

Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki
Instytut Informatyki

Rozprawa doktorska

**Bezprzewodowe sieci komputerowe
wykorzystujące konwersję protokołów**

Mgr inż. Bartłomiej Zieliński

Promotor:

Dr hab. inż. Adam Mrózek, Prof. Politechniki Śląskiej

Gliwice, czerwiec 1997

Spis treści

Spis rysunków	5
Spis tabel	8
1. Wprowadzenie	10
1.1. Rozwój sieci komputerowych	10
1.2. Przyczyny stosowania mediów bezprzewodowych	11
1.3. Przykłady zastosowań mediów bezprzewodowych	12
1.4. Problematyka poruszana w pracy	14
2. Elementy sieci komputerowych	16
2.1. Topologia sieci	16
2.2. Media transmisyjne	17
2.3. Rodzaje łącz	17
2.4. Metody dostępu do łącza	17
2.5. Protokoły komunikacyjne	18
2.6. Model odniesienia OSI/ISO	18
2.6.1. Elementy systemu otwartego	19
2.6.2. Warstwy i ich funkcje	19
2.6.3. Miejsce transmisji bezprzewodowej w modelu OSI/ISO	20
2.6.4. Połączenia międzysieciowe	21
2.7. Wybrane standardy sieci	21
2.7.1. Standard RS-232C	23
2.7.2. Standard RS-485	24
2.7.3. Sieć przemysłowa Modbus	24
2.7.3.1. Warstwa fizyczna	24
2.7.3.2. Warstwa liniowa	25
2.7.3.3. Warstwa zastosowań	26
2.7.4. Sieć przemysłowa Profibus	27
2.7.4.1. Warstwa fizyczna	27
2.7.4.2. Warstwa liniowa	27
2.7.4.3. Warstwa zastosowań	30
3. Charakterystyka bezprzewodowych mediów transmisyjnych	32

3.1. Fale radiowe i mikrofałe	32
3.1.1. Wykorzystanie fal radiowych do transmisji danych	33
3.1.2. Propagacja wybranych zakresów fal radiowych	34
3.1.2.1. Propagacja fal krótkich	34
3.1.2.2. Propagacja fal ultrakrótkich i mikrofal	36
3.2. Światło laserowe i podczerwień	38
3.2.1. Fale z zakresu podczerwieni	38
3.2.2. Światło laserowe	39
3.3. Struktura radiowego systemu transmisyjnego	41
3.3.1. Modulacja w cyfrowych systemach radiokomunikacyjnych	41
3.3.2. Dobór parametrów systemu radiokomunikacyjnego	42
3.3.2.1. Dobór częstotliwości nośnej i szerokości pasma	42
3.3.2.2. Dobór mocy nadajnika	44
3.4. Struktura optycznego systemu transmisyjnego	46
3.4.1. Nadajniki i odbiorniki promieniowania świetlnego	46
3.4.2. Modulacja w optycznych systemach transmisyjnych	47
3.4.3. Rodzaje łączy optycznych	48
3.5. Uwarunkowania prawne	49
3.6. Możliwości techniczne	50
4. Idea konwersji protokołów	51
4.1. Dyskusja możliwych rozwiązań	51
4.2. Zadania konwertera protokołów	54
4.3. Warianty realizacji konwertera protokołów	56
5. Realizacja konwertera protokołów	60
5.1. Konwerter protokołów dla łącza RS-232C	60
5.1.1. Protokół łącza bezprzewodowego	61
5.1.2. Baza sprzętowa	61
5.1.2.1. Mikrosterownik 80C32	62
5.1.2.2. Układ transmisji szeregowej 8251	63
5.1.3. Integracja układów	64
5.1.4. Oprogramowanie konwertera	65
5.1.4.1. Inicjalizacja konwertera	66
5.1.4.2. Obsługa łącza przewodowego	67
5.1.4.3. Obsługa łącza bezprzewodowego	67

5.1.4.4. Konwersja protokołów	68
5.1.5. Środki wspomagające implementację konwertera	69
5.1.6. Analiza czasowa pracy konwertera	69
5.1.6.1. Transmisja danych o dużej objętości	70
5.1.6.2. Transmisja danych o małej objętości	71
5.1.7. Oszacowanie wpływu konwertera na przepustowość łącza	72
5.1.8. Ocena konwertera	74
5.2. Zmodyfikowany konwerter dla sieci przemysłowych	77
5.2.1. Protokół łącza radiowego	78
5.2.2. Zasady konwersji protokołów	79
5.2.3. Baza elementowa	80
5.2.3.1. Mikrosterownik Dallas DS80C320	80
5.2.3.2. Moduł Micromax μ M-31	81
5.2.3.3. Moduł Micromax μ M-uni	82
5.2.3.4. Moduł radiowy Radiometrix BiM-433-F	83
5.2.3.5. Układ dopasowania napięć Yuko KA-485	83
5.2.4. Projekt konwertera protokołów	85
5.2.4.1. Projekt układu radiowego	86
5.2.4.2. Projekt układu odczytu konfiguracji	87
5.2.5. Montaż układu	87
5.2.6. Oprogramowanie konwertera	88
5.2.6.1. Inicjalizacja konwertera	90
5.2.6.2. Obsługa łącza przewodowego	91
5.2.6.3. Obsługa łącza bezprzewodowego	91
5.2.6.4. Procedura konwersji protokołów	91
5.2.7. Środki wspomagające implementację konwertera	93
5.2.8. Analiza czasowa zmodyfikowanego konwertera	93
6. Badanie właściwości konwerterów	96
6.1. Badanie wpływu parametrów konwertera na przebieg transmisji	96
6.1.1. Wpływ długości ramki oraz liczby potwierdzeń	97
6.1.2. Wpływ szybkości komunikacji z komputerem oraz długości przesyłanej informacji	103
6.1.3. Wpływ zakłóceń	105
6.2. Współpraca konwerterów z siecią Modbus	106
6.2.1. Testy ogólne	107

Spis treści	4
<hr/>	
6.2.2. Testy porównawcze	109
6.2.3. Pomiar stopy błędów	112
7. Kierunki dalszych prac	115
8. Podsumowanie i wnioski	117
9. Literatura	119

Spis rysunków

Rys. 1.	Topologie sieci komputerowych	16
Rys. 2.	Warstwy w modelu odniesienia OSI/ISO	20
Rys. 3.	Ilustracja zasady pracy regeneratora	22
Rys. 4.	Ilustracja zasady pracy mostu	22
Rys. 5.	Ilustracja zasady pracy routera	22
Rys. 6.	Ilustracja zasady pracy wrót	22
Rys. 7.	Format znaku dla transmisji asynchronicznej w standardzie RS-232C	23
Rys. 8.	Format ramki sieci Modbus w trybie ASCII	25
Rys. 9.	Format ramki sieci Modbus w trybie RTU	25
Rys. 10.	Format komunikatu sieci Modbus	26
Rys. 11.	Zasada dostępu do łącza w sieci Profibus	28
Rys. 12.	Formaty ramek sieci Profibus	29
Rys. 13.	Widmo fal elektromagnetycznych	32
Rys. 14.	Rozchodzenie się fali jonosferycznej w zakresie fal krótkich	34
Rys. 15.	Schemat cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego	41
Rys. 16.	Trójskładnikowy model propagacji przyziemnej przedhoryzontowej	44
Rys. 17.	Rodzaje łączy optycznych	48
Rys. 18.	Przykładowa, przewodowa sieć komputerowa	51
Rys. 19.	Przewodowa sieć komputerowa z urządzeniami do transmisji bezprzewodowej	52
Rys. 20.	Ilustracja problemu ukrytej i odkrytej stacji	54
Rys. 21.	Idea konwertera protokołów transmisyjnych	55
Rys. 22.	Konwerter protokołów jako urządzenie wewnętrzne	56
Rys. 23.	Konwerter protokołów jako autonomiczne urządzenie zewnętrzne	57
Rys. 24.	Format nagłówka ramki protokołu łącza radiowego	61
Rys. 25.	Format pola danych ramki protokołu łącza radiowego	61
Rys. 26.	Struktura mikrosterownika jednocukłowego 80C32	62
Rys. 27.	Schemat blokowy konwertera protokołów dla łącza RS-232C	65
Rys. 28.	Schemat programu konwertera dla łącza RS-232C	66
Rys. 29.	Przebieg transmisji z użyciem konwerterów przy dużej objętości przesyłanej informacji	70
Rys. 30.	Przebieg transmisji z użyciem konwerterów przy małej objętości przesyłanej informacji	71

Rys. 31.	Teoretyczny wpływ wielkości przesyłanej informacji na efektywną szybkość transmisji dla różnych długości pola danych ramki	74
Rys. 32.	Czasy transmisji danych łączem przewodowym (T_w) i bezprzewodowym (T_{wl}) w zależności od długości pola danych ramki	75
Rys. 33.	Teoretyczny wpływ długości pola danych ramki na efektywną prędkość transmisji dla przesyłu informacji o długości 65536 B	75
Rys. 34.	Struktura ramki łącza bezprzewodowego	78
Rys. 35.	Struktura wewnętrzna mikrosterownika DS80C320	81
Rys. 36.	Wyprowadzenia mikrosterownika DS80C320 w obudowie DIP-40	82
Rys. 37.	Schemat blokowy płytki $\mu M-31$	83
Rys. 38.	Schemat blokowy modułu BiM-433-F	84
Rys. 39.	Wymiary i rozkład wyprowadzeń modułu BiM-433-F	84
Rys. 40.	Schemat blokowy konwertera protokołów	86
Rys. 41.	Schemat układu radiowego konwertera protokołów	87
Rys. 42.	Schemat układu konfiguracyjnego konwertera protokołów	87
Rys. 43.	Rozmieszczenie elementów na płytce uniwersalnej μM -uni	88
Rys. 44.	Widok tylnej części obudowy konwertera	89
Rys. 45.	Ilustracja działania programu konwertera	90
Rys. 46.	Procedura obsługi łącza przewodowego	92
Rys. 47.	Procedura obsługi łącza bezprzewodowego	92
Rys. 48.	Schemat procedury konwersji protokołów	93
Rys. 49.	Realizacja transakcji w sieci Modbus z użyciem konwerterów	94
Rys. 50.	Konfiguracja stanowiska badawczego	97
Rys. 51.	Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (1200 bd)	100
Rys. 52.	Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (300 bd)	100
Rys. 53.	Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (9600 bd)	101
Rys. 54.	Wpływ liczby potwierdzeń na użyteczną szybkość transmisji (1200 bd) .	101
Rys. 55.	Wpływ liczby potwierdzeń na użyteczną szybkość transmisji (300 bd) . .	102
Rys. 56.	Wpływ liczby potwierdzeń na użyteczną szybkość transmisji (9600 bd) .	102
Rys. 57.	Wpływ wielkości przesyłanej informacji na użyteczną szybkość transmisji	104
Rys. 58.	Konfiguracja doświadczalnego segmentu sieci Modbus z wykorzystaniem łącza przewodowego	107
Rys. 59.	Konfiguracja doświadczalnego segmentu sieci Modbus z wykorzystaniem konwerterów	108

Rys. 60.	Konfiguracja stanowiska dla badania przezroczystości konwerterów i stopy błędów łącza radiowego	108
----------	---	-----

Spis tabel

Tab. 1.	Dekadowy podział fal radiowych na podzakresy wg CCIR	33
Tab. 2.	Tradycyjny podział fal radiowych na zakresy	33
Tab. 3.	Względne szybkości wybranych metod modulacji	43
Tab. 4.	Typowe parametry nadajników promieniowania świetlnego	46
Tab. 5.	Wybrane parametry odbiorników promieniowania świetlnego	47
Tab. 6.	Orientacyjne parametry różnych wariantów łączy bezprzewodowych	50
Tab. 7.	Czas transmisji 11-bitowego znaku w zależności od prędkości transmisji łącza	79
Tab. 8.	Parametry techniczne modułu BiM-433-F	85
Tab. 9.	Opis wyprowadzeń modułu BiM-433-F	85
Tab. 10.	Użyteczna szybkość transmisji przy szybkości łącza radiowego 300 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek	98
Tab. 11.	Użyteczna szybkość transmisji dla szybkości łącza radiowego 1200 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek	99
Tab. 12.	Użyteczna szybkość transmisji przy szybkości łącza radiowego 9600 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek	99
Tab. 13.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu kablowym (roz- dzielczość 60 ms)	109
Tab. 14.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu bezprzewodo- wym (rozdzielczość 60 ms)	110
Tab. 15.	Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łączy (rozdzielczość 60 ms)	110
Tab. 16.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na łączu kablowym (rozdzielczość 60 ms)	110
Tab. 17.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na łączu bezprzewodo- wym (rozdzielczość 60 ms)	110
Tab. 18.	Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na obu ty- pach łączy (rozdzielczość 60 ms)	111
Tab. 19.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu kablowym (roz- dzielczość 20 ms)	111
Tab. 20.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu bezprzewodo- wym (rozdzielczość 20 ms)	111
Tab. 21.	Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łączy (rozdzielczość 20 ms)	111

Tab. 22.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu kablowym (rozdzielczość 10 ms)	112
Tab. 23.	Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu bezprzewodowym (rozdzielczość 10 ms)	112
Tab. 24.	Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łącz (rozdzielczość 10 ms)	112
Tab. 25.	Wyniki pomiarów stopy błędów łącza radiowego	113

1. Wprowadzenie

Postępująca komputeryzacja różnych instytucji, przedsiębiorstw i zakładów produkcyjnych pociąga za sobą konieczność łączenia komputerów w sieci komputerowe. Przykładowymi zadaniami sieci komputerowych są:

- wymiana informacji pomiędzy użytkownikami poszczególnych komputerów, np. w trybie pracy grupowej,
- zdalny dostęp do zgromadzonych danych,
- współdzielenie relatywnie drogich zasobów, np. dysków, drukarek, skanerów, ploterów itp.,
- umożliwienie zdalnego dostępu do komputerów dużej mocy,
- monitorowanie i zdalne sterowanie procesami przemysłowymi.

1.1. Rozwój sieci komputerowych

Sieci komputerowe wywodzą się od systemów wielodostępnych, w których wielu użytkowników, za pośrednictwem terminali, korzystało z pojedynczego komputera o stosunkowo, jak na owe czasy, dużej mocy obliczeniowej [1]. Z czasem powstały terminale inteligentne, mogące wstępnie przetwarzać dane, odciążając tym samym jednostkę centralną. Następnie zaczęto łączyć ze sobą komputery obliczeniowe, przy czym początkowo połączenia te ograniczone były do sprzętu tego samego typu, pracującego pod kontrolą jednego systemu operacyjnego. Ograniczenie to później zniesiono, tworząc sieci otwarte.

Początkowo sieci komputerowe konstruowano z myślą o wymianie informacji między komputerami i ich użytkownikami. Były to, w większości przypadków, sieci, umożliwiające transmisję na duże odległości z małymi szybkościami (np. ARPANET [2, 3, 4]). W późniejszym okresie pojawiły się sieci lokalne, umożliwiające komunikację z szybkościami znacznie większymi, ale na stosunkowo małym obszarze, ograniczonym zwykle do pojedynczego budynku czy przedsiębiorstwa. Sieci lokalne umożliwiają efektywne współdzielenie drogich zasobów, jak np. skanery, drukarki, plotery czy dyski o dużej pojemności.

Wzrost niezawodności komputerów i sieci komputerowych sprawił, że interesujące stało się ich zastosowanie do monitorowania procesów przemysłowych oraz sterowania nimi. W ten sposób pojawiły się sieci przemysłowe, w których ważną cechą jest gwarantowany maksymalny czas reakcji, mniej istotna jest natomiast przepustowość łącza. W sieciach przemysłowych na ogół przesyłane są krótkie komunikaty o długości kilku do kilkuset bajtów, podczas gdy w sieciach lokalnych przesyła się relatywnie duże informacje o objętości rzędu kilo-, a nawet megabajtów.

Do tworzenia sieci komputerowych, jako medium transmisyjne, początkowo wykorzystywano skrętkę. Okazało się jednak, iż ma ona niedużą odporność na zakłócenia, a także uniemożliwia uzyskanie wysokich prędkości transmisji i dużych zasięgów. Z tego powodu popularne stały się kable koncentryczne, które mają znacznie lepsze parametry [1]. Z kolei rozwój techniki transmisji optycznej spowodował, że do tworzenia sieci zaczęto wykorzystywać łącza światłowodowe, charakteryzujące się zarówno bardzo dużymi prędkościami transmisji, jak i wysoką odpornością na zakłócenia.

Wymienione media transmisyjne posiadają jednak pewne wady. Wymagają mianowicie dużych nakładów na okablowanie budynków, co w praktyce uniemożliwia szybkie tworzenie sieci, nie nadają się także do wykorzystania w sieciach mobilnych. Ponadto, problemem może być zapewnienie łączności na stosunkowo dużym obszarze, nie wyposażonym w środki łączności. Z tego powodu pojawiło się zainteresowanie innymi rozwiązaniami, takimi jak transmisja radiowa i satelitarna, a w ostatnim czasie również z użyciem fal z zakresu podczerwieni.

1.2. Przyczyny stosowania mediów bezprzewodowych

Literatura [2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] podaje kilka najbardziej typowych przypadków, w których wykorzystanie transmisji bezprzewodowej jest pożądane lub wręcz konieczne:

1. Stacje, które mają komunikować się ze sobą, rozmieszczone są na dużych obszarach, ubogich w środki łączności, np. telefonicznej. Transmisja radiowa jest wówczas względnie prostym i tanim sposobem uzyskania łączności na stosunkowo duże odległości (zależnie od mocy nadajnika i topografii terenu).
2. Projektowana sieć może charakteryzować się dużymi wahaniami obciążenia lub małą szybkością transmisji, tak więc posiadane kanały łączności przewodowej (linie dzierżawione) mogą być wykorzystane tylko w niewielkim stopniu. Zastosowanie mediów bezprzewodowych jest wówczas korzystniejsze z ekonomicznego punktu widzenia.
3. Stacje mogą poruszać się względem siebie. W tym przypadku zalety transmisji bezprzewodowej, szczególnie radiowej, są najbardziej oczywiste, ponieważ przewody elektryczne praktycznie uniemożliwiają swobodne poruszanie się stacji.
4. Wymagana jest duża szybkość tworzenia sieci lub elastyczność konfigurowania i rekonfigurowania projektowanej sieci. Transmisja bezprzewodowa umożliwia częste zmiany liczby użytkowników sieci bez konieczności dokonywania zmian w strukturze systemu.

Powyższe sytuacje rozpatrywane są głównie w kontekście zastosowania transmisji radiowej z relatywnie małą szybkością na duże odległości. Obecnie jednak coraz bardziej popularne stają się także inne rozwiązania, jak np. transmisja satelitarna, która w wielu przypadkach z powodzeniem może zastąpić radiową, a także łączność z użyciem podczerwieni. Jako przykładowe można wymienić następujące sytuacje [13]:

5. Sieć składa się z niewielkiej liczby stacji i zlokalizowana jest na stosunkowo małym obszarze. Wówczas, jeśli instalacja połączeń przewodowych jest niewygodna, można wykorzystać, w zależności od wymagań, fale radiowe lub podczerwień.
6. W środowisku pracy sieci istnieją silne zakłócenia elektromagnetyczne, które oddziałują niekorzystnie na parametry transmisji, a często ją uniemożliwiają. Dość dobrym rozwiązaniem jest wówczas wykorzystanie podczerwieni jako medium transmisyjnego; można też zastosować system hybrydowy, wykorzystujący, zależnie od warunków, fale radiowe lub podczerwień [14].
7. Stacje sieci umieszczone są w ten sposób, że przewody łączące muszą zostać poprowadzone drogą okrężną, co znacznie zwiększa koszt sieci, a także obniża jej niezawodność. Z sytuacją taką mamy do czynienia w centrach aglomeracji miejskich. Również tutaj można wykorzystać podczerwień lub fale radiowe.

Widać zatem, że bezprzewodowe media transmisyjne mogą znaleźć zastosowanie w pewnych przypadkach, szczególnie, gdy użycie medium przewodowego jest niewygodne lub wręcz wykluczone ze względów technicznych.

1.3. Przykłady zastosowań mediów bezprzewodowych

Wymienione powyżej przypadki stanowią jedynie przesłanki stosowania mediów bezprzewodowych. Istnieje jednak wiele ciekawych zastosowań, jak np. [13]:

1. System monitorowania stanu lasu i ochrony przeciwpożarowej. Stacje lokalne, rozmieszczone w punktach obserwacyjnych, wyposażone są w czujniki podczerwieni, pozwalające na zlokalizowanie miejsca o podwyższonej temperaturze. W przypadku wykrycia pożaru informacja o tym fakcie, zawierająca dane umożliwiające określenie zagrożonego obszaru, przesyłana jest do stacji centralnej za pomocą fal radiowych.
2. System zbierania danych dla energetyki. Stacja centralna umieszczona jest w samochodzie, natomiast stacje lokalne są nieruchome, umieszczone na budynkach. Podczas przejazdu ulicą stacje lokalne przesyłają do stacji centralnej np. dane z liczników zużycia energii. W tym przypadku, ze względu na mobilność stacji, konieczne jest użycie fal radiowych.

3. System sterowania oparty na inteligentnych przetwornikach pomiarowych. Każdy przetwornik jest stacją lokalną i realizuje pewne funkcje pomiarowo-kontrolne. W sieci wymieniane są wówczas tylko niezbędne informacje o stanie urządzeń, np. komunikaty o błędach lub innego typu sytuacjach awaryjnych. Istnieje także możliwość przekazywania fragmentów kodu programu, a więc daleko idąca rekonfiguracja funkcji poszczególnych przetworników. Przykładem może być sterowanie światłami ulicznymi wykorzystujące dane o natężeniu ruchu z poszczególnych kierunków. Stacje mogą wówczas przysyłać informacje o natężeniu ruchu oraz komunikaty o blokowaniu się skrzyżowań. Odpowiednie wykorzystanie takich danych powinno zwiększyć przepustowość głównych ciągów komunikacyjnych przez kierowanie samochodów trasą alternatywną lub wyprowadzenie "korków" poza miasto.
4. System zbierania danych w medycynie. Liczne urządzenia pomiarowe, stosowane do badania i rejestrowania stanu chorych, emitują silne zakłócenia elektromagnetyczne wpływające niekorzystnie na parametry transmisji przewodami elektrycznymi czy przez fale radiowe. Ponieważ stacje sieci są w tym przypadku nieruchome, można zastosować transmisję z użyciem podczerwieni.
5. Łączność pomiędzy urządzeniami w dużych miastach lub między odległymi oddziałami przedsiębiorstwa. Zdarza się, że zapewnienie łączności przewodowej pomiędzy dwoma bliskimi budynkami w centrum miasta wymaga prowadzenia kabli drogami okrężnymi. Spowodowane jest to istnieniem różnorodnych przeszkód, jak np. sieć gazowa czy wodno-kanalizacyjna, a także tory tramwajowe. Wydłużanie połączeń wpływa niekorzystnie na parametry transmisji, obniżając jakość sieci i jej niezawodność, a także zwiększa koszty instalacji. Wykorzystanie łączy bezprzewodowych jest bardzo prostym i eleganckim rozwiązaniem tego problemu, szczególnie gdy poszczególne stacje mogą "widzieć się" wzajemnie. Można wówczas wykorzystać zarówno fale radiowe, jak i podczerwień. Urządzenia przeznaczone do tego typu połączeń, tzw. mosty bezprzewodowe, pomimo wysokiej ceny, mogą okazać się atrakcyjne cenowo wobec np. łączy dzierżawionych, często udostępniają też wyższą przepustowość łącza.
6. Systemy łączności rezerwowej na obszarach zagrożonych sejsmicznie. W przypadku trzęsienia ziemi przewody komunikacyjne mogą ulec uszkodzeniu. W celu utrzymania łączności można wykorzystać transmisję bezprzewodową, szczególnie radiową.
7. Systemy obsługi w dużych magazynach lub domach towarowych. Elektroniczne kasy fiskalne, rozpoznające rodzaj towaru na podstawie np. kodów paskowych, muszą mieć do dyspozycji dane dotyczące cen poszczególnych artykułów. W przypadku zmiany którejś ceny informacja o tym fakcie może zostać rozesłana

do wszystkich kas jednocześnie. Ze względu na nieruchomość stacji korzystne jest użycie podczerwieni jako medium transmisyjnego.

8. System monitorowania przewozu materiałów i substancji niebezpiecznych. Ciężarówki, transportujące tego typu materiały, wysyłają sygnały identyfikacyjne, umożliwiające precyzyjną lokalizację poszczególnych pojazdów. Ze względu na wielkość obszaru monitorowania (praktycznie cały kraj lub nawet kontynent) oraz nieograniczone możliwości poruszania się stacji, jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie łączności satelitarnej. Jako ciekawostkę można przytoczyć fakt wykorzystywania tego typu rozwiązań w armii Stanów Zjednoczonych do celów lokalizacji żołnierzy, z których każdy wyposażony jest w nadajnik.
9. Lokalna sieć komputerowa zestawiana tymczasowo (ang. *ad-hoc network*), np. na czas trwania konferencji. Użytkownicy sieci, wyposażeni w komputery przenośne, mogą komunikować się między sobą, jak również z siecią przewodową. To ostatnie połączenie uzyskuje się za pomocą tzw. punktu dostępu (ang. *access point*), pozwalającemu stacjom wyposażonym w łącze bezprzewodowe na dostęp do sieci przewodowej.
10. Lokalna wewnątrzbudynkowa sieć komputerowa (ang. *Wireless In-building Network*) [15]. Sieć taka składa się zazwyczaj z pojedynczej stacji sterującej (ang. *Control Module*) i stacji użytkowników (ang. *User Module*) [16]. Każda z tych stacji może być także dołączona do segmentu sieci przewodowej. Stacje użytkowników komunikują się ze sobą tylko za pośrednictwem stacji sterującej, której zasięg (w przypadku transmisji radiowej) określa rozmiary tzw. mikrokomórki sieci. Sąsiednie mikrokomórki muszą korzystać z różnych kanałów radiowych, niemniej jednak struktura budynku ogranicza zasięg stacji, toteż sieci pracujące na różnych piętrach mogą pracować w tym samym kanale bez wzajemnego zakłócania. Parametry użytkowe sieci są zbliżone do parametrów przewodowych sieci lokalnych.

1.4. Problematyka poruszana w pracy

Niniejsza praca stanowi próbę wprowadzenia bezprzewodowych mediów transmisyjnych do typowych sieci przewodowych w taki sposób, że istnieje możliwość dalszego stosowania posiadanego już sprzętu i oprogramowania sieciowego, czyli bez naruszania logicznego i fizycznego standardu sieci. W szczególności rozpatrywana jest możliwość realizacji bezprzewodowych segmentów w przewodowych sieciach komputerowych.

Rozdział drugi pracy omawia podstawowe pojęcia, związane z sieciami komputerowymi. Pokróćce opisany jest model systemów otwartych oraz wybrane rozwiązania sieci komputerowych, wykorzystywane w dalszych częściach pracy.

Rozdział trzeci stanowi charakterystykę bezprzewodowych mediów transmisyjnych, takich jak fale radiowe i świetlne. Opisane są zarówno pewne właściwości fizyczne tych fal, związane z ich propagacją, jak również sposoby ich wykorzystania do realizacji transmisji danych cyfrowych.

