

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA · MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

4 ÷ 6 (257 ÷ 259)

1988

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 28

WARSZAWA 1988

NR 4-6/257-259/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Bezzosowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - dr inż. Krystyna Płowko
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Stanisław Sołta

Redaktorzy działów:

doc. dr inż. Alina Karwowska-Lamparska
mgr inż. Mirosław Żurawski

Adres Redakcji:

Instytut Łączności
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej
Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr Krystyna Juszkiewicz
Montaż tekstu: techn. Grażyna Woźnica

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 1988.09.01.
Druk ukończono w czerwcu 1988 r.

Ryszard Romaniuk

ŚWIATŁOWODOWA TELEKOMUNIKACJA PODMORSKA

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Światłowody dla kabli podmorskich	7
3. Podmorskie kable światłowodowe	15
4. Podmorskie kable mufy przelotowe i rozdziel- oza	25
5. Układka i reperacja podmorskich kabli światło- wodowych	30
6. Podmorskie stacje regeneracyjne	35
7. Odbiornik optoelektroniczny	42
7.1. Budowa odbiornika	42
7.2. Wzmacniacz korektor z regulowanym wzmo- żeniem	45
7.3. Układ odtwarzania sygnału zegara	46
7.4. Moduł decyzyjny	48
8. Nadajnik optoelektroniczny	49
8.1. Budowa zespołu układów nadawczych	49
8.2. Lasery półprzewodnikowe	50
8.3. Moduł nadawczy	54
8.4. Multipleksery światłowodowe	55
9. Pozostałe układy podmorskiego światłowodowego systemu teletransmisyjnego	57
9.1. Układy nadzoru i zabezpieczenia pracy pod- morskiej optoelektronicznej stacji regene- ratorowej	57
9.2. Układy zasilania podmorskiej stacji regene- ratorowej	59
9.3. Obudowa podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneracyjnej	60
9.4. Stacje końcowe traktu kablowego	62

	Str.
10. Podstawowe kierunki rozwoju światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich i absolutne ograniczenia transmisji światłowodowej	64
11. Rozwój światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich w poszczególnych krajach /lata 1985-1990/	67
12. Światłowodowe systemy transoceaniczne i o zasięgu ogólnoswiatowym	75
12.1. Przewidywania na lata 1988-1995	75
12.2. Światłowodowe systemy teletransmisyjne planowane w basenie Oceanu Atlantyckiego	77
13. Światłowodowe systemy teletransmisyjne planowane w basenie Oceanu Spokojnego	85
14. Pozostałe systemy o zasięgu ogólnoswiatowym	91
14.1. Systemy teletransmisyjne planowane w basenie Morza Śródziemnego i Oceanu Indyjskiego	91
14.2. Systemy światłowodowe o zasięgu ogólnoswiatowym	94
15. Telokomunikacja światłowodowa a satelitarna	94
Wykaz literatury	99

ŚWIATŁOWODOWA TELEKOMUNIKACJA PODMORSKA

1. WPROWADZENIE

Pierwsze dziesięciolecie rozwoju światłowodowej telekomunikacji podmorskiej stanowi zamknięty etap, w czasie którego ta nowa technika rozwinęła się od pierwszych w skali światowej doświadczeń laboratoryjnych do wysokiego stadium zaawansowania technicznego [44, 45]. Umownie wyznaczony tutaj etap wstępnego rozwoju zakończył się dwoma znamienymi faktami [15]. Pierwszy z nich to oddanie w 1985 r. pierwszych podmorskich światłowodowych systemów użytkowych o parametrach transmisyjnych lepszych od systemów klasycznych. Drugi natomiast to określenie w wyniku szerokiej badań w ośrodkowych laboratoriach absolutnych ograniczeń światłowodowej telekomunikacji podmorskiej i opracowanie umownych generacji systemów wraz z przewidywanym horyzontem czasowym ich praktycznego wprowadzania. Wyniki pierwszego etapu prac podsumowała na początku 1986 r. w Paryżu konferencja światłowodowej telekomunikacji podmorskiej [23].

Podział oraz podstawowe dane tych przewidywanych generacji systemów zestawiono w tabeli 1. Przedstawione w tabeli dane będą podstawą do dalszych rozważań technicznych.

W praktyce pierwsze podstawy rozwoju światłowodowej komunikacji podmorskiej powstały pod koniec lat siedemdziesiątych wraz z uzyskaniem dojrzałości technicznej przez jednorodowe telotransmisyjne systemy lądowe. Od 1976 roku rozpoczęto intensywne prace nad podmorskimi zastosowaniami techniki światłowodowej w dwóch państwach: Japonii i USA. Wówczas to kabel światłowodowy był prawdopodobnie po raz pierwszy zanurzony do wody na większą głębokość /ponad 100 m/ i wykonywano pierwsze eksperymenty transmisyjne na odległość kilku kilometrów [3, 4].

Przewidywane generacje światłowodowych podmoriskich systemów teletransmisyjnych i ich podstawowe parametry [16, 23, 24]

Umowna nazwa i numer generacji systemu	Długość fali pracy w [nm]	Rodzaj światłowodu	Rodzaj kabla światłowodowego	Objętość magazynu generatorkowa w [km]	Liczba stacji regeneracyjnych	Skalność transmisji informacyjnej [bit/s]	Rodzaj systemu teletransmisyjnego	Okres badań i eksploatacji systemu	Uwagi
Wielomodowa /0/	0,85 1,3 1,5	wielomodowy gradientowy optymalizowany dyspersyjnie	duża liczba światłowodów do kilkunastu światłowodów zbrojony	5-30	łądowe	32	lokalny przybrany	1978-1988	krótka linia bezzmenialkowa, mała szybkość przepływu informacji
Jednomodowa /1/	1,3	jednomodowy optymalizowany	polimorfa z kilkoma zbrojeniami wzdłużnymi światłowodów	50-80	podmorskie	280, 560	pełnomorski z zbrojeniami wzdłużnymi	1980-1991	już obecnie przestarzały
Przebieg /2/	1,3 1,5	jednomodowy line przesyłowy dyspersyjnie optymalizowany	polimorfa z par światłowodów zbrojenie wzdłużne	100-100	podmorskie i lądowe	560, 1200, 2400	lokalny bezzbrojeniowy, transmisyjny z zbrojeniami	1985-2000	ograniczenie absolutnie bezstratny światłowodowy typu SiO ₂ F
Przebieg /3/	1,30 1,55	np. optykono-wielomodowy jednomodowy zbrojeniowy optymalizowany dyspersyjnie	3-6 par światłowodów zbrojenie wzdłużne	1000	wyłącznie lądowe	1200, 2400, 4800	wielomodalny transmisyjny z zbrojeniami wzdłużnymi	po 1995	chociaż ograniczenie absolutnie bezstratny światłowodowy i badania sprawnych laserów w przemyśle i komunikacji ze względu na szybkość przetwarzania wzdłużnych światłowodów VLSI

Do prowadzenia intensywnych prac w dziedzinie światłowodowej telekomunikacji podmorskiej zmusił Japonię charakter kraju: stosunkowo duża liczba niewielkich wysp rozrzuconych na nieszyt rozległym terenie morskim. Do czasu rozwinięcia techniki światłowodowej do poziomu dojrzałości technologicznej Japonia posiadała bardzo rozwinięty system podmorskiej telekomunikacji kablowej. Systemy teletransmisyjne budowane do 1976 r. z zastosowaniem kabli współosiowych miały długość 3,5 tys. km. Mimo tego, już w 1976 r. rozpoczęto w Japonii intensywne badania nad światłowodowymi podmorskimi systemami teletransmisyjnymi.

Od 1978 roku prace nad systemami światłowodowej telekomunikacji podmorskiej są prowadzone w znacznie szerszym zakresie [3, 4] i w sposób systematyczny w czterech krajach: Francji [20], Wielkiej Brytanii [2], Japonii [8] i USA [5]. Od tego czasu ta niezwykle interesująca dyscyplina optoelektroniki światłowodowej rozwija się niezwykle dynamicznie, ze względu na istnienie potencjalnych wielkich rynków zbytu dla tego typu systemów [5, 14, 35]. Technologia ta wzbudza największe zainteresowanie w państwach wyspiarskich i o długiej linii brzegowej.

Po roku 1982 do wymienionych czterech państw dołączyła grupa następujących, włączając się w rozwój światłowodowych systemów podmorskich. Należy tutaj wymienić: Włochy [10], Danię [26, 30], Hiszpanię [23], Brazylię [10] i Norwegię.

Ze względu na stosunkowo wysokie koszty prowadzenia badań, budowy i instalacji telekomunikacyjnych systemów podmorskich w prace nad tym zagadnieniem włączały się początkowo jedynie laboratoria optoelektroniczne największych światowych firm przemysłu telekomunikacyjnego i kablowego. Wśród tych firm można wymieniać: Italcable, CIT-Alcatel - - Centrum Telekomunikacji Światłowodowej z Francji, Les Cables de Lyon, American Telephone and Telegraph /ATT/ z USA, British Telecom International /BTI/, Standard Telephone and Cables /STC/ z Anglii, Kokusai Denshin Denwa /KDD/ z Japonii, Ocean Cable Corporation /OCC/ z Japonii, Nippon Tele-

phone and Telegraph /NIT/, Submarcom i Centre National d'Études des Télécommunications /CNST/ z Francji, British Telecom Research Laboratories /BTRL/ z Wielkiej Brytanii, Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni /CSELT/ z Włoch, Compania Telefonica Nacional de España /CTNE/. Powstały także nowe duże przedsiębiorstwa badawczo-przemysłowe o charakterze prywatnym, jak np.: Lightwave Submarine Systems Inc. w USA i inne, których celem były prace nad rozwojem dalekosiężnych systemów podmorskich i inwestowanie tej dziedziny.

Zupełnie innego rodzaju kable są potrzebne dla wód głębokich i spokojnych, a inne dla płytkich czy przybrzożnych. Wody płytkie charakteryzują się na ogół mniejszą stabilnością dna, co wynika zarówno z działania prądów wodnych na szelfach kontynentalnych, jak i możliwości wpływu ruchu statków. Przewidywano już wówczas, że układanie światłowodowych kabli podmorskich będzie konieczne w portach, w poprzek często uczęszczanych szlaków wodnych, w okolicach często penetrowanych łowisk rybackich itp. Kabel pracujący w takich warunkach musi być zabezpieczony przed poderwaniem do góry przez silny prąd wody, drganiem indukowanymi ruchem statków oraz zahaczeniem kotwicą czy sprzętem rybackim. Najczęściej wymaga się wówczas aby kabel był zakopany w dnie morskim lub gdy nie jest to możliwe - kotwiony w miejscach o największym zagrożeniu do dna morskiego.

Określono ponadto w sposób systematyczny wymagania na warunki środowiskowe na dnie morskim. W warunkach technicznych układania światłowodowych kabli podmorskich uwzględnia się:

- stopień skalistości dna;
- maksymalne dopuszczalne nachylenie dna;
- stabilność geologiczną dna morskiego.

Opracowanie prototypu autonomicznej podmorskiej stacji regeneratorskiej wymagało rozwiązania takich problemów, jak: zasilanie podmorskie w energię elektryczną stacji optoelektronicznej, zużycie energii elektrycznej przez stację określającą całkowitą efektywność jej pracy, odprowadzanie cie-

plą za szczelnej obudowy podmorskiej, odporność urządzenia na udary mechaniczne i wysokie ciśnienie wody, niezawodność określona przez czas życia i średni czas pomiędzy awariami, sposób nadzoru pracy i zdalna diagnostyka stacji regeneracyjnej. Na techniczne rozwiązanie tych zagadnień miało do dyspozycji ściśle określoną przestrzeń, ograniczoną do wymiarów typowej kablowej mufy podmorskiej. W przypadku pracy z kablami światłowodowymi, mufa ta musi zawierać, oprócz układów elektronicznych i optoelektronicznych, również dwie komory złączek światłowodowych i części sprzęgające mufę z kablem. Wyjściowym wymaganiem technicznym na podmorską optoelektroniczną stację regeneracyjną był warunek, aby nie miała ona parametrów gorszych od stacji klasycznych, a w szczególności aby nie zużywała znacznie większej mocy elektrycznej i nie wymagała zastosowania znacznie większej obudowy podmorskiej.

W roku 1979 ukazało się pierwsze w literaturze fachowej porównanie światłowodowych systemów dalekosiężnych z systemami telekomunikacji satelitarnej [3]. Później ten nurt dyskusyjny porównujący w różny sposób oba systemy, nawet czasami wręcz agresywny z obu stron, został znacznie rozszerzony [7, 14]. Prowadzony jest zresztą do dziś i ostatnio zaowocował w organizacji dużej międzynarodowej konferencji telekomunikacji światłowodowej oraz satelitarnej Fibrosat, w czasie której w wręczny sposób połączono oba tematy [24]. Bardzo dużą rangę naukową i polityczną tej konferencji podkreśla fakt zorganizowania jej w czasie światowej wystawy EXPO'86 w Vancouver w Kanadzie.

Rok 1980 stanowił dla światłowodowej telekomunikacji podmorskiej ważny przełom i to nie tylko ze względu na liczne w tym czasie eksperymenty techniczne. Po raz pierwszy w tym roku, w firmie ATT, opracowano i opublikowano bardzo szczegółowy plan budowy dalekosiężnego systemu transoceanicznego w basenie Oceanu Atlantyckiego. Zgodnie z tradycją, związaną z poprzednimi liniami kablowymi, projektowanemu systemowi nadano nazwę TAT-3 /ósmą kablową linią transatlantycką/.

Plan przewidywał budowę linii zgodnie z założeniami pierwszej generacji systemów oraz oddanie jej do użytku w połowie 1988 r.

Ta ważna decyzja światowego potentata przemysłowo-badawczego w zakresie telekomunikacji uczyniła lata 1980-88 okresem intensywnych przygotowań dla ważnej próby nowej technologii. W tamtym czasie sceptycyzm odnośnie budowy światłowodowych systemów transoceanicznych był w innych krajach na tyle duży, że następne decyzje dotyczące współpracy międzynarodowej przy budowie kolejnych systemów transoceanicznych zaczęto podejmować w pewnym pośpiechu dopiero w 1985 r. [20, 27, 28]. Po wieloletnich badaniach technicznych i ekonomicznych w 1985 r. stało się zupełnie pewne, że Ziemia zostanie dosłownie opasana dziesiątkami systemów transoceanicznych łączących wszystkie kontynenty. Podpisano wówczas wiele umów dotyczących budowy następnych systemów w basenach Oceanu Atlantyckiego, Oceanu Spokojnego, Morza Śródziemnego i Oceanu Indyjskiego z horyzontem czasowym ich realizacji do roku 2000.

Po ogłoszeniu przez firmę ATT planów budowy systemu transatlantyckiego z USA do Wielkiej Brytanii i Francji, kraje te podjęły znaczne inwestycje nad dalszym rozwojem u siebie prototypów odpowiednich części składowych systemów. W tym samym czasie Japonia rozpoczęła przygotowania do ukladki podmorskiego kabla światłowodowego rozciągającego się wzdłuż osi długiej Wysp Japońskich.

W latach 1983-1984 wymienione państwa przeprowadziły eksperymentalne przybrzeżne bądź pełnomorskie badania swoich prototypów światłowodowych systemów dalekosiężnych:

Francja - S280,
 Anglia - NL2,
 Japonia - OS280,
 USA - SL280.

Dane dotyczące tych eksperymentów transmisyjnych zostały opublikowane w specjalnym tematycznym wydaniu dwóch najpo-

ważniejszych czasopiśmie traktujących o telekomunikacji, a mianowicie: IEEE J. on Selected Areas in Telecommunication oraz IEEE J. Lightwave Technology [15, 16].

2. ŚWIATŁOWODY DLA KABLI PODMORSKICH

Warunki fizyczne występujące w środowisku podmorskim nakładają odpowiednie wymagania techniczne na konstrukcję podmorskich kabli światłowodowych. Jednym z istotnych wymagań technicznych na stosowane w nich światłowody jest ich zwiększona odporność na oddziaływanie wody, jonów hydroksylowych oraz wolnego wodoru gazowego [33]. Podstawowe wymagania techniczne na światłowody dla kabli podmorskich wynikają obecnie z dwóch grup zagadnień - ekonomicznych i niezawodnościowych [7, 15].

Tak więc, na przykład, podstawowym wymaganiem jest, żeby dla określonej długości fali transmisji światłowody miały jak najmniejszą jednostkową stratę optyczną i małą dyspersję.

W pasmie $1,3 \mu\text{m}$ minimalne uzyskane straty są w granicach $0,28-0,29 \text{ dB/km}$, a w pasmie $1,55 \mu\text{m}$ wynoszą $0,12-0,14 \text{ dB/km}$ [36]. Ustalono ostatecznie wymagania CCITT dotyczące tłumienia światłowodów dla kabli podmorskich, a mianowicie: $0,45 \text{ dB/km}$ dla $1,3 \mu\text{m}$ i $0,25 \text{ dB/km}$ dla $1,55 \mu\text{m}$ [23]. Wartości te są określone jako średnie tłumienie długiego odcinka światłowodu między regeneratorami, łącznie ze spawanymi lub klejonymi złączkami. Ze względu na znaczny postęp w technologii światłowodów niskostratnych wymagania te będą musiały być prawdopodobnie zweryfikowane.

Optymalizacja polega na takim zaprojektowaniu profilu refrakcyjnego światłowodu i wymiarów poszczególnych fragmentów wielopromieniowego rozdziału, aby zerową wartość dyspersji uzyskać w szerszym pasmie w okolicy pożądanej długości fali transmisyjnej, gdzie występuje minimum tłumienia. Niestety w takim światłowodzie optymalizowanym dyspersyjnie dla pasma $1,55 \mu\text{m}$ mogą wzrosnąć jego tzw. straty mikrozgię-

ciowe. Straty te rosną wraz z maleńiem apertury numerycznej /w zakresie małych wartości apertur, poniżej 0,15/ w każdym światłowodzie, a szczególnie wzrastają w światłowodach jednomodowych z segmentowym wielopiersścieniowym rdzeniem.

Straty mikrozgięciowe są powodowane w światłowodzie przez jego lokalne mikroodkształcenia wskutek oddziaływania sprężystego ze strukturą toru i kabla. Mikroodkształcenia mogą być porównywalne z długością fali lub z wymiarem rdzenia światłowodu. Tak więc, współczynnik jakości podczas optymalizacji dyspersyjnej niskostratnych i szerokopasmowych światłowodów jednomodowych, przeznaczonych do pracy w pasmie 1,6 μm , obejmuje nie tylko bezwzględną wartość dyspersji fali, ale i straty mikrozgięciowe. Straty mikrozgięciowe mają duże znaczenie w kablach podmorskich, ze względu na to, że mogą narastać bardzo powoli do dużych wartości podczas długoterminowej eksploatacji kabla.

Zalecenia CCITT dotyczące dyspersji i przyrostowych strat mikrozgięciowych światłowodu podają dla pasm 1,3 i 1,6 μm następujące liczby: 5 ps/nm km oraz 0,01 dB/km. Takie ograniczenie dyspersyjne pozwala na niezniekształconą transmisję sygnału z szybkością ponad 3 Gbit/s przy odległości międzyzmaczniakowej ponad 100 km i szerokości spektralnej charakterystyki lasera półprzewodnikowego 0,1 nm.

W przeciwieństwie do ograniczenia tłumieniowego, wymienione ograniczenie dyspersyjne nie jest absolutne i można je stosunkowo łatwo zmniejszyć do poziomu poniżej 1 ps/nm km. Dalsze zmniejszenie dyspersji światłowodowej w szerokim pasmie jest praktycznie niemożliwe, ze względu na statystyczne rozrzuty /fluktuacje/ lokalnej wartości współczynnika załamania i związaną z tym technologiczną dokładność odtworzenia teoretycznie określonego profilu refrakcyjnego światłowodu. Natomiast, dla ściśle określonej długości fali lub nawet kilku długości fali w danym pasmie dyspersję można wyzerować.

Przy tak małych stratach jednostkowych światłowodu jednodowego pracującego w pasmie $1,6 \mu\text{m}$ bardzo istotny staje się problem łączenia /spawania lub klejenia/ odpowiednich długości światłowodów, tworzących ciągły odcinek międzyregeneratorowy. Średnia długość łączonych obecnie odcinków światłowodów wynosi ponad 10 km. Tak więc, dla systemu podmorskiego pracującego w pasmie $1,3 \mu\text{m}$ z odległością międzyregeneratorową ok. 60 km światłowod musi być siedmiokrotnie spawany. Zakładając średnie straty złącza spawanego nieco mniejsze niż 0,1 dB, otrzymujemy całkowite straty złązek dla transmisyjnego odcinka międzyregeneratorowego około 0,5 dB. Wartość ta jest równoważna stratom dodatkowej długości $1,5 \text{ km}$ światłowodu w tym pasmie.

Wymagania na średnią spawaną długość światłowodu rosną znacznie w pasmie $1,6 \mu\text{m}$. Aby nie powiększyć obliczonych powyżej strat przyrostowych łączenia światłowodów dla odcinka międzyregeneratorowego, przewiduje się, że odcinki te dla pasma $1,6 \mu\text{m}$ powinny mieć minimalnie 25 km długości. Obecnie takie odcinki światłowodu uzyskuje się wyłącznie drogą wyboru odcinków mało stratnych. Procedura taka zwiększa istotnie koszty systemu dalekosiężnego. Zakłada się, że wraz z dalszym rozwojem technologii produkcji światłowodów jednodowych mediana długości ciągłych odcinków może być przesunięta, wkrótce do wartości ok. 15-20 km.

Obok tłumienia jednostkowego i dyspersji, podstawowymi parametrami światłowodu do zastosowań podmorskich jest wytrzymałość mechaniczna na siły zrywające, zginające i ścinające oraz długookresowa stabilność parametrów mechanicznych. Najczęściej stosowanym eksperymentalnym wskaźnikiem wytrzymałości światłowodu są testy na zrywanie oraz zginanie. Stosuje się tutaj zarówno stacjonarne testy zmęczeniowe, jak i testy dynamiczne.

Podstawowe znaczenie dla zwiększenia wytrzymałości mechanicznej światłowodu ma jakość powierzchni szklanego płaszczka zewnętrznego lub tzw. zewnętrznego bufora krzemionkowego, który pokrywa dodatkowo właściwy płaszcz optyczny. Naj-

wyższa jakość powierzchni oznacza całkowity brak mikropęknięć. W procesie technologicznym czysta powierzchnia szkła musi być całkowicie zabezpieczona przed dostępem zanieczyszczeń, a szczególnie jonów metali i jonów wodorotlenowych.

Bezpośrednie pokrycie światłowodów przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie dokonuje się chemicznej neutralizacji powierzchni światłowodów. W wyniku tego procesu następuje dezaktywacja niewysycenych wiązań warstwy atomów krzemu leżących na powierzchni oraz "retusz" ewentualnych mikropęknięć. Natomiast w drugim etapie pokrywa się światłowód bardzo cienkim, lecz całkowicie szczelnym i elastycznym pokryciem z kymaru /polimer winylowo-fluorowy/ lub akrylatów epoksydowych. Wymienione pokrycia są odporne na korozję i stanowią dobrą barierę wodorową, tzn. zapobiegają dyfuzji jonów OH^- i cząsteczek H_2 .

Powolna dyfuzja wolnego i uwięzowanego wodoru w kierunku rdzenia światłowodów jest bardzo szkodliwa, gdyż powoduje znaczny wzrost tłumienia w pasmach długofalowych. Źródłem dyfundującego wodoru może być niedostatecznie suchy bufor krzemionkowy pokrywający światłowód oraz tworzywa sztuczne tworzące strukturę toru i kabla w najbliższym sąsiedztwie światłowodów.

Innymi czynnikami powodującymi powolną degradację światłowodów są:

- mikrozgięcia włókna, spowodowane starzeniem tworzyw sztucznych;
- powolne losowe uszkodzenia struktury kabla;
- oddziaływanie promieniowania jonizującego o bardzo małej mocy dawki w środowisku podmorskim.

Czas życia światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich określany jest obecnie na 25 lat. W tym okresie zmiany właściwości światłowodów nie powinny przekroczyć 10% wartości parametrów początkowych. Dotyczy to głównie tłumienia optycznego.

W tabelicy 2 zestawiono podstawowe parametry światłowodów jednomodowych przeznaczonych do pracy w systemach teletransmisyjnych różnych generacji. Pierwsze dwie generacje systemów bazują na światłowodach ze szkła krzemionkowego słabo domieszkowanego. Minimalne tłumienie tych światłowodów jest przewidywane teoretycznie na ok. 0,1 dB/km, co daje ograniczenie transmisyjne dla odległości ok. 500 km bez regeneratora. W praktyce laboratoryjnej do 1987 r. przeprowadzono następujące eksperymenty teletransmisyjne: ze stopą błędów 10^{-9} /rys. 1/:

- 400 km, 45 Mbit/s,
- 120 km, 4 Gbit/s,
- 10 km, 15 Gbit/s.

Na lata dziewięćdziesiąte w zakresie drugiej generacji systemów są przygotowywane, np. przez firmę ATT, następujące handlowe układy transmisyjne:

- 1,2 Gbit/s, 200 km,
- 2,4 Gbit/s, 150 km,
- 4,8 Gbit/s, 100 km.

Do budowy tych układów konieczne są światłowody optymalizowane pod względem tłumienia i dyspersji.

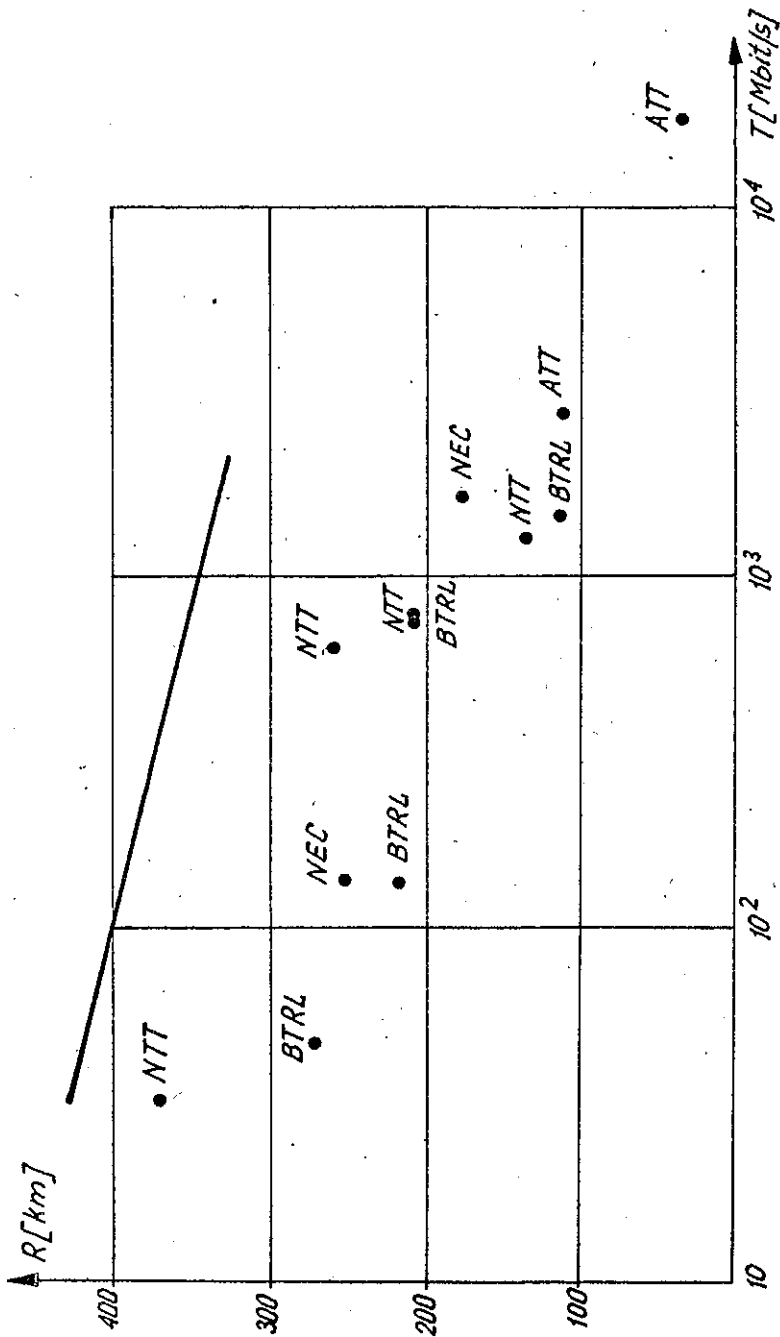
Przedstawione powyżej liczby określają graniczne możliwości dwóch pierwszych generacji systemu światłowodowego. Powne niewielkie przesunięcie tej granicy jest możliwe w przypadku zastosowania światłowodów fluorokrzemionkowych. Fluorokrzemiany mają mniejszą dyspersję naturalną, mniejsze straty oraz mniejszy współczynnik załamania od topionego kwarcu, a także są bardzo odporne mechanicznie.

