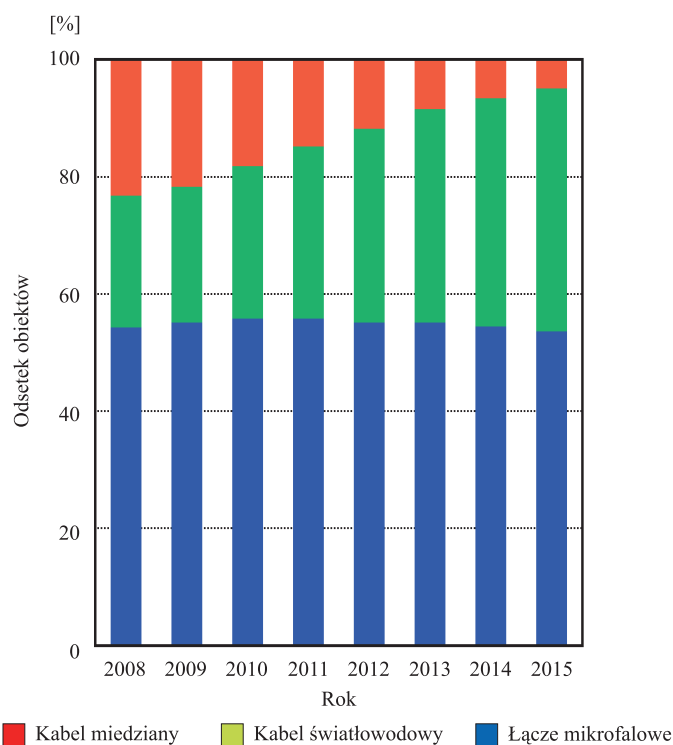
Krzysztof Borzycki, Paweł Gajewski,
Stanisław Dziubak, Michał Jabłoński

W artykule przedstawiono metody monitoringu technicznego telekomunikacyjnych sieci kablowych i ich elementów oraz system monitoringu sieci kablowych SPOT opracowany w ramach projektu rozwojowego OR00012612. System ten służy do scentralizowanego wykrywania uszkodzeń i nieuprawnionych ingerencji w sieciach kablowych miedzianych i światłowodowych. Rola monitoringu sieci kablowych wzrasta wobec obserwowanego w ostatnich latach znacznego wzrostu liczby uszkodzeń związanych z robotami budowlanymi i drogowymi oraz kradzieżami kabli.

Hermetyzacja sieci, kable miedziane, kable światłowodowe, monitoring, oprogramowanie, sieci kablowe

Wprowadzenie

Sieci telekomunikacyjne i informatyczne wymagają odpowiedniej infrastruktury kablowej. Także w sieciach bezprzewodowych około 45% stacji bazowych (BTS) na świecie ma łącza kablowe, przeważnie światłowodowe (rys. 1) [1].



Rys. 1. Media transmisyjne w łączach do stacji bazowych

Działanie sieci wymaga fizycznej ciągłości torów transmisyjnych zbudowanych z par przewodów metalowych lub włókien światłowodowych i utrzymania ich parametrów w zakresie narzuconym przez współpracujące urządzenia aktywne.

Przerwy i zmiany parametrów linii kablowych to przyczyny większości zakłóceń w pracy. Sieć można wyposażać w mechanizmy ochronne, tworząc znane z sieci SDH pierścienie, bądź łącza z rezerwą 1+1 lub 1+N, gdzie urządzenia aktywne automatycznie przełączają ruch na nieuszkodzone zasoby, eliminując skutki pojedynczej awarii. Z powodu wysokich kosztów są one rzadko spotykane w sieciach dostępowych.

Większość systemów transmisyjnych ma funkcje nadzoru i sygnalizacji przerw w działaniu łączy i zmian tłumienności torów kablowych, lecz bez funkcji lokalizacji miejsca uszkodzenia kabla. Nadzór ten nie obejmuje nieużywanych linii kablowych. Właściciel infrastruktury kablowej, wynajmujący pary miedziane i „ciemne” włókna światłowodowe innym użytkownikom, nie ma dostępu do danych z ich systemów zarządzania siecią.

Sieci zawierają też liczne obiekty bezobsługowe: szafy kablowe, kontenerowe krotnice abonenckie, szafy dostępne z urządzeniami sieci VDSL i TV kablowej, czy stacje bazowe sieci komórkowych (BTS), narażone na wpływ środowiska, wandalizm i kradzieże. Liczba samych BTS-ów w Polsce przekracza 28 tysięcy i praca większości z nich zależy od sprawności światłowodowych łączy kablowych.

Awarie sieci telekomunikacyjnych prowadzą często do zakłóceń w działaniu instalacji ważnych dla gospodarki i bezpieczeństwa państwa: systemów kolejowych, bankowych, kontroli ruchu lotniczego, administracji, policji, numerów alarmowych, a straty z powodu niedostępności usług telekomunikacyjnych są znacznie wyższe od kosztów naprawy.

Dla sprawnego utrzymania infrastruktury i zachowania określonych parametrów jakości usług QoS (*Quality of Service*) przez umowy z klientami SLA (*Service Level Agreement*) i regulatorów, niezbędne jest:

- monitorowanie stanu sieci kablowej przez wyspecjalizowany i autonomiczny system,
- detekcja, identyfikacja, lokalizacja i sygnalizacja zdarzeń zagrażających pracy sieci, jak przerwa kabla, otwarcie obiektu, pożar, czy zmiany parametrów,
- wspomaganie procesów ochrony i utrzymania infrastruktury kablowej,
- rejestracja, analiza i raportowanie zdarzeń w sieci.

Poniżej przedstawiono zagrożenia i mechanizmy uszkodzeń sieci kablowych, metody lokalizacji uszkodzeń kabli i system monitoringu infrastruktury telekomunikacyjnej SPOT. System ten powstał w latach 2010-2012, w wyniku realizacji projektu rozwojowego z zakresu obronności i bezpieczeństwa „Prototyp systemu perymetrycznej ochrony infrastruktury telekomunikacyjnej”, finansowanego przez NCBiR. Wykonawcą było konsorcjum złożone z Instytutu Łączności, który odpowiadał za opracowanie elementów sprzętowych i firmy informatycznej Asseco Poland, która przygotowała oprogramowanie dla Centrum Nadzoru i Stacji Nadzoru. Wybrane elementy SPOT zainstalowano dla przetestowania w sieci dostępowej TP S.A.

Zagrożenia dla telekomunikacyjnych sieci kablowych

Rodzaje uszkodzeń

Najczęściej spotykane przyczyny uszkodzeń infrastruktury kablowej to:

- 1) roboty budowlane i drogowe, których skutkiem są przecięcia lub uszkodzenia kabli, kanalizacji i studni kablowych,

- 2) kradzieże kabli i osprzętu, dewastacje, włamania do obiektów i sabotaż,
- 3) wypadki komunikacyjne powodujące uszkodzenia podpór linii napowietrznych i szaf ulicznych, a także uszkodzenia studni kablowych przez pojazdy,
- 4) warunki zewnętrzne: wichury, szkody górnicze, osuwiska gruntu, oblodzenie, uszkodzenia linii napowietrznych przez złamane drzewa,
- 5) błędy w trakcie prac przy utrzymaniu i eksploatacji sieci: przecięcia kabli, zwarcia przewodów, błędne przełączenia, nadmierne zginanie światłowodów,
- 6) starzenie kabli i osprzętu pod wpływem temperatury, wilgoci i wibracji,
- 7) przegryzanie kabli przez zwierzęta.

W kraju dominują powody 1 i 2. Zdecydowana większość kabli telekomunikacyjnych jest układana pod ziemią w kanalizacji z bloków betonowych lub rur osłonowych HDPE, stąd typowe dla linii napowietrznych uszkodzenia 4 i 6 są nieliczne.

Instalacje napowietrzne są typowe na obszarach wiejskich, gdzie kable z parami przewodów miedzianych są wieszane na słupach drewnianych pozostałych po liniach z przewodami niez izolowanymi. Stan słupów jest często zły i dochodzi do awarii (rys. 2). Światłowodowe kable napowietrzne są rzadko używane, m.in. z powodu podatności kabli o przekroju ósemkowym na wibracje od wiatru, prowadzące do uszkodzeń.



Rys. 2. Złamany drewniany słup w sieci dostępowej

Od 1993 r. zainstalowano ponad 15 tys. km przewodów odgromowych z włóknami światłowodowymi OPGW (*Optical Ground Wire*) na liniach 110 kV, 220 kV i 400 kV. Branża energetyczna ma dobre doświadczenia z ich eksploatacją. Samonośne dielektryczne kable światłowodowe ADSS (*Aerial Dielectric Self Supported*) są instalowane rzadziej, przeważnie na liniach średniego napięcia nieposiadających przewodów odgromowych. Wskutek licznych awarii zrezygnowano natomiast z dielektrycznych kabli światłowodowych, podczepianych do przewodów fazowych.

Wzrost liczby uszkodzeń kabli podczas prac budowlanych, to efekt dużej liczby inwestycji infrastrukturalnych po wejściu Polski do UE w 2004 r., nieostrożności wykonawców oraz błędnej lub niekompletnej dokumentacji sieci kablowej. Spadku liczby uszkodzeń tego typu w krótkiej i średniej perspektywie nie można oczekiwać.