Rozdział czwarty omawia możliwe sposoby połączenia przewodowego i bezprzewodowego segmentu sieci komputerowej, oparte na idei konwertera protokołów transmisyjnych. W rozdziale tym znajduje się uzasadnienie konieczności zastosowania tego typu rozwiązania oraz dyskusja możliwych wariantów wykonania konwertera, przy zachowaniu fizycznego i logicznego standardu sieci.

W rozdziale piątym opisana jest pokrótce próbna realizacja konwertera dla łącza RS-232C, z rozbiciem na część sprzętową i programową, a także zaprezentowana jest próba oszacowania wpływu konwertera na parametry czasowe sieci. Ponieważ rozwiązanie to nie spełnia pewnych wymogów, charakterystycznych dla sieci przemysłowych, opisana jest także koncepcja i realizacja zmodyfikowanego konwertera dla tych właśnie sieci. Scharakteryzowane są elementy sprzętowe konwertera, wraz z ich danymi technicznymi, a także sposób ich połączenia. Z kolei opisane jest oprogramowanie układu z podziałem na fragmenty, realizujące poszczególne zadania. W rozdziale tym podjęto także próbę oszacowania wpływu zastosowania konwertera protokołów na parametry czasowe przykładowej sieci przemysłowej.

W rozdziale szóstym opisane są badania efektywności transmisji, wykonane z użyciem konwerterów. Pierwszą grupę stanowią badania wpływu wybranych parametrów na efektywność transmisji pomiędzy dwoma komputerami. Uzyskane wyniki są porównane i wzbogacone o analogiczne rezultaty dla kontrolerów TNC. Drugą grupę stanowią badania, zrealizowane w sieci Modbus z wykorzystaniem konwerterów, przeznaczonych dla sieci przemysłowych. Uzyskane wyniki są porównane z analogicznymi wynikami dla sieci, pracującej bez użycia konwerterów. Wykonano także badanie stopy błędu łącza radiowego i przedstawiono jego wyniki.

Rozdział siódmy wskazuje możliwe kierunki dalszych prac nad konwerterem protokołów dla łączy bezprzewodowych. Zaproponowane są rozwiązania, które powinna cechować rekonfigurowalność układu, modułowa struktura konwertera oraz możliwość dynamicznego doboru parametrów transmisji w trakcie pracy układów.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie całości pracy.

2. Elementy sieci komputerowych

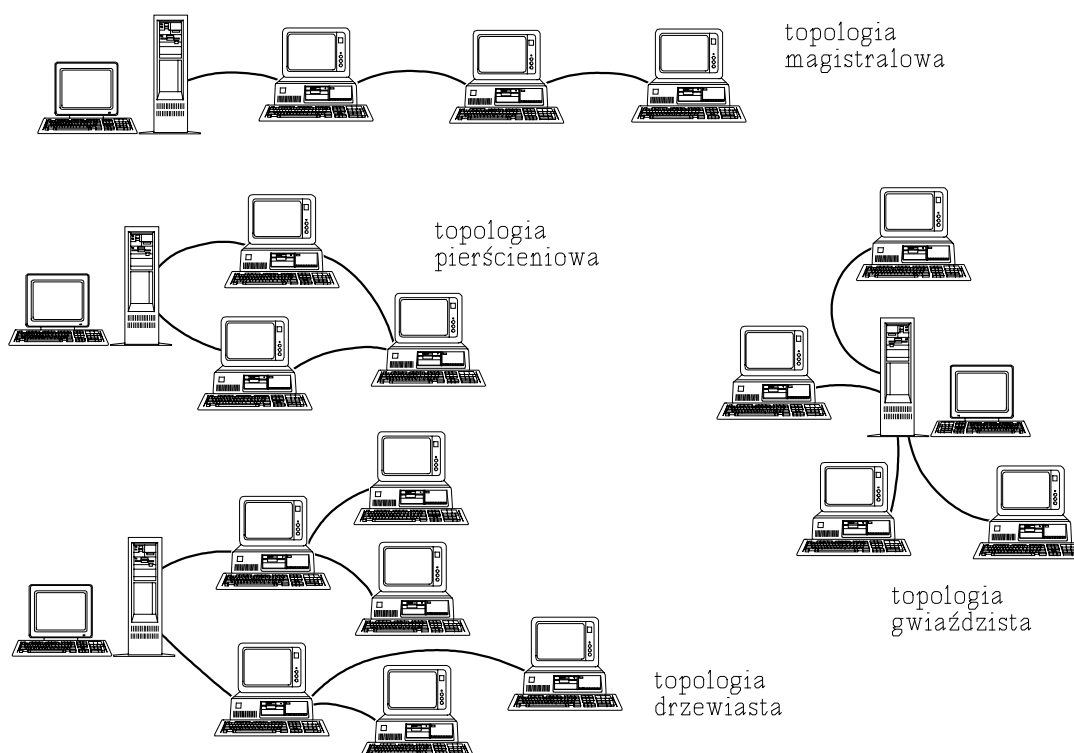
Sieć komputerowa jest to struktura, która udostępnia procesowi użytkowemu, znajdującemu się w pewnym miejscu, określone funkcje lub usługi przetwarzania danych, wykonywane w innym miejscu [17]. Sieć komputerową określa się także jako strukturę, umożliwiającą połączenie komputerów w taki sposób, że mogą wymieniać między sobą dane [2].

Sieci komputerowe charakteryzują się pewnymi wspólnymi cechami. Są to [1]:

- topologia,
- medium transmisyjne,
- rodzaj łącza,
- metoda dostępu do łącza,
- protokół komunikacyjny.

2.1. Topologia sieci

Topologia sieci jest to sposób wzajemnego rozmieszczenia stacji sieci i przewodów połączeniowych [18]. W spotykanych obecnie sieciach można wyróżnić następujące topologie (rys. 1) [2, 18]:



Rys. 1. Topologie sieci komputerowych

- magistralową,
- pierścieniową,
- gwiazdzistą,
- drzewiastą,
- swobodną.

W sieciach komputerowych (lokalnych i przemysłowych) najczęściej stosowana jest topologia magistralowa.

2.2. Media transmisyjne

Medium transmisyjne, czyli fizyczny ośrodek transmisji, jest to rodzaj połączenia między stacjami sieci [18]. Media transmisyjne dzieli się na:

- przewodowe:
 - * skrętka (skręcona para przewodów),
 - * kabel koncentryczny (współosiowy),
 - * światłowód;
- bezprzewodowe:
 - * fale radiowe,
 - * światło z zakresu podczerwieni.

2.3. Rodzaje łączy

Wśród łączy, używanych do realizacji sieci komputerowych, wykorzystuje się następujące rodzaje łączy [2]:

- jednokierunkowe (simpleksowe, ang. *simplex*),
- dwukierunkowe naprzemienne (półdupleksowe, ang. *half-duplex*),
- dwukierunkowe jednoczesne (dupleksowe, ang. *full-duplex*).

W sieciach komputerowych o topologii magistralowej wykorzystywane są łączy dwukierunkowe naprzemienne, zaś w sieciach pierścieniowych – jednokierunkowe.

2.4. Metody dostępu do łączy

Metoda dostępu do łączy jest to algorytm uzyskiwania przez stację sieci zezwolenia na nadawanie. Wyróżnia się następujące grupy metod [19, 20, 21]:

1. Metody dostępu swobodnego:
 - a) niewrażliwe na częstotliwość nośną:
 - Aloha (ang. *pure Aloha*),
 - Aloha szczelinowa (ang. *slotted Aloha*);

- b) wrażliwe na częstotliwość nośną (CSMA, ang. *Carrier Sense Multiple Access*):
 - z unikaniem kolizji (CA, ang. *colission avoiding*),
 - z wykrywaniem kolizji (CD, ang. *colission detection*),
 - z rozstrzygnięciem kolizji (CR, ang. *colission resolving*).
- 2. Metody dostępu sterowanego:
 - a) sztywne:
 - podział czasu (TDMA, ang. *Time Division Multiple Access*),
 - podział częstotliwości (FDMA, ang. *Frequency Division Multiple Access*),
 - podział kodowy (CDMA, ang. *Code Division Multiple Access*) – tylko dla systemów z widmem rozproszonym,
 - b) adaptacyjne:
 - przekazywanie żetonu (ang. *token passing*),
 - odpytywanie (ang. *polling*),
 - odpytywanie adaptacyjne (ang. *probing*),
 - bufory opóźniające (ang. *register insertion*),
 - wirujące tacki (ang. *slotted ring*).

Spośród wymienionych, najczęściej stosuje się następujące metody:

- dostępu swobodnego z unikaniem lub wykrywaniem kolizji (w sieciach lokalnych),
- przekazywania żetonu (w sieciach lokalnych lub przemysłowych),
- odpytywania (w sieciach przemysłowych).

2.5. Protokoły komunikacyjne

Protokół komunikacyjny jest to zbiór reguł, obowiązujących wszystkie stacje uczestniczące w procesie transmisji danych przy uwzględnieniu wszystkich występujących wówczas problemów [1, 22]. Do podstawowych zadań protokołów komunikacyjnych zalicza się:

- zapewnienie odporności danych na zakłócenia i błędy transmisji,
- dzielenie informacji na fragmenty i odzyskiwanie jej z fragmentów,
- adresowanie urządzeń,
- wybór trasy przesyłania informacji,
- ochronę informacji przed niepowołanym dostępem.

2.6. Model odniesienia OSI/ISO

W celu umożliwienia współpracy urządzeń sieciowych, pochodzących od różnych producentów, w ramach międzynarodowej organizacji standaryzacyjnej ISO (ang. *International Standards Organization*) opracowano zbiór pojęć, zasad i rozwiązań, umożliwiających wzajemną komunikację produktów, zgodnych z tymi zaleceniami. Zbiór ten nazwano mode-

lem odniesienia systemów otwartych (ang. *Open Systems Interconnection Reference Model*) [21].

2.6.1. Elementy systemu otwartego

Funkcje systemu otwartego zdekomponowano, dzieląc go hierarchicznie na *N-podsystemy*. *N-podsystemy* wszystkich połączonych systemów tworzą *N-warstwę* (ang. *N-layer*). Oprócz najwyższej, każda warstwa może świadczyć *usługi komunikacyjne* (ang. *N-services*) na rzecz warstwy wyższej, może także – za wyjątkiem warstwy najniższej – korzystać z usług warstw niższych. W warstwie *N* znany jest zbiór usług warstwy *N-1*, ale nie jest znany sposób ich realizacji, który wobec tego może być zmieniany.

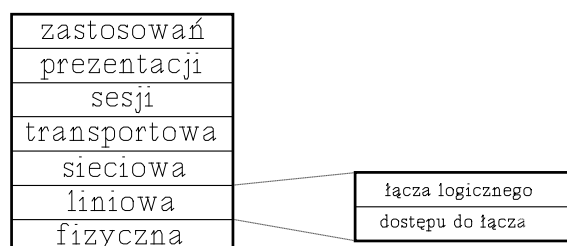
2.6.2. Warstwy i ich funkcje

W ramach modelu OSI/ISO wyróżniono 7 warstw:

1. Warstwę fizyczną (ang. *physical layer*), umożliwiającą przesyłanie pojedynczych bitów z zachowaniem ich kolejności.
2. Warstwę liniową (ang. *data link layer*), odpowiedzialną za prawidłową transmisję informacji w ramach o określonej strukturze. W sieciach lokalnych w ramach tej warstwy wyróżnia się:
 - a) podwarstwę dostępu do łącza (MAC, ang. *medium access control*), zapewniającą stacjom bezkolizyjny dostęp do łącza,
 - b) podwarstwę łącza logicznego (LLC, ang. *logical link control*), odpowiedzialną za współpracę z warstwami wyższymi.
3. Warstwę sieciową (ang. *network layer*), zapewniającą wybór i utworzenie dróg transmisji między stacjami końcowymi.
4. Warstwę transportową (ang. *transport layer*), oddzielającą warstwy wyższe od zagadnień przesyłania informacji między stacjami końcowymi.
5. Warstwę sesji (ang. *session layer*), odpowiedzialną za synchronizację dialogu między stacjami.
6. Warstwę prezentacji (ang. *presentation layer*), zapewniającą syntaktyczne przekształcenie postaci informacji na jednorodną postać.
7. Warstwę zastosowań (ang. *application layer*), oferującą całość usług komunikacyjnych procesom użytkowym.

Podział sieci na warstwy, według modelu OSI/ISO, ilustruje rys. 2.

Nie wszystkie warstwy muszą być implementowane w każdym systemie otwartym. Przykładowo, tzw. węzły sieci (systemy pośrednie) składają się z trzech najniższych warstw (fizycznej, liniowej i sieciowej), ponieważ ich głównym zadaniem jest przesyłanie informacji, a nie jej przetwarzanie. Z kolei w sieciach przemysłowych występuje zazwyczaj warstwa fizyczna, liniowa i zastosowań; ostatnia z nich rozbita jest na podwarstwę współ-



Rys. 2. Warstwy w modelu odniesienia OSI/ISO

pracy z warstwami niższymi (ang. *lower layers interface*), realizującą wybrane zadania brakujących warstw, oraz podwarstwę, realizującą usługi właściwe dla warstwy zastosowań w sieciach przemysłowych.

2.6.3. Miejsce transmisji bezprzewodowej w modelu OSI/ISO

Z punktu widzenia transmisji bezprzewodowej najbardziej interesujące są dwie najniższe warstwy modelu odniesienia, ponieważ wprowadzenie bezprzewodowych mediów transmisyjnych wiąże się głównie ze zmianami w warstwie fizycznej. Wskazane jest jednak uwzględnienie tej zmiany w warstwie liniowej, ponieważ jest ona odpowiedzialna za bezpośrednie sterowanie łączem transmisyjnym i może stosować procedury, odpowiednie do danej sytuacji. Podobne powiązanie warstwy liniowej z fizyczną ma również miejsce w standardach IEEE i ISO dotyczących sieci lokalnych typu Ethernet, Token-Bus i Token-Ring [21].

Podstawowym zadaniem warstwy fizycznej jest przesył pojedynczych bitów z zachowaniem ich kolejności [2]. Przesył ten powinien odbywać się w sposób, zapewniający możliwie jak najlepszą ochronę informacji przed przekłamaniami. Typowo, na poziomie warstwy fizycznej określone są poziomy napięcie, odpowiadające poszczególnym wartościom bitów, czas trwania bitu, a także liczba i przeznaczenie poszczególnych styków złącza. Przykłady rozwiązań sieci na poziomie warstwy fizycznej opisane są w [23, 24].

Zadaniem warstwy liniowej jest taka współpraca z warstwą fizyczną, aby przesyłane informacje nie zawierały błędów transmisji. Dlatego też wymiana danych na poziomie warstwy liniowej dokonywana jest z wykorzystaniem ramek o określonej długości i strukturze. Przykładowymi funkcjami tej warstwy są [21, 25]:

- serializacja i deserializacja ramki,
- nadawanie preambuły,
- synchronizacja blokowa (rozpoznawanie granic ramki),
- adresowanie stacji,
- zapewnienie przezroczystości protokołu,
- sterowanie przepływem informacji,
- ochrona przed błędami.

Funkcje te realizowane są zgodnie z ustalonym protokołem. Protokoły warstwy liniowej dzieli się na znakowe (ang. *character-oriented*, *byte-oriented*) [27] i bitowe (ang. *bit-oriented*) [28]. W protokołach znakowych pewne znaki (bajty) w ramce mają specjalne znaczenie, co z jednej strony ułatwia ich implementację, z drugiej zaś narzuca konieczność stosowania specjalnych technik w celu osiągnięcia przezroczystości protokołu, czyli umożliwienia transmisji dowolnych ciągów znaków bez obawy, że zostaną one zinterpretowane przez protokół jako informacje sterujące. Pozbawione tej wady są protokoły bitowe, w których dane przesyłane są w postaci ciągów bitów (tzw. ramek), ograniczonych określonym wzorcem bitowym. Realizacja tych protokołów ułatwiona jest dzięki istnieniu specjalnych układów scalonych [21], które zapewniają przezroczystość protokołu.

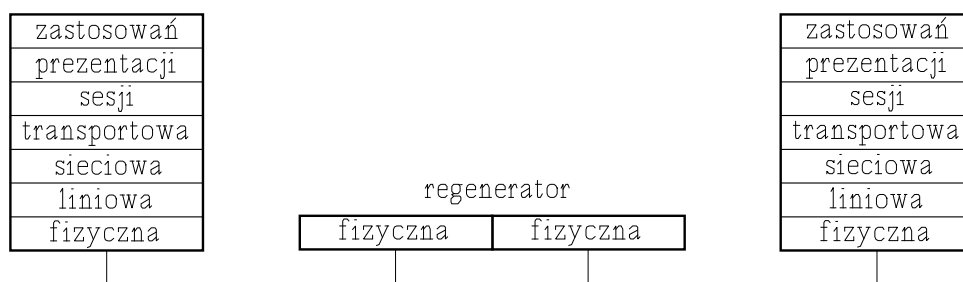
2.6.4. Połączenia międzysieciowe

Poszczególne sieci komputerowe mogą być łączone na kilka sposobów, w zależności od potrzeb. Do tego celu wykorzystywane są następujące urządzenia [18, 29]:

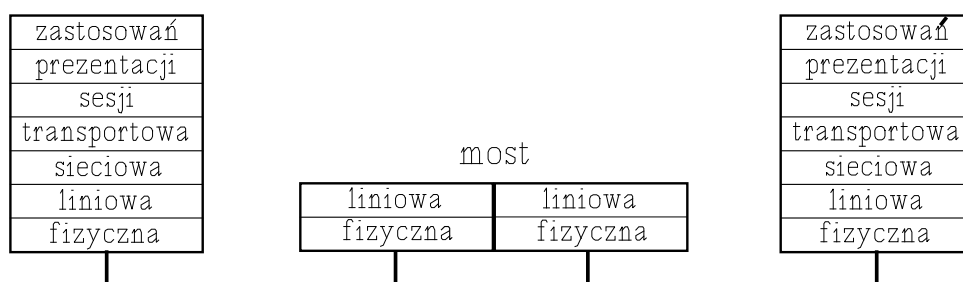
1. Regenerator (ang. *repeater*), łączący sieci na poziomie warstwy fizycznej (rys. 3). Regenerator służy do połączenia dwóch segmentów sieci tego samego typu i dokonuje jedynie wzmocnienia oraz dopasowania elektrycznego sygnałów, bez wnikania w znaczenie przesyłanych danych.
2. Most (ang. *bridge*), łączący sieci na poziomie warstwy liniowej (rys. 4). Most jest najprostszym urządzeniem, umożliwiającym łączenie sieci różnego typu, np. wykorzystujących różne protokoły dostępu do łącza itp. Most dokonuje buforowania danych, powoduje zatem opóźnienia w transmisji.
3. Router (ang. *router*), łączący sieci na poziomie warstwy sieciowej (rys. 5). Routery stosuje się wszędzie tam, gdzie istnieje problem wyboru trasy przesyłanej informacji. Wyróżnia się także uproszczoną wersję routera, tzw. brouter, który wprawdzie także łączy sieci na poziomie warstwy sieciowej, jednak nie dokonuje wyboru trasy. Urządzenia te stosuje się, gdy konwersja protokołów na poziomie warstwy liniowej jest zbyt złożona [18].
4. Wrota (ang. *gateway*), łączące sieci na poziomie warstwy zastosowań (rys. 6). Wrota stosuje się w celu umożliwienia współpracy sieci zupełnie odmiennych typów, np. sieci lokalnej i sieci przemysłowej.

2.7. Wybrane standardy sieci

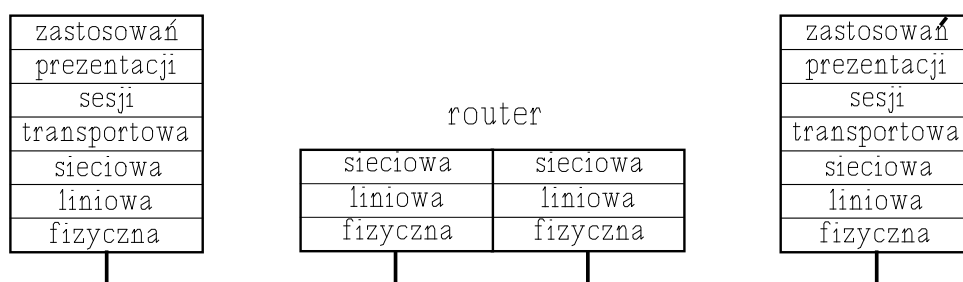
Istnieje wiele standardów sieci komputerowych. Część z nich jest uznana przez międzynarodowe organizacje standaryzacyjne (np. ISO). Z pozostałych sieci, niektóre, dzięki dużej ich popularności, stały się standardami de facto pomimo, że nie istnieje żaden dokument standaryzacyjny, opisujący te rozwiązania.



Rys. 3. Ilustracja zasady pracy regeneratora



Rys. 4. Ilustracja zasady pracy mostu



Rys. 5. Ilustracja zasady pracy routera



Rys. 6. Ilustracja zasady pracy wrot

W poniższym omówieniu wybrano rozwiązania, spotykane w niektórych sieciach przemysłowych, a wykorzystywane w dalszej części niniejszej pracy w kontekście ich realizacji bezprzewodowej.

2.7.1. Standard RS-232C

Standard RS-232C [30] definiuje zasadniczo jedynie warstwę fizyczną modelu OSI/ISO [2] i określa sposób współpracy między urządzeniem końcowym dla danych (DTE, ang. *Data Terminal Equipment*) i urządzeniem komunikacyjnym dla danych (DCE, ang. *Data Communication Equipment*); tym niemniej standard ten wykorzystywany jest także do transmisji danych pomiędzy urządzeniami DTE.

Standard określa dwa sposoby transmisji szeregowej:

- asynchroniczna transmisja znakowa,
- transmisja synchroniczna.

W przypadku transmisji asynchronicznej jednostką informacji stanowi znak, zaopatrzony w dodatkowe bity sterujące: bit startu, bit parzystości i bity stopu. Format znaku przedstawiony jest na rys. 7.

Start	Dane	Parzystość	Stop
1 b	5 ÷ 8 b	1 b	1 ÷ 2 b

Rys. 7. Format znaku dla transmisji asynchronicznej w standardzie RS-232C

Łącze w standardzie RS-232C jest niesymetryczne. Sygnały logiczne reprezentowane są przez odpowiednie poziomy napięcie:

- '1' logiczna – napięcia z zakresu $-3 \div -15$ V (typowo -12 V),
- '0' logiczne – napięcia z zakresu $+3 \div +15$ V (typowo $+12$ V).

Dla transmisji asynchronicznej określono następujące prędkości transmisji: 50, 75, 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 b/s.

Przewody transmisji asynchronicznej, zgodne ze standardem RS-232C, zawierają 8 linii sygnałowych [30]:

- TxD (ang. *Transmitted Data*, dane nadawane),
- RxD (ang. *Received Data*, dane odbierane),
- DTR (ang. *Data Terminal Ready*, gotowość urządzenia końcowego dla danych),
- DSR (ang. *Data Set Ready*, gotowość urządzenia komunikacyjnego dla danych),
- RTS (ang. *Request To Send*, żądanie nadawania),
- CTS (ang. *Clear To Send*, gotowość do nadawania),
- DCD (ang. *Data Carrier Detected*, wykrycie nośnej),
- RI (ang. *Ring Indicator*, wskaźnik wywołania).

Długość przewodów łączących komunikujące się ze sobą urządzenia nie może przekraczać 15 m.

2.7.2. Standard RS-485

Standard RS-485 [30], podobnie jak RS-232C, definiuje jedynie warstwę fizyczną sieci. W przeciwieństwie do RS-232C, zdefiniowane są tu jedynie parametry przewodów i sygnałów, nie jest natomiast określony format przesyłanych danych.

Łącze w standardzie RS-485 jest symetryczne i zrównoważone, zakończone terminatorami o wartości impedancji falowej. Maksymalna długość przewodów wynosi 1200 m, a prędkość transmisji 10 Mb/s.

Do jednej linii transmisyjnej można podłączyć do 32 nadajników (o wyjściach trójstanowych) i 32 odbiorników. Wielkości te dotyczą układów o parametrach typowych; produkowane obecnie nadajniki-odbiorniki o znacznie mniejszej obciążalności łącza umożliwiają łączenie do 128 [31] lub 256 [32] układów do jednej linii.

2.7.3. Sieć przemysłowa Modbus

Sieć przemysłowa Modbus, opracowana przez firmę Gould Modicon, należy do grupy standardów *de facto*. Swą dużą popularność zawdzięcza m. in. temu, że konstrukcję jej warstwy fizycznej oparto o powszechnie stosowany standard RS-232C. Sieć Modbus jest przeznaczona do realizacji rozproszonych systemów pomiarowo-kontrolnych na bazie sterowników programowalnych firm Gould Modicon, AEG oraz Telemecanique [30, 33].

2.7.3.1. Warstwa fizyczna

Dane na poziomie warstwy fizycznej są przesyłane asynchronicznie w postaci znaków o formacie określonym przez standard RS-232C. Medium transmisyjne stanowi skrętka. Stosowane są następujące prędkości transmisji: 50, 75, 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 i 19200 b/s. Format znaku oraz prędkość transmisji jest ustalana przez użytkownika na etapie konfigurowania sieci.

Sieć Modbus posiada architekturę magistralową wielopunktową. Przyłączenie urządzeń do wspólnej magistrali wymaga pośrednictwa modemów. Przy zastosowaniu modemów firmy Gould Modicon do magistrali o maksymalnej długości około 4.5 km można przyłączyć do 32 urządzeń (węzłów). W przypadku zastosowania modemów telekomunikacyjnych, wyposażonych w łącze szeregowe RS-232C, uzyskuje się zwiększenie długości magistrali powyżej 4.5 km oraz liczby węzłów sieci do 247. Możliwa jest również realizacja bezmodemowego łącza dwupunktowego, jednak wtedy maksymalna odległość między komunikującymi się urządzeniami zostaje ograniczona do około 15 m.

Każdemu z węzłów sieci Modbus musi być przyporządkowany niepowtarzalny adres (numer) z zakresu $1 \div 247$.

2.7.3.2. Warstwa liniowa

Dane w sieci Modbus przesyłane są w postaci ramek o formacie zależnym od trybu pracy sieci. Sieć Modbus może pracować w dwóch trybach:

- ASCII,
- RTU (ang. *Remote Terminal Unit*).

W trybie ASCII znaki ramki zawierają bit startu, 7 bitów informacyjnych oraz bit parzystości i bit stopu lub 2 bity stopu. Każdy bajt ramki kodowany jest w postaci dwóch cyfr szesnastkowych ('0' ÷ '9', 'A' ÷ 'F'), określających zawartość kolejno bardziej i mniej znaczącej połowy bajtu. Odstępy pomiędzy poszczególnymi znakami ramki nie mogą przekraczać 1 sekundy. Początek ramki oznaczony jest znakiem ':' (3Ah), koniec zaś parą znaków CR-LF (0Dh, 0Ah). Ramka zabezpieczona jest 8-bitową liniową sumą kontrolną (LRC, ang. *Longitudal Redundancy Check*). Format ramki trybu ASCII przedstawiony jest na rys. 8.

