

**PODSTAWY FIZYCZNE  
OPTOELEKTRONIKI I  
TELEKOMUNIKACJI  
ŚWIATŁOWODOWEJ**

**Prof.dr hab. Halina Abramczyk**

# Wstęp

## 1. Podstawy fizyczne transmisji światłowodowej

### 1.1. Wprowadzenie

### 1.2. Prawo Snelliusa i kąt graniczny dla całkowitego wewnętrznego odbicia

### 1.3. Rodzaje światłowodów

### 1.4. Rozchodzenie się światła w światłowodach. Analiza elektrodynamiczna

#### 1.4.1. Światłowod cylindryczny skokowy

#### 1.4.1. Mody typu TE (lub H)

#### 1.4.2. Mody typu TH (lub E)

#### 1.4.3. Mody hybrydowe typu HE i EH

#### 1.4.4. Typy modów $TE_{mp}$ , $TM_{mp}$ , $HE_{mp}$ , $EH_{mp}$

#### 1.4.5. Częstotliwość odcięcia

#### 1.4.6. Mody liniowo spolaryzowane $LP_{mp}$

### 1.5. Rozchodzenie się światła w światłowodach. Analiza elektrodynamiczna.

Światłowod planarny. Graficzne rozwiązywanie równania charakterystycznego

### 1.6. Rozchodzenie się światła w światłowodach. Analiza toru optycznego i analiza elektrodynamiczna dla światłowodu cylindrycznego gradientowego

### 1.7. Wytwarzanie światłowodów szklanych

### 1.8. Pojęcie okien optycznych światłowodów

### 1.9. Generacje transmisji światłowodowej

### 1.10. Podsumowanie

### 1.11. Uzupełnienia

## 2. Budowa kabli i parametry światłowodów

### 2.1. Budowa kabli światłowodowych

### 2.2. Parametry światłowodów

#### 2.2.1. Tłumienie, tłumienność

#### 2.2.2. Apertura numeryczna NA

#### 2.2.3. Częstotliwość odcięcia

#### 2.2.4. Współczynnik dyspersji D

**2.2.5. Współczynnik dyspersji polaryzacyjnej PMD, długość zdudnień**

**2.3. Bilans mocy optycznej systemu światłowodowego**

**2.4. Reflektometr światłowodowy**

**2.4.1. Budowa i działanie reflektometru Brillouin'a**

### **3. Typy dyspersji**

**3.1. Dyspersja modowa**

**3.2. Dyspersja chromatyczna**

**3.2.1. Dyspersja falowodowa (światłowodowa)**

**3.2.2. Dyspersja materiałowa. Podstawy teoretyczne: prędkość grupowa, opóźnienie grupowe, dyspersja prędkości grupowej GVD, współczynnik dyspersji D**

**3.2.3. Dyspersja polaryzacyjna**

### **4. Zjawiska nieliniowe**

**4.1. Zjawiska nieliniowe drugiego rzędu**

**4.2. Zjawiska nieliniowe trzeciego rzędu**

**4.3. Wymuszone rozpraszanie Ramana**

**4.4. Rozpraszanie Brillouina**

**4.5. Mieszanie czterofalowe**

**4.6. Automodulacja fazy (SPM)**

**4.7. Skośna modulacja fazy (XPM)**

**4.8. Teoretyczny opis zjawiska GVD i automodulacji SPM**

**4.8.1. Nieliniowe równanie Schrodingera**

**4.8.2. Włączenie efektów nieliniowych wyższego rzędu do nieliniowego równania Schrödingera**

**4.8.3. Wyprowadzenie zależności na poszerzenie impulsu spowodowanego efektem GVD i efektem automodulacji SPM**

## **5. Źródła światła w transmisji światłowodowej**

### **5.1. Podstawy fizyki laserów**

**5.1.1. Przejścia spontaniczne i wymuszone. Współczynniki Einsteina. Własności promieniowania wymuszonego**

**5.1.2. Podstawy działania laserów**

**5.1.3. Inwersja obsadzeń**

**5.2. Całkowita liczba modów podłużnych. Dobroć rezonatora. Związek między szerokością linii emisji wymuszonej a dobrocią rezonatora**

**5.3. Synchronizacja modów. Związek między szerokością linii emisji spontanicznej a czasem trwania impulsu. Metody synchronizacji modów. Synchronizacja aktywna i pasywna**

**5.4. Typy laserów**

**5.4.1. Lasery światłowodowe**

**5.4.2. Synchronizacja aktywna i pasywna w laserach światłowodowych. Podstawy teoretyczne**

**5.4.3. Lasery Ramana**

**5.4.4. Lasery półprzewodnikowe**

**5.4.4.1 Półprzewodniki samoistne. Półprzewodniki domieszkowane. Złącza n-p**

**5.4.4.2 Lasery diodowe. Dioda luminescencyjna LED**

**5.4.4.3. Lasery z rozłożonym odbiciem Bragga (DBR). Lasery z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (DFB)**