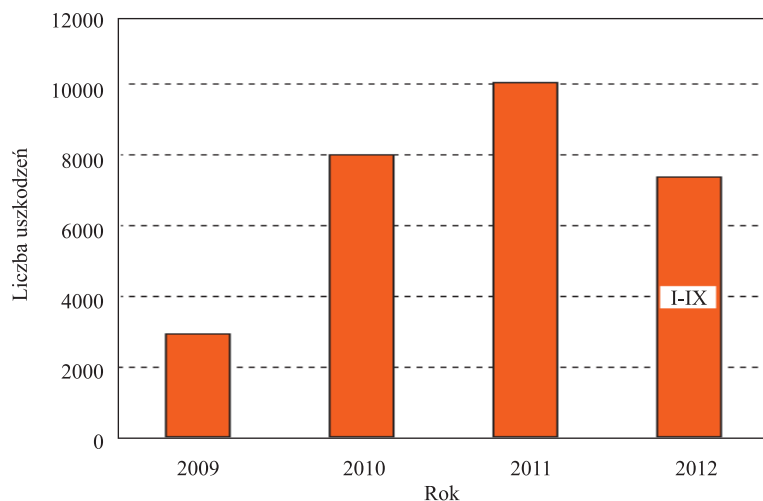
Kradzieże kabli

Poważne zagrożenie stanowią kradzieże kabli miedzianych w celu sprzedaży miedzi na złom. Podstawowa forma kradzieży to włamanie do dwóch lub więcej studni kablowych (rys. 3), przecięcie kabli i wyciągnięcie ich z kanalizacji. Spotyka się również wykopywanie kabli doziemnych i zdejmowanie kabli napowietrznych. W rejonach, gdzie pokrywy studni kablowych wzmocniono i zaopatrzone w zabezpieczenia mechaniczne, obserwuje się odkopywanie kanalizacji i włamania do niej.



Rys. 3. Pokrywa studni kablowej rozbita przez złodziei w Warszawie w 2013 r.

W sieci TP S.A. od stycznia 2009 r. do września 2012 r. zanotowano 28308 kradzieży lub usiłowania kradzieży kabli połączonych z dewastacją. W latach 2011-2012 takich zdarzeń notowano średnio 30 dziennie (rys. 4), co spowodowało 1,6 mln uszkodzeń łączy abonenckich [2]. Kradzieże to główny powód niedostępności usług w stałej sieci dostępowej: w 2010 r. było 0,5 mln uszkodzeń na 7,5 mln czynnych przyłączy abonenckich TP S.A. – tj. 67 uszkodzeń na 1000 przyłączy.



Rys. 4. Uszkodzenia na skutek kradzieży w sieci TP S.A. w latach 2009-2012

Uwagę zwraca koncentracja geograficzna. W 2012 r. opisywane zjawiska miały miejsce głównie w okolicach Katowic, Szczecina, Gdańska i Łodzi [2]. Wskaźniki uszkodzeń były tam kilkakrotnie wyższe od średniej krajowej oraz pojawiały się seryjne uszkodzenia tych samych linii: dla 30% z nich w czasie 19 miesięcy (styczeń 2010 – lipiec 2011) co najmniej 7-krotnie [3]. Po okresie koncentracji kradzieży kabli na Górnym Śląsku, gdzie w 2010 r. było ich aż 4858, tj. 48,4% całej liczby w kraju i wzmożeniu aktywności policji w tym rejonie, nastąpiła migracja zjawiska na Pomorze [2], [4].

Koszty materiałów niezbędnych do napraw w latach 2009-2012 wyniosły 95 mln zł, co jest kwotą dużą, ale nadal nieobejmującą robocizny, strat przychodów z usług oraz utraty niezadowolonych klientów. Kradzieże miedzianych kabli telekomunikacyjnych, energetycznych i kolejowych, to także poważny problem w Wielkiej Brytanii [5]-[7], gdzie straty w 2011 r. oszacowano na ok. 4 mld zł, RPA, Włoszech, Austrii i Indiach.

Prócz straty kabli miedzianych, podczas kradzieży lub ich usiłowań dochodzi zwykle do:

- przecinania sąsiednich kabli, także światłowodowych,
- niszczenia studni kablowych i kanalizacji,
- uszkodzeń złączy kablowych, szaf i innego osprzętu,
- pozostawiania otwartych studni i szaf ulicznych, stanowiących zagrożenie dla ludzi i pojazdów oraz narażonych na dalsze uszkodzenia lub zalanie wodą.

Obiektem zainteresowania złodziei i wandalii są też kable energetyczne i przewody uziemiające stacji bazowych sieci komórkowych, kontenery i szafy uliczne z wyposażeniem, akumulatorami i okablowaniem.

W 2011 r. pojawiło się w Polsce zjawisko kradzieży poprzez wyciąganie kabli światłowodowych z kanalizacji w miejscach budowy sieci, dla odsprzedaży innym użytkownikom. W Indiach podobne kradzieże notowano już w 2008 r. [8].

Naprawy kabli światłowodowych są kosztowne. Wykonanie złącza kabla 144-włóknowego razem z pomiarami OTDR z obu końców linii trwa 6-12 h i kosztuje 8-10 tys. zł, bez uwzględnienia kosztów dojazdów, napraw studni kablowych i odszkodowań dla klientów pozbawionych usług itd. Dodatkowe jedno lub dwa złącza spawane w naprawionej linii wprowadzają straty rzędu 0,1-0,4 dB. Wzrost tłumienia torów światłowodowych po serii uszkodzeń może przekroczyć rezerwę budżetu mocy łącza, ustaloną zwykle na 2-6 dB, zmuszając operatora do odbudowy całej linii długości 50-80 km. Sytuacje takie wystąpiły w sieciach DWDM na Górnym Śląsku. Mimo, że wykrywalność takich przestępstw w 2012 r. wyniosła 14%, wiele spraw jest umarzanych na skutek „niskiej szkodliwości społecznej” czynu.

Inne rodzaje uszkodzeń

Przypadki sabotażu (przecinania) linii kablowych są w Polsce rzadkie. Występują głównie na tle sporów między operatorem a właścicielem nieruchomości, przez którą przechodzi linia. Inne pospolite w kraju uszkodzenia infrastruktury kablowej to uszkodzenia studni kablowych obok dróg przez samochody ciężarowe, wyłamywanie i kradzieże żeliwnych wkładów pokryw studni kablowych, uszkodzenia kabli napowietrznych przez złamane drzewa. Spotyka się też nielegalne układanie przez operatorów alternatywnych swych kabli w kanalizacji TP S.A. bez uzgodnień i opłat. Obiekty mieszczące urządzenia aktywne i systemy zasilania bezprzewodowego są narażone również na przegrzanie wskutek wysokiej temperatury na zewnątrz i nasłonecznienia, uszkodzenia akumulatorów w niskich temperaturach i kondensację wilgoci wewnątrz.

Przeciwdziałanie takim zjawiskom wymaga zamykania i monitorowania otwarcia wszystkich studni kablowych na danym obszarze. Zestaw środków używanych do zabezpieczenia sieci kablowej przed uszkodzeniami przez czynniki zewnętrzne i nieuprawnioną ingerencją nosi nazwę „hermetyzacji sieci”. Odpowiednie czujniki i systemy alarmowe są dostępne, jednak dla operatora sieci lepszy jest jeden system zapewniający zintegrowaną ochronę całej infrastruktury.

Uszkodzenia linii kablowych

Uszkodzenia prowadzące do przerwy lub zmian parametrów linii można podzielić według kryteriów szybkości rozwoju i długości uszkodzonego odcinka, jak pokazano w tabeli 1. Styl druku wskazuje prawdopodobne konsekwencje:

- **uszkodzenie trwale: niezbędna wymiana lub naprawa,**
- uszkodzenie trwale w części przypadków,
- *uszkodzenie przemijające po zaniku przyczyny.*

Tabela 1. Klasyfikacja typowych uszkodzeń linii kablowych

Skupione	Natychmiastowe	Stopniowe
	Przecięcie kabla	Korozja złączy miedzianych
	Zgniecenie kabla	Zawilgocenie osłony złącza
	Zwarcie pary miedzianej	Uszkodzenie połączenia od wibracji
	<i>Zgięcie włókna światłowodowego</i>	Uszkodzenie uchwytu od wibracji
	<i>Rozłączenie toru transmisyjnego</i>	Osiadanie gruntu
Rozłożone	Kradzież kabla	Starzenie i zawilgocenie kabla
	Uszkodzenie OPGW od zwarcia	Ruchy gruntu i szkody górnicze
	Złamany słup linii napowietrznej	Migracja włókien w kablu
	Uszkodzony uchwyt kabla napowietrzego	Oblodzenie kabla napowietrzego
		<i>Niska temperatura (światłowody)</i>

Uszkodzenia natychmiastowe

Natychmiastowe uszkodzenie linii kablowej nie jest poprzedzone mierzalną, stopniową zmianą parametrów. Najczęściej spotykane przecięcia kabli wskutek kradzieży lub prac budowlanych powodują nagle przerwanie wszystkich par przewodów lub włókien światłowodowych. Nie można tu wykonać działań prewencyjnych, lecz można wyznaczyć strefy zagrożone na podstawie statystyki wcześniejszych uszkodzeń i charakterystyk obszarów, przez które przechodzi linia kablowa.

W razie takiego uszkodzenia krytyczna jest szybkość jego wykrycia i czas przybycia na miejsce pracowników ochrony lub policji. System monitoringu musi lokalizować przerwę kabla z dokładnością nie gorszą niż 300 m, porównywalną do długości sekcji między studniami kablowymi, względnie sy-

gnalizować otwarte studnie kablowe. Reakcja w ciągu 10 minut umożliwia schwytanie złodziei na gorącym uczynku lub ich spłoszenie bez zabrania kabli, co redukuje koszt i czas naprawy.