Ośrodkiem transmisyjnym dla systemów podmorskich trzeciej generacji mają być światłowody nietlenkowe. Nad tego rodzaju światłowodami są prowadzone już od kilkunastu lat bardzo intensywne badania naukowe i techniczne, w co najmniej kilkudziesięciu ośrodkach na świecie. Podstawowe szkła nietlenkowe przydatne na światłowody o dużej długości, jakimi dysponuje współczesna technika to:

Tablica 2

Przewidywane parametry światłowodów jednonodowych przeznaczonych do pracy w podmorskich systemach teletransmisyjnych różnych generacji [23]

Gene- racja sy- stemu	Materiał światło- wodu	Tramien- ność świa- tłowodu w kablu pod- morskim w [dB/km]	Dywersja światłowo- du [ps/nm km]	Średnia długość łączonych odcinków światło- wodowych w [km]	Straty złączy pomię- dzy światło- wodami w [dB]	Wytrzy- małość mechan- iczna światło- wodu na zrywanie w [cPa]	Przyro- stowe straty kablowa- nia świa- tłowodu w [dB/km]	Śred- nica rdzenia w [μm]
1	SiO ₂ :Ge	0,35±0,02	4, natural- ne pasmo zerowej dywersji	10	0,1	5	0,01	3-5
2	SiO ₂ :F	0,18±0,02	1, światło- wody o przesunię- tej dysper- sji zerowej do pasma 1,6 μm, a w przyszłości do pasma 1,6-2 μm	25	0,05	5	0,01	3-8
3	szkła nietlen- kowe: ha- logenki i chalko- genki	ok. 10 ⁻²	1, optyma- lizowane dywersyj- nie.	100	5·10 ⁻³	0,1-0,5	5·10 ⁻³	10-30



Rys. 1. Bezregeneracyjne światłowodowe eksperymenty teletransmisyjne, wykonane w warunkach laboratoryjnych, ze stopą błędów mniejszą od 10^{-9} . Linia ograniczająca wykres od góry oznacza absolutne ograniczenie optycznej transmisji liniowej w światłowodzie jednomodowym

BTRL - laboratoria badawcze Poczty Erytyjskiej, NEC - Nippon Electric Co., NTT - Nippon Telephone and Telegraph, BELL - Bell Telephone Co., ATT - American Telephone and Telegraph

- halogenki /fluorowe/, fluorki, chlorki, bromki oraz jodobromki;

- chalkogenki /tlenowe/, siarczki, selenki i tellurki.

Podstawowymi zaletami światłowodów nietlenkowych są:

- bardzo niskie straty optyczne;
- szerokie możliwości dopasowania zerowej wartości dyspersji materiałowej do pasma transmisji;
- istotny wzrost wymiarów rdzenia światłowodu jednomodowego, ze względu na wzrost długości fali;
- kilkakrotnie niższy poziom optycznych zjawisk nieliniowych w światłowodach ze szkła ZrF_4 w porównaniu ze światłowodem ze szkła SiO_2 .

Podstawową wadą niektórych rodzajów z tych światłowodów jest chemiczna niestabilność szkieł i ich mniejsza wytrzymałość mechaniczna w porównaniu ze szklami krzemionkowymi i innymi szklami tlenkowymi.

Dla kilku rodzajów z tych światłowodów osiągnięto obecnie minimalne straty poniżej 1 dB/km, a dla światłowodów ze szkła typu $HfZrF$ pokonano ostatnio barierę 0,5 dB/km [29]. Taki światłowod jednomodowy można pobudzić mocą optyczną o wartości średniej równej 1 W bez wystąpienia zjawiska nieliniowego rozpraszania stymulowanego. Dla porównania, w światłowodzie jednomodowym krzemionkowym rozpraszanie nieliniowe występuje przy mocy średniej powyżej 10 mW. Łatwo obliczyć, że przy czułości odbiornika optoelektronicznego równej -40 dBm dysponujemy już obecnie odległością międzyregeneratorową znacznie ponad 100 km. Obniżenie tłumienia jedynie do poziomu charakterystycznego dla światłowodów krzemionkowych, daje w systemie trzeciej generacji odległość międzyregeneratorową ponad 1000 km [29].

3. PODMORSKIE KABLE ŚWIATŁOWODOWE

Podstawowym zadaniem konstrukcji kabla podmorskiego jest odpowiednie rozmieszczenie światłowodów w rdzeniu kabla oraz zabezpieczenie światłowodu przed oddziaływaniem czynników środowiskowych [3, 6, 19]. Światłowody powinny być rozmieszczone w ośrodku kabla w taki sposób, aby w żadnych warunkach eksploatacji kabla nie dochodziło do ich naprężenia mechanicznego. Naprężenie światłowodów powoduje niekontrolowany wzrost strat optycznych bądź zniekształcenia fazy transmowanego optycznego sygnału impulsowego.

Wśród czynników mogących wpływać szkodliwie na światłowody, a występujących podczas przechowywania, układki, eksploatacji i napraw kabla należy wymienić:

- czynniki mechaniczne, jak: naprężenia wzdłużne i wyginające, zarysowania pokryć ochronnych, siły ścinające i skręcające, mikrozgięcia [9], duże ciśnienie wody dochodzące do 1000 atmosfer - co odpowiada umieszczeniu kabla podmorskiego na głębokościach do 9 km [12];
- czynniki termiczne, jak: cykliczne zmiany temperatur podczas przechowywania i układki kabla oraz długotrwałej eksploatacji systemu, szczególnie sezonowe zmiany temperatur w płytkowodnej części trasy kabla;
- czynniki związane z obecnością słonej wody, jak: poprzeczne i podłużne wnikanie wody do kabla, czemu zapobiega tzw. blokowanie wodne kabla polegające na umieszczeniu w nim co kilkadziesiąt metrów wysokociśnieniowych barier przeciwwodnych uszczelnionych elastomerem [19];
- czynniki elektrochemiczne, powodujące powolny wzrost tłumienia światłowodu w pasmie długofalowym i pogorszenie jego właściwości mechanicznych;
- promieniowanie jonizujące, powodujące dewitryfikację szkła.

Przewiduje się, że dalekosiężne światłowodowe kable podmorskie przeznaczone dla systemów pierwszej generacji będą

posiadać w podstawowej wersji konstrukcyjnej trzy pary światłowodów [11]. Dwie pary służą do utworzenia czterech jednokierunkowych traktów transmisyjnych, zaś trzecia para będzie wykorzystywana dla celów pomiarowych, zdalnego nadzoru, np. realizacji pętli wstecznych oraz w warunkach awaryjnych do realizacji traktu rezerwowego.

Przewiduje się również, że liczba par światłowodów w kablach podmorskich dla systemów regeneracyjnych /tutaj w takim rozumieniu, że system posiada podmorskie stacje regeneracyjne/ drugiej generacji może wzrosnąć do sześciu [6]. Natomiast kable dla systemów bezregeneracyjnych /tzn. systemy nie posiadające podmorskich stacji regeneracyjnych, a mające jedynie lądowe stacje regeneracyjne/ będą posiadać także więcej par światłowodów niż sześć, nawet od kilkunastu do kilkudziesięciu, a w szczególnych przypadkach do kilkuset [20, 22].

Głównymi czynnikami decydującymi o liczbie światłowodów w kablu dla systemów regeneracyjnych jest komplikacja budowy podmorskich stacji regeneracyjnych i związanej z tym ich niezawodności. Przy zwiększonej liczbie torów światłowodowych w kablu znacznie wzrastają wymiary podmorskich stacji regeneracyjnych, zwiększa się zużycie mocy elektrycznej. Także, wraz ze wzrostem liczby elementów, maleje niezawodność. Problem ten nie występuje w systemach bezwzmocniakowych.

Struktura światłowodowych kabli podmorskich jest przedmiotem normalizacji w różnych krajach i obecnie różnice pomiędzy głównymi producentami są już niezbyt duże [23]. Zbrojenie wszystkich kabli jest prawie identyczne. Pewne różnice występują w, zawierającym światłowody, rdzeniu kabla. Między innymi w celu przeprowadzenia międzynarodowej normalizacji światłowodowych kabli podmorskich zorganizowano już kilka dużych konferencji poświęconych tej tematyce [10, 23, 24].

Istotnym elementem procesu normalizacji technicznej było uzgodnienie pomiędzy czołowymi producentami, tzw. klasa podmorskich kabli światłowodowych. Klasy te zgrupowano w tabl. 3.

Tablica 3

Światłowodowe kable podmorskie i niektóre ich parametry

Rodzaj kabla światłowodowego	Nominalna siła rozciągająca [kN]	Wytrzymałość kabla na zrywanie [kN]	Dla porównania waga w wodzie kabli współosiowych o podobnych parametrach /wymiarach/ [T/km]	Waga w wodzie i waga w powietrzu kabla światłowodowego [T/km]	Moduł kabla [km]	Średnica zewnętrzna kabla [mm]	Objętość własna kabla [m ³ /km]	Gęstość średnia kabla [g/cm]
Lekki podmorski aluminiowy miedziany	100	150	0,8	0,5/0,8 0,7/1,0	28-30 20-22	20-24	0,3	2,4-2,6
Lekki zbrojony	200	300	-	0,9 ÷ 1/1,25 ÷ 1,5	20	25-30	0,45	2,8
Pojedynczo zbrojony	500	650	-	1,3 ÷ 1,5/2 ÷ 2,5	20	30-35	0,7	3,0
Podwójnie zbrojony	600	750	8-10	3,5 ÷ 4,5/5 ÷ 6	19	40-45	1,5	3,5
Potrójnie zbrojony lub specjalnie zbrojony	750	1000	16-20	7 ÷ 9/10 ÷ 12	15	50-60	2,8	3,5

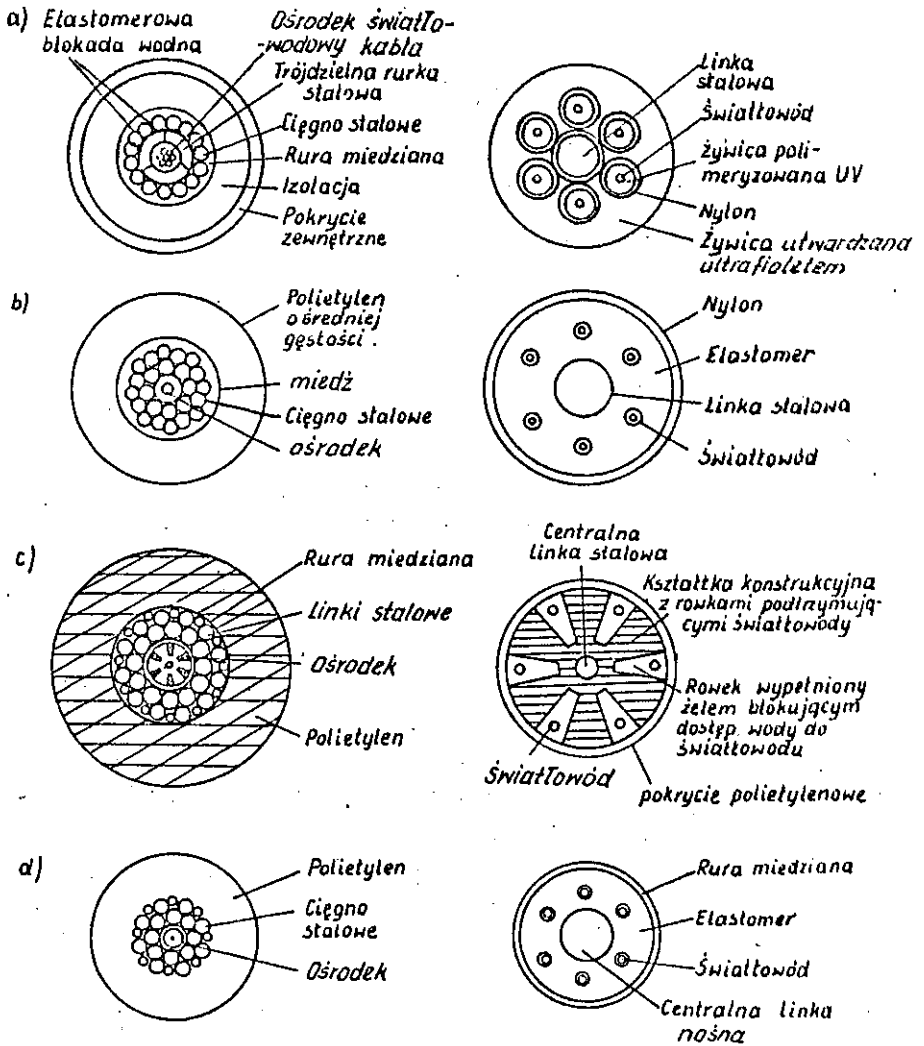
Jedynym kryterium klasyfikacji są: maksymalna dopuszczalna siła rozciągająca kabel /tzw. nominalna siła rozciągająca/ i siła zrywająca kabel. Nominalna siła rozciągająca jest podawana zazwyczaj przez producentów jako siła, która powoduje względne wydłużenie kabla o 1% przy całkowitym braku wydłużenia światłowodu. Wytrzymałość kabla określona jest przez wartość siły zrywającej kabel.

Ośrodek wszystkich dalekosiężnych światłowodowych kabli podmorskich składa się z: centralnej linki stalowej, otoczonej warstwą twardego tworzywa sztucznego, a następnie warstwą miękkiego elementu konstrukcyjnego podtrzymującego światłowody, i zewnętrznego twardego pokrycia nylonowego.

Na rys. 2 przedstawiono przekroje ośrodków kablowych i lekkich światłowodowych kabli podmorskich kilku głównych producentów.

Rdzeń podmorskiego kabla francuskiego wykorzystuje patent CNET-u, zgodnie z którym światłowody są umiejscowione w rowkach helikalnych wykonanych w polietylenowym elemencie konstrukcyjnym nałożonym na lince centralnej. Struktura ta jest podobna jak we francuskich światłowodowych kablach podziemnych, produkowanych np. przez firmę SAT. Rowki w kształcie wypełniono żelem silikonowym z dodatkiem substancji blokujących dostęp wody do światłowodu. Światłowody zamknięto w rowkach poprzez owinięcie rdzenia taśmą mylarową. Całość tej struktury /centralnej części rdzenia kablowego/ pokryto cienką warstwą polietylenu.

W kablach amerykańskich, japońskich i angielskich, indywidualnie zabezpieczone światłowody /pokryte warstwą gumy silikonowej i ewentualnie umieszczone dodatkowo w twardych rurkach nylonowych/ zatopiono trwale w większym elastomerym buforze, spełniającym tę samą rolę, co kształtka z rowkami helikalnymi w kablu francuskim. Światłowody w tym buforze również zwinięto helikalnie wokół osi kabla. Skok spirali i moduł Younga elastomeru w stosunku do modułu Younga nylonu i szkła są tak dobrane, aby przy każdych warunkach normalnej pracy kabla światłowody nie były nadmiernie rozciągnięte



Rys. 2. Struktura lekkich światłowodowych kabli podmorskich /LSKP/ i rdzeni kablowych przeznaczonych dla systemów pełnomorskich i transoceanicznych. Pokazano przekrój poprzeczny rdzenia kabla zawierającego światłowody /prawa strona rys./ i umiejscowienie rdzenia kablowego w kablu lekkim /lewa strona rys./.

a/ LSKP produkcji japońskiej przeznaczony dla systemu teletransmisyjnego pełnomorskiego OS280; b/ LSKP produkcji amerykańskiej dla systemu SL280; c/ LSKP produkcji francuskiej dla systemu S280; d/ LSKP produkcji angielskiej dla systemu NL2

/przy rozciągnięciu kabla/ lub nadmiernie wygięte /przy wygięciu kabla lub wzdłużnym skurczeniu kabla w niskiej temperaturze/.

Konstrukcja elementów rdzenia kabla bezpośrednio podtrzymujących światłowody jest niezwykle istotna ze względu na straty mikrozgięciowe światłowodu. Miarę strat mikrozgięciowych światłowodu w kablu stanowi tzw. maksymalna osułość mikrozgięciowa kablowania wyrażana w przyroście strat optycznych w dB na jeden km długości kabla światłowodowego. Osułość ta jest mierzona podczas maksymalnej dopuszczalnej zmiany temperatury otoczenia i dla maksymalnych obciążeń kabla oraz w najbardziej niekorzystnych warunkach pracy systemu.

Najbardziej niekorzystna zmiana termiczna wiąże się na ogół z obniżeniem temperatury otoczenia powodującym twardnienie i większe skurczenie się części kabla zbudowanych z tworzyw sztucznych w porównaniu ze światłowodami i częściami metalowymi. Lekkie światłowodowe kable podmorskie pracują w środowisku o bardzo stabilnych warunkach termicznych /2-6°C na głębokości poniżej 1 km/. W takich kablach, przechowywanych przed ułożeniem w temperaturze pokojowej, światłowód jest poddawany wstępnemu naprężeniu, po to, by po obniżeniu temperatury kabla do temperatury środowiska wodnego ułożenie światłowodu w torze było optymalne.

Podstawą konstrukcji prawie wszystkich światłowodowych kabli podmorskich [15; 23] jest tzw. lekki kabel podmorski, nazywany także w literaturze kablem głębokowodnym lub pełnomorskim /rys. 2/. W kablu tym, ośrodek zawierający światłowody owinięto stalowym ciągnem kabla z nałożoną rurą przewodzącą i zewnętrznym pokryciem izolacyjnym. Opancerzenie lekkich kabli głębokowodnych różni się nieco w zależności od producentów.

W kablu japońskim rdzeń pokryto bezpośrednio trójdzielną spawaną szczerólnie rurką stalową. Na rurce znajduje się dwuwarstwowy oienki oplót stalowy z nałożoną rurą miedzianą lub duraluminiową. Rurę miedzianą pokrywa zewnętrzna poli-

etylenowa warstwa izolacyjna. W kablu tym powierzchnia polietylenu dodatkowo jest ochroniona bardzo cienkim pancerzem nylonowym.

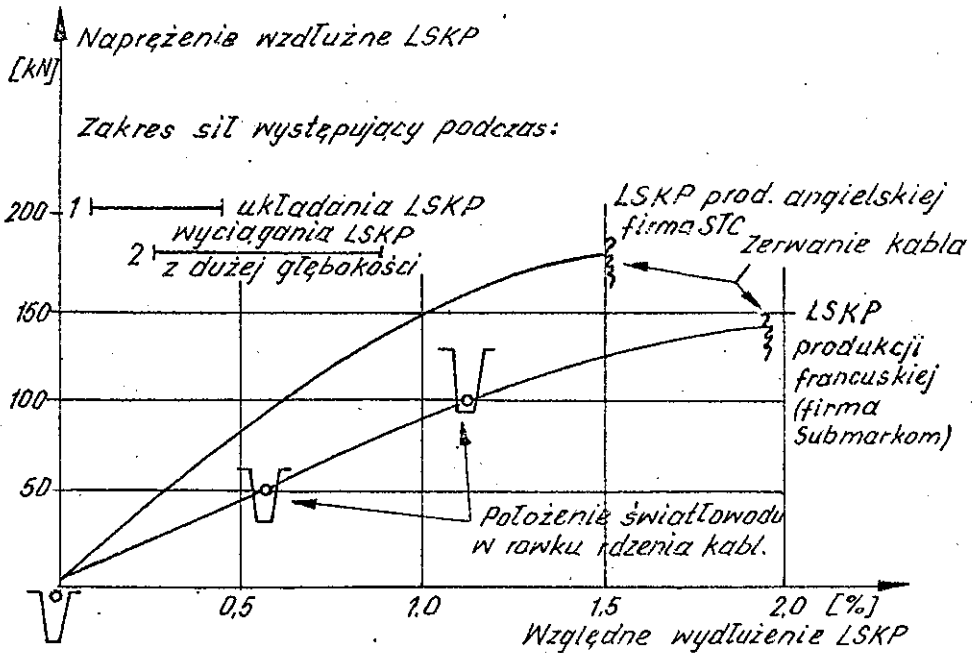
Lekkie kable podmorskie produkcji angielskiej, francuskiej i amerykańskiej nie zawierają trójdzielnej rurki stalowej, a oplot stalowy jest nakładany bezpośrednio na centralny ośrodek kabla.

Wszystkie lekkie kable podmorskie wytrzymują bez zmiany optycznych i elektrycznych parametrów transmisyjnych siłę rozciągającą do 100 kN. Zgodnie z normami międzynarodowymi, przy takiej sile działającej na kabel, światłowod nie powinien być naprężony, a wydłużenie względne kabla powinno wynosić nie więcej niż 1%. Natomiast siła zrywająca taki kabel nie może być mniejsza od 130-150 kN, a wydłużenie względne kabla wynosi wówczas 1,5-2% przy co najwyżej 0,5-1% wydłużeniu względnym światłowodu. Zachowanie się światłowodu w lekkim kablu podmorskim produkcji francuskiej, występujące podczas rozciągania tego kabla, przedstawiono na rys. 3.

Dla większości rodzajów światłowodowych kabli podmorskich nominalna wytrzymałość jest określana przez taką siłę, która powoduje wydłużenie kabla o 1-1,2% przy braku naprężenia światłowodów. Doświadczenia zebrane do tej pory podczas układania i symulowanych reperacji światłowodowych kabli podmorskich wykazują, że podczas wyciągania kabla z bardzo dużych głębokości, przekraczających 3-5 km, w najbardziej niekorzystnych warunkach ulega on wydłużeniu względnemu do 0,7% [23].

Grupę parametrów wytrzymałościowych światłowodowych kabli podmorskich uzupełniają:

- siła ścinająca, która dla kabla lekkiego powinna być większa od 100 kg/cm;
- minimalny promień zgięcia, przy którym nie występują mieralne straty optyczne i który wynosi 1 m dla kabla lekkiego;
- moduł kabla.



Rys. 3. Charakterystyki wydłużenia względnego kabla podmorskiego lekkiego w funkcji siły rozciągającej

Lekkie światłowodowe kable podmorskie poddaje się znormalizowanemu testowi na zginanie polegającemu na stukrotnym wygięciu o 180° w przeciwnych kierunkach, przy promieniu zgięcia równym 30 cm.

Moduł kabla podmorskiego jest to siła zrywająca kabel zanurzony w wodzie pod wpływem jego ciężaru własnego wyrażonego w jednostkach jego długości. Ciężar światłowodowych kabli podmorskich o typowej budowie i zanurzonych w wodzie zawiera się w granicach od 0,5 do 4 ton na kilometr długości kabla, głównie w zależności od rodzaju uzbrojenia. Moduł światłowodowych lekkich kabli podmorskich z przewodzącą rurą miedzianą waha się w granicach 20-22 km, a z rurą duraluminiową w granicach 28-30 km. Różnica wynika z około trzykrotnie mniejszej wagi rury duralowej od rury miedzianej.

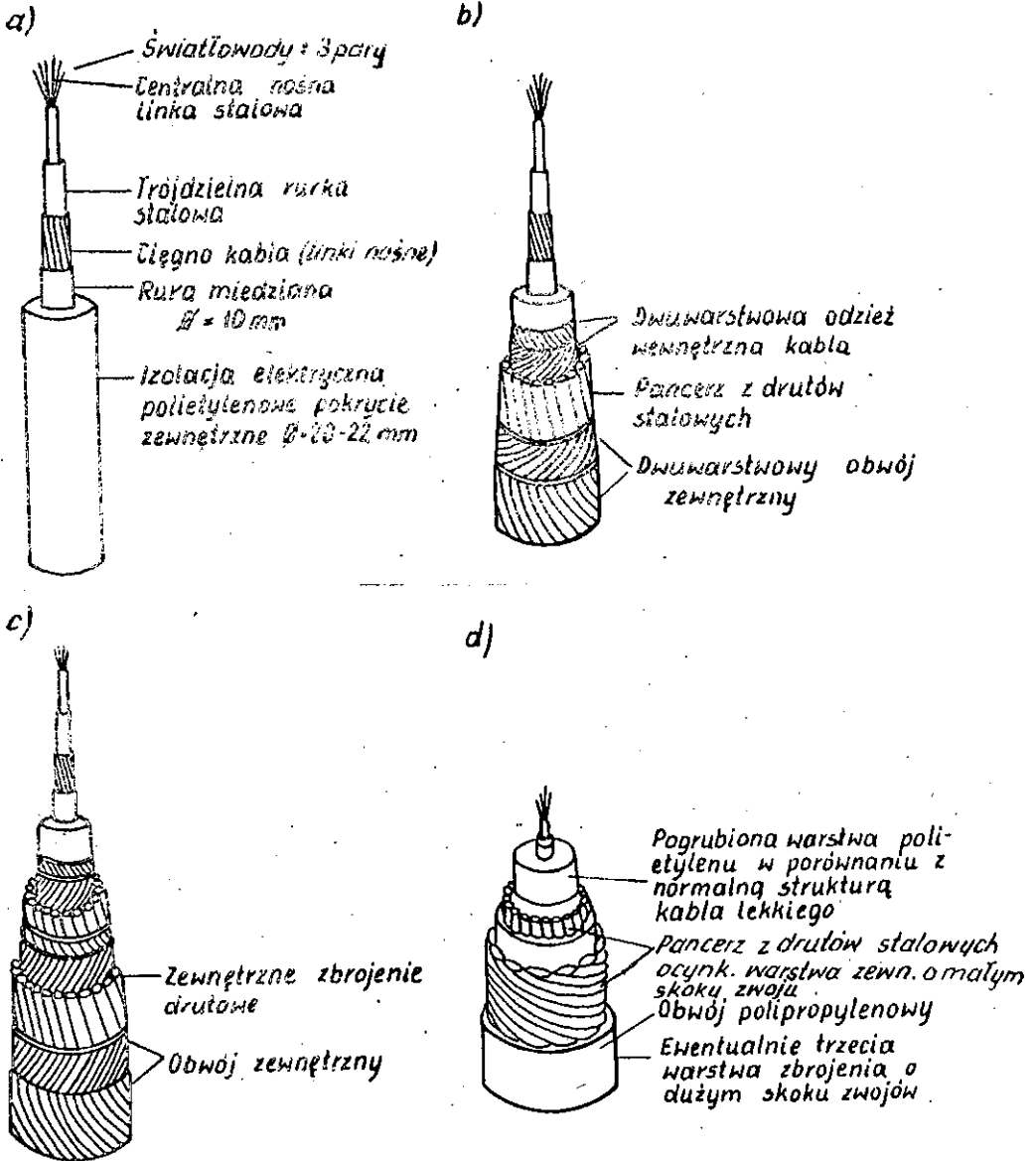
W zależności od potrzeb zastosowania lekki światłowodowy kabel podmorski jest pojedynczo, podwójnie, a nawet potrójnie zbrojony. Zbrojenie kabli różnych firm jest prawie identyczne. Najprostszy rodzaj uzbrojenia /klasa kabla - - lekki zbrojony/ polega tylko na wzmocnieniu oplotu stalowego dodatkowymi warstwami w kablu lekkim. Na rys. 4 przedstawiono schematycznie budowę lekkiego kabla podmorskiego produkcji japońskiej, który został pojedynczo i podwójnie uzbrojony. Trzecie zbrojenie stosowane bardzo rzadko jest w postaci oplotu stalowego o bardzo niewielkim skoku uzwojenia. W niektórych innych konstrukcjach światłowodowych kabli podmorskich stosuje się pomiędzy zbrojeniami, np. pierwszym i drugim, uszczelniającą rurę ołowianą [30].

Światłowodowe kable podmorskie muszą przenosić energię elektryczną zasilającą podmorskie stacje regeneracyjne. W związku z tym istotne są również ich parametry elektryczne, a wśród nich:

- oporność właściwa,
- straty elektryczne,
- klasa izolacji.

Dla podmorskich kabli światłowodowych z przewodzącą rurą miedzianą oporność właściwa nie przekracza $0,6 \Omega / \text{km}$, a dla kabla z rurą duralową waha się w granicach $0,7-0,8 \Omega / \text{km}$. Wartość prądu zasilania dla światłowodowych kabli podmorskich wykorzystywanych w teletransmisyjnych systemach transoceanicznych 2 generacji jest znormalizowana i wynosi $1,6 \text{ A}$. Dla porównania prądy zasilania systemów TAT-6 i TAT-7 wynoszą odpowiednio 650 mA i 400 mA . Napięcie zasilające w urządzeniach końcowych światłowodowych systemów transoceanicznych ustalono na $\pm 7-7,5 \text{ kV}$. Badania izolacji światłowodowego kabla podmorskiego dla systemu transoceanicznego wykonuje się przy napięciu 30 kV .

Pod wpływem działania środowiska morskiego parametry kabla światłowodowego /elektryczne, optyczne, mechaniczne/ ulegają powolnym i nagłym zmianom w czasie, przewidzianym



Rys. 4. Struktura światłowodowych kabli podmorskich /SKP/

a/ LSKP produkcji japońskiej firmy Ocean Cable Corp.; b/ SKP pojedynczo zbrojony produkcji japońskiej; c/ SKP podwójnie zbrojony produkcji japońskiej; d/ SKP podwójnie zbrojony produkcji angielskiej firmy STC o wzmocnionym zbrojeniu zewnętrznym. /Takie wzmocnione zbrojenie zewnętrzne nakłada się na kabel podwójnie zbrojony z rys. b/ otrzymując bardzo ciężki kabel potrójnie zbrojony dla specjalnych celów/

normami 25-letniej eksploatacji systemu. Zakłada się, że najbardziej niekorzystne zmiany temperatury pracy kabla, zmiany ciśnienia w zakresie 0-900 kg/cm² oraz naciąg kabla równy 10 ton dają przyrost strat optycznych kabla mniejszy niż 0,001 dB/km dla każdego z tych czynników [15, 23]. Tak więc w sumie, dla odcinka międzyregeneratorowego, przyrostowe straty środowiskowe muszą być mniejsze od 0,1 dB. Straty te podlegają pewnym fluktuacjom krótkoterminowym i długoterminowym np. sezonowym, związanym z przypadkowym charakterem i sezonowością wpływów środowiskowych.