Znacznik początku	Adres	Kod polecenia	Dane	Suma kontrolna	Znacznik końca
1 B	2 B	2 B	2×n B	2 B	2 B

Rys. 8. Format ramki sieci Modbus w trybie ASCII

W trybie RTU znaki ramki zawierają bit startu, 8 bitów informacyjnych oraz bit parzystości i bit stopu lub 2 bity stopu. W przeciwieństwie do trybu ASCII, dopuszcza się przesyłanie bajtów o dowolnej wartości (0 ÷ FFh). Odstęp między poszczególnymi znakami ramki nie może przekraczać $1.5 \times t_c$ (t_c – czas transmisji znaku). Początek i koniec ramki oznaczone są stanem ciszy na łączu, trwającym co najmniej $4 \times t_c$. Ramka zabezpieczona jest 16-bitową cykliczną sumą kontrolną (CRC, ang. *Cyclic Redundancy Check*). Format ramki trybu RTU przedstawiony jest na rys. 9.

Znacznik początku	Adres	Kod polecenia	Dane	Suma kontrolna	Znacznik końca
	1 B	1 B	n B	2 B	

Rys. 9. Format ramki sieci Modbus w trybie RTU

Jednostka nadrzędna ma ustalony czas oczekiwania na odpowiedź od jednostki podrzędnej. Przekroczenie tego czasu może być spowodowane wysłaniem komunikatu do nie istniejącej jednostki podrzędnej lub błędami transmisji (w przypadku wykrycia błędów transmisji jednostka podrzędna ignoruje otrzymany komunikat).

2.7.3.3. Warstwa zastosowań

Programy użytkowe korzystają z usług komunikacyjnych za pośrednictwem warstwy zastosowań. Sieć Modbus została zaprojektowana dla konkretnej dziedziny zastosowań – syntezy rozproszonych systemów pomiarowo-kontrolnych na bazie sterowników PLC [33]. Zakres oferowanych programom użytkowym usług musi umożliwiać realizację, typowych w takich systemach, operacji, jak np.: odczytanie stanu urządzenia zdalnego, zmianę stanu, zadanie parametrów pracy itp. W sieci Modbus warstwa zastosowań udostępnia usługi:

- odczytu stanu wybranego wejścia dwustanowego,
- odczytu stanu wybranego wyjścia dwustanowego,
- odczytu zawartości grupy rejestrów,
- ustawienia/zerowania wybranego wyjścia dwustanowego,
- ustawienia/zerowania grupy wyjść dwustanowych,
- zapisu wartości początkowej do wybranego rejestru,
- zapisu wartości początkowych do grupy rejestrów,
- odczytu zawartości rejestru stanu urządzenia podrzędnego,
- odczytu licznika komunikatów.

W sieci Modbus wyróżnia się jednostkę nadrzędną (ang. *master*), odpowiedzialną za organizację pracy sieci, oraz jednostki podrzędne (ang. *slave*), realizujące polecenia stacji nadrzędnej. Komunikacja zachodzi wyłącznie między jednostką nadrzędną i jednostkami podrzędnymi. Stosowane są dwa tryby adresowania:

- adresowanie indywidualne, w którym wskazana jednostka podrzędna, po odebraniu komunikatu, odsyła odpowiedź do jednostki nadrzędnej,
- adresowanie rozgłoszeniowe, w którym komunikat odbierany jest przez wszystkie jednostki podrzędne równocześnie, a odpowiedź nie jest wysyłana.

Komunikat jednostki nadrzędnej zawiera polecenie dla jednostki podrzędnej. Odpowiedź jednostki podrzędnej zawiera potwierdzenie realizacji polecenia oraz ewentualnie dane. Jeżeli jednostka podrzędna wykryje niepoprawny komunikat (np. odwołanie do nie istniejącego rejestru), odsyła informację o błędzie. Struktura komunikatu przedstawiona jest na rys. 10.

Adres	Kod polecenia	Dane
1 B	1 B	n B

Rys. 10. Format komunikatu sieci Modbus

2.7.4. Sieć przemysłowa Profibus

Standard Profibus (Process Fieldbus) definiuje sieć obiektową (ang. *fieldbus*), przeznaczoną do realizacji rozproszonych systemów pomiarowo-kontrolnych. Architektura logiczna sieci tego standardu obejmuje 3 warstwy modelu OSI/ISO: fizyczną, liniową oraz zastosowań. Protokoły tych warstw opisane są w normie DIN 19245 [34, 35, 36].

2.7.4.1. Warstwa fizyczna

Specyfikacja warstwy fizycznej sieci standardu Profibus została oparta na standardzie łącza RS-485. Sieć posiada topologię magistralową, złożoną z liniowych segmentów kabla. Maksymalna długość segmentu wynosi 1200 m, segmenty łączy się szeregowo poprzez regeneratory (ang. *repeater*). Dopuszczalne jest szeregowe połączenie co najwyżej 4 takich segmentów, zatem maksymalna długość magistrali sieci Profibus wynosi 4800 m. Do sieci można przyłączyć do 127 węzłów, przy czym do pojedynczego segmentu co najwyżej 32. Stosowana jest transmisja w trybie asynchronicznym z prędkościami: 9.6, 19.2, 93.75, 187.5, 500 kb/s. Długość magistrali, w konkretnym przypadku, zależy od przyjętej prędkości transmisji.

Adres węzła jest liczbą z zakresu $0 \div 126$, adres 127 jest adresem rozgłoszeniowym (ang. *broadcast*).

2.7.4.2. Warstwa liniowa

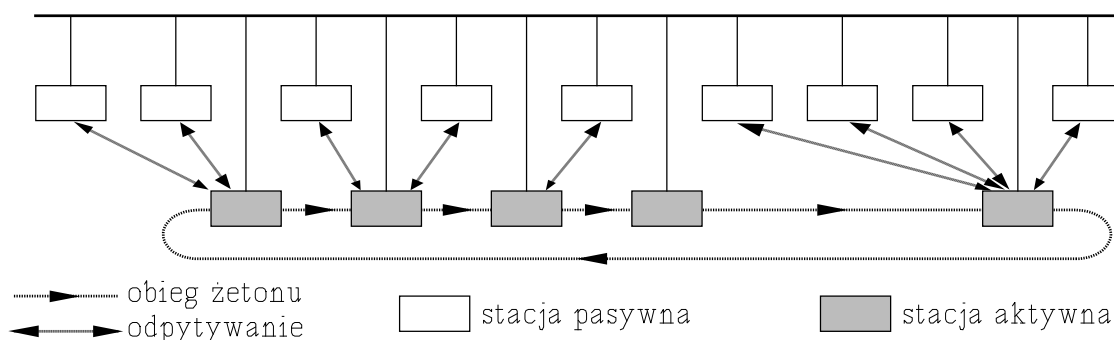
Warstwa liniowa w sieci Profibus odpowiedzialna jest za:

- realizację protokołu dostępu do łącza,
- adresowanie stacji w sieci,
- udostępnianie usług warstwie zastosowań.

Dostęp do łącza

W sieci Profibus wyróżnia się węzły aktywne (ang. *masters*) oraz pasywne (ang. *slaves*). Węzły aktywne (w liczbie do 32 w całej sieci) mogą nadawać dane z własnej inicjatywy, natomiast węzły pasywne mogą tylko odbierać dane i odpowiadać na zapytania od węzłów aktywnych. Przydział łącza węzłom aktywnym odbywa się na zasadzie przekazywania żetonu, natomiast komunikacja pomiędzy węzłami aktywnymi a pasywnymi odbywa się na zasadzie odpytywania (ang. *polling*). Przekazywanie żetonu odbywa się w kolejności rosnących adresów modulo 127. Zasadę dostępu do łącza w sieci Profibus ilustruje rys. 11 [35].

Komunikacja między węzłami aktywnymi a pasywnymi składa się z transakcji. Węzeł aktywny wysyła tzw. komunikat akcji, zawierający dane lub żądanie danych. Jako odpowiedź od węzła pasywnego otrzymuje potwierdzenie poprawnego odbioru danych lub żądane dane. Wyróżnia się transakcje priorytetowe i niepriorytetowe. Transakcje priorytetowe są wykonywane zawsze w pierwszej kolejności. Posiadacz żetonu może zrealizować



Rys. 11. Zasada dostępu do łącza w sieci Profibus

jedną transakcją priorytetową, natomiast transakcje niepriorytetowe mogą być realizowane tylko wtedy, gdy nie naruszy to zadanego czasu obiegu żetonu.

W przypadku zagubienia żetonu lub zmiany konfiguracji sieci w trakcie pracy, sterowniki sieciowe samoczynnie wykryją i usuną awarię. Proces ten jest dla użytkownika niewidoczny.

Ramka w sieci Profibus składa się ze znaków, zawierających: bit startu, 8 bitów informacyjnych, bit parzystości oraz bit stopu, nadawanych kolejno bez przerw między znakami. Wyróżnia się następujące typy ramek (rys. 12):

- żeton (typ SD4),
- polecenie (typ SD1),
- danych o stałej (typ SD3) oraz zmiennej (typ SD2) długości,
- potwierdzenie (typ SD5).

W pierwszym znaku każdej z ramek jest zakodowany jej typ. Jeżeli węzeł aktywny wysła do węzła pasywnego tylko polecenie, używana jest ramka typu SD1, polecenie jest zakodowane w polu P ramki. Do równoczesnego przesyłania poleceń i danych wykorzystuje się ramki typu SD3 oraz SD2. W ramce danych o stałej długości (typ SD3) można przesłać 8 bajtów danych (liczba bitów informacyjnych w znaku równa się 8), natomiast w ramce o zmiennej długości ich liczba jest zapisywana dwukrotnie – w znakach LE oraz LER. Ponieważ sumaryczna długość ramki w sieci Profibus nie może przekroczyć 255 znaków, liczba bajtów danych w ramce o zmiennej długości nie może przekroczyć 246. Zawartości ramek polecenia oraz danych są zabezpieczane sumą kontrolną, po której następuje znacznik końca ramki. Jeżeli węzeł pasywny ma tylko potwierdzić poprawny odbiór danych, wysła jednoznakową ramkę potwierdzenia SD5.

Adresowanie odbiorców w sieci Profibus

Komunikujące się węzły sieci są jednoznacznie określone przez adresy odbiorcy i nadawcy. Jeżeli w węzłach sieci wykonywanych jest wiele zadań i występuje komunikacja między zadaniami w różnych węzłach, konieczne jest korzystanie z usług komunikacyjnych

Typ SD1	Adres odbiorcy	Adres nadawcy	Kod polecenia	Suma kontrolna	Koniec ramki
1 B	1 B	1 B	1 B	2 B	1 B

polecenie

Typ SD2	LE	LEr	Typ SD2	Adres odbiorcy	Adres nadawcy	Kod polecenia		Suma kontrolna	Koniec ramki
1 B	1 B	1 B	1 B	1 B	1 B	1 B		2 B	1 B

dane o zmiennej długości

Typ SD3	Adres odbiorcy	Adres nadawcy	Kod polecenia	Dane	Suma kontrolna	Koniec ramki
1 B	1 B	1 B	1 B	8 B	2 B	1 B

dane o stałej długości

Typ SD4	Adres odbiorcy	Adres nadawcy
1 B	1 B	1 B

żeton

Typ SD5
1 B

potwierdzenie

Rys. 12. Formaty ramek sieci Profibus

za pośrednictwem tzw. punktów udostępniania usług (SAP, ang. *Service Access Point*).

W znakach adresowych na 7-u bitach zakodowane są adresy węzłów, stąd zakres adresów $0 \div 126$, natomiast 8-my bit pełni funkcję tzw. wskaźnika rozszerzenia adresu. Jeżeli ten bit jest ustawiony, w polu danych ramki znajduje się znak zawierający numer PUU (punktu udostępniania usług) odbiorcy w ramach węzła odbiorcy. Numery PUU muszą być liczbami z zakresu $0 \div 62$.

Możliwe jest także przesłanie ramki w trybie rozgłaszania oraz adresowania grupowego. Adres odbiorcy jest w obu przypadkach równy 127, zatem ramka odbierana jest przez wszystkie węzły równocześnie. Jeżeli numer jest równy 63, wówczas odebrana ramka jest kierowana do wszystkich zadań w węzłach sieci (rozgłaszanie). Jeżeli natomiast numer $PUU \neq 63$, odbiorcami ramki są te zadania, które korzystają z PUU o podanym numerze (adresowanie grupowe).

Podwarstwa łącza logicznego

Podwarstwa łącza logicznego udostępnia warstwie zastosowań 6 typów usług:

- przesłanie danych bez potwierdzenia (SDN, ang. *Send Data with No acknowledgement*),
- przesłanie danych z potwierdzeniem (SDA, ang. *Send Data with Acknowledgement*),
- żądanie danych jako odpowiedzi (RDR, ang. *Request Data with Reply*),
- przesłanie danych wraz z żądaniem danych (SRD, ang. *Send and Request Data*),
- cykliczne żądanie danych jako odpowiedzi (CRDR, ang. *Cyclic Request Data with Reply*),
- cykliczne przesyłanie danych wraz z żądaniem danych (CSRD, ang. *Cyclic Send and Request Data*).

Za pomocą usługi typu SDN można przesłać komunikat do użytkownika indywidualnego, grupy użytkowników lub do wszystkich użytkowników sieci. W tym przypadku nie ma gwarancji, że dane zostały przekazane poprawnie, gdyż odbiór komunikatu nie jest potwierdzany.

W usłudze typu SDA nadawca, po wysłaniu komunikatu, czeka na potwierdzenie odbioru. Potwierdzenie to jest odsyłane przez podwarstwę łącza logicznego węzła odbiorczego po bezbłędnym odebraniu komunikatu i przekazaniu go użytkownikowi. Potwierdzenie negatywne lub wystąpienie błędu przy odbiorze potwierdzenia powoduje retransmisję komunikatu.

Usługa typu SRD umożliwia przesłanie danych do indywidualnego użytkownika oraz pobranie od niego uprzednio przygotowanych danych, odsyłanych jako odpowiedź. Dopuszcza się również przesyłanie komunikatu zawierającego tylko żądanie odpowiedzi (usługa typu RDR). Odpowiedź jest odsyłana po poprawnym odebraniu komunikatu przez węzeł odbiorczy oraz przekazaniu danych użytkownikowi. Brak odpowiedzi lub wystąpienie błędu przy jej odbiorze powoduje retransmisję komunikatu.

Po wywołaniu usług typu CSRD lub CRDR następuje cykliczne odpytywanie, przez użytkownika wywołującego usługę, jednego lub wielu użytkowników sieci. Sposób wymiany komunikatów z każdym z odpytywanych użytkowników jest taki sam, jak w usługach typu, odpowiednio, SRD i RDR.

2.7.4.3. Warstwa zastosowań

Usługi warstwy zastosowań sieci standardu Profibus zostały zdefiniowane w specyfikacji FMS (ang. *Fieldbus Message Specification*) [36], uproszczonej wersji specyfikacji MMS (ang. *Manufacturing Message Specification*) [37].

Warstwa zastosowań sieci Profibus podzielona jest na dwie podwarstwy [35]:

- podwarstwę współpracy z niższymi warstwami (LLI, ang. *Lower Layer Interface*),
- podwarstwę komunikatów (FMS, *Fieldbus Message Specification*).

Podwarstwa LLI jest odpowiedzialna za [35]:

- sterowanie przepływem informacji,
- ustanawianie i likwidację połączeń,
- konwersję funkcji warstwy liniowej do postaci wymaganej przez FMS.

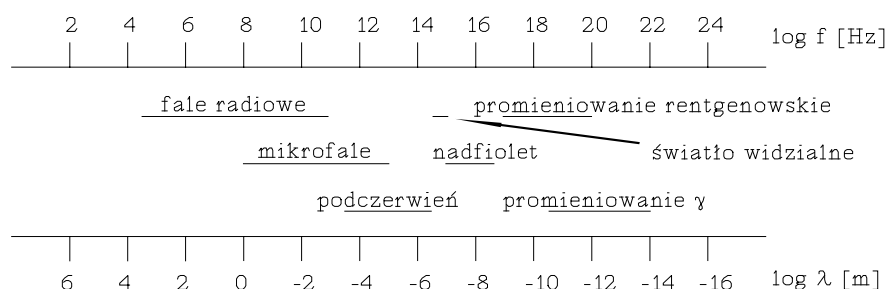
Podwarstwa FMS udostępnia następujące usługi [35]:

- inicjalizację i zakończenie,
- odrzucenie,
- status,
- opis obiektu,
- utworzenie obiektu,
- skasowanie obiektu,
- odczyt,
- zapis,
- powiadomienie o zdarzeniu,
- potwierdzenie zdarzenia.

3. Charakterystyka bezprzewodowych mediów transmisyjnych

Podczas gdy w komunikacji przewodowej stosowane są fale elektromagnetyczne rozchodzące się wzdłuż linii przesyłowej w przestrzeni ograniczonej, komunikacja bezprzewodowa wykorzystuje fale elektromagnetyczne rozchodzące się w wolnej przestrzeni [38]. Ogólnie rzecz biorąc, zakresy częstotliwości fal elektromagnetycznych, wykorzystywane do transmisji, są zbliżone dla mediów przewodowych i bezprzewodowych, stosowanie tych drugich daje jednak nowe możliwości związane z propagacją fal, nie ograniczoną do linii transmisyjnej. Konsekwencją takiego rozwiązania jest jednak większa podatność na zakłócenia elektromagnetyczne.

Ponieważ właściwości fal elektromagnetycznych o różnych częstotliwościach znacznie odbiegają od siebie, wprowadzono ich podział na zakresy, pokazany na rys. 13 [39]. Spotykane obecnie urządzenia do transmisji bezprzewodowej wykorzystują w roli medium transmisyjnego fale radiowe (w tym mikrofałe) lub światło z zakresu bliskiej podczerwieni, również laserowe.



Rys. 13. Widmo fal elektromagnetycznych

3.1. Fale radiowe i mikrofałe

Fala radiowa [40] jest to promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwościach od częstotliwości słyszalnych (15 kHz) do częstotliwości fal widzialnych ($3 \cdot 10^{14}$ Hz). Ponieważ tak duża szerokość ich widma powoduje duże zróżnicowanie właściwości fal radiowych, wprowadzono jego podział na podzakresy. W chwili obecnej obowiązuje, wprowadzony przez CCIR, dekadowy podział fal radiowych na zakresy, zgodny z Regulaminem Radiokomunikacyjnym [41]. Podział ten przedstawiono w tabeli 1. Ponieważ jednak klasyfikacja ta jest całkowicie formalna i nie wynika z właściwości poszczególnych zakresów fal, stosowany jest nadal podział tradycyjny, przedstawiony w tabeli 2 [40].

Tab. 1. Dekadowy podział fal radiowych na podzakresy wg CCIR

Numer pasma	Nazwa fal	Oznaczenie	Długość fal	Częstotliwość
4	myriametrowe	VLF	100 ÷ 10 km	3 ÷ 30 kHz
5	kilometrowe	LF	10 ÷ 1 km	30 ÷ 300 kHz
6	hektometrowe	MF	1000 ÷ 100 m	300 ÷ 3000 kHz
7	dekametrowe	HF	100 ÷ 10 m	3 ÷ 30 MHz
8	metrowe	VHF	10 ÷ 1 m	30 ÷ 300 MHz
9	decymetrowe	UHF	100 ÷ 10 cm	300 ÷ 3000 MHz
10	centymetrowe	SHF	10 ÷ 1 cm	3 ÷ 30 GHz
11	milimetrowe	EHF	10 ÷ 1 mm	30 ÷ 300 GHz
12	decymilimetrowe		1 ÷ 0.1 mm	300 ÷ 3000 GHz

Tab. 2. Tradycyjny podział fal radiowych na zakresy

Nazwa fal	Długość fal	Częstotliwość
bardzo długie	≥ 20 km	≤ 15 kHz
długie	20 ÷ 3 km	15 ÷ 100 kHz
średnie	3000 ÷ 200 m	100 ÷ 1500 kHz
pośrednie	200 ÷ 100 m	1.5 ÷ 3 MHz
krótkie	100 ÷ 10 m	3 ÷ 30 MHz
ultrakrótkie	10 ÷ 1 m	30 ÷ 300 MHz
mikrofale	≤ 1 m	≥ 300 MHz

3.1.1. Wykorzystanie fal radiowych do transmisji danych

Do transmisji danych cyfrowych wykorzystuje się najczęściej fale radiowe z zakresów VHF (30 ÷ 300 MHz) i UHF (300 ÷ 3000 MHz), rzadziej wykorzystywane są fale z zakresu SHF (3 ÷ 30 GHz).

Wykorzystanie fal z zakresów LF i MF (30 ÷ 3000 kHz), jakkolwiek atrakcyjne ze względu na bardzo duże zasięgi, ograniczone jest szerokością pasma częstotliwości dostępnego do transmisji, a co za tym idzie, małą szybkością transmisji [42, 43]. Z kolei fale z zakresu HF (3 ÷ 30 MHz) podlegają dużym i częstym zmianom propagacji [40, 42, 44], tak więc uzyskanie niezawodnej transmisji przy ich wykorzystaniu jest znacznie utrudnione. Również i w tym zakresie, acz w mniejszym niż dla fal LF i MF stopniu, ograniczone jest pasmo częstotliwości, tym niemniej fale tego zakresu wykorzystywane są powszechnie w transmisji amatorskiej z prędkościami rzędu 300 b/s [45].

Fale z zakresów VHF i UHF nie podlegają już tak wielkim ograniczeniom na szerokość pasma częstotliwości. W zakresie SHF wykorzystuje się najczęściej częstotliwości niższe, ze względu na znaczny wzrost tłumienia fal radiowych powyżej 10 GHz [43], tym niemniej częstotliwości wyższe, ze względu na korzystne właściwości, znajdują zastosowanie w urzą-

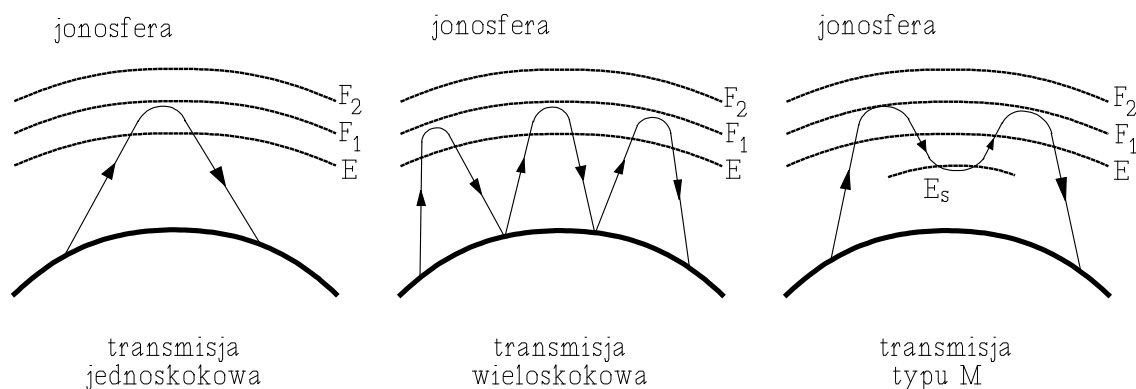
dzeniach do transmisji w bezprzewodowych sieciach lokalnych [11]. Fale z zakresu UHF nadają się znacznie lepiej niż VHF do realizacji transmisji radiowej w budynkach fabrycznych, ponieważ zakłócenia elektromagnetyczne, charakterystyczne dla tego środowiska, o wiele bardziej wpływają na częstotliwości poniżej 1 GHz [12]. W zależności od posiadanego sprzętu do transmisji radiowej, można uzyskać prędkości od 1.2 kb/s do 5 Mb/s.

3.1.2. Propagacja wybranych zakresów fal radiowych

Fale elektromagnetyczne, należące do poszczególnych zakresów, rozchodzą się w przestrzeni w różny sposób. Jest to spowodowane zróżnicowanym wpływem otoczenia, zależnym od częstotliwości fali. W poniższym omówieniu przyjęto tradycyjny podział fal na zakresy (tabela 2), ponieważ wynika on z właściwości fal radiowych.

3.1.2.1. Propagacja fal krótkich

W zakresie fal krótkich ($100 \div 10$ m, $3 \div 30$ MHz) fala powierzchniowa jest tak silnie tłumiona, że w odległości kilku do kilkudziesięciu kilometrów od nadajnika odbiór jej jest niemożliwy. Tym niemniej fala jonosferyczna w tym zakresie pozwala na osiągnięcie bardzo dużych zasięgów, obejmujących nawet całą kulę ziemską. Różne sposoby propagacji fal krótkich w jonosferze przedstawia rys. 14 [40]. Fale krótkie odbijane są głównie przez obszar F_2 , a niekiedy także przez obszary E , E_s i F_1 .



Rys. 14. Rozchodzenie się fali jonosferycznej w zakresie fal krótkich

Cechą charakterystyczną jonosfery jest istnienie dwóch częstotliwości, określających sposób propagacji fal. *Maksymalna częstotliwość użytkowa* (MUF, ang. *Maximal Usable Frequency*) jest to największa częstotliwość, przy której można uzyskać łączność pomiędzy dwoma punktami, fale o częstotliwościach większych od MUF nie są bowiem odbijane przez jonosferę. Z kolei *najmniejsza częstotliwość użytkowa* (LUF, ang. *Lowest Usable Frequency*) jest najniższą częstotliwością, która, z uwagi na wzrost tłumienia wraz ze wzrostem długości fali, może być użyta do zapewnienia transmisji na daną odległość. Tak więc

zakres użytecznych częstotliwości fal krótkich ograniczony jest od dołu przez wartość LUF, od góry zaś przez MUF.

Dla częstotliwości większych od MUF nawet znaczne zwiększenie mocy nadajnika nie powoduje nawiązania łączności, podczas gdy dla częstotliwości bliskich LUF wzrost tłumienia można zrekompensować zwiększeniem mocy nadajnika. Nadmierne zbliżanie się do MUF nie jest jednak wskazane, gdyż w razie nagłego, chwilowego zmniejszenia tej wartości może nastąpić zanik całkowity. Jako *optymalną częstotliwość roboczą* (FOT, fr. *Fréquence Optimum de Traffic*) przyjmuje się $FOT=0.85 \cdot MUF$.

Komunikację na falach krótkich utrudniają zmiany warunków propagacyjnych jonosfery, wpływające z kolei na wartości LUF i MUF. Wartości te zmieniają się w zależności od pory roku, pory doby i fazy 11-letniego cyklu aktywności słonecznej. Przeciętnie wpływ tych czynników objawia się następująco:

- wartości MUF są większe w dzień niż w nocy,
- wartości MUF w nocy są większe latem niż zimą,
- wartości MUF w dzień są większe zimą niż latem dla obszaru F_2 , dla pozostałych zaś obszarów – przeciwnie,
- wartości MUF są większe w okresach silnej aktywności słonecznej,
- wartości LUF na trasach krótkich wykazują maksimum w godzinach popołudniowych i spadają poza zakres fal krótkich w nocy, natomiast na trasach długich mają przebieg nieregularny.