Uszkodzenia stopniowe

Uszkodzenia tego typu rozwijają się powoli, w czasie od tygodni do 20 lat i dłużej i są powodowane m.in. przez:

- wnikanie wilgoci lub lekkich węglowodorów do kabli i osprzętu,
- starzenie polimerów pod wpływem wysokich temperatur lub światła,
- wibracje (linie napowietrzne, wzdłuż torów kolejowych, na mostach i wiaduktach),
- korozję elektrochemiczną (metale) i naprężeniową (polimery, włókna szklane),
- migrację włókien wewnątrz kabli światłowodowych.

Okresowe pomiary zmieniających się parametrów tłumienia jednomodowych włókien światłowodowych dla długości fali 1550 lub 1625 nm, rezystancji izolacji par przewodów, czy poziomów zakłóceń w sieciach współosiowych i analiza ich wyników przez oprogramowanie bądź wyszkolonego operatora umożliwiają predykcję uszkodzeń i naprawy prewencyjne. Uszkodzenia takie mogą także ujawniać się nagle, choć z opóźnieniem. Przykłady to:

- skutki zamarzania zimą wody zgromadzonej w osłonie złączowej na linii napowietrznej,
- pękanie włókien światłowodowych poddanych ostremu zginaniu w osłonie złączowej, szafce lub przełącznicy po niestarannej instalacji,
- przegrzanie i pęknięcie lub nawet zapalenie się ciasno zgiętego włókna światłowodowego przenoszącego sygnał o mocy pow. 400 mW [11]-[12].

Zmiany parametrów pod wpływem czynników zewnętrznych

Specjalną kategorię stanowią zmiany parametrów i awarie kabli napowietrznych wskutek ciężkich warunków pogodowych: niskich temperatur (-30 do -40°C), oblodzenia lub porywistego wiatru. Warunki takie utrzymują się na ogół do 200 h, a po ich zaniku parametry linii kablowej mogą samoczynnie wrócić do normy. Przykładem jest wzrost tłumienności kabla światłowodowego z ośrodkiem tubowym niskiej jakości lub zestarzonemu po wielokrotnej ekspozycji na wysokie temperatury, obserwowany po spadku temperatury poniżej pewnego progu, np. -30°C, kiedy włókna światłowodowe ulegają silnym mikrozmęgnięciom po wykorzystaniu całego zakresu swobodnego ruchu wewnątrz skurczonych tub ośrodka [13], bądź formowania się kryształów lodu lub bryłek stwardniałego żelu.

Okresy podwyższonej intensywności uszkodzeń powyższego typu są częściowo przewidywalne na podstawie prognoz pogody, pomiarów temperatury i siły wiatru, itp. Zachowanie narażonych elementów sieci kablowej jest jednak w dużym stopniu losowe i można jedynie przewidywać podwyższone ryzyko uszkodzeń w określonym rejonie i czasie. Dane z monitoringu parametrów wskazują natomiast elementy sieci kablowej niespełniające standardów niezawodności, które należy wymienić.

W sieciach z parami przewodów miedzianych, wzrost rezystancji lub przerwa może być wynikiem uszkodzeń korozyjnych lub mechanicznych łączówek. Wnikanie wody przez nieszczelną powłokę kabla lub pojemnik osłony złączowej prowadzi też do upływności między przewodami lub przewodami a ziemią. Problem dotyczy głównie linii zbudowanych przed 1992 rokiem, zanim wprowadzono w kraju żelowanie ośrodka kabli i łączówek.

Zasady monitoringu sieci kablowej w systemie SPOT

Zdecydowana większość uszkodzeń linii kablowych powoduje przerwę, zwarcie bądź zmiany parametrów wszystkich par przewodów lub włókien światłowodowych. Statystyki Bellcore z USA [14] podają że 86% uszkodzeń podziemnych kabli światłowodowych podczas prac ziemnych i budowlanych (80% wszystkich uszkodzeń) doprowadziło do przerywania wszystkich włókien w kablu. Odsetek ten jest niższy dla uszkodzeń powodowanych m.in. przez gryzienie, wyładowania atmosferyczne i ostrzał z broni palnej, względnie rzadkich w Polsce. Z tego powodu wystarcza monitorowanie jednej pary lub włókna w każdej linii. Wyjątki to błędy w montażu i przełączaniu, obejmujące zwykle pojedyncze pary lub włókna, sabotaż wybranych łączy i instalacja odgałęzienia, wymagająca przecięcia i ponownego zespawania włókna.

System monitoringu powinien zapewnić szybkie i niezawodne wykrycie uszkodzenia i jego lokalizację oraz mieć zasięg wystarczający do nadzoru linii w całym zakresie długości. Lokalizacja jest ważniejsza dla linii światłowodowych o długości do 100-120 km, niż przyłączy miedzianych w sieci dostępowej o długości do 5-8 km (dane sieci w kraju). Jak pokazano w Tabeli 2, nie ma metod uniwersalnych. Szarym tłem wyróżniono metody zastosowane w SPOT.

Tabela 2. Porównanie typowych metod monitoringu kabli telekomunikacyjnych

Metoda	Lokalizacja uszkodzenia	Czas detekcji uszkodzenia [s]	Zasięg [km]	Uwagi
Monitoring kabli miedzianych				
Kontrola ciągłości elektrycznej	Nie	<1	>30	Niski koszt
Pomiary rezystancji i pojemności	Tak (mało dokładna)	1-10	≥15*	Średni koszt
Reflektometryczna (TDR)	Tak (dokładna)	~5	3-5*	Wysoki koszt. Możliwe zakłócenia
Monitoring kabli światłowodowych				
Transmisyjna (źródła i odbiorniki)	Nie	<1	≥150	Możliwy nadzór czynnych włókien
Reflektometryczna (OTDR)	Tak (dokładna)	20-1200**	50-120***	Możliwy nadzór czynnych włókien. Wysoki koszt
* zależy od przekroju przewodów w kablu, ** zależy od liczby sekwencyjnie kontrolowanych linii *** dla kabli jednomodowych, zależy od wymaganej zdolności rozdzielczej				

SPOT wykonuje cykliczne pomiary parametrów wybranych par przewodów i włókien, porównując ich wyniki z danymi wzorcowymi pochodzącymi z pomiarów wykonanych w czasie tzw. kalibracji linii. Zmiana parametru przekraczająca zakres tolerancji powoduje alarm i określenie miejsca uszkodzenia. Monitorowane parametry obejmują:

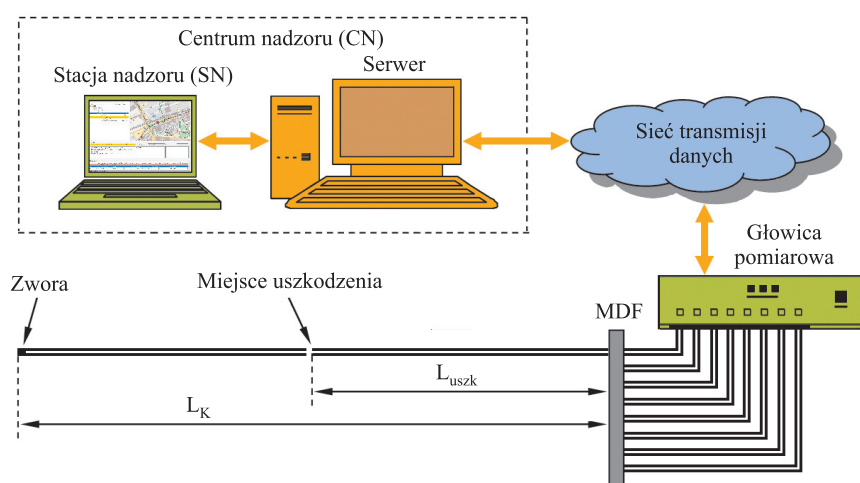
- dla par przewodów miedzianych: rezystancję pętli przewodów R, pojemności między przewodami C i rezystancji pomiędzy przewodami a ziemią (Rz),

- dla jednomodowych włókien światłowodowych: charakterystyki reflektometryczne amplitudy sygnału powracającego z toru optycznego w funkcji opóźnienia względem wprowadzanego do włókna impulsu sondującego, mierzone światłowodowym reflektometrem impulsowym OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*).

Uwarunkowania zasięgu oraz dokładności lokalizacji uszkodzenia są odmienne dla kabli miedzianych i światłowodowych.

Monitoring kabli miedzianych

Zasada lokalizacji uszkodzenia bazuje na monitorowaniu pary przewodów, która jest zwarta na końcu linii oddalonym od głowicy pomiarowej, co umożliwia pomiary rezystancji w pętli (rys. 5).



Rys. 5. Lokalizacja uszkodzenia kabla z przewodami miedzianymi

Uszkodzenia par przewodów miedzianych w kablach telekomunikacyjnych objawiają się przeważnie [15] jako:

- 1) zwarcie przewodów ze sobą,
- 2) przerwa jednego lub obu przewodów,
- 3) upływność izolacji między przewodami, widoczna jako rezystancja bocznikująca,
- 4) wtrącenie dodatkowej rezystancji w obwód.

Objawy 1 i 2 są typowe dla najczęściej spotykanych uszkodzeń kabli wywołanych przez nagłe czynniki zewnętrzne: roboty ziemne, budowlane i drogowy, uszkodzenia słupów i szaf kablowych przez pojazdy, kradzieże kabli, sabotaż, itp. Objawy 3 i 4 sygnalizują na ogół powoli rozwijające się uszkodzenia spowodowane korozją przewodów, degradacją złączy lub zawilgoceniem ośrodka kabla. Zawilgocenie ośrodka kabla powoduje też około 3-krotny wzrost pojemności między przewodami [16].

