

Wskazano, że szybki wzrost wymagań dotyczących przepływności łączy abonenckich i jakości usług zmusza do budowy nowej infrastruktury dostępowej, przeważnie z wykorzystaniem włókien światłowodowych jako medium transmisyjnego. Przedstawiono czynniki motywujące operatorów do budowy sieci światłowodowych, rozwiązania techniczne sieci, ich klasyfikację oraz problemy związane z zapewnieniem dostępu do sieci operatorom alternatywnym.

**dostęp szerokopasmowy, sieci światłowodowe, sieci dostępne, włókno światłowodowe, włókno mikrostrukturalne, kabel światłowodowy, FTTH, FTTN, FTTx, DSL, regulacje, konkurencja**

## Wprowadzenie

Nowoczesne sieci telekomunikacyjne są najważniejszym elementem infrastruktury technicznej państwa budującego gospodarkę opartą na wiedzy i jednym z podstawowych atutów konkurencyjnych w epoce globalizacji i informatyzacji.

Większość infrastruktury technicznej (sieci drogowe, kolejowe i energetyczne, porty, lotniska, rurociągi itp.) powstawała przez długi czas (40–150 lat), zgodnie z dość powolnie ewoluującą techniką. Sieci telekomunikacyjne i teleinformatyczne natomiast wyróżniają się zmiennością standardów technicznych; wymiana ich elementów przeważnie jest związana ze starzeniem się, a nie zużyciem.

Podobny los czeka stałe sieci dostępne, zbudowane głównie z kabli z parami przewodów miedzianych i projektowane dla analogowych usług głosowych o pasmie częstotliwości 3,4 kHz, przy długości przyłącza abonenckiego do około 10 km.

Miejsce analogowych usług głosowych, telefaksów, dostępu wdzwanianego i usług ISDN-BR zajmuje stopniowo dostęp szerokopasmowy do internetu, telewizja, zwłaszcza wysokiej rozdzielczości (*High Definition Television* – HDTV), gry sieciowe i inne usługi, wymagające łączy stałego o przepływności do abonenta (*downstream*) co najmniej 10 Mbit/s. Dla usług HDTV będzie niezbędne wprowadzenie dostępu abonenckiego o przepływności około 50 Mbit/s i budowa sieci nowej generacji (*New Generation Network* – NGN).

Należy jednak odróżnić, stanowiącą przedmiot tego artykułu, sieć **dostępową** nowej generacji (*Access NGN*) od sieci **szkieletowej** nowej generacji opartej na protokole internetowym (*Core NGN*). Często mylone w różnych opracowaniach i wypowiedziach, te dwa typy NGN nie mają wspólnych funkcji i elementów. Przykładowo, sieć 21CN (*21st Century Network*) budowana w Wielkiej Brytanii przez British Telecom (BT) jest siecią NGN szkieletową; BT wyklucza budowę NGN dostępowej.

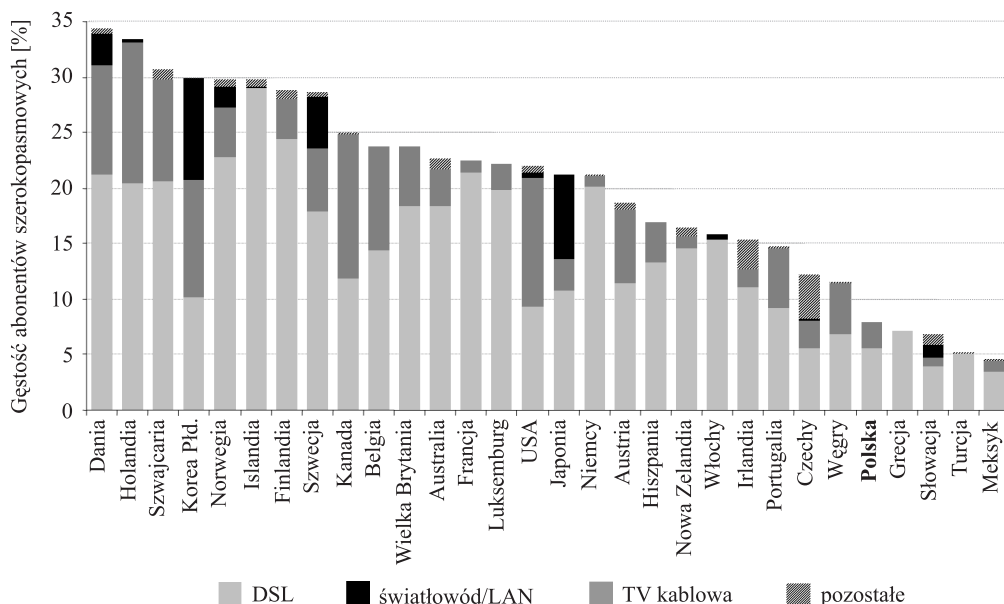
Dla Polski o gęstości linii abonenckich zaledwie 31% w porównaniu z 45–70% w krajach „starej” UE [7, 21] konieczność ponownej budowy sieci dostępowej stanowi okazję do „przeskoczenia” zapóźnień inwestycyjnych i wyrównania punktu startu.

## Stan obecny

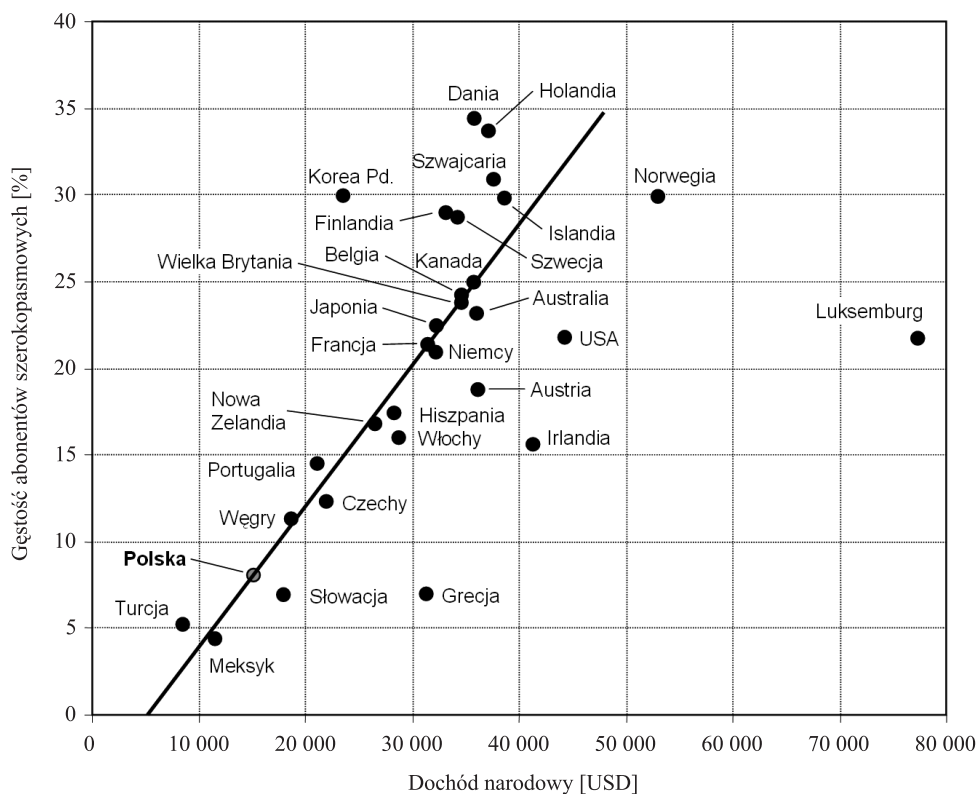
Dane OECD [32], przedstawione w tabl. 1 i na rys. 1 oraz 2, sytuują Polskę i inne nowe kraje UE w dolnej grupie członków organizacji pod względem dostępności usług szerokopasmowych.

**Tabl. 1. Gęstość abonentów szerokopasmowych i dochód narodowy w krajach OECD [32]**

Państwa	Gęstość abonentów szerokopasmowych stałych, czerwiec 2007 r. [%]	PKB na osobę według parytetu siły nabywczej, 2006 r. [USD]
Dania	34,3	36 087
Holandia	33,5	37 584
Szwajcaria	30,7	38 289
Korea Południowa	29,9	23 581
Norwegia	29,8	53 092
Islandia	29,8	39 259
Finlandia	28,8	33 045
Szwecja	28,6	34 006
Kanada	25,0	35 948
Belgia	23,8	34 624
Wielka Brytania	23,7	34 690
Australia	22,7	36 027
Francja	22,5	31 860
Luksemburg	22,2	77 841
USA	22,1	43 801
Japonia	21,3	31 918
Niemcy	21,2	32 407
Austria	18,6	36 209
Hiszpania	17,0	28 909
Nowa Zelandia	16,5	26 839
Włochy	15,8	29 145
Irlandia	15,4	40 990
Portugalia	14,7	20 938
Czechy	12,2	22 244
Węgry	11,6	18 453
<b>Polska</b>	<b>8,0</b>	<b>15 077</b>
Grecja	7,1	31 571
Słowacja	6,8	17 606
Turcja	5,2	8 571
Meksyk	4,6	11 539
OECD – średnia	<b>18,8</b>	
Uwagi:		
1. Za dostęp szerokopasmowy uznano łącze o przepływności minimum 256 kbit/s do abonenta.		
2. Liczby w tablicy są sumą danych dla wszystkich technik dostępu stałego.		



Rys. 1. Gęstość abonentów szerokopasmowych w krajach OECD i udziały technik dostępu. Dane OECD z czerwca 2007 r. [32]



Rys. 2. Zależność między gęstością abonentów szerokopasmowych i realnym dochodem narodowym na jednego mieszkańca w krajach OECD, liczonym wg parytetu siły nabywczej w 2006 r. Dane OECD z czerwca 2007 r. [32]

Zależność między poziomem dochodu narodowego a gęstością dostępu szerokopasmowego (rys. 2) jest prawie proporcjonalna, gdyż w zglobalizowanej gospodarce wszędzie są dostępne te same techniki i sprzęt po zbliżonych cenach, a konsumenci i firmy wydają podobną część wolnych środków finansowych na usługi danego rodzaju. W efekcie, to poziom dochodu narodowego określa wydatki konsumentów na usługi szerokopasmowe i przychody operatorów sieci. Na rys. 2 można zauważyć kilka odstępstw od tej reguły:

- wyjątkowe rozpowszechnienie usług szerokopasmowych w średnio zamożnej Korei Południowej, która zdecydowanie wyprzedziła USA, Japonię i Niemcy;
- zapóźnienie Irlandii, Norwegii i Grecji – ta ostatnia wypada gorzej od Polski;
- dość niską gęstość w USA, kraju bardzo z informatyzowanym.

W połowie okresu realizacji strategii lizbońskiej UE, mającej uczynić gospodarkę unijną „najbardziej konkurencyjną na świecie” (2000–2011), kraje UE nie wyprzedzają innych członków OECD o zbliżonym poziomie dochodu narodowego. Dobre wyniki krajów północnej Europy tłumaczy przede wszystkim ich ogólna zamożność.

Podziw budzi postęp w Korei Południowej w porównaniu do państw UE o podobnej zamożności – Grecji i Portugalii. Można spotkać się z opinią, że rozwój rynku koreańskiego to efekt traktowania go przez miejscowe koncerny elektroniczne jako poligonu doświadczalnego i salonu wystawowego. Na pewno, ale dlaczego takich wyników nie ma w Japonii i USA?

## Motywy budowy sieci FTTx

### *Nowe usługi telekomunikacyjne*

Szerokopasmowy dostęp stały zaowocował pojawieniem się wielu usług konsumenckich wcześniej niemożliwych lub nieopłacalnych. Do najważniejszych z nich należą:

- 1) internetowe usługi telewizyjne (IPTV) włącznie z HDTV konkurujące z telewizją naziemną, kablową i satelitarną oraz wypożyczalniami DVD;
- 2) interaktywne gry sieciowe, np. World of Warcraft;
- 3) telefonia, wizjotelefonia i radiofonia internetowa;
- 4) wymiana plików (*peer-to-peer*, p2p), generująca 30–80% transferu danych w sieciach, który szybko rośnie z powodu wymiany plików wideo, o typowych rozmiarach 0,5–4 GB;
- 5) dystrybucja oprogramowania; przykładowe rozmiary plików: Windows Vista Enterprise: 1632 MB, Microsoft Office 2007 Professional: 2679 MB, Windows Vista SP1 x64: 730 MB, Adobe Photoshop CS3: 337 MB;
- 6) serwisy wymiany treści multimedialnych (audio, foto, wideo): YouTube, Flickr i inne;
- 7) internetowa sprzedaż plików audio i wideo, np. iTunes;
- 8) serwisy społeczne (MySpace, Facebook) i „światy wirtualne” (SecondLife);
- 9) dostęp do bibliotek elektronicznych, w tym filmów, książek i dokumentów, encyklopedii (Wikipedia, Wikimedia) i serwisów edukacyjnych;
- 10) utrzymywanie kopii danych użytkownika na serwerach ISP, o pojemności do 100 GB;
- 11) poczta elektroniczna z załącznikami o dużych rozmiarach.