4. PODMORSKIE KABLOWE MUFY PRZELOTOWE I ROZDZIELCZE

Podmorskich kablowych muf przelotowych na ogół nie stosuje się podczas pierwszej układki kabla światłowodowego. Spawane odcinki światłowodu o średniej długości 10 km /dla kabli dalekosiężnych/ są torowane i następnie kablowane bez udziału muf w ciągłe odcinki międzyregeneratorowe kabla podmorskiego. Światłowodowe mufy przelotowe stosuje się natomiast podczas wszelkich reperacji uszkodzeń kabla [15, 16, 23].

Spawanie światłowodów wewnątrz mufy odbywa się obecnie prawie wyłącznie metodą łuku elektrycznego. Zespawany światłowodów nawija się na bęben o średnicy ok. 5 cm. Bęben zamyka się w wysokociśnieniowej obudowie stalowej izolowanej od wewnątrz i z zewnątrz warstwą polietylenu. Obudowa ciśnieniowa przewodzi kablowy prąd zasilania, stanowi szczelne zabezpieczenie światłowodów przed oddziaływaniami mechanicznymi i wodą oraz przenosi wzdluzne naprężenia rozciągające kable. Przewodzenie prądu zasilania pomiędzy kablem a uchwytem kotwowym jest realizowane poprzez szczelny lutowany i zaciskany przepust aluminiowo-miedziany, wykonany w pokrywie obudowy ciśnieniowej. Zewnętrzna izolującą warstwę polietylenu na obudowie ciśnieniowej pokrywa się szczelnym obwojem z taśmy z miedzi berylowej. Materiał ten jest wyjątkowo odporny na korozję w środowisku podmorskim.

Jednym z podstawowych parametrów mufy, oprócz jej wytrzymałości mechanicznej, jest szczelność w ośrodku gazowym i w wodzie. Badania mufy w ośrodku gazowym określają jej przepuszczalność dla pary wodnej. Badania szczelnościowe mufy przeprowadza się w znormalizowanych warunkach dla ciśnień równych 1000 kg/cm^2 .

Wewnętrzna struktura mufy podmorskiej dla kabli lekkich i zbrojonych jest identyczna. Ciężno kabla i wewnętrzne warstwy zbrojenia są osiowo kotwione w wewnętrznej części obudowy stalowej mufy. Wytrzymałość kotwienia musi odpowiadać wytrzymałości danego rodzaju kabla podmorskiego. Mufa jest dodatkowo zbrojona i posiada dodatkowe kotwienia, jeśli współpracuje z kablami ciężkimi. Zewnętrzne zbrojenie mufy wykonuje się z wstępnie kształtowanych drutów stalowych mocowanych pierścieniami na kablu, tuż przed i za mufą, tak aby zbrojenie to przenosiło naprężenia wzdłużne pomiędzy obioma częściami kabla. Długość podmorskiej kablowej mufy przelotowej waha się w zakresie 1-1,5 m, a średnica 6-12 cm. Mufy to są symetryczne względem środka długości.

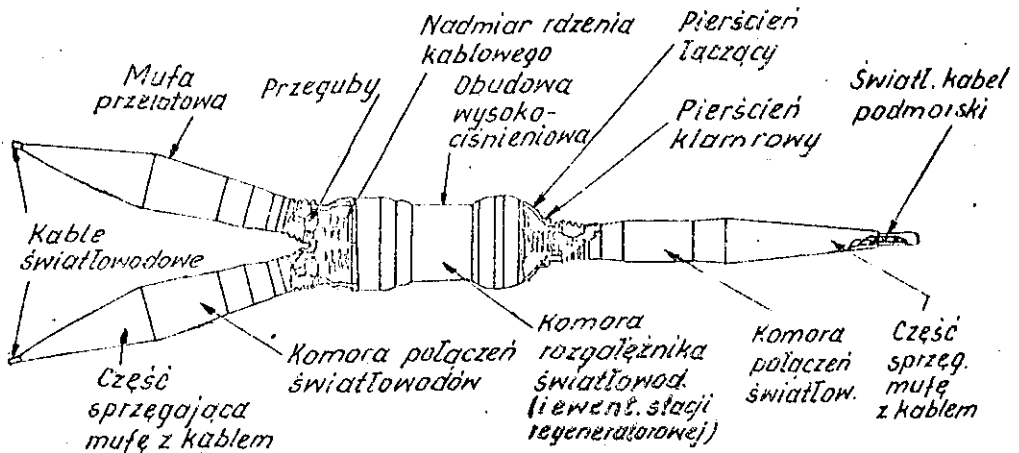
Dwie niesymetryczne kablowe mufy przelotowe współpracują z każdą stacją regeneratorską. Ze względu na dużą długość całej stacji regeneratorskiej /ponad 3 m/ bardzo często mufy te łączą się z obudową stacji za pomocą przegubu. Struktura wewnętrzna takiej mufy jest bardzo podobna do muf opisanych poprzednio z tą różnicą, że jej obudowa posiada znacznie większą średnicę - dostosowaną do obudowy stacji regeneratorskiej.

Podmorskie rozgałęzienia trasy kablowej nie występowały w teletransmisyjnych systemach klasycznych z kablami współosiowymi. Natomiast w większości projektów światłowodowych systemów transoceanicznych pierwszej i drugiej generacji takie rozgałęzienia optyczne lub optoelektroniczne występują [16, 23]. Możliwa jest konstrukcja rozgałęźników w dwóch zasadniczych postaciach:

- optycznej: bez regeneratorów optoelektronicznych;
- optoelektronicznej: wspólnie ze stacją regeneratorską.

Obecnie przeważa tendencja budowy rozgałęźników bezregeneracyjnych.

Rozgałęźnik bezregeneracyjny /rys. 5/ zawiera wyłącznie multiplekser światłowodowy i przełączniki wysokonapięciowe o dużej niezawodności. Przełączniki te służą do zmiany konfiguracji linii zasilającej wysokiego napięcia - przełączenie zasilania na odpowiednią gałąź rozgałęźnika lub uziemienie. Producenti przewidują umieszczenie rozgałęźnika w znormalizowanych obudowach złożonych z elementów standardowej obudowy stacji regeneracyjnej.

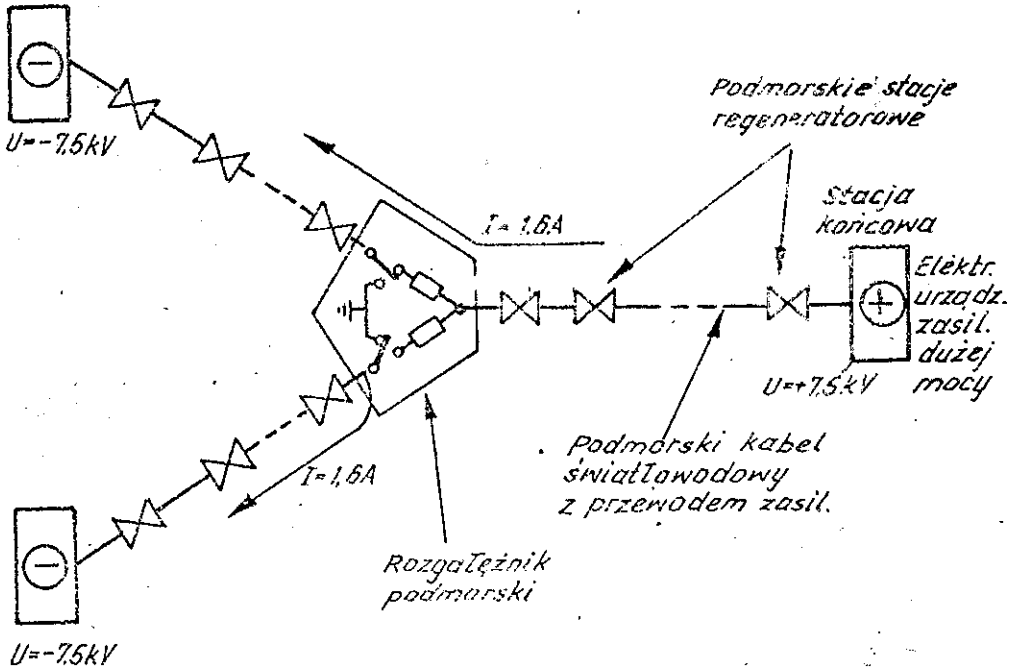


Rys. 5. Budowa podmorskiej mufy odgałęźnej dla kabla światłowodowego /firma KDB/

W celu zwiększenia niezawodności pracy rozgałęźnika optycznego zmniejsza się, lokalnie przy rozgałęźniku odległości, do trzech sąsiednich podmorskich stacji regeneracyjnych. Najczęściej odległości te redukowane są do połowy swojej wartości nominalnej.

Rys. 6 przedstawia wysokonapięciowy, stałoprądowy układ zasilania podmorskiego rozgałęźnika trasy kabla światłowodowego dla teletransmisyjnego systemu transoceanicznego. Do budowy przełącznika układu zasilania wykorzystuje się obecnie przekaźniki próżniowe o dużej niezawodności.

Stacja końcowa

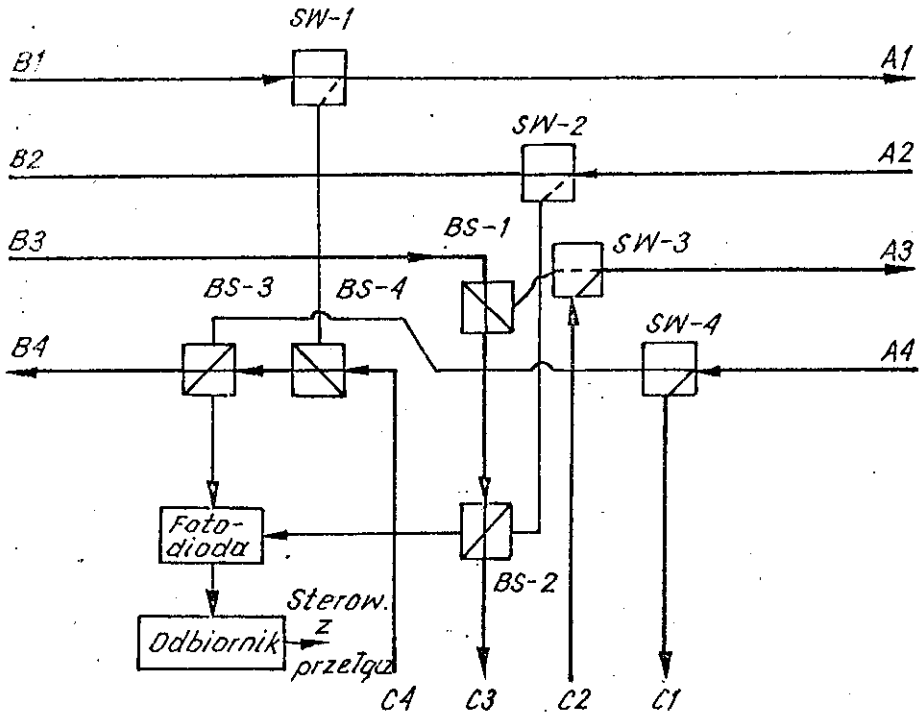


Rys. 6. Zasada przełączania zasilania w podmorskiej światłowodowej sieci odgałęźnej

Na rys. 7 pokazano budowę optycznej i optoelektronicznej części rozgałęźnika światłowodowego obsługującego trzy gałęzie kablowe. W normalnych warunkach pracy układu, bez uszkodzenia żadnego ze światłowodów, transmisja dwukierunkowa utrzymywana jest za pomocą następujących par światłowodów: /C4B4, B3C3/, /C2A3, A4C1/, /B1A1, A2B2/.

Uszkodzenie światłowodu A4C1 powoduje zadziałanie przełączników SW2 i BS2 i przepływ sygnału zastępczą drogą A2C3, natomiast uszkodzenie światłowodu C2A3 - zadziałanie przełączników optycznych BS4 i SW1 i przepływ sygnału drogą C4A1. Uszkodzenie światłowodu A2B2 powoduje zadziałanie przełączników SW4 i BS1 i przepływ sygnału drogą A4B4, a uszkodzenie

światłowodu B1A1 - uszkodzenie przełączników BS1 i SW3 i przepływ sygnału drogą B3A3. Z kolei uszkodzenie dróg C4B4 i B3C3 powoduje przesłanie dowolnymi możliwymi drogami sygnału ze stacji B do stacji A i dalej ze stacji A do stacji C.



Rys. 7. Zasada przełączania światłowódów w podmorskim odgałęźniku światłowodowym bezregeneratorowym
 A, B, C - światłowodowe gałęzie rozgałęźnika; $A_1 \dots A_4$ - światłowody w kablu podmorskim tworzącym gałąź A; SW, BS - elektromechaniczne /lub elektrooptyczne/ przełączniki światłowodowe

Aktualne położenie i funkcje przełączników światłowodowych są sterowane przez optoelektroniczne układy nadzoru. Część optoelektroniczną jednego z takich układów nadzoru przedstawiono także na omawianym rys. 7. Fotodioda lawino-

wa detekuje sygnał z dwóch przełączników BS2 i BS3, a więc ten układ kontroli nadzoruje następujące połączenie: C4B4, A4B4, B3C3, A2C3.

5. UKŁADKA I REPERACJA PODMORSKICH KABLI ŚWIATŁOWODOWYCH

Układka podmorskiego kabla światłowodowego nie różni się w zasadniczy sposób od układki podmorskich kabli współosiowych [1] z wyjątkiem montażu światłowodowych rozgałęźników podmorskich [8, 26, 36]. Rozgałęźniki takie, przewidziane w podmorskich systemach światłowodowych [27], nie były stosowane w podmorskich systemach współosiowych. Ze względu na to, że podmorskie kable światłowodowe są znacznie cieńsze i lżejsze od kabli współosiowych, wzrasta kilkakrotnie długość kabli światłowodowych przewożonych statkami kablowymi. Duże statki kablowe mogą zabierać obecnie jednorazowo nawet do 5 tys. km kabla światłowodowego [23]. Cała operacja układania linii transoceanicznej możliwa jest do przeprowadzenia w jednym etapie. Kabel światłowodowy na statku przechowywany jest /razem z regeneratorami lub bez regeneratorów/ na szpulach o średnicy 3 m.

Kabel światłowodowy może być łączony z podmorskimi stacjami regeneratorskimi na pokładzie statku kablowego bądź w fabryce kablowej. Łączenie na statku jest utrudnione przez gorsze na nim warunki środowiskowe. Wykonywanie ultraniskostratnych spawów światłowodowych i hermetyzowanie obudów stacji wzmacniakowych powinno odbywać się w czystych laboratoriach lądowych.

Łączenie całości linii kablowej w fabryce nie posiada tych wad, ale utrudniony jest znacznie transport dużych długości kabla na statek. Utrudnienia z transportem wynikają także z tego, że obudowa zewnętrzna stacji regeneratorskich, o średnicy kilkunastu cm, może mieć długość do trzech m - łącznie z tymi częściami kabla, które do niej bezpośrednio przylogają i na które nałożony jest dodatkowy obwód przeciwdziałający nadmiernej wygiętości się kabla. Przeciwdziałaniu

występowania nadmiernych naprężeń w obudowie stacji wzmacniakowej ma służyć przegub zastosowany w niektórych konstrukcjach /kable japońskie i amerykańskie/.

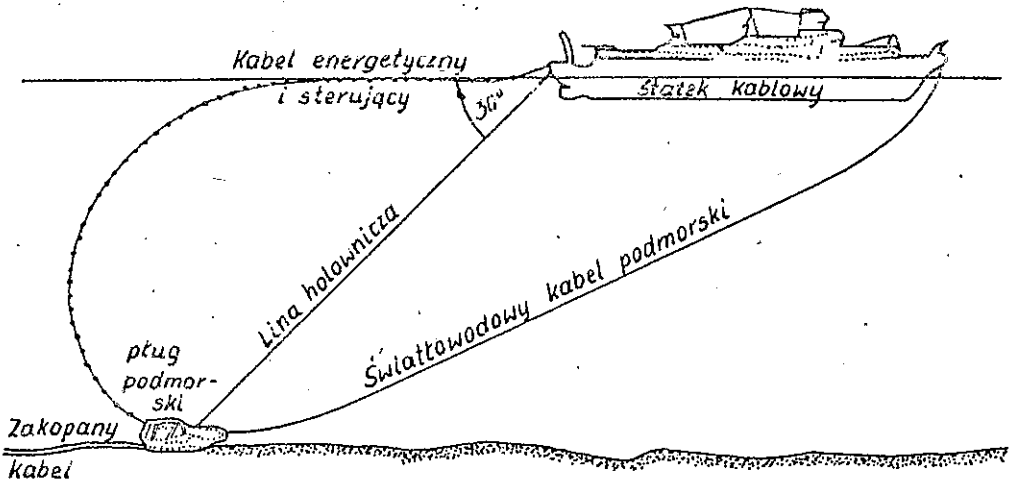
Japończycy, do układania swoich światłowodowych kabli podmorskich wybrali technikę montażu linii na statku. Czysta część procesu odbywa się w kontenerowych kilkupomieszczeniowych laboratoriach, odizolowanych od pozostałych urządzeń. Amerykanie, Francuzi i Anglicy wybrali technikę układania ze statku w ciągłym procesie linii całkowicie zmontowanej w fabryce kablowej [23, 27].

W części pełnomorskiej trasy kabla światłowodowego, z wyjątkiem obszarów aktywnych tektonicznie, o skalistym dnie lub o dużym nachyleniu dna morskiego, przewiduje się układanie jego na najbliższej wersji konstrukcyjnej. Szybkość układania kabla lekkiego lub lekkiego zbrojonego w tych warunkach zawiera się w granicach 2-10 węzłów. Bardziej krytyczne jest układanie kabla w wodach płytszych o głębokości mniejszej niż 1 km, ze względu na niebezpieczeństwo zniszczenia kabla przez kotwicę statku lub trawlerzy rybackie. W trakcie układki kabla trzeba go zakopywać w dnie morza. Na rys. 8 przedstawiono operację zakopywania kabla światłowodowego za pomocą statku i pługu kablowego.

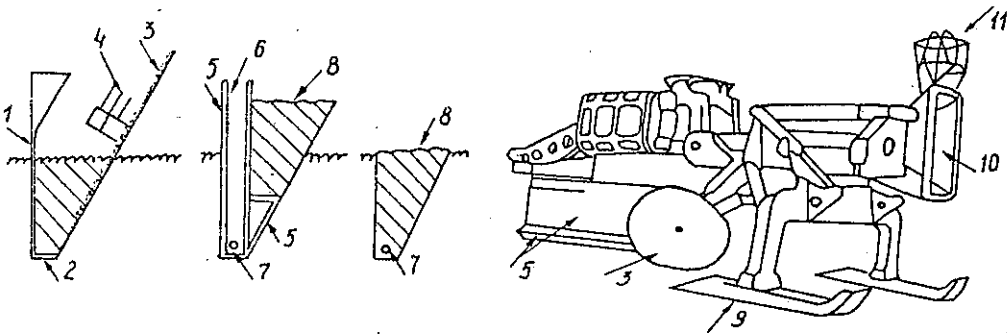
Pokazany na rys. 9 pług angielski /firma BTI Marine Services/ posiada dwuczęściowy lemiesz. Złożony jest on z prostopadłego noża i wirującej tarczy usytuowanej ukośnie. Pług wycina w gruncie trapezową skibę i przesuwa ją na poziomej rampie lemiesza tak skośnie w górę, aby było możliwe opuszczenie na dno powstałej bruzdy podmorskiego kabla światłowodowego.

Na rys. 10 przedstawiono operację układania podmorskiego rozgałęźnika światłowodowego za pomocą jednego statku. Dwa statki kablowe mogą wykonać taką operację bez etapów pośrednich z zatopieniem końca jednej lub obu gałęzi kablowych rozgałęźnika.

Po uszkodzeniu światłowodowego kabla podmorskiego konieczna jest lokalizacja tego uszkodzonego miejsca. Znane są kla-



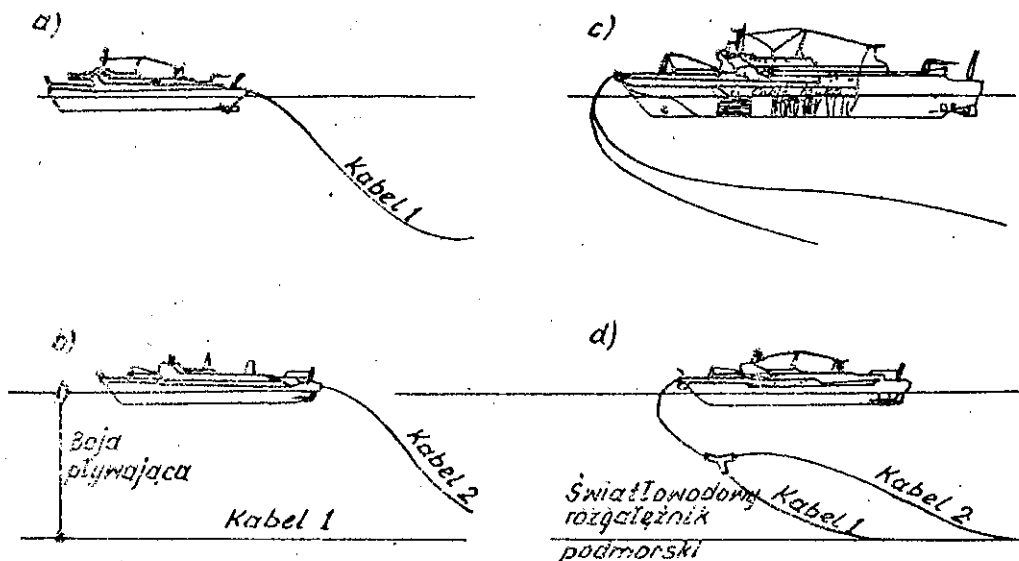
Rys. 8. Zakopywanie podmorskiego kabla światłowodowego za pomocą statku i pługu kablowego



Rys. 9. Budowa podmorskiego pługu kablowego produkcji angielskiej przeznaczonego do układania kabli światłowodowych

a/ zasada działania lemiesza pługu; b/ wygląd zewnętrzny i budowa pługu

1 - ostra krawędź natarcia lemiesza pługu, 2 - pozioma stopa lemiesza, 3 - wirujący nóż tarczowy, który wraz z lemieszem odcina trapezoidalną skibę gruntu z dna morskiego, 4 - silnik elektryczny - napęd noża tarczowego, 5 - stopniowo pogrubiająca się część lemiesza unosząca skośnie do góry skibę wyciętego gruntu, 6 - szczelina w lemieszu służąca do wprowadzenia kabla na dno bruzdy, 7 - światłowodowy kabel podmorski, 8 - skiba gruntu wycięta w dnie morskim, 9 - płyty pługu, 10 - wejście dla kabla, 11 - reflektory, kamery telewizyjne, sonar, hydrofony



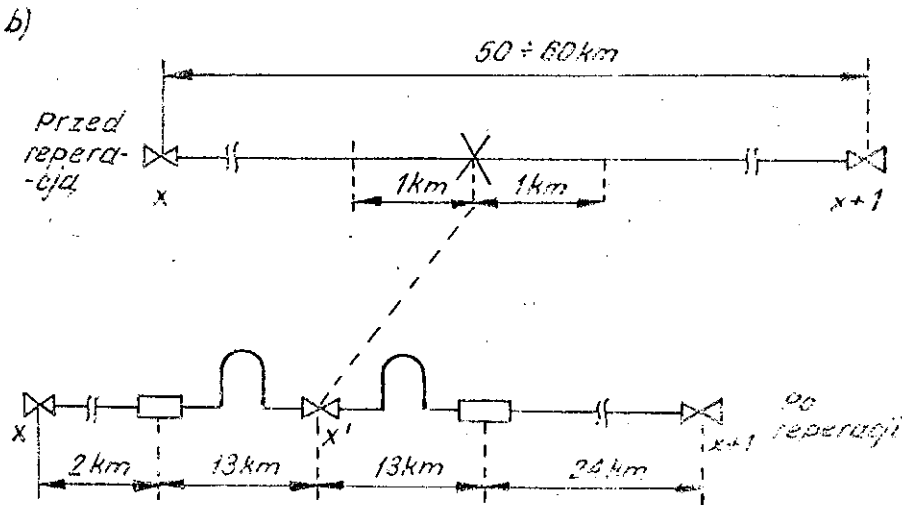
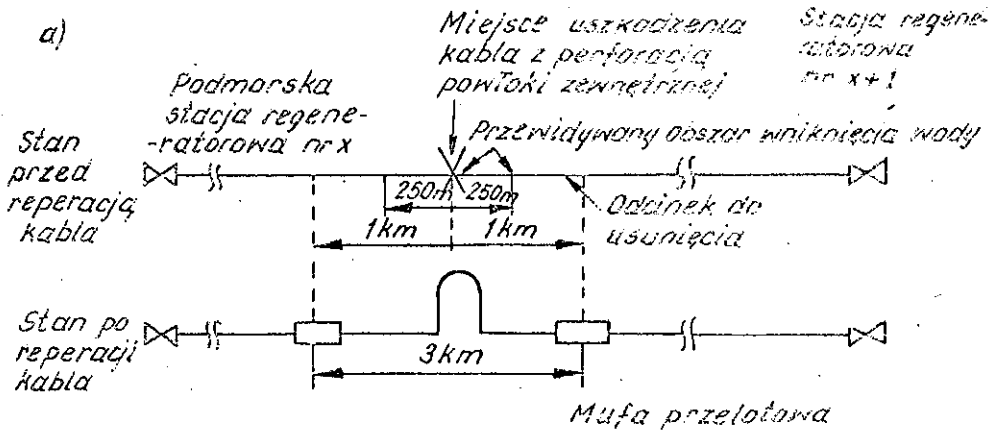
Rys. 10. Układanie światłowodowego rozgałęźnika podmorskiego za pomocą jednego statku kablowego

a/ układanie kablowej gałęzi 1; b/ układanie kablowej gałęzi 2; c/ łączenie gałęzi kablowych w rozgałęźniku; d/ układanie gałęzi głównej

syczne metody lokalizacji uszkodzeń części elektrycznej kabla z żyłami miedzianymi, polegające na pomiarach oporności, upływności i pojemności międzyregeneratorowych odcinków układu zasilania. W przypadku uszkodzenia światłowodu w kablu, w pierwszym etapie dokonywana jest lokalizacja uszkodzonego odcinka międzyregeneratorowego ze stacji końcowych systemu teletransmisyjnego. Następnie poprzez pomiar /przeprowadzony automatycznie z najbliższej stacji regeneratorewej/ metodą optycznego rozproszenia wstecznego może być zlokalizowane miejsce uszkodzenia światłowodu z dokładnością do pojedynczych metrów. Taka procedura postępowania będzie możliwa w systemach drugiej i trzeciej generacji [18, 27]. Wówczas każda stacja regeneratorewa będzie dysponować odpowiednim układem pomiarowym.

Obecnie stosowana technika lokalizacji uszkodzeń wymaga wyłączenia na powierzchnię jednej lub obydwu stacji regeneratorewych, w pobliżu których stwierdzono uszkodzenie światłowodu. Następnie po otwarciu jednej ze stacji regene-

atorowych i dokonania pomiarów rozproszenia wstępnego lokalizuje się miejsce uszkodzenia. Po przecięciu kabla odtwarza się ciągłość drogi optycznej i miejsce reperacji zamienia się w przelotowej mufie kablowej.



Rys. 11. Reperacja światłowodowego kabla podmorskiego polegająca na odtworzeniu jego ciągłości

a/ kable przed i po reperacji umieszczone na dnie morskim w płytce wodzie; b/ kable w głębokiej wodzie

Podczas układania światłowodowego kabla podmorskiego konieczne jest zachowanie pewnego lokalnego nadmiaru jego długości w celu umożliwienia podniesienia go z dużej głębokości dla potrzeb ewentualnej reperacji uszkodzenia. Kabel zwykle układa się nie w linii prostej, ale wzdłuż linii zygzakowatej o okresie zygzaków i amplitudzie zależnej od głębokości wody.

Na rys. 11 przedstawiono schemat uszkodzonego podmorskiego kabla optycznego przed i po reperacji - w dwóch przypadkach przebiegu trasy kablowej: na małej i dużej głębokości. Przyjmuje się eksperymentalnie, że maksymalny wlot wody i możliwe pogorszenie parametrów transmisyjnych światłowodów mogą wystąpić dla 1 km długości kabla w obu kierunkach od miejsca nieszczelności pokrycia zewnętrznego.

Dla kabla ułożonego płytko łącznie usuwa się 2 km kabla, wstawiając w to miejsce trzy kilometry nowego kabla i wykonując dwie dodatkowe mufy łączące przelotowe. Dla kabla położonego głęboko, w miejscu uszkodzenia, jeśli jest ono w pobliżu środka odcinka międzyregeneratorowego, wstawia się dodatkową stację regeneratorową. Po obu stronach tej nowej stacji przyłącza się dodatkowe odcinki kabla o długości co najmniej kilkunastu kilometrów. Te odcinki kabla mają zapobiec nadmiernemu skróceniu lokalnych odległości międzywzmacniakowych, tak aby nie wystąpiło zjawisko nasycania się odbiorników optoelektronicznych.

6. PODMORSKIE STACJE REGENERATOROWE

Podmorska stacja regeneratorowa współpracująca z kablem zawierającym trzy pary światłowodów składa się [15, 18, 23] z:

- sześciu regeneratorów,
- wspólnego dla regeneratorów zespołu układów nadzoru typu "in line" i typu "off line", oraz
- układów zasilania.