W wymienionych sytuacjach zmienia się rezystancja widziana przez głowicę pomiarową (GP): spada w przypadkach 1 i 3, a rośnie w przypadkach 2 i 4. W sytuacji zupełnego zwarcia lub przerwy możliwa jest lokalizacja uszkodzenia na podstawie zmian parametrów elektrycznych pary – rezystancji przypadku 1 i pojemności dla 2. Automatyczny wybór trybu pomiaru odległości odbywa się na podstawie kierunku zmian 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 miejsca do 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.

Zasięg i dokładność lokalizacji uszkodzenia zależą od parametrów monitorowanych kabli, technologii budowy sieci kablowej i jakości jej dokumentacji oraz procedury pomiarowej.

Własności kabli i wpływ temperatury

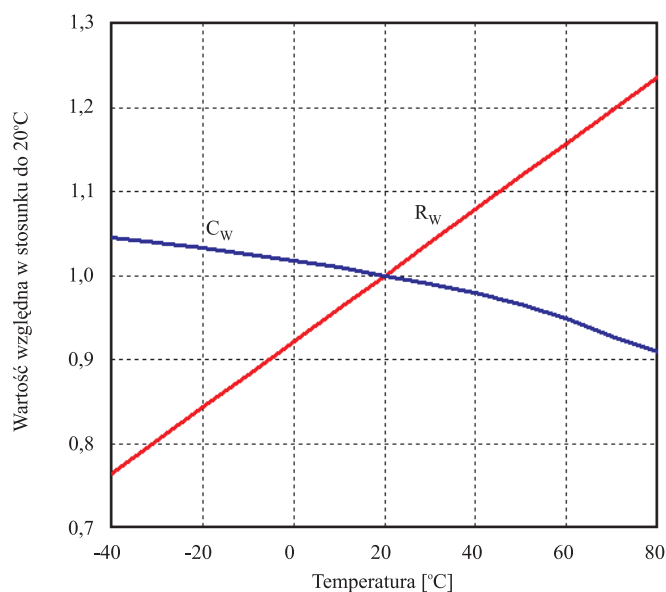
Kable dla sieci dostępowych produkowane zawierają pary przewodów miedzianych o średnicy 0,4-0,8 mm w izolacji z polietylenu niskiej gęstości (LDPE) litego lub spienionego [17]. Kable dla innych zastosowań mają przewody o średnicach do 1,4 mm [18]. Dane kable istotne dla pracy systemu monitoringu zestawiono w Tabeli 3 [18].

Tabela 3. Parametry par przewodów w kablach miejscowych w temperaturze +20°C

Średnica przewodu [mm]	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2
Rezystancja pętli maks. [Ω /km]	300,0	191,8	133,2	73,6	56,6	45,6	31,8
Pojemność skuteczna maks. [nF/km]	55	55	55	55	26-60*	26-60*	26-60*
* zależny od konstrukcji i przeznaczenia kabla							

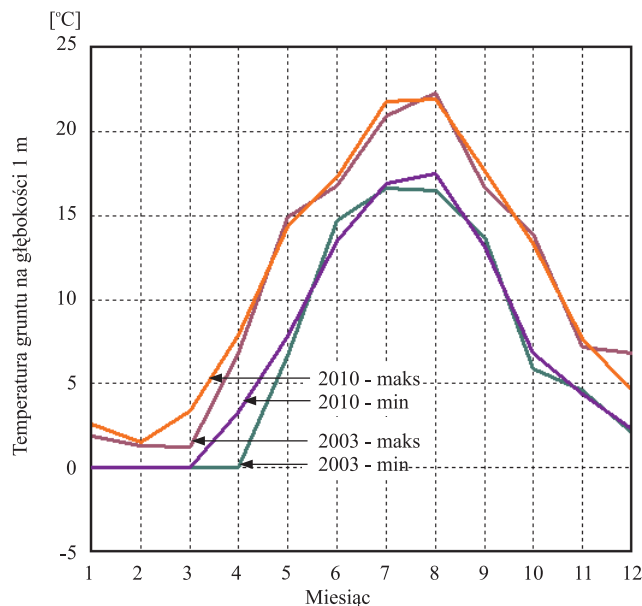
Tolerancja produkcyjna rezystancji i pojemności par w kablach telekomunikacyjnych wynosi odpowiednio około $\pm 3\%$ i $\pm 10\%$, co sugeruje wyższą dokładność lokalizacji zwarcia niż przerwy. Niestety, przyłącza abonenckie często zawierają sekcje o różnych średnicach przewodów, których rezystancja 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 jest ścisła i kompletna. Problem ten nie występuje przy lokalizacji przerw kabli telekomunikacyjnych o nominalnie identycznej pojemności par.

Złącza rozmieszczone co 120-300 m wnoszą pomijalną rezystancję $\leq 0,003 \Omega$ [19] i pojemność. Duże znaczenie mają natomiast zmiany parametrów kabli z temperaturą. Rezystywność wyżarzanej miedzi elektrolitycznej stanowiącej materiał żył w kablach miejscowych rośnie prawie liniowo z temperaturą, o 0,393%/K przy +20°C, natomiast przenikalność dielektryczna litego LDPE używanego do ich izolacji spada nieliniowo z temperaturą [20]. Związane z tym zmiany parametrów przewodów miedzianych z izolacją z litego LDPE przedstawiono na rys. 6. Zmiany pojemności między przewodami w izolacji z polietylenu spienionego z temperaturą są mniejsze.



Rys. 6. Względna rezystancja pętli R_W i pojemność C_W pary przewodów w funkcji temperatury

Zakres zmian parametrów kabla zależy od przedziału temperatur pracy. Pomiarzy 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 w latach 2003-2010 wykazały, że roczna zmienność temperatury mieści się w zakresie $\pm 12^\circ\text{C}$ w odniesieniu do średniej rocznej temperatury, która jest bliska $+10^\circ\text{C}$ [21]-[23]. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 7.



Rys. 7. Roczne zmiany temperatury gruntu w miejscowości Sobolewo w latach 2003-2010

Długotrwałe ustalenie minimalnej temperatury w sezonie zimowym na poziomie 0°C wskazuje, że woda gruntowa podczas procesu zamarzania i topnienia odbiera i dostarcza ciepło stabilizując temperaturę. W suchym, piaszczystym gruncie efekt ten nie wystąpi i można oczekiwać szerszego przedziału temperatur. Podobnie będzie w gruncie skalistym o wysokiej przewodności termicznej, gdzie transfer ciepła z i do atmosfery jest szybszy.

Zakres temperatur pracy kabli napowietrznych w Polsce należy do najszerszych na świecie i rozciąga się od około -40°C, zanotowanych w 1913, 1939-40 i 1987 r. do około +70°C dla kabla z czarną powłoką grzanego 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 Tabeli 4. System monitoringu powinien tolerować te zmiany bez generowania fałszywych alarmów o uszkodzeniach lub przekroczenia zakresu pomiarowego.

Tabela 4. Temperatury kabli miejscowych i zmiany parametrów par przewodów

Rodzaj kabla	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 pary [%]	+1,2 / -1,5	+4,0 / -9,6

Zmiany rezystancji z temperaturą są znaczne, natomiast wpływ starzenia i normalnie spotykanych sił rozciągających na oba parametry kabla jest pomijalny.

Zasięg lokalizacji uszkodzenia

Parametry chronionej linii powinny mieścić się w zakresach pomiarowych, z marginesami na wzrost rezystancji i pojemności pod wpływem temperatury (Tabela 4), wzrost rezystancji po degradacji złączy i innych elementów (20%) i inne zjawiska (10%). Przy tych założeniach, rezystancja pętli i pojemność pary przewodów linii w temperaturze odniesienia nie powinny przekraczać odpowiednio 73% i 90% górnej granicy zakresu pomiarowego dla linii podziemnych oraz 65% i 87% dla napowietrznych.

Tabela 5. Zakresy pomiaru pojemności i rezystancji głowicy pomiarowej SPOT

Zakres pomiaru rezystancji pętli (nominalny)	4095 Ω
Zakres pomiaru rezystancji (linie podziemne)	3008 Ω
Zakres pomiaru rezystancji (linie napowietrzne)	2701 Ω
Zakres pomiaru pojemności (nominalny)	1000 nF
Zakres pomiaru pojemności (linie podziemne)	899 nF
Zakres pomiaru pojemności (linie napowietrzne)	877 nF

Jak pokazano w Tabeli 6, zasięg użyteczny jest ograniczony praktycznie tylko przez zakres pomiaru pojemności, gdyż kable z żyłami 0,4 mm służą do budowy krótkich linii i odgałęzień, i wynosi około 16 km. Monitoring spotykanych w sieciach kolejowych linii z przewodami o średnicy 1,0-1,4 mm i długości do 40 km wymaga zakresu pomiaru pojemności rozszerzonego do 2,5-3 μF .

Tabela 6. Maksymalne długości monitorowanych linii kablowych

Średnica przewodu [mm]	0,4	0,5	0,6	0,8
Rezystancja pętli maks. [Ω/km]	300,0	191,8	133,2	73,6
Pojemność skuteczna maks. [nF/km]	55	55	55	55
Zasięg dla $R = 3008 \Omega$ (linie podziemne) [km]	10,03	15,68	22,58	40,87
Zasięg dla $R = 2701 \Omega$ (linie napowietrzne) [km]	9,00	14,08	20,28	36,70
Zasięg dla $C = 899 \text{ nF}$ (linie podziemne) [km]	16,35			
Zasięg dla $C = 877 \text{ nF}$ (linie napowietrzne) [km]	15,95			

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 zależnościami (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. 6. 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, która objawia się zmianą względnej rezystancji R_W i pojemności C_W par w kablu, przedstawioną na rys. 6.