Wymagane parametry łącza abonenckiego, czyli przepływność, dobowy transfer danych i opóźnienia transmisyjne dla poszczególnych usług, są bardzo różne, ale dla pełnego zaspokojenia potrzeb wymagającego gospodarstwa domowego należy spełnić wszystkie.

Niezbędna przepływność łącza jest dyktowana przez usługi wizyjne, osiągając 2–6 Mbit/s dla każdej usługi standardowej o rozdzielczości 576 x 720 lub podobnej (Standard Definition Television – SDTV) i jakości identycznej z telewizją naziemną oraz 10–20 Mbit/s dla HDTV 1080p (1080 x 1920). Usługi wizyjne rozsiewcze są wrażliwe na zmienne opóźnienia transmisyjne. W zespołowych grach sieciowych (*Massive Multiplayer Role Playing Game* – MM-RPG) też nie dopuszcza się przerw i opóźnień, gdyż czas reakcji uczestnika decyduje o wyniku.

Telefonia, wizjotelefonia i radiofonia internetowa mają niższą przepływność strumienia danych (16–200 kbit/s), ale również wymagają transmisji w czasie rzeczywistym. Odmienne, usługi wymienione w punktach 4–11 potrzebują transferu danych o wielkiej objętości, a tolerują zmienną szybkość i opóźnienia. Miesięczny transfer danych generowany przez aplikacje p2p i telepracę, taką jak wymiana grafiki komputerowej, edycja filmów czy skład czasopism, w skrajnych przypadkach osiąga 500–1000 GB.

Ściągnięcie pliku o objętości 6 GB, która odpowiada zawartości dysku DVD z filmem fabularnym, w ciągu 1 lub 2 h wymaga łącza o przepływności do abonenta odpowiednio 13,3 Mbit/s i 6,7 Mbit/s, podobnej jak dla usług wizyjnych strumieniowych.

Dystrybucja programów TV wiąże się z przekazem podobnej objętości danych. Przesyłanie programu TV o przepływności 3 Mbit/s przez 4,5 h dziennie (średni czas oglądania TV deklarowany w Polsce w 2006 r.) oznacza miesięczny transfer równy 186 GB; przy oglądaniu programu HDTV 12 Mbit/s w identycznym wymiarze czasu już 746 GB.

Usługi telewizyjne polegają głównie na rozsyłaniu ograniczonej liczby identycznych strumieni do wielu użytkowników. Operator dokonuje grupowania ruchu wizyjnego na krawędzi sieci i silnie są obciążone tylko segmenty bliskie użytkownikom. Popularność usług „wideo na życzenie”, generujących ruch nie poddający się grupowaniu jest niewielka.

Brak tej możliwości w przypadku p2p, gdyż do i od każdego użytkownika przesyłane są inne dane. Aplikacje p2p silnie obciążają sieć szkieletową i połączenia międzyoperatorskie, nie przynosząc przychodów za dodatkowe usługi. Tłumaczy to skłonność dostawców do blokowania ruchu p2p i żądań, aby firmy świadczące usługi związane z transferem dużych ilości danych, takie jak Google lub BBC, uczestniczyły w kosztach rozbudowy ich sieci.

## ***Dostęp do usług nowej generacji***

Szacując przepływność łącza do abonenta trzeba uwzględnić, że gospodarstwo domowe może mieć wiele urządzeń przyłączonych do sieci, takich jak PC, laptop, PDA, telewizor, cyfrowy rejestrator TV (DVR), konsola do gier i inne, oraz korzystać z wielu usług równocześnie. Zestawienie orientacyjnych parametrów usług zawiera tabl. 2.

Zaspokojenie potrzeb telekomunikacyjnych, zawodowych i rozrywkowych zamożnego gospodarstwa domowego wymaga łącza o przepływności do abonenta 50–100 Mbit/s.

Trudniej oszacować przepływność w kierunku zwrotnym. Spośród usług z tabl. 2, ruch prawie symetryczny generują: p2p, telepraca i transfer danych składowanych na serwerach sieciowych.

Ruch generowany przez użytkownika p2p nie abonującego usług TV i mało „surfującego” po internecie jest prawie symetryczny, natomiast amator TV internetowej i płatnych serwisów multimedialnych praktycznie tylko ściąga dane.

**Tabl. 2. Przepływność strumieni usług dla użytkowników mieszkaniowych**

Usługa	Liczba kanałów	Przepływność kanału [Mbit/s]	Przepływność łączna [Mbit/s]
Transmisja programu HDTV w czasie rzeczywistym	2	12	24
Ściąganie dużych plików (p2p, zakup multimediiów)	2	15	30
Radio internetowe	2	0,5	1
Przeglądanie sieci, poczta elektroniczna	1	10	10
Gra sieciowa MM-RPG	1	5	5
Telepraca	1	10	10
Zdalne kopie danych i multimediiów	1	10	10
Pozostałe (VoIP, uaktualnianie systemu itp.)	2	2	4
Razem – szczytowe obciążenie łącza do abonenta			94

Nowe usługi, na przykład telewizja porównywalna ze standardem kinowym 4k (4096 x 2160), „teleobecność”, gry albo serwisy społeczne połączone z transmisją HDTV lub obrazem trójwymiarowym, mogą wymagać łącza domowego nawet 500 Mbit/s. Powstaje pytanie, które z technologii dostępu abonenckiego mogą powyższe wymagania spełnić.

W listopadzie 2004 r. NTT wprowadził w Japonii usługę 1 Gbit/s za opłatą 5500 JPY ( $\approx$  125 PLN) miesięcznie; natomiast od kwietnia 2005 r. City Telecom (HK) Ltd. z Hongkongu oferuje **symetryczne** łącza 1 Gbit/s, w obu przypadkach w sieciach światłowodowych.

### **Technologie dostępu szerokopasmowego**

Do zapewnienia klientom indywidualnym dostępu szerokopasmowego można wykorzystać:

- sieci telefoniczne z kabli miedzianych i modemy DSL (*Digital Subscriber Line*);
- sieci telewizji kablowej (TVK) z kabli współosiowych i modemy TVK;
- sieci LAN (*Local Area Network*) z kabli symetrycznych w budynkach wielorodzinnych;
- sieci światłowodowo-miedziane (*Fiber To The Curb/Building* – FTTC/FTTB);
- sieci światłowodowe (*Fiber To The Home* – FTTH);
- systemy radiowe, przede wszystkim WiFi, WiMax i 3G – HSDPA;
- transmisję po przewodach energetycznych niskiego napięcia (*Digital Power Line* – DPL);
- dostęp satelitarne.

Struktura techniczna dostępu (rys. 1) zależy m.in. od gęstości zaludnienia, urbanizacji i polityki regulacyjnej. Część rozwiązań nie zaspokoi potrzeb masowego klienta w Polsce, ponieważ:

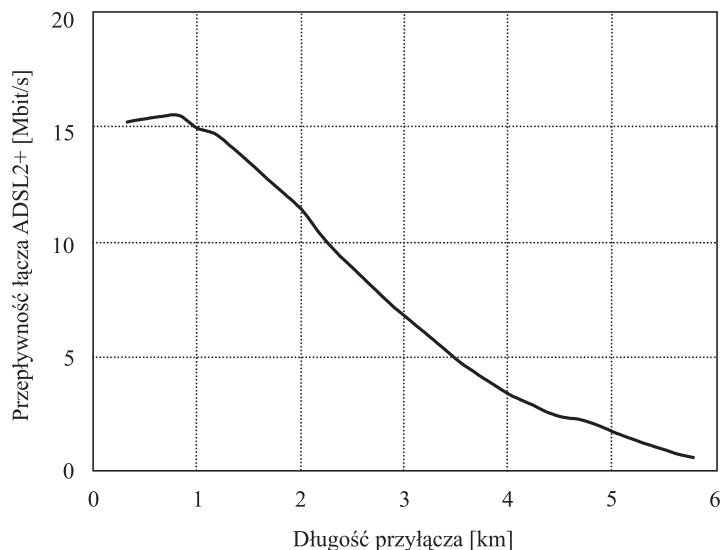
- DPL stwarza problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną i normalizacją; mimo początkowego optymizmu zainteresowanie tą technologią wygasa;

- coraz częstsze są protesty przeciw budowie obiektów radiowych, sugerujące nawet „liczne sygnały o masowych zachorowaniach (szczególnie dotyczy chorób nowotworowych) i zgonów przy stacjach bazowych telefonii komórkowej” [35];
- usługi transmisji danych w sieciach ruchomych – EDGE (GSM) i HSDPA (3G), z wysokimi opłatami są traktowane jako specjalny, uzupełniający rodzaj dostępu;
- usługi satelitarne są kosztowne i odznaczają się znacznymi opóźnieniami.

### Ograniczenia wprowadzane przez tradycyjną sieć telefoniczną

Sieć kablowa zbudowana dla usług głosowych charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem długości przyłączy – między przełącznicą główną centrali (MDF) a posesją abonenta – oraz parametrów kabli (np. średnicy i skoku skrętu przewodów oraz rodzaju izolacji) a także częstą obecnością w przyłączy sekcji z kabli różnych typów i odgałęzień wprowadzających odbicia. W efekcie parametry części przyłączy, przede wszystkim charakterystyki przeników NEXT i FEXT oraz tłumienności, nie są odpowiednie do transmisji sygnałów cyfrowych o szerokości pasma do 2,2 MHz (ADSL2+), 8,8 MHz (VDSL2+, 52 Mbit/s) i 17,7 MHz (VDSL2+, 100 Mbit/s).

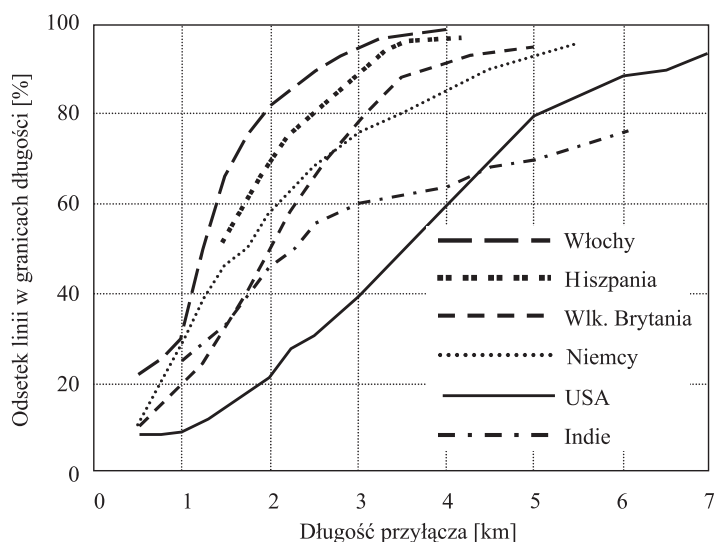
W sieci z dużą liczbą urządzeń xDSL głównym ograniczeniem przepływności i niezawodności usług szerokopasmowych są przeniki sygnałów z innych łączy przechodzących przez ten sam kabel. Ich poziom wzrasta z długością. Na rys. 3 przedstawiono średnie przepływności łączy z modemami ADSL2+ (ITU-T G.992.5) w funkcji ich długości, pochodzące z pomiarów w sieci British Telecom [38].