**5.5. Teoretyczne podstawy zjawisk zachodzących w półprzewodnikach**

**5.5.1. Model swobodnych elektronów**

**5.5.2. Poziomy energetyczne swobodnych elektronów dla przypadku jednowymiarowego**

**5.5.3. Poziomy energetyczne swobodnych elektronów dla przypadku trójwymiarowego**

**5.5.4. Model prawie swobodnych elektronów**

**5.6. Diody i lasery diodowe stosowane w telekomunikacji światłowodowej**

## **5. Detektory w transmisji światłowodowej**

**6.1. Typy detektorów i parametry charakteryzujące detektory**

**6.2. Detektory fotoemisyjne. Fotopowielacz**

**6.3. Detektory półprzewodnikowe**

**6.4. Detektory wielokanałowe linijka diodowa PDA i kamera CCD**

**6.5. Detektory stosowane w transmisji światłowodowej**

## **7. Elementy traktu światłowodowego**

**7.1. Pasywne elementy traktu światłowodowego**

**7.1.1. Światłowody i kable światłowodowe**

**7.1.2. Złączki**

**7.1.3. Sprzęgacze – rozgałęziacze**

**7.1.3.1. Teoretyczne podstawy sprzęgaczy kierunkowych**

**7.1.4. Izolatory optyczne**

**7.2. Aktywne elementy traktu światłowodowego**

**7.2.1. Teoretyczne podstawy wzmocnienia optycznego**

**7.2.2. Wzmacniacze światłowodowe**

**7.2.2.1. Wzmacniacz erbowy EDFA**

**7.2.2.2. Wzmacniacz Ramana**

**7.2.3. Wzmacniacz półprzewodnikowy**

**7.2.4. Modulatory**

**7.2.5. Multipleksery i demultipleksery**

**7.2.6. Przełączniki**

## **8. Techniki zwielokrotnienia i sieci światłowodowe**

**8.1. Sposoby zwiększenia przepustowości łącz światłowodowych**

**8.2. Techniki zwielokrotnienia WDM , DWDM, TDM**

**8.3. Sieci światłowodowe**

**8.3.1. Światłowody w sieciach komputerowych i telekomunikacyjnych**

**8.3.2. Systemy transmisji**

**8. 3.2.1. Systemy transmisji cyfrowej**

- PDH
- SDH
- FITL i pochodne

- **FDDI**
- **Fiber Channel**
- **HIPPI**

#### **8.3.2.2. Systemy transmisji analogowej**

- **HFC (CATV)**

#### **8.4. Topologie sieci**

#### **8.5. Ethernet światłowodowy**

#### **8.6. Token Ring (Pierścień kontrolowany przez znacznik)**

#### **8.7. ATM (Tryb przesyłania asynchronicznego )**

## Wstęp

W swojej najnowszej książce „The World is flat: A brief history of the twenty-first century” (Świat jest płaski: Krótka historia XXI wieku”, jeden z czołowych współczesnych ekonomistów świata Thomas L. Friedman pisze o trzech fazach globalizacji: 1) 1492-1800- nawiązanie stosunków handlowych z Nowym Światem, rozpoczęte odkryciem Ameryki, 2) 1800-2000 – globalna integracja rozwija się poprzez spółki wielonarodowe, których rozwój jest możliwy dzięki maszynie parowej, kolei żelaznej, ropie naftowej, 3) trzecia faza globalizacji właśnie się rozpoczyna dzięki wiodącej technologii jaką jest światowa sieć światłowodowa.

Wykorzystanie światła do transmisji danych fascynowało uczonych i wynalazców od stuleci. Wystarczy wspomnieć eksperyment Johna Tyndalla, demonstrujący efekt całkowitego wewnętrznego odbicia w rurze z wodą, czy też eksperymenty w 1880 z fotofonem.

Technologia światłowodowa zaczęła się rozwijać w szybkim tempie w drugiej połowie lat pięćdziesiątych. Pierwszym spektakularnym sukcesem było urządzenie transmitujące obraz w całkowicie szklanym światłowodzie skonstruowane przez Briana O'Briena z American Optical Company i jego kolegów z the Imperial College of Science and Technology. Wszystkie wczesne światłowody miały ogromne tłumienności i sygnał mógł wędrować na niewielkie odległości. Aby zmniejszyć tłumienności, zastosowano włókna zbudowane z rdzenia i płaszczka. Niższy współczynnik załamania płaszczka niż rdzenia zwracał promień odbity do rdzenia i zmniejszał tłumienność. Taki światłowód mógł już znaleźć pierwsze zastosowania w praktyce, głównie w medycynie. Drugi etap związany jest z rozwojem laserów, a w szczególności laserów półprzewodnikowych oraz diód luminescencyjnych (LED). Pierwszy laser rubinowy i helowo-neonowy powstał w 1960. Pierwszy laser półprzewodnikowy został zbudowany dwa lata później, w 1962 roku. Lasery i diody LED znalazły szerokie zastosowanie w technologii światłowodowej.

Gdy znaleziono właściwe nadajniki światła, powrócono ze wzmożoną siłą do transmisji światła przez włókna szklane. Światło ma dużo wyższą częstotliwość niż fale radiowe i w związku z tym około 10000 razy większą pojemność informacyjną przenoszenia sygnału i fakt ten od dawna nie dawał spokoju inżynierom telekomunikacji. Problem polegał tylko na tym, że światło nie może rozchodzić się bezprzewodowo w przestrzeni

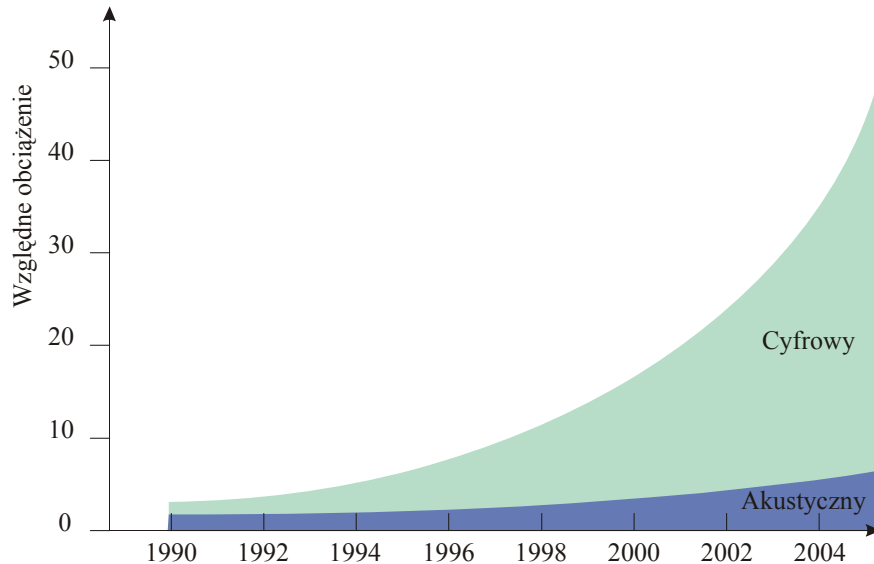
atmosferycznej ze względu na występującą zawsze absorpcję i rozpraszanie, zwiększoną w zmiennych warunkach pogodowych przez deszcz, mgłę, zanieczyszczenia, chmury. „Drut” szklany wydawał się dobry do transmisji światła, gdyby tylko poprawić jego tłumienność. Pierwsze światłowody miały tłumienność 1000 dB/km. W 1966 roku Standard Telecommunication Laboratory in England opublikowała swoją sztandarową pracę o komunikacji światłowodowej, sugerując, że medium kabla światłowodowego mogłoby być użyte w telekomunikacji gdyby udało się uzyskać światłowody o tłumienności 20 dB/km. A przecież tłumienność 20 dB/km oznacza, że tylko 1% przejdzie przez odcinek 1 km, 99% zostaje utracony bezpowrotnie. Współczesne światłowody mają tłumienność rzędu 0.2 dB/km. Te liczby mówią same za siebie i ilustrują jaki postęp w telekomunikacji światłowodowej zastał uczyniony w ciągu ostatnich czterdziestu lat. W roku 1970 firma Corning odniosła sukces w zbudowaniu pierwszego światłowodu mającego oczekiwaną tłumienność poniżej 20dB/km. Osiągnęli to dzięki wytworzeniu szkła o bardzo wysokim stopniu czystości.

Pierwsze lasery i diody LED były wysoce nie zadawalające do osiągnięcia coraz większych wymagań wobec szybkości transmisji. To samo stwierdzenie dotyczyło detektorów półprzewodnikowych. Początkowo pracowano z diodami i fotodetektorami z zakresu widzialnego, ale w tym zakresie rozpraszanie Rayleigha jest jeszcze tak duże, że czyste szkło nie mogło skompensować bariery wysokiej tłumienności. Rozwój technologii ruszył w kierunku penetracji nowych regionów spektralnych, najpierw 850 nm, a potem zakresu dalekiej podczerwieni, bowiem tam w okolicach 1310 nm, oraz 1550 nm, tłumienności szkła są najniższe. Ponadto, rosły wymagania wobec mocy diód laserowych i LED oraz szybkości modulacji. To z kolei powodowało wzrost wymagań wobec detektorów, które powinny charakteryzować się krótkim czasem odpowiedzi.