Przy propagacji fal krótkich występują jeszcze inne zjawiska:

- *strefy milczenia*, znajdujące się między najdalszym punktem zasięgu fali powierzchniowej a najbliższym punktem zasięgu fali jonosferycznej,
- *odbicia od warstw sporadycznych*, szczególnie E_s , powodujące podwyższenie wartości MUF, zwłaszcza w nocy,
- *propagacja pozaortodromowa*, polegająca na rozchodzeniu się fal poza płaszczyznę wielkiego koła Ziemi, spowodowana nachyleniem jonosfery lub odbiciem od terenu nachylonego,
- *zaburzenia jonosferyczne*, tzw. burze jonosferyczne, powodujące pogorszenie warunków łączności krótkofalowej,
- zanik powszechny, polegający na nagłym wzroście absorpcji i zaniku odbioru fal krótkich na całej półkuli oświetlonej przez Słońce,
- zjawisko Dopplera, powodujące zmianę częstotliwości krótkofalowej nawet o kilka kiloherców,
- echo, spowodowane docieraniem do odbiornika fal, rozchodzących się bezpośrednio (po najkrótszej trasie) i pośrednio,

- rozpraszanie fali jonosferycznej, umożliwiające stosowanie fal o częstotliwości większej od MUF,
- zaniki:
 - * *zanik interferencyjny*, będący skutkiem interferencji fal docierających do odbiornika różnymi drogami,
 - * *zanik polaryzacyjny*, będący wynikiem interferencji w odbiorniku fal o różnej polaryzacji, powstałych wskutek rozszczepienia, pod wpływem ziemskiego pola magnetycznego, fali padającej na jonosferę,
 - * *zanik absorpcyjny*, powodowany wahaniami tłumienia fali w obszarze E, a występujący głównie w południe,
 - * *zanik graniczny*, będący skutkiem nagłego obniżenia wartości MUF podczas pracy na częstotliwości bliskiej tej wartości,
 - * *zanik uskokowy*, występujący w miejscach, w których granica między strefą odbioru i strefą ciszy podlega zmianom.

Opisane zaniki rzadko występują pojedynczo; mogą one mieć charakter synchroniczny lub selektywny. *Zanik synchroniczny* oddziałuje jednakowo na wszystkie składowe fali, podczas gdy *zanik selektywny* wpływa na nie w różny sposób.

W przypadku fal krótkich konieczne jest obliczenie nie tylko mocy nadajnika, lecz również wartości MUF i LUF dla konkretnej trasy sygnału. Obliczenia te są dość skomplikowane; ich opis znajduje się w [40].

3.1.2.2. Propagacja fal ultrakrótkich i mikrofal

Fale ultrakrótkie i mikrofałe (10 m ÷ 1 mm, 30 MHz ÷ 300 GHz) przy rozchodzeniu się wykazują właściwości zbliżone do promieni widzialnych. Prawa optyki geometrycznej nie obowiązują jednak ściśle i dzięki temu odbiór możliwy jest nie tylko w granicach zasięgu optycznego. W procesie propagacji fal duże znaczenie mają następujące zjawiska:

- refrakcja troposferyczna,
- dyfrakcja fal wokół powierzchni Ziemi oraz przeszkód terenowych (wzniesień lub budynków),
- rozpraszanie fal w troposferze,
- odbicie od śladów meteorów.

Natężenie pola fal ultrakrótkich zależy od wielu czynników takich, jak np. częstotliwość, wysokość umieszczenia anten czy parametry elektryczne gruntu. Z tego powodu do obliczeń natężenia pola nie stosuje się na ogół wzorów, jak ma to miejsce w przypadku innych zakresów fal, lecz specjalnie opracowane krzywe propagacji, wyznaczone na podstawie wielu pomiarów natężenia pola na różnych obszarach i w różnych warunkach klimatycznych.

Cechą charakterystyczną fal ultrakrótkich jest ich rozpraszanie w jono- i troposferze. Przy stosowaniu nadajników o dużej mocy (rzędu $50 \div 100$ kW), wyposażonych w anteny o dużym zysku energetycznym, można osiągnąć duże zasięgi. Zjawisko rozpraszania troposferycznego umożliwia łączność na odległość do 1000 km z szerokością pasma 5 MHz w zakresie częstotliwości $50 \text{ MHz} \div 30 \text{ GHz}$. Z kolei rozpraszanie jonosferyczne pozwala na osiągnięcie odległości 2000 km przy szerokości pasma 6 kHz i w wąskim zakresie częstotliwości $30 \div 70$ MHz.

Zjawisko odbicia fal od śladów meteorów można także wykorzystać do uzyskania łączności na duże odległości. Niestety, łącza tego typu charakteryzują się krótkim czasem trwania. Współczynnik wykorzystania łącza, określane jako stosunek czasu istnienia łącza do całkowitego czasu pracy nadajnika, wynosi $3 \div 16$ %, zależnie od mocy nadajników i parametrów anten. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wykorzystania małych nadajników i prostych anten do uzyskania łączności na odległość do 2000 km przy szerokości pasma 3 kHz.

Natężenie pola dla propagacji przestrzennej przedhoryzontowej (w zasięgu bezpośredniej widoczności anten) określa się przy pomocy wzoru Wwiedeńskiego [46]:

$$E \text{ [V/m]} = 4\pi\sqrt{30P_N G_N} \frac{h_N h_O}{\lambda R^2}, \quad (1)$$

gdzie P_N oznacza moc nadajnika [W], G_N – zysk energetyczny anteny nadawczej [W/W], h_N i h_O – odpowiednio wysokości zawieszenia anteny nadawczej i odbiorczej [m], R – odległość od nadajnika [m], a λ – długość fali [m]. Moc sygnału, docierającego na wejście odbiornika, można wyznaczyć z równania dopasowanej anteny odbiorczej [46]:

$$P_O \text{ [W]} = \frac{\lambda^2 E^2 G_O}{480\pi^2} = P_N G_N G_O \cdot \frac{h_N^2 h_O^2}{R^4}, \quad (2)$$

gdzie E oznacza natężenie pola elektrycznego fali [V/m], G_O – zysk energetyczny anteny odbiorczej [W/W], λ – długość fali [m], a P_O – moc sygnału na wejściu odbiornika [W].

Mikrofale (fale elektromagnetyczne o częstotliwościach powyżej 300 MHz) rozchodzą się w sposób zbliżony do promieni świetlnych. Częstotliwości z tego zakresu wykorzystywane są w radiowych sieciach lokalnych, pracujących wewnątrz budynków. Fale natrafiają wówczas na liczne przeszkody w postaci ścian, mebli, ludzi itp. i ulegają zjawiskom optyki geometrycznej: odbiciu, załamaniu i rozproszeniu, których wynikiem są następujące zjawiska [47]:

- zaniki chwilowe, spowodowane np. poruszeniem się ludzi lub przedmiotów lub krótkotrwałymi zakłóceniami elektromagnetycznymi,

- zaniki, wywołane docieraniem do odbiornika fal różniących się w fazie (fale w przeciwfazie wygaszają się wzajemnie), np. prostej i odbitej (rozproszenie lokalne, ang. *local spread*),
- różnice w czasie propagacji fal zmierzających do odbiornika różnymi drogami, np. wprost i po wielokrotnym odbiciu (rozproszenie opóźnienia, ang. *delay spread*)

Analizę efektów propagacji wielodrogowej przeprowadzono w [46]. W celu zapobieżenia efektom propagacji wielodrogowej stosuje się następujące metody [47]:

- wyrównywanie adaptacyjne (ang. *adaptive equalization*), polegające na wprowadzaniu własnego "echa" o tak dobranej amplitudzie i fazie, aby wyeliminować sygnały odbite,
- rozpraszanie widma sygnału (ang. *spread spectrum*), pozwalające na wyeliminowanie efektów rozpraszania lokalnego,
- stosowanie odpowiednich zbiorczych anten kierunkowych.

Podczas projektowania mikrofalowych sieci radiowych i analizy dróg sygnałów można wykorzystać technikę śledzenia promieni (ang. *ray tracing*). Podejście takie opisane jest w [48]. Zbiorcze podsumowanie tej problematyki zawarte jest w [49, 50].

3.2. Światło laserowe i podczerwień

Alternatywą dla fal radiowych są fale świetlne. Ich zaletą jest np. możliwość bardzo dokładnego skierowania wiązki na odbiornik, dzięki czemu sieci znajdujące się na wspólnym obszarze i korzystające z tych samych zakresów fal elektromagnetycznych nie zakłócają się wzajemnie. W chwili obecnej najczęściej wykorzystywane są fale z zakresu bliskiej podczerwieni, a także światło laserowe.

3.2.1. Fale z zakresu podczerwieni

Fale elektromagnetyczne z zakresu podczerwieni [51] ulegają podobnym zjawiskom jak światło widzialne i dość istotnie różnią się od fal radiowych.

Istotną cechą propagacji wolnoprzestrzennego promieniowania podczerwonego jest duża tłumienność jednostkowa, wynosząca $1 \div 10$ dB/km. Jest ona spowodowana wysoką częstotliwością fal świetlnych. Fale świetlne ulegają silnej absorpcji przez parę wodną i dwutlenek węgla, rozproszeniu na cząsteczkach kurzu i załamaniu przy przenikaniu warstw powietrza o różnej temperaturze.

Moc sygnału optycznego, docierającego do odbiornika w odległości l km od nadajnika można określić następującą zależnością [52]:

$$P(l) \text{ [W]} = P_N 10^{-\alpha l/10}, \quad (3)$$

gdzie P_N oznacza moc nadajnika [W], zaś α – tłumienność [dB/km].

Maksymalna odległość, na jaką można przesłać sygnał optyczny, wynosi zatem

$$L_{\max} \text{ [km]} = \frac{10}{\alpha} \log \frac{P_N}{P_O}, \quad (4)$$

gdzie P_N , P_O – odpowiednio moc nadana i odebrana [W] (moc odebrana nie może być mniejsza od czułości odbiornika). W przeciwieństwie zatem do transmisji radiowej, w której zasięg zależy głównie od mocy nadajnika, w mniejszym zaś stopniu od tłumienności trasy, w systemach optycznych tłumienność trasy ma dużo większe znaczenie niż moc nadajnika, co nakłada znaczne ograniczenia na zasięg transmisji.

Łączność między nadajnikiem a odbiornikiem może być zrealizowana bezpośrednio lub poprzez promieniowanie dyfuzyjne. Łączność bezpośrednia wymaga ciągłej bezpośredniej widoczności (ang. *line-of-sight*) pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, podczas gdy w łączności dyfuzyjnej wykorzystuje się promieniowanie odbite od np. ścian i mebli. Jest to możliwe dzięki temu, że większość powierzchni odbija 40 ÷ 90 % promieniowania z zakresu podczerwieni i sygnał, nawet po kilku odbiciach, zachowuje wystarczającą moc, aby zostać poprawnie odebrany.

Podobnie jak fale radiowe, również podczerwień ulega zjawisku propagacji wielodrogowej. Detektory promieniowania w podczerwieni mają jednak wymiary znacznie większe od długości fali, toteż nie występuje tu, znane z łączności radiowej, zjawisko zaniku, spowodowanego nałożeniem się sygnałów o przeciwnych fazach. Tym niemniej wielodrogowość jest przyczyną interferencji międzysymbolowych, utrudniających odbiór sygnałów o dużych przepływnościach.

Innym problemem jest promieniowanie świetlne występujące w środowisku pracy łącza wykorzystującego podczerwień. Moc takiego promieniowania może przekraczać nawet o 25 dB moc sygnału użytecznego. Rozwiązaniem tego problemu jest użycie do łączności światła monochromatycznego i filtrów pasmowoprzepustowych, a także zastosowanie koncentratorów (wzmacniaczy) optycznych [51].

3.2.2. Światło laserowe

Światło laserowe [40] jest szczególnym przypadkiem fal elektromagnetycznych z zakresu światła widzialnego i zakresów sąsiednich. Cechą charakterystyczną laserów jest możliwość uzyskania wiązki światła o bardzo małej rozbieżności (rzędu 1 sekundy). Układ kolumnacyjny lasera można traktować jako antenę nadawczą o bardzo dużej kierunkowości i wysokim zysku energetycznym. Dzięki małej długości emitowanych fal rozmiary takiej anteny są małe w porównaniu z antenami radiowymi. Ponadto światło laserowe pozwala na transmisję z dużymi szybkościami, dzięki dużej szerokości pasma sygnału. Zasięg transmisji może sięgać nawet kilku lat świetlnych przy mocy nadajnika 10 kW [53]. Mała szerokość

wiązki pozwala także na eliminację zakłóceń zewnętrznych oraz ochronę danych przed niepowołanym dostępem.

Wadą światła laserowego jest konieczność dokładnego nacelowania wiązki światła na odbiornik; wynikające stąd trudności rosną przy wzroście odległości transmisji. W przypadku łączności z obiektami ruchomymi konieczne jest śledzenie ich toru.

Komunikacja laserowa naziemna jest utrudniona wskutek pochłaniania, rozpraszania i załamania się promieni w atmosferze pod wpływem czynników atmosferycznych (mgła, deszcz, śnieg, ruchy mas powietrza, zanieczyszczenia). Również przeszkody naziemne, jak np. drzewa czy budynki, utrudniają stosowanie laserów.

Tłumienie promieni laserowych w atmosferze jest zawsze wynikiem ich pochłaniania i rozpraszania, przy czym w zależności od stanu atmosfery i długości fali elektromagnetycznej udział poszczególnych zjawisk jest różny. Rozchodzenie się światła w atmosferze można opisać zależnością [40]:

$$I [lx] = I_0 e^{-(\alpha_p + \alpha_r)l}, \quad (5)$$

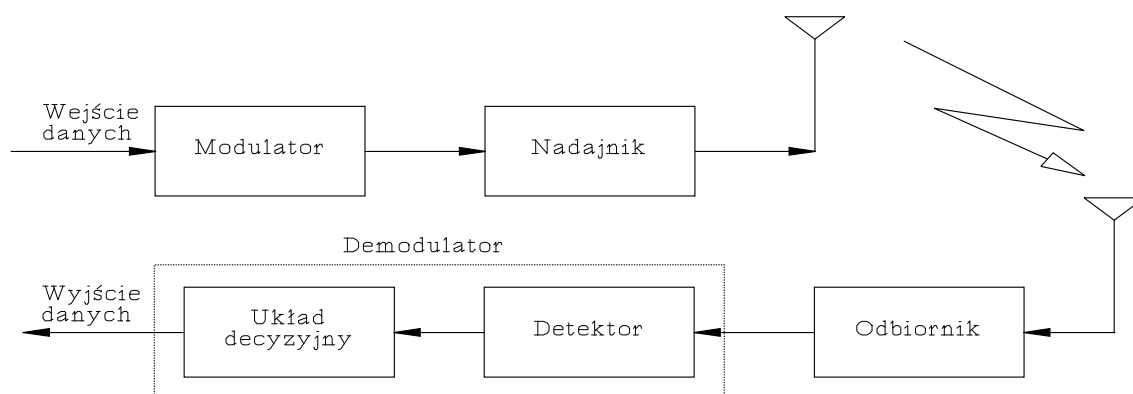
gdzie I_0 - natężenie promieniowania na początku drogi [lx], I - natężenie promieniowania na końcu drogi [lx], l - długość przebytej drogi w atmosferze [km], α_p i α_r - współczynnik odpowiednio pochłaniania i rozpraszania atmosfery [dB/km].

Wartość współczynnika tłumienia $\alpha = \alpha_p + \alpha_r$ zależy od długości fali. Zależność ta jest bardzo nieregularna, można jednak wyróżnić pewne zakresy długości fal elektromagnetycznych, dla których sumaryczne tłumienie α jest znacznie niższe, niż dla pozostałych długości. Są to zakresy: $0.5 \div 0.9 \mu\text{m}$, $1.0 \div 1.1 \mu\text{m}$, $1.2 \div 1.3 \mu\text{m}$, $1.55 \div 1.75 \mu\text{m}$, $2.1 \div 2.4 \mu\text{m}$, $3.4 \div 4.1 \mu\text{m}$ i $8 \div 12 \mu\text{m}$ [40]. Należy zaznaczyć, że w laserowej komunikacji bezprzewodowej stosowane są fale z tych samych zakresów, co w transmisji światłowodowej. Tłumienie maleje wraz ze wzrostem wysokości i w odległości 70 km od Ziemi jest już pomijalnie małe [40].

Pochłanianie fal elektromagnetycznych spowodowane jest głównie przez cząsteczki pary wodnej i dwutlenku węgla, jak również, szczególnie w niższych partiach atmosfery, przez zawiesiny w powietrzu bardzo drobnych ciał ciekłych (mgła, chmury) i stałych (dym, pył). Rozpraszanie z kolei spowodowane jest oddziaływaniem fotonów fali świetlnej z cząsteczkami znajdującymi się w atmosferze; w zależności od ich rozmiaru, mówi się o *rozpraszaniu molekularnym*, *dyfrakcyjnym* lub *geometrycznym (aerorozolowym)*. Rozpraszanie geometryczne ma wpływ na tłumienie w całym zakresie częstotliwości optycznych, natomiast współczynnik rozpraszania molekularnego jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi długości fali, spośród fal optycznych zatem najmniejszemu tłumieniu ulegają fale z zakresu podczerwieni [40].

3.3. Struktura radiowego systemu transmisyjnego

W celu wykorzystania fal radiowych do transmisji danych cyfrowych niezbędne jest przetworzenie tych danych na postać akceptowalną przez odpowiednie systemy transmisyjne [52]. Przetworzenie to, podobnie jak dla "tradycyjnej" transmisji analogowej, oparte jest na technice modulacji, przy czym w cyfrowych systemach łączności wykorzystuje się inne metody modulacji. Sygnał wyjściowy z modulatora przekazywany jest do nadajnika (rys. 15)



Rys. 15. Schemat cyfrowego systemu radiokomunikacyjnego

skąd, poprzez odpowiednie medium transmisyjne (w tym przypadku fale radiowe), trafia do odbiornika. W celu wyodrębnienia, z uzyskanego przebiegu, przesyłanych danych stosuje się demodulator, składający się z detektora i układu decyzyjnego. Możliwe są dwa rodzaje detekcji:

- *detekcja koherentna*, wymagająca sinusoidalnego sygnału odniesienia, zsynchronizowanego w fazie i częstotliwości z odebrany sygnałem nośnym,
- *detekcja niekoherentna*, nie wymagająca takiego sygnału.

Zadaniem układu decyzyjnego (tzw. synchronizatora elementowego) jest zdekodowanie zdemodulowanego sygnału i przekształcenie go w ciąg bitów danych.

3.3.1. Modulacja w cyfrowych systemach radiokomunikacyjnych

Modulacja jest to modyfikacja przebiegu nośnego wielkiej częstotliwości za pomocą sygnału informacyjnego małej częstotliwości (sygnału w paśmie podstawowym). Fala nośna jest opisana równaniem:

$$S(t) = A(t) \sin[2\pi f(t) + \Phi(t)], \quad (6)$$

gdzie $S(t)$, $A(t)$, $f(t)$ i $\Phi(t)$ oznaczają odpowiednio: modulowany sygnał nośny, amplitudę, częstotliwość i fazę.

W zależności od tego, który z parametrów przebiegu nośnego jest modyfikowany sygnałem informacyjnym, wyróżnia się modulację amplitudy (AM), częstotliwości (FM) lub

fazy (PM). W cyfrowych systemach radiokomunikacyjnych występują dwa etapy modulacji [45]. Pierwszy z nich to modulacja cyfrowa, w której modyfikowany parametr przybiera tylko pewne określone wartości. Proces ten wykonywany jest przez modem, na wyjściu którego pojawia się zmodulowana fala podnośna (ang. *subcarrier frequency*), zwana też częstotliwością pośrednią (ang. *intermediate frequency*). Drugi etap to modulacja analogowa przebiegu nośnego wielkiej częstotliwości falą podnośną, odbywająca się w nadajniku. Należy zwrócić uwagę na fakt, że przed wykorzystaniem sygnału informacyjnego w procesie modulacji może on zostać poddany filtracji, korekcji lub innym przekształceniom w celu poprawy parametrów systemu, np. ograniczenia szerokości pasma.

W celu zwiększenia szybkości bitowej przy niezmienionej szybkości modulacji stosuje się modulacje wielowartościowe (np. 4-, 8- lub 16-wartościowe) zamiast binarnych (2-wartościowych). W metodach tych często stosowana jest także modulacja mieszana, będąca kombinacją dwóch podstawowych metod modulacji. Modulacja wielowartościowa, ze względu na większą liczbę rozróżnialnych stanów sygnału, a więc i mniejszą odporność na błędy, wymaga jednak lepszego toru transmisyjnego.

3.3.2. Dobór parametrów systemu radiokomunikacyjnego

Projektując cyfrowy system radiokomunikacyjny należy dokonać wyboru częstotliwości nośnej oraz szerokości pasma. Wpływ na te czynniki ma rodzaj modulacji, w szczególności zaś jej szybkość oraz pożądana szybkość transmisji. Każda metoda modulacji charakteryzuje się efektywnością widmową (ang. *spectral efficiency*), czyli maksymalną liczbą bitów przesyłanych w jednostce czasu przy określonej szerokości pasma. Tabela 3 [52, 54] podaje wartość tego parametru dla najczęściej używanych metod modulacji.

Kolejnym istotnym parametrem jest moc nadajnika. Zależy ona przede wszystkim od pożądanego zasięgu transmisji, lecz także od ukształtowania terenu, na którym planuje się rozmieszczenie sieci radiowej, oraz parametrów stosowanych anten.

3.3.2.1. Dobór częstotliwości nośnej i szerokości pasma

Mając daną żadaną szybkość transmisji R [b/s] oraz względną szybkość wybranej metody modulacji V_m [b/s/Hz], można wyznaczyć częstotliwość nośną f [Hz] zgodnie z poniższą zależnością:

$$f \text{ [Hz]} = \frac{R}{V_m}. \quad (7)$$

Z kolei szerokość pasma w [Hz] uzależniona jest od żądanej szybkości transmisji i , zgodnie z twierdzeniem Nyquista [52], określona jest zależnością:

$$w \text{ [Hz]} = \frac{R}{2}. \quad (8)$$

Tab. 3. Względne szybkości wybranych metod modulacji

Typ	Metoda modulacji	Szybkość [b/s/Hz]
AM	OOK (kluczowanie amplitudy) – detekcja koherentna	0.8
	QAM (4-wartościowa modulacja amplitudy)	1.7
	QPR (4-wartościowa modulacja o częściowej odpowiedzi)	2.25
FM	FSK (kluczowanie z przesuwem częstotliwości) – detekcja niekoherentna	0.8
	CP-FSK (kluczowanie z przesuwem częstotliwości o ciągłej fazie) – detekcja niekoherentna	1.0
	MSK (szybkie kluczowanie z przesuwem częstotliwości)	1.9
	DE-MSK (szybkie kluczowanie z przesuwem częstotliwości kodowane różnicowo)	1.9
PM	BPSK (binarne kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	0.8
	DE-BPSK (binarne kluczowanie z przesuwem fazy kodowane różnicowo)	0.8
	DPSK (różnicowe kluczowanie z przesuwem fazy)	0.8
	QPSK (4-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy)	1.9
	DQPSK (różnicowe 4-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy)	1.8
	8-Φ PSK (8-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	2.6
	16-Φ PSK (16-wartościowe kluczowanie z przesuwem fazy) – detekcja koherentna	2.9
AM/PM	16-Φ APK (16-wartościowe kluczowanie z przesuwem amplitudy i fazy)	3.1

Szerokość pasma, wyliczona według powyższego wzoru i wyrażona w [Hz], teoretycznie wystarcza do przesłania R bitów na sekundę. Jest ona zwana szerokością Nyquista. W praktyce jednak, ze względu na obecność szumów, liczba bitów, jaką można przesłać w jednostce czasu, wynosi:

$$R_{\text{prakt}} \text{ [b/s]} = w \cdot \log_2 \left(\frac{S}{N} + 1 \right) \quad (9)$$

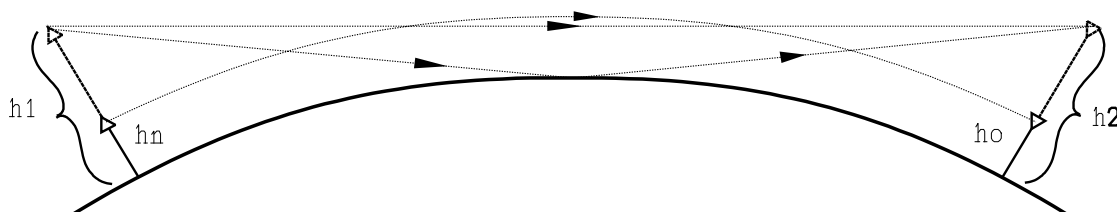
gdzie S i N oznaczają odpowiednio średnią moc sygnału i szumu [W].

Zależność powyższa, wyprowadzona przez Shannona [55, 56], jest prawdziwa dla optymalnego kodu Shannona, zapewniającego pomijalnie małą stopę błędu oraz swobodny dobór mocy sygnału, rozłożonej równomiernie w całej szerokości pasma. Kod ten nie jest możliwy do zrealizowania w praktyce, a więc osiągalna szybkość transmisji jest jeszcze niższa.

Oczywiście, ze względu na przyjęte w radiofonii założenia, nie jest możliwy swobodny dobór częstotliwości nośnej oraz szerokości pasma transmisji. Przydziałem pasm zajmują się odpowiednie agencje rządowe. W Polsce funkcję tę pełni Państwowa Agencja Radiokomunikacyjna (PAR).

3.3.2.2. Dobór mocy nadajnika

W przypadku fal ultrakrótkich (30 ÷ 1000 MHz), najczęściej stosowanych w radiowej łączności cyfrowej ze względu na korzystniejsze niż w przypadku fal krótkich parametry transmisji, występuje tzw. przyziemna propagacja fal (rys. 16). W propagacji tej, prócz



Rys. 16. Trójskładnikowy model propagacji przyziemnej przedhoryzontowej

zjawisk rozpraszania i pochłaniania fal, duże znaczenie mają zjawiska odbicia, dyfrakcji i refrakcji. Tłumienność trasy przyziemnej jest znacznie większa niż trasy wolnoprzestrzennej, a ponadto jest silnie zależna od rodzaju terenu. Ostatni czynnik ma szczególne znaczenie zwłaszcza dla sieci mobilnych.

Bezinterferencyjny zasięg użytkowy [46] jest to taka odległość pomiędzy nadajnikiem a odbiornikiem, przy której przeciętny sygnał odbierany ma moc równą rzeczywistej czułości odbiornika (P_{Omin}). Zasięg ten zależy nie tylko od mocy nadajnika, lecz także od parametrów anten (zysk energetyczny) oraz ukształtowania terenu, które z kolei wpływa na tłumienność trasy. Ogólnie, zasięg użytkowy d_u związany jest z mocą sygnału odbieranego następującą zależnością:

$$P_{Omin} [\text{W}] = \frac{P_N G_N G_O}{L(d_u)}, \quad (10)$$

gdzie P_N oznacza moc nadajnika [W], G_N i G_O – odpowiednio zysk energetyczny anteny nadajnika i odbiornika [W/W], zaś $L(d_u)$ – tłumienność trasy jako funkcję zasięgu (odległości).

Rozwiązanie równania (10) względem d_u pozwala na wyznaczenie zasięgu użytkowego.

Dla tras przedhoryzontowych, tzn. takich, dla których odległość transmisji nie przekracza horyzontu radiowego (czyli kiedy stacje "widzą się" wzajemnie), przy częstotliwościach nie większych niż 100 MHz, tłumienność określona jest wzorem [46, 57]:

$$L(d_u) \cong \frac{d_u^4}{h_1^2 h_2^2}, \quad (11)$$

gdzie h_1 i h_2 są skorygowanymi wzniesieniami anten odpowiednio nadawczej i odbiorczej [m] (rys. 16), zależnymi od rodzaju polaryzacji (pozioma lub pionowa) i parametrów elektrycznych (przenikalność elektryczna, konduktancja właściwa) gruntu.