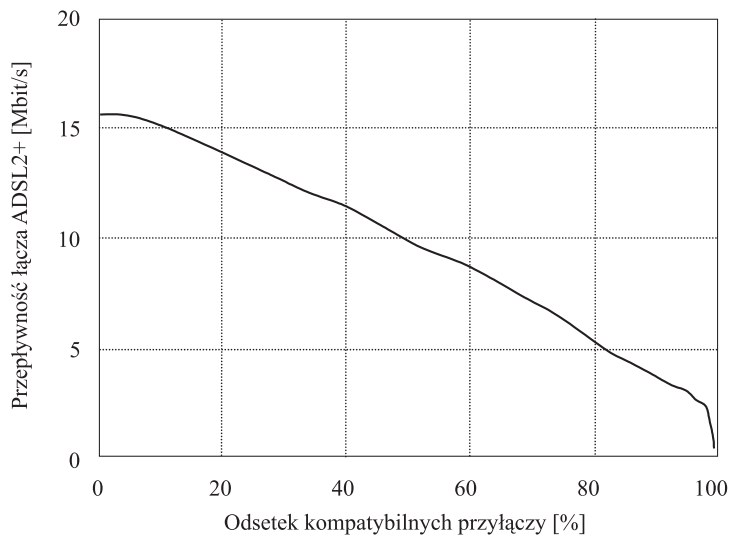
Rys. 3. Przepływność łącza abonenckiego ADSL2+ w funkcji długości linii [38]

Długość łącza 15 Mbit/s jest ograniczona do 1000–1200 m; dla łączy VDSL2 (ITU-T G.993.2) o przepływności do abonenta 52,8 Mbit/s po parze przewodów średnicy 0,5 mm spada do 300–500 m. Rozkłady długości przyłączy w sieciach kilku krajów zaprezentowano na rys. 4. Autor nie ma danych

o sieci Telekomunikacji Polskiej SA (TP SA), ale powinny być one zbliżone do tych z Hiszpanii i Wielkiej Brytanii.



Rys. 4. Długości linii abonenckich w sieciach wybranych krajów. Dane firmy Alcatel [8]



Rys. 5. Dostępność usług szerokopasmowych w technologii ADSL2+ w sieci BT [38]

Zaawansowane usługi szerokopasmowe są niedostępne w znacznej części istniejących sieci stałych. Dane z pomiarów łączy ADSL2+ w sieci BT (rys. 5) wskazują, że około 20% gospodarstw domowych w Wielkiej Brytanii nie można zapewnić dostępu 5 Mbit/s niezbędnego dla usług wizyjnych SDTV. Są to gospodarstwa objęte „wykluczeniem szerokopasmowym”.



Tradycyjna infrastruktura kablowa umożliwia dostarczenie usługi HDTV (15 Mbit/s) do zaledwie 10% abonentów w Wielkiej Brytanii i 30% we Włoszech. W Polsce problem wykluczenia szerokopasmowego zaostroża niedobór infrastruktury i zahamowanie jej rozbudowy po 2000 r.

### Szerokopasmowe sieci dostępowe NGN

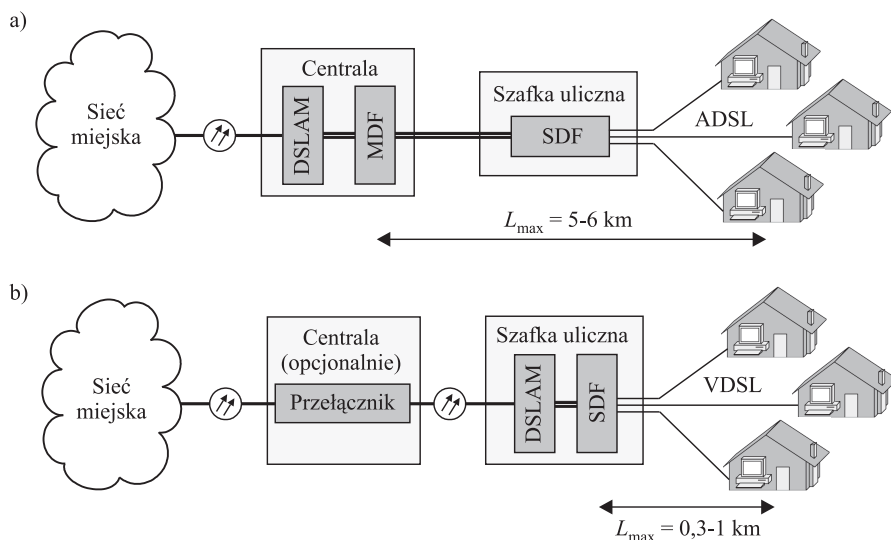
Sieć stałą można przystosować dla dostępu szerokopasmowego alternatywnie przez:

- skrócenie przyłączy miedzianych do 300–1000 m;
- zastąpienie kabli przez systemy mikrofalowe (nie omawiane w tym artykule);
- zastąpienie kabli miedzianych przez światłowody.

Wariant a) jest znany jako FTTN (*Fiber To The Node*). Centrale telefoniczne zostają zastąpione przez jednostki wyniesione, instalowane w szafach ulicznych (sieć FTTC) lub w budynkach wielorodzinnych (sieć FTTB), obsługujące mniejszą liczbę abonentów ( $\approx 200$ ) przez krótkie przyłącza miedziane i połączone z siecią światłowodami (rys. 6).

Zmiany te powinny zmniejszyć awaryjność i koszty utrzymania sieci dzięki:

- zmniejszeniu długości kabli miedzianych oraz liczby uszkodzeń i kradzieży;
- wprowadzeniu protekcji i zdalnego nadzoru łączy do jednostek wyniesionych;
- eliminacji zakłóceń;
- zwolnieniu miejsca w kanalizacji kablowej i sprzedaży starych kabli na złom;
- sprzedaży zbędnych budynków central i działek oraz redukcji personelu.



**Rys. 6.** Struktury sieci dostępowych: a) tradycyjnej; b) FTTN

MDF (Main Distribution Frame) – przełącznica główna, SDF (Sub-loop Distribution Frame) – przełącznica w jednostce wyniesionej, DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) – koncentrator cyfrowych linii abonenckich, ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line) – asymetryczna cyfrowa linia abonencka, VDSL (Very-high speed Digital Subscriber Line) – cyfrowa linia abonencka o bardzo wysokiej przepływności

Jednak skrócenie przyłączy oznacza instalację licznych jednostek wyniesionych – najczęściej w szafkach ulicznych oraz problemy z ich lokalizacją i zasilaniem.

Segment miedziany sieci FTTB można zbudować jako LAN z kabli symetrycznych kategorii 5 lub 6. Sieci tego typu mają przepływność do 100 Mbit/s, ale nadają się tylko do bloków mieszkalnych, gdyż długość przyłącza jest ograniczona do 100 m, a typowe kable LAN nie są przystosowane do instalacji na zewnątrz ze względu na brak uszczelnienia, ograniczony zakres temperatur pracy i niską wytrzymałość mechaniczną.

Z powodu względnej prostoty i niskich kosztów budowy sieci FTTC/FTTB, zainteresowanie operatorów zasiadających budową NGN tego rodzaju jest duże. W Europie sztandarowym przykładem jest Deutsche Telekom (DT), który w 2006 r. rozpoczął budowę sieci FTTC z przyłączami VDSL 52 Mbit/s o przeciętnej długości kabli 300 m, przewidzianej dla usług Triple-Play (TV + internet + telefon). DT planuje transfer do niej ponad 10 mln swych klientów w 40 największych miastach Niemiec za sumę około 3 mld EUR [14], co wymaga instalacji 74 000 szaf ulicznych i 18 000 km kabli światłowodowych [42]. KPN (Holandia) planuje pełne przejście na standard NGN-FTTC i likwidację większości tradycyjnych central do 2010 r. Telefonica (Hiszpania) przewiduje, że w latach 2006–2010 zapewni 60% jej abonentów dostęp VDSL 52 Mbit/s. Realizacja tych i podobnych projektów jest zagrożona przez poważne problemy regulacyjne [8, 14, 38].

Operatorzy alternatywni i samorządy, budujący od początku własne sieci szerokopasmowe od zera, wybierają przeważnie wariant bez kabli miedzianych. Budowę sieci czysto światłowodowej podjął też od października 2006 r. Orange (France Telecom) we Francji.

Kwestia, czy wybrać światłowód, czy system radiowy, pozostaje otwarta. Nowe systemy 4G-LTE oferują przepływności do 100 Mbit/s [45], a Fixed WiMax (IEEE 802.16 (2004)) do 70 Mbit/s. W warunkach miejskich przewagę ma dostęp światłowodowy, pozbawiony problemów z propagacją, ograniczonymi zasobami widma i protestami ekologów.

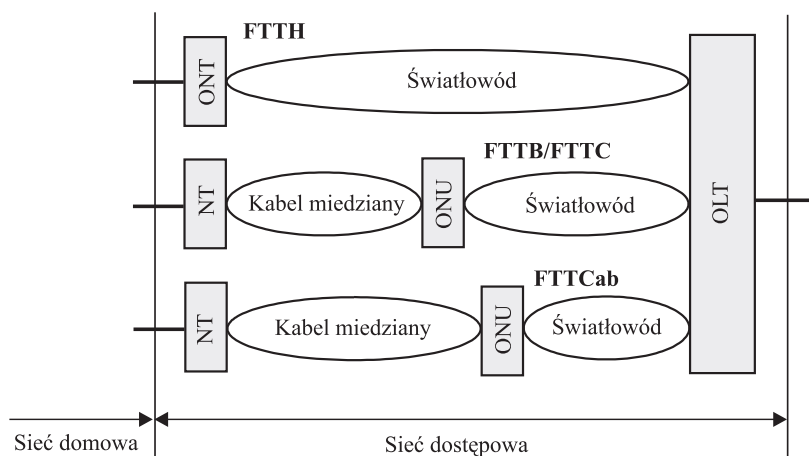
## Rozwiązania techniczne sieci FTTx

### Definicje

Określenie FTTx dotyczy grupy technik dostępowych, wykorzystujących włókna światłowodowe jako medium do budowy przyłącza abonenckiego lub jego części [9]. Poniżej podano zestawienie najbardziej znanych rozwiązań i ich nazw:

- FITL (*Fiber In The Loop*) – światłowód w linii abonenckiej: ogólne określenie światłowodowej sieci abonenckiej;
- FTTH (*Fiber To The Home*) – światłowód do domu: sieci z przyłączami światłowodowymi do posesji abonenta, bez segmentów z innym medium transmisyjnym; alternatywny termin: FTTP (*Fiber To The Premises*);
- FTTB (*Fiber To The Building*) – światłowód do budynku: sieć z łączami światłowodowymi do budynków, wewnątrz których zastosowano inne medium transmisyjne; dotyczy to zwykle budynku wielorodzinnego z okablowaniem miedzianym telefonicznym i wspólnym dla TV kablowej, rzadziej biurowego;
- FTTM (*Fiber To The Multi-Dwelling Unit*) – światłowód do budynku wielorodzinnego: wersja sieci FTTB, z przyłączem światłowodowym do bloku mieszkalnego;

- FTTC (*Fiber To The Curb (Cabinet)*) – światłowód do szafki ulicznej: sieć z łączami światłowodowymi do szafek ulicznych, do których abonent jest przyłączany krótkim kablem miedzianym, np. przez modem VDSL; używa się też skrótu FTTCab;
- FTTP (*Fiber To The Pedestal*) – światłowód do fundamentu (szafki ulicznej): inne określenie sieci FTTC/FTTCab;
- FTTN (*Fiber To The Node*) – światłowód do węzła: sieć z łączami światłowodowymi do jednostek (węzłów) wyniesionych, do których abonent jest przyłączany krótkim kablem miedzianym; alternatywna nazwa z identycznym skrótem: *Fiber To The Neighborhood*;
- PON (*Passive Optical Network*) – pasywna sieć optyczna: sieć FTTH, w której włókno wychodzące z urządzenia centralowego (OLT) rozgałęzia się za pomocą sprzęgaczy na wiele włókien (do 32) prowadzonych do urządzeń abonenckich (ONT);
- WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network*) – pasywna sieć optyczna ze zwielokrotnieniem falowym, w której każdy użytkownik ma przydzieloną własną długość fali; wszystkie kanały optyczne z wyjścia OLT początkowo są prowadzone jednym włóknem, a następnie rozgałęziane za pomocą demultipleksera falowego;
- B-PON (*Broadband Passive Optical Network*) – szerokopasmowa pasywna sieć optyczna: starsza wersja PON, o przepływności do 1244 Mbit/s w kierunku do abonentów i do 622 Mbit/s w kierunku zwrotnym, zgodna z zaleceniem ITU-T G.983 [19];
- G-PON (*Gigabit Passive Optical Network*) – gigabitowa pasywna sieć optyczna: PON z przepływnością do 2488 Mbit/s w obu kierunkach, objęta zaleceniem ITU-T G.984 [20];
- GE-PON (*Gigabit Ethernet Passive Optical Network*) – pasywna sieć optyczna Gigabit Ethernet: PON ze standardem transmisji Ethernet i przepływnością do 1 Gbit/s w obu kierunkach, objęta normą IEEE 802.3 (2005) [15];