Stację umieszczono w cylindrycznej obudowie odpornej na udary mechaniczne i wysokie ciśnienie. Każdy z regeneratorów w stacji obsługuje jeden światłowód i posiada następujące układy w rozwiązaniu modułowym:

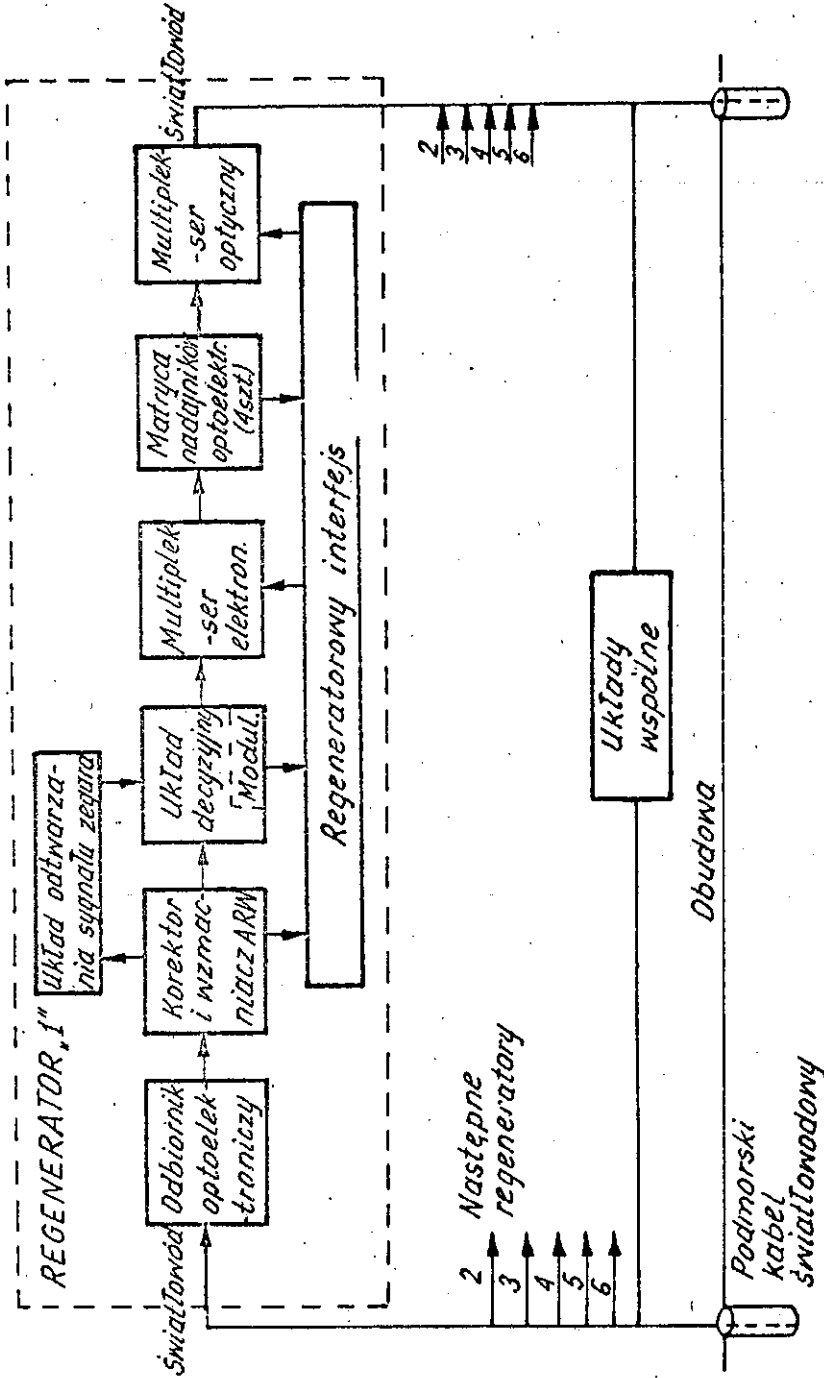
- odbiornik optoelektroniczny /czasami dwa odbiorniki na jeden światłowód/,
- impulsowy układ korekcyjny oraz wzmacniacz o automatycznie regulowanym wzmacnieniu,
- logiczny układ decyzyjny,
- układ odtwarzania sygnału zegara,
- multiplexer elektryczny i optyczny,
- od dwóch do czterech nadajników laserowych, nazywanych modułami nadawczymi, na jeden światłowód,
- regeneratory interfejs nadzorczy.

Ogólny schemat blokowy stacji przedstawiono na rys. 12.

W warunkach eksploatacji podmorskiej stacja regeneratoryjna jest stosunkowo niedostępna i koszty jej wymiany bądź reperacji są bardzo wysokie. Jedyną drogą uzyskania odpowiednio niskich kosztów eksploatacji systemu jest ustalenie odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności technicznej stacji. Czas bezawaryjnej pracy podmorskiej stacji regeneratoryjnej przewidziany jest na 25 lat. Natomiast czas międzyawaryjny całego światłowodowego systemu teletransmisyjnego określono na ponad 10 lat.

Miarą niezawodności jest jednostka FIT określająca jedno dopuszczalne uszkodzenie systemu na 10^9 godzin pracy w warunkach nominalnych.

Spełnienie tego podstawowego wymagania technicznego jest możliwe tylko wówczas, gdy czas bezawaryjnej pracy poszczególnych elementów i układów stacji jest wielokrotnie dłuższy [9, 18]. Niezawodność jest złożoną funkcją wymaganych parametrów pracy stacji: elektrycznych, optycznych, termicznych i mechanicznych. Niektóre z tych parametrów zebrano w tabl.4.



Rys. 12. Schemat blokowy podmorskiej stacji regeneratorów optoelektronicznych przeznaczonych dla teletransmisyjnych systemów dalekosiężnych

Układy wspólne obejmują: 1 - transpozycję połączeń elektrycznych, 2 - realizację optycznych pętli wstecznych, 3 - modulację fazy, 4 - układy logiczne i liniowe nadzoru, 5 - układy zasilania.

Parametry optoelektronicznej stacji regeneratorskiej
dla podmorskich światłowodowych systemów teletransmisyjnych

Parametr	Jedno- atka	System pierwszej generacji	System drugiej genera- cji
Liczba regeneratorów w stacji	szt.	6	6; 12
Optyczna moc wyjściowa regeneratora	dBm	0 ± 4	+5 ± 0
Czułość wejściowa regeneratora dla 300 Mbit/s i BER = 10 ⁻¹⁰	dBm	-34 ± -40	-40 ± -50
Minimalny optyczny zakres dynamiczny	dB	25	30 ± 40
Maksymalne zmniejszenia fazy impulsu optycznego	deg ² /MHz	15	10
Prąd zasilający	A	1,6	0,5 ± 1
Spadek napięcia w stacji	V	20 ± 60	10 ± 20
Moc elektryczna na stację regenera- torową	W	30 ± 100	30
Maksymalne dopuszczalne zużycie mocy przez jeden układ scalony w stacji	W	1	0,5
Liczba układów scalonych w regenera- torze	szt.	5	3 ± 4
Liczba układów scalonych nadzoru i zasilania w stacji regeneratorskiej	szt.	14	10 ± 12
Całkowita liczba układów scalonych w stacji	szt.	44	30 ± 35
Liczba laserów na światłowód	szt.	2 ± 4	1 ± 2
Liczba laserów w stacji	szt.	24	12
Liczba fotodiod w stacji	szt.	30; 36	18
Napięcie zasilania układów scalonych	V	6	2
Maksymalna temperatura elementów aktywnych	°C	50 ± 65	50
Maksymalne różnice temperatur pomię- dzy masą stacji i otoczeniem wodnym	°C	6	4
Rezystancja termiczna obudowy stacji w powietrzu w wodzie	K/W	0,3 0,15	- 0,1
Odporność na uderzenia	ε	50	50
Odporność na drgania w zakresie częstotliwości 5-500 Hz	ε	3	3
Niezawodność regeneratora	FIT	10	-
Niezawodność stacji	FIT	64	-

Niezawodność zależy również od technologii, konstrukcji układów elektronicznych i optoelektronicznych oraz rodzaju obudowy stacji.

W przypadku występowania w stacji układów i elementów o różnych niezawodnościach, niezawodność całego systemu jest w dużej mierze określona przez tzw. najslabsze ogniwo systemu. W takiej sytuacji konieczne jest zapewnienie odpowiednich redundancji układowych w odniesieniu do tych elementów, które nie mają odpowiednich niezawodności. W przypadku optoelektronicznej stacji regeneratorskiej tym najslabszym ogniwem w chwili obecnej jest niewątpliwie laser półprzewodnikowy [18, 31, 32]. Z tego względu moduły nadawcze w podmorskiej stacji regeneratorskiej są zwielokrotnione od 2 do 4 razy dla indywidualnego toru światłowodowego.

Uzyskanie bardzo dużej niezawodności pracy podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorskiej - rzędu 10^8 godzin pracy bez awarii, czyli powyżej 10 tys. lat - wymaga [23]:

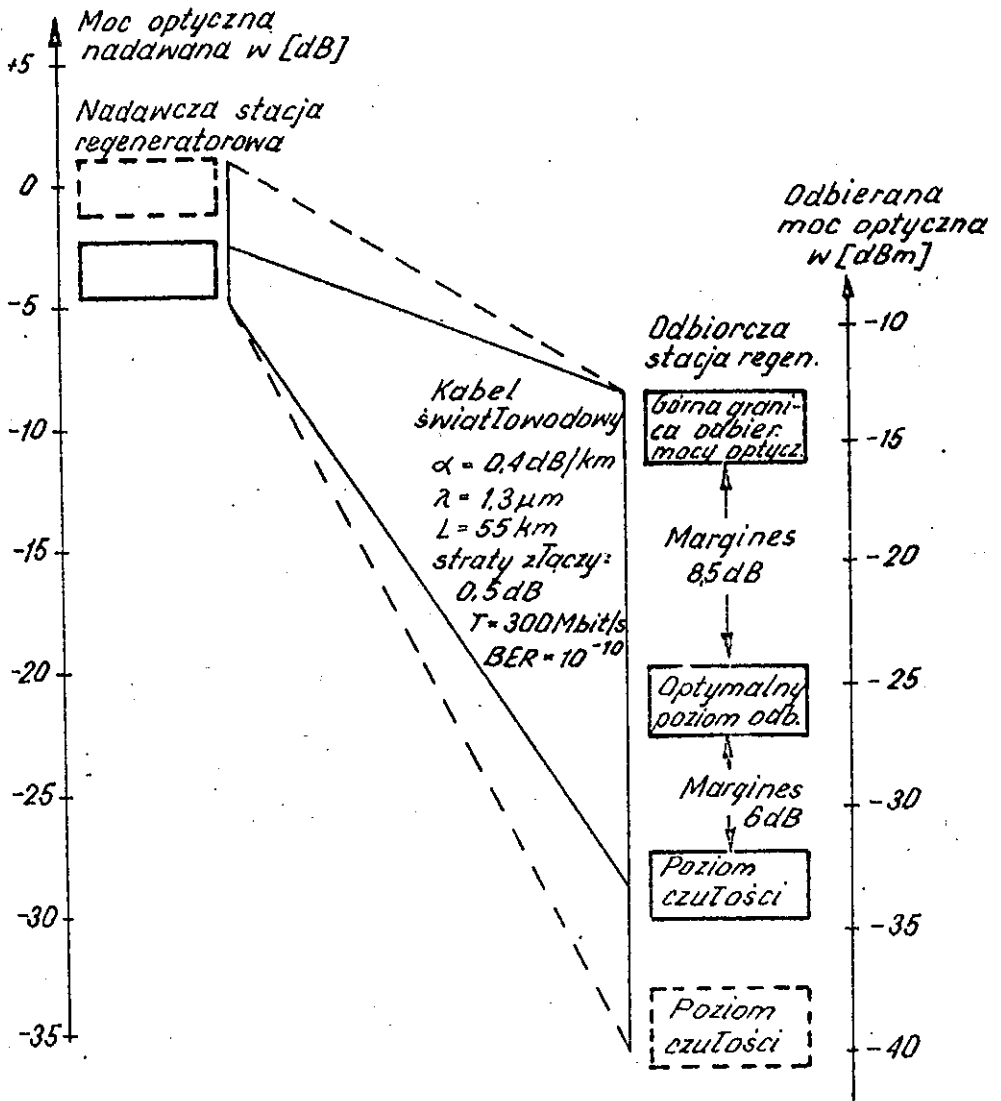
- minimalizacji liczby zastępowanych w stacji układów aktywnych, o znormalizowanej technologii wysokiej skali integracji; w perspektywie minimalizacja liczby układów elektronicznych na rzecz układów optoelektronicznych;
- minimalizacji zużycia mocy elektrycznej przez stację -
- w perspektywie do poniżej 10 W /takie jest obecnie zużycie mocy elektrycznej przez stację regeneratorską teletransmisyjnego systemu podmorskiego z kablami współosiowymi/; obecnie moc zużywana przez stację optoelektroniczną jest w zakresie 100-30 W dla sześciu regeneratorskich;
- minimalizacji przyrostu temperatury wewnątrz stacji poprzez zmniejszenie całkowitej rezystancji termicznej obudowy;
- bardzo dużej odporności stacji na oddziaływania mechaniczne: uderzenia, drgania, wysokie ciśnienie;
- wszechstronnego zabezpieczenia i nadzoru wszystkich układów stacji oraz zapewnienia ich odpowiedniej redundancji;
- pozostawienia odpowiedniego marginesu wzmoocnienia.

Konstrukcja układów podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorskiej jest następująca. Każdy moduł regeneratorski wykonano w technologii hybrydowego układu scalonego. Częścią główną modułu jest odpowiedni układ scalony VLSI i ewentualnie inne elementy aktywne dyskretne oraz dodatkowe elementy biernie - filtrujące, zasilające, zabezpieczające. Hybrydowe układy wszystkich modułów zmontowano na płytach ze szlachetnej ceramiki, np. alundowej, i zamknięto w szczelnych obudowach metalowych.

Moduły tworzące regeneratorski zmontowano na płycie drukowanej i ponownie zamknięto w indywidualne obudowy. Układy nadzoru i zasilania także posiadają odrębne, szczelne obudowy modułowe. Usytuowanie przestrzenne obudów wewnątrz stacji jest tak wykonane, aby zapewnić minimalną rezystancję termiczną od elementów aktywnych generujących ciepło do zewnętrznej obudowy stacji i maksymalną odporność mechaniczną całości.

Koszt podmorskich stacji regeneratorskich wchodzących w skład światłowodowego systemu transoceanicznego wynosi 30-35% całości kosztów systemu pierwszej generacji. Odległość międzyregeneratorska w tych systemach jest stosunkowo niewielka i jej zmiana o $\pm 10\%$ zmienia koszt systemu o $\pm 3\%$, a więc stosunkowo niewiele. Jest to charakterystyczna cecha podmorskich systemów pierwszej generacji. Odległość międzyregeneratorska decyduje znacznie bardziej w tym przypadku o czasie życia systemu i jego niezawodności, a więc o kosztach eksploatacji, niż samym koszcie systemu. Sytuacja ta ulegnie zasadniczej zmianie dla systemów drugiej generacji, w których odległość międzyregeneratorska jest kilkukrotnie większa.

Na rys. 13 przedstawiono bilans mocy optycznej dla jednego odcinka międzyregeneratorskiego światłowodowego systemu transoceanicznego pierwszej generacji. Linia przerywaną wskazano graniczne możliwości rozwoju tego typu systemów. Natomiast linią ciągłą zaznaczono parametry systemów obecnie konstruowanych i pracujących.



Rys. 13. Bilans mocy optycznej dla odcinka międzyregeneratorskiego światłowodowego systemu telotransmisyjnego podmorskiego pierwszej generacji

- - potencjalno możliwości systemów pierwszej generacji,
- - parametry systemów projektowanych na lata 1988-90 oraz systemów obecnie eksploatowanych

7. ODBIORNIK OPTOELEKTRONICZNY

7.1. Budowa odbiornika

Odbiornik optyczny składa się z fotodiody i monolitycznego przedwzmacniacza transimpedancyjnego. Przedwzmacniacz wyposażono w układ detekcji i tłumienia zjawiska kaskadowej akumulacji zniekształceń fazowych impulsów optycznych. W odbiorniku są stosowane fotodiody następujących typów:

- planarna PIN z InGaAs - zastosowana w systemach amerykańskich i angielskich;
- lawinowa germanowa - zastosowana w systemach japońskich.

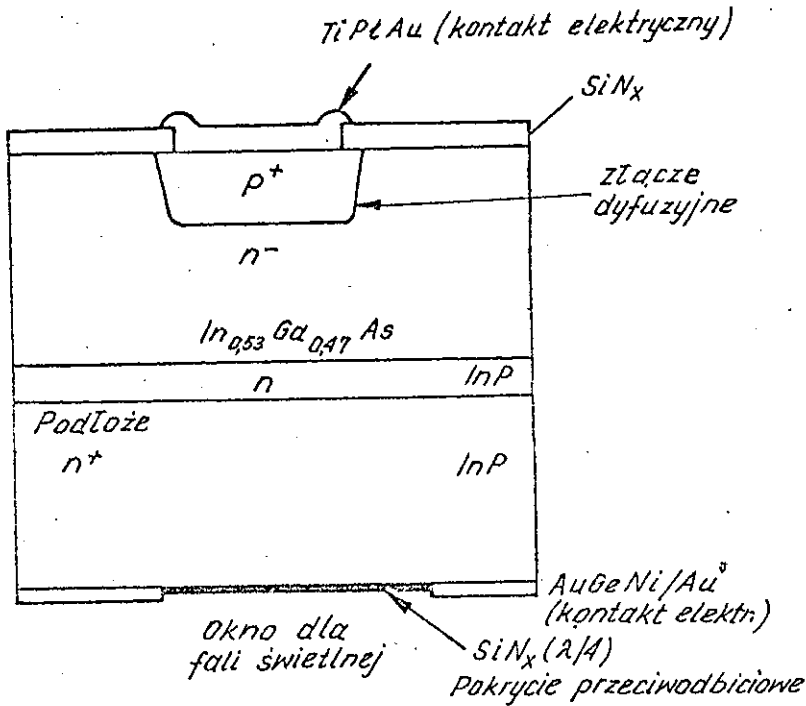
Sprawność konwersji fotodiody PIN wynosi 0,8 A/W dla pasm 1,3 i 1,6 μm . Jakość odbiornika zależy nie tylko od sprawności konwersji optoelektronicznej, ale i od jak najmniejszej wartości pojemności złączeniowej fotodiody. Pojemność ta wpływa na szum i pasmo przedwzmacniacza, a zależy od powierzchni fotodiody i koncentracji domieszek w obszarze aktywnym. W najlepszych fotodiodach pojemność ta jest mniejsza od 0,3 pF przy napięciu polaryzacji -10 V. Parametry stosowanych w systemach podmorskich fotodiod zebrano w tabeli 5, a konstrukcję fotodiody typu heterostrukturnego przedstawiono na rys. 14.

Fotodiodę zamknięto w hermetycznej obudowie z dołączonym na stałe światłowodem. Połączenia wewnątrz obudowy są optymalizowane ze względu na minimum pojemności pomiędzy fotodiodą i przedwzmacniaczem oraz maksymalną wytrzymałość mechaniczną. Obudowę fotodiody zamocowano na ceramicznym podłożu hybrydowego układu zintegrowanego. Na tym samym podłożu zamocowano też monolityczny układ przedwzmacniacza wykonany w technologii VLSI. Układ ten posiada częstotliwość graniczną 1 GHz /systemy francuskie/, 5 GHz /systemy amerykańskie pierwszej generacji/ i jest optymalizowany szumowo. Całość odbiornika jest hermetycznie zamknięta w obudowie modułowej z odpowiednimi wyprowadzeniami: współosiowym dla sygnału,

Tablica 5

Parametry fotodiod dla podmorskiej stacji regeneratorskiej

Rodzaj fotodiody	PIN z InGaAs	Lawinowa Ge APD	Linowa planarna na Germanowa
Funkcja w układzie	odbiorcza	odbiorcza	monitorująca
Sprawność kwantowa [A/W] dla 1,3 i 1,6 μm	0,8		0,7
Pojemność całkowita [pF] dla $U_R = -10 V$	0,25		kilkadziesiąt
Prąd upływu średni dla $U_R = -10 V$ [nA]	20		5000
Czas narastania impulsu [ps] dla długości fali 1,3 i 1,6 μm	mniej niż 100	mniej niż 100	nie istotne
Średnica obszaru czynnego [μm]	10	10	800
Rodzaj obudowy	hermetyzowana z włókna	hermetyzowana z włókna	hermetyzowana z laserem i włókna
Wewnętrzne wzmocnienie [dB]	patrz: sprawność kwantowa	10	patrz: sprawność kwantowa



Rys. 14. Budowa fotodiody heterostrukturanej dla światłowodowego systemu podmorskiego pierwszej generacji

zasilania i nadzoru. Z kolei modułową obudowę odbiornika zamocowano na płycie drukowanej regeneratora.

Dla wejściowej mocy optycznej ok. -40 dB odbiornik przeznaczony do podmorskiej stacji regeneratorskiej teletransmisyjnego systemu transoceanicznego dokonuje konwersji sygnału ze stopą błędów nie większą od 10^{-9} - 10^{-10} . Zakres dynamiczny odbiornika dla systemu pierwszej generacji jest większy od 25 dB optycznych.

Niektóre rozwiązania układów podmorskiej stacji regeneratorskiej zawierają dwa niezależne odbiorniki optoelektroniczne. Odbiornik redundancyjny jest włączany w tor transmisyjny za pomocą wejściowego multiplexera światłowodowego [20]. W pierwszych wersjach konstrukcyjnych stacji regeneratorsko-

wych multipleksery te są typu elektromechanicznego, w których koniecznie jest mechaniczne przesunięcie rozciątych światłowodów. W następnych generacjach systemów układy te zostaną zastąpione wyłącznie urządzeniami optoelektronicznymi w rozwiązaniu światłowodowym lub planarnym [22].

Wejściowe multipleksery światłowodowe są podobnej konstrukcji do multiplekserów wyjściowych połączonych z laserami. Zastosowanie w stacji regeneratorowej obu typów multiplekserów światłowodowych, o odpowiedniej konstrukcji wyłącznie optycznej, pozwala na tworzenie złożonych pętli transmisyjnych całkowicie optycznych. Celem konstrukcji takich pętli może być, np. całkowite lub częściowe, pominięcie jednej stacji regeneratorowej lub wybranych jej części.

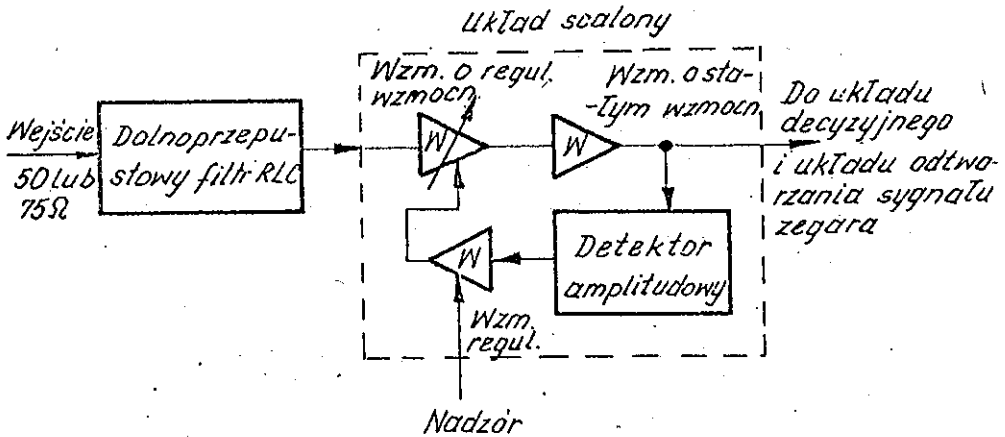
7.2. Wzmacniacz korektor z regulowanym wzmacnieniem

Moduł wzmacniacza korektora zapewnia na wyjściu korekcję kształtu impulsów i odpowiednią amplitudę impulsów wyjściowych, niezależnie od amplitudy impulsów wejściowych /w zakresie nominalnej wartości tych impulsów/. Kształt impulsów jest korygowany zgodnie z charakterystyką Nyquista, co pozwala na najlepszy kompromis pomiędzy czułością urządzenia i tolerancją na zniekształcenia impulsów wejściowych /tj. zmiany amplitudy, fazy, zachodzenie na siebie/. Schemat blokowy układu wzmacniacza korektora dla podmorskiego regeneratora optoelektronicznego przedstawiono na rys. 15.

Wzmacniacz regulowany posiada zmienne wzmacnienie w zakresie od zera do ok. 200. Pozwala to utrzymać stały poziom impulsów wyjściowych z dokładnością do kilku procent w zakresie kilkusetkrotnych zmian poziomu impulsów wejściowych. Poziom sygnału wyjściowego jest stałym parametrem układu i ustalany jest zazwyczaj przez laserowe trymowanie odpowiedniego rezystora cienkowarstwowego, umieszczonego w hybrydowym układzie scalonym tworzącym moduł wzmacniacza korektora.

Sygnałom wyjściowym z modułu wzmacniacza korektora, oprócz ciągu wzmacnionych impulsów, jest również napięcie proporcjonalne do chwilowej wartości wzmacnienia układu. Napięcie to

stanowi miarę mocy optycznego sygnału wejściowego. Ponieważ jest ono odwrotnie proporcjonalne do mocy wejściowej, więc tego rodzaju miara jest najbardziej dokładna dla krytycznego małego poziomu sygnału wejściowego.



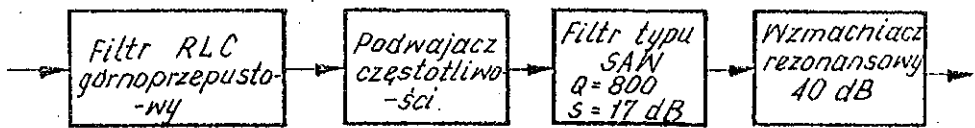
Rys. 15. Schemat blokowy układu wzmacniacza korektora w podmorskim regeneratorsie optoelektronicznym

Wszystkie elementy aktywnie wzmacniacza - korektora są zrealizowane w postaci monolitycznego układu scalonego. Układ zawiera dwa wzmacniacze o stałym i zmiennym wzmacnieniu. Element nieliniowy /tzw. detektor amplitudy/ detekuje poziom sygnału wyjściowego. Sygnał ten podawany jest gałęzią sprzężenia zwrotnego, w której znajduje się wzmacniacz regulacyjny. Wzmacniacz regulacyjny porównuje ten sygnał ze stabilnym sygnałem odniesienia i w wyniku tego porównania tak wpływa na wzmacniacz o zmiennym wzmacnieniu, aby utrzymać na niezmiennym poziomie sygnał wyjściowy.

7.3. Układ odtwarzania sygnału zegara

Układ odtwarzania sygnału zegara, nazywany dalej zegarem lokalnym, zawiera /por. rys. 16/:

- bierny filtr wejściowy,
- element nieliniowy podwajający częstotliwość,
- filtr wąskopasmowy o częstotliwości środkowej f_x równej liczbowo szybkości transmisji informacji wyrażonej w Mbit/s,
- wzmacniacz rezonansowy.



Rys. 16. Schemat blokowy układu odtwarzania sygnału zegara w regeneratorze optoelektronicznym

Filtr wejściowy to górnoprzepustowy filtr RLC, którego celem jest wyizolowanie z sygnału impulsowego, pasma częstotliwości symetrycznego względem $f_x/2$.

Element nieliniowy posiada symetryczną charakterystykę częstotliwości i służy jako podwajacz częstotliwości.

Filtr wąskopasmowy jest urządzeniem z akustycznymi falami powierzchniowymi. Przeciętą dobroć tego typu filtra wynosi 800, a straty sygnałowe 17 dB. Kolejny człon układu - wzmacniacz o wzmocnieniu większym niż 40 dB kompensuje straty sygnałowe w filtrze i zapewnia odpowiedni poziom wyjściowy sygnału.

Podobnie jak we wzmacniaczu - korektorze wszystkie układy aktywne zegara lokalnego są zrealizowane w postaci takiego samego monolitycznego układu scalonego. Do celów odtwarzania sygnału zegara wykorzystuje się wzmacniacz szerokopasmowy i element nieliniowy z układu opisanego poprzednio. Pozostałe układy są realizowane w module układu odtwarzania sygnału zegara w technologii zintegrowanych hybrydowo układów.

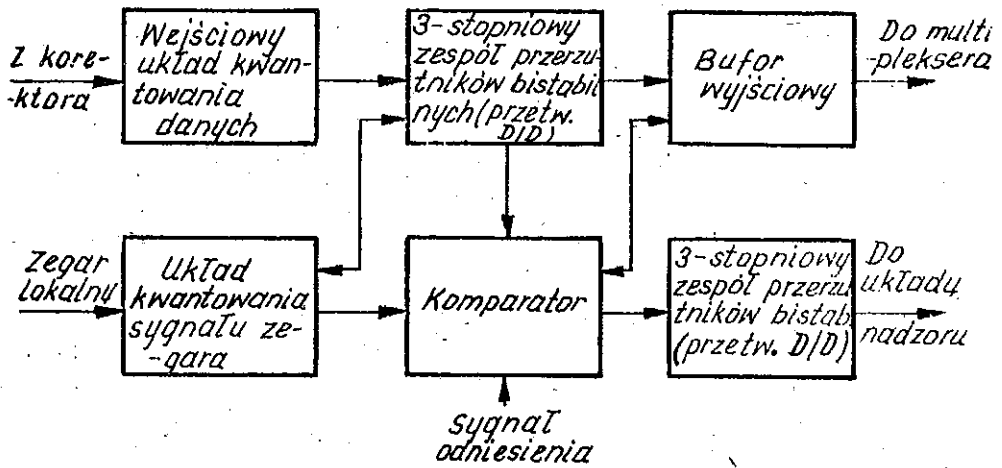
Od zegara lokalnego wymaga się odpowiedniej stałości fazy sygnału tego zegara w funkcji czasu i ewentualnie zmiennych warunków środowiskowych. Wymagana w systemie teletransmisyjnym tego typu spektralna gęstość zniekształceń fazowych wynosząca $15 \text{ deg}^2/\text{MHz}$ [14, 15, 16] nakłada warunek stabilności fazy sygnału w granicach 0,25 rad. Wymagania dotyczące stabilności fazy zawierają także warunki na kształt funkcji transmisji fazy tego układu. Funkcja ta musi być monotoniczna w całym pasmie; jej nachylenie nie może przekroczyć określonych ograniczeń wynikłych ze stabilności układu oraz jego właściwości szumowych.