Dla częstotliwości powyżej 100 MHz, ze względu na wzrost tłumienności wraz ze wzrostem częstotliwości nośnej, stosuje się oszacowanie wzorem Egli [46, 58]:

$$L(d_u)[\text{dB}] \cong 88 + 40\log d_u[\text{km}] - 20\log(h_N[\text{m}]h_o[\text{m}]) + 20\log f[\text{MHz}] \quad (12)$$

lub Grzybkowskiego [46, 59]:

$$L(d_u)[\text{dB}] \cong 100 + 40\log d_u[\text{km}] - 20\log(h_N[\text{m}]h_o[\text{m}]) + 10\log f[\text{MHz}]. \quad (13)$$

Tłumienność trasy można także wyznaczyć na podstawie wykresów Okumury, określających poprawkę, jaką należy dodać do wyliczonej tłumienności wolnoprzestrzennej [46]:

$$L_0(d_u) = \frac{16\pi^2 d_u^2}{\lambda^2}, \quad (14)$$

gdzie λ jest długością fali nośnej [m]. Wykresy podstawowe, wykonane dla prawie gładkiego terenu miejskiego, uzupełnione są o wykresy, określające poprawkę ze względu na wysokość ustawienia anteny nadawczej i odbiorczej oraz typ terenu.

Dla tras pozahoryzontowych, jak dotychczas, nie znaleziono opisu analitycznego tłumienności, dlatego też stosuje się opracowane przez CCIR krzywe medianowe [46]. Ponieważ empirycznie wykazano, iż tłumienność pozahoryzontowa zależy głównie od częstotliwości i odległości, zaś tylko nieznacznie od wzniesienia anten, przyjmuje się zależność

$$L_c[\text{dB}] = L[\text{dB}] + \Delta L[\text{dB}], \quad (15)$$

w której L oblicza się ze wzoru:

$$L[\text{dB}] \cong 120 + 40\log d[\text{km}] - 20\log(h_1[\text{m}]h_2[\text{m}]), \quad (16)$$

natomiast $\Delta L(f, d)$ odczytuje się z nomogramu Bullingtona, określającego poprawki pozahoryzontowe do wzorów przedhoryzontowych dla propagacji przyziemnej [46].

Oprócz zasięgu użytkowego nadajnik charakteryzuje się także *zasięgiem zakłóceniovym*, czyli odległością, w której zakłócana jest praca innych nadajników wykorzystujących ten sam kanał radiowy. Zasięg ten jest na ogół $1.5 \div 2$ razy większy od zasięgu użytkowego. Z kolei interferencja, pochodząca od innych nadajników, uwzględniona jest w koncepcji

zasięgu ograniczonego interferencją. Szczegółowe rozważania na ten temat można znaleźć w literaturze [46, 57]. W praktyce obliczenia teoretyczne służą jedynie do orientacyjnego wyznaczenia mocy nadajnika. Silna zależność zasięgu od kształtu terenu powoduje bowiem, iż słyszalność stacji w różnych kierunkach może być trudna do przewidzenia. Dlatego też konieczne jest próbne uruchomienie nadajnika i empiryczne sprawdzenie, czy w pożądanym miejscu istnieje zadowalająca jakość odbioru. Uzyskane w ten sposób dane służą następnie do korekty mocy nadajnika. Należy także zaznaczyć, iż nadajnik powinien posiadać pewną rezerwę mocy, która pozwala zapobiec zerwaniu transmisji wskutek zaników fal.

3.4. Struktura optycznego systemu transmisyjnego

Struktura optycznego systemu transmisyjnego jest w zasadzie zbliżona do struktury systemów radiowych. Oczywiście zamiast anten radiowych są tu wykorzystywane układy nadawczo-odbiorcze promieniowania świetlnego, kolejna różnica dotyczy też metod modulacji sygnałów.

3.4.1. Nadajniki i odbiorniki promieniowania świetlnego

Jako nadajniki promieniowania świetlnego stosuje się obecnie diody elektroluminescencyjne (LED, ang. *light emitting diode*) lub diody laserowe. Ich zaletą jest możliwość sterowania wielkością promieniowanej mocy optycznej za pośrednictwem prądu wejściowego. Różnice wynikają z odmiennych zasad działania: w diodzie LED świecenie spowodowane jest spontaniczną rekombinacją nadmiarowych par elektron-dziura, w diodzie laserowej natomiast rekombinacja występuje synchronicznie wskutek wprowadzania do złącza promieniowania zewnętrznego. Typowe parametry nadajników promieniowania świetlnego zawiera tabela 4 [1, 51].

Tab. 4. Typowe parametry nadajników promieniowania świetlnego

Parametr	Dioda LED	Dioda laserowa
Moc optyczna	1 mW	5 ÷ 10 mW
Moc wprowadzana	0.02 ÷ 0.1 mW	2 ÷ 4 mW
Prąd modulacji	100 mA	20 ÷ 40 mA
Widmo optyczne	40 ÷ 120 nm	0.3 ÷ 2 nm
Szybkość modulacji	10 ÷ 200 MHz	> 1 GHz
Wrażliwość na zmiany temperatury	mała	duża
Cena	2 ÷ 200 \$	15 ÷ 5000 \$

Jako odbiorniki (detektory) promieniowania stosuje się zwykle fotodiody PIN (ang. *P-Intrinsic-N*) lub fotodiody lawinowe (APD, ang. *Avalanche Photo Diode*). Fotodiody lawinowe charakteryzują się 1000-krotnie większą skutecznością przetwarzania strumienia fotonów na strumień elektronów, jednak w praktycznych zastosowaniach, w celu uniknięcia wzmocnienia szumów, stosuje się diody o mniejszych współczynnikach powielania. Diody PIN stosowane są najczęściej przy przepływnościach do 100 Mb/s, zaś APD – powyżej 1 Gb/s [52]. Typowe parametry fotodiod zawiera tabela 5 [1].

Tab. 5. Wybrane parametry odbiorników promieniowania świetlnego

Typ	Współczynnik powielania	Czas odpowiedzi	Napięcie zasilania
fotoprzewodnik	10^5	10^{-3} (ok. 1 ms)	
fotodioda P-N	1	10^{-6} (ok. 1 μ s)	
dioda PIN	1	10^{-9} (ok. 1 ns)	5 ÷ 10 V
fototranzystor	10^2	10^{-5} (ok. 10 μ s)	
fotodioda lawinowa APD	10^3	10^{-9} (ok. 1 ns)	100 ÷ 200 V
tranzystor polowy	10^2	10^{-7} (ok. 100 ns)	

3.4.2. Modulacja w optycznych systemach transmisyjnych

W chwili obecnej technologia realizacji nadajników i odbiorników promieniowania świetlnego pozwala na realizację detekcji koherentnej, jest ona jednak skomplikowana i kosztowna [51]. Tak więc w optycznych systemach transmisyjnych stosowana jest detekcja niekoherentna, zaś najczęściej stosowane metody modulacji to bezpośrednia detekcja sygnału oraz modulacja intensywności strumienia świetlnego.

Modulacja intensywności strumienia świetlnego (IM, ang. *Intensity Modulation*) uzyskiwana jest poprzez zmianę natężenia prądu sterującego nadajnikiem promieni świetlnych. Z kolei odbiornik wytwarza prąd optyczny o natężeniu proporcjonalnym do mocy padającego promieniowania. Jeżeli przesyłany sygnał jest cyfrowy, proces modulacji ogranicza się do włączania i wyłączania diody w zależności od wartości kolejnych bitów danych. Dla transmisji dwupunktowej jedynym ograniczeniem dla prędkości transmisji jest bezwładność nadajnika. Dla transmisji przez łącze dyfuzyjne dodatkowe ograniczenia spowodowane są interferencją międzysymbolową, będącą wynikiem propagacji wielodrogowej.

Modulacja intensywności promieniowania może być także połączona z innymi typami modulacji, najczęściej z klucowaniem częstotliwości. System ten, zwany FSK-IM, wymaga wprowadzenia dodatkowego modulatora przed nadajnikiem i demodulatora za odbiornikiem,

zapewnia jednak wyższą jakość transmisji niż tylko modulacja intensywności promieniowania.

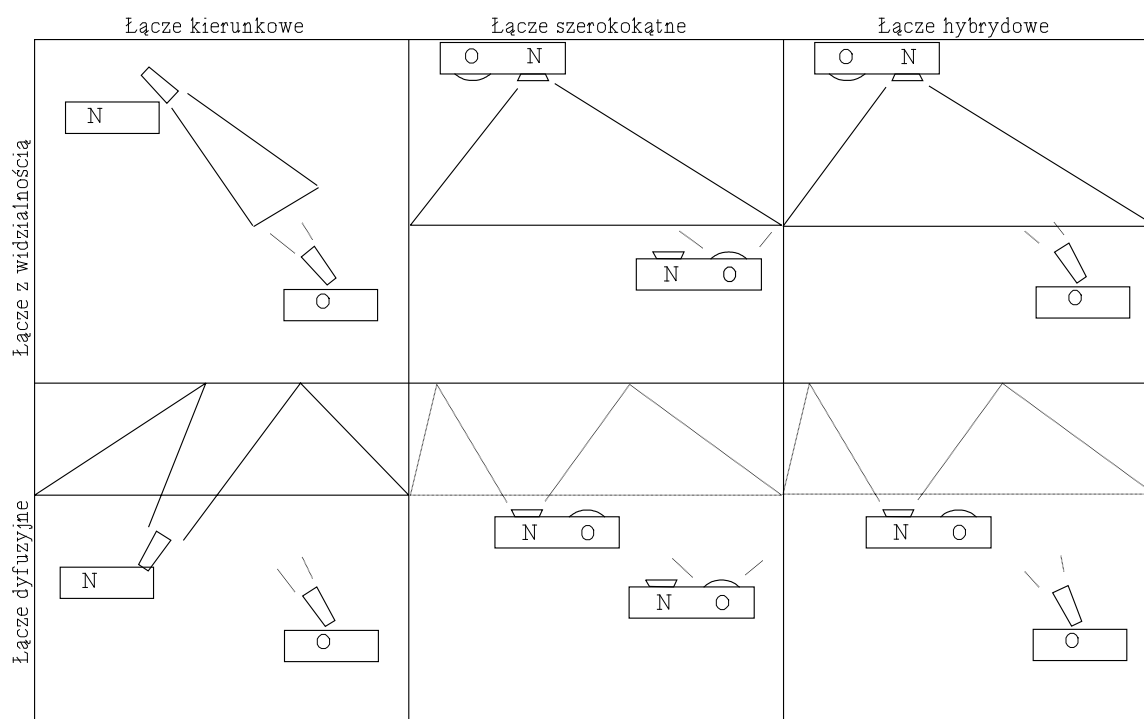
Oprócz wymienionych, w optycznych systemach transmisyjnych stosuje się także modulacje impulsowe [52, 60]:

- modulację amplitudy impulsów (PAM, ang. *Pulse Amplitude Modulation*),
- modulację położenia impulsów (PPM, ang. *Pulse Position Modulation*),
- modulację szerokości impulsów (PWM, ang. *Pulse Width Modulation*),
- modulację częstotliwości impulsów (PFM, ang. *Pulse Frequency Modulation*).

Wymienione metody modulacji impulsowej są również używane w połączeniu z modulacją intensywności promieniowania.

3.4.3. Rodzaje łączy optycznych

Łącza optyczne można podzielić na łącza z widzialnością bezpośrednią i łącza dyfuzyjne. Innym kryterium podziału może być szerokość kąta widzenia nadajnika i odbiornika. Można wyróżnić sześć rodzajów łączy, przedstawionych na rys. 17 [51, 60].



Rys. 17. Rodzaje łączy optycznych

Łącza kierunkowe z widzialnością bezpośrednią charakteryzuje się dobrym wykorzystaniem mocy promieniowania, ponieważ wysłany sygnał z bardzo niewielkimi stratami dociera do odbiornika, którego kierunkowa charakterystyka pozwala uzyskać wysokie wartości stosunku sygnału do szumu. W łączy takim nie występuje także propagacja wielodrogowa. Szybkość transmisji sięga 125 Mb/s przy zasięgu około 30 m. Nie można jednak używać

takiego łącza do transmisji rozsiewczej, tj. takiej, w której ten sygnał odbierany jest przez wiele stacji równocześnie. Łącze kierunkowe dyfuzyjne eliminuje to ograniczenie, jednak prędkość transmisji nie przekracza 200 kb/s, a zasięg – 20 m.

Łącza kierunkowe posiadają jeszcze jedną wadę – nie można ich używać do transmisji między stacjami ruchomymi, ponieważ wymagają odpowiedniego nastawienia odbiornika względem nadajnika. Wadę tę eliminuje łącze szerokokątne, umożliwiające transmisję z szybkością do 50 Mb/s przy zasięgu kilku metrów. Zasięg ten można zwiększyć przez zastosowanie łącza szerokokątnego z bezpośrednią widzialnością, pod warunkiem jednak, że droga sygnałów nie jest przesłonięta. Można także zastosować łącze hybrydowe, w którym nadajnik jest szerokokątny, odbiornik zaś ma charakterystykę kierunkową.

3.5. Uwarunkowania prawne

Możliwości użytkowania fal radiowych, zarówno w Polsce, jak i w innych krajach, ograniczone są uwarunkowaniami prawnymi.

Obowiązujące w kraju przepisy dopuszczają wykorzystywanie fal radiowych dla transmisji danych w zakresach częstotliwości 299.5 ÷ 299.975 MHz i 333.5 ÷ 335.975 MHz z szerokością kanału 25 kHz, przy ograniczeniu maksymalnej mocy nadajnika do 10 W [61]. Używanie tych pasm wymaga zgody Państwowej Agencji Radiokomunikacyjnej (PAR) i jest płatne. Wysokości opłat ustalane są przez Ministerstwo Łączności, a wszelkie postanowienia w tym zakresie publikowane są w Dziennikach Ustaw.

Istnieje możliwość stosowania bez zgody PAR urządzeń o mocach nie przekraczających 20 mW, pracujących na częstotliwościach do 800 MHz. Nie zwalnia to jednak od konieczności uzyskania homologacji Ministerstwa Łączności.

W większości krajów Europy Zachodniej (a także w Czechach i Bułgarii), Japonii i Stanach Zjednoczonych wydzielono specjalne zakresy częstotliwości dla potrzeb transmisji w sieciach lokalnych, zwane ISM (ang. *Industrial, Scientific & Medical*) [62]. Są to następujące zakresy częstotliwości:

- 902 ÷ 928 MHz (Stany Zjednoczone),
- 2.4 ÷ 2.4835 GHz (Europa, Stany Zjednoczone, Japonia),
- 5.725 ÷ 5.85 GHz (Stany Zjednoczone).

Wykorzystanie tych częstotliwości nie wymaga zgody ani opłat, jednak urządzenia radiowe pracujące w tych zakresach muszą stosować rozpraszanie widma sygnału (ang. *spread spectrum*) z ograniczeniem mocy nadajnika do 1 W w USA, 100 mW w Europie i 10 mW w Japonii [63, 64]. Pasma ISM stanowią podstawę specyfikacji warstwy fizycznej standardu IEEE 802.11 bezprzewodowych sieci lokalnych [63, 65].

W Polsce pasma ISM nie są jeszcze udostępnione, ponieważ zabronione jest używanie urządzeń pracujących z widmem rozproszonym [61].

Używanie optycznych urządzeń bezprzewodowych (wykorzystujących podczerwień i światło laserowe) nie wymaga ani uzyskiwania zgody, ani opłat.

3.6. Możliwości techniczne

W zależności od użytego medium transmisyjnego i sposobu przetwarzania sygnałów, parametry urządzeń do transmisji bezprzewodowej znacznie różnią się od siebie. Orientacyjne dane, charakterystyczne dla poszczególnych grup, zebrane są w tabeli 6 [38]. Szersze omówienie spotykanych obecnie rozwiązań można znaleźć w [38, 66].

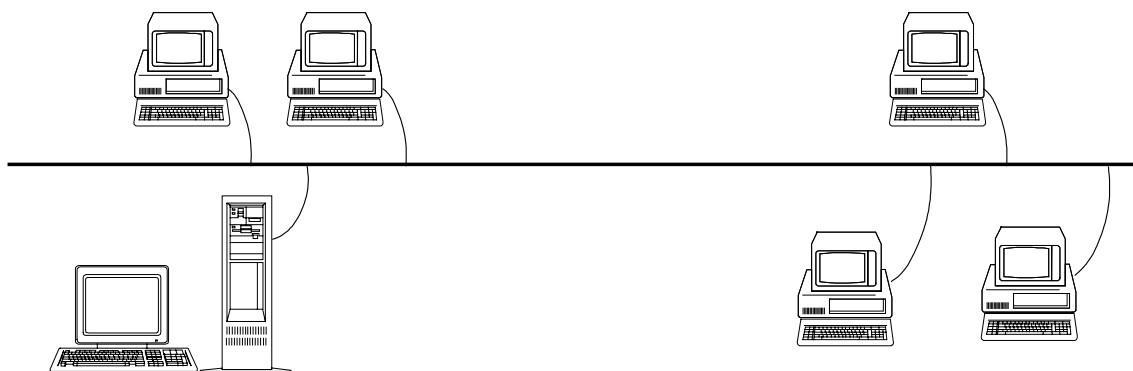
Tab. 6. Orientacyjne parametry różnych wariantów łączy bezprzewodowych

	Fale radiowe		Podczerwień		Laser
	wąskopasmowe	widmo rozproszone	skupiona	rozproszona	
Prędkość	0.3÷40 kb/s	1-2 Mb/s	4-155 Mb/s	1-2 Mb/s	4-155 Mb/s
Zasięg	20 km	500 m	500 m	20 m	1.2 km
Mobilność	tak	tak	nie	tak	nie
Niezbędna widoczność	nie	nie	tak	nie	tak
Odporność na zakłócenia	średnia	duża	bardzo duża		bardzo duża
Bezpieczeństwo informacji	małe	duże	duże	średnie	duże
Wymagana zgoda PAR	tak		nie		nie
Koszt	średni	średni	duży	średni	duży

4. Idea konwersji protokołów

Jak już wspomniano, bezprzewodowe media transmisyjne można wykorzystać w sieciach komputerowych zarówno do stworzenia sieci całkowicie bezprzewodowej, jak i do uzupełnienia sieci kablowej o segment bezprzewodowy lub wymiany segmentu przewodowego na bezprzewodowy, gdy taka potrzeba występuje [66]. Drugie z wymienionych rozwiązań wydaje się ciekawsze, ponieważ umożliwia dalsze stosowanie posiadanego już sprzętu i oprogramowania komunikacyjnego, a jednocześnie daje nowe możliwości, związane z wprowadzeniem medium bezprzewodowego. **Koniecznym do spełnienia warunkiem jest, aby fakt obecności nowego medium transmisyjnego pozostał niezauważony nie tylko dla użytkowników sieci, lecz przede wszystkim dla sprzętu i oprogramowania sieciowego.** Wiąże się to z koniecznością dochowania standardu logicznego i fizycznego sieci [67].

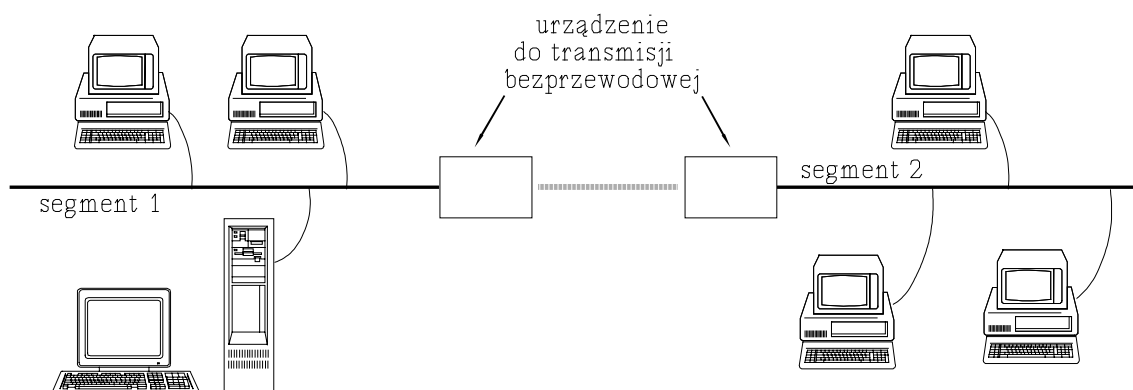
Wyposażenie przewodowej sieci komputerowej w możliwość transmisji bezprzewodowej wymaga dodania do sieci odpowiednich urządzeń, które z jednej strony pracują zgodnie z wymogami sieci przewodowej, z drugiej zaś – umożliwiają transmisję bezprzewodową. Schemat sieci komputerowej przed i po wprowadzeniu urządzeń bezprzewodowych przedstawiają odpowiednio rys. 18 i 19 [11].



Rys. 18. Przykładowa, przewodowa sieć komputerowa

4.1. Dyskusja możliwych rozwiązań

Najprostszym sposobem realizacji łącza bezprzewodowego, współpracującego z siecią przewodową, jest dołączenie do istniejącej sieci urządzeń, które przetwarzają sygnały elektryczne segmentu przewodowego na fale elektromagnetyczne i odwrotnie. Urządzenie takie dokonuje zatem konwersji na poziomie warstwy fizycznej sieci, zaś zestaw składający się z co najmniej dwóch takich urządzeń, komunikujących się bezprzewodowo, pełni funkcję regeneratora (ang. *repeater*).



Rys. 19. Przewodowa sieć komputerowa z urządzeniami do transmisji bezprzewodowej

Zastosowanie takiego rozwiązania wymaga jednak spełnienia wielu warunków, które często są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do spełnienia.

Przede wszystkim **łącze bezprzewodowe musi zapewniać prędkość transmisji równą prędkości transmisji łącza kablowego**. Warunek ten może być trudny do spełnienia np. w sieciach radiowych, w których prędkość transmisji, ograniczona szerokością pasma częstotliwości, jest znacznie niższa niż w sieciach przewodowych.

Kolejnym warunkiem jest, aby **dane nadchodzące z segmentu przewodowego miały odpowiedni format**, tzn. były zaopatrzone w adresy stacji oraz były zabezpieczone sumą kontrolną. Nie wszystkie protokoły sieci przewodowych zawierają te informacje. Przykładowo, protokoły, wykorzystujące łącze RS-232C dla potrzeb transmisji plików poprzez modemy telefoniczne (np. X-Modem, Y-Modem, Z-Modem, Kermit [68]), dostosowane są do transmisji pomiędzy dwiema stacjami na łączu wirtualnym w trybie połączeniowym i nie niosą informacji o adresach stacji uczestniczących w transmisji. W sieci radiowej transmisja pomiędzy dwiema stacjami może wówczas spowodować niepożądane włączenie się kolejnych stacji w proces wymiany danych. Odbieranie przez nie danych jest wprawdzie "nie-szkodliwe", jednak wysłanie przez którąś z nich potwierdzenia poprawnego ich przyjęcia może spowodować błędy pracy sieci, wywołane np. kolizją na łączu lub powielaniem potwierdzeń. Należy zaznaczyć, że część tych potwierdzeń może być pozytywna, a część negatywna (oznaczająca np. błąd transmisji), co utrudnia pracę nadajnika, który musi podjąć decyzję, co zrobić, kiedy pewna ramka została odebrana poprawnie i niepoprawnie (nadajnik nie wie, że jest słyszany przez wiele odbiorników).

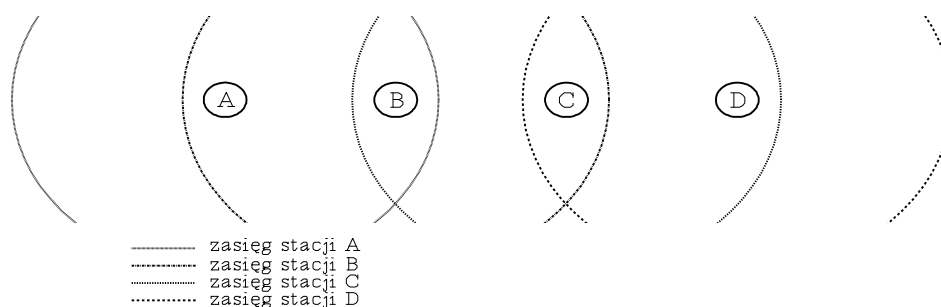
W większości sieci przewodowych informacje przesyłane są w ramach o strukturze odpowiedniej dla łącza bezprzewodowego. Ponieważ jednak **łączność bezprzewodowa jest bardziej narażona na wpływ środowiska pracy sieci, a więc charakteryzuje się wyższą stopą błędów**, korzystne może być przesyłanie jednej ramki sieci przewodowej w kilku ramach sieci bezprzewodowej [15].

Niektóre urządzenia radiowe wymagają odczekania pewnego czasu od chwili włączenia nadajnika do momentu rozpoczęcia właściwej transmisji danych [45, 69]. Jest to czas potrzebny na ustabilizowanie się parametrów pracy nadajnika. **W niektórych przypadkach nadajnik radiowy wymaga, aby dane poprzedzone zostały odpowiednią preambułą w celu uzyskania synchronizacji z ciągiem bitów danych** [70]. Na ogół protokoły sieci przewodowych nie są w stanie spełnić tych wymagań.

W sieciach bezprzewodowych niektóre stacje mogą być tak rozmieszczone, że nie posiadają wzajemnej łączności. Zastosowanie rywalizacyjnego protokołu dostępu do łącza może zatem prowadzić do powstania niewykrytych kolizji. Ponadto, realizacja wykrywania kolizji (CSMA/CD), łatwa do wykonania w sieciach przewodowych, jest często niewykonalna w sieciach radiowych, które najczęściej oparte są na łączach półdupleksowych [71]. Gdyby nawet mieć układ radiowy z możliwością nasłuchu w czasie nadawania, to w odbiorniku mógłby wystąpić, znany w sieciach radiowych, efekt przechwytywania (ang. *capture effect*) [2], powodując niewykrycie kolizji. Dlatego też w sieciach tych stosowane są protokoły z unikaniem kolizji (CSMA/CA) i potwierdzaniem poprawnego odbioru [72]. Ponieważ jednak kolizja powoduje błędny odbiór ramki, brak potwierdzenia pozytywnego, lub potwierdzenie negatywne, można uznać za sygnalizację kolizji; być może dlatego w literaturze (np. [45, 73]) można znaleźć informację, że w sieciach bezprzewodowych wykorzystywany jest mechanizm CSMA/CD, podobnie jak w sieci Ethernet. Mechanizm wykrywania kolizji możliwy jest natomiast do stosowania w sieciach, w których medium transmisyjnym jest podczerwień rozproszona [51].