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: T_K - temperatura kabla w czasie kalibracji, T_P - temperatura kabla w czasie pomiaru po uszkodzeniu.

Błąd pomiaru odległości do przerwy określa podobna zależność:

$$\Delta L_{\text{uszk}} = L_{\text{uszk}} \cdot C_W. \quad (5)$$

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 dla przypadku dodawania się błędów obu rodzajów, zestawiono w Tabelach 7, 8 i 9, gdzie znak określa kierunek największego błędu w danych warunkach.

Tabela 7. Niepewność lokalizacji uszkodzenia $\Delta L_{uszk}/L_{uszk}$ w linii jednorodnej

$\Delta L_{uszk}/L_{uszk}$ [%]		Rodzaj uszkodzenia	
		Zwarcie	Przerwa
$T_K - T_P$ [K]	-30	-13,8	+7,4
	-15	-7,9	+6,3
	0	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$
	15	+7,9	-6,5
	30	+13,8	-8,3

Lokalizacja zwarcia jest bardziej dokładna w zakresie temperatur pracy linii podziemnych. W szerszym dokładniejsza jest lokalizacja przerwy. Znak błędu związanego z wpływem temperatury jest dla obu metod lokalizacji uszkodzenia przeciwny.

Tabela 8. Błąd lokalizacji zwarcia ΔL_{uszk}

ΔL_{uszk} [%]		Odległość do miejsca uszkodzenia L_{uszk} [m]				
Różnica temperatur ($T_P - T_K$)		1000	2000	3000	4000	5000
	-30	-138	-276	-414	-552	-689
	-15	-79	-158	-237	-316	-395
	0	± 20	± 40	± 60	± 80	± 100
	15	+79	+158	+237	+316	+395
	30	+138	+276	+414	+552	+689

Tabela 9. Błąd lokalizacji przerwy ΔL_{uszk}

ΔL_{uszk} [%]		Odległość do miejsca uszkodzenia L_{uszk} [m]				
Różnica temperatur ($T_P - T_K$)		1000	2000	3000	4000	5000
	-30	-74	-148	-221	-295	-369
	-15	-63	-126	-189	-252	-315
	0	± 50	± 100	± 150	± 200	± 250
	15	+65	+131	+196	+261	+326
	30	+83	+166	+249	+332	+414

Lokalizacja uszkodzenia linii podziemnej z dokładnością nie przekraczającą podwójnej odległości między studniami kablowymi (ok. 250 m) jest możliwa w zakresie do 3-3,5 km. Wpływ temperatury można zmniejszyć, korygując wyniki pomiarów rezystancji i pojemności do wartości w temperaturze odniesienia zgodnie z rys. 6. Dane o temperaturze kabla mogą pochodzić z czujnika w studni kablowej lub być wprowadzane ręcznie.

Podczas lokalizacji uszkodzeń na trasie linii należy uwzględnić rozmieszczenie zapasów kabli (20-40 m) oraz nadmiar długości kabla wprowadzany przez zwisy i odcinki pionowe na zejściach ze słupów w liniach napowietrznych.

Dla uniknięcia fałszywych alarmów, zaprogramowane na stałe zmiany rezystancji pętli sygnalizowane jako uszkodzenie muszą być większe niż podane w Tabeli 6, np. $\pm 20\%$. Wadą tego rozwiązania jest brak sygnalizacji zwarcia blisko odległego końca linii, na przykład podczas kradzieży ostatnich 150 m kabla, kiedy rezystancja linii długości 3 km spada o tylko 5%. Należy je uzupełnić o porównywanie wyników pomiarów w krótkim przedziale czasu, przykładowo 15 minut, z mniejszym zakresem tolerancji.

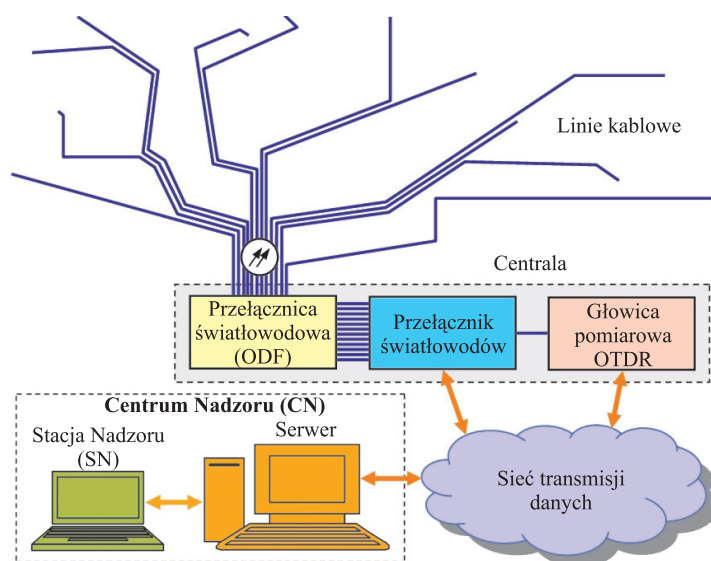
Monitoring kabli światłowodowych

Do nadzoru sieci światłowodowych wybrano metodę reflektometryczną impulsową OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*), która umożliwia lokalizację miejsca uszkodzenia z dokładnością 10-200 m, pozwala określić typ uszkodzenia (przerwa, wzrost tłumienności, odbicie), nie wymaga dostępu do obu końców linii i zbierania alarmów i danych z urządzeń transmisyjnych. Niemniej ma ona też wady, jak wysoki koszt reflektometru (10-30 tys. euro), długi czas pomiaru: (20-300 s) i skomplikowana interpretacja charakterystyk reflektometrycznych.

Budowa systemu

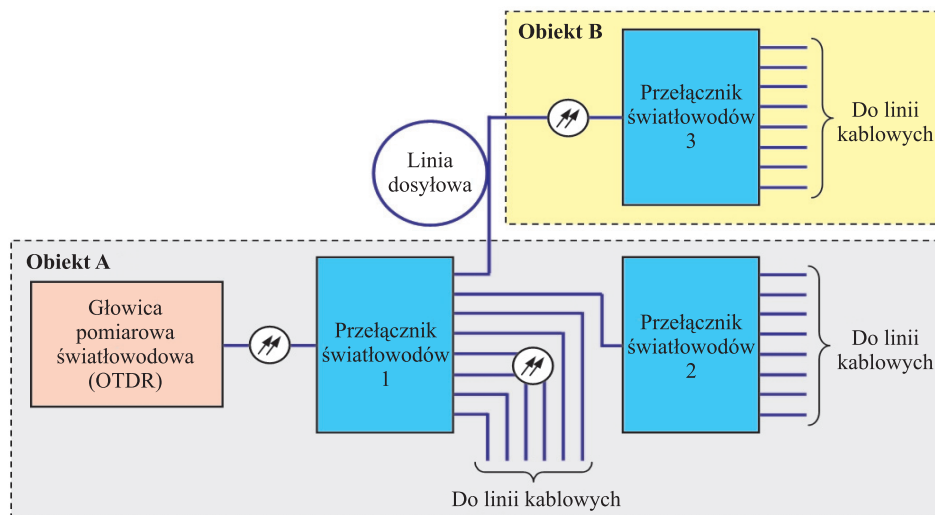
Wysoki koszt OTDR wymusza zmianę architektury systemu. GP dla kabli miedzianych ma zespół równoległe pracujących modułów pomiarowych przyłączonych na stałe do chronionych kabli, natomiast GP do kabli światłowodowych zawiera jeden OTDR, przyłączany do monitorowanych kabli za pomocą zdalnie sterowanego przełącznika światłowodowego (rys. 8). Zasadniczy tryb pracy to nadzór jednego wolnego włókna w każdym kablu.

OTDR pracuje w zakresie 1625-1650 nm lub 1550 nm, gdzie włókna jednomodowe mają minimalną tłumienność (0,18-0,25 dB/km) oraz najsilniejszą wrażliwość na oddziaływania zewnętrzne, jak zgięcia, ściskanie bądź degradację w wyniku uszkodzenia pokrycia ochronnego, wywołujące skupiony lub rozłożony wzrost tłumienności.



Rys. 8. Schemat blokowy systemu monitoringu kabli światłowodowych

Liczbę kabli chronionych przez pojedynczą GP można zwiększyć spinając szeregowo włókna z kilku krótkich linii kablowych w jeden obwód oraz łącząc kaskadowo przełączniki światłowodów, także umieszczone na różnych obiektach połączonych wolnym włóknem światłowodowym (rys. 9).



Rys. 9. Dwustopniowe przełączanie włókien światłowodowych

Wymienione rozwiązania obniżają koszt ochrony pojedynczej linii, ale niestety straty dodatkowych linii i przełączników sumują się, konfigurowanie systemu jest bardziej skomplikowane, oprogramowanie Centrum Nadzoru musi wydzielać dane poszczególnych linii z każdej charakterystyki reflektometrycznej. Wydłuża się także czas detekcji uszkodzenia.

Analogicznie jak dla kabli miedzianych, w czasie uruchamiania systemu wykonuje się kalibrację linii, tj. pomiar wzorcowej charakterystyki reflektometrycznej. Podczas nadzorowania sieci, system porównuje charakterystyki z bieżącymi pomiarów ze wzorcowymi.