7.4. Moduł decyzyjny

Podstawową funkcją modułu decyzyjnego jest rekonstrukcja z założoną dokładnością pełnego transmisyjnego sygnału impulsowego, tzn. amplitudy i położenia czasowego impulsów elektrycznych. Sygnałami wejściowymi dla modułu decyzyjnego są sygnały z układu wzmacniacza korektora i zegara lokalnego. Zapewnienie dostatecznego stopnia niezawodności regeneratora wymaga, aby moduł decyzyjny pracował prawidłowo - nawet w przypadku całkowitego uszkodzenia zegara lokalnego. Takie uszkodzenie powoduje wzrost zniekształceń fazowych, lecz bez utraty ciągłości działania regeneratora. Moduł decyzyjny posiada również układy pozwalające na pomiar w czasie rzeczywistym pracy /in line/ bieżącej wartości stopnia błędów regeneratora oraz układ komunikacji z regeneratorem interfejsem nadzorczym - za pomocą bitów parzystości /rys. 17/.

Zasadniczy proces rekonstrukcji sygnału zachodzi w tzw. układzie kwantowania, który ustala poziom każdego impulsu na logicznie 0 lub logiczną 1, oraz przerzutniku bistabilnym z opóźnieniem, który zmienia swój stan w takt sygnału zegara i w buforze wyjściowym.

Układ zabezpieczający przed uszkodzeniem zegara lokalnego zawiera detektor poziomu sygnału zegara. Jeśli sygnał zegara spadnie poniżej ustalonego poziomu, wówczas układ kon-



Rys. 17. Schemat blokowy modułu decyzyjnego dla podmorskiego regeneratora optoelektronicznego.

trolli nie przełącza bistabilnych przerzutników opóźniających, czyniąc z nich dodatkowy układ kwantujący w torze głównym modułu decyzyjnego. Impulsy w torze głównym są przekazywane od wejścia do wyjścia bez regeneracji ich prawidłowych położenia czasowych.

Układ kontroli błędów i detekcji sygnału nadzoru zawiera konwerter kodu typu bez powrotu do zera /powrót do zera^{x/} i przerzutnik bistabilny. Średnia wartość sygnału wyjściowego tego układu zmienia się w funkcji obecności bitów parzystości sygnałów nadzoru lub bitów błędnych.

8. NADAJNIK OPTOELEKTRONICZNY

8.1. Budowa zespołu układów nadawczych

Zespół układów nadawczych regeneratora zawiera [16, 36]:

- multiplexer elektroniczny,

^{x/} Ang. NRZ/RZ.

- do czterech modułowych nadajników laserowych,
- multiplekser optyczny.

Wejście jednego z optoelektronicznych modułów nadawczych wybrane przez multiplekser optoelektroniczny jest podłączone do elektronicznego układu transpozycji i tworzenia pętli zwrotnych. Wyjście tego nadajnika jest jednocześnie wybrane przez multiplekser optyczny i dołączone do światłowodu wyjściowego. Wszystkie te funkcje zespołu są kontrolowane przez układy nadzoru.

Poprzez układy nadzoru, zespoły układów nadawczych wszystkich regeneratorów połączono elektrycznie wzajemnie ze sobą. W ten sposób możliwe jest połączenie dowolnego modułu nadawczego z dowolnym odbiornikiem optoelektronicznym w ramach stacji regeneratorów. Tendencje rozwojowe budowy zespołu układów nadawczych podążają w kierunku zwiększenia roli multipleksowania optycznego, a więc bezpośredniego przełączania światłowodowych kanałów transmisyjnych.

Zespół układów nadawczych x-tej stacji regeneratorowej umożliwia w takim przypadku połączenie lasera pracującego w kierunku A-B z odbiornikiem pracującym w kierunku B-A. Taka konfiguracja połączeń jest obecnie możliwa do wykonania na drodze elektronicznej, a w przyszłości będzie możliwa do wykonania na drodze całkowicie optycznej. W x+1-ej stacji regeneratorowej zespół układów nadawczych może tak kierować sygnał, że zostanie on "zapętłony" pomiędzy obiema stacjami. Takie stworzenie pętli zwrotnej ma na celu sprawdzenie lokalnej jakości transmisji na tym odcinku traktu lub lokalizację uszkodzenia.

8.2. Lasery półprzewodnikowe

Źródłami sygnału optycznego w podmorskich stacjach regeneratorskich są wyłącznie jednomodowe lasery półprzewodnikowe dużej mocy [31, 32]. Jednomodowa praca tych laserów musi być zapewniona także przy ich pracy impulsowej. Obecnie pod-

stawowym zagadnieniem związanym z zastosowaniem laserów półprzewodnikowych w podmorskiej stacji regeneracyjnej jest ich niezawodność.

Znane są podstawowe mechanizmy degradacji laserów półprzewodnikowych. Zwiększono ostatnio istotnie ich trwałość do ponad 10^7 godzin. A mimo to bardzo trudno jest nadal wybrać z dużej partii laserów te, które na pewno nie ulegną degradacji katastrofalnej w stosunkowo krótkim czasie. Lasery niższej jakości podlegają szybszej degradacji, objawiającej się np. szybszym wzrostem prądu progowego w czasie eksploatacji diody. Jednak, wśród laserów najwyższej jakości znajdują się także takie elementy, których proces degradacji katastroficznej rozpoczyna się dopiero po kilku - kilkunastu tysiącach godzin pracy. Lasery najwyższej jakości wybiera się takie, których parametry optyczne i elektryczne /emisyjne/ nie zmieniają się prawie w ogóle w czasie starzenia laboratoryjnego i pierwszego okresu pracy. Elementy takie posiadają także najniższy prąd progowy w danej serii technologicznej. Jednakże elementów takich, które ulegną szybkiemu uszkodzeniu, nie można obecnie wyeliminować w trakcie rutynowych pomiarów nie niszczących. Za zjawisko bardzo powolnej degradacji jest odpowiedzialną powolną migrację dyslokacji sieci krystalicznej w pobliże aktywnego obszaru lasera.

Do głównych parametrów elektrycznych lasera, istotnych z punktu widzenia jego działania w podmorskiej stacji regeneracyjnej, zaliczamy: prąd progowy, pojemność diody, maksymalną dopuszczalną gęstość prądu pobudzającego. Natomiast do głównych parametrów optycznych lasera zaliczamy: czas opadania i narastania impulsu optycznego, rozbieżność wiązki wyjściowej, moc optyczną przekazywaną w modzie podstawowym oraz szerokość spektralną. Wymienione parametry dla laserów mających pracować w systemach podmorskich pierwszej i drugiej generacji zestawiono w tabeli 6.

Prąd progowy lasera, który zależy głównie od wymiarów obszaru aktywnego i jakości kryształu, decyduje o mocy strat w diodzie, a więc o temperaturze złącza, a w ostatecznej kon-

Lasery półprzewodnikowe z InGaAsP dla podmorskich stacji regeneratorycznych

Parametry lasera	System pierwszej generacji	System drugiej generacji
Minimalny wymagany ekonomicznie czas życia lasera [godz.]	1×10^7	10^9
Minimalna dopuszczalna szybkość działania t_r/t_f [ns]	0,7/0,9	0,1 - 0,3
Maksymalny dopuszczalny prąd progowy I_{th} [mA] dla 20°C	30 - 60	10
Nominalny prąd pracy [mA]	$I_{th} + 40$	$I_{th} + 10$
Optyczna moc wyjściowa w wodzie podstawowym laserem [mW] / laser bez światłowodu	5 - 10	2 - 3
Rozbieżność wiązki w polu dalekim stopnie	11×30	
Wymiary obszaru aktywnego [μm]	8×2	6×3
Sprawność sprzężenia ze światłowodem [%] Światłowód jednomodowy o $NA=0,1$	30 - 40	50 - 70
Szerokość spektralna [nm]	0,1	0,05

sekwencji - o czasie jej życia. W warunkach laboratoryjnych uzyskuje się lasery o prądzie progowym poniżej 10 mA. W praktyce przewiduje się zastosowanie - w systemach pierwszej generacji - laserów o prądzie progowym w zakresie 30-50 mA.

Współczesne lasery półprzewodnikowe charakteryzują się szybkością działania znacznie przekraczającą obecne potrzeby projektowanych światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich. W laboratoryjnych diodach laserowych z łatwością otrzymuje się pasmą w zakresie kilku GHz. Rekordowe osiągnięcia w tym zakresie przekraczają 12-15 GHz [31, 32].

Diodę laserową dla systemów podmorskich zbudowano z materiału czteroskładnikowego, za pomocą technologii epitaksji z fazy ciekłej. Proces epitaksji jest wykonywany na podłożu o wytrawionym rowku dla obszaru aktywnego. Zewnętrzne kontakty elektryczne przygotowano w postaci niskorezystancyjnych dyfuzyjnych złączy Schottky'ego. Metalizację warstwową wykonuje się z tytanu, platyny i złota.

Diodę laserową montuje się na masie termicznej o dużej pojemności cieplnej. Masę wykonuje się ze szlachetnej ceramiki BeO /w rozwiązaniach tańszych/ lub z diamentu. Diodę przyłutowuje się do masy za pomocą lutu złotego będącego eutektycznym stopem złota i cyny w proporcji 80/20. Materiał ten jest jednym z najbardziej stabilnych termicznie i elektrycznie lutów nie wykazujących zjawiska elektromigracji. Złote przewody łączące są mocowane metodą termokompresji.

Lasery półprzewodnikowe stosowane w teletransmisyjnych systemach lądowych i podmorskich w zasadniczo sposób nie różnią się między sobą. Natomiast występuje znaczna różnica w ich montażu i obudowie. Bezpośrednią obudowę lasera wykonano z najwyższej jakości stali narzędziowej platerowanej nikiem i złotem. Obudowa zawiera: laser z masą termiczną, fotodiodę monitorującą, doprowadzenia elektryczne i zakończenie światłowodu.

Najbardziej krytyczne jest tutaj precyzyjne połączenie lasera ze światłowodem i utrzymanie stabilności tego połączenia, ze względu na występujące zjawiska dylatacji termicz-

noji. Wymagana dokładność justacji optycznej wynosi w tym przypadku $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Końcówka światłowodowa wchodząca do obudowy lasera poprzez precyzyjną rurkę niklową jest metalizowana i lutowana do rurki tak, aby uzyskać całkowitą szczelność przepustu optycznego. Koniec rurki wewnątrz obudowy jest lutowany do masy termicznej lasera z zastosowaniem techniki ultraprecyzyjnego mikropozyjonowania w taki sposób, aby sprzężenie optyczne było optymalne. Wewnątrz obudowy lasera nie stosuje się żadnych materiałów organicznych.

Po złożeniu wszystkich elementów otwarta obudowa jest odgazowywana w próżni w podwyższonej temperaturze przez kilkadziesiąt godzin, a następnie zamykana hermetycznie w atmosferze ultraczystego i suchego helu o punkcie wilgotności -60°C . Tak wykonaną obudowę lasera poddaje się następnie bardzo ostrym badaniom mechanicznym i klimatycznym, włączając w to: uderzenia do 500 g, szoki termiczne, pracę pod wodą w wysokiej temperaturze itp.

8.3. Moduł nadawczy

Moduł nadawczy składa się z: wieloheterostrukturnego lasera InGaAsP , monolitycznego układu zasilającego laser impulsami prądowymi o subnanosekundowych czasach narastania i opadania, fotodiody PIN monitorującej wsteczny promień lasera i układu scalonego sterowanego tą fotodiodą i realizującego funkcję sprzężenia zwrotnego stabilizującego zasilanie prądowe lasera.

Napięcie kontrolne /proporcjonalne do prądu zasilania lasera/ jest zamieniane w układzie nadzoru na przesyłaną do stacji końcowych wiadomość kontrolną o stanie danego lasera. Z zespołu takich pomiarów wykonanych w pewnym okresie tworzona jest charakterystyka starzenia elementu, pozwalająca na bieżące przewidywanie jego czasu życia.

Fotodioda kontrolna steruje dwoma obwodami sprzężenia zwrotnego: układem kontroli mocy średniej do regulacji prądu zasilania i układem kontroli sprawności lasera do regulacji głębokości modulacji.

Podobnie jak i w poprzednich modułach, układy zintegrowane oraz laser i fotodiode w indywidualnej obudowie zamontowano na ceramicznej płytce podłożowej w technologii hybrydowych układów scalonych i ułożono w obudowie modułowej. Moduł laserowy umieszczono na następnej masie termicznej stykającej się poprzez cienką warstwę ceramiczną z zewnętrzną masą termiczną stacji regeneracyjnej. W ten sposób uzyskuje się małą wartość impedancji termicznej pomiędzy laserem a metalową obudową wysokociśnieniową stacji regeneracyjnej. Obudowa ta stanowi jednocześnie zewnętrzną masę termiczną stacji.

8.4. Multipleksery światłowodowe

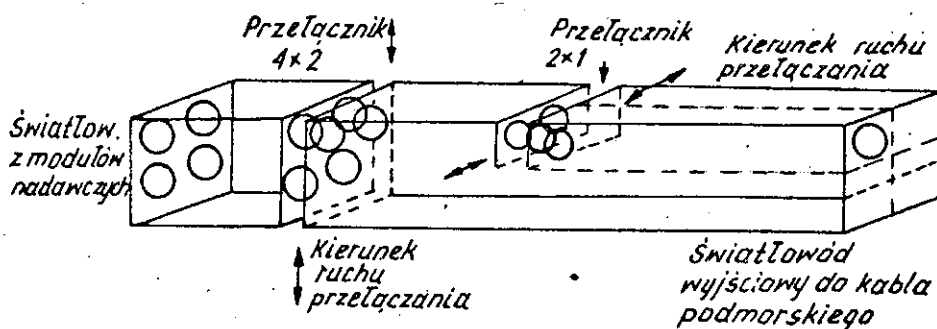
Rolą multipleksera światłowodowego w podmorskiej stacji regeneracyjnej jest przełączanie modułów nadawczych i ewentualnie odbiorczych tak, aby wytworzyć wewnątrz stacji odpowiednie ciągłe drogi optyczne. Multipleksery optyczne łączą odpowiedni tor w regeneracji z odpowiednim światłowodem transmisyjnym w kablu podmorskim. W ten sposób multipleksery umożliwiają przełączanie uszkodzonych modułów nadawczych, przełączanie uszkodzonych odcinków światłowodu w kablu, zawrócenie kierunku transmisji w celu badań reflektometrycznych i tworzenie optycznych pętli zwarcowych do diagnostyki układów i kanałów transmisyjnych.

W światłowodowych podmorskich systemach teletransmisyjnych pierwszej generacji przewiduje się wykonanie tych multipleksersów w wersji elektromechanicznej i magnetoptycznej. W następnych generacjach konieczne jest wyeliminowanie jakiegokolwiek ruchu mechanicznego nie tylko z układu multipleksera, ale i z całej stacji podmorskiej. Jest to możliwe poprzez wykonanie multipleksera w planarnej wersji zintegrowanej.

Wersji rozwiązań multipleksersów światłowodowych jest bardzo wiele i każdy z producentów systemów stosuje odmienne, opatentowane rozwiązania konstrukcyjne. Na przykład, w systemie pierwszej generacji, do mechanicznego przełączania światła

łowodów Francuzi zastosują miniaturowe silniki elektryczne, których wysoka niezawodność była sprawdzona w podmorskich teletransmisyjnych systemach klasycznych. W dalszych generacjach tych systemów takie rozwiązanie jest jednak nie do przyjęcia.

Elektromechaniczny multiplekser światłowodowy firmy ATT, który będzie zastosowany w amerykańskich systemach teletransmisyjnych pierwszej generacji umożliwia połączenie czterech modułów nadawczych z pojedynczym światłowodem wyjściowym. Ten multiplekser jest zbudowany z modyfikowanych przełączników kontaktronowych. Budowę multipleksera przedstawiono na rys. 18. Główną częścią urządzenia jest ruchomy zestaw miniaturowych kostek kwarcowych z precyzyjnie wytrawionym rowkiem w kształcie litery V. Pozycjonowanie rowka w kostce wykonano z dokładnością $0,05 \mu\text{m}$. W rowkach pomiędzy dwoma kostkami zamocowano światłowody jednomodowe. Pozycjonowanie światłowodów wykonano z dokładnością lepszą niż $0,2 - 0,4 \mu\text{m}$.



Rys. 18. Schemat budowy mechanicznego multipleksera światłowodowego firmy ATT, przeznaczonego dla światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich pierwszej generacji

Przełącznik 4×2 składa się z dwóch kaskadowo połączonych przełączników 2×1 . Każdy przełącznik 2×1 zawiera ruchomy zestaw kostek z umocowanym jednym światłowodem, który jest centrowany naprzeciw stałego zestawu trzech kostek utrzymu-

jącoych dwa światłowodowy. Zestawy kostek są umieszczone w obudowie tak, że po ruchu nieco większym od średnicy światłowodu następuje dokładne centrowanie odpowiednich światłowodów naprzeciw siebie. Z ograniczeń dokładności centrowania wynikają straty optyczne, które dla każdego przełącznika typu "2x1" wynoszą $0,5 \div 0,8$ dB. Przełączenie jest wykonywane na rozkaz układu nadzoru poprzez magnetyczne igły popychające.

9. POZOSTAŁE UKŁADY PODMORSKIEGO ŚWIATŁOWODOWEGO SYSTEMU TELETRANSMISYJNEGO

9.1. Układy nadzoru i zabezpieczenia pracy podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneracyjnej

Celem pracy układów nadzoru jest możliwość zdalnego sprawdzenia, na rozkaz ze stacji końcowych lub w przypadku objawów uszkodzenia wewnętrznego stacji, wszystkich podstawowych funkcji stacji regeneracyjnej i układów zasilania. Pozwala to na identyfikację i lokalizację uszkodzeń w układach i kablu. Nadzór niektórych parametrów i funkcji regeneratora jest możliwy w czasie jego pracy, dotyczy to np. marginesu stopy błędów, automatycznego przełączania lasera. Niektóre funkcje kontrolne są wykonywane po wyłączeniu części linii z pracy - pomiar optycznej mocy wyjściowej i wejściowej, pomiar charakterystyk lasera.

Układy nadzoru w podmorskich stacjach regeneracyjnych ściśle współpracują z układami nadzoru w stacjach końcowych traktu. Bez nadzoru ze stacji końcowych, w stacjach podmorskich są dokonywane przełączenia modułu laserowego i ewentualnie odbiornika optoelektronicznego. Wypełnienie pozostałych funkcji przełączania i funkcji kontrolnych w stacji podmorskiej wymaga nadzoru stacji końcowych. Dotyczy to sprawdzania: czułości odbiornika optoelektronicznego, pasma częstotliwości układu, stopnia przełączenia części optoelektronicznej oraz bieżącego zakresu dynamicznego regeneratora.

Część nadzorcza podmorskiej stacji regeneratorskiej składa się z następujących układów:

- regeneratorskiego interfejsu nadzorczego, który jest konstrukcyjnie związany z każdym regeneratorem i jest układem wykonawczym dla systemu nadzoru tego regeneratora;
- układu liniowego, który detekuje sygnały nadzoru i przekształca wiadomości /o prądzie zasilania lasera oraz wzmożeniu wzmacniacza regulowanego/ na postać cyfrową;
- układu logicznego, który dekoduje rozkazy nadzoru i formułuje odpowiedzi;
- układów transpozycji połączeń i tworzenia pętli wstecznych, których funkcją jest przełączanie torów transmisyjnych zgodnie z procedurą zakodowaną w pamięci trwałej stacji, w celu zapewnienia niezbędnej redundancji układu i lokalizacji uszkodzeń;
- układu modulacji fazy, który nakłada informacje nadzoru na liniowy sygnał transmisyjny.

Część nadzorcza podmorskiej stacji regeneratorskiej uzupełniono elementami i układami zabezpieczającymi poszczególne bloki stacji. Każdy regenerator zabezpieczono przed zniszczeniem w przypadku przebiecia elektrycznego lub uszkodzenia wysokonapięciowego układu zasilania. Monolityczne układy scalone zaprojektowano w taki sposób, aby nie mogły ulec uszkodzeniu w przypadku zwarć dyskretnych elementów, montowanych w hybrydowych układach scalonych tworzących poszczególne moduły stacji.

Informacje wysyłane przez układy nadzoru do stacji końcowych i odwrotnie są następujące:

- słowa alarmowe, przesyłane od regeneratora do stacji końcowych, zawierają adres regeneratora i informacje o prądzie zasilania lasera, średniej wejściowej mocy optycznej, stopie błędów transmisji w regeneratorze;
- słowa kontrolne - przesyłane ze stacji końcowych do stacji regeneratorskiej, zawierają adres regeneratora

i skutkiem ich przesłania jest przełączenie lasera lub odbiornika, tworzenie transmisyjnych torów zastępczych i pętli wstecznych, pomiar "in line" marginesu stopy błędów transmisji w stosunku do wymaganej wartości progowej;

- słowa zerujące - przesyłane od stacji końcowych do stacji podmorskich, zerują wszystkie pamięci nietrwałe stacji regeneracyjnej w celu umożliwienia przesłania potwierdzenia słów alarmowych.

9.2. Układy zasilania podmorskiej stacji regeneracyjnej

Optoelektroniczna stacja regeneracyjna zużywa więcej energii elektrycznej niż analogiczna stacja elektroniczna. Dla systemów światłowodowych pierwszej generacji stacja sześcioregeneracyjna zużywa w zakresie od 30 do 100 watów mocy w zależności od parametrów sygnałowych. Stacja elektroniczna współpracująca z transoceanicznym kablem współosiowym zużywa do 10 watów mocy. Większe zużycie mocy w stacji optoelektronicznej jest spowodowane jej rozbudową o odbiornik i zespół nadajników optoelektronicznych w każdym regeneratorze oraz o dodatkowe układy nadzoru, kontrolujące tę część optoelektroniczną stacji.

Wydzielanie większej mocy elektrycznej i przekształcanie jej w moc cieplną wewnątrz szczelnie zamkniętej, i niewielkiej w porównaniu z systemami lądowymi, obudowy stacji regeneracyjnej stwarza wiele problemów technicznych. Najważniejsze z nich to: lokalny silny wzrost temperatury w pobliżu niektórych elementów aktywnych /będących głównymi źródłami ciepła/ i transfer ciepła z obudowy na zewnątrz. Tak więc, w porównaniu z klasycznymi systemami teletransmisyjnymi, obudowa optoelektronicznej podmorskiej stacji regeneracyjnej powinna posiadać kilkakrotnie mniejszą rezystancję termiczną, jeśli zachowane mają być podobne wymiary stacji.

Napięcie zasilania stacji podmorskiej wynosi 6 - 6,8 V dla systemów pierwszej generacji. Otrzymywane jest ono wewnątrz stacji za pomocą stabilizatorów elektronicznych z wej-

ściowymi diodami Zenera dużej mocy. Indywidualne układy filtrów separujących zasilanie od torów sygnałowych wykonano w technologii hybrydowych układów scalonych dla każdego modułu i dla każdego zespołu modułów regeneratora osobno. Lokalne napięcie zasilania w stacji podlega sprawdzaniu przez układy nadzoru.

9.3. Obudowa podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorej

Rolą obudowy podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorej jest nadanie stacji odpowiednio dużej odporności na wysokie ciśnienie na dużych głębokościach pod wodą, oddziaływania mechaniczne, spotykane najczęściej podczas układania lub reperacji kabla, oraz zapewnienie odpowiednio małej rezystancji termicznej od poszczególnych elementów aktywnych stacji do zewnętrznych warstw obudowy.

Ze względu na wymagania małej wartości rezystancji termicznej obudowy podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorej /0,15 deg/W w wodzie/ nie jest możliwe zawieszenie wszystkich układów stacji wewnątrz obudowy na sprężynach, co miało miejsce w klasycznych podmorskich stacjach regeneratorej. Konsekwencją braku zawieszenia sprężynowego są znacznie zwiększone wymagania, dotyczące odporności układów stacji na udary i drgania mechaniczne. W rozwiązaniu konstrukcyjnym bez zawieszenia sprężynowego metalowa masa termiczna i elektryczna wszystkich układów stacji generujących ciepło powinna bezpośrednio przylegać, na jak największej powierzchni, do zewnętrznej obudowy metalowej. Jednakże obie części metalowe muszą być odizolowane cienką warstwą dielektryka, o dobrym przewodnictwie termicznym, ze względu na zapewnienie niezawodności wysokonapięciowych układów zasilania stacji. Izolacyjność tej warstwy obudowy, a także dla warstw zewnętrznych z tworzywa sztucznego sprawdzana jest dla napięć o wartości 30 kV.

Tablica 7

Właściwości obudowy podmorskiej optoelektronicznej stacji regeneratorskiej

Parametr	Jednostka	Wymagana wartość
Wytrzymałość na ciśnienie hydrostatyczne	kg/cm ²	1000
Szczelność gazowa, test z helum o ciśnieniu 1000 kg/cm ² przez 1 godzinę	cm ³ /s	10 ⁻⁹
Odporność na uderzenia	g	50 ÷ 500
Odporność na drgania	g	5 ÷ 500
Straty przepustów światłowodowych wysokieciśnieniowych na jeden światłokół	dB	0,1
Zakres temperatur pracy	°C	-10 ÷ +60
Szczelność woda i gazowa wysokociśnieniowych przepustów światłowodowych		jak dla całej obudowy

Oddziaływanie wysokiego ciśnienia powyżej 500 kg/cm^2 w środowisku podmorskim powoduje odkształcenie promieniowe stalowej cylindrycznej obudowy stacji regeneratorskiej. Odkształcenie to wynosi w podanych warunkach około 1 mm i ma ono istotne znaczenie w przypadku, jeśli wewnętrzne układy i ich masy przylegają bezpośrednio do ściskanej wysokociśnieniowej części obudowy. Projekt wewnętrznych części obudowy musi uwzględniać te istotne przesunięcia pomiędzy poszczególnymi częściami wewnętrznymi stacji.

W tabelicy 7 podano podstawowe właściwości obudowy stacji dla światłowodowych teletransmisyjnych systemów transoceanicznych.

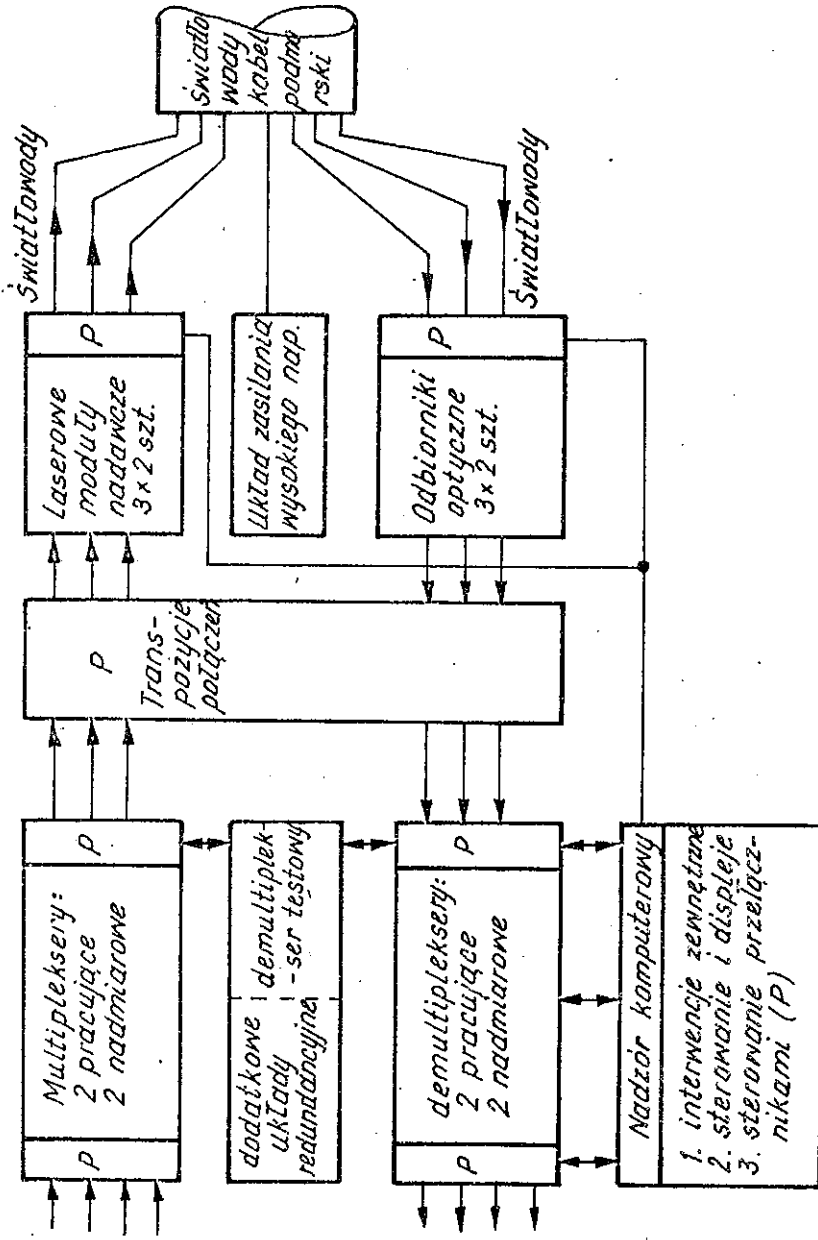
9.4. Stacje końcowe traktu kablowego

Stacje końcowe światłowodowego podmorskiego systemu teletransmisyjnego zawierają następujące grupy urządzeń:

- układy zasilania mocy elektrycznej,
- transmisyjne urządzenia końcowe traktu kablowego,
- komputerowe układy nadzoru.