**Rys. 7.** Architektura sieci FTTx, według ITU-T G.983/G.984

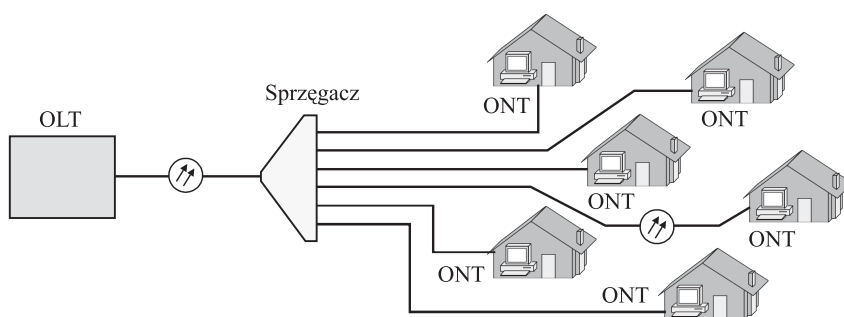
ONU (Optical Network Unit) – światłowodowa jednostka sieciowa, ONT (Optical Network Termination) – światłowodowe zakończenie sieciowe, OLT (Optical Line Termination) – zakończenie linii światłowodowej, NT (Network Termination) – zakończenie sieciowe

- E2P (*Ethernet Point-to-Point*): sieć światłowodowa ze standardem transmisji Ethernet i strukturą gwiazdową, z połączeniami do użytkowników bez rozgałęziania.

Architekturę sieci FTTx przedstawiono na rys. 7 [19].

### Sieci FTTH

Dominującym obecnie rozwiązaniem jest sieć z pasywnym rozgałęzieniem włókien światłowodowych (rys. 8), która umożliwia ograniczenie długości kabli, liczby włókien i kosztów instalacji. Brak urządzeń aktywnych eliminuje problemy z zasilaniem urządzeń wyniesionych, ich zawodnością w skrajnych temperaturach (w Polsce przede wszystkim z degradacją akumulatorów w temperaturach poniżej  $-20^{\circ}\text{C}$ ) oraz ich wymianą w razie przejścia na nowy standard transmisji, gdyż sieć pasywna jest „przezroczysta”. Rozgałęzianie wprowadza znaczne tłumienie, osiągające 18–21 dB przy podziale 1:32 i zmusza do instalacji w OLT wzmacniaczy optycznych dla kanału telewizyjnego 1550 nm.



Rys. 8. Topologia sieci PON (oznaczenia jak na rys. 7)

Rozgałęzianie włókna wychodzącego z OLT (rys. 8) może być wielostopniowe, co umożliwia optymalizację zużycia kabli i osprzętu; połączenia optyczne z grupą ONT mają wtedy strukturę drzewiastą. Używa się w tym celu sprzęgaczy 1 x 2, 1 x 4, 1 x 8, 1 x 16 i 1 x 32.

Transmisja sygnałów odbywa się pojedynczym włóknem jednomodowym o nieprzesuniętej dyspersji, zgodnym z zaleceniem ITU-T G.652 [17], przy użyciu zwielokrotnienia falowego (tabl. 3).

Tabl. 3. Długości fal używane w sieciach FTTH

Rodzaj sieci FTTH	B-PON i G-PON [nm]	GE-PON [nm]
Transmisja do abonenta	1490	1550
Transmisja w kierunku zwrotnym	1310	1310
Przesyłanie do abonenta sygnałów TV z modulacją analogową	1550	—

W sieciach GE-PON trzeciego kanału optycznego brak, a sygnały TV są przesyłane cyfrowo.

Standardy dopuszczają znaczne zróżnicowanie parametrów OLT (tabl. 4), lecz operatorzy zwykle wprowadzają wersje o najwyższych pojemnościach.

**Tabl. 4. Przepływności kanałów optycznych w sieci G-PON, według ITU-T G.984 [20]**

Przepływność w kierunku do abonenta [Mbit/s]	Przepływność w kierunku zwrotnym [Mbit/s]	Proporcja
1244,16	155,52	8:1
1244,16	622,08	2:1
1244,16	1244,16	1:1
2488,32	155,52	16:1
2488,32	622,08	4:1
2488,32	1244,16	2:1
2488,32	2488,32	1:1

Przepływności kanałów cyfrowych dzieli się między wszystkich użytkowników przyłączonych do odgałęzień włókna wychodzącego z OLT. Przy rozgałęzieniu 1:32 zapewnia to gwarantowaną przepływność dla użytkownika sieci B-PON, G-PON lub GE-PON w granicach 20–100 Mbit/s.



**Rys. 9. Urządzenie centralowe Alloptic Edge2000: 16 OLT dla sieci GE-PON [23]**



**Rys. 10. Zakończenie linii światłowodowej dla sieci GE-PON (Alloptic Edge200) [23]**

Problem dzielenia pojemności nie występuje w sieci z dedykowanymi włóknami do każdego użytkownika lub sieci WDM-PON, lecz rozwiązania te są droższe i względnie rzadko stosowane.

W sieci PON z gęstym zwielenkrotnieniem falowym (*Dense Wavelength Division Multiplexing* – DWDM) lub zgrubnym zwielenkrotnieniem falowym (*Coarse Division Multiplexing* – CWDM), oznaczanej jako WDM-PON, każdy użytkownik ma przydzieloną inną długość fali i pełną przepływność przesyłanego na niej strumienia cyfrowego. Miejsce sprzęgaczy (rys. 8) zajmują multiplexery optyczne WDM.

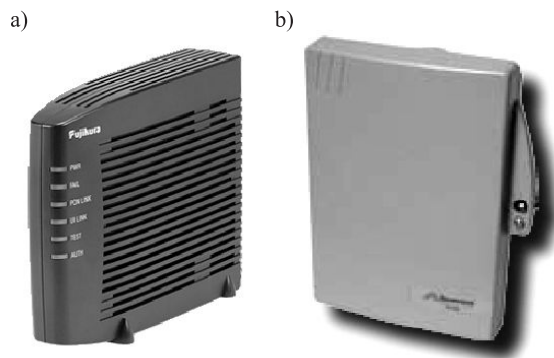
Sieć WDM-PON wymaga droższych urządzeń i jest trudniejsza w instalacji, ale zapewnia wyższą i niezależną od liczby czynnych użytkowników szybkość dostępu oraz – co ważne dla operatora – dobrą skalowalność kosztów wyposażenia aktywnego w OLT [26]. Urządzenia w wersji CWDM z 8 kanałami są dostępne komercyjnie [33, 34].

Wygląd typowych OLT pokazano na rys. 9 i 10.

Długości przyłączy w sieci G-PON i B-PON w wersji standardowej są ograniczone do 20 km przez budżet mocy optycznej i dopuszczalne różnice opóźnień transmisyjnych dróg optycznych między OLT a ONT. W specjalnych wersjach urządzeń zasięg można wydłużyć nawet do 100 km. Znika więc ograniczenie długości przyłącza znane z sieci xDSL.

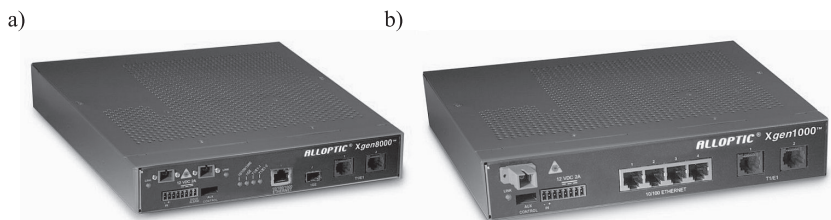
Montowane na posesji abonenta, światłowodowe zakończenie sieciowe (ONT) współpracuje ze wszystkimi urządzeniami telekomunikacyjnymi, informatycznymi i audiowizualnymi w domu i jest wyposażone w dość bogaty zestaw interfejsów. Obecnie typowy zestaw zawiera interfejsy do kabli miedzianych, w liczbie 1–4 szt. [11, 23, 33, 34, 44]:

- LAN 10/100BaseT ze złączami RJ45 do przyłączenia komputerów osobistych, napędów dyskowych, odtwarzaczy DVD lub BD i innych podobnych urządzeń;
- T1 lub E1 (1,5/2 Mbit/s) do central PABX itp. (w ONT dla klientów biznesowych);
- analogowe POTS ze złączami RJ11 do aparatów telefonicznych i faksów;
- współosiowe 75  $\Omega$  do przyłączenia odbiornika TV, nagrywarki DVD lub magnetowidu.



Rys. 11. Zakończenia ONT mieszkaniowe: a) Fujikura FNP6010 [11]; b) Terawave TW-124G [44]

Światłowodowe zakończenia sieciowe dla abonentów mieszkaniowych mają często atrakcyjną i łatwą do czyszczenia obudowę z tworzywa sztucznego (rys. 11). Wersje dla firm i pracujące w sieci FTTB cechuje funkcjonalna forma (rys. 12); często są dostosowane do montażu w stojaku.



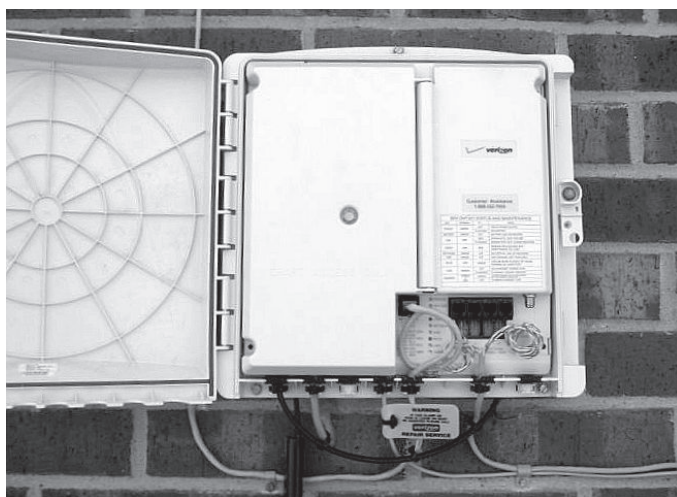
**Rys. 12.** Urządzenia ONT dla sieci GE-PON (firmy Alloptic) dla klientów biznesowych: a) Xgen8000 z portami 1000FX i 10/100BaseT; b) Xgen1000 z 4 portami 10/100BaseT [23]

Zakończenia ONT dla sieci GE-PON, zapewniających usługi 1 Gbit/s [11, 34, 44], mają następujące interfejsy danych:

- symetryczne 1000BaseT;
- światłowodowe 1000FX (ONT przeznaczone dla większych firm).

Niektóre ONT zapewniają internetowe usługi telefoniczne VoIP ze zwykłych aparatów analogowych. W sieci Verizon FiOS (USA) używa się ONT wyposażonych w cyfrowy interfejs wizyjny HDMI dla usług HDTV.

W domkach jednorodzinnych lub małych firmach ONT instaluje się najczęściej na ścianie, także na zewnątrz budynku (rys. 13), co ułatwia dostęp do urządzenia przy naprawach, ale wystawia je na działanie skrajnych temperatur.



**Rys. 13.** Światłowodowe zakończenie sieciowe naścienne z otwartą pokrywą. Wersja używana w sieci Verizon FiOS

Urządzenia ONT wymagają zasilania, którego nie można zapewnić zdalnie z centrali, z powodu braku połączenia kablem miedzianym i dość wysokiego poboru mocy, nawet przez najmniejsze urządzenia (15–30 W). ONT powinno gwarantować usługi telefoniczne również w warunkach awaryjnych. Typowym rozwiązaniem jest zasilanie sieciowe z podtrzymaniem przez hermetyczny akumulator ołowiowy; najczęściej 12 V, 5 Ah. Taka pojemność wystarcza na 2–4 h pracy ONT. Trwałość akumulatora umieszczonego w budynku wynosi około 5 lat.