Lokalizacja uszkodzeń

Lokalizacja przerwy lub skupionego wzrostu tłumienności włókna światłowodowego za pomocą odbywa się przez pomiar opóźnienia T_R pomiędzy wysłaniem impulsu sondującego przez reflektometr, a odbiorem sygnału odbitego lub rozproszonego, na podstawie zależności:

$$L_{\text{uszk}} = cT_R/2n_{\text{eff}}, \quad (6)$$

w której c – prędkość światła w próżni, a n_{eff} – współczynnik załamania światła dla danego włókna i długości fali (1,46-1,50), podawany przez producenta z dokładnością do 4 cyfr po przecinku i praktycznie niezależny od temperatury.

Niepewność pomiaru odległości do miejsca uszkodzenia włókna jest porównywalna z długością impulsu sondującego OTDR, która w typowych warunkach jest ustawiana w zakresie 10-100 m. Lokalizacja uszkodzenia na trasie linii kablowej musi uwzględnić obecność i rozmieszczenie zapasów kabli, nadmiar długości kabla wprowadzany przez zwisy i odcinki pionowe w liniach napowietrznych i nadmiar długości włókna światłowodowego w kablu (0,2-4%).

Budżet tłumienności i zasięg

Maksymalne rozmiary monitorowanego obszaru ogranicza budżet tłumienności optycznej T :

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

gdzie: D – określony dla $S/N = 1$ zakres dynamiki reflektometru światłowodowego [dB], zależny od szerokości impulsu. Istnieje kompromis między zakresem dynamiki i zasięgiem, a zdolnością rozdzielczą OTDR i czasem pomiaru. W przybliżeniu, każde podwojenie szerokości impulsu podwyższa zakres dynamiki o 1,5 dB, a podwojenie czasu pomiaru o 0,75 dB.

Suma strat elementów obwodu optycznego pokazanego na rys. 9 nie może przekraczać budżetu tłumienności OTDR, zgodnie z zależnością:

$$L_M\alpha + L_D\alpha + NS_P + (2N+1)S_Z \leq T \quad (8)$$

w której: L_M – długość linii kablowej monitorowanej [km], L_D – długość linii kablowej dosyłowej [km], α – tłumienność włókna w kablu ze złączami spawanymi [dB/km], N – liczba stopni rozgałęzienia ($N = 1$ lub 2), S_P – straty wnoszone przez przełącznik optyczny [dB], S_Z – straty złączy światłowodowych na przełączniczy na każdym obiekcie [dB].

Założono, że na każdym obiekcie z przełącznikiem w torze optycznym wstawione są 2 złącza rozłączalne. Typowe parametry dla długości fal 1550 nm i 1625 nm: $\alpha = 0,30$ - $0,35$ dB/km (włókno: $0,20$ - $0,25$ dB/km, złącza spawane: $0,2$ dB co $1,5$ - $2,5$ km), $S_P = 1,5$ - $2,0$ dB, $S_Z = 0,3$ - $0,6$ dB.

Przykłady obliczeń budżetu strat i zasięgu przedstawiono w Tabeli 10. Wariant 1 dotyczy monitoringu rozległej sieci strefowej ($N = 1$, rys. 8), 2 – sieci miejskiej o dużej liczbie linii kablowych, z przełącznikami wyniesionymi ($N = 2$, rys. 9), 3 - sieci pokrywającej mniejszy obszar, bez przełączników wyniesionych ($N = 1$), a z podwyższoną zdolnością rozdzielczą dla dokładnej lokalizacji uszkodzeń.

Tabela 10. Przykłady obliczeń budżetu tłumienności i zasięgu pomiaru

Parametr	Wariant 1	Wariant 2	Wariant 3
Zakres dynamiki OTDR (D) [dB]	35	30	25
Budżet tłumienności brutto (T) [dB]	30	25	20
Liczba stopni przełączania (N)	1	2	1
Straty przełącznika (S_p) [dB]	2	2	2
Straty złącza na ODF (S_z) [dB]	0,4	0,4	0,4
Budżet tłumienności netto [dB]	26,8	21,0	16,8
Tłumienność linii kablowej (a) [dB/km]	0,33	0,35	0,35
Zasięg ($L_M + L_D$) [km]	81,2	60,0	48,0

Uwzględniając że trasy linii kablowych odbiegają od linii prostych z powodu korzystania z dostępnej kanalizacji, pasów drogowych, linii energetycznych itp., średnica obszaru pokrytego przez monitorowaną sieć kablową może osiągnąć orientacyjnie 100 km.

Monitoring czynnych łączy światłowodowych

Czynne łączy jednomodowe można nadzorować reflektometrem pracującym poza zakresami widma zajmowanymi przez systemy transmisyjne: 1270-1350 nm i 1510-1590 nm, na zasadzie zwielokrotnienia falowego WDM (*Wavelength Division Multiplexing*). Zalecenie ITU-T L.41 przewiduje wykorzystanie tu długości fal bliskich 1650 nm [24].

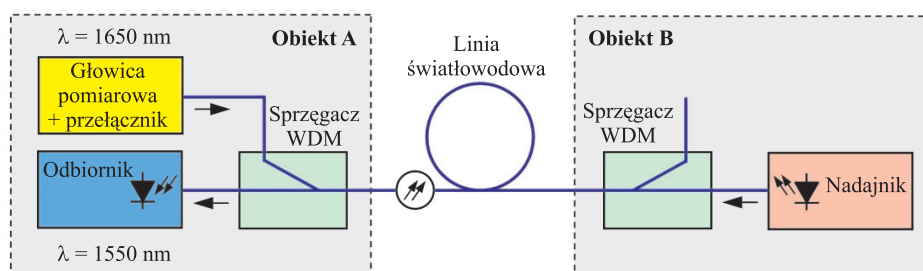
Nadzorowany tor światłowodowy należy wyposażyć na końcach w sprzęgacze WDM, separujące spektralnie ODTR od urządzeń aktywnych (rys. 10). Sprzęgacze podwyższają tłumienność toru optycznego o ok. 2,5 dB [25], co wymaga weryfikacji budżetu mocy łączy.

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 łączy prowadzi do ich intermodulacji w wyniku wymuszonego rozproszenia Ramana [26]-[27]. Zjawisko to jest najsilniejsze, kiedy długość fali OTDR jest o 70-120 nm dłuższa niż ta, na której pracuje łączy, na przykład 1550 nm, a praktycznie nie występuje w przypadku łączy 1310 nm. Podczas propagacji obu sygnałów w identycznym kierunku obserwuje się modulację amplitudy (tłumienie) sygnału w łączy w takt impulsów OTDR, które redukuje budżet mocy łączy i może prowadzić do błędów transmisji, wzmocnienie sygnału z OTDR wzdłuż linii i zaniżenie wskazań tłumienności, a także wzrost szumów na charakterystykach reflektometrycznych.

Wzajemne zakłócenia można ograniczyć przez propagację sygnałów w przeciwnych kierunkach i zmniejszenie mocy impulsów z OTDR wprowadzanych do włókna.

Przeciwbieżna propagacja impulsów z OTDR i nadajnika łączy w układzie z rys. 10 znacznie 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 wrażliwych na zakłócenia analogowych łączy spotykanych w sieciach TV kablowej. Ze względu na różne charakterystyki nadzorowanych łączy, w części przypadków jest konieczna redukcja mocy impulsów OTDR za pomocą tłumika, niestety kosztem spadku zakresu dynamiki i zasięgu systemu.



Rys. 10. Schemat monitoringu czynnego włókna światłowodowego

Koszt sprzęgaczy i ich montażu połączonego z przerwą w pracy łącza oraz konieczność sprawdzania kompatybilności systemu z nadzorowanym łączem sprawiają, że monitoring czynnych włókien stanowi wyjątkowe rozwiązanie dla ochrony sieci o specjalnym znaczeniu.

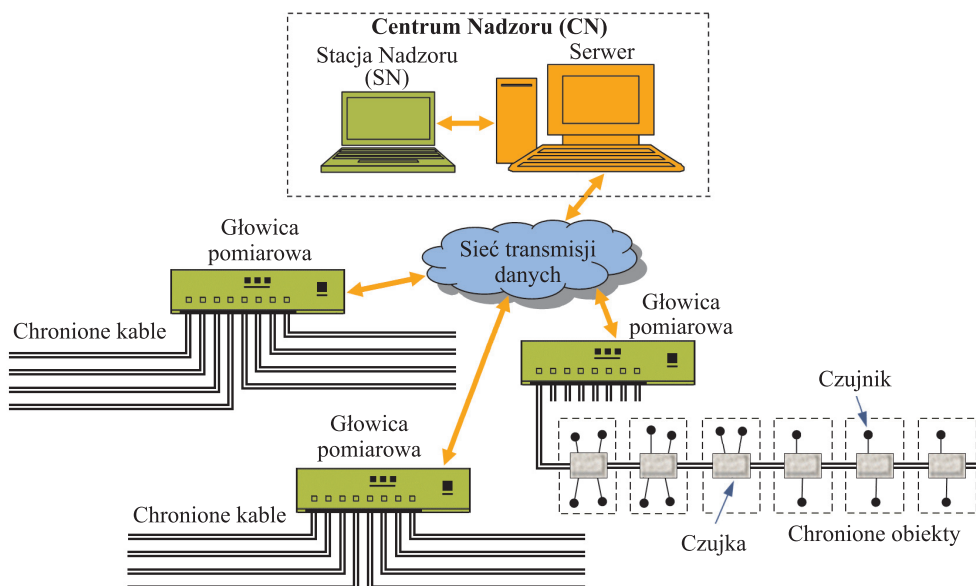
Opis techniczny systemu SPOT

Możliwości i elementy sprzętowe systemu

System SPOT umożliwia:

- monitorowanie ciągłości i parametrów (R, C) par przewodów miedzianych,
- lokalizację uszkodzeń kabli miedzianych,
- monitorowanie obiektów bezobsługowych za pomocą czujników,
- wprowadzanie i prezentację opisów obiektów i danych kontaktowych,
- sygnalizację uszkodzeń oraz prezentację elementów sieci i uszkodzeń na mapie,
- rejestrację i archiwizację zdarzeń w sieci,
- tworzenie raportów z danymi selekcjonowanymi według kryteriów użytkownika.