Transmisyjne urządzenia końcowe [23, 38], przedstawione w sposób blokowy na rys. 19, są kilkustopniowymi multiplekserami i demultiplekserami pomiędzy interfejsem CEPT 4 /140 Mbit/s/ i optycznym sygnałem liniowym 295,6 Mbit/s w kodzie 24B1P. Kod ten posiada słowa 25-bitowe.

Oprócz multipleksowania i przetwarzania sygnałów O/E i E/O, transmisyjne urządzenia końcowe dodają do sygnałów liniowych bity parzystości oraz sygnały kontrolne i nadzorcze. Odbywa się to w celu nadzoru traktu pomiędzy stacjami końcowymi i nadzoru adresowanych podmorskich stacji regeneratorskich. Transmisyjne urządzenia końcowe współpracują z układami nadzoru komputerowego.



Rys. 19. Schemat blokowy stacji końcowej systemu światłowodowego teletransmisyjnego transoceanicznego /pełnomorskiego/

10. PODSTAWOWE KIERUNKI ROZWOJU ŚWIATŁOWODOWYCH TELETRANSMISYJNYCH SYSTEMÓW PODMORSKICH I ABSOLUTNE OGRANICZENIA TRANSMISJI ŚWIATŁOWODOWEJ

Główny kierunek rozwoju omawianych tutaj systemów światłowodowych wyznaczony jest przez przedstawione wcześniej generacje. Jednakże w ramach tych generacji uunownych można wyodrębnić tendencje techniczne i technologiczne polegające na:

- zwiększeniu niezawodności systemu,
- zwiększeniu odległości międzyregeneratorowej,
- zwiększeniu szybkości transmisji informacji,
- poprawieniu jakości transmisji informacji,
- obniżeniu kosztów instalacji i eksploatacji systemu.

Osiągnięcie wyżej wymienionych celów jest możliwe, ale wymaga podjęcia określonych środków technicznych.

Pierwsza generacja teletransmisyjnych światłowodowych systemów podmorskich pracuje w pasmie falowym 1,3 μm , co pozwala na uzyskiwanie odległości międzyregeneratorowych obecnie rzędu 60 km, a wkrótce rzędu 100 km. Dla odległości transmisyjnych do 300 km przewiduje się stosowanie podmorskich systemów bezregeneratorowych drugiej generacji pracujących w pasmie falowym 1,6 μm . Poważnym stymulatorem badań w tym kierunku są liczne przewidywane potrzeby zastosowań tego typu systemów [14, 35]. Inym również ważnym stymulatorem jest nadzieja budowy światłowodowego systemu transatlantyckiego drugiej generacji, nie zawierającego podmorskich stacji regeneratorowych.

Powazną zaletą systemu bezregeneratorowego jest brak konieczności zasilania elektrycznego w kablu transmisyjnym i w związku z tym znacznie większa elastyczność transmisyjna linii kablowej. Podmorskie optoelektroniczne stacje regeneratorowe mogą pracować tylko w takim systemie, dla którego zostały początkowo zaprojektowane. Podstawowymi parametrami systemu, które nie mogą być zmienione w tym przypadku

są: szybkość transmisji i pasmo fali optycznej. Zwiększenie przepustowości informacyjnej systemu związane byłoby z wymianą wszystkich podmorskich stacji regeneracyjnych. Przedsięwzięcie takie jest zupełnie nieopłacalne. Łatwiej i taniej jest położyć zupełnie nowy kabel podmorski, z nowymi stacjami regeneracyjnymi. W przeciwieństwie do tego, dalekosiężny system bezregeneracyjny wymaga jedynie zmiany urządzeń stacji końcowych.

Dwukrotne zwiększenie przepływności informacyjnej teletransmisyjnego kanału światłowodowego w systemie wymaga dodatkowego marginesu wzmoocnienia rzędu $3 \div 4,5$ dB. Alternatywną drogą w stosunku do klasycznego zwielokrotnienia częstotliwościowego transmisji jest zwielokrotnienie falowe, nazywane także transmisją typu WDM /ang. Wavelength Division Multiplexing/. W układzie WDM także należy liczyć się ze stratami optycznymi rzędu kilku decybeli przy zwiększeniu przepustowości systemu [36]. Dalszym ograniczeniem przy zwielokrotnieniu typu WDM są wzrastające przerzutki przesłuchowe pomiędzy zbyt blisko usytuowanymi kanałami transmisyjnymi w przestrzeni długości fali transmitowanej światłowodem.

Kolejną alternatywną metodą powiększenia przepływności informacyjnej kanału światłowodowego, lub poprawienia jakości transmisji, jest zastosowanie optycznej transmisji koherentnej. Taki rodzaj transmisji stanowi przedmiot żywego zainteresowania światłowodowej telekomunikacji podmorskiej, lecz obecnie jest w początkowej fazie swego rozwoju. Przy tego rodzaju transmisji chodzi głównie o koherentny odbiór sygnału optycznego, podobnie jak to ma miejsce dla systemów radiowych, czyli heterodynowanie i homodynowanie optyczne. Połączenie transmisji sygnału optycznego ściśle koherentnego czasowo i przestrzennie z odbiorem heterodynowym lub homodynowym powoduje istotną redukcję szumów w odbiorniku optoelektronicznym. W ten sposób uzyskuje się wzrost czułości systemu o około 10 dB [37, 38]. Transmisyjny system koherentny umożliwia również gęstsze upakowanie kanałów WDM.

Ograniczenia transmisyjne w układzie światłowodowym wynikają zarówno z dysponowanego poziomu mocy optycznej na wejściu światłowodu przy nadajniku optoelektronicznym, jak i z czułości odbiornika optoelektronicznego. W odbiorniku optoelektronicznym, zasady statystyki kwantowej określają minimalną liczbę fotonów na 21 w celu określenia obecności impulsu optycznego ze stopą błędów co najmniej 10^{-9} [39]. Zakładając, że w analizowanym systemie teletransmisyjnym dysponujemy idealnym detektorem w odbiorniku optoelektronicznym o sprawności 100%, czułość układu wynosi wówczas -66 dBm dla impulsów optycznych transmitowanych z szybkością 140 Mbit/s. Czułość ta ulega redukcji o wielokrotność 3 dB w przypadku kolejnych podwojeń szybkości transmisji.

W przypadku optycznej transmisji liniowej, moc pobudzająca światłowód jednomodowy nie może przekroczyć ograniczenia nieliniowego rozpraszania stymulowanego Ramana. Ograniczenie to wynosi zazwyczaj +20 dBm dla pasma falowego 1,6 μm . Dla wymienionych powyżej danych, na rys. 1 sporządzono krzywą, ograniczającą pole tego wykresu od góry. Ograniczenie to ma charakter absolutny dla wszystkich generacji systemów teletransmisyjnych. Jednakże i tutaj istnieją poważne możliwości rozszerzenia zakresu transmisyjnego. Związane jest to z możliwością, jaka pojawiła się w zakresie eksperymentalnym w ostatnim czasie, zmiany naturalnej kwantowej statystyki fali świetlnej [40]. Ograniczeniem byłoby wówczas odbiór jednego fotonu na impuls z małym prawdopodobieństwem błędów, co poprawiłoby parametry światłowodowego systemu teletransmisyjnego o następnych kilka - kilkanaście decybeli.

Kolejna grupa zagadnień związanych z rozszerzeniem pasma transmisyjnego i polepszenia jakości transmisji w światłowodowym kanale informacyjnym dotyczy optycznych zjawisk nieliniowych, a w tym:

- transmisji solitonowej,
- mieszania czterofotonowego,

- samomodulacji fazowej impulsu i samoogniskowania fali optycznej,
- odwracania frontu fazowego fali dyspersyjnej i samokorekcji holograficznej.

We wszystkich wymienionych zakresach prowadzi się na świecie intensywne badania podstawowe i badania laboratoryjne [41]. Najpoważniejsze osiągnięcia, jakie uzyskano do tej pory, to: transmisja w światłowodzie jednomodowym solitonowego impulsu optycznego o czasie trwania mniejszym od 10 fs, holograficzna korekcja kształtu impulsu w światłowodzie o długości 2x100 km, zbudowanie rozłożonego wzmacniacza światłowodowego o długości kilkuset metrów i wzmacnieniu 20 dB.

Wszystkie z wymienionych badań będą wkrótce miały istotne znaczenie dla dalszego rozwoju światłowodowych teletransmisyjnych systemów podmorskich drugiej i trzeciej generacji. Przedstawione tutaj kierunki badań pokazują, jak duże możliwości dalszego rozwoju tkwią jeszcze przed tą stosunkowo nową techniką.

11. ROZWÓJ ŚWIATŁOWODOWYCH TELETRANSMISYJNYCH SYSTEMÓW PODMORSKICH W POSZCZEGÓLNYCH KRAJACH /LATA 1985-1990/

Na początku 1986 roku, dla celów łączności publicznej, na świecie ułożono 1700 km światłowodowego kabla podmorskiego oraz 39 optoelektronicznych podmorskich stacji regeneracyjnych /systemy Optican 1, Anglia - Belgia 5, Marsyllia - Korsyka nr 3 i Monsiu - Hokkaido, Kiusiu - Okinawa/.

W tym samym okresie powstały w USA dwa bardzo obszerne opracowania liczące po kilka tysięcy stron każde, dotyczące perspektyw rozwoju światłowodowej telekomunikacji podmorskiej do roku 2000 [14, 35]. W obu tych opracowaniach szacuje się, że do końca wieku zostanie zrealizowanych ok. 50 dużych projektów podmorskich linii światłowodowych i kilkaset pomniejszych. Głównie przewidywano obszary geograficzne koncentracji

tych systemów to: obrzeże Pacyfiku, Morze Karaibskie, Morze Śródziemne, Morze Północne i Morze Bałtyckie. Łączna długość światłowodowego kabla podmorskiego we wszystkich tych systemach zbudowanych do końca wieku będzie liczyć ok. 50 tys. km, a liczba podmorskich stacji regeneracyjnych przekroczy 4 tysiące sztuk. Szacunkowa wartość tych systemów wyniesie ok. 2 - 2,5 mld dolarów.

W 1985 roku do klubu państw zajmujących się w praktyce światłowodową telekomunikacją podmorską dołączyły: Dania, Norwegia i Hiszpania [23, 26, 30].

Jednym z krajów, w którym nieunikniona jest budowa złożonej telekomunikacyjnej sieci podmorskiej, jest Dania. Charakter geograficzny tego kraju zmusza do instalacji teletransmisyjnych systemów podmorskich, obecnie w wersji światłowodowej, o stosunkowo niewielkiej długości. Pierwsze prace laboratoryjne nad systemami podmorskimi /wieźdywyspowymi i kanałowymi/ w tym kraju rozpoczęto w 1983 r. na podstawie umowy pomiędzy największą telekomunikacyjną firmą duńską NKT a administracją łączności [26, 30]. W sierpniu 1985 r. NKT wykonała pierwszy w tym kraju podmorski eksperyment transmisyjny na odległość 5 km. Przeprowadzono wówczas kilka symulowanych prób technicznych z reperacją podmorskiego kabla światłowodowego w różnych warunkach pogodowych.

Po udanych wynikach tego eksperymentu, we wrześniu 1985 r. oddano do użytku linię światłowodową o długości 20 km spinającą oba brzegi Wielkiego Beltu, tj. Fionię i Zelandię. Cechą charakterystyczną tej i następnych linii duńskich jest fakt, że są one ułożone w stosunkowo płytkiej wodzie w poprzek tras wodnych bardzo uciążliwych przez największe statki. Takie warunki wymagają bezwzględnego zakopania kabla za pomocą piłgu podmorskiego w dnie morskim. Kabel powinien być specjalnie odporny na drgania, naprężenia mechaniczne, dobrze zabezpieczony przed przypadkowym zahaczeniem kotwicą. Średnia głębokość zakopania w dnie morskim dla omawianego kabla, ułożonego w poprzek Wielkiego Beltu, wynosiła 0,8 m [26]. Kabel zawierał sześć par światłowodów i był podwójnie

zbrojony. W roku 1987 zainstalowano w Danii co najmniej dziesięć krótkich światłowodowych linii podmorskich, których długość wynosi od kilku do kilkunastu kilometrów. Mają one średnie wartości przepływności w zakresie 32 - 140 Mbit/s.

Dania zainteresowana jest również podmorskimi światłowodowymi systemami teletransmisyjnymi projektowanymi w basenie Morza Północnego i Bałtyku. Na koniec roku 1988 planuje się połączenie Danii z Wielką Brytanią. W 1989 roku Kopenhaga zostanie połączona kablem światłowodowym z Rønne na Bornholmie /system o przepływności 280 Mbit/s/. W 1990 roku projektuje się przedłużenie tej linii do Mielna /system bezregeneratory o przepływności 140 Mbit/s/ [42]. Koszt linii światłowodowej łączącej Bornholm z naszym krajem ocenia się na ok. 10 mln dolarów. Linia ta ma stanowić fragment połączenia tranzytowego naszego kraju z systemem światłowodowym TAT-8.

Norwegia ukierunkowała swoje prace w dyskutowanej dziedzinie na światłowodowe systemy przybrzeżne bezwzmacniakowe, głównie przecinające fiordy, a także linie typu brzeg - wyspa, brzeg - platforma wiertnicza. Ta specjalizacja wynika z poważnego finansowania badań w dziedzinie teletransmisyjnych systemów światłowodowych przez przemysł wydobywczy ropy naftowej i gazu. Systemy takie charakteryzują się długością do 100-150 km, maksymalną głębokością ułożenia kabla do 1 km. System teletransmisyjny obsługuje potrzeby stałej łączności telefonicznej stacji brzegowych z platformami wiertniczymi i transmisji dużej liczby danych ze współpracującym z tym systemem złożonym układem telemetrycznym. Podstawową zaletą systemu światłowodowego pracującego w takich warunkach środowiskowych jest duża niezawodność działania oraz kompatybilność sygnałowa z siecią światłowodowych czujników pomiarowych. Pierwsze eksperymenty podmorskie na szerszą skalę Norwegowie rozpoczęli w 1985 roku.

W zakresie teletransmisyjnych światłowodowych systemów podmorskich Hiszpania nawiązała współpracę z amerykańską firmą ATT-BTL. We wrześniu 1985 roku Amerykanie ułożyli linię światłowodową pomiędzy wyspami Gran Canaria i Tenerifo o dłu-

gości 120 km z trzema podmorskimi stacjami regeneratorskimi. System nazwano Optican-1 i w dniu 1 maja 1986 roku przekazano go do publicznej eksploatacji hiszpańskiej administracji łączności. Jest to pierwszy światowy abonencki system pełnomorski z podmorskimi stacjami regeneratorskimi. Okres od położenia linii kablowej do oddania systemu teletransmisyjnego do eksploatacji wykorzystano na badanie przygotowawcze dla systemów TAT-8 i TPC-3. Wykonano kilka przybrzeżnych i pełnomorskich testów reperacyjnych kabla światłowodowego i stacji regeneratorskich. Przeprowadzono badania nad różnymi typami uszkodzeń mechanicznych kabla.

Średni okres pomiędzy uszkodzeniami dla systemu Optican-1 przewidziano na ponad 10 lat, a wbrew temu w czasie pierwszego okresu eksploatacji, w lecie 1986 roku doszło do kilkukrotnych uszkodzeń podmorskiego kabla światłowodowego. Złożyło się na to kilka przyczyn, m.in. w rejonie Wysp Kanaryjskich dno morskie jest bardzo skaliste. W pewnych miejscach kabel nie leżał więc na dnie, a zwisał pomiędzy sąsiednimi uskokami skalnymi. Dla tego regionu charakterystyczny jest również pewien rodzaj rekina, niezbyt dużego ale agresywnego, który niszczy kabel. W okolicach miejsc uszkodzenia kabla w zakresie wód płytkich znaleziono tkwiące w osłonie polietylenowej kabla fragmenty odłamanych zębów rekina.

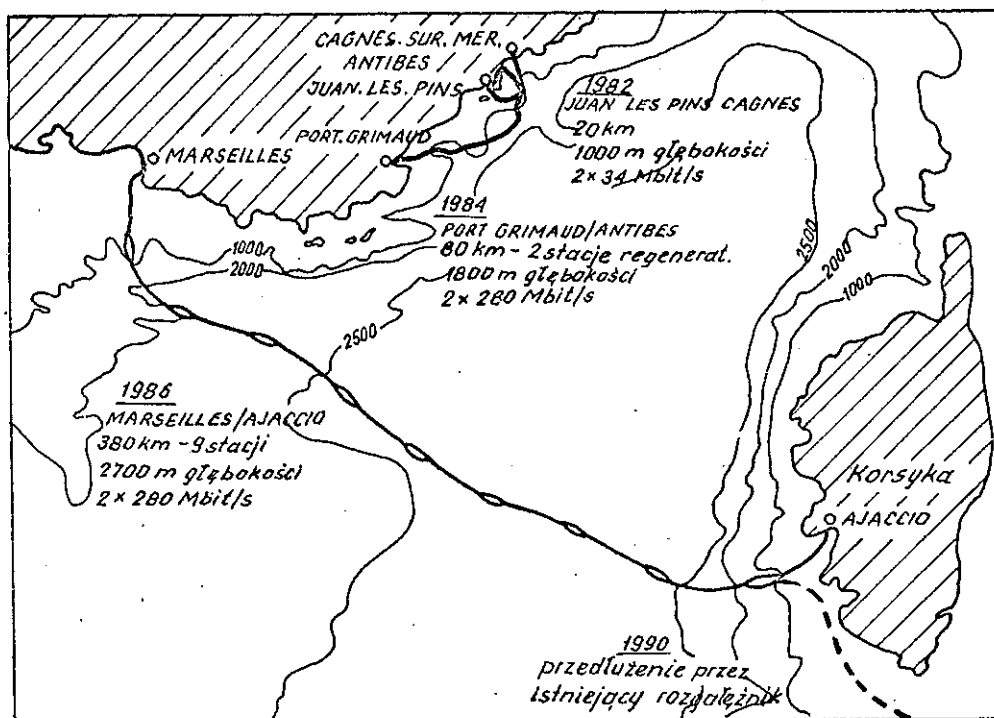
We wrześniu 1985 r. firma ATT przeprowadziła na Zachodnim Wybrzeżu USA pierwszą dużą serię testów światłowodowego systemu teletransmisyjnego drugiej generacji. System pracował w pasmie 1,6 μm ; długość jego wynosiła początkowo 150 km, a następnie 200 km. Zastosowano lekki podmorski kabel światłowodowy całkowicie dielektryczny. System nie posiadał podmorskich stacji regeneratorskich. Transmitowano sygnały pomiarowe i kontrolne z szybkością 3 Mbit/s. Wykonano serię interesujących eksperymentów dotyczących wytrzymałości mechanicznej tego rodzaju kabli podmorskich. W części trasy kabel rozpięto ponad dnem morza pomiędzy zawieszonymi na znacznej głębokości bojami. System ten przeznaczony jest do realizacji linii międzywyspowych oraz międzypaństwowych [23].

Pod koniec 1986 roku oddano do użytku światłowodową linię podmorską Anglia-Belgia, tzw. linię nr 5. Linia przecina Morze Północne pomiędzy Broadstairs w Anglii a Ostendą w Belgii. Przepływność informacyjna systemu wynosi 840 Mbit/s. Linia o długości 120 km ma trzy podmorskie stacje regeneracyjne.

Do roku 1990 przewidziane jest wykonanie kilku następnych linii na terenie południowej części Morza Północnego pomiędzy Anglią, RFN, Danią, Belgią, Szwecją i Holandią. Kolejnym /po linii nr 5/ większym przedsięwzięciem będzie budowa w roku 1988 linii Anglia-Dania. Będzie ona miała długość prawie 500 km. Cechą charakterystyczną wszystkich linii kablowych w tym obszarze geograficznym /szelfie/ jest ich płytkie położenie i stosunkowo mała stabilność dna morskiego. Zwiększa to w sposób istotny koszty systemu, ze względu na konieczność stosowania kabli podmorskich podwójnie zbrojonych, które są kilkakrotnie droższe od kabli lekkich, oraz z uwagi na konieczność zakopywania kabla w dnie morskim na dużej części trasy.

W roku 1987 Wielka Brytania rozpoczęła środowiskowe badania eksperymentalne systemów drugiej generacji. Pierwsze próby transmisyjne z systemami bezregeneracyjnymi na odległość przekraczającą 100 km przeprowadzono pomiędzy wyspami na obszarze Morza Irlandzkiego. W roku 1988 przewiduje się budowę tego rodzaju systemów na obszarze Kanału La Manche pomiędzy Wielką Brytanią a Wyspami Normandzkimi. Systemy te, pracujące w pasmie falowym 1,6 μm , będą przeznaczone do badań eksploatacyjnych weryfikujących założenia projektowe całego szeregu następnych systemów, które Wielka Brytania zamierza ułożyć w morzu wokół swego terytorium.

Pod koniec 1986 roku Francja zainstalowała światłowodowy podmorski system teletransmisyjny łączący Marsylię z Korsyką /Ajaccio/. Do budowy podmorskiej linii zastosowano kabel światłowodowy o długości 392 km. System zawiera 9 podmorskich stacji regeneracyjnych w tym jeden, na razie nie wykorzystany, podmorski rozgałęźnik trasy kablowej. Trasę linii przedstawiono na rys. 20.



Rys. 20. Trasa systemu światłowodowego łączącego Marsylię z Korsyką

Do roku 1990 przewiduje się przedłużenie tej linii na Sycylię i dalej na Sycylię. Na Sycylii system zostanie połączony z planowaną na lata dziewięćdziesiąte światłowodową siecią wschodniośrodkowomorską, łączącą takie kraje i wyspy jak: Grecja, Turcja, Kreta, Cypr, Syria i Izrael oraz Egipt. W dalszej kolejności system ten zostanie połączony z magistralą światłowodową przecinającą Ocean Indyjski.

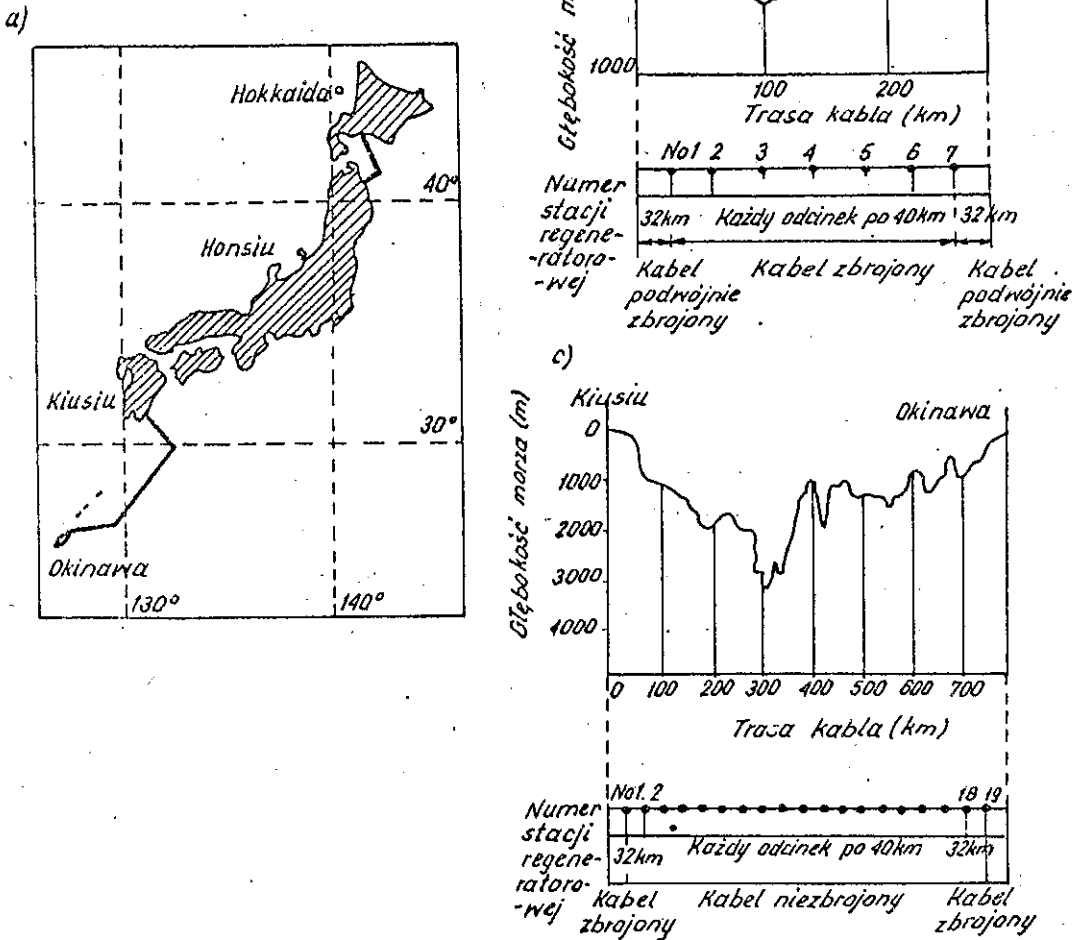
W połowie lat osiemdziesiątych firma Submarkom we współpracy z CIT Alcatel i Les Cables De Lyon opracowała całą rodzinę bezregeneratorowych teletransmisyjnych światłowodowych systemów podmorskich, oznaczonych symbolem CR. Systemy przeznaczone do pracy w pasmie 1,6 μm na odległość początkowo do 150 km z przepływnością informacyjną w zakresie od 2 do 560 Mbit/s. Główne zastosowanie tych systemów przewiduje się

dla telekomunikacji przybrzeżnej na terenie Kanału La Manche, Zatoki Biskajskiej i Lazurowego Wybrzeża. Część z tych systemów będzie stosowana do łączności stacji brzegowych z morskimi platformami wiertniczymi.

W sierpniu 1986 roku firma japońska KDD ułożyła światłowodowy kabel podmorski wzdłuż początkowego fragmentu trasy planowanego transoceanicznego systemu TPC-3. Długość tego fragmentu kabla wynosi 350 km. Linia zawiera łącznie siedem podmorskich optoelektronicznych stacji regeneracyjnych i jeden podmorski rozgałęźnik trasy kablowej. Eksperyment ten, w zamierzeniu konstruktorów systemu, stanowił ostateczny test eksploatacyjny japońskiego systemu OS280, na podstawie którego będzie zbudowany japoński fragment linii TPC-3.

W grudniu 1986 r. i marcu 1987 r. oddano do użytku /pod nadzorem firmy NTT/ dwie podmorskie linie transmisyjne pomiędzy wyspami Honsiu i Hokkaido oraz Kiusiu i Okinawa. Wchodzą one w skład transjapońskiej magistrali teletransmisyjnej. Pierwsza linia ma długość 300 km i siedem podmorskich stacji regeneracyjnych, zaś druga - 900 km i dziewiętnaście takich stacji. Obie linie pracują z przepływnością 400 Mbit/s i posiadają 17280 abonenckich kanałów rozmównych. Czas życia tych systemów szacuje się na 25 lat z założonym teoretycznie dziesięcioletnim okresem pomiędzy uszkodzeniami. Trasę obu linii przedstawiono na rys. 21.

Dążenie do dalszego rozwoju transjapońskiego systemu światłowodowego sprawia, że w firmie NTT prowadzi się intensywnie prace nad integracją układu pojedynczego regeneratora w jeden hybrydowy układ scalony. Prace te mają głównie na celu dalszy wzrost niezawodności podmorskiej regeneracyjnej stacji optoelektronicznej oraz minimalizację zużycia przez nią mocy elektrycznej. Przewiduje się osiągnięcie do roku 1990 jednego wata mocy elektrycznej rozproszonej na jeden regenerator współpracujący z pojedynczym światłowodem. W sumie daje to nieco poniżej 10 W mocy zasilania na jedną stację regeneracyjną. Obecnie moc zużywana przez jeden regenerator nie przekracza 10 W /np. w systemie F400M/.



Rys. 21. Trasa transjapońskiego podmorskiego systemu światłowodowego łączącego Hokkaido z Honshu i Kiუსiu z Okinawą
 a/ trasa systemu podmorskiego; b/ szczegóły budowy odcinka Honshu-Hokkaido; c/ szczegóły budowy odcinka Kiუსiu-Okinawa

Do marca 1990 roku firma NTT przewiduje zainstalowanie na terenie wód przybrzeżnych Japonii ok. 40 odcinków międzywspolnych systemu F6M, ok. 10 odcinków systemu F400M. Maksymalna głębokość akwenów przybrzeżnych, w których układane są te systemy, nie przekracza 1,5 km. Obecnie instalowane systemy pracują w pasmie falowym 1,3 μm , a po 1990 roku będą pracowały w pasmie 1,6 μm .