W sieciach radiowych z rywalizacyjnymi protokołami dostępu znane są zagadnienia *ukrytej stacji* (ang. *hidden terminal*) i *odkrytej stacji* (ang. *exposed terminal*), które mogą wystąpić, jeżeli nie wszystkie stacje mają bezpośrednią łączność [74, 75]. Zjawisko ukrytej stacji zachodzi, kiedy stacja A nadaje do stacji B (rys. 20). Stacja C, nie będąca w zasięgu stacji A, nie "słyszy" tej transmisji, przyjmuje zatem, że łącze jest wolne i, jeśli ma dane do transmisji, nadaje je, powodując w stacji B kolizję z danymi ze stacji A. Przeciwnie, zjawisko odkrytej stacji zachodzi, kiedy stacja B nadaje do stacji A. Stacja C, będąca w zasięgu stacji B, przyjmuje, że łącze jest zajęte i wstrzymuje transmisję (np. do stacji D). Tymczasem dane nadawane ze stacji C nie spowodowałyby kolizji w stacji A, ponieważ stacje te nie posiadają bezpośredniej łączności. Oba zjawiska powodują zmniejszenie ogólnej przepustowości sieci odpowiednio wskutek kolizji, a więc i konieczności retransmisji, lub niepotrzebnego wstrzymywania transmisji. Nie oznacza to jednak niemożności efektywnego stosowania rywalizacyjnych protokołów dostępu w sieciach bezprzewodowych, niezbędne są jednak pewne ich modyfikacje. Przykłady takich modyfikacji można znaleźć w [75, 76, 77].

Ponieważ w sieciach bezprzewodowych propagacja sygnałów nie jest ograniczona do linii transmisyjnej [38], przekazywane w ten sposób **informacje są bardziej, niż w sie-**



Rys. 20. Ilustracja problemu ukrytej i odkrytej stacji

ciach przewodowych, narażone na podsłuch. Problem ten występuje najczęściej w transmisji radiowej. Dlatego też, w pewnych przypadkach, konieczne może się okazać szyfrowanie danych w celu zabezpieczenia ich przed niepowołanym dostępem.

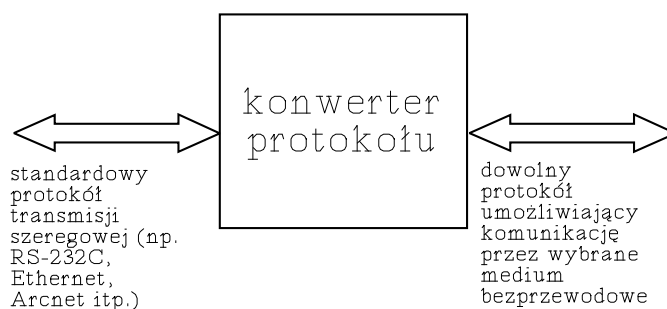
Podsumowując, protokoły sieci przewodowych bądź nie nadają się bezpośrednio do stosowania w sieciach bezprzewodowych, bądź też ich stosowanie powoduje nieoptymalne wykorzystanie medium transmisyjnego. **Połączenie przewodowego i bezprzewodowego segmentu sieci wymaga zatem innego, bardziej inteligentnego, rozwiązania, zapewniającego lepsze wzajemne dopasowanie współpracujących segmentów sieci. Takim rozwiązaniem może być konwerter protokołów.**

4.2. Zadania konwertera protokołów

Skoro proste przetworzenie sygnałów elektrycznych na fale elektromagnetyczne (konwersja warstwy fizycznej sieci) jest niewystarczające, należy dokonać konwersji protokołów na poziomie warstwy liniowej (rys. 21) [67]. Aby tego dokonać, należy zastosować inteligentne rozwiązanie sprzętowo-programowe, czyli układ mikroprocesorowy, wyposażony w pamięć programu, dwa łącza transmisyjne oraz pamięć do zapamiętywania (buforowania) przesyłanych i konwertowanych danych. Takie rozwiązanie zapewni poprawną współpracę przewodowego i bezprzewodowego segmentu sieci, ponieważ dochowany zostaje standard logiczny i fizyczny sieci przewodowej, a przy tym jest przezroczyste dla protokołów wyższych warstw sieci. Według terminologii modelu OSI/ISO urządzenie takie pełni funkcję mostu.

W porównaniu z rozwiązaniem ograniczonym do konwersji jedynie warstwy fizycznej, konwerter warstwy liniowej może posiadać następujące zalety:

1. Konwerter może zapewnić współpracę łączy o różnych prędkościach transmisji.
2. W przypadku braku w przesyłanym ciągu danych odpowiednich informacji organizacyjnych (adresy, suma kontrolna itp.), konwerter może dodać potrzebne informacje, przetwarzając dane (np. w celu wyliczenia sumy kontrolnej, zabezpieczającej przed błędami transmisji) lub parametry konfiguracyjne (np. w celu dodania adre-



Rys. 21. Idea konwertera protokołów transmisyjnych

sów stacji).

3. Konwerter może zapewnić taki podział informacji nadchodzącej z łącza przewodowego, że łączem bezprzewodowym przesyłane będą ramki o odpowiedniej długości, dostosowanej do warunków pracy tego łącza (w szczególności stopy błędów).
4. Konwerter może zadbać o nienaruszenie zależności czasowych, charakterystycznych dla urządzeń do transmisji bezprzewodowej (np. czas między włączeniem nadajnika a rozpoczęciem transmisji).
5. Konwerter może poprzedzić dane preambułą, umożliwiającą uzyskanie synchronizacji nadajnika z przesyłanym ciągiem bitów.
6. Konwerter może spełnić dodatkowe wymagania urządzeń do transmisji bezprzewodowych odnośnie formatu danych (np. równowaga zer i jedynek, odpowiednie kodowanie itp.).
7. Konwerter może zapewnić protokół dostępu stacji do łącza, odpowiedni dla wybranego łącza bezprzewodowego i środowiska pracy sieci.
8. Konwerter może wprowadzić dodatkowe zabezpieczenie przesyłanych danych przed niepowołanym dostępem.
9. Konwerter może zmieniać pewne parametry w czasie pracy, istnieje także możliwość dopasowania go do używanych protokołów komunikacyjnych.

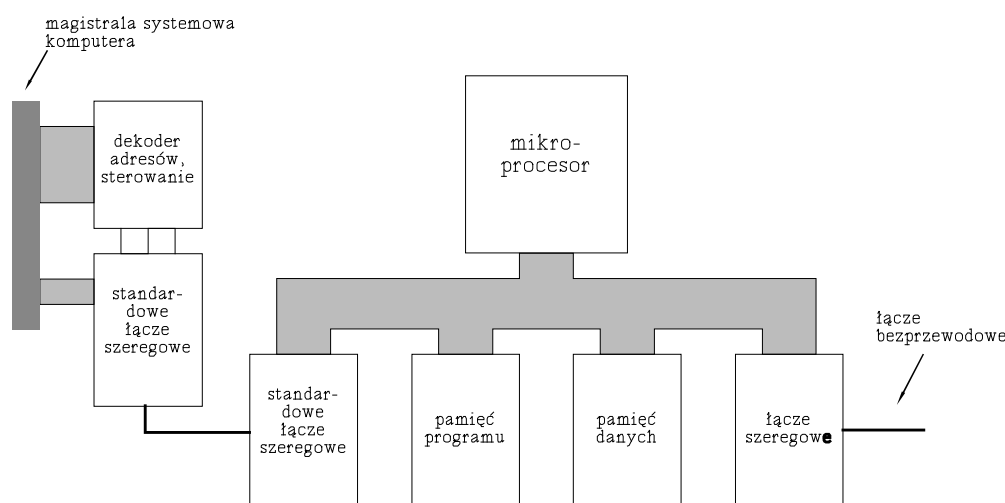
Wymienione warunki można spełnić w sposób niewidoczny dla standardowych urządzeń do transmisji przewodowej [11], co jest ogromną zaletą w porównaniu z konwersją jedynie warstwy fizycznej, ponieważ umożliwia to dalsze stosowanie posiadanych już urządzeń i programów do transmisji przewodowej bez konieczności ich modyfikacji, a ponadto zapewnia lepsze wykorzystanie wybranego łącza bezprzewodowego. Wadą natomiast tego rozwiązania jest wprowadzenie dodatkowych, nieraz znacznych opóźnień w proces transmisji danych. Opóźnienia te wynikają z konieczności buforowania przesyłanych informacji oraz dokonania konwersji protokołów. Wady tej pozbawione jest natomiast połączenie segmentów sieci na poziomie warstwy fizycznej.

4.3. Warianty realizacji konwertera protokołów

Konwerter może być zaprojektowany i wykonany na dwa sposoby:

- jako element karty sieciowej,
- jako autonomiczne urządzenie zewnętrzne.

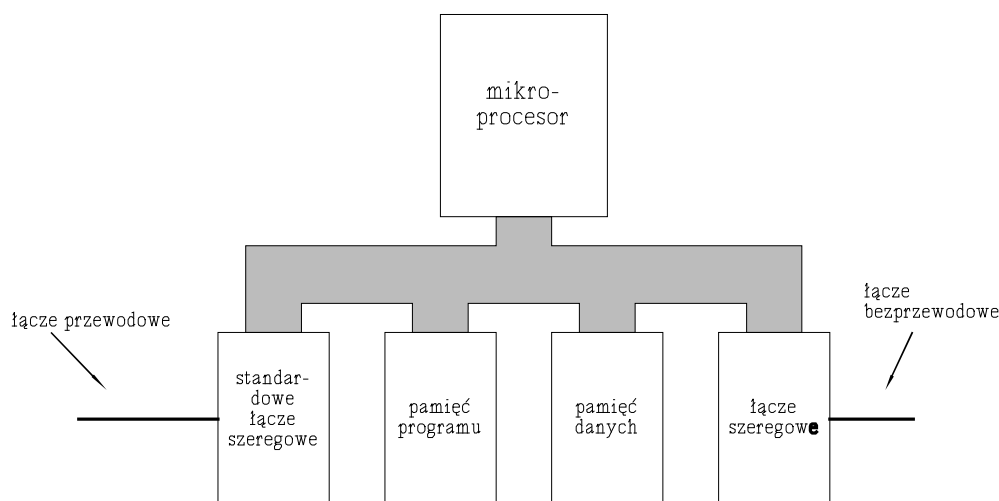
Konwerter, będący elementem karty sieciowej (rys. 22), może komunikować się z komputerem jedynie poprzez jego magistralę systemową. Aby zapewnić działanie oprogramowa-



Rys. 22. Konwerter protokołów jako urządzenie wewnętrzne

nia komunikacyjnego, od strony magistrali komputera konwerter musi emulować pracę odpowiedniego portu transmisji szeregowej, którego złącze zapewnia komunikację z właściwym układem konwertera, zamiast, jak zazwyczaj, być wyprowadzone na obudowę komputera. Warunek ten stwarza dodatkowe utrudnienie konstrukcyjne, ponieważ układ konwertera musi zostać uzupełniony o układ realizujący standardowe łącze, które może cechować się większą złożonością niż sam konwerter. Ponadto, wykonany układ może być stosowany jedynie w komputerach wyposażonych w odpowiedni typ magistrali, zaś przeniesienie go do komputera innego typu wymaga ponownego zaprojektowania układu. Zaletą tego rozwiązania jest natomiast zmniejszenie ogólnej liczby układów (np. eliminacja nadajników i odbiorników linii transmisyjnej) oraz umieszczenie całego układu na jednej płytce, a więc większa jego niezawodność. Płytką ta umieszczona jest wewnątrz obudowy komputera, co eliminuje potrzebę projektowania obudowy i dołączania dodatkowego źródła zasilania.

Konwerter autonomiczny (rys. 23) może komunikować się z komputerem lub segmentem sieci jedynie poprzez złącza, znajdujące się na obudowach konwertera. Dzięki temu nie ma potrzeby uzupełniać konwertera o układ interfejsu szeregowego komputera. Kolejną zaletą tego rozwiązania jest możliwość współpracy konwertera z dowolnym sprzętem, wyposażonym w odpowiedni interfejs. Jest to znacznie słabsze ograniczenie niż typ magistrali,



Rys. 23. Konwerter protokołów jako autonomiczne urządzenie zewnętrzne

ponieważ standardowe interfejsy są implementowane na wielu różnych platformach sprzętowych¹⁾. Pewnym utrudnieniem jest w tym przypadku potrzeba zapewnienia dodatkowego źródła zasilania i zaprojektowania odpowiedniej obudowy dla konwertera. Zewnętrzne zasilanie, niezależne od zasilania komputera, daje konwerterowi autonomicznemu jeszcze jedną zaletę: informacje przychodzące łączem bezprzewodowym mogą być magazynowane w pamięci konwertera w czasie, kiedy komputer jest wyłączony. Wysłanie tych danych do komputera nastąpi po włączeniu jego zasilania i uruchomieniu odpowiedniego oprogramowania.

Niezależnie od wyboru konstrukcji układu (wariant wewnętrzny czy zewnętrzny), zasadniczy układ konwertera pozostaje bez zmian. Składa się on z następujących podzespołów:

- mikroprocesor,
- pamięć programu,
- pamięć danych,
- standardowy interfejs szeregowy, realizujący łącze przewodowe,
- interfejs szeregowy, realizujący łącze bezprzewodowe.

Poprawną współpracę tych elementów układu zapewnia odpowiednio skonstruowane oprogramowanie. Jeśli dla wybranego typu jednostki centralnej dostępny jest system operacyjny, można wykorzystać pewne jego funkcje. W przypadku jednak, kiedy konwerter projektowany i wykonywany jest od podstaw, konieczne jest zaimplementowanie niezbędnych funkcji w programie, sterującym jego pracą.

¹⁾Przykładowo, karty sieci lokalnej Ethernet dla komputerów typu IBM PC współpracują z magistrami typu ISA, EISA lub PCI, istnieją także implementacje dla innych komputerów, nie wyposażonych w wymienione magistrale.

Program sterujący można podzielić na następujące elementy:

- procedurę inicjalizacji konwertera, ustalającą odpowiednie parametry pracy podzespołów, wchodzących w skład układu,
- obsługę łącza przewodowego,
- obsługę łącza bezprzewodowego,
- procedurę konwersji protokołów, dokonującą zmianę formatu przesyłanych danych.

W zależności od oprogramowania, konwerter może pracować na dwa sposoby:

- jako rozwiązanie dedykowane, dopasowane do jednego lub kilku znanych protokołów transmisyjnych,
- jako rozwiązanie uniwersalne, zapewniające współpracę z dowolnym protokołem transmisyjnym.

W rozwiązaniu uniwersalnym znaki przesyłane po łączu przewodowym nie są interpretowane przez konwerter. Założenie to wynika z faktu, że nie można z góry określić, jaki protokół wykorzystywany jest w łączu przewodowym, tak więc struktura danych jest nieznaną. Konwersja protokołów polega wówczas na umieszczaniu wszystkich znaków w ramach łącza bezprzewodowego. Dopuszcza się zatem przesłanie pojedynczej ramki protokołu przewodowego w kilku ramach łącza bezprzewodowego [15], możliwa jest także sytuacja odwrotna, kiedy kilka ramek łącza przewodowego zostanie umieszczonych razem w jednej ramce łącza bezprzewodowego. Wysłanie ramki łączem bezprzewodowym powinno nastąpić, jeżeli zachodzi jeden z poniższych warunków:

- zebrana została określona liczba znaków do wysłania,
- od chwili odebrania ostatniego znaku upłynął zadany czas.

W przypadku, jeżeli w sieci przewodowej często pojawiają się krótkie ramki, mogą wystąpić znaczne opóźnienia w dotarciu informacji do adresata. Jest to spowodowane właśnie oczekiwaniem na zebranie określonej liczby znaków. Opóźnień tych można uniknąć, jeśli konwerter może rozpoznać koniec ramki.

Istnieje kilka sposobów określania końca ramki:

- pojawienie się w strumieniu danych określonej sekwencji bitów (jak np. w protokole HDLC [21]),
- jawne podanie długości ramki w jej części sterującej (np. protokół Z-Modem [68]),
- wystąpienie na łączu ciszy o określonym czasie trwania (np. protokół sieci przemysłowej Modbus [30]).

Rozpoznanie końca ramki różnych protokołów w konwerterze uniwersalnym wymaga daleko idącej możliwości konfigurowania parametrów konwertera. Może się więc okazać, że rozwiązaniem prostszym, a więc i tańszym w realizacji, jest konwerter dedykowany dla wybranego protokołu lub grupy protokołów. Konwerter taki może rozpoznać nie tylko koniec ramki, lecz również pola adresowe i sterujące, a także dokonać sprawdzenia po-

prawności danych otrzymanych danych łączem przewodowym. Jest to możliwe, ponieważ znana jest struktura przesyłanych informacji. Niestety, konwerter taki będzie błędnie interpretował dane wysłane według innych protokołów transmisyjnych, a więc posiadające inną strukturę.

5. Realizacja konwertera protokołów

W pierwszym podejściu zdecydowano się na realizację układu, umożliwiającego transmisję bezprzewodową danych, przesyłanych łączem standardu RS-232C. Łącze to występuje w niemal wszystkich komputerach osobistych (np. typu IBM PC), a pewne elementy tego standardu wykorzystywane są w niektórych sieciach przemysłowych. Następnie zrealizowano konwerter protokołów, umożliwiający transmisję radiową w wybranych sieciach przemysłowych, w których transmisja jest częściowo lub całkowicie oparta na standardzie RS-232C. Struktura sprzętowo-programowa tego układu jest zbliżona do struktury pierwszego konwertera, inny jest jednak sposób realizacji niektórych jego funkcji.

5.1. Konwerter protokołów dla łącza RS-232C

Do praktycznej realizacji konwertera w pierwszym podejściu wybrano układ, realizujący konwersję protokołów, oparty na standardzie RS-232C na protokół łącza bezprzewodowego [67, 78, 79]. Wybór ten podyktowany został ogromną popularnością tego standardu, dostępnością i niską ceną dokumentacji i elementów potrzebnych do jego realizacji oraz łatwością jego implementacji. Ponieważ łącze zgodne z tym standardem występuje w komputerach wielu różnych typów, a także w sterownikach przemysłowych, rozwiązanie oparte na układzie "wewnętrznym" znacznie ograniczyłoby możliwości jego zastosowania. Dlatego też zdecydowano się na realizację konwertera autonomicznego. Z kolei mnogość protokołów transmisyjnych, wykorzystujących jako warstwę fizyczną łącze RS-232C, wymusiła niejako założenie, iż konwerter powinien zostać zaprojektowany do współpracy z dowolnym protokołem tej rodziny.

Ponieważ łącze RS-232C, oprócz linii danych, wykorzystuje także linie sterujące, konieczne jest umożliwienie przesłania informacji o stanie tych sygnałów. Skoro jednak w łączu bezprzewodowym do dyspozycji są tylko linie danych, zmianie sygnału sterującego odpowiadać musi przesłanie odpowiedniej ramki sterującej. Informacje, przesyłane liniami danych, mogą być wysyłane i odbierane łączem bezprzewodowym w ramach o zmiennej długości pola danych.

Przyjęto założenie, że konwerter powinien mieć możliwość współpracy z dowolnym wariantem łącza bezprzewodowego. Dopasowanie konwertera do konkretnego przypadku można uzyskać na drodze modyfikacji sprzętowo-programowej, bez konieczności wprowadzania zmian w pozostałej części układu.

Przyjęto, że konwerter zostanie zmontowany na płycie uniwersalnej.

5.1.1. Protokół łącza bezprzewodowego

Dla potrzeb transmisji poprzez łącze bezprzewodowe zaproponowano własny protokół transmisyjny. Umożliwia on komunikację pomiędzy wieloma stacjami sieci na łączu pseudodwukierunkowym (ang. *half-duplex*). Wymiana informacji sterującej i użytkowej odbywa się za pośrednictwem ramek, składających się z nagłówka oraz ewentualnie pola danych. Format nagłówka ramki przedstawiony jest na rys. 24, natomiast format pola danych przedstawiony jest na rys. 25.

Długość ramki	Adres odbiorcy	Adres nadawcy	Pole sterujące	–	Numer ramki	Suma kontrolna
1 B	1 B	1 B	1 B	1 B	1 B	2 B

Rys. 24. Format nagłówka ramki protokołu łącza radiowego

Długość danych	Dane użytkownika	Suma kontrolna
1 B	1 ÷ 245 B	2 B

Rys. 25. Format pola danych ramki protokołu łącza radiowego

W protokole przewidziano następujące typy ramek, rozpoznawane na podstawie zawartości pola sterującego:

- ramki nadajnika:
 - * połączenie,
 - * zajęcie łącza,
 - * przesyłanie danych,
 - * zwolnienie łącza,
 - * rozłączenie;
- ramki odbiornika:
 - * akceptacja,
 - * odrzucenie,
 - * błąd transmisji.

Oprócz ramki danych, wszystkie pozostałe ramki są ramkami sterującymi i zawierają jedynie nagłówek.

5.1.2. Baza sprzętowa

Konwerter dla łącza RS-232C można zrealizować w oparciu o mikrosterownik jednokładowy rodziny MCS-51 [80, 81, 82]. Układy te zawierają:

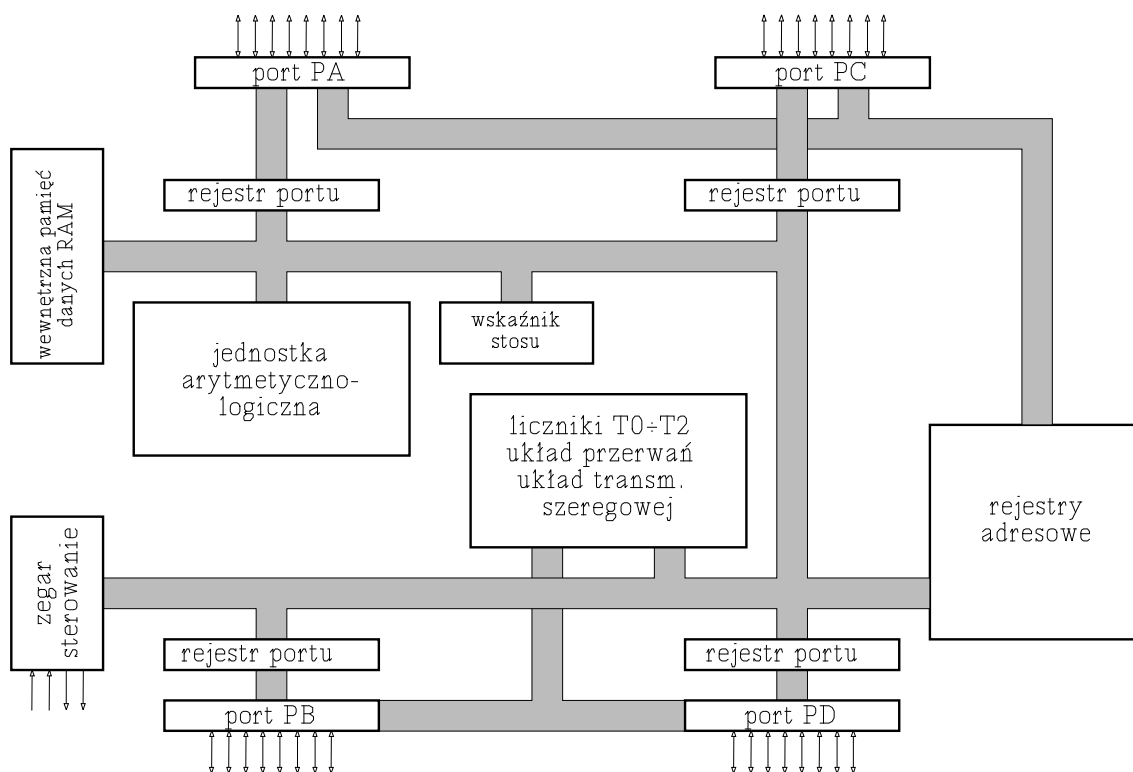
- 8-bitową jednostkę centralną,
- wewnętrzną pamięć danych RAM,

- układ przerwań,
- układ czasowo-licznikowy,
- porty równoległe,
- port szeregowy.

Ponieważ mikrosterownik zawiera tylko jeden port szeregowy, do realizacji konwertera niezbędne jest dołączenie dodatkowego układu, realizującego transmisję szeregową. Funkcję tę może pełnić układ USART (ang. *Universal Synchronous-Asynchronous Receiver-Transmitter*) typu 8251 [83, 84]. Z kolei mała pojemność wewnętrznej pamięci danych wymusza dołączenie zewnętrznego układu pamięci RAM.

5.1.2.1. Mikrosterownik 80C32

Do realizacji konwertera wybrano mikrosterownik 80C32, ponieważ posiada on bogatszy niż 8031 układ licznikowy, ułatwiający programowanie szybkości łącza szeregowego, a także większą pojemność wewnętrznej pamięci danych [81]. Strukturę wewnętrzną mikrosterownika 80C32 ilustruje rys. 26 [85].



Rys. 26. Struktura mikrosterownika jednocukładowego 80C32

Układ transmisji szeregowy mikrosterownika 80C32 pozwala na transmisję asynchroniczną z szybkościami $5.72 \div 375000$ b/s przy częstotliwości taktowania procesora równej 12 MHz. Do sterowania szybkością transmisji można wykorzystać wewnętrzne liczniki mikrosterownika. Między bitem startu i bitem stopu można przesłać 8 lub 9 bitów informacji-

nych, tak więc istnieje możliwość przesyłu znaków 7- lub 8-bitowych z bitem parzystości. Jest zatem możliwe wykorzystanie wewnętrznego portu szeregowego do realizacji łącza asynchronicznego, zgodnego ze standardem RS-232C.

Mikrosterownik posiada cztery równoległe porty wejścia-wyjścia. Obsługa tych portów odbywa się na drodze wyłącznie programowej, przy czym możliwe jest odwoływanie się zarówno do całego portu (bajtu), jak i do pojedynczych bitów. Dopuszcza się występowanie w obrębie każdego portu linii wejściowych i wyjściowych. Wyprowadzenia portów posiadają pewne alternatywne znaczenie, zależne od sprzętowo-programowej konfiguracji systemu. I tak port PA pełni funkcję multipleksowanej 8-bitowej magistrali adresowej (bity 0 ÷ 7) i danych, port PC – magistrali adresowej (bity 8 ÷ 15), a port PD posiada funkcje sterujące (wejście-wyjście szeregowo, wejścia liczników, wejścia przerywające, sterowanie zewnętrzną pamięcią danych).

Układ przerwań mikrosterownika pozwala obsługiwać zarówno przerwania, pochodzące z wewnętrznych układów wspomagających (np. liczników, portu szeregowego), jak i od układów znajdujących się poza strukturą mikrosterownika (np. typowych układów wejścia-wyjścia). Jest więc możliwa realizacja układu, w którym dwa porty szeregowo – wewnętrzny i zewnętrzny – mogą być obsługiwane z wykorzystaniem przerwań. Poszczególne źródła przerwań mogą być maskowane, można także całkowicie zablokować możliwość zgłaszania przerwań. Poszczególne źródła przerwań posiadają nadany sztywno priorytet, można jednak programowo nadać poszczególnym przerwanom wyższy lub niższy poziom priorytetu.

Układ czasowo-licznikowy posiada trzy liczniki. Liczniki T0 i T1, posiadające identyczną strukturę, mogą pełnić funkcję czasomierza lub licznika impulsów zewnętrznych. Liczniki te mogą pracować m. in. w trybie 8-bitowym z automatycznym ładowaniem wartości początkowej (ang. *automatic reload*) lub w trybie 16-bitowym. Wpis wartości początkowej może odbywać się programowo, również w procedurze obsługi przerwania od układu licznikowego. Licznik T2 posiada inną strukturę niż T0 i T1, może jednak pełnić identyczne funkcje. Jest to licznik 16-bitowy z możliwością automatycznego wpisywania wartości początkowej. Wszystkie liczniki mogą być źródłem przerwań lub impulsów taktujących dla wewnętrznego układu transmisji szeregowo.