## Sieci FTTB

Publiczna infrastruktura pasywna sieci FTTB jest zasadzie identyczna jak w sieci FTTH. Podstawowa różnica dotyczy interfejsów od strony użytkowników. Światłowodowa jednostka sieciowa (ONU), instalowana w budynku wielorodzinnym lub użytkowym, mieszczącym małe firmy i sklepy, musi mieć odpowiednio dużą liczbę portów telefonicznych i transmisji danych (rys. 14). Wyjście sygnału TV 50–870 MHz jest jedno, ponieważ w budynku mieszkalnym na ogół istnieje już okablowanie współosiowe z rozgałęźnikami i filtrami.



Rys. 14. Światłowodowa jednostka dla sieci GE-PON Optimate 1000NT (firmy FlexLight) z 24 interfejsami 10/100BaseT oraz protekcją łącza światłowodowego do budynków biurowych i wielorodzinnych [34]

Wersja zakończenia sieciowego (ONT) dla dużych i średnich biur lub przedsiębiorstw z zasady współpracuje z systemem informatycznym i centralą abonencką (PABX). W tym celu są niezbędne interfejsy E1 (2 Mbit/s) do centrali telefonicznej oraz Ethernet do serwera – te ostatnie zarówno w wersji symetrycznej, jak i optycznej, do 1 Gbit/s włącznie. Analogowe interfejsy telefoniczne i telewizyjne mają drugorzędne znaczenie lub nie ma ich wcale.

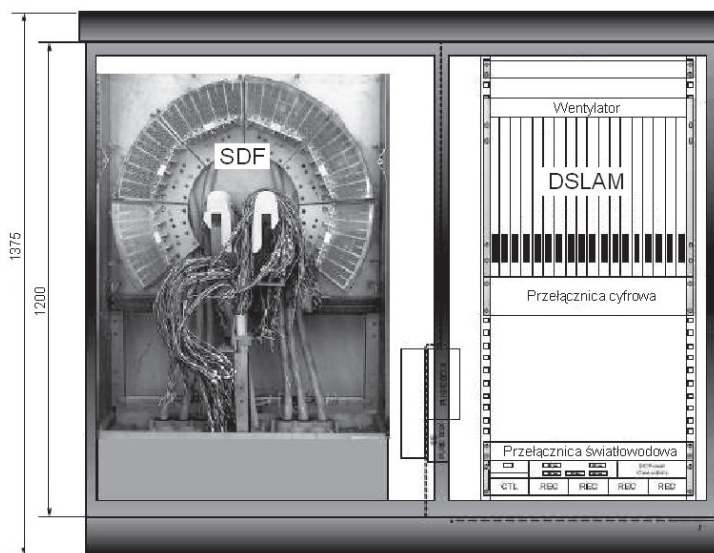
Pojedyncze łącze w sieci FTTB obsługuje dużą liczbę użytkowników i dlatego ONT mają zdublowany interfejs sieciowy z protekcją łącza w konfiguracji 1 + 1. Budynek jest przyłączony za pomocą dwóch kabli światłowodowych prowadzonych alternatywnymi drogami i należących do dwóch nakładających się podsieci PON. Gdy jest wymagana bardzo wysoka niezawodność (zwykle uszkodzenia kabli stanowią 90–95% awarii), można zastosować dwa OLT, z których każde zasila swoją podsieć PON.

W budynku biurowym ONT jest najczęściej zasilane napięciem przemiennym z urządzenia zasilania bezprzerwowego (UPS), także scentralizowanego. Używanie indywidualnych akumulatorów jest kłopotliwe z powodu wysokiego poboru mocy przez ONT z dużą liczbą interfejsów – przykładowo urządzenie z rys. 14 pobiera 100 W.

## Sieci FTTN/FTTC

Charakterystycznym elementem sieci FTTC jest jednostka wyniesiona, na ogół instalowana w szafie ulicznej (rys. 15), zawierająca koncentrator cyfrowych linii abonenckich DSL (DSLAM) oraz przełącznicę par miedzianych do abonentów (SDF).





Rys. 15. Typowa szafa uliczna dla sieci FTTC z przyłączami VDSL2 [8]

Koncentrator DSLAM jest połączony z siecią kablami światłowodowymi i dokonuje konwersji strumieni cyfrowych na format DMT używany w przyłączach z parami przewodów miedzianych, najczęściej w wersji VDSL2 oraz koncentracji i komutacji ruchu. Pojemność DSLAM wynosi 24–1080 linii abonenckich xDSL [2, 16, 39, 40]. Duże DSLAM mają budowę modułową, z wymiennymi pakietami zakończeń linii cyfrowych i analogowych [16, 39, 40], umożliwiając stopniową migrację abonentów od usług wąskopasmowych do szerokopasmowych. Pakiet VDSL2 ma 24–72 portów; są oferowane również pakiety zakończeń ADSL2+, ADSL2 i SHDSL. Najnowszy standard VDSL2 przewiduje przepływności do 200 Mbit/s w obu kierunkach, ale obecnie proponowane usługi nie przekraczają 60 Mbit/s.

Łączami do jednostki wyniesionej są najczęściej Gigabit Ethernet 1 Gbit/s lub STM-16/64.

Jednostka wyniesiona obsługuje przeciętnie 200 abonentów w promieniu 200–500 m i obszar zaledwie 0,2–1 km<sup>2</sup>. To oznacza, że rozwiązania FTTC nadają się w zasadzie wyłącznie do miast i wymagają instalacji dużej liczby szaf ulicznych, w przeciwieństwie do FTTH, w której średnica obszaru obsługiwanego przez OLT dochodzi do 12–15 km.

Szafa uliczna wymaga zasilania z sieci energetycznej, a dla zabezpieczenia pracy po jego odcięciu przeważnie ma baterię akumulatorów ołowiowych 48 V. Te ostatnie w polskich warunkach klimatycznych stanowią słaby punkt sieci z ulicznymi jednostkami wyniesionymi, ulegając szybkiej degradacji zimą. DSLAM można też instalować w dużych blokach mieszkalnych [13], tworząc sieć FTTB.

Zaletą szaf ulicznych z DSLAM jest łatwy dostęp do wyposażenia dla serwisantów, wadą – trudności ze znalezieniem miejsca i uzyskaniem pozwoleń, gdyż pobór mocy 1–1,5 W na zakończenie VDSL2+ zmusza do chłodzenia za pomocą hałaśliwych wentylatorów.

## Niestabilność technologiczna

Szybki postęp techniczny i istnienie różnych standardów FTTx powodują:

- starzenie się infrastruktury;
- ryzyko inwestycyjne, związane z długim okresem zwrotu nakładów na budowę sieci.

W informatyce i telefonii komórkowej rozwiązaniem jest wymiana komputerów, okablowania strukturalnego, aparatów komórkowych oraz wyposażenia stacji bazowych co 2–5 lat. Pociąga to za sobą krótki okres amortyzacji i wymaga łatwej wymiany przestarzałych elementów. Tak nie jest w przypadku pasywnej infrastruktury stałej sieci telekomunikacyjnej, której:

- instalacja jest pracochłonna, kosztowna i uciążliwa (uzyskiwanie pozwoleń, roboty ziemne i budowlane, przerwy w świadczeniu usług, wizyty monterów);
- okres amortyzacji ustalony w przepisach jest długi (15–25 lat);
- stopa zysku z eksploatacji jest niska – zaledwie 3% dla sieci TP SA, według audytu z 2007 r.

Ostrzeżeniem są losy sieci OPAL (*Optical Passive Access Line* lub *Optische Anschlussleitung*), zbudowanej przez Deutsche Telekom (DT) w latach 1991–1996, głównie na terenach dawnej NRD. Sieć OPAL zapewniała 2 mln abonentów wąskopasmowe usługi telefoniczne, przeważnie w strukturze FTTB/FTTC; był to pierwszy duży projekt FTTx.

W 1999 r. DT rozpoczął wprowadzanie dostępu szerokopasmowego w tańszej technice xDSL, rezygnując z rozbudowy i modernizacji sieci OPAL [28]. Równocześnie, w związku z wysokimi kosztami budowy, regulator ustalił dla operatorów alternatywnych stawki za dostęp do sieci FTTB prawie trzykrotnie wyższe niż do sieci miedzianej [28]. Powstało „OPAL-getto” [36] bez konkurencji i szerokopasmowego dostępu do internetu, które zlikwidowano po 2000 r., budując sieć z tradycyjnych kabli miedzianych.

Problem dotyczy nawet sieci FTTN–VDSL2, gdyż przepływności do 100 Mbit/s mogą nie wystarczyć za 10 lat. Ewentualny brak nowych wersji DSL, o odpowiednio wyższych parametrach i kompatybilnych z istniejącym okablowaniem, zmusi operatorów do kosztownej konwersji sieci FTTN na FTTH, z wymianą prawie nowych kabli miedzianych na światłowodowe, usunięciem z szaf DSLAM i MDF oraz montażem na ich miejscu sprzęgaczy, multiplexerów WDM (w sieci WDM-PON) i przełącznic światłowodowych.

## Włókna i kable światłowodowe dla sieci FTTx

Okablowanie światłowodowe dzieli się na trzy segmenty:

- a) dosyłowy – od jednostki wyniesionej do szkieletu sieci;
- b) dystrybucyjny – od jednostki wyniesionej do posesji abonenta (w sieci FTTH);
- c) wewnątrz posesji abonenta (w sieci FTTH).

**Segment a)** nie różni się zasadniczo od standardowej infrastruktury światłowodowej sieci miejskich i strefowych. Przy przyłączeniu do jednostki wyniesionej 200 abonentów z dostępem stałym 100 Mbit/s i współczynnikiem obciążenia 20% (duży ruch p2p bez limitów) ruch w łączu dosyłowym osiąga 4 Gbit/s; zmusza to do instalacji urządzeń 10 Gbit/s.

Długości łączy dasyłowych nie przekraczają 20 km i jest zbędna kompensacja dyspersji lub używanie włókien NZ-DSF w łącach 10 Gbit/s; wystarczają włókna jednomodowe o nieprzesuniętej dyspersji [17]. Liczba włókien zależy głównie od wymogów regulacyjnych: połączenie jednostki wyniesionej z siecią każdego operatora wymaga 2–4 włókien.

Budowa dużej liczby łączy do szaf ulicznych i budynków mieszkalnych skłania do poszukiwania szybszych i tańszych metod instalacji kabli niż układanie w kanalizacji teletechnicznej. Instalacje napowietrzne, typowe w Japonii, Korei Płd., Chinach i USA, są wrażliwe na uszkodzenia i nieestetyczne. Rozwiązania znane z literatury obejmują:

- układanie kabli światłowodowych w kanalizacji ściekowej [42] lub ciepłowniczej;
- stosowanie mikrokabli wdmuchiwanymi i mikrokanalizacji;
- układanie mikrokabli w nawierzchni dróg lub pod chodnikiem, bez kanalizacji;
- podwieszanie kabli światłowodowych do przewodów energetycznych.

Większość z nich testowano i oferowano w Polsce, ale bez szerszej akceptacji.

**Segment b)** wyróżnia się:

- wysoką docelową liczbą przyłączy, w początkowym okresie nieprzewidywalną;
- częstymi przełączeniami użytkowników, co musi odbywać się szybko i tanio.

Kable sieci FTTH najlepiej instalować pod ziemią, gdyż gwarantuje to dużą niezawodność, co jest istotne przy pracochłonności i wysokich kosztach napraw. Kable światłowodowe nie są atrakcyjne dla złodziei, ponieważ nie zawierają metali kolorowych.

Do zastąpienia istniejącej sieci dostępowej będą potrzebne kable o wysokiej liczbie włókien światłowodowych, w granicach 100–1000, niewielkiej średnicy i ułatwionym montażu. Warunki te najłatwiej spełnić, wprowadzając taśmy światłowodowe i suche uszczelnienie osrodka optycznego, technologie dotychczas w Polsce nie używane (rys. 23).

Oslony złączowe muszą być uszczelnione mechanicznie i przystosowane do wykonywania licznych odgałęzień oraz częstego otwierania. Powinny one umożliwiać montaż rozgałęziaczy optycznych (*splitter*) dla sieci PON, multiplexerów i filtrów dla sieci WDM-PON oraz złączy rozłącznych. Jedną z opcji dostępu dla operatorów alternatywnych [45] przewiduje przyłączanie do rozgałęziaczy optycznych w sieci PON.