Ochrona linii kablowych obejmuje cykliczne pomiary parametrów par przewodów i włókien w liniach kablowych za pomocą głowic pomiarowych (GP) i porównywanie wyników z danymi wzorcowymi z pomiarów w czasie tzw. kalibracji linii. Zmiana przekraczająca ustalony zakres tolerancji powoduje alarm w centrum nadzoru (CN) i określenie przez oprogramowanie serwera CN miejsca uszkodzenia. System nadzoruje też obiekty bezobsługowe za pomocą czujników połączonych z GP parą przewodów przez interfejsy – czujki. Schemat blokowy SPOT przedstawia rys. 11.



Rys. 11. Konfiguracja systemu SPOT

Do serwera CN są dołączone Stacje Nadzoru (SN) – komputery PC z wyspecjalizowanym oprogramowaniem, używane przez operatorów weryfikujących alarmy i przekazujących zlecenia napraw lub interwencji do firm serwisowych, agencji ochrony lub jednostek policji.

Głowica pomiarowa dla kabli miedzianych (rys. 12) ma 8 lub 16 portów dla linii kablowych i 8 dla linii z czujkami. Maksymalna liczba czujek przyłączonych do jednej pary przewodów zależy od poboru mocy oraz rezystancji przewodów i zawiera się zwykle w granicach 15-40. GP zbiera dane przez sekwencyjne „odpytywanie” czujek - przy 30 czujkach na linii czas aktualizacji danych wynosi około 2 s. Dane GP zestawiono w Tabeli 11.

Czujka to interfejs elektroniczny, do którego można przyłączyć cztery czujniki. Prócz klasycznych czujników włamaniowych i pożarowych, dla ochrony infrastruktury telekomunikacyjnej przydatne są czujniki temperatur wykrywające przegrzanie urządzeń w szafach ulicznych i kontenerach lub przechłodzenie akumulatorów w tych obiektach, a także kamery i mikrofony umożliwiające dokumentowanie włamań, kradzieży i nielegalnych prac oraz sprawdzanie osób wykonujących planowe roboty w sieci.

Serwer CN współpracuje z rozmieszczonymi w chronionej sieci głowicami pomiarowymi, które są z nim połączone za pośrednictwem sieci transmisji danych, wykorzystując protokół transmisji UDP lub TCP/IP. Umożliwia to scentralizowany nadzór całej sieci kablowej operatora, przy praktycznie dowolnej liczbie i lokalizacji GP.



Rys. 12. Głowica pomiarowa do kabli miedzianych, czujka przewodowa i dwa czujniki otwarcia obiektu

Tabela 11. Dane techniczne głowicy pomiarowej do kabli miedzianych i czujek SPOT

Napięcie zasilania GP	48 V _{DC}
Liczba portów dla pomiarów kabli	8/16
Liczba portów dla czujek	8
Zakres pomiaru rezystancji pętli	0-4095 Ω
Zakres pomiaru pojemności	20-1000 nF
Zakres pomiaru rezystancji izolacji	0-500 kΩ
Napięcie zasilania czujek na zaciskach GP	62 V _{DC}
Przepływność transmisji danych z czujek	3,5 kbit/s
Napięcie zasilania czujki	12-62 V _{DC}
Zakres temperatur pracy GP	-20...+70°C
Zakres temperatur pracy czujki	-30...+70°C
Protokoły transmisji danych	TCP-IP, UDP
Interfejs transmisji danych do CN	Ethernet 10/100 Mbit/s, 2 Mbit/s E1, modem V.32bis

Oprogramowanie dla Centrum Nadzoru

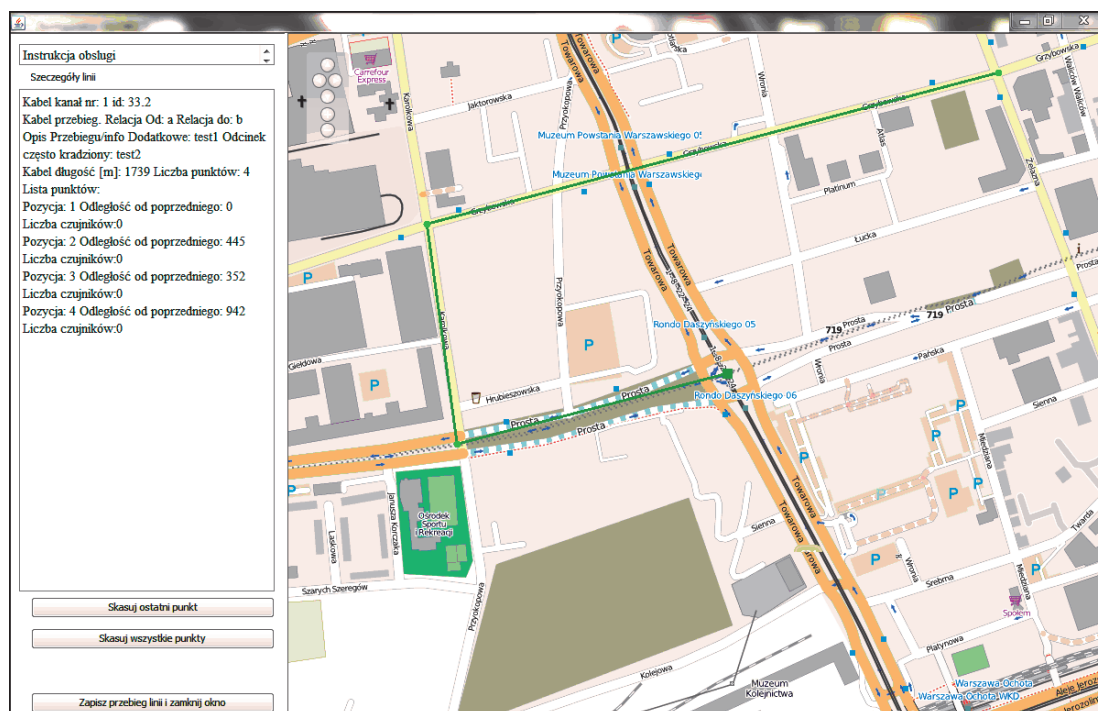
Oprogramowanie serwera CN i SN realizuje funkcje związane z:

- zbieraniem i obróbką danych pomiarowych z GP,
- wykrywaniem, sygnalizacją i lokalizacją uszkodzeń,

- instalacją, konfigurowaniem i nadzorem pracy własnych elementów sprzętowych,
- wprowadzaniem danych chronionych elementów sieci,
- utrzymywaniem bazy map cyfrowych,
- zarządzaniem użytkownikami o różnych poziomach uprawnień.

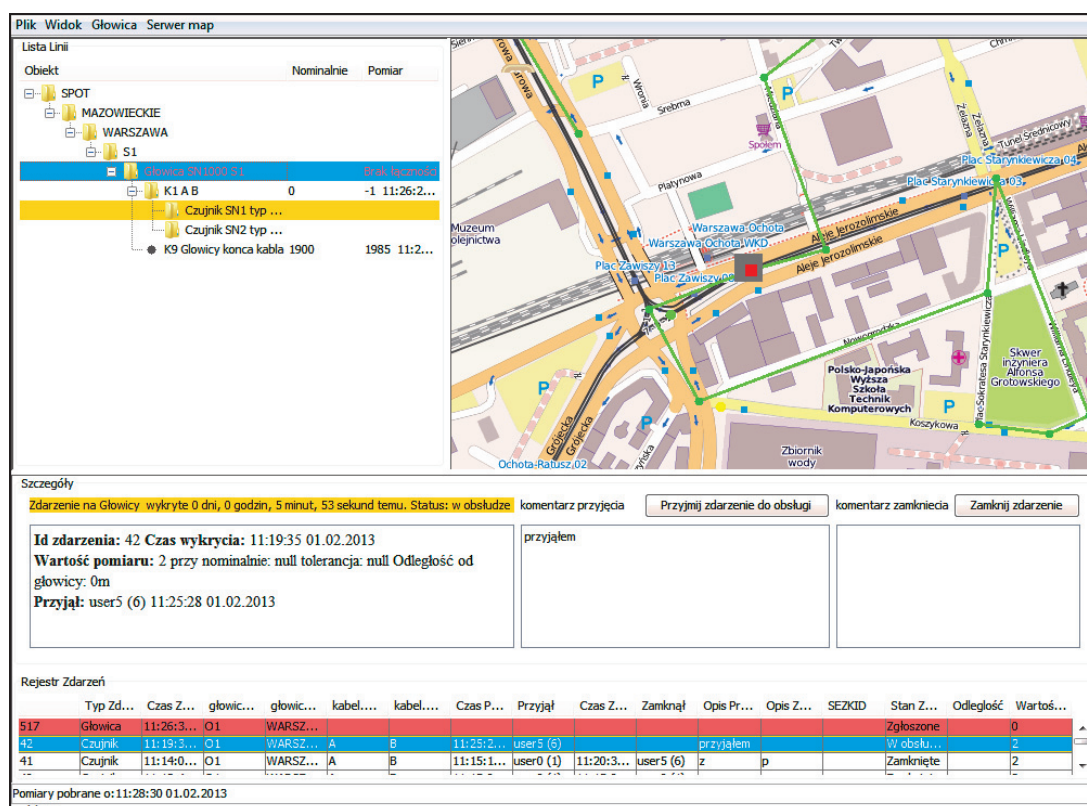
Oprogramowanie serwera pracuje pod Linuxem, a SN - Windows XP, Vista lub 7. Zestaw map cyfrowych Polski do prezentacji elementów sieci i uszkodzeń na Stacjach Nadzoru pochodzi z darmowego serwisu OpenStreetMap. Mapy używane w systemie mają postać plików graficznych PNG określanych jako „kafelki mapowe”. Wymieniony, niekomercyjny serwis mapowy nie gwarantuje ich dostępności i jakości, jednak dotychczasowe doświadczenia wykazały, że dokładność map jest wystarczająca dla SPOT. Dla zagwarantowania nieprzerwanej pracy systemu, kopie kafelków mapowych są przechowywane „offline” na serwerze Asseco Poland.