5.1.2.2. Układ transmisji szeregowo 8251

Układ transmisji szeregowo typu 8251 pozwala na synchroniczną lub asynchroniczną transmisję danych z szybkościami 0 ÷ 64 kb/s (zastosowana wersja μ PD71051 firmy NEC umożliwi uzyskanie szybkości do 256 kb/s [86]). Sterowanie szybkością transmisji wymaga zewnętrznego generatora częstotliwości (układ zapewnia jedynie stopień podziału sygnału taktującego przez 1, 16 lub 64). Przesyłane są znaki o długości 5 ÷ 8 bitów, które mogą być

automatycznie uzupełnione bitem parzystości. Również i ten układ może służyć do realizacji łącza szeregowego standardu RS-232C.

5.1.3. Integracja układów

Przyjęto, że dla potrzeb komunikacji z komputerem, poprzez łącze zgodne ze standardem RS-232C, wykorzystane zostaną wewnętrzne porty mikrosterownika 8032, natomiast łącze bezprzewodowe będzie obsługiwane przez zewnętrzny port szeregowy (układ 8251) [67, 79]. Taka konfiguracja umożliwi bowiem łatwą zmianę typu układu sterującego łączem bezprzewodowym. W przypadku takiej zmiany konieczne jest ponowne zaprojektowanie fragmentu części sprzętowej konwertera, w zależności od zastosowanego układu, a także napisanie oprogramowania zależnego od sprzętu. Nie jest natomiast konieczne dokonywanie jakichkolwiek zmian w części odpowiedzialnej za transmisję na łączu RS-232C.

Linie danych łącza przewodowego zrealizowano w oparciu o wbudowany port szeregowy, natomiast linie sterujące w oparciu o część portu równoległego PB. Jako konwertery poziomów napięć standardu RS-232C na TTL i odwrotnie wykorzystano układy MC1488 [87] i MC1489 [88].

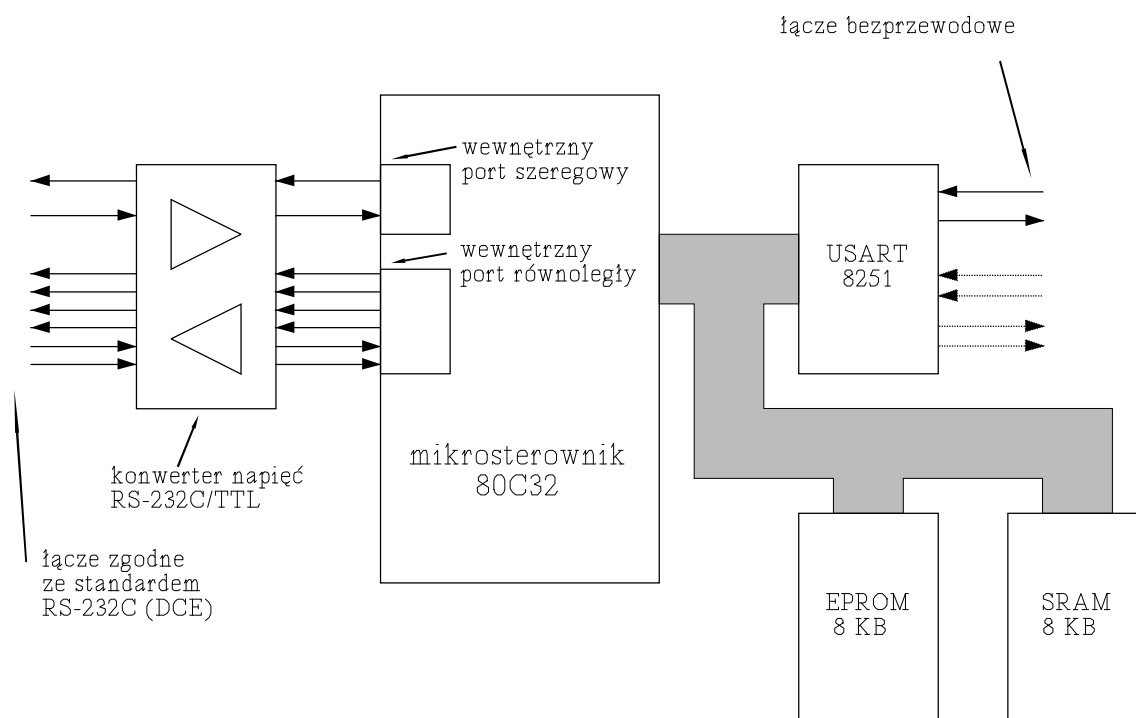
Układ 8251 umieszczono w przestrzeni adresowej zewnętrznej pamięci danych. Układ ten może zgłaszać przerwanie zewnętrzne o wyższym priorytecie (INT0). Zgłoszenie przerwania oznacza gotowość nadajnika lub odbiornika. Dokładne rozpoznanie przyczyny przerwania odbywa się na drodze programowej przez odczyt rejestru statusu. Jako źródło sygnału zegarowego wykorzystano sygnał ALE mikrosterownika o częstotliwości 1 MHz (mikrosterownik taktowany jest częstotliwością 12 MHz).

Licznik T0 pracuje jako czasomierz o długości słowa 16 bitów. Przepelnienie licznika powoduje wygenerowanie przerwania. Procedura obsługi tego przerwania wpisuje do licznika wartość początkową i, poprzez wyprowadzenie portu PB, generuje impuls określający prędkość transmisji zewnętrznego portu szeregowego (układ 8251). Do taktowania wewnętrznego portu szeregowego wykorzystano licznik T2, pracujący jako czasomierz w trybie z automatycznym ładowaniem wartości początkowej.

Pamięć danych mikrosterownika zrealizowano przy pomocy modułu statycznej pamięci RAM o pojemności 8 KB i umieszczono w przestrzeni adresowej zewnętrznej pamięci danych. Program, sterujący pracą konwertera, zapisano w pamięci EPROM o pojemności 8 KB, umieszczonej w przestrzeni adresowej pamięci programu.

Schemat blokowy konwertera przedstawiony jest na rys. 27.

Konwerter został dostosowany do współpracy z modemem radiowym, zbudowanym w oparciu o układ scalony Am7911 według schematu zamieszczonego w [45]. Modem ten gwarantuje poprawną współpracę z amatorskim nadajnikiem-odbiornikiem radiowym.



Rys. 27. Schemat blokowy konwertera protokołów dla łącza RS-232C

Współpraca konwertera z tym modemem wymaga trzech linii:

- dane nadawane,
- dane odbierane,
- przełączanie nadawanie-odbiór.

Jako linie danych wykorzystano linie danych układu 8251. Przełączanie nadawanie-odbiór zrealizowane jest programowo z wykorzystaniem wolnej linii sterującej tego układu.

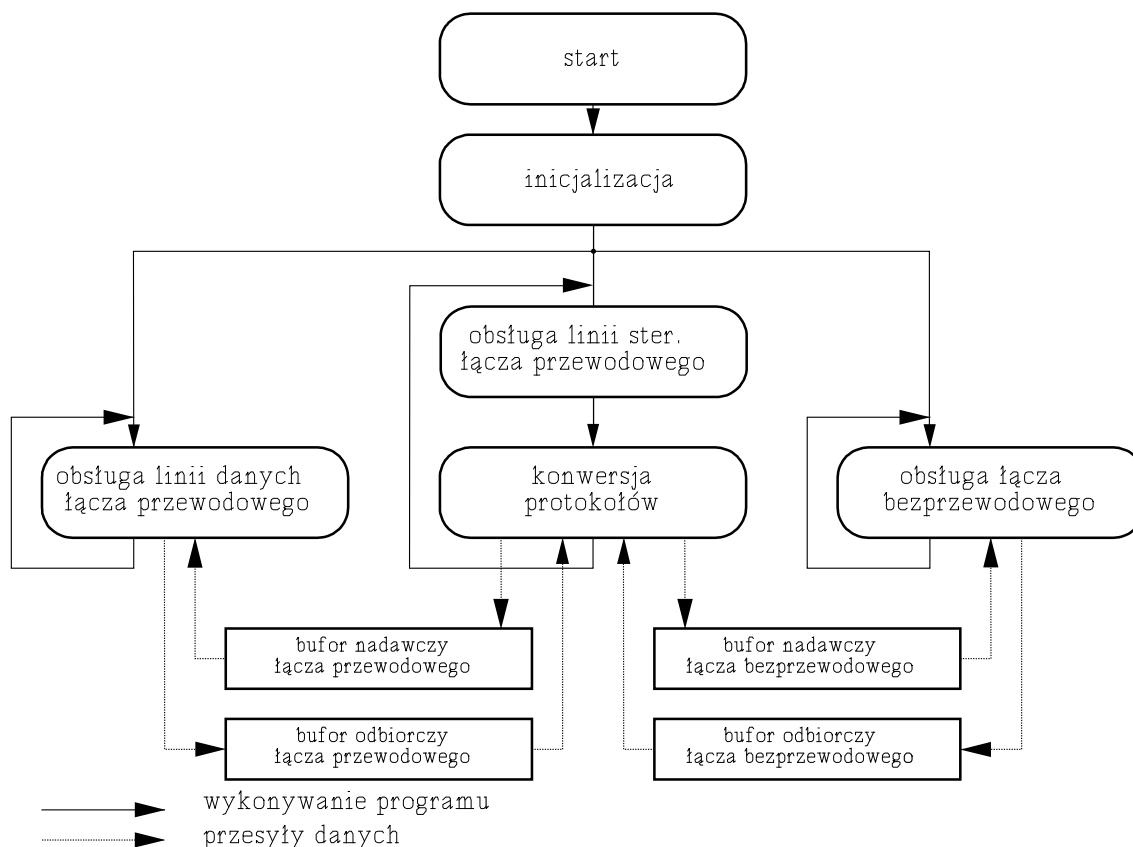
5.1.4. Oprogramowanie konwertera

Część programową konwertera można podzielić na fragmenty, realizujące następujące funkcje:

- inicjalizacja konwertera,
- obsługa łącza przewodowego:
 - * obsługa linii danych łącza,
 - * obsługa linii sterujących;
- obsługa łącza bezprzewodowego,
- konwersja protokołów.

Obsługa łącza bezprzewodowego oraz linii danych łącza przewodowego zrealizowana jest z wykorzystaniem mechanizmu przerwań, natomiast obsługa linii sterujących łącza przewodowego oraz konwersja protokołów wykonywana jest cyklicznie. Strukturę oprogra-

mowania można zatem przedstawić jako trzy współbieżnie i cyklicznie wykonywane procesy, komunikujące się za pośrednictwem buforów (rys. 28).



Rys. 28. Schemat programu konwertera dla łącza RS-232C

5.1.4.1. Inicjalizacja konwertera

Procedura inicjalizacji konwertera wykonywana jest automatycznie po włączeniu zasilania lub wskutek wyzerowania układu (ang. *reset*). Procedura ta obejmuje:

- wyzerowanie pamięci danych,
- wyzerowanie i zaprogramowanie układu 8251,
- zaprogramowanie wewnętrznego portu szeregowego,
- zaprogramowanie układu czasowo-licznikowego,
- zaprogramowanie układu przerwań.

Układ 8251 pracuje w trybie transmisji asynchronicznej. Format znaku obejmuje 1 bit startu, 8 bitów informacyjnych, bit parzystości (generowany sprzętowo) i bit stopu. Dodatkowe dzielenie prędkości transmisji nie jest stosowane.

Wewnętrzny port szeregowy pracuje w trybie 3 (transmisja asynchroniczna). Format znaku obejmuje bit startu, 8 bitów informacyjnych, bit parzystości i bit stopu.

Licznik T0 pracuje w trybie 1 (16-bitowym) jako czasomierz. Licznik T2 pracuje jako generator impulsów dla wewnętrznego portu szeregowego w trybie z automatycznym wpisywaniem wartości początkowej.

Układ przerwań obsługuje przerwania przychodzące od wewnętrznego portu szeregowego i licznika T0 oraz przerwanie zewnętrzne (od układu 8251).

5.1.4.2. Obsługa łącza przewodowego

Obsługę łącza przewodowego można podzielić na dwa fragmenty:

- obsługę linii danych,
- obsługę linii sterujących.

Obsługa linii sterujących sprowadza się do cyklicznego sprawdzania stanu linii wejściowych portu PB i porównywania ze stanem poprzednim. W przypadku wykrycia zmiany stanu, procedura konwersji protokołów otrzymuje informację o konieczności przygotowania odpowiedniej ramki sterującej. Mechanizm ten działa także w drugą stronę, tzn. jeżeli od procedury konwersji protokołów nadejdzie informacja o nadejściu ramki sterującej, odpowiednio zmieniany jest stan linii wyjściowych portu.

Obsługa linii danych zrealizowana jest na zasadzie przerwań. Po przyjęciu przerwania od wewnętrznego portu szeregowego następuje sprawdzenie przyczyny przerwania. Jeżeli pochodzi ono od odbiornika, odebrany znak jest wczytywany i umieszczany w buforze cyklicznym w pamięci. Przerwanie pochodzące od nadajnika sygnalizuje możliwość wysłania kolejnego znaku.

W przypadku wykrycia znacznego zapełnienia pamięci, do komputera wysyłany jest znak XOFF, oznaczający konieczność wstrzymania wysyłania danych. Przywrócenie wysyłania danych sygnalizowane jest znakiem XON, wysyłanym, jeśli zapełnienie pamięci buforowej ulegnie zmniejszeniu.

5.1.4.3. Obsługa łącza bezprzewodowego

Obsługa łącza bezprzewodowego ma za zadanie nadawać i odbierać ramki sterujące i danych, zgodnie ze zdefiniowanym protokołem komunikacyjnym.

Ramki wysyłane są po przygotowaniu ich przez procedurę konwersji protokołów. Po wysłaniu każdej ramki następuje oczekiwanie na przyjście ramki potwierdzającej poprawny odbiór. Jeśli takie potwierdzenie nie nadejdzie w czasie 1 s, ramka jest retransmitowana. Retransmisja następuje także wtedy, jeżeli nadejdzie potwierdzenie negatywne, tzn. ramka sygnalizująca błąd transmisji. Możliwe jest także nadejście ramki odrzucającej, sygnalizującej poprawną transmisję i niemożność zrealizowania polecenia. Przykładem może być próba nawiązania łączności ze stacją zaangażowaną w inną transmisję, posiadającą zapełnione bufory czy połączoną z wyłączonym komputerem.

Każda nadchodząca ramka sprawdzana jest pod kątem poprawności transmisji. Wykrycie błędu w nagłówku ramki powoduje jej zignorowanie, ponieważ nie ma wówczas pewności, czy nie uległy przekłamaniu pola adresowe i rozkazowe. Wykrycie błędu w polu danych, zabezpieczanym osobną sumą kontrolną, powoduje wysłanie ramki informującej o błędzie.

5.1.4.4. Konwersja protokołów

Zadaniem procedury konwersji protokołów jest przygotowywanie ramek łącza bezprzewodowego, dekodowanie odbieranych ramek (o ile były one poprawnie przyjęte) oraz podejmowanie decyzji dotyczących transmisji poszczególnych typów ramek.

Ramka *Nawiązanie połączenia* wysyłana jest wskutek pojawienia się stanu aktywnego sygnału DTR łącza RS-232C. Jeżeli w stacji odbierającej sygnał DTR jest aktywny, ustawia ona sygnał DSR i wysyła ramkę *Akceptacja*, której nadejście powoduje ustawienie stanu aktywnego sygnału DSR w stacji nadającej. Niemożność realizacji żądania sygnalizowana jest ramką *Odrzucenie*, która może zostać wysłana np. jeżeli stacja zajęta jest realizacją transmisji do innej stacji.

Po nawiązaniu połączenia może zostać wysłana ramka *Zajęcie łącza*, o ile na łączu pojawi się stan aktywny sygnału RTS. Jeżeli stacja odbierająca może zrealizować to żądanie, wysyła ramkę *Akceptacja* i ustawia na łączu RS-232C stan aktywny sygnału DCD. Nadejście ramki *Akceptacja* pozwala na ustawienie stanu aktywnego sygnału CTS. Stacja odbierająca może wysłać ramkę *Odrzucenie*, jeśli odbiera dane z innej stacji (zmniejsza to ryzyko kolizji na łączu).

Zwolnienie łącza sygnalizowane jest ramką *Zwolnienie łącza*, wysyланą wskutek zaniku sygnału RTS w stacji nadającej. Przyjęcie tego polecenia przez stację odbierającą pozwala na dezaktywację sygnału DCD i potwierdzone jest wysłaniem ramki *Akceptacja*, której nadejście powoduje ustawienie sygnału CTS w stanie nieaktywnym. Po zwolnieniu łącza inna stacja może zainicjować jego zajęcie.

Rozłączenie, wywołane dezaktywacją sygnału DTR w stacji nadającej, sygnalizowane jest wysłaniem ramki *Rozwiązanie połączenia*. Przyjęcie tego polecenia przez stację odbierającą powoduje ustawienie w niej sygnału DSR w stan nieaktywny i wysłanie ramki *Akceptacja*.

Ramki danych są kompletowane i wysyłane, jeżeli nastąpi jeden z poniższych warunków:

- stacja nadająca otrzyma pewną liczbę znaków z komputera,
- odebrany zostanie znak CR (kod ASCII 13).

Liczba znaków, niezbędna do wysłania ramki, jest parametrem, który może być zmieniany. Jeżeli niezbędne jest natychmiastowe wysłanie ramki pomimo zgromadzenia mniej-

szej liczby znaków, komputer musi wysłać znak CR (umożliwia to np. pracę konwertera w sieci Modbus w trybie ASCII [30]).

Jeżeli powyższe warunki uniemożliwiają zapewnienie korzystnych parametrów czasowych sieci, istnieje możliwość wprowadzenia dodatkowego ograniczenia czasowego, zmniejszającego opóźnienia w procesie transmisji danych. Można w tym celu zastosować licznik T1, nie wykorzystywany w obecnej wersji konwertera. Modyfikacja taka umożliwiłaby współpracę konwertera np. z siecią Modbus również w trybie RTU [30].

Wysłanie ramki danych sprowadza się do wysłania nagłówka (ramki sterującej *Dane*), po którym następuje pole danych, zabezpieczone osobną sumą kontrolną. Błąd w polu danych sygnalizowany jest przez stację odbierającą wysłaniem ramki *Błąd*; odebranie takiej ramki przez nadajnik powoduje retransmisję całej ramki danych. Błąd w nagłówku nie jest sygnalizowany, ponieważ cała ramka danych jest wówczas ignorowana. Ramka danych może także zostać odrzucona (ramka *Odrzucenie*), jeśli stacja odbierająca nie jest w stanie przyjąć danych, np. wskutek zapełnienia buforów.

Odebrana poprawnie ramka danych jest dekodowana, a zawarte w niej dane przekazywane są procedurze obsługi łącza przewodowego celem wysłania do komputera.

5.1.5. Środki wspomagające implementację konwertera

Podczas realizacji konwertera wykorzystywano następujące narzędzia:

- pakiet programów OrCAD wersja 3.21:
 - * program draft do rysowania schematów,
 - * program libedit do utworzenia opisu nowych elementów,
 - * program erchk do sprawdzenia poprawności połączeń;
- asembler dla mikrosterowników rodziny MCS-51,
- programator pamięci EPROM w celu umieszczenia kodu wynikowego programu konwertera,
- analizator stanów logicznych firmy Philips dla obserwacji przebiegów sygnałów cyfrowych,
- emulator układowy mikrosterowników rodziny MCS-51 firmy Signum Systems.

5.1.6. Analiza czasowa pracy konwertera

Ponieważ konwerter protokołów dokonuje buforowania przesyłanych danych, transmisja w sieci, zawierającej konwertery, składa się z trzech procesów (rys. 29 i 30):

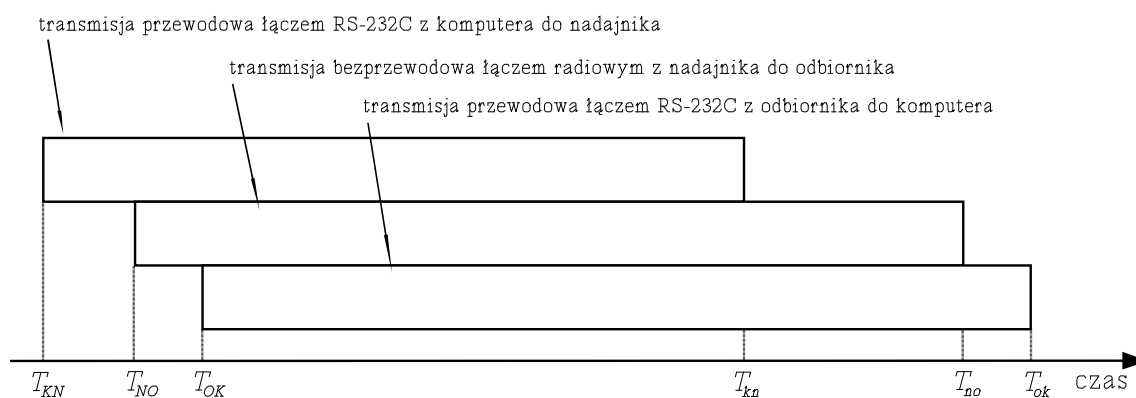
- transmisja poprzez łącze RS-232C z komputera do nadajnika (początek w chwili T_{KN} , koniec w chwili T_{kn}),
- transmisja łączem bezprzewodowym z nadajnika do odbiornika (początek w chwili T_{NO} , koniec w chwili T_{no}),

- transmisja poprzez łącze RS-232C z odbiornika do komputera (początek w chwili T_{OK} , koniec w chwili T_{ok}).

Ze względu na buforowanie informacji w pamięci danych konwertera te trzy procesy przebiegają w dużym stopniu równolegle. Różnice w czasie ich rozpoczęcia i zakończenia wynikają właśnie z konieczności dokonania konwersji protokołów, a w szczególności przygotowywania ramek do wysłania i odzyskiwania informacji z ramek odebranych. Dodatkowe opóźnienia mogą wynikać z konieczności stosowania się konwertera do zasad protokołu transmisyjnego łącza bezprzewodowego, np. z konieczności uzyskania potwierdzenia poprawnego odbioru każdej ramki.

5.1.6.1. Transmisja danych o dużej objętości

Rys. 29 ilustruje przebieg transmisji danych o relatywnie dużej objętości, np. plików.



Rys. 29. Przebieg transmisji z użyciem konwerterów przy dużej objętości przesyłanej informacji

Czas przesyłania tych danych jest znacznie dłuższy niż czasy "rozpędzania" i "hamowania" transmisji, odpowiednio $(T_{OK} - T_{KN})$ i $(T_{ok} - T_{kn})$. Z tego powodu, opóźnienie, wnoszone przez konwerter, jest względnie małe i dla bardzo dużych objętości danych może pozostać niezauważone. Sytuacja taka może wystąpić w sieciach typu biurowego.

Przykładowo, w sieci typu Ethernet teoretyczna efektywność określona jest następującą zależnością [100]:

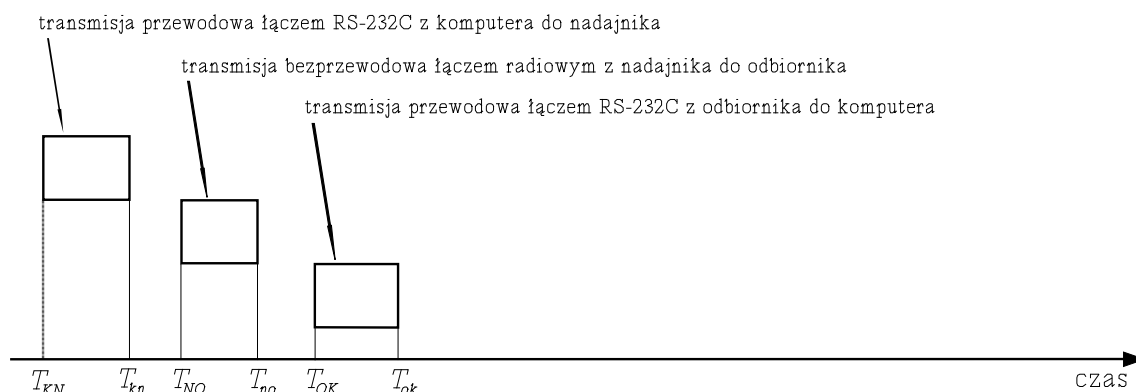
$$E = \frac{\frac{P}{C}}{\frac{P}{C} + W \cdot T}, \quad (17)$$

gdzie P oznacza długość ramki [b], C – prędkość transmisji [b/s], T – czas potrzebny na wykrycie kolizji [s], a W – średnią liczbę prób dostępu do łącza. Po dołączeniu do sieci konwerterów, wnoszących opóźnienie T_k [s], wzór (17) może przyjąć postać

$$E = \frac{\frac{P}{C}}{\frac{P}{C} + W \cdot T + T_k} \quad (18)$$

5.1.6.2. Transmisja danych o małej objętości

Rys. 30 ilustruje przebieg transmisji danych o relatywnie małej objętości, np. komunikatów w sieci przemysłowej. Czas przesyłania tych danych jest porównywalny, lub nawet



Rys. 30. Przebieg transmisji z użyciem konwerterów przy małej objętości przesyłanej informacji

krótszy, niż czas "rozpędzania", a zatem opóźnienie, wnoszone przez konwerter, ma istotny wpływ na całkowity czas transmisji danych, który może być nawet kilkakrotnie dłuższy, niż czas transmisji tych samych danych w sieci bez konwertera.

Opóźnienie transmisji danych w sieci przemysłowej może też zależeć od sposobu rozpoznawania przez konwerter końca ramki sieci przewodowej. Przykładowo, w sieci Modbus, pracującej w trybie ASCII, wykrycie końca ramki może nastąpić szybciej, niż jeżeli ta sama sieć pracuje w trybie RTU. Jest to spowodowane innym sposobem oznaczania końca ramki w tych trybach.

Parametrem, charakteryzującym sieci przemysłowe, jest czas trwania cyklu sieci [1]. W sieci Modbus jest on równy sumie czasów trwania poszczególnych transakcji. Transakcja w sieci Modbus składa się z pytania (polecenia), wysłanego ze stacji nadrzędnej oraz odpowiedzi ze stacji podrzędnej. Z uwzględnieniem czasu, potrzebnego na realizację polecenia w stacji podrzędnej, czas wykonania transakcji może być określony zależnością [1]:

$$T \text{ [s]} = \frac{L_b}{V} \cdot (F_M + F_S) + T_{\text{wyk}}, \quad (19)$$

gdzie L_b – długość znaku [b], V – prędkość transmisji [b/s], F_M i F_S – odpowiednio długość ramki stacji nadrzędnej i podrzędnej [B], a T_{wyk} – czas potrzebny na realizację polecenia w stacji podrzędnej [s].

Po dołączeniu konwerterów czas transakcji można określić wzorem

$$T \text{ [s]} = \frac{L_b}{V} \cdot (F_M + F_S) + T_{wyk} + (T_{kM} + T_{kS}), \quad (20)$$

gdzie T_{kM} i T_{kS} są opóźnieniami [s], wnoszonymi przez konwertery w procesy transmisji ramki, odpowiednio, stacji nadrzędnej i podrzędnej.