Przełącznice światłowodowe dla sieci FTTH nie wymagają nowych rozwiązań, poza kwestiami oznakowania i katalogowania przyłączy (zwłaszcza rozgałęzianych) oraz dostępu dla operatorów alternatywnych, z podziałem na strefy dla poszczególnych firm.

**Segment c)** jest odległy od dotychczasowej praktyki, nawet z sieci LAN, ponieważ:

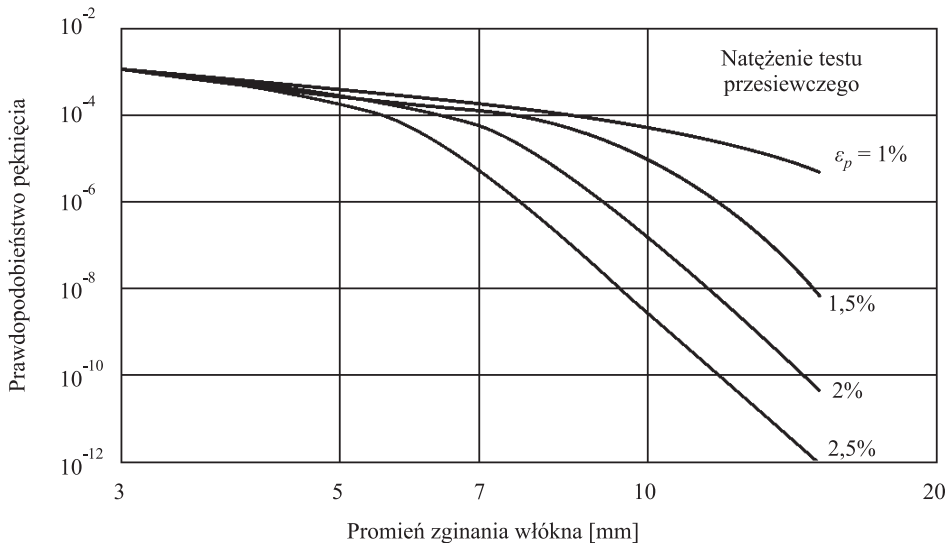
- klient nie toleruje „zaśmieciania” mieszkania; kable powinny być cienkie, mało widoczne i trudno palne, odporne na zginanie i ściskanie, jak zwykłe przewody telefoniczne;
- instalowanie musi być szybkie, np. przez mocowanie do ściany zaciskami lub klejem, możliwe do wykonania przez monterów nie znających specyfiki okablowania światłowodowego;
- połączenia są krótkie (5–50 m); tłumienność i dyspersja mają minimalne znaczenie;

- metraż zużywanych kabli jest minimalny, można wprowadzić wyroby dość drogie i nietypowe, jeśli to obniży koszty robocizny oraz podwyższy niezawodność sieci.

Wymienione czynniki skłoniły konstruktorów do opracowania specjalnych włókien światłowodowych.

### Włókna jednomodowe tolerujące zginanie

Standardowe włókna jednomodowe [17] wymagają zachowania minimalnego promienia gięcia 25–40 mm, aby uniknąć wzrostu tłumienności, gdyż prowadzenie światła we włóknie jest prowadzeniem słabym, zapewnionym przez niewielką różnicę współczynników załamania rdzenia i płaszczka: 0,3–0,5%. Promień zginania ograniczony poziomem naprężeń w szkle i pokryciu ścisłym włókna jest mniejszy: 6–10 mm (rys. 16), przy założeniu, że długość włókna narażonego na zginanie w całym przyłączy nie przekracza 5–10 m [13, 27].



**Rys. 16.** Prawdopodobieństwo uszkodzenia 250 zwojów włókna światłowodowego średnicy 0,125 mm w czasie 20 lat [13]

Naprężenie powstające w zgiętym włóknie opisuje wzór [27]:

$$\sigma_{\max} = \frac{E_1 \cdot d_1}{2r_g}, \quad (1)$$

gdzie:  $\sigma_{\max}$  – najwyższa wartość naprężenia występująca na powierzchni włókna,  $d_1$  – średnica włókna szklanego,  $E_1$  – moduł sprężystości szkła,  $r_g$  – promień zginania włókna.

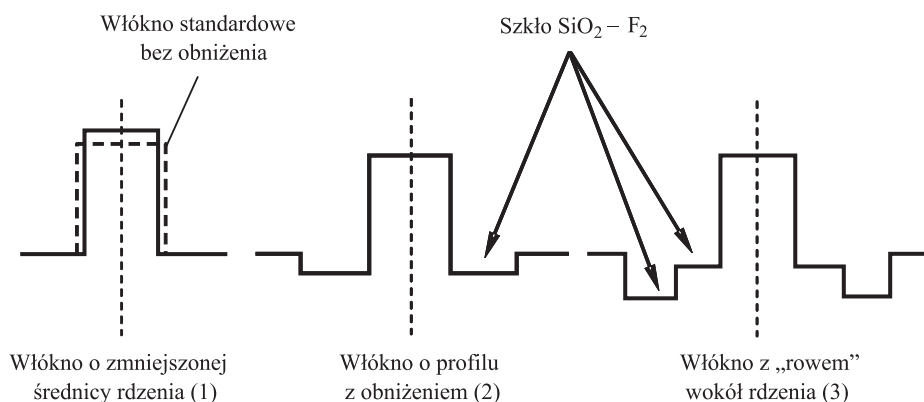
Zgięcie włókna średnicy 0,125 mm na promieniu 6,25 mm wprowadza naprężenie 0,69 GPa, równe przykładanemu podczas testu przesiewczego.

Do instalacji w budynkach mieszkalnych są potrzebne kable niewrażliwe na ciasne zgięcia i zginanie, przykładowo przez postawienie mebla na kablu lub zaciśnięcie obejmą do mocowania. Odporność

na zginięcie zapewnia budowa kabla, natomiast ograniczenie strat wywołanych zgięciami wymaga włókien jednomodowych nowego typu. Rozwiązania wprowadzane w tym celu obejmują:

- 1) włókna o zoptymalizowanej konstrukcji (wymiary, profil refrakcyjny) i konwencjonalnej budowie, zgodne z zaleceniem ITU-T G.652.D [1, 5, 10, 46];
- 2) włókna o zwykłej budowie, lecz parametrach niezgodnych z zaleceniem ITU-T G.652 [17], m.in. o małej średnicy pola modowego i nieco przesuniętej dyspersji [12];
- 3) włókna z barierą mikro- lub nanostrukturalną, blokującą ucieczkę światła [4, 18, 29, 30, 43].

Zaletami włókien (1), przedstawionych na rys. 17, są niski koszt produkcji oraz zgodność transmisyjna i montażowa ze standardowymi włóknami jednomodowymi. Wyroby z grupy (2) często wymagają nietypowych programów do wykonywania złączy spawanych, a straty połączeń z włóknami innych typów są stosunkowo wysokie. Problem ten dotyczy również włókien z „rowem” wokół rdzenia (3) (*Trench Assisted Fiber – TAF*), wykonanym ze szkła silnie domieszkowanego dyfundującym w czasie spawania fluorem.



Rys. 17. Profile refrakcyjne włókien jednomodowych tolerujących zginanie [10, 12, 46]

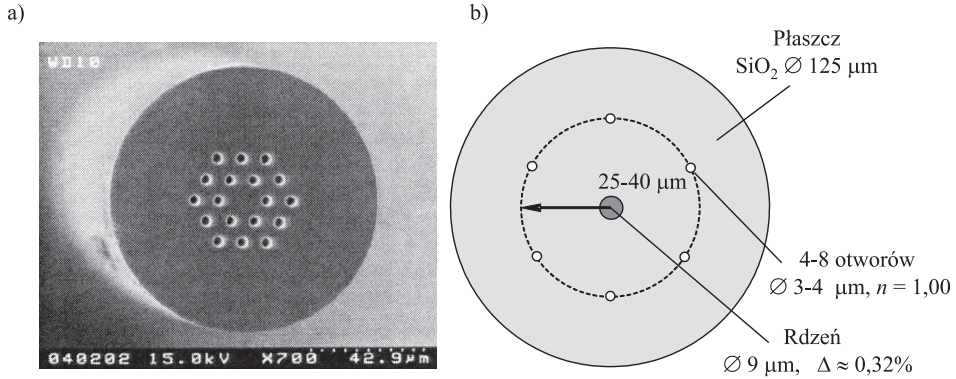
Włókna z grup (1) i (2) znormalizowano w zaleceniu ITU-T G.657 [18] jako kategorie G.657.A i G.657.B (tabl. 5).

Tabl. 5. Wymagania dla strat spowodowanych makrozgięciami

Parametry	ITU-T G.657.B			ITU-T G.657.A	
	15	10	7,5	15	10
Promień zginania [mm]	15	10	7,5	15	10
Liczba zwojów	10	1	1	10	1
Straty max. $\lambda = 1550$ nm [dB]	0,03	0,10	0,50	0,25	0,75
Straty max. $\lambda = 1625$ nm [dB]	0,10	0,20	1,00	1,00	1,50

Stabilność tłumienności włókna w warunkach zginania oraz innych szkodliwych oddziaływań mechanicznych rośnie stopniowo w grupach (1), (2) i (3). Włókna mikrostrukturalne, z których najbardziej są znane włókna z barierą otworkową (*Hole Assisted Fiber – HAF*), pokazane na rys. 18,

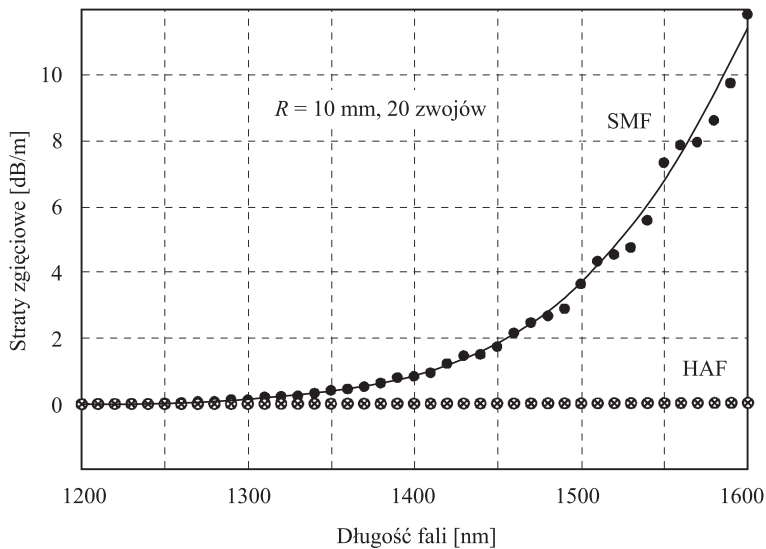
są rozpowszechnione w sieciach FTTH w Japonii. Włókna te należą do kategorii G.657.B, dla której w zaleceniu nie określono dyspersji chromatycznej i polaryzacyjnej.



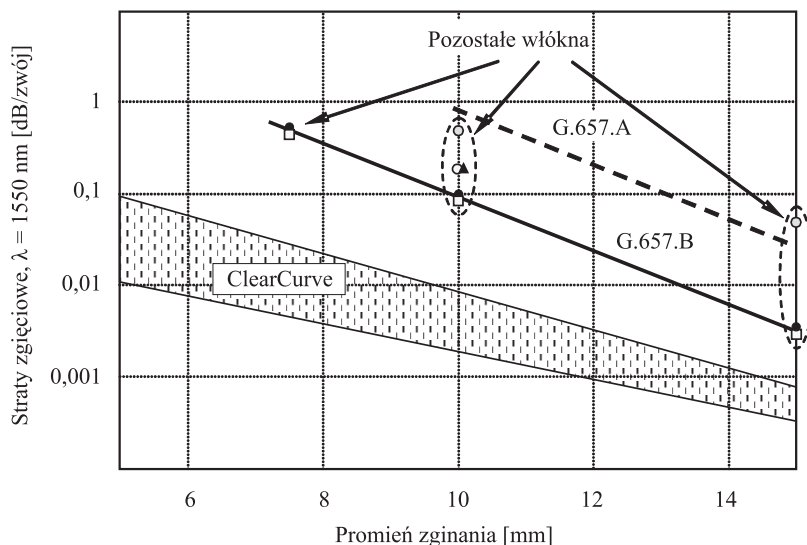
Rys. 18. Włókna z barierą otworkową: a) podwójną [43]; b) pojedynczą [30]

Spawanie HAF wymaga kontrolowanego ogrzewania dość szerokiej strefy wokół właściwego złącza, w celu łagodnego zaciśnięcia otworów bez deformacji rdzenia. Średnica pola modowego włókna HAF po zaciśnięciu jest podobna jak zwykłego włókna jednomodowego [43], co umożliwia ich niskostratne łączenie za pomocą specjalnych zgrzewarek.