Obecnie, w pojedynczym włóknie dla pojedynczej długości fali można uzyskiwać przepustowości 40 Gb/s. Zastosowanie technik multipleksacji DWDM spowodowały niewyobrażalny wcześniej rozwój technologii światłowodowej. Terabitowe sieci umożliwiają niewyobrażalnie duże szybkości transmisji, pozwalają na przekaz 100 milionów (!) rozmów telefonicznych za pomocą jednego włókna światłowodowego lub jednoczesne przesyłanie 649 tysięcy szybkich linii internetowych ADSL z szybkością 8 Mb/s każda. A to tylko jedno włókno! Współczesny optokabel, który może zawierać 400 włókien można dostarczyć przepływności petabitowych, czyli strumieni o pojemności  $10^{15}$  informacji cyfrowych w czasie 1 sekundy. Takie przepustowości dają fenomenalny wzrost liczby osób korzystających



z Internetu. Obecnie prawie pół miliarda ludzi ma dostęp do Internetu, a 40 milionów ma dostęp do domowego Internetu. Rysunek W.1 ilustruje tę tendencję.



Rys. W.1 Ilustracja dostępu do Internetu

Niżej, kilka liczb które ilustrują rozwój sieci światłowodowych w ostatnich latach:

- Lata 1990-1995, 2.5 Gb/s w jednym włóknie, 1 kanał, TDM, 80-150 km bez regeneracji,
- 10 Gb/s w jednym włóknie, 1 kanał, TDM,

Na początku XXI wieku osiągnięto nowe rekordy w sieciach szkieletowych DWDM w jednym włóknie:

- wrzesień, 2000, Alcatel, 5.12Tb/s, włókno Teralight, 300 km, 128 kanałów o 40 Gb/s każdy,
- październik 2000, NEC, 6.4Tb/s na odcinku 186 km,
- 2003, Alcatel, 10.1Tb/s na odległość 300 km oraz 5.0 Tb/s w zasięgu do 2000 km.

W praktyce na początku nowego stulecia (2003) w sieciach szkieletowych DWDM osiągnano w jednym włóknie 40 Gb/s na pojedynczej długości fali, a liczba kanałów nie przekraczała 160 kanałów.

Rozwój szybkich sieci optycznych zależy od następujących czynników:

- rozwój sieci szkieletowych (SDH, ATM) poprzez
  1. doskonalenie medium przekazu (kabel miedziany, światłowód, transmisja bezprzewodowa)
  2. zastosowanie technologii zwielokrotnienia wielofalowego WDM,DWDM,UWDM
- rozwój węzłów komutacji (rozdzielacze, sprzęgacze, konwerter, przełączniki, terakomutatory)
- rozwój abonenckich sieci dostępowych (usługi wąskopasmowe -modem analogowy, średniopasmowe - sieci ISDN, szerokopasmowe – ADSL, modem kablowy HFC)
- modernizacja protokołów transportowych

Rozwój sieci szkieletowych (SDH, ATM) poprzez doskonalenie medium przekazu – światłowodu można osiągnąć poprzez:

- zastosowanie włókien światłowodowych o odpowiedniej charakterystyce przenoszenia (mody, tłumienność, dyspersja, nieliniowość): MMF, SMF,DS-SMF, NZDS-SMF. Obecnie dla najlepszych włókien uzyskuje się ok. 40 Gb/s w pojedynczym włóknie dla pojedynczej długości fali.
- zwiększenie liczby włókien w pojedynczym kablu: pierwsze instalacje zawierały 4,8,24,48 włókien, obecne optokable zawierają 144 włókna (Fabryka Kabli Ożarów) a nawet ponad 400 włókien w jednym kablu. W ten sposób można dostarczyć przepływności petabitowych, czyli strumieni o pojemności  $10^{15}$  informacji cyfrowych w czasie 1 sekundy.

Rozwój sieci szkieletowych (SDH, ATM) odbywa się również poprzez zastosowanie technologii zwielokrotnienia wielofalowego WDM,DWDM,UWDM:

- 80\*40 Gb/s, 160\*10 Gb/s, 320\*2.5 Gb/s

Tworzenie szybkich sieci optycznych wykorzystujących technologie zwielokrotnienia wielofalowego WDM,DWDM,UWDM jest możliwe poprzez budowanie kompletnych optycznych platform obejmujących:

1. światłowody
2. lasery i modulatory
3. wzmacniacze optyczne

4. urządzenia zwielokrotniające
5. przełączniki i terakomutatory.

Tabela W.1 Przykładowe platformy optyczne

Wave Star OLS 80 G	Lucent Technologies	80 Gb/s, 16 kanałów optycznych DWDM o szybkości 5 Gb/s każdy
Wave Star OLS 400G	Lucent Technologies	400 Gb/s(640 Gb/s), 2.5 Gb/s lub 10 Gb/s w pojedynczym kanale
Wave Star OLS 800G	Lucent Technologies	800 Gb/s, 320 kanałów UWDM, (320*2.5 Gb/s lub 80*10 Gb/s)
Optinex	Alcatel	5.12 Tb/s, 128 kanałów o 40 Gb/s każdy
Infinity MTS	Simens	3.2 Tb/s (80*40Gb/s, 160*10 Gb/s) w jednym włóknie optycznym
Unishere Solutions	Simens	Kompletowanie sieci nowej generacji z równoczesną integracją transmisji głosu i danych

Programy rozszerzenia pasma transportowego, czyli zwiększenia przepływności na potrzeby Internetu (nie mniej niż 155 Mb/s) pod wspólnym hasłem Internet 2:

- new Generation Internet (USA)
- Information Society Technologies (Europa)
- Polski Internet Optyczny Pionier (Polska) –finansowany przez KBN dla rozwoju infrastruktury nauki polskiej, połączenie 22 sieci metropolitalnych MAN, 5

krajowych centrów superkomputerowych poprzez szerokopasmowa siec optyczną POL-34/155 (Optinex, Alcatel)

- TPSA, ogólnopolska sieć szkieletowa, 12 pierścieni transmisji międzystrefowej w technologii SDH o przepływności 2.5 Gb/s każdy (Optinex, Alcatel)
- Podpisano kontrakt (TPSA i Lucent Technologies) na instalację najnowocześniejszej krajowej optycznej sieci szkieletowej o przepływności 400 Gb/s z wykorzystaniem platform Wave Star OLS 400G