Planowana przez TP S.A. centralizacja monitoringu sieci telekomunikacyjnych w skali kraju dopuszcza fakt, że pracownicy CN nie będą znali specyfiki miejsca uszkodzenia i muszą polegać na informacjach z systemu monitoringu, takich jak dane o wcześniejszych uszkodzeniach, adresy, telefony i inne dane kontaktowe, lokalizacje i charakterystyki techniczne chronionych obiektów i miejsca częstych uszkodzeń i kradzieży kabli.



Rys. 13. Wprowadzanie trasy linii kablowej (linia falista) na Stacji Nadzoru

Oprogramowanie SPOT nadzoruje również działanie własnych głowic pomiarowych i ciągłość połączeń z nimi przez zewnętrzną sieć transmisji danych (rys. 14).



Rys. 14. Ekran aplikacji SN z sygnalizacją utraty połączenia CN z głowicą pomiarową, pokazaną na mapie jako mały kwadrat

Podsumowanie

System ochrony infrastruktury telekomunikacyjnej SPOT jest obecnie testowany w sieci TP S.A. w Lublinie, gdzie służy do ochrony kabli miedzianych w kanalizacji kablowej przed kradzieżami. W każdej z nadzorowanych studni kablowych zamontowano 2 magnetyczne czujniki otwarcia pokrywy, połączone przewodowo z GP zainstalowaną w szafie ulicznej z wyposażeniem DSLAM. System próbny monitoruje 5 linii kablowych o długości do 5 km, zawierających 94 studnie.

Autorzy są przekonani, że wdrożenie tego rodzaju rozwiązań oraz szybkie interwencje policji i agencji ochrony powinny ograniczyć uciążliwą i kosztowną plagę kradzieży kabli telekomunikacyjnych.

Praca naukowa jest finansowana ze środków na naukę w latach 2011-2012 jako projekt rozwojowy OR00012612 „Prototyp systemu perymetrycznej ochrony telekomunikacyjnej infrastruktury krytycznej”.

Bibliografia

- [1] Mishra P.: *Heterogeneous Access Networks and the Need for a Fibre-Rich Infrastructure*. FTTH Conference 2013, Londyn, Wlk. Brytania, 2013
- [2] Matyasik R.: *Doświadczenia Orange Polska w walce ze zjawiskiem kradzieży kabli*. Konferencja „Przeciwdziałanie kradzieżom metali”, Warszawa, 2012

- [3] *Kradzieże kabli telekomunikacyjnych*. Prezentacja TP na spotkanie „Kradzieże infrastruktury”, Warszawa, 2011
- [4] *Przeciwdziałanie wybranym zjawiskom przestępczym*. Wydział Prewencji KWP w Katowicach. Konferencja „Przeciwdziałanie kradzieżom metali”, Warszawa, 2012
- [5] Holzhammer J.: *On the case of copper theft*. Total Telecom, 2012
- [6] Hosken A.: *Scrap metal industry faces crackdown*. BBC News, 2012. [Online] Available <http://www.bbc.co.uk/news/uk-16411400>
- [7] Ransom D.: *Police – Private Partnership to Tackle Metal Theft*. Konferencja „Przeciwdziałanie kradzieżom metali”, Warszawa, 2012
- [8] Kotteeswaran C. S.: *BSNL cable theft goes unchecked*. Deccan Chronicle, 2012
- [9] *Ramowa oferta TP o dostępie telekomunikacyjnym w części infrastruktura telekomunikacyjna w zakresie kanalizacji kablowej*. TP S.A., 2011
- [10] *Projekt: Decyzja Nr DHRT-WORK-6082-7/11 (...) w przedmiocie zatwierdzenia „Ramowej Oferty TP o dostępie telekomunikacyjnym w części infrastruktura telekomunikacyjna w zakresie kanalizacji kablowej”*. UKE, 2012
- [11] André P., Rocha A., Domingues F., Facão M.: *Thermal Effects in Optical Fibres*. Developments in Heat Transfer, InTech, Rijeka, Chorwacja, 2011 [Online] Available http://cdn.intechopen.com/pdfs/19881/InTech-Thermal_effects_in_optical_fibres.pdf
- [12] Percival R. M., Sikora E. S. R., Wyatt R.: *Catastrophic damage and accelerated ageing in bent fibres caused by high optical powers*. Electronics Letters, vol. 36, no. 5, 2000, s. 414 - 416
- [13] 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, San Francisco, USA, 1998, s. 333 - 345
- [14] *Reliability Of Fiber Optic Cable Systems: Buried Fiber Optic Cable, Optical Groundwire Cable, All Dielectric, Self Supporting Cable*. Alcoa Fujikura Ltd., 2001
- [15] *Identifying Basic Faults on Cable Pairs and Station Wiring*. dB Levels, Inc., i.H.E.L.P., 2007/2012
- [16] Valencia R.: *Outside Plant Telephone Cable Testing & Fault Locating*. 3M Test & Measurement Systems, Austin, USA, 1999
- [17] ZN-96/TP S.A.-029: *Telekomunikacyjne sieci miejscowe. Telekomunikacyjne kable miejscowe o izolacji i powłoce polietylenowej, wypełnione. Wymagania i badania*.
- [18] *Kable i przewody telekomunikacyjne*. Tele-Fonika Kable S.A., 2006.
- [19] ZN-05/TP S.A.-030: *Telekomunikacyjne sieci miejscowe. Łączniki żył. Wymagania i badania*.
- [20] Van den Berg O., Sengers W. G. F., Jager W. F., Picken S. J., Wübbenhorst M.: *Dielectric and Fluorescent Probes To Investigate Glass Transition, Melt, and Crystallization in Polyolefins*. Macromolecules, vol. 37, 2004, s. 2460-2470,
- [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. [Online] Available <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. [Online] Available <http://www.wigry.win.pl/monit2010/titul.htm>
- [24] Zalecenie ITU-T L.41: *Maintenance wavelength on fibres carrying signals*. 05/2000
- [25] *OTDR-WDM Filter 1625 nm or 1650 nm*. FOC Fibre Optical Components GmbH 08/2011
- [26] Scheerer C.: *OTDR pulse power limit in on-line monitoring of optical fibres owing to stimulated Raman scattering*. Electronics Letters, Vol. 32, No. 7, 1996, s. 679-680,
- [27] Chen H., Leblanc M., Plomteux O.: *Live-Fiber OTDR Testing: Traffic and Measurement Impairments*. Technical Note 022, EXFO Electro-Optical Engineering Inc., 2007.

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); specjalista w zakresie badań kabli i włókien światłowodowych, osprzętu i systemów transmisyjnych; uczestnik europejskich programów badawczych COST-270, COST-299 i NEMO; wykładowca oraz instruktor w zakresie telekomunikacji optycznej; przedstawiciel IŁ w Polskim Komitecie Normalizacyjnym i IEC TC86. Aktualnie zaangażowany w opracowanie systemów monitoringu technicznego dla telekomunikacyjnych sieci kablowych (projekty SPOT i SMIT). Autor 60 publikacji i 2 patentów; tłumacz języka angielskiego; zainteresowania naukowe: telekomunikacja optyczna, kable i włókna światłowodowe, miernictwo optyczne, badania kabli i osprzętu, dyspersja polaryzacyjna.

e-mail: K.Borzycki@itl.waw.pl

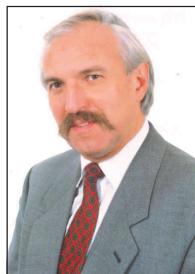
Paweł Gajewski



Mgr inż. Paweł Gajewski – absolwent Wydziału Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej (1983); długoletni pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (od 1983); zainteresowania: projektowanie oraz oprogramowanie urządzeń i systemów pomiarowych, kontrolnych itp. Aktualnie zaangażowany w projektowanie systemów monitoringu telekomunikacyjnych sieci kablowych oraz systemów pomiaru jakości energii elektrycznej.

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 łączy międzymiastowych ABUS, rozliczania abonentów AST, monitorowania pracy central telefonicznych ASM oraz monitorowania infrastruktury telekomunikacyjnej SMOK i SPOT.

e-mail: S.Dziubak@itl.waw.pl

Michał Jabłoński



Mgr inż. Michał Jabłoński – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Kierownik projektów w Dziale Projektów Badawczo-Rozwojowych w Departamencie Organizacji Międzynarodowych i Rozwiązań Dla Sektora Bezpieczeństwa w Asseco Poland SA. Analityk w projektach B+R dotyczących infrastruktury krytycznej oraz bezpieczeństwa.

e-mail: michal.jablonski@asseco.pl