Efektywność działania bariery mikrostrukturalnej z otworkami lub warstwami grubości nanometrowej, tworzącymi zwierciadło dielektryczne (prawdopodobna zasada budowy włókna Corning ClearCurve [4]), jest wysoka i – praktycznie – likwiduje ucieczkę promieniowania z rdzenia nawet w warunkach odkształceń bliskich niszczącym (rys. 19 i 20).

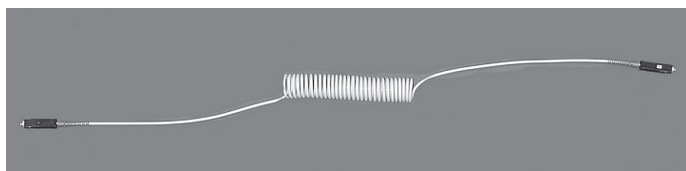


Rys. 19. Charakterystyki strat zgięciowych 6-otworkowego włókna HAF z rys. 18b i standardowego włókna o nieprzesuniętej dyspersji (SMF) [30]



**Rys. 20.** Charakterystyki strat zgięciowych włókna Corning ClearCurve i innych włókien tolerujących zginanie, wytwarzanych w 2007 r. Dane firmy Corning [4]

Bardzo stabilna tłumienność włókien G.657.B jest, paradoksalnie, krytykowana [10], gdyż brak łatwo wykrywalnego wzrostu tłumienności uniemożliwia wykrycie szkodliwego zgięcia reflektometrem. Nie da się też wykonać zakończeń bezodbiociowych do pomiarów reflektancji złączy i likwidacji artefaktów reflektometrycznych („duchów”) tradycyjną metodą zwijania włókna lub kabla na przecię średnicy 6–10 mm. Niemożliwe jest identyfikowanie czynnych włókien ITU-T G.657.B za pomocą czujników wprowadzających zgięcie włókna lub kabla, a także używanie zgrzewarek wyposażonych w układ lokalnego sprzężenia optycznego LID (*Local Injection and Detection*).



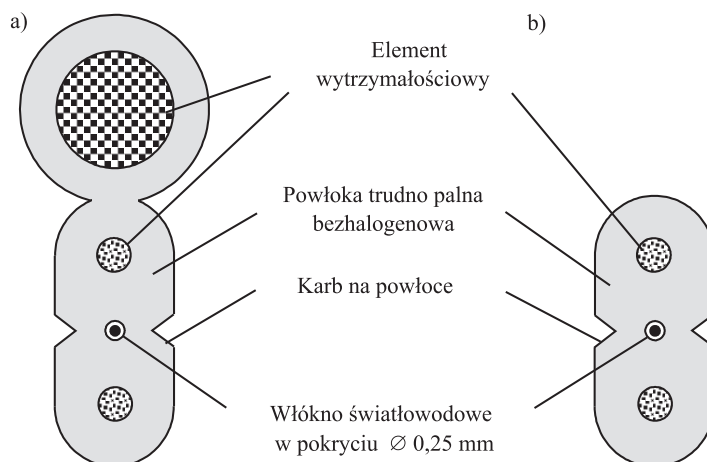
**Rys. 21.** Sznur światłowodowy zwijany z włóknem HAF. Średnica kabla 2 mm, średnica części zwijanej 14 mm. Opracowanie NTT [13]

Włókna HAF umożliwiły wykonanie użytecznego optycznego sznura zwijanego (rys. 21).

### **Kable światłowodowe dla sieci abonenckich**

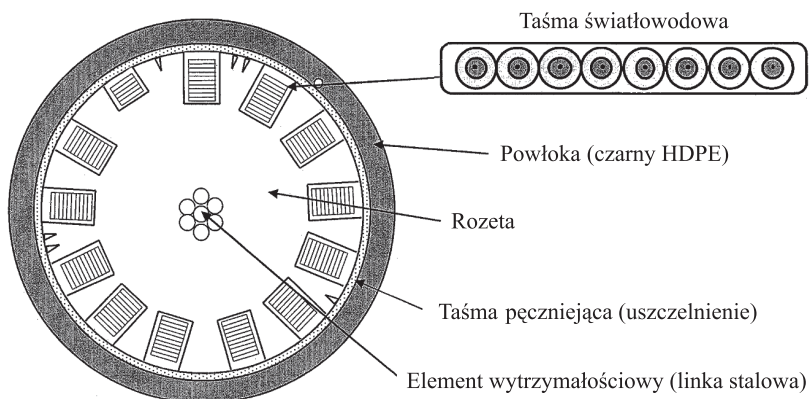
Oryginalne rozwiązania widać w kablach do przyłączy abonenckich. Należą do nich mikrokable, których nowe konstrukcje mają coraz mniejszą średnicę i masę w celu zaoszczędzenia miejsca w kanalizacji i ułatwienia wciągania lub wdmuchiwania. Przykładem jest 12-włóknowy mikrokabel kanałowy z tubą centralną B-Lite Green UT SP1089, firmy Nexans, średnicy zaledwie 3,9 mm [31].

Na rys. 22 pokazano kable używane przez NTT (Japonia) do przyłączy abonenckich, głównie napowietrznych [6, 25], mocowane do słupów i ścian za pomocą klamer i zszywek, a w związku z tym narażone na długotrwałe działanie znacznych sił ściskających. Ośrodek optyczny, zawierający 1–12 włókien, jest umieszczony między sztywnymi prętami wzmacniającymi większej średnicy, wykonanymi z laminatu szklanego lub aramidowego, które przenoszą obciążenia, a spłaszczenie kabla mieści się w bezpiecznych granicach. Karb powłoki umożliwia jej szybkie otwarcie w celu wydobycia włókna światłowodowego.



Rys. 22. Przekroje kabli 1-włóknowych (firmy Furukawa) do instalacji FTTH [25]: a) kabel przyłączeniowy samonośny; b) kabel wewnętrzny

Firma Corning przyjęła z kolei, że nowe włókna ClearCurve będą umieszczane w kablach stacyjnych o konwencjonalnej budowie, tj. małogabarytowym średnicy 2,9 mm oraz wzmocnionym i wodoszczelnym średnicy 4,8 mm, co umożliwi montaż zwykłymi metodami.



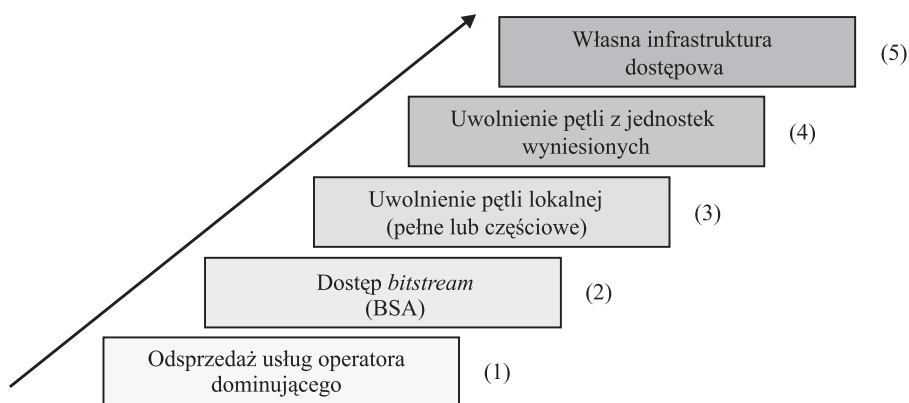
Rys. 23. Kabel rozetowy 1000-włóknowy dla sieci FTTH [24]



Typową w Japonii konstrukcję kabla kanałowego o wysokiej pojemności dla segmentu b) przedstawiono na rys. 23. Kabel z ośrodkiem rozetowym zawiera 1000 włókien klejonych w taśmy 8-włóknowe, ma średnicę zewnętrzną 29 mm oraz masę jednostkową 610 kg/km i zakres temperatur pracy od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ .

### Dostęp dla operatorów alternatywnych w sieciach FTTx

Zasadę hurtowego dostępu do sieci operatora dominującego po urzędowych cenach, sformułowaną dla tradycyjnej sieci telefonicznej, przeniesiono w UE na sieci NGN [8, 22]. Model „drabiny inwestycyjnej” (rys. 24) zakłada, że operator alternatywny przejdzie stopniowo od sprzedaży usług operatora dominującego do posiadania własnej sieci dostępowej.



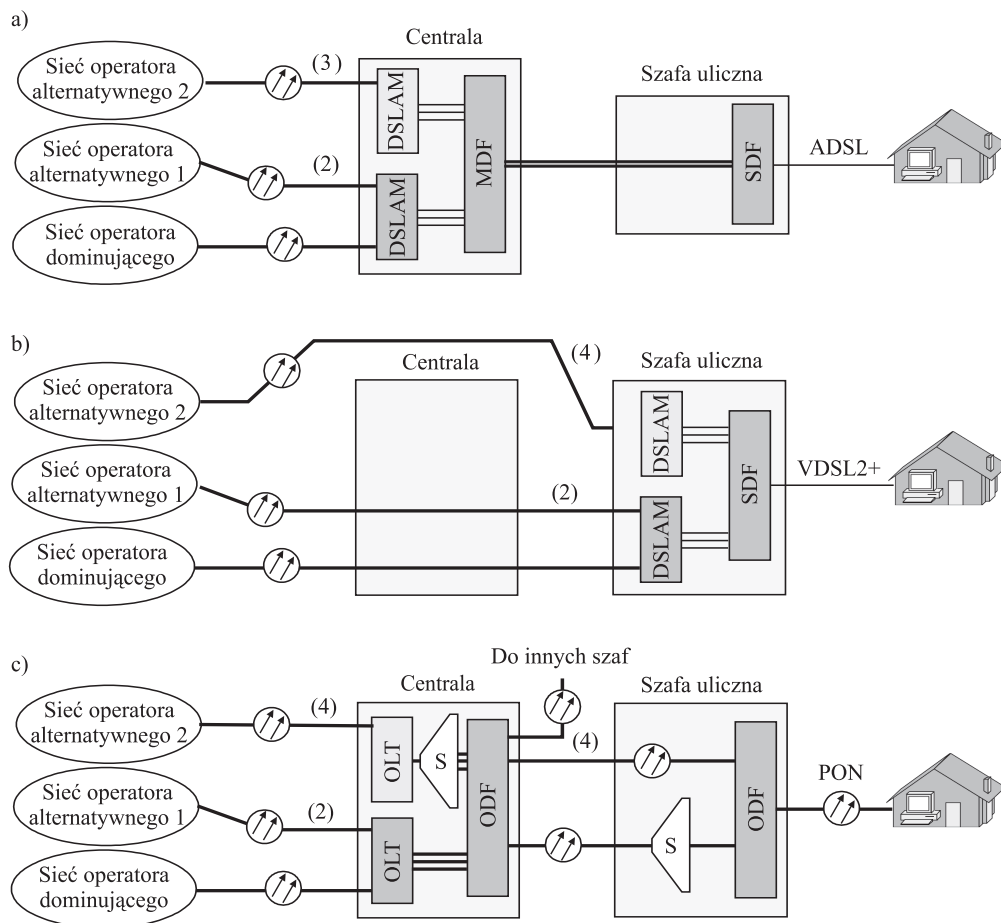
Rys. 24. Rozwój konkurencji w sieci stałej na zasadzie „drabiny inwestycyjnej” [45]

Całkowita (FTTH) lub częściowa (FTTB, FTTC) likwidacja sieci miedzianej przez operatora dominującego odcina dostęp konkurentom, którzy weszli na szczebel 2 lub 3, budując łącza do central i montując tam swe wyposażenie (kolokacja). W tym stadium znajdują się główni konkurenci TP SA oferujący szerokopasmowy dostęp do internetu (Netia, Exatel, Dialog).