12. ŚWIATŁOWODOWE SYSTEMY TRANSOCEANICZNE I O ZASIĘGU OGÓLNOŚWIATOWYM

12.1. Przewidywania na lata 1988-1995

Opracowania prognostyczne rozwoju światłowodowej telekomunikacji podmorskiej na świecie [14, 35] zawierają dane dotyczące nie tylko, omówionych poprzednio w zarysie, systemów lokalnych i krajowych ale i systemów transoceanicznych. Przewiduje się, że do 1995 roku całkowita długość podmorskich kabli światłowodowych użytkowanych w sieciach publicznych wyniesie od 150 do 200 tys. kilometrów /tj. 4 - 5-krotnie więcej niż obwód Ziemi/. Całkowita długość światłowodów w kablach podmorskich przekroczy 1 mln km, zaś liczba podmorskich stacji regeneracyjnych będzie większa od 10 tysięcy sztuk.

Okres pomiędzy rokiem 1995 a 2000 ma według tych prognoz stanowić kolejny ważny etap przełomowy w rozwoju technicznym światłowodowych systemów podmorskich. Będzie to czas intensywnych badań środowiskowych światłowodowych systemów podmorskich trzeciej generacji.

W latach 1988-1995 przewiduje się ułożenie od 5 do 8 światłowodowych kabli transoceanicznych w basenie Atlantyku, łączących głównie Amerykę Północną z Europą Zachodnią, a także Europę Zachodnią z Ameryką Południową i południową częścią Afryki. W basenie Pacyfiku przewiduje się położenie co najmniej 3 - 4 kabli przecinających ten ocean na trasach: Ameryka Północna - Azja i Ameryka Północna - Australia. Planuje się ułożenie co najmniej jednego kabla światłowodowego w ba-

senie Oceanu Indyjskiego na trasie Afryka - Indie - Oceania -
- Australia.

Cechą charakterystyczną projektowanych transoceanicznych systemów światłowodowych jest ich stosunkowo mała przepływność informacyjna w porównaniu, z opisanymi poprzednio, granicznymi możliwościami techniki światłowodowej w tym zakresie. Tylko 3 z 13 systemów transoceanicznych planowanych na lata 1988-95 będzie miało przepływność większą niż 280 Mbit/s. Taka przepływność jest obecnie już zupełnie nieopłacalna w światłowodowych dalekosiężnych systemach lądowych.

Podstawowym względem, który zdecydował o takim wyborze parametru przepływności, była niezawodność telotransmisyjnego systemu podmorskiego. Koszt wymiany podmorskiej stacji re-generatorowej jest tak wysoki /w niektórych przypadkach od 100 do 1000 razy większy niż wymiany stacji lądowej/, że bardziej opłacalna jest w chwili obecnej rezygnacja z dużej przepływności na rzecz znacznego zwiększenia marginesu wzmocnienia w systemie dla pojedynczych podmorskich odcinków międzyregeneratorowych. Po 1991 roku, kiedy nastąpi w zakresie światłowodowych systemów transoceanicznych całkowite przejście na drugą generację systemów światłowodowych, za standardową przepływność proponuje się przyjąć w tym okresie 560 Mbit/s.

Przewidywany koszt światłowodowych systemów transoceanicznych zbudowanych do roku 1995 wyniesie 5,5 ÷ 6,5 mld dolarów. Dodając do tej kwoty wymienione poprzednio 2 - 2,5 mld dolarów wydatkowane w tym czasie na systemy lokalne, otrzymuje się szacunkowy koszt rozwoju tej techniki na świecie do roku 1995 wynoszący 7,5 - 9 mld dolarów.

W przypadku powyższego rozwoju tej techniki i wypełnienia powyżej przedstawionych planów do 1995 roku, nie wyklucza się możliwości budowy po roku 2000 światłowodowych pętli wokółziemskich [23, 24] łączących np. Afrykę, Australię i Amerykę Północną oraz Eurazję z Ameryką Północną i Południową. Długość tych zamkniętych pętli przewidywana jest na ok. 50 - 55 tys. km każda.

Zgodnie z założeniami biura planowania długoterminowego firmy AT&T, międzynarodowy rynek /tzn. popyt/ telekomunikacji dalokosiężnej będzie wzrastać w ciągu najbliższych kilku - kilkunastu lat z szybkością 15 - 25% rocznie. Wzrost ten będzie spowodowany głównie przez rozwój transmisji danych oraz sieci zupełnie nowych usług. Przewidywana stopa wzrostu liczby kanałów telefonicznych realizowanych w technice światłowodowej przez Atlantyk i Pacyfik wyniesie w latach 1988-95 ok. 40 - 50% rocznie. Na przykład na trasie USA - Europa Zachodnia liczba kanałów telefonicznych zrealizowanych w systemach światłowodowych do roku 1995 ma przekroczyć 500 tys., gdy w roku 1987 było ich tylko 23 tysiące /w kablach o torach metalicznych/.

Geograficzny podział zainteresowań poszczególnych państw w rozwoju transoceanicznej telekomunikacji podmorskiej jest obecnie następujący. Dla Stanów Zjednoczonych są ważne połączenia na Atlantyku z Europą Zachodnią i Ameryką Południową oraz na Pacyfiku z Japonią, Australią i południowo-wschodnią Azją. Państwa Europy Zachodniej są zainteresowane głównie połączeniami przez Atlantyk z USA, Ameryką Południową i południową częścią Afryki oraz połączeniami przez Morze Śródziemne na Bliski Wschód do Indii i Oceanii. Niektóre państwa zachodnioeuropejskie są także inwestorami systemów planowanych na Oceanie Spokojnym.

12.2. Światłowodowe systemy teletransmisyjne planowane w basenie Oceanu Atlantyckiego

W latach 1988-1995 planowane jest uruchomienie następujących światłowodowych transatlantyckich systemów podmorskich [23, 24, 28, 35, 36]:

- 2 ÷ 4 systemy abonenckie pomiędzy USA i Europą Zachodnią administrowane przez poczty krajowe;
- 2 ÷ 3 systemy abonenckie prywatne poza administracją pocztową pomiędzy USA i Wielką Brytanią;

- 1 z 2 systemy specjalizowano na transmisję danych i sygnałów wizyjnych;
- co najmniej jeden system transmisyjny łączący Europę Zachodnią i Amerykę Południową.

Na rys. 22 przedstawiono orientacyjną lokalizację tych systemów.

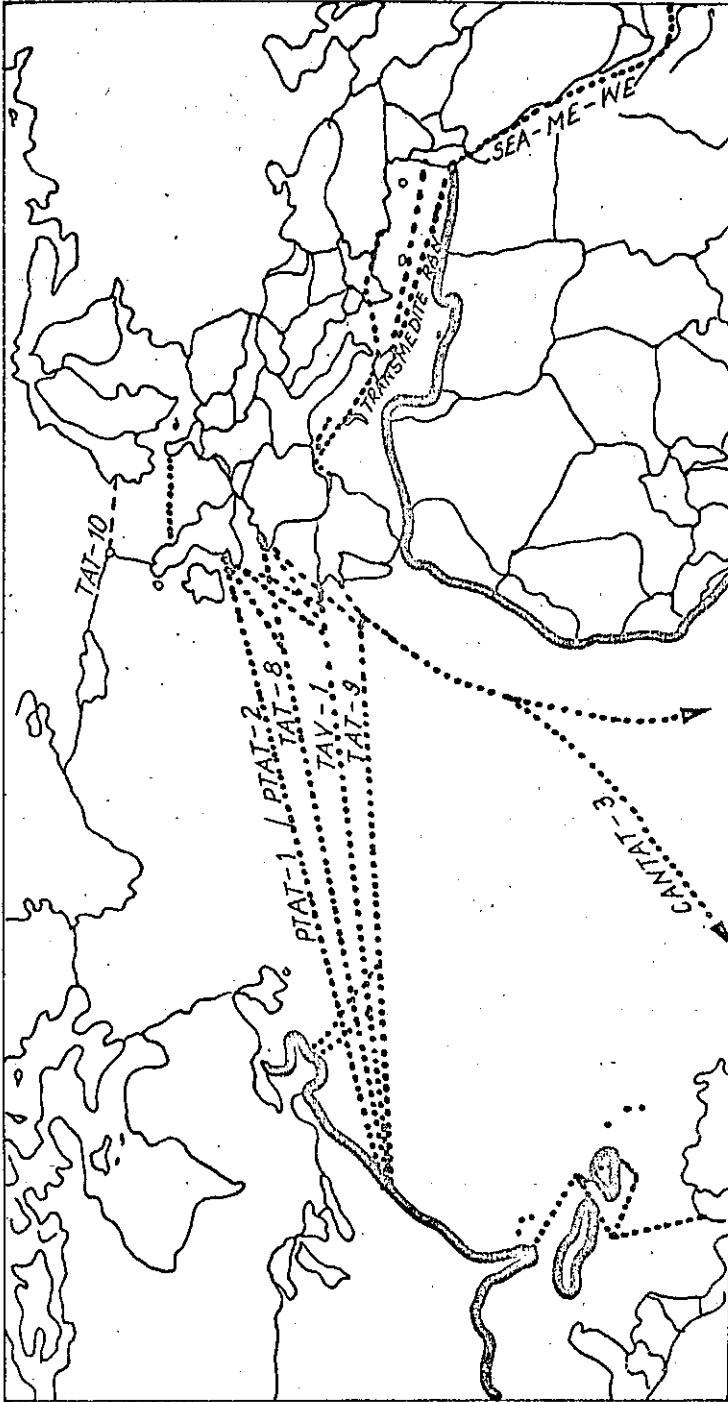
W tablicy 8 przedstawiono podstawowe dane ekonomiczne, geograficzne i techniczne tych systemów, łącznie z ich nazwami.

System TAT-8 jest wspólnym przedsięwzięciem USA, Wielkiej Brytanii i Francji, realizowanym na podstawie umowy międzynarodowej i planów firmy ATT z roku 1980. Przewaga amerykańskich inwestorów i wykonawców jest znaczna. Prawie 90% systemu będzie wykonane przez firmę ATT, co oznacza zastosowanie prawie 5800 km kabla amerykańskiego firmy ATT, 500 km kabla angielskiego firmy STC oraz 300 km kabla francuskiego firmy Submarcom. Podstawowe dane techniczne systemu są zgodne z parametrami omówionych poprzednio systemów: amerykańskiego SL280, angielskiego NL2 i francuskiego S280.

Schemat systemu TAT-8, na którym zaznaczono wymienione odcinki i rodzaje zastosowanych kabli podmorskich przedstawiono na rys. 23. System ma być w pełni gotowy do eksploatacji abonenckiej w czerwcu 1988 r.

Kabel systemu TAT-8 ma posiadać dwie pary użyteczne światłowodów i trzecią parę rezerwową. Pierwsza para transmituje sygnały z Tuckerton w USA do Penmarch we Francji i z powrotem. Druga para łączy Tuckerton z Widemouth w Wielkiej Brytanii i odwrotnie. Obie pary światłowodów rozdzielają się w rozgałęzieniu kabla umiejscowionym na europejskim szelfie kontynentalnym. W celu zapewnienia symetrii budowy kabla, dodatkowa para światłowodów łączy Wielką Brytanię i Francję. Trzecia para jest rezerwową dla indywidualnych odcinków trasy kablowej między podmorskimi stacjami regeneratorskimi.

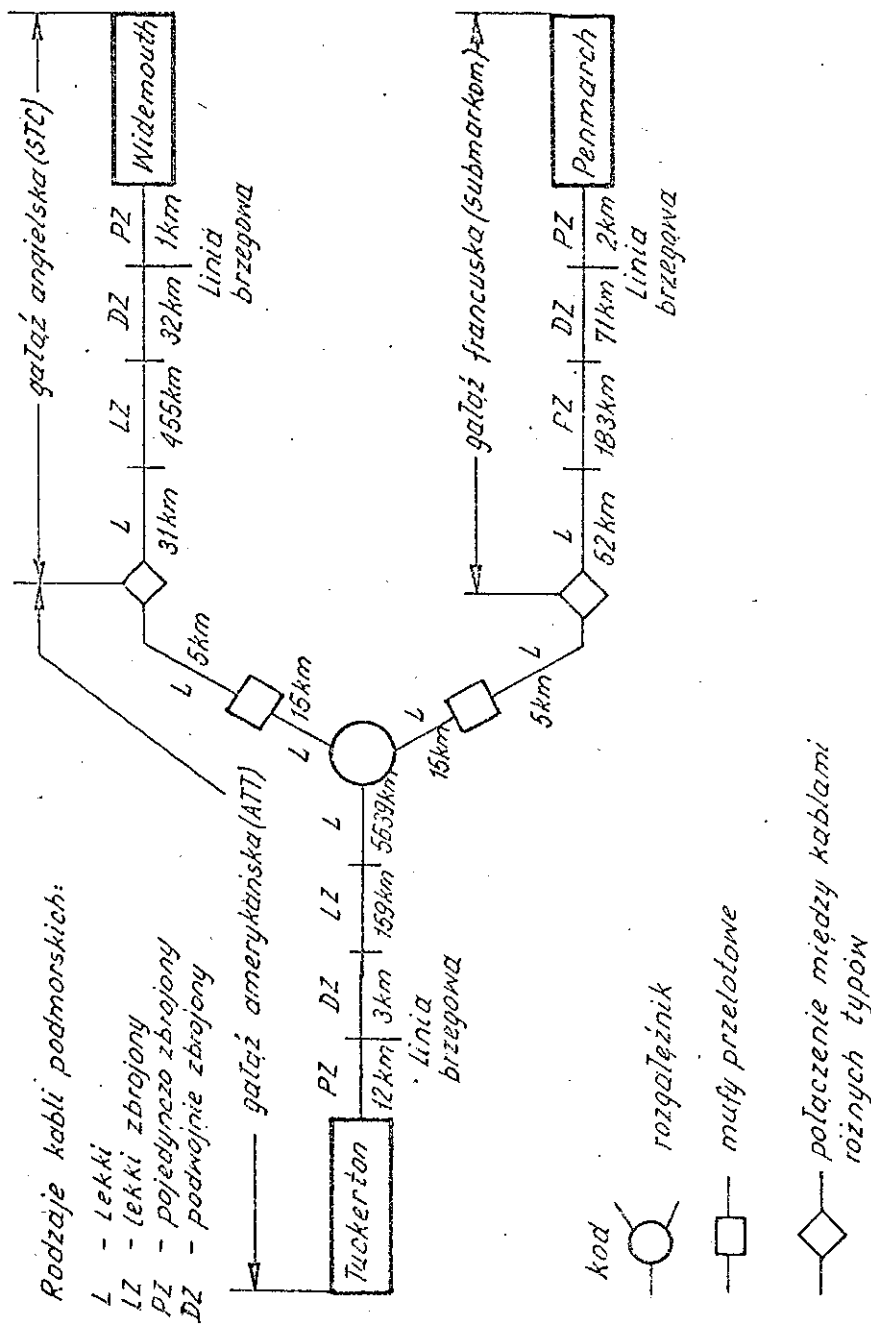
Każda para światłowodów transmituje dwa dwukierunkowo sygnały cyfrowe o przepływności 140 Mbit/s. Dwa takie sygnały



Rys. 22. Światłowodowa telekomunikacja podmorska w rejonie tzw. północnoatlantyckiego "kanału informacyjnego"

Teletransmisyjne światłowodowe systemy transatlantyczne planowane w latach 1988-1995

Nazwa systemu	Okres realizacji	Liczba kanałów telefonicznych w tys.szt.	Przebiegnowość w Mbit/s	Liczba par światłowodów w kablu podmorskim	Generacja systemu	Główni inwestorzy
TAT-8	VI 1988	40	280	2+1	1	adu. łączn. USA i Japonii
TAT-9	1991	80	565	2+1	2	JW.
TAT-10	1994-95	80	565	4+2	2	JW.
TAT-11	po 1995	320	1200	4+2	2 lub 3	JW.
PTAT-1	1989	40	280	2+1	1	Tel. Optik Cable and Wireless
PTAT-2	1992	40	280	2+1	2	JW.
PTAT-3	po 1995	320	1200	4+2	2 lub 3	JW.
TAV-1	1989	160	565	4+2	1	Submarine Lightwave Cable, Inc.
TAV-2 lub TAD	po 1995	320	1200	4+2	2 lub 3	JW.



Rys. 23. Schemat budowy systemu TAT-8

tworzą sygnał 280 Mbit/s, który łącznie z sygnałami technicznymi daje wynikową przepływność cyfrową 296,6 Mbit/s. Sygnał 140 Mbit/s jest tworzony w stacjach końcowych systemu teletransmisyjnego z trzech sygnałów 45 Mbit/s. Każdy sygnał 45 Mbit/s zawiera po stronie europejskiej systemu 21 grup pierwotnych po 2 Mbit/s i 28 grup pierwotnych po 1,5 Mbit/s ze strony amerykańskiej. Było to niezbędne dla zapewnienia współpracy różniących się między sobą systemów PCM o standardach europejskim i amerykańskim.

Elementarnym sygnałem w systemie TAT-8¹ jest sygnał 140 Mbit/s. System dynamicznego zwielokrotnienia kanałów rozmównych /TASI/ pozwala multipleksować do pięciu razy podstawowy zestaw 3780 kanałów telefonicznych, dając całkowitą pojemność jednej pary światłowodów równą 18900 kanałów telefonicznych. Transmisyjny kod liniowy typu 24B1P o słowie długości 25 bitów jest jednolity dla całego systemu. Inne wspólne parametry wszystkich gałęzi systemu to: prąd zasilania 1,6 A, napięcie zasilania w stacjach końcowych 7 kV, długość fali świetlnej 1,3 μm . Budowa stacji końcowych i tworzenie rzędów sygnałów cyfrowych jest zgodna z rekomendacją CCITT nr G703.

Odrębnym trudnym zagadnieniem technicznym jest podmorsko połączenie w linii różnych kabli światłowodowych. Wymienione połączenie podmorskie musi spełniać następujące zadania:

- łączyć dwa różne kable o nieco innej konstrukcji mechanicznej; zapewnić odpowiednią szczelność i wytrzymałość mechaniczną miejsca połączenia;
- umożliwić bezzakłócenową transmisję sygnału optycznego pomiędzy stacjami regeneratorskimi o nieco różnej konstrukcji położonymi po obu stronach połączenia kabli.

W celu uniknięcia konieczności łączenia odmiennych konstrukcyjnie kabli w warunkach podmorskich, ich połączenie będzie wykonane w warunkach fabrycznych. Natomiast w czasie układki kabla będzie się łączyć wyłącznie kable o jednolitej

konstrukcji. We francuskiej fabryce kablowej dokona się połączenia pomiędzy odcinkiem francuskiego kabla podmorskiego a krótkim, kilkudziesięciometrowym odcinkiem kabla amerykańskiego. Ostateczne połączenie odbędzie się na morzu, w pobliżu rozgałęźnika trasy kablowej, pomiędzy dwiema końcówkami kabla amerykańskiego na amerykańskim statku kablowym.

Całkowity koszt budowy systemu TAT-8 wyniesie 350-360 mln dolarów. W tych ramach koszt kabla amerykańskiego /bez kosztów światłowodu, a więc koszt samego kablowania światłowodu/ osiągnie 40 mln dolarów. Zastosowany w tym kablu światłowód jednomodowy wyprodukuje firma ATT /część amerykańska/. Światłowód będzie kablowany przez firmę Simplex Wire and Cable z Portsmouth MI. Natomiast producentem stacji końcowych i podmorskich stacji regeneracyjnych będzie fabryka ATT Network Systems, Clark Ship Factory, NJ.

Do roku 1991 - w którym planowane jest uruchomienie następnego światłowodowego systemu transatlantyckiego z serii TAT, a mianowicie TAT-9 - system TAT-8 będzie wykorzystany w około 60% jego przepływności nominalnej. Uruchomienie systemu TAT-9 spowoduje, że oba omawiane systemy będą obciążone w blisko 50%. W latach 1994-95, w końcu tego okresu, przewiduje się uruchomienie kolejnego światłowodowego systemu transatlantyckiego oraz przyjmuje się całkowitą wymiennalność systemów TAT-8 i TAT-9 w przypadku całkowitego zniszczenia jednego z nich.

Do roku 2000 przewiduje się budowę następnego systemu transatlantyckiego pomiędzy USA a Europą Zachodnią. W przypadku uzyskania odpowiednich postępów technologicznych systemy TAT-10 oraz TAT-11 są planowane jako systemy tzw. trzeciej generacji. Trzecia generacja światłowodowych systemów podmorskich instalowanych na dnie Atlantyku oznacza, że w tych systemach nie będą stosowane regeneratory podmorskie. Dla Oceanu Atlantyckiego budowa takiego systemu jest możliwa w przypadku zastosowania odcinków międzyregeneracyjnych kabla podmorskiego o średniej długości 350-400 km i nie dłuższych od 450 km. Trasa kablowa systemu prowadzi wtedy z Norwegii

i Wielkiej Brytanii przez Szetlandy, Wyspy Owoce, Islandię, Grenlandię na Labrador.

Niezależnie od prac firmy ATT nad światłowodowymi systemami transatlantyckimi serii TAT, które będą administrowane przez Zarządy Telekomunikacji USA, W. Brytanii i Francji, prowadzone są prace przez niektóre firmy prywatne, jak np. Hutton z Nowego Jorku, we współpracy z Cable and Wireless z Wielkiej Brytanii oraz odrębnie Submarine Lightwave Cable z USA i Tel Optik z USA. Firmy te projektują instalację światłowodowych systemów transatlantyckich w latach 1989-92. Będą to systemy pierwszej generacji /do roku 1991/ i drugiej generacji /po roku 1991/. Przewiduje się dzierżawienie zestawów łącz w tych systemach przez organizacje przemysłowe.

Dwa światłowodowe systemy teletransmisyjne nowej serii PTAT-1 /pierwszej generacji/ i PTAT-2 /drugiej generacji/ planowane są do uruchomienia na lata 1989-92.

Uruchomienie światłowodowego systemu teletransmisyjnego TAV-1 /transatlantycki system transmisji sygnałów telewizyjnych/ jest planowane na rok 1989. Będzie to system pierwszej generacji o dwukrotnie większej przepływności niż uruchamiane równolegle w tych latach inne systemy transatlantyckie. Zwiększenie przepływności wyniknie z zastosowania światłowodowego kabla podmorskiego o sześciu parach włókien optycznych, a nie z zastosowania doskonalszych urządzeń elektronicznych i optoelektronicznych. Głównym inwestorem jest firma amerykańska Submarine Lightwave Co. z Waszyngtonu reprezentująca interesy przemysłu amerykańskiego i japońskiego. Głównym celem instalacji tego systemu, czego inwestorzy zupełnie nie ukrywają, jest:

- przezycięcie monopolu administracji łączności w zakresie transatlantyckiej telekomunikacji kablowej;
- całkowita zmiana relacji cenowych transmisji w stosunku do systemów telekomunikacji satelitarnej w tym regionie świata;

- stymulacja rozwoju zupełnie nowych usług telekomunikacji cyfrowej, np. CAD, CAM /ang. computer aided design and manufacturing, usługi komputerowe wspomagające projektowanie i procesy produkcyjne/.

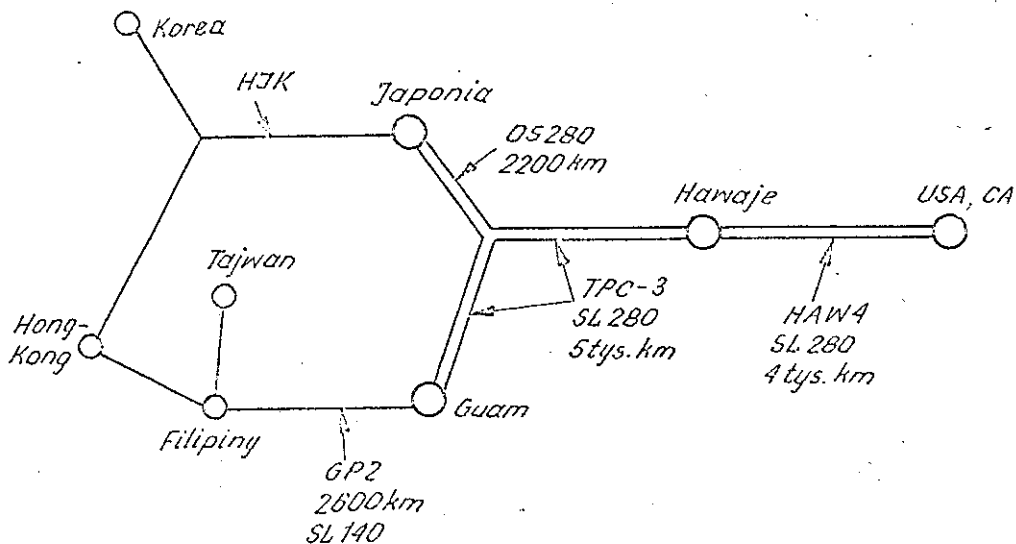
Wynajmowane będą łącza abonenckie o przepływności binarnej 45 lub 140 Mbit/s. Już obecnie większość planowanej przepływności informacyjnej tego systemu jest zarezerwowana przez korporacje przemysłu samochodowego i ciężkiego m.in.: General Motors, Toyota Motors, Union Carbide.

Oprócz połączenia USA - Europa Zachodnia, w basenie Atlantyku planowany jest również system światłowodowy łączący Amerykę Południową, Afrykę Południową, Wyspy Kanaryjskie i Hiszpanię. System ten o nazwie Cantat-3 ma kosztować, zgodnie z pierwotnymi planami 1 mld dolarów, a długość kabla ma osiągnąć ok. 20 tys. km. Wymienia się przybliżony okres realizacji systemu na dziesięciolecie 1995-2005. Jak dotąd, mimo opracowania szczegółowych planów systemu, brak jest głównych wykonawców.

13. ŚWIATŁOWODOWE SYSTEMY TELETRANSMISYJNE PLANOWANE W BASENIE OCEANU SPOKOJNEGO

W roku 1982 po raz pierwszy zainicjowano w kręgach administracji pocztowych USA i Japonii pomysły budowy teletransmisyjnego systemu światłowodowego przez Ocean Spokojny. System został nazwany TPC-3, gdyż byłby trzecim abonenckim systemem kablowym przecinającym Pacyfik. Oficjalnie porozumienie dwustronne, podobne jak w odniesieniu do systemu TAT-8, podpisano w styczniu 1985 r. Natomiast na początku 1986 roku podpisano umowę uzupełniającą pomiędzy 23 firmami, które będą współwłaścicielami tego systemu. Są to między innymi: ATT, KDD, Teleglobe Canada, Hawaiian Telephone, ITT, RCA, McDonnell Douglas, TRT Telecom oraz firmy z Filipin, Australii, Nowej Zelandii, Tajwanu, Południowej Korei, Wielkiej Brytanii, Francji i RFN [12, 14, 22, 23, 24, 27, 28, 30].

Główna gałąź systemu łącząca USA z Japonią poprzez Hawaje ma być gotowa do użytku do końca 1988 roku, a więc zaledwie w kilka miesięcy po oddaniu do eksploatacji systemu TAT-8. Przepływność systemu i konstrukcję kabla podmorskiego zaplanowano podobnie jak dla TAT-8. Dwaj główni wykonawcy systemu to: ATT z USA i KDD z Japonii. Na rys. 24 przedstawiono schemat systemu TPC-3.



Rys. 24. Schemat budowy systemu TPC-3

Poszczególne gałęzie systemu TPC-3 są następujące:

HAW-4, łącząca Hawaje z Kalifornią;

TPC-3, łącząca Hawaje z wyspą Guam i Japonią;

GP-2 - łącząca wyspę Guam z Filipinami, Hong-Kongiem, Tajwanem /oddanie do użytku w 1989 r./;

H-J-K - łącząca Hong-Kong z Japonią i Koreą Południową /oddanie do użytku w 1990 r./.

Do zbudowania głównej magistrali pomiędzy Japonią i USA przewiduje się rozbudowę systemu TPC-3 do postaci zamkniętej pętli. W 1989 roku zostanie uruchomiona linia Guam - Filipi-

ny, a do 1990 roku powinien działać cały system. W połowie lat dziewięćdziesiątych inwestorzy systemów teletransmisyjnych w tym regionie śwłata przewidują zastąpienie wszystkich działających tutaj systemów na kablach współosiowych systemami działającymi na kablach światłowodowych.

W lecie 1985 roku statki kablowe japońskie i amerykańskie w czasie kilkumiesięcznych prac, przeprowadzonych za pomocą najnowocześniejszej aparatury echograficznej, poszukiwały optymalnej drogi dla kabla podmorskiego dla systemu TPC-3. Największa głębokość położenia kabla będzie wynosić ok. 3200 metrów w okolicy rowu Izu-Ogasara. Wymienione poszukiwania miały na celu wyeliminowanie miejsc nieodpowiednich dla położenia kabla, takich jak: nadmiernie skaliste dno, zbyt duża pochyłość przekraczająca 30° i zbyt duże głębokości przekraczające 9 km. Rozgałęźnik trasy kabla światłowodowego umiejscowiono w pobliżu wyspy Marousa na podwodnym płaskowyzu na głębokości ok. 1200 m.