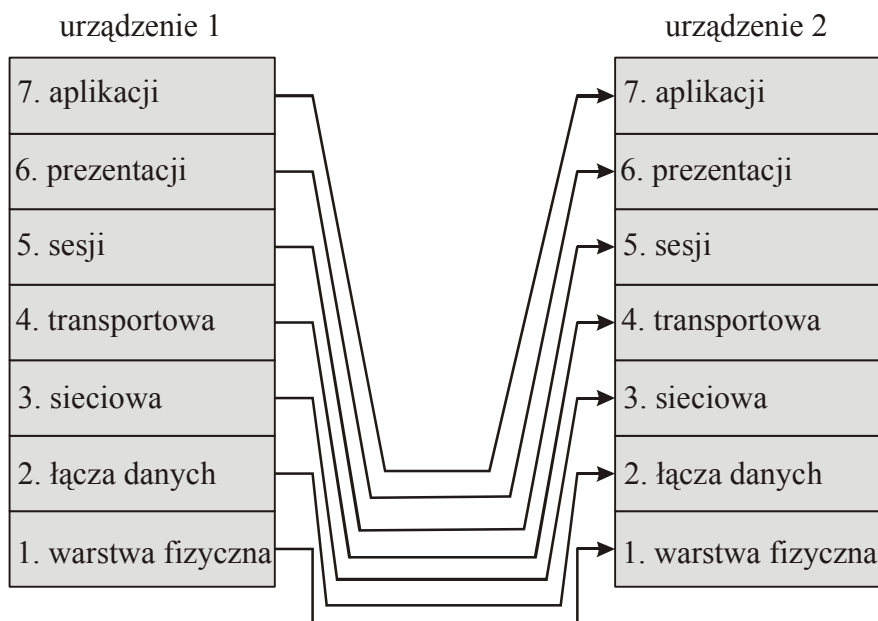
Inny kierunek rozwoju sieci optycznych obejmuje prace nad dostępem do usług abonenckich.

Tabela W.2 ilustruje kierunki rozwoju dostępu do usług abonenckich.

Tabela W.2 Rozwój dostęp do usług abonenckich

Usługi wąskopasmowe	przewody miedziane, przepływności do 144 kb/s, modemy analogowe
Usługi średniopasmowe	przewody miedziane, przepływności do 2 Mb/s technologia ISDN (Integrated Services Digital Network)
Usługi szerokopasmowe	przewody miedziane, korzystanie z jednej pary przewodów do świadczenia tradycyjnych usług telefonicznych i dwukierunkowej (lecz asymetrycznej) transmisji danych), przepływności 2-8 Mb/s cyfrowa technologia xDSL (Digital Subscriber Line) głównie ADSL (Asymmetric DSL)
Kablowa alternatywa	Operator telewizji kablowej CATV (Cable TV), hybrydowa sieć optyczno-współosiowa HFC (Hybrid Fiber Coax) z wykorzystaniem dwukierunkowych łączy światłowodowych w części szkieletowej i kabla współosiowego, przepływności 10-40 Mb/s

Zanim przystąpimy do omówienia światłowodów, sposobów ich łączenia w celu stworzenia sieci światłowodowych wykorzystywanych we współczesnej telekomunikacji i sieciach komputerowych przypomnijmy sobie schemat transmisji danych, zwany modelem ISO/OSI. Model otwartych standardów połączeń OSI (Open System Interconnection) został opracowany w 1977 roku przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (International Standard Organization, ISO) w celu opisu i uporządkowania schematów działania ówczesnych sieci komputerowych. Model ten opisuje proces transmisji danych, dzieląc go na 7 etapów. Każdy etap związany jest z wykonaniem pewnych odrębnych zadań za pomocą określonych układów sprzętowych lub odpowiedniego oprogramowania zwanych obiektami. Zbiór sprzętu i oprogramowania przeznaczonych do wykonania zadań określonego etapu nosi nazwę warstwy. Tak więc model OSI ma 7 warstw przedstawionych na Rys. W.2.



Rys. W.2 Model odniesienia OSI

Dane przesyłane są od wierzchołka stosu warstw poprzez kolejne warstwy aż do najniższej warstwy fizycznej, która przesyła dane przez sieć do odległego komputera. W książce „Podstawy fizyczne optoelektroniki i telekomunikacji światłowodowej” zajmujemy się warstwą najniższą – warstwą fizyczną. Warstwa fizyczna stanowi fizyczny nośnik transmisji danych i obejmuje obiekty takie jak: przewody, karty sieciowe, modemy, regeneratory, koncentratory, multipleksery, modulatory, demultipleksery, nadajniki sygnału, odbiorniki sygnału. Wśród obiektów interesować będą nas tylko te, które związane są z optycznymi

metodami przesyłania danych, czyli z technikami światłowodowymi. Niżej przypomnijmy główne funkcje pełnione przez poszczególne warstwy.

Tabela W.3 Model odniesienia OSI- zadania warstw [1]

<b>Warstwa 7-</b> Aplikacji - logowanie, poczta elektroniczna, bazy danych, polecenia systemu operacyjnego
<b>Warstwa 6</b> – Prezentacji- interpretacja danych, dekompresja, emulacja terminali
<b>Warstwa 5</b> - Sesji – połączenie logiczne pomiędzy komputerami. Aplikacje sieciowe korzystają z usług tej warstwy. Np. NetBIOS..
<b>Warstwa 4</b> – Transportowa- przekazywanie danych pomiędzy połączonymi systemami. Np. TCP/IP
<b>Warstwa 3</b> – Sieciowa – przekazywanie danych przez sieć od nadawcy do adresata. Dane warstw 1-3 przetwarzane są w tzw. pakietach.
<b>Warstwa 2</b> – Łąca danych. Dane z warstwy 3 przygotowane są do przesłania w formie ramki. Kontrola niezawodności przesyłanych danych pomiędzy węzłami sieci. (protokoły Ethernet, Token Ring)
<b>Warstwa 1</b> – Fizyczna – transmisja danych. Okablowanie, napięcia, poziomy sygnał, kodowanie, itd.

Warstwy pracują zgodnie z ich własnym protokołem, Każda kolejna warstwa musi znać sposób komunikacji z warstwą niższą, a do tego wystarcza znać jedynie format danych opisany poprzez protokół wymiany danych.

Pojęcie warstwy nie jest tożsame z pojęciem protokołu. Każda warstwa może być obsługiwana przez różne protokoły, mniej bądź bardziej wydajne. Niżej przedstawiono najczęściej stosowane protokoły do obsługi kolejnych warstw. Model ISO/OSI, choć uniwersalny i opisuje poprawnie również transmisję danych według protokołu internetowego TCP/IP, bywa zastąpiony przez czterowarstwowy model TCP/IP, który w sposób bardziej czytelny opisuje funkcje poszczególnych warstw. Niżej pokazano porównanie modeli

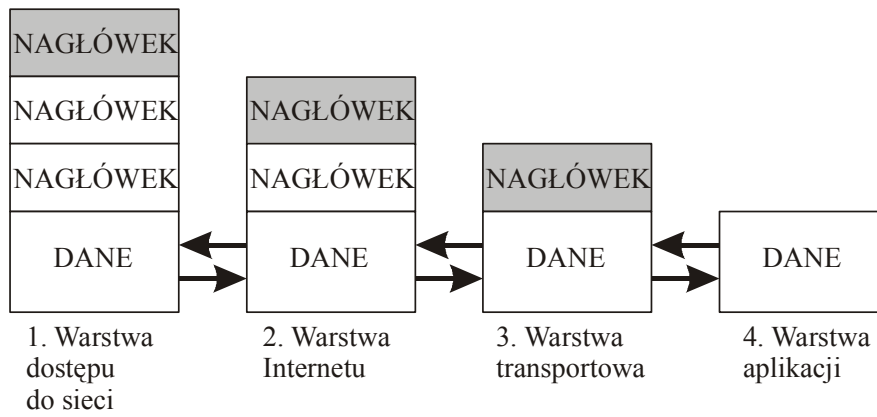
ISO/OSI oraz TCP/IP oraz obszary nakładania się warstw, jak również najczęściej stosowane protokoły obsługi poszczególnych warstw.