W sieci FTTC/N/B analogiczny funkcjonalnie dostęp daje kolokacja na poziomie jednostki wyniesionej, do której każdy operator alternatywny doprowadza swe łącza (rys. 25). Dostęp do sieci odbywa się przez DSLAM operatora dominującego (szczebel 2) lub DSLAM operatora alternatywnego, przyłączony do wybranych par na SDF (szczebel 4).

Istnieją jednak czynniki poważnie utrudniające działalność mniejszym operatorom:

- na obszarze obsługiwanym z jednostki wyniesionej brak liczby klientów, uzasadniającej instalację własnej DSLAM; najmniejsze urządzenia tego typu mają około 20 portów [2, 16], czyli trzeba pozyskać 5–10% spośród 200–300 abonentów;
- szafy uliczne mają mało miejsca na instalację dodatkowych urządzeń;
- budowa linii kablowych do jednostek wyniesionych jest kosztowna i czasochłonna.



**Rys. 25.** Metody dostępu operatorów alternatywnych do sieci szerokopasmowych [8]: a) sieć PSTN; b) sieć FTTC/FTTN; c) sieć FTTH-PON. Numeracja szczebli dostępu według rys. 24

W tej sytuacji regulatorzy w państwach UE stawiają operatorom planującym budowę sieci FTTx dodatkowe i zniechęcające warunki [8, 14], obejmujące m.in.:

- udostępnianie kanalizacji do układania kabli konkurentów;
- rezerwowanie miejsca i mocy w szafach ulicznych na potrzeby kolokacji;
- utrzymywanie starych obiektów i miedzianej sieci kablowej na użytek konkurentów.

## Perspektywy budowy sieci FTTx w Polsce

Warto przypomnieć, że:

- sieć dostępową nowej generacji (NGN) jest kosztowna;
- regulator (Urząd Komunikacji Elektronicznej – UKE) znajduje się od 2004 r. w permanentnym konflikcie z TP SA;

- planowany na 2008 r. podział TP SA, według nieznanych jeszcze zasad, spowoduje wstrzymanie przez operatora inwestycji do czasu sfinalizowania podziału;
- rynek dostępu szerokopasmowego w kraju odznacza się wyjątkową wrażliwością na ceny, przy umiarkowanych wymaganiach dotyczących parametrów i jakości usług.

Jeśli uwzględni się ww. czynniki, pewne jest odkładanie przez TP SA budowy sieci FTTx. W negocjacjach z regulatorem TP SA wykorzystano przykłady z Francji, gdzie France Telecom buduje od jesieni 2006 r. sieci FTTH, oferujące dostęp 100 Mbit/s, przy względnie przychylnym podejściu regulatora Arcep. Istotny będzie również przykład Niemiec, gdzie Deutsche Telekom po decyzji regulatora o przymusowym udostępnianiu elementów sieci FTTN zawiesił jej budowę w 2007 r. Inne firmy nie podejmą znaczących inwestycji, oczekując, że otrzymają tani dostęp do nowej sieci TP SA.

Paradoksalnie, opóźnienie może być korzystne, gdyż wzrost oczekiwań klientów i informacje o doświadczeniach zagranicznych najprawdopodobniej wymuszają decyzję o budowie sieci FTTH, a nie – stanowiącej w dłuższej perspektywie pułapkę inwestycyjną – sieci FTTN.

W listopadzie 2007 r. TP SA poinformowała o decyzji budowy próbnej sieci FTTH w jednym bloku mieszkalnym w Warszawie. Sieć ma zapewnić swym abonentom dostęp do internetu 50 Mbit/s oraz usługi telewizyjne [41].

Ocenę osiągnięć Polski i UE w tym zakresie umożliwiają doniesienia o rozpisany przez rząd Singapuru przetargu na budowę sieci FTTH, mającej w 2015 r. zapewnić **usługę powszechną 1000 Mbit/s** [37] dla wszystkich mieszkańców (4,7 mln) i firm w tym kraju. Jej koszt szacuje się na 2 mld USD. Budowę sieci pasywnej, instalację urządzeń aktywnych i hurtową sprzedaż usług transmisyjnych będą prowadziły osobne firmy, określane jako NetCo i OpCo. Nie mogą one oferować usług detalicznych klientom końcowym.

Obecnie (w maju 2008 r.) o kontrakt na budowę infrastruktury pasywnej, dotowaną przez państwo sumą 543 mln USD, ubiega się 10 wstępnie zakwalifikowanych firm i konsorcjów, w tym BT Singapore Pte Ltd., którego macierzysta spółka w Wielkiej Brytanii wyklucza budowę światłowodowej sieci dostępowej w swoim kraju – do czasu zmiany regulacji o uwolnieniu pętli lokalnej lub uzyskania subsydiów od państwa. Na krótkiej liście przetargu OpCo jest 11 uczestników, w tym BT oraz Deutsche Telekom Asia Pte Ltd.

## **Bibliografia**

- [1] *AllWave FLEX Zero Water Peak Fiber*. OFS Furukawa, 2007
- [2] *Bitstorm-HP-160 VDSL2 High Performance IP-DSLAM*. Zhone Technologies Inc., 09.2007
- [3] *ClearCurve™ Compact Drop Cable Product Specifications EVO-761-EN*. Corning Cable Systems, September 2007
- [4] *Corning ClearCurve Optical Fiber*. Corning Inc., September 2007
- [5] *Corning SMF-28e XB Optical Fiber*. Corning, May 2007 (karta katalogowa PI1462)
- [6] *DC-1 Drop Cable*. Fujikura Ltd., 2003
- [7] Duszak M., Olender-Skorek M., Bartoszewska B.: *Wielkość rynku telefonii stacjonarnej i zmiany jego struktury*. Przegląd Telekomunikacyjny, 2007, nr 11, s. 928–931
- [8] *ERG Opinion on Regulatory Principles of NGA*, ERG(07) Rev. 2, May 2007
- [9] *FTTH Council – Definition of Terms*. FTTH Council, August 2006
- [10] George J., Mazzaresse D.: *Video-optimized fiber is all about the bends*. Lightwave, July 2007, pp. 13, 16–18

- [11] *Gigabit Ethernet PON (GE-PON) Solution*. AFL Telecommunications, 08.2006
- [12] Himeno K. *et al.*: *Low Bending-Loss Single-Mode Fibers for Fiber-to-the-Home*. Journal Lightwave Technology, 2005, vol. 23, no. 11, pp. 3494–3499
- [13] Hiramatsu K. *et al.*: *Optical Fiber Curl Cord*. NTT Technical Review, 2005, vol. 3, no. 5, pp. 57–61
- [14] Hoff von den K., Dargue M.: *VDSL2 to Threaten European Local Loop Unbundlers*. CSMG Adventis, January 2007
- [15] IEEE 802.3 (12/2005): *Standard for Information Technology – Telecommunications and information exchange between systems – Local and metropolitan area networks – Specific requirements; Part 3: Carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications*
- [16] *IES-5000/IES 5005 6.5U/4U IP DSLAM with DC Power*. ZyXEL Communications Corp., 07.2007
- [17] ITU-T Rec. G.652 (06/2005): *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*
- [18] ITU-T Rec. G.657 (12/2006): *Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network*
- [19] ITU-T Rec. G.983 (01/2005): *Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*
- [20] ITU-T Rec. G.984.1 (03/2003): *Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics*
- [21] Kamiński F.: *Problematyka usługi powszechnej w sektorze komunikacji elektronicznej Unii Europejskiej w perspektywie długoterminowej*. Telekomunikacja i Techniki Informacyjne, 2007, nr 1–2, s. 3–36
- [22] Kamiński F.: *Regulacja konkurencji na wokandzie Komisji Europejskiej*. Biuletyn Informacyjny IŁ, 2007, nr 4, s. 1–12, <http://www.itl.waw.pl/publ/biuletyn>
- [23] *Karty katalogowe urządzeń: Edge2000, Edge200, Home4000, Xgen1000, Xgen8000*. Alloptic Inc., 2006
- [24] Kawataka J. *et al.*: *Novel Optical Fiber Cable for Feeder and Distribution Sections in Access Networks*. Journal Lightwave Technology, 2003, vol. 21, no. 3, pp. 789–806
- [25] Kobayashi I.: *Optical fiber cables for FTTH in Japan*. September 2002 (dokument roboczy ITU-T SG06 D28)
- [26] Lee C.-H., Choi K.-M.: *Fiber to the Home*. W: Materiały z konferencji LEOS 2007, Lake Buena Vista, USA, 2007, referat ThDD2, s. 937–938
- [27] Matthijsse P., Griffioen W.: *Matching optical fiber lifetime and bend-loss limits for optimized local loop fiber storage*. Optical Fiber Technology, 2005, vol. 11, pp. 92–99
- [28] Mühlbauer P.: *Die Glasfaser in ihrem Lauf... hält DSL im Osten auf*. Telepolis, 12.02.2001, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/4/4885/1.html>
- [29] Nakajima K. *et al.*: *Hole-Assisted Fiber Design for Small Bending and Splice Losses*. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, vol. 15, no. 12, pp. 1737–1739
- [30] Nakajima K. *et al.*: *Hole-Assisted Single Mode Optical Fiber*. Patent USA 7228040, June 2007
- [31] *Nexans B-Lite Green UT SP1089 Microcable up to 12 Fibres*. Nexans, 2007

- [32] *OECD Broadband Statistics to December 2006*. OECD Directorate for Science, Technology and Industry, 2007
- [33] *Optimate 2500LT FlexLight's High Capacity GPON (ITU-T G.984) Optical Line Terminal*. FlexLight Networks Inc., 2007
- [34] *Optimate 1000 NT FlexLight's High Capacity GPON (ITU-T G.984) Small Business/Multi Dwelling Optical Network Terminal (ONT)*. FlexLight Networks Inc., 2007
- [35] *Pismo protestacyjne przeciw stacji bazowej telefonii cyfrowej sieci Era nr 46277 – Wrocław Krzyki*. Społeczny Komitet Protestacyjny „NIE! DLA WIEŻY”, Wrocław, luty 2007, <http://www.iddd.de/umtsno/wroclaw/wroclawsztabowa30.htm>
- [36] *Raus aus dem OPAL-Ghetto*. Forum internetowe rosengart.de, kwiecień 2004, <http://www.rosengart.de/archives/000015.html>
- [37] *Singapore Opens Bidding Battle for 1Gb/s NGN*. TelecomWeb, December 2007
- [38] *Strategic Review of Telecommunications – Phase 2: Response to Ofcom, Version 4.1 (Final)*. Critical Telecom Corporation, February 2005
- [39] *SURPASS hiX 56\*\* IP-DSLAM*. SwjazinformService GmbH, 2006
- [40] *SURPASS hiX 56xx series – Carrier Ethernet IP DSLAMs*. Siemens, 2006
- [41] Świderek T.: *TP oferuje pierwsze internetowe łącza o prędkości 50 Mb/s*. Gazeta Prawna, nr 221 (2091), 14 listopada 2007
- [42] *Telecom Italia Group Next Generation Network – Meeting with European Authorities*. Telecom Italia, April 2007
- [43] Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiba M.: *Bending-Insensitive Single-Mode Hole-Assisted Fibers with Reduced Splice Loss*. W: Materiały z konferencji *Lasers & Electro-Optics (CLEO)*, Baltimore, USA, 2005, referat CMV6, s. 384–386
- [44] *TW-124G ONTs GPON Optical Network Terminals for Residential and SOHO Applications*. Terawave Communications, 09.2006
- [45] *WiMax Killer?: 100 MB/s LTE Mobile Wireless Passes Key Test*. TelecomWeb, November 2007
- [46] Wu F. et al.: *A New G.652D, Zero Water Peak Fiber Optimized for Low Bend Sensitivity in Access Networks*. W: Materiały z konferencji *55th IWCS/Focus*, Providence, USA, 2006

## Krzysztof Borzycki



Dr inż. Krzysztof Borzycki (1959) – 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 w Szwecji (2001–2002); specjalista w zakresie badań homologacyjnych i certyfikacyjnych kabli światłowodowych, systemów transmisyjnych i osprzętu; uczestnik europejskich programów badawczych COST-299 i NEMO; wykładowca oraz instruktor w zakresie telekomunikacji optycznej; przedstawiciel IŁ w Polskim Komitecie Normalizacyjnym; autor ponad 40 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