Podmorski rozgałęźnik trasy kablowej w systemie TPC-3, podobnie jak rozgałęźnik w systemie TAF-8, nie ma regeneratorów. Zapewnia on połączenie dowolnych par włókien optycznych ze sobą oraz przełączenie elektrycznych torów zasilających. Odcinki międzyregeneratorowe kabla bezpośrednio przyległe do optoelektronicznego rozgałęźnika podmorskiego są skrócone do połowy długości nominalnej ze względu na zapewnienie większego marginesu mocy optycznej w tym miejscu systemu.

Producentem podmorskich rozgałęźników trasy kablowej dla systemu TPC-3 będzie firma japońska Fujitsu. Konkurencyjne rozwiązanie rozgałęźnika jest przygotowywane przez firmę NEC. Stacja rozgałęźnikowa będzie miała 4,5 metra długości, cylinder stalowy platerowany miedzią berylową o średnicy 50 cm oraz wagę nie więcej niż 1 tonę. Producentem laserów dla części systemu budowanej przez Japonię jest również firma Fujitsu, a dla części amerykańskiej systemu - firma ATT. Zostaną zastosowane tutaj lasery półprzewodnikowo z materiałów czteroskładnikowych typu VSB /ang. V-grooved substrate buried/.

Włączanie lasera redundancyjnego odbywa się za pomocą planarnych przełączników magnetoptycznych, o małych stratach wtrącenia, w których nie występuje podczas przełączania żaden ruch mechaniczny światłowodu.

Problemem opracowania zasad współpracy różnych systemów teletransmisyjnych dla basenu Pacyfiku jest bardziej skomplikowany niż dla Atlantyku ze względu na istnienie różnych systemów w różnych miejscach tego obszaru. Teletransmisyjny standard północnoamerykański /tzn. standard o przepływności grupy pierwotnej 1,5 Mbit/s/ dominuje w zachodniej części Pacyfiku. Równocześnie pewne państwa azjatyckie używają standardu europejskiego /tzn. systemu z grupą pierwotną o przepływności 2 Mbit/s/. We wschodniej części Pacyfiku dwa rodzaje systemów występują równolegle, a mianowicie: ruch do i z USA odbywa się w standardzie amerykańskim, a tranzyt z Azji do Europy przez USA odbywa się w standardzie europejskim. Wydaje się, że w tej sytuacji konieczne jest opracowanie odpowiednio uniwersalnych końcowych stacji systemów teletransmisyjnych.

Całkowity koszt głównych gałęzi systemu TPC-3 wyniesie ok. 800 mln dolarów.

W połowie lat dziewięćdziesiątych projektowane jest następnym razem wspólnie przedsięwzięcie amerykańsko-japońskie, a mianowicie budowa kolejnego systemu TPC-4 administrowanego przez zarządy łączności obu krajów. Będzie to system drugiej generacji o przepływności 560 Mbit/s. System trzeciej generacji jest dla Pacyfiku obecnie całkowicie poza zasięgiem możliwości współczesnej optoelektroniki światłowodowej.

Innym systemem, niezależnym od administracji łączności, planowanym na koniec lat osiemdziesiątych jest tzw. system Pacific Telecom. Uruchomienie systemu przewidywane jest w roku 1989 tuż po uruchomieniu głównej gałęzi systemu TPC-3. System teletransmisyjny połączy stan Waszyngton /Seattle/ z Alaską i z Japonią.

W południowej części Pacyfiku planowany jest na dziesięciolecie 1990-2000 system o umownej nazwie TASHAN-2 [35].

Tablica 9

Teletransmisyjne światłowodowe systemy przecinające Pacyfik
i planowane w latach 1988-95

Nazwa systemu	Okres realizacji	Przepływność w [Mbit/s]	Pary światłowodów w kablu	Generacja systemu	Główni inwestorzy
TPC-3	1988-1990	280	2+1	1	ATT, KDD
TPC-4	po 1995	565 lub 1200	4+2	2 lub 3	ATT, KDD
Pacific Telecom	1989	280	2+1	1	PTC
Tasman-2	1991-1995	280 i 565	2+1 i 4+2	2	administracje łączności Australii, Nowej Zelandii, USA i Japonii

W połowie 1986 roku podano do publicznej wiadomości wstępne plany budowy dalekosiędnego światłowodowego systemu transoceanicznego łączącego Australię, Nową Zelandię, Azję i Amerykę Północną oraz niektóre regiony Oceanii. Koszt systemu, według obecnych ocen przekroczy znacznie 1 mld dolarów, a długość trasy kablowej wyniesie ok. 25 tys. km. Budowa będzie patronowana przez: The Overseas Telecommunication Commission z Australii, Australia International Telecommunications Authority i przez New Zealand Post Office. Duży udział będą posiadać w inwestowaniu także poczty USA i Japonii. Jak do tej pory jest to projekt szczegółowy największego planowanego podmorskiego systemu światłowodowego o zasięgu ogólnosiwiatowym. Przekracza on, zarówno odległościami trasy kablowej jak i zakresem finansowania, wszystkie dotychczasowe projekty systemów tego typu. W szczególności długość trasy kablowej będzie większa niż łącznie dla systemów TAT-8 i TIC-3. Cały system po oddaniu do użytku zwiększy przepływność istniejących w tym regionie systemów kablowych przeszło 20-krotnie.

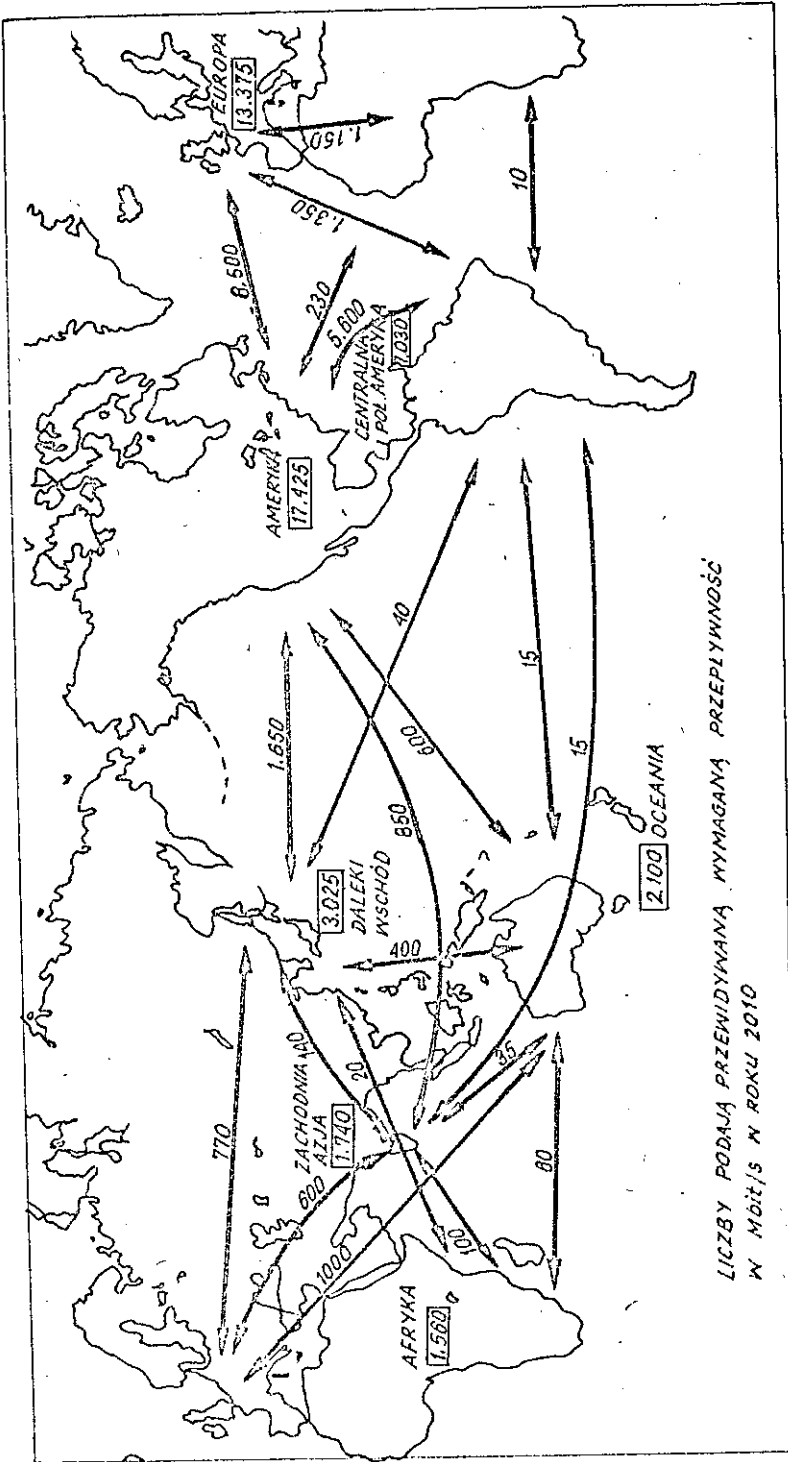
Teletransmisyjne systemy światłowodowe planowane w latach 1988-95 w basenie Pacyfiku przedstawiono na rysunku 25, a ich niektóre dane zebrano w tabelicy 9.

14. POZOSTAŁE SYSTEMY O ZASIĘGU OGÓLNOŚWIATOWKI

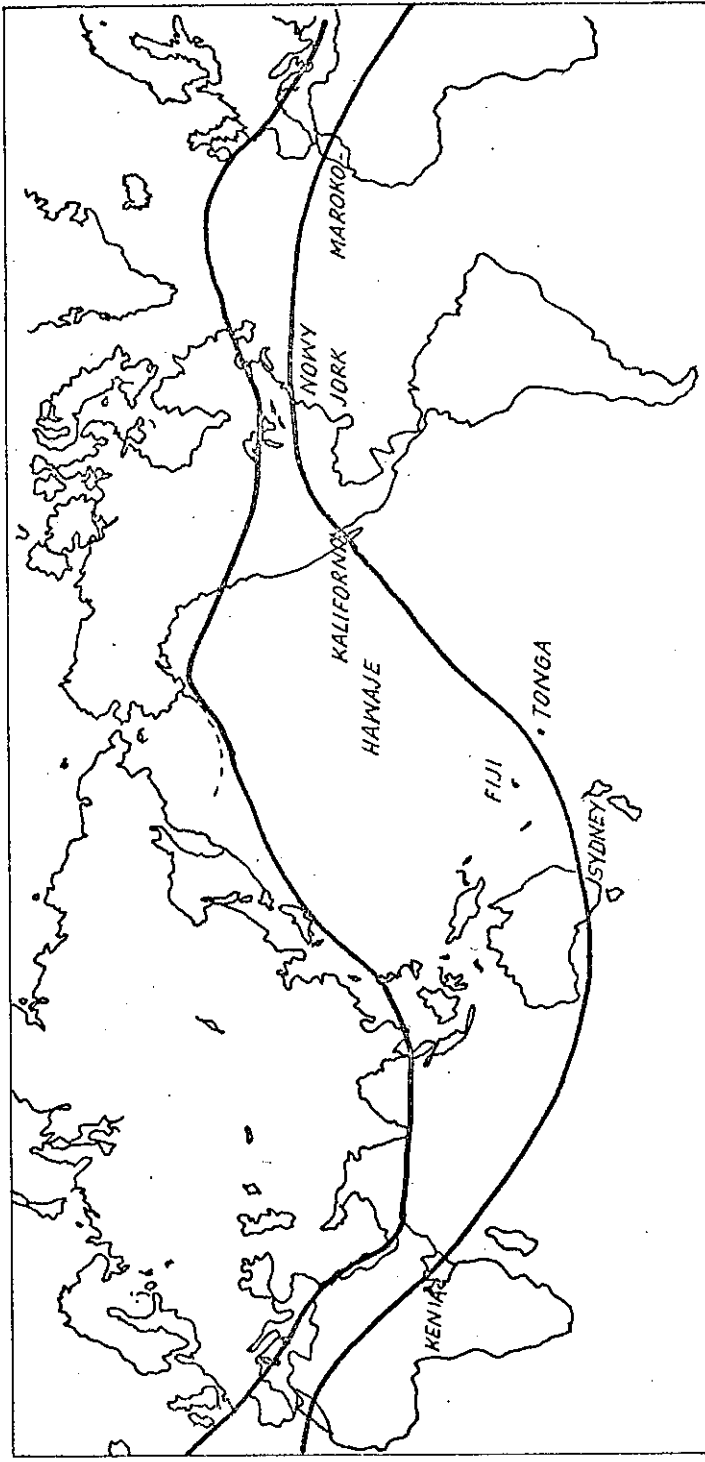
14.1. Systemy teletransmisyjne

planowane w basenie Morza Śródziemnego i Oceanu Indyjskiego

Na rok 1990 planowane jest oddanie do użytku aboneneckiego światłowodowego systemu teletransmisyjnego określonego nazwą TRANSMEDITERRAN i SEA-ME-WE. Lokalizację systemu przedstawiono na rys. 22 i rys. 25. System połączy na Morzu Śródziemnym: Francję, Włochy, Grecję, Turcję, Izrael; Egipt, państwa wzdłuż Morza Czerwonego, Indie, Indonezję i Australię. Głównymi inwestorami są: British Telecom International, Submarkom, Cable and Wireless oraz Italcable. Przewidywany koszt całego systemu wyniesie 600 mln dolarów.



Rys. 26. Przewidywania dotyczące rozwoju rozwoju telekomunikacji światłowodowej do roku 2010



Rys. 27. Projekty światłowodowych pętli wokółziemskich

14.2. Systemy światłowodowe o zasięgu ogólnosiwiatowym

Długoterminowe prognozy rozwoju telekomunikacyjnych systemów kablowych /obecnie takie systemy są realizowane wyłącznie w postaci systemów światłowodowych/ o zasięgu światowym bazują na przewidywaniach dotyczących rozwoju usług telekomunikacyjnych. Na rys. 26 przedstawiono takie przewidywania dla roku 2010. Były one opublikowane na konferencji Suboptik [23]. Na rys. 27 podano wstępne propozycje tras i konfiguracji wokółziemskich magistrali światłowodowych.

Realizację tak dużych kablowych systemów teletransmisyjnych przewiduje się w pierwszym lub drugim dziesięcioleciu XXI wieku. Wstępne przewidywania zakładają połączenie taką pętlą Europy Zachodniej, Kanady, USA i Japonii. Opracowano także wstępne projekty pętli łączącej Australię, USA i Afrykę.

Obecnie przewiduje się, że aby spełnić w efektywny sposób swoje zadania, jako wielodostępnej magistrali pętlowej, taki system powinien mieć przepływność w zakresie 3 - 5 Gbit/s [35]. Aktualne wyniki prac laboratoryjnych wskazują, że będzie to możliwe.

15. TELEKOMUNIKACJA ŚWIATŁOWODOWA A SATELITARNA

Tak jak to przedstawiono w niniejszym artykule, do końca obecnego stulecia planuje się bardzo dynamiczny rozwój światłowodowej telekomunikacji dalekosiężnej o zasięgu ogólnosiwiatowym. Z planami tymi związany jest aktualnie bardzo wysoki poziom inwestycji w badania naukowe i techniczne w tej dziedzinie. Taki kierunek działań nie może pozostać bez istotnego wpływu na pozostałe subdziedziny telekomunikacji. Przewiduje się takie efekty, jak [14, 23, 35, 36]:

- znaczne ograniczenie w niektórych dziedzinach zakresu działania telekomunikacji satelitarnej;

- znaczne rozszerzenie takich grup usług telekomunikacyjnych, jak: telekonferencji i poczty elektronicznej oraz sygnałów niosących informacje akustyczne i optyczne;
- znaczne obniżenie kosztów transmisji danych.

W chwili obecnej nie można jednak stwierdzić, że telekomunikacyjne systemy światłowodowe ograniczą ilościowy i jakościowy rozwój telekomunikacji satelitarnej. Na pewno spowodują jednak konieczność ponownego, dokładniejszego określenia roli techniki satelitarnej i zdefiniowania na nowo pewnych zakresów usług telekomunikacyjnych.

Światłowodowe systemy teletransmisyjne są bardziej odporne na interferencję elektromagnetyczną od systemów satelitarnych. W systemach światłowodowych nie występuje tak duże opóźnienie sygnału jak w systemach satelitarnych. Opóźnienie takie, równe w przybliżeniu 0,25 s lub wielokrotność tej wielkości, występuje w przypadku korzystania z satelity umieszczonego na orbicie geostacjonarnej - odległej od powierzchni Ziemi o 36 tys. km.

Szczególne pole współzawodnictwa powiędzy systemami światłowodowymi i satelitarnymi będzie, i to już w najbliższym czasie, tzw. północnoatlantycki "korytarz informacyjny" prowadzący z Kanady i USA do Europy, Afryki Północnej i na Bliski Wschód. Tą drogą, którą obsługują obecnie systemy satelitarne i systemy kablowe z kablami współosiowymi, przekazywanych jest 65% informacji w ruchu międzynarodowym z USA. Systemy satelitarne obsługują obecnie 60% tego ruchu i przewiduje się zmniejszenie tej liczby o około 10% po wprowadzeniu w połowie roku 1988 do eksploatacji systemu TAT-8.

Także bardzo dynamiczny rozwój planowany jest dla systemów telekomunikacji satelitarnej w północnoatlantyckim "korytarzu informacyjnym". W drugiej połowie 1986 roku na orbicie geostacjonarnej nad Atlantykiem umieszczono satelitę I-satu VI-F2 nowej generacji o wadze tylko 2 tony. Satelita posiada 30 tys. dwukierunkowych kanałów rozmównych i trzy kanały telewizyjne. Dwa następne satelity, z tej nowej rodziny

i o tym samym zasięgu geograficznym, mają być umieszczone na orbicie w latach 1987 i 1988.

Czas życia tych satelitów wynosi 10 lat. W porównaniu z tym, czas życia światłowodowych systemów transatlantyckich wynosi 25 lat. W chwili obecnej nieopłacalna jest naprawa satelity na orbicie za pomocą promu kosmicznego, choć taka operacja jest możliwa i przeprowadzano ją dla celów doświadczalnych, łącznie z usunięciem satelity i przetransportowaniem go z powrotem na Ziemię. Średni czas pomiędzy awariami światłowodowego systemu transoceanicznego jest przewidywany na ponad 10 lat. Oznacza to konieczność wykonania około trzech napraw kabla lub podmorskich stacji regeneracyjnych w czasie życia systemu. Wykonanie takich napraw jest opłacalne i będą one wykonywane za pomocą statków kablowych, po uprzednim optoelektronicznym zidentyfikowaniu miejsca i rodzaju uszkodzenia. W obecnie istniejących światłowodowych systemach podmorskich dokonywano wielu próbnych uszkodzeń kabla i podmorskich stacji regeneracyjnych, aby ustalić normy techniczne na naprawę uszkodzeń w różnych warunkach środowiskowych.

Oba rozważane tutaj systemy telekomunikacji cechują się odmiennym charakterem uszkodzeń. W kablu podmorskim może ulec uszkodzeniu jeden ze światłowodów bądź jeden tor podmorskiej stacji regeneracyjnej. Wówczas układy nadzoru reagują przełączeniem przepływu informacji na urządzenia dublujące. Natomiast losowe przerwanie ciągłości kabla unieruchamia system teletransmisyjny całkowicie. W przypadku satelity całkowite jego uszkodzenie jest bardzo mało prawdopodobne. Z powodów losowych może ulec uszkodzeniu część urządzeń teletransmisyjnych na pokładzie satelity. Mogą ulec uszkodzeniu anteny w niektórych stacjach naziemnych wskutek oddziaływania złej pogody, ale pozostała część systemu satelitarnego pozostaje sprawna.

Innym parametrem obu systemów podlegającym dyskusji i porównaniu jest pasmo transmisyjne. Większość obecnie eksploatowanych transponderów satelitarnych posiada pasmo 72 MHz.

Tablica 10

Porównanie dalekosiężnych telekomunikacyjnych systemów światłowodowych i satelitarnych

Parametr	System światłowodowy	System satelitarny
Paźmo transmisyjne	ograniczone przez układy optoelektroniczne, teoretyczne paśmo światłowodów jest ok. 1 THz, największa do tej pory szybkość transmisji wynosi kilkanaście GHz/kilokanaście km, systemy użytkowe pracują z największą szybkością obecnie 565 Mbit/s, w roku 1989 planowana linia ATT 1,7 Gbit/s / 100 km	większość obecnie pracujących transponderów satelitarnych posiada następujące paśmo znormalizowane: 36, 54, 72 MHz; przewidywane rozszerzenie paśma do co najmniej kilkusset MHz
Czas życia, średni czas bezawaryjny	25 lat/10 lat, opłacalna naprawa podmorska	10 lat/10 lat, nieopłacalna naprawa na orbicie
Odporność na zakłócenia falowe	praktycznie całkowicie odporne na zakłócenia elektromagnetyczne	transmisja podlega interferencjom z różnymi źródłami, włączając w to mikrofalowe
Odporność mechaniczna	linia światłowodowa może być uszkodzona przez sztorm, statki; zjawiska geologiczne	burze mogą uszkodzić pojedyncze anteny, lecz całość systemu pozostaje nienaruszona
Poufność transmisji	trudno zdetekować informację z kabla optycznego	konieczne zastosowanie złożonych układów kryptograficznych, kodowanie wielopozycyjne
Właściwości sieciowe	głównie kanały typu punkt do punktu, trudności w budowie sieci całkowicie optycznej	głównie układy telekomunikacyjne typu punkt - obszar, jedyny do tej pory opłacalny system dla obszarów słabo zaludnionych, układy zbierania danych typu wiele punktów - punkt
Elastyczność topologiczna	układ praktycznie niemożliwy do rekonfiguracji	łatwość rekonfiguracji zależna od hardware'u
Podstawowe kierunki rozwoju technologii i techniki	zwiększenie odległości międzyzmacniakowej i przepływności informacyjnej, obniżenie kosztów systemu, nowe technologie światłowodów ultraniskostratnych	zastosowanie ortogonalnych polaryzacji fali, anteny z wielokrotną wąską wiązką stanowiącą komutacja wiązek antenowych, wzmacniacze 14 GHz na ciele stałym, zwiększenie mocy nadajników do 100 W, obniżenie kosztów anteny abonenckiej do ok. 200 dolarów, transmisja w paśmie 18 GHz
Całkowicie rozdzielne obszary zastosowań	???	transmisja ruchoma
Współpraca systemów		teleporty w dużych aglomeracjach miejskich

Podstawowym problemem technicznym jest tutaj jak najbardziej efektywne użytkowanie tego ograniczonego pasma. Prowadzi się badania nad komutacją polaryzacji fali retransmitowanej przez antenę satelity, nad komutacją przestrzenną wąskich wiązek antenowych, wreszcie nad komputerowym wielokrotnym wykorzystaniem tych samych pasm częstotliwości itp. Wszystkie te metody mają służyć zwielokrotnieniu kanałów rozmównych i transmisji danych w tym samym pasmie częstotliwości.

Z drugiej strony, zupełnie odmiennie problemy są związane z rozwojem teletransmisyjnych systemów światłowodowych. Powiększenie odległości międzyregeneratorowej wymaga między innymi zwiększenia mocy lasera sprzężanej do światłowodu i ominięcia strat własnych światłowodu. Oba czynniki są uwarunkowane postępami w pracach technologicznych nad półprzewodnikami i szklami.

Znaczne zwiększenie szybkości transmisji w teletransmisyjnych systemach światłowodowych wymaga stopniowego przejścia w układach nadawczo-odbiorczych z klasycznych układów elektrycznych na planarne układy optoelektroniki zintegrowanej. Obecnie najszybszym systemem światłowodowym osiągalnym handlowo jest system firmy ATT o przepływności 2 Gbit/s i odległości międzyregeneratorowej 150 km.

Porównanie obu dyskutowanych grup systemów teletransmisyjnych w zakresie omówionej problematyki przedstawiono w tabelicy 10.

WYKAZ LITERATURY

1. Zajac E.E.: Dynamics and kinematics of the laying and recovery of submarine cable. Bell Syst. Tech. J., vol. 36, No 5, September 1957.
2. Bennet A.J.: NG-1 submarine cable system, planning and design. Electrical Communications, vol. 57, No 2, 1978, pp. 104-108.
3. Kirkland F.E.: Overseas communication by submarine cables. Telecommunications, May 1979, pp. 45-50.
4. Dawidziuk B.M.: Transoceanic communications via underwater systems. Telecommunications, May 1979, p. 53.
5. Dawidziuk B.M.: Undersea cable systems plunge into the water of new technology. Telephony, August 1982, pp. 24-30.
6. Negishi Y. et al.: Design of deep-sea submarine optical fibre cable. JLT, December 1982, pp. 839-845.
7. Rutkowski A.: The impact of new technology on satellite communication. Telecommunication Magazine, vol. 17, No 1, February 1983, pp. 46-49.
8. Proc. of IVth IOOC, Tokyo, June 1983, Undersea systems and cables, Special Session 29A4.
9. Murphy R.H.: Reliability growth programmes for undersea communication systems. IEEE Trans. on Reliability, vol. R-32, August 1983.
10. Proc. of IVth World Telecommunication Forum, Geneva, Switzerland, October 1983.
11. Frisch D.A. et al.: High-capacity 1,3 μm optical fibre transmission systems trial for submarine applications. Electron. Lett., vol. 20, No 4, 1984, pp. 154-155.
12. Ishikawa Y. et al.: 7000 m deep sea trial of OS-280M optical fiber submarine cable system. Electron. Lett., vol. 20, No 13, 1984.

13. Asakawa K. et al.: Underwater optical connector for remotely operated submersible. *Electron. Lett.*, vol. 20, 1984, p. 1031.
14. 1984 World's Submarine Telephone Cable Systems, US Department of Commerce, Undersea Cable Engineers Inc.
15. IEEE J. on Selected Areas in Telecommunication, vol. SAC-2, November 1984, Special Issue on Undersea Lightwave Communications.
16. IEEE J. LWT, vol. LT-2, No 6, December 1984, Special issue on Undersea Lightwave Communications.
17. Tsutsumi S. et al.: Operation trial of 400 Mb/s submarine optical transmission system. *Electron. Lett.* vol. 21, No 5, February 1985, pp. 182-183.
18. AT&T Technical Journal, Assuming High Reliability of Lasers and Photodetectors for Submarine Lightwave Cable Systems, vol. 64, No 3, March 1985, Special issue.
19. Yoshizawa N. et al.: Water propagation blocking properties of submarine optical cable. *Electron. Lett.*, vol. 21, No 18, August 1985, pp. 796-798.
20. Thiennot J. et al.: Optical undersea systems in France: today and tomorrow. *IEEE Communications Magazine*, vol. 23, No 8, August 1985, pp. 6-14.
21. Guterl F. et al.: Fiber optics: poised to displace satellites. *IEEE Spectrum*, August 1985, pp. 30-37.
22. Paul D.K.: Communications by undersea cable: present and future. *SPIE*, vol. 559, 1985, p. 08.
23. Proc. of Int. Conf. on Optical Fiber Submarine Telecommunication Systems, 18-21 February 1986, Paris Suboptio.
24. FIBRESAT '86, Int. Conf. on Satellite and Fiber Optic Communications, Vancouver, Canada, September 9-12, 1986.
25. Sandbank C.P.: *Optical Fiber Communication Systems*. J. Wiley Editors, New York, 1980.

26. Johnson G.T., Kill J.: Development of submarine cable plough and plough burial of fibre optic submarine cables. Teleteknik, English Edition, No 1, 1986.
27. Faas G.: Details of massive Trans-Pacific optical cable. Lightwave, March 1986.
28. Moltzman R.: Three billion \$ for grabs in underwater cable market. Lightwave, December 1986.
29. Dumbaugh W.H.: Infrared transmitting glasses. Optical Engineering, vol. 24, No 2, March/April 1985, pp. 257-262.
30. Hornung E.: Repeaterless undersea cable communications in Denmark. Laser Focus, November 1986, pp. 134-136.
31. Proc. of SPIE, vol. 723. Progress in Semiconductor Laser Diodes, 1986.
32. Proc. of SPIE, vol. 587. Optical Fibre Sources and Detectors, 1985.
33. Adams R.: How hydrogen attacks marine fibres. Lightwave, May 1986, pp. 37-39.
34. Glazer S.: Undersea cable, the next generation will be fiberoptics. IFOC, vol. 2, No 4, August 1981, pp. 34-35, 48.
35. Optical Fibre Submarine Communications, Kessler Marketing Intelligence, Newport CA, USA 1986.
36. Runge P.K., Triscitta P.R., edits.: Undersea Lightwave Communications. IEEE Press, New York 1986.
37. Proc. of SPIE, Coherent Technology in Fiber Optic Systems I, vol. 568, 1985.
38. Proc. of SPIE, Coherent Technology in Fiber Optic Systems II, vol. 844, 1987.
39. Gagliardi R.M., Karp S.: Optical Communications, Willey 1975, New York.

40. Yurke B., Slusher R.E.: Squeezed light. Optics News, June 1987, vol. 13, No 6, pp. 6-9.
41. Fisher R.A.: Optical Phase Conjugation. Acad. Press, New York, 1985.
42. Gęborys L.: Problemy wyboru systemu teletransmisyjnego pomiędzy Bornholmem a Polską. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 1, 1987, str. 3-8.
43. One billion \$ fiber link project set for NZ, Australia, Optical Engineering Reports, SPIE, No 8, 1986.
44. Romaniuk R.: Światłowodowa telekomunikacja podmorska. BIT, nr 6 /76/, 1986.
45. Romaniuk R.: Podmorskie telekomunikacyjne systemy światłowodowe. Cz.I, Biul. Techn. ML, nr 4, 1986; cz. II, Biul. Techn.ML, nr 1, 1987.

ISSN 0209-1046