Tabela W.4 [1] Porównanie modeli ISO/OSI oraz TCP/IP oraz obszary nakładania się warstw

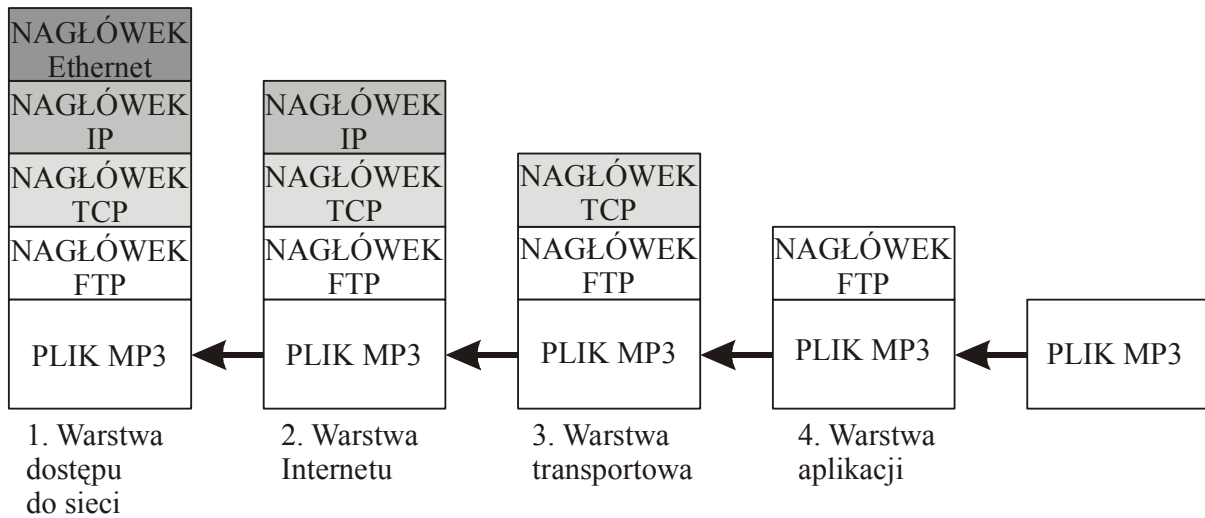
Model ISO/OSI	Model TCP/IP	Przykładowe protokoły		
Warstwa aplikacji	Warstwa aplikacji	Telnet, SSH,	DNS	
Warstwa prezentacji		FTP, SMTP,HTTP POP, IMAP	SNMP	
Warstwa sesji			Syslog	
Warstwa transportowa	Warstwa transportowa	TCP	UDP	
Warstwa sieciowa	Warstwa internetu	IP		ICM
Warstwa łącza danych	Warstwa dostępu do sieci	ARP, RARP	PPP	
Warstwa sprzętowa		IEEE 802.3	SLIP	

Według modelu TCP/IP w wykładach Techniki światłowodowe omówimy warstwę dostępu do sieci w jej dwóch aspektach: fizycznej warstwy dostępu do sieci koncentrując się na jednym z możliwych, obok kabla koncentrycznego i skrętki, nośnikach informacji – światłowodach. Omówimy fizyczne zjawiska zachodzące w światłowodach, zjawiska towarzyszące propagacji światła, takie jak tłumienie i dyspersja. Następnie powiemy o sposobach łączenia światłowodów w sieci światłowodowe. Przy tej okazji powiemy również o warstwie dostępu do sieci, ale w aspekcie protokołów używanych w sieciach światłowodowych, takich jak Ethernet, FDDI, Token Ring.

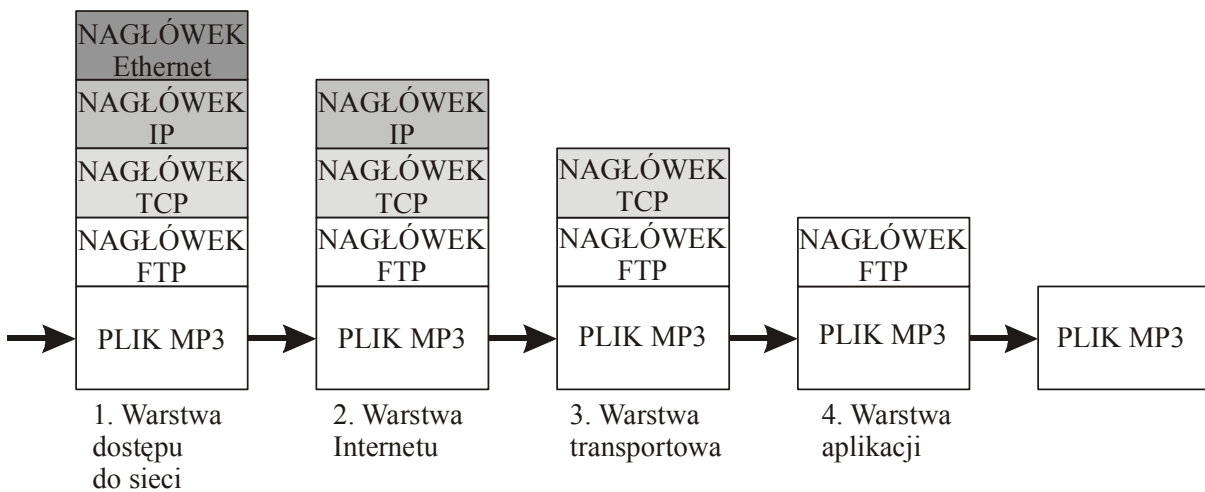
Aby zrozumieć proces komunikacji między warstwami, wykorzystajmy obrazowy sposób przedstawiony w pracy [1].



Rys. W. 3 Ilustracja procesu komunikacji między warstwami



Rys. W.4 Ilustracja procesu transmisji pliku za pomocą protokołu FTP [1]



Rys. W.5 Ilustracja procesu transmisji pliku za pomocą protokołu FTP [1]

Na koniec wstępu należy wymienić organizacje międzynarodowe ustanawiające standardy sieci komputerowych. W globalnym świecie standardy komunikacji są nieodzownym



elementem rozwoju, porządkowania i modyfikacji sieci telekomunikacyjnych i komputerowych.