5.1.7. Oszacowanie wpływu konwertera na przepustowość łącza

Przykładowe oszacowanie dotyczy będzie przypadku, kiedy konwerter pracuje z szybkością transmisji $V_w = 9600$ b/s na łączu przewodowym i $V_{wL} = 1200$ b/s na łączu bezprzewodowym. Maksymalna długość pola danych ramki wynosi $L_D = 128$ B. Zgodnie z zasadami protokołu transmisyjnego [67], każda wysłana ramka musi zostać indywidualnie potwierdzona. Długość ramki potwierdzającej oraz nagłówek ramki danych wynosi $L_H = 8$ B, przy czym w tej ostatniej jeszcze 3 B dodawane są do przesyłanej informacji w polu danych, tak więc można założyć, że długość nagłówka ramki danych $L_{HD} = 11$ B. Przyjęto, że znak na łączu przewodowym i bezprzewodowym reprezentowany jest na $L_b = 11$ bitach, zgodnie ze standardem RS-232C. Czas przełączenia nadawanie-odbiór i odbiór-nadawanie wynosi $T_{TR} = T_{RT} = 0.1$ s. W oszacowaniu pomija się czas wykonywania przez konwerter poszczególnych operacji, uwzględniając jedynie zależności czasowe, wynikające z parametrów transmisji.

Liczba ramek, jakie zostaną wysłane, określona jest zależnością

$$N_F = \left\lfloor \frac{L_{DD}}{L_D} \right\rfloor, \quad (21)$$

gdzie L_{DD} oznacza całkowitą długość danych [B].

Czas transmisji pojedynczej ramki wraz z potwierdzeniem wynosi

$$T_F \text{ [s]} = \frac{L_b \cdot (L_{HD} + L_D + L_H)}{V_{wL}} + T_{RT} + T_{TR}, \quad (22)$$

przy czym dla ostatniej ramki w miejsce L_D należy podstawić $L_D' = L_{DD} - (N_F - 1) \cdot L_D$, ponieważ, jeżeli L_{DD} nie jest całkowitą wielokrotnością L_D , ramka ta zawiera mniej danych.

Całkowity czas transmisji danych łączem bezprzewodowym, z podziałem na N_F ramek, wynosi zatem

$$T_{NF} \text{ [s]} = \left\lfloor \frac{L_{DD}}{L_D} \right\rfloor \left(\frac{L_b \cdot (L_H + L_{HD})}{V_{wL}} + T_{RT} + T_{TR} \right) + \frac{L_b \cdot L_{DD}}{V_{wL}}. \quad (23)$$

Pierwszy składnik sumy, znajdującej się po prawej stronie równania (23), można zinterpretować jako narzut czasowy, wynikający z przyjętego protokołu transmisyjnego i parametrów urządzeń, użytych do realizacji transmisji bezprzewodowej.

Zgodnie z wykresem czasowym, przedstawionym na rys. 29, całkowity czas transmisji danych z wykorzystaniem konwerterów protokołów można określić następująco:

$$T \text{ [s]} = T_{ok} - T_{KN} = (T_{NO} - T_{KN}) + (T_{no} - T_{NO}) + (T_{ok} - T_{no}). \quad (24)$$

Wyliczony według równania (23) czas T_{NF} odpowiada składnikowi $(T_{no} - T_{NO})$ w równaniu (24). Czas $T_R = (T_{NO} - T_{KN})$ jest większy lub równy czasowi transmisji łączem przewodowym takiej liczby znaków, jaka odpowiada maksymalnej liczbie znaków w ramce danych łącza bezprzewodowego:

$$T_R \text{ [s]} \geq \frac{L_D \cdot L_b}{V_W}. \quad (25)$$

Z kolei czas $T_H = (T_{ok} - T_{no})$ jest większy lub równy czasowi transmisji łączem przewodowym takiej liczby znaków, jaka została przesłana w ostatniej ramce:

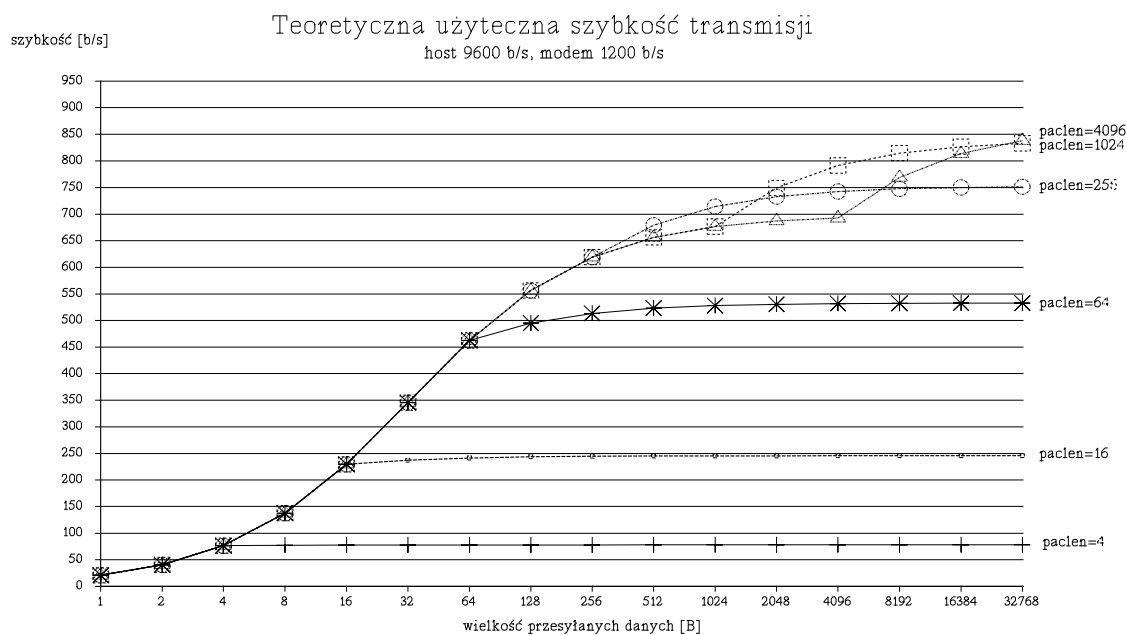
$$T_H \text{ [s]} \geq \frac{L'_D \cdot L_b}{V_W}, \quad (26)$$

przy czym $L'_D \leq L_D$. Równanie (24) przyjmuje więc postać

$$\begin{aligned} T \text{ [s]} &= T_R + T_{NF} + T_H \geq \\ &\geq \frac{L_b \cdot (L_D + L'_D)}{V_W} + \left[\frac{L_{DD}}{L_D} \left(\frac{L_b \cdot (L_H + L_{HD})}{V_{WL}} + T_{RT} + T_{TR} \right) + \frac{L_b \cdot L_{DD}}{V_{WL}} \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Dla przyjętych parametrów transmisji oraz dla $L_{DD} = 8205$ B czas T_{NF} wynosi około 100 s. Po uwzględnieniu czasów T_R i T_H , sumaryczny czas transmisji powinien wynosić około 101 s, co daje efektywną prędkość transmisji, wyliczoną według wzoru zamieszczonego w [67], równą 650 b/s. Bez użycia konwerterów czas transmisji przy $V_W = 1200$ b/s wynosi około 75 s, co daje efektywną prędkość transmisji rzędu 870 b/s.

Z powyższej analizy wynika, że przy przesyłaniu informacji o relatywnie dużej objętości, tzn. gdy $T_{NF} \gg T_R + T_H$, czasy T_R oraz T_H mają niewielki wpływ na całkowity czas transmisji i mogą zostać pominięte. Zastosowanie konwertera protokołów powoduje wówczas, dla założonych wartości parametrów, wydłużenie tego czasu o około 32 %. Jeśli natomiast czas transmisji danych łączem bezprzewodowym jest porównywalny z czasami T_R i T_H , wydłużenie czasu transmisji przez konwerter będzie znacznie większe. Zależność tę ilustruje rys. 31, na którym pokazany jest teoretyczny (wynikający z obliczeń według wzoru (27)) wpływ



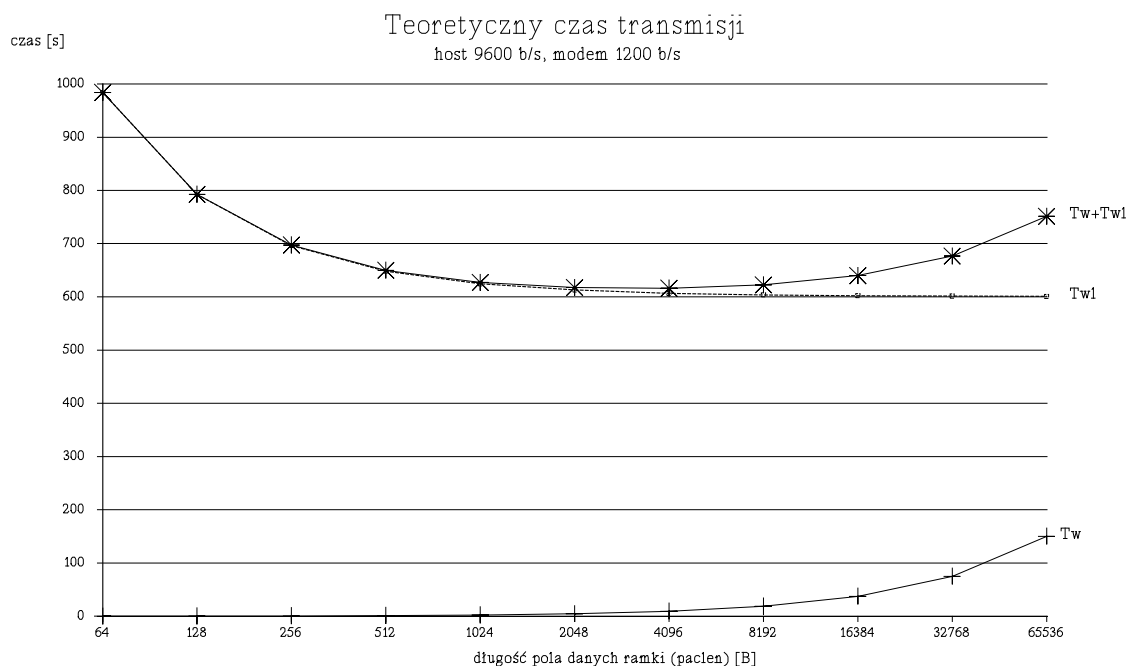
Rys. 31. Teoretyczny wpływ wielkości przesyłanej informacji na efektywną szybkość transmisji dla różnych długości pola danych ramki

długości przesyłanej informacji na efektywną szybkość transmisji dla różnych długości pola danych ramki. Interesujące jest załamanie krzywych dla bardzo dużych długości pola danych ramki (1024 i 4096 B). Wynika ono z tego, że transmisja łączem bezprzewodowym rozpoczyna się po zgromadzeniu w konwerterze odpowiedniej liczby znaków. W tym przypadku jest ona tak duża, że czas transmisji tych znaków łączem przewodowym do konwertera także odgrywa istotną rolę, co ilustruje rys. 32. Teoretyczną zależność efektywnej prędkości transmisji od długości pola danych ramki (dla przesyłu danych o długości 65536 B) ilustruje rys. 33, na którym także widać wspomnianą właściwość konwertera. Można zatem wyciągnąć wniosek, że stosowanie dużych długości ramki jest uzasadnione wyłącznie przy przesyłaniu informacji o bardzo dużej długości (rzędu MB). Należy także zaznaczyć, że wzrost długości stosowanych ramek pociąga za sobą wzrost zapotrzebowania na pamięć danych konwertera, a także zwiększone ryzyko błędu transmisji [2, 67].

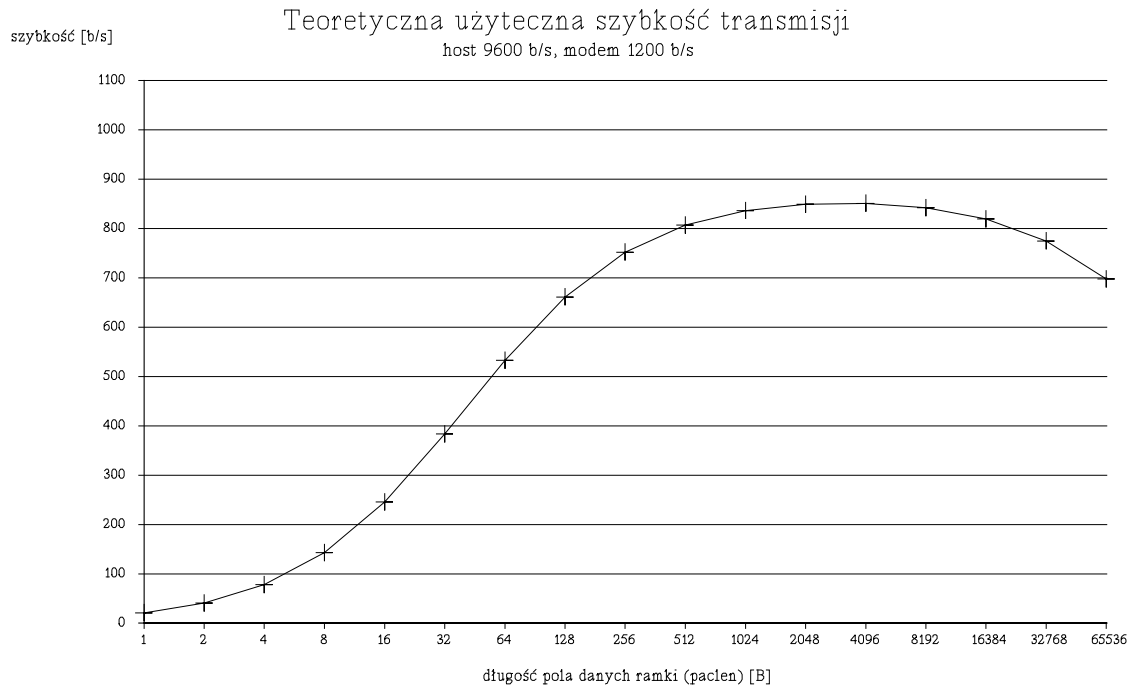
Podobną analizę można przeprowadzić również dla innych parametrów transmisji, jak np. prędkości transmisji na obu łączach lub pojemność pola danych w ramce, a także dla innych objętości przesyłanych informacji.

5.1.8. Ocena konwertera

Wykonany konwerter protokołów został dostosowany do współpracy z komputerami w sieciach typu biurowego. Z technicznego punktu widzenia możliwa jest jego praca w sieci przemysłowej (np. Modbus), jednak z wieloma ograniczeniami, wynikającymi z różnic, jakie



Rys. 32. Czasy transmisji danych łączem przewodowym (T_w) i bezprzewodowym (T_{wl}) w zależności od długości pola danych ramki



Rys. 33. Teoretyczny wpływ długości pola danych ramki na efektywną prędkość transmisji dla przesyłu informacji o długości 65536 B

występują między sieciami przemysłowymi i biurowymi. Okazuje się także, iż konwerter oferuje gorsze parametry użytkowe, niż dostępne w handlu kontrolery TNC, posiadające

zbliżoną strukturę [45]. Jest to spowodowane ograniczeniami zastosowanego w konwerterze protokołu transmisyjnego oraz parametrami zastosowanych urządzeń do transmisji bezprzewodowej.

Łącze RS-232C w komputerze (np. typu IBM PC) może służyć do przesyłu danych bez konieczności definiowania jakiegokolwiek protokołu. Można również, przy zastosowaniu odpowiedniego oprogramowania, wykorzystać je do przesyłu plików zgodnie z regułami specjalnie do tego celu opracowanych protokołów transmisyjnych. Protokoły te, pomimo że oparte są o tę samą specyfikację warstwy fizycznej, wykazują jednak istotne różnice w stosunku do protokołów sieci przemysłowych:

1. Sieci przemysłowe nie wykorzystują linii sterujących łącza RS-232C, a jedynie linie danych.
2. Sieci przemysłowe pracują zawsze według ustalonego protokołu warstwy liniowej.
3. Sieci przemysłowe służą wymianie komunikatów o długości znacznie krótszej niż długość przesyłanych plików.
4. Sieci przemysłowe składają się z wielu stacji (co jest uwzględnione w protokole), podczas gdy przesył plików dotyczy zawsze dwóch stacji.
5. W sieci przemysłowej istnieją ograniczenia na maksymalny czas transmisji informacji.
6. Protokoły sieci przemysłowych zapewniają protokół dostępu stacji do łącza (przy przesył plików pomiędzy dwiema stacjami jest on zbędny).
7. Protokoły sieci przemysłowych zapewniają adresowanie stacji (zbędne dla łącza dwupunktowego) i efektywne procedury wykrywania błędów transmisji.

Z powyższego porównania właściwości wynikają następujące wnioski:

- implementacja łącza RS-232C może zostać ograniczona do linii danych,
- konwerter powinien rozpoznawać koniec ramki sieci przemysłowej,
- przesyłane ramki powinny być znacznie krótsze niż w sieci biurowej,
- uzupełnianie przesyłanej informacji o adres i sumę kontrolną jest zbędne,
- sprawdzanie poprawności odbioru ramki w konwerterze nie jest niezbędne.

Widać zatem, że wykonany konwerter protokołów nie spełnia tych założeń. Ponadto, wymaga on dołączenia zewnętrznego modemu i radiostacji, podczas gdy wskazane jest, aby konwerter protokołów stanowił pojedyncze urządzenie. Dlatego też zrezygnowano z modyfikacji już wykonanego urządzenia i postanowiono zbudować nowy konwerter, bazując jednak na doświadczeniach związanych z układem poprzednim.

5.2. Zmodyfikowany konwerter dla sieci przemysłowych

Do praktycznej realizacji konwertera dla sieci przemysłowych wybrano układ, realizujący konwersję protokołów sieci przemysłowych, w których transmisja odbywa się zgodnie z zasadami standardu RS-232C. Wybór ten, podobnie jak i poprzednio, podyktowany był dostępnością i niską ceną elementów i dokumentacji oraz łatwością implementacji tego standardu.

Przyjęto, że konwerter protokołów dla sieci przemysłowych, z tych samych co poprzednio przyczyn, także powinien być urządzeniem autonomicznym. Konwerter powinien mieć możliwość współpracy z dowolnym protokołem sieci przemysłowej, możliwa jest także praca układu z innymi protokołami opartymi na łączu RS-232C (np. Modbus) [93, 94]. Istnieje również możliwość stosowania układu w sieci wykorzystującej format znaku zgodny z RS-232C, ale opartej na innej warstwie fizycznej (np. RS-485 w sieci Profibus). W tym przypadku konieczne jest dołączenie dodatkowego układu dopasowującego (konwertera poziomów napięć), odpowiadającego z jednej strony wymogom sieci przemysłowej, z drugiej zaś – standardowi RS-232C.

Założenia powyższe precyzyjnie określają wymogi wobec parametrów łącza przewodowego w konwerterze. Przyjęto asynchroniczny format znaku, zgodny ze standardem RS-232C. Prędkość transmisji może wynosić 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600 lub 19200 b/s (co umożliwi transmisję w sieci Modbus bez ograniczeń, natomiast w sieci Profibus tylko w dolnych zakresach prędkości). Znak może zawierać 7 lub 8 bitów informacyjnych, 1 lub 2 bity stopu oraz ewentualnie bit kontroli poprawności (bit parzystości lub nieparzystości). Wymienione parametry transmisji można ustalać poprzez odpowiednie ustawienie przełączników konfiguracyjnych na płycie konwertera.

Wymóg zawarcia konwertera wraz z układem nadajnika-odbiornika radiowego w jednym urządzeniu wymusił ograniczenie modyfikowalności układu, który w tym przypadku został przystosowany do współpracy z jednym, wybranym rodzajem układu radiowego.

Przyjęto ponadto, że do montażu układu konwertera wykorzystane zostaną gotowe podzespoły, jak np. płytki jednostki centralnej dla mikrosterowników rodziny MCS-51 oraz dostosowana do współpracy z nią płytka uniwersalna. Również do realizacji łącza bezprzewodowego zdecydowano się wykorzystać gotowy moduł nadajnika-odbiornika radiowego, który może współpracować z układami cyfrowymi bezpośrednio lub za pośrednictwem prostego układu sterującego i filtrującego.

Aby uniknąć konieczności wprowadzenia do układu dodatkowego, zewnętrznego układu transmisji szeregowej, wykorzystano rozbudowaną wersję mikrosterownika rodziny MCS-51, tj. układ Dallas 80C320, posiadający wbudowane dwa identyczne porty szeregowe, w pełni

zgodne z portem szeregowym mikrosterownika w wersji podstawowej. Przyjęto, że pierwszy z tych układów odpowiedzialny będzie za transmisję w łączu przewodowym, drugi zaś – za obsługę elementu radiowego. W porównaniu do pierwszego konwertera, zwiększono także pojemność pamięci danych z 8 do 32 KB.

5.2.1. Protokół łącza radiowego

Wykorzystany moduł nadajnika-odbiornika radiowego ma specyficzne wymagania odnośnie formatu przesyłanych danych. Dlatego też konieczne jest odpowiednie przetworzenie przesyłanych danych, pomimo że protokoły wybranych sieci przemysłowych dostarczają wszystkich mechanizmów, potrzebnych do poprawnej pracy łącza bezprzewodowego (adresowanie stacji, algorytm dostępu do łącza, przesyłanie danych w ramach itp.). Z tego powodu nie jest konieczne wprowadzanie tych informacji do protokołu łącza radiowego, wystarczy umieścić je w ramce bez zmian i interpretacji.

Wymagania modułu radiowego są następujące [70]:

- dane powinny być przesyłane w ramach,
- nadanie ramki powinno być poprzedzone wysłaniem preambuły w celu zsynchronizowania modułu z ciągiem bitów; preambuła składa się z ciągu bitów o wartościach na przemian '0' i '1' i powinna trwać przez $3 \div 5$ ms,
- dane powinny być oddzielone od preambuły separatorem (2 bajty o wartości FFh) i znacznikiem początku danych (2 bajty o wartościach 01h i FDh),
- w obrębie całego ciągu danych powinna zostać zachowana równowaga bitów o wartości '0' i '1'.

Ostatni z wymienionych warunków może być spełniony poprzez odpowiednie kodowanie (kod Manchester) lub przez wysłanie każdego bajtu ramki wraz z jego dopełnieniem (negacja każdego bitu). Ze względu na trudności realizacji kodu Manchester, wybrano drugi z opisanych sposobów, a jego realizacja odbywa się na drodze programowej.

Format ramki łącza radiowego przedstawiony jest na rys. 34.

Preambuła	Separator	Początek danych	Długość danych	Dane	Suma LRC
20 B (AAh)	2 B (FFh)	2 B (01FDh)	2 B	≤ 32 B	2 B

Rys. 34. Struktura ramki łącza bezprzewodowego

Format znaku łącza jest asynchroniczny, zgodny ze standardem RS-232C. Znak składa się z bitu startu, 8 bitów informacyjnych i bitu stopu. Prędkość transmisji wynosi 37500 b/s. Czas transmisji ramki, w zależności od długości pola danych L_D , wynosi zatem

$$T(L_D) \text{ [s]} = 5 \cdot 10^{-3} + \frac{10 \text{ [b]}}{37500 \text{ [b/s]}} (8 + 2 \cdot L_D \text{ [B]}). \quad (28)$$

Ponieważ konwerter przeznaczony jest głównie do pracy w sieciach, które zapewniają ochronę danych przed błędami, zrezygnowano z zaawansowanych mechanizmów ochrony, zakładając, że są one implementowane w protokole sieci przewodowej. Zastosowano jedynie prostą sumę kontrolną LRC. Błąd sumy kontrolnej powoduje odrzucenie ramki bez informowania nadawcy o błędzie. Podobny mechanizm występuje w sieci Modbus.

5.2.2. Zasady konwersji protokołów

Jednym z możliwych zastosowań konwertera jest praca w sieci Modbus. Sieć ta w trybie RTU wykorzystuje ciszę na łączu jako ogranicznik (znacznik początku i końca) ramki, dlatego też przy ustalaniu zasad konwersji należy zwrócić szczególną uwagę na parametry czasowe konwertera, aby nie powodował on błędów pracy sieci przewodowej [93].

Przy założonych parametrach łącza radiowego, czas transmisji pojedynczego znaku wynosi 0.267 ms. Czas transmisji najkrótszej ramki, zawierającej 1 bajt łącza przewodowego, wynosi 2.67 ms, zatem wraz z preambułą wynosi on 7.67 ms. Transmisja najdłuższej ramki, zawierającej 16 bajtów łącza przewodowego, zajmuje 10.68 ms (z preambułą 15.68 ms).

Czas transmisji 1 bajtu łączem przewodowym, w zależności od prędkości transmisji tego łącza, może wahać się od 0.573 do 220 ms (tabela 7). Czas ten dla prędkości do 1200 b/s jest dłuższy niż czas transmisji najkrótszej ramki, dlatego też można w ramce łącza radiowego przesłać tylko 1 bajt łącza przewodowego. Podobnie po stronie odbiorczej, transmisja na łączu przewodowym może zostać rozpoczęta, jeśli tylko jest znak do wysłania.

Tab. 7. Czas transmisji 11-bitowego znaku w zależności od prędkości transmisji łącza

Prędkość [b/s]	19200	9600	4800	2400	1200	600	300	150	110	75	50
Czas [ms]	0.573	1.146	2.292	4.583	9.17	18.3	36.7	73.3	100	147	220

Dla prędkości wyższych, z zakresu 2400 ÷ 19200 b/s, wysyłanie ramek z pojedynczymi bajtami informacji jest już nieopłacalne, ponieważ w czasie wysyłania ramki mogą nadejść kolejne bajty. Dlatego też w ramce umieszcza się więcej bajtów. Skompletowanie i wysłanie ramki następuje, gdy:

- z łącza przewodowego odebrano co najmniej 16 znaków, lub
- od chwili odebrania ostatniego znaku łącza przewodowego upłynął czas nieco przekraczający czas transmisji znaku przy zadanej prędkości łącza (tabela 7).

Analogicznie po stronie odbiorczej, transmisja łączem przewodowym następuje, gdy:

- zgromadzono odpowiednią liczbę znaków, zależnie od szybkości transmisji łącza przewodowego; liczba ta jest tak dobrana, że w czasie potrzebnym na przesłanie znaków można odebrać 3 ramki łącza bezprzewodowego,

- od chwili odebrania ostatniej ramki łącza bezprzewodowego upłynął czas nieco przekraczający czas transmisji najdłuższej możliwej ramki, tj. 15.68 ms.

Przyjęte zasady konwersji nie naruszają założenia przezroczystości i uniwersalności konwertera, mogą jedynie powodować opóźnienia w procesie transmisji danych. Opóźnienia te, w zakresie szybkości do 1200 b/s, nie są zauważalne, ponieważ czas transmisji ramki łączem bezprzewodowym jest mniejszy lub w przybliżeniu równy czasowi transmisji znaku łączem przewodowym. W zakresach szybkości powyżej 2400 b/s, ze względu na przyjęte zasady, konwerter może powodować opóźnienia. Będą one widoczne najbardziej podczas transmisji krótkich informacji, a mogą pozostać niezauważone podczas transmisji dużych porcji danych, np. plików.

5.2.3. Baza elementowa