- **ANSI**

Amerykański Narodowy Instytut Normalizacji (ang. ANSI - The American National Standards Institute) jest prywatną organizacją nie komercyjną. Organizacja ta nie wdraża aktywnie ani nie narzuca nikomu swoich standardów. Jej zadaniem jest ułatwianie rozwoju, koordynacji oraz publikowanie nie obligatoryjnych standardów. Instytut uczestniczy natomiast w pracach innych organizacji ustanawiających standardy globalne, takich jak ISO, IEEE itp.

- **IEEE**

Instytut Inżynierów Elektryków i Elektroników (ang. IEEE - The Institute of Electrical and Electronics Engineers) definiuje i publikuje standardy telekomunikacyjne i informatyczne przesyłania danych. Celem IEEE jest tworzenie norm, które byłyby akceptowane przez większość instytucji zajmujących się tymi zagadnieniami, a w szczególności instytut ANSI. Akceptacja taka zwiększa zakres ich oddziaływania dzięki uczestnictwu ANSI w globalnych organizacjach określających standardy. Największym osiągnięciem IEEE jest zdefiniowanie standardów LAN oraz MAN. Standardy te tworzą zbiór norm technicznych, ogólnie określanych jako "Projekt 802" lub jako seria standardów IEEE 802. W roku 1985 Instytut ustanowił standard IEEE 802.3 będący podstawą działania Ethernetu.

- **ISO**

Międzynarodowa Agencja Normalizacyjna (ang. ISO - International Organization for Standardization) została utworzona w 1946 roku w Szwajcarii, w Genewie. Zakres jej działania obejmuje praktycznie wszystkie dziedziny określania standardów międzynarodowych.. Aktualnie ISO składa się z ponad 140 narodowych organizacji standaryzacyjnych. Należy do niej również Polski Komitet Normalizacyjny. Najważniejszym standardem opracowanym przez ISO jest Model Łączenia Systemów Otwartych, czyli model ISO/OSI.

- **IETF**

IETF (Internet Engineering Task Force) jest organizacją regulującą rozwój technologii internetowych. Standardami tej organizacji są dokumenty RFC (ang. Request for Comments) zawierające standardy dotyczące Internetu.

- IEC

Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (ang. IEC - International Electrotechnical Commission) została założona w 1909 roku. Komisja IEC przygotowuje i publikuje międzynarodowe standardy dotyczące zagadnień elektrycznych i elektronicznych. W Stanach Zjednoczonych Instytut ANSI reprezentuje zarówno IEC, jak i ISO. W celu zwiększenia efektywności działania w zakresie technologii informatycznych stanowiących obszar ząębiana się kompetencji wielu organizacji IEC i ISO utworzyły Połączony Komitet Techniczny (ang. JTC - Join Technical Committee).

- IAB

IAB (Internet Architecture Board ) jest Komitetem IETF (ang. Internet Engineering Task Force) i ciałem doradczym Towarzystwa Internetowego ISOC (ang. Internet Society). Jest odpowiedzialna za działalność IETF oraz procesy ustalania standardów internetowych. Wybiera także edytora dokumentów RFC.

Zanim omówimy technologię opartą na kablu światłowodowym, przedstawmy technologie oparte na różnych fizycznych nośnikach informacji, czyli nośnikach takich jak:

- kable miedziane,
- bezprzewodowe nośniki:
  - fale radiowe
  - mikrofae
  - podczerwień
- światłowody

Zanim omówimy technologię opartą na kablu światłowodowym, przedstawmy w dużym skrócie technologie kabla miedzianego, które powoli przechodzą do historii, czyli technologie kabla koncentrycznego i skrętki.

Kabel koncentryczny (BNC), często nazywany "koncentrykiem", składa się z dwóch koncentrycznych (czyli współosiowych) przewodów. Najczęściej spotykany rodzaj kabla koncentrycznego składa się z pojedynczego przewodu miedzianego otoczonego materiałem

izolacyjnym. Izolator jest otoczony innym cylindrycznym przewodnikiem, którym może być przewód lity lub pleciony, otoczony następną warstwą izolacyjną. Całość osłonięta jest koszulką ochronną z polichlorku winylu (PCW) lub teflonu. Kabel koncentryczny jest najczęściej określany przez numer specyfikujący rozpoczynający się od liter RG. Kable o różnych numerach RG charakteryzują się różnymi własnościami fizycznymi i elektrycznymi, co oznacza, że kabel wykorzystywany przez jeden rodzaj sieci nie może współpracować z innym. Kabel koncentryczny jest wykorzystywany do łączenia komputerów szeregowo bez potrzeby stosowania żadnych dodatkowych urządzeń. Najczęściej używane są dwa rodzaje kabli koncentrycznych znanych pod popularną nazwą jako cienki koncentryk lub gruby koncentryk.

Cienki koncentryk (tzw. cienki Ethernet, ang. Thin Ethernet) składa się z pojedynczego, centralnego przewodu miedzianego, otoczonego warstwą izolacyjną. Jest to kabel ekranowany, a więc odporny na zakłócenia. W celu ochrony przesyłanych informacji przed wpływem pól elektromagnetycznych jako ekran stosuje się cienką siatkę miedzianą. Maksymalna długość jednego segmentu sieci realizowanej na cienkim koncentryku wynosi 185 metrów. Nie jest to odległość między poszczególnymi komputerami, lecz pomiędzy jednym a drugim końcem sieci. Ten typ kabla może być wykorzystywany w sieciach o przepustowości do 10Mb/s. Rysunek W.6 przedstawia cienki koncentryk.



Rys. W.6 Cienki koncentryk

Gruby koncentryk (tzw. gruby Ethernet, (ang. Thick Ethernet)) jest najczęściej żółtego lub pomarańczowego koloru. Gruby Ethernet składa się z pojedynczego, centralnego przewodu otoczonego warstwą izolacyjną, a następnie ekranującą siateczką oraz zewnętrzną izolacją. Maksymalna długość jednego segmentu sieci realizowanej na grubym koncentryku wynosi 500 metrów. Ten typ kabla może być wykorzystywany w sieciach o przepustowości do 10Mb/s. Rysunek W.7 przedstawia grubo koncentryk.



## Rys. W.7 Gruby koncentryk

Technologia oparta na kablu koncentrycznym przechodzi do historii ze względu na liczne jego wady, z których największe to:

- mała przepustowość (do 10 Mb/s),
- problemy z rozbudową sieci i dołączeniem nowych komputerów,
- mało odporny na poważne awarie, przerwanie kabla powoduje unieruchomienie całej domeny kolizji,
- niewygodny sposób instalacji (grube, nieelastyczne kable, duże łączki, terminatory, łączki T.

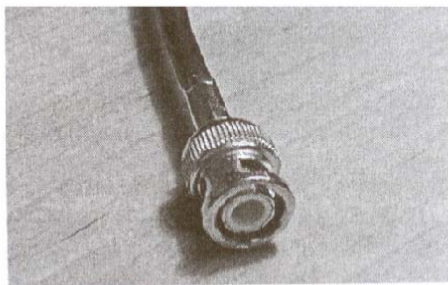
Do jego zalet można zaliczyć natomiast:

- cena niższa niż ekranowana skrętka,
- stosunkowo niewielka wrażliwość na zakłócenia i szумы elektromagnetyczne. ze względu na ekranizację.

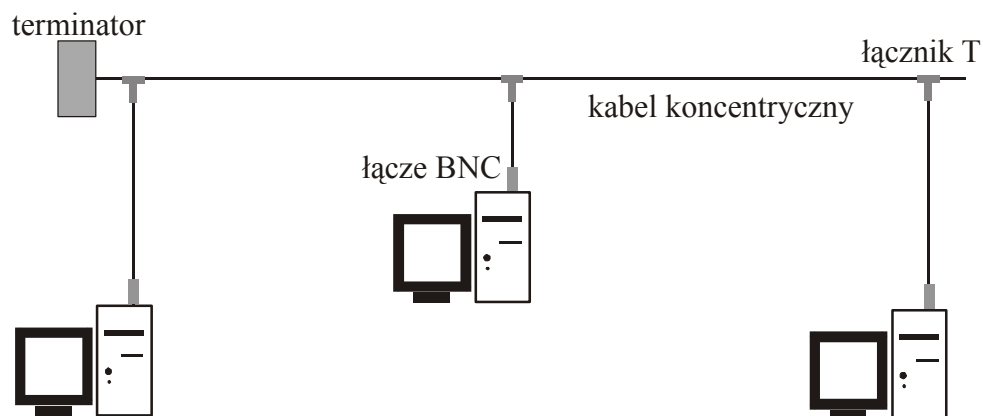
Technologia kabla koncentrycznego wykorzystywana jest w dwóch standardach:

- Ethernet gruby –10Base-5 (ang. Thick Ethernet). Kabel oznaczony jest symbolem RG-8 oraz RG-11 i charakteryzuje się impedancją falową  $50 \Omega$  i grubością  $1/2''$ . Maksymalna odległość między stacjami wynosi 500 m.
- Ethernet cienki –10Base-2 (ang. Thin Ethernet). Kabel oznaczony jest symbolem RG-58 i charakteryzuje się impedancją falową  $50 \Omega$  i grubością  $1/4''$ . Maksymalna odległość między stacjami wynosi 185 m.

W technologii 10Base-2 kolejne odcinki są łączone za pomocą końcówek BNC (Rys.W.8) w topologii magistrali (Rys.W.9) W łączeniu kabli koncentrycznych używa się również takich elementów jak łączniki T (Rys.W.10)

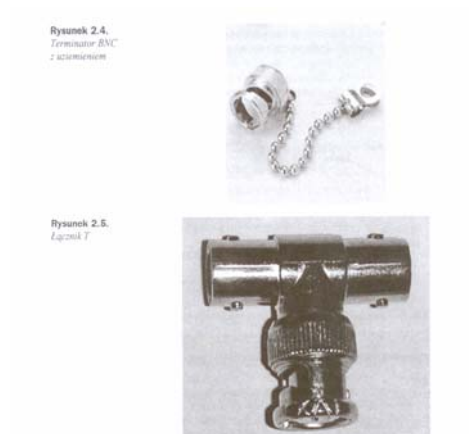


Rys. W.8 Końcówka typu BNC



Rys. W.9 Konfiguracja łączenia komputerów w technologii 10Base-2

Kabel koncentryczny powinien być zakończony terminatorem (Rys.W.10) o rezystancji  $50 \Omega$  dostosowanej do impedancji falowej kabli, z czego jeden z nich powinien być uziemiony (najczęściej połączony łańcuszkiem do obudowy komputera).



Rys. W.10 a) Terminator, b) Łącznik typu T

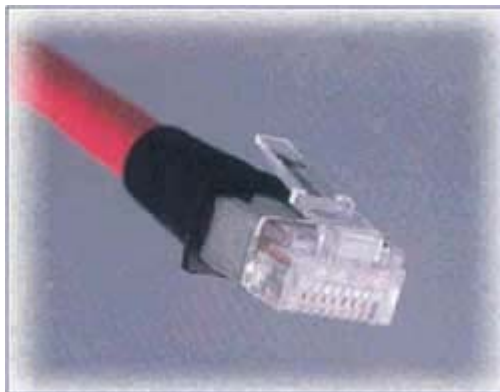
Obecnie najczęściej używanym medium transmisyjnym opartym na technologii kabla miedzianego jest niekranowany, dwuparowy kabel skręcany zwany skrętką UTP (*Unshielded Twisted-Pair cable*). Skrętka UTP składa się z ośmiu przewodów skręconych po dwa (czterech par), umieszczonych we wspólnej izolacji. Kable są wspólnie skręcane, aby zmniejszyć oddziaływanie elektromagnetyczne par przewodów na siebie. Skręcone pod różnymi kątami kable zmniejszają powierzchnię pętli pola magnetycznego utworzonej przez obwód, czyli minimalizują oddziaływanie elektromagnetyczne w sąsiadujących kablach. Zastosowanie skrętki UPT opiera się na standardzie amerykańskim EIA/TIA (ang. Electronic Industries Association/ Telecommunications Industry Association) opracowanym w 1991 dla kabli klasy 1,2,3,4,5 oraz na normie ISO ISI 11801 ustanowionej w 1995 dla kabli klasy A, B,C,D. Gdy skrętka jest wykorzystywana w środowisku o dużych zakłóceniach elektromagnetycznych stosowany jest kabel ekranowany STP (ang. Shielded Twisted Pair). Zbudowany jest on z czterech skręconych par przewodów miedzianych, otoczonych siatką lub folią i umieszczonych w izolacyjnej osłonie.



Rys. W.11 Skrętka UTP, napis na obudowie określa kategorię kabla.

Skrętkę przyłącza się do karty sieciowej za pomocą złącza RJ-45 (Rys. W.12). Skrętka stosowana jest przede wszystkim w sieciach o topologii gwiazdy, gdzie uszkodzenie jednego

połączenia nie wpływa na pracę całej sieci. Instalacja okablowania skrętkowego jest bardzo prosta dzięki zastosowaniu połączeń zaciskowych. Mimo, iż skrętka jest najtańszym kablem wymaga dodatkowych urządzeń, tzw. hubów, do których przyłączone są wszystkie stacje robocze.



Rys. W.12 Złącze RJ-45

Przepustowość skrętki zależna jest od tzw. kategorii. Rozróżniamy następujące kategorie:

- kategoria 1 jest wykorzystywana jako kabel telefoniczny
- kategoria 2 jest przeznaczona jest do transmisji danych z szybkością 4 Mb/s
- kategoria 3 jest przeznaczona do transmisji o przepustowości do 10 Mb/s
- kategoria 4 jest przeznaczona do transmisji o przepustowości 16 Mb/s
- kategoria 5 jest przeznaczona do transmisji o przepustowości ponad 100 Mb/s - ten typ skrętki ma zastosowanie w szybkich sieciach np. Fast Ethernet
- kategorii jest przeznaczona do transmisji o przepustowości do 622 Mb/s i wykorzystywany jest w sieciach ATM.

Niżej przedstawiono kategorie kabli zdefiniowane przez EIA/TIA.

Tabela. W.5 [1] Kategorie kabli wyznaczonych przez standardy EIA/TIA

CAT 1 – kategoria 1	nieekranowana skrętka telefoniczna, stosowana do transmisji głosu, nie ma możliwości transmisji danych
CAT 2 - kategoria 2	nieekranowana skrętka umożliwiająca transmisję głosu i danych (modem) z częstotliwością do 4 MHz, kabel składa się z dwóch par skręconych przewodów

CAT 3 - kategoria 3	skrętka umożliwiająca transmisję o szybkości do 10 MHz, spotykana w starszych instalacjach sieci Ethernet 10Base-T, kabel składa się z czterech par skręconych ze sobą przewodów
CAT 4 - kategoria 4 klasa C	skrętka umożliwiająca transmisję o szybkości do 16MHz, kabel składa się z czterech par skręconych ze sobą przewodów
CAT 5 - kategoria 5 klasa D	skrętka umożliwiająca transmisję o szybkości do 100MHz, ze względu na zminimalizowanie indukcyjności wzajemnej przewodów, każda para ma skręt o innym skoku. Impedancja falowa skrętki CAT 5 wynosi $100 \Omega$
CAT 5e – kategoria 5 poszerzona klasa D+	skrętka umożliwia transmisję o szybkości do 100 MHz, kategoria ta została opisana w dodatku TIA/EIA 568-A-5, zastrzono dla niej wymagania oraz wprowadzono dwa dodatkowe parametry (poziom sygnału echa i przesłuch zbliżony), które musi spełniać kabel, aby zagwarantować poprawną transmisję o szybkości 1 Gb/s
CAT 6 - kategoria 6	skrętka umożliwiająca transmisję o szybkości do 250 MHz, kategoria ta została opisana w dodatku TIA/EIA 568-B.2-1 (międzynarodowa norma ISO/IEC 11801.2 – klasa E)
CAT - kategoria 7	skrętka umożliwiająca transmisję o szybkości do 600 MHz, kategoria ta została opisana w dodatku TIA/EIA-B.2-1 (międzynarodowa norma ISO/IEC 11801.2 – klasa F). Można używać jedynie wersji STP (ang. Shielded Twisted Pair) skrętki z każdą parą indywidualnie ekranowaną folią aluminiową

W aktualnie instalowanych sieciach zalecane jest stosowanie kabla kategorii 5e lub wyższej, gdyż tylko one gwarantują poprawną pracę Ethernetu gigabitowego. Istniejące okablowanie klasy 5 w większości przypadków spełnia wymagania CAT-5e, dzięki czemu możliwe jest bezproblemowe dostosowanie sieci do technologii 1000Base-T. Aby upewnić się, czy nasza sieć oparta na niższej kategorii będzie mogła być wykorzystana w technologii 1000Base-T, najczęściej musimy zapłacić specjalistycznej firmie zajmującej się instalatorstwem sieciowym za usługę sprawdzenia sieci pod względem zgodności z kategorią 5e, bowiem urządzenia testujące są drogie i nie stanowią typowego wyposażenia administratora sieci.

Zalety skrętki CAT5e są następujące:



- duża przepustowość, do 1000 Gb/s,
- niska cena,
- łatwa instalacja i diagnozowanie uszkodzeń,
- odporna na poważne awarie,
- akceptowana przez wiele rodzajów sieci.

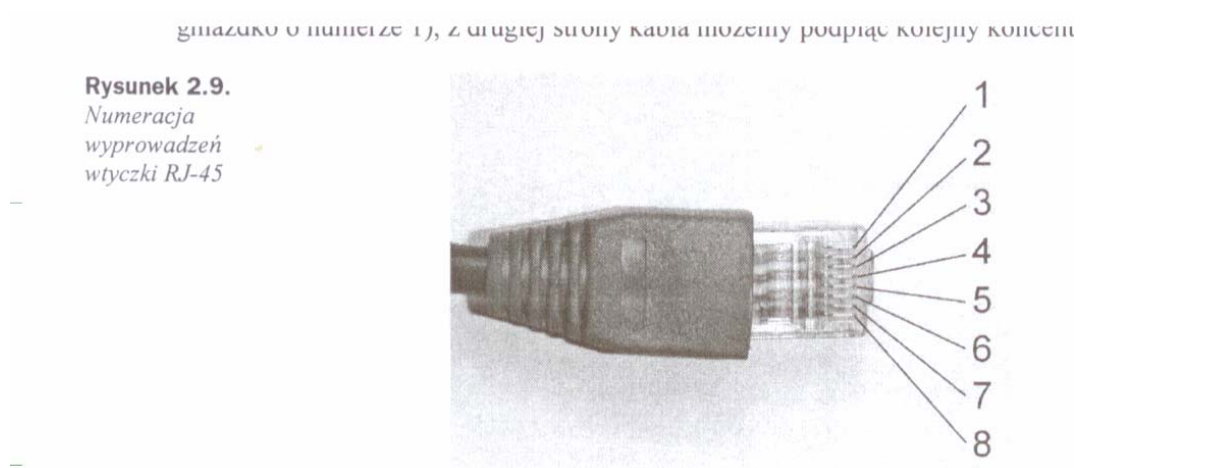
Wady skrętki CAT5e są następujące:

- niewielka odporność na zakłócenia elektromagnetyczne, ponieważ skrętka UTP jest nieekranowana,
- niewielka odporność na uszkodzenia mechaniczne, konieczne jest instalowanie listw naściennych,
- długość odcinka kabla jest mniejsza niż w innych mediach transmisji i sięga zaledwie 100 m.

W instalacjach z zastosowaniem skrętki stosuje się dwa typy końcówek :

- RJ-11 – sześciopozycyjny łącznik modularny (łącznik telefoniczny)
- RJ-45- ośmiopozycyjny łącznik modularny (sieć Ethernet) (Rys.W.12)

Wtyczki RJ-45 mają ponumerowane wyprowadzenia (Rys.W.13), każde wyprowadzenie oznaczone odpowiednim kolorem, odpowiadające równym przeznaczeniom, takim jak transmisja (+), transmisja (-), odbiór (+), odbiór(-), niektóre są nie używane.



Rys. W.13 Numeracja wyprowadzeń wtyczki RJ-45 [1]

Po omówieniu standardów transmisji opartej na kablu miedzianym przedstawimy standardy transmisji światłowodowej, które będziemy omawiać w tej książce w rozdziale 8.

Z punktu widzenia transmisji światłowodowej najważniejsze standardy to:

- 10Base-FL - transmisja 10 Mb/s, rzadko spotykany,
- 100Base-FX- transmisja 100 Mb/s,
- 1000Base-LX – transmisja 1000 Mb/s, laser długofalowy emitujący promieniowanie o długości fali 1300 nm,
- 1000Base-SX – transmisja 1000 Mb/s, laser krótkofalowy emitujący promieniowanie o długości fali 850 nm,

## Literatura

1. K. Krysiak, Sieci komputerowe, Helion, 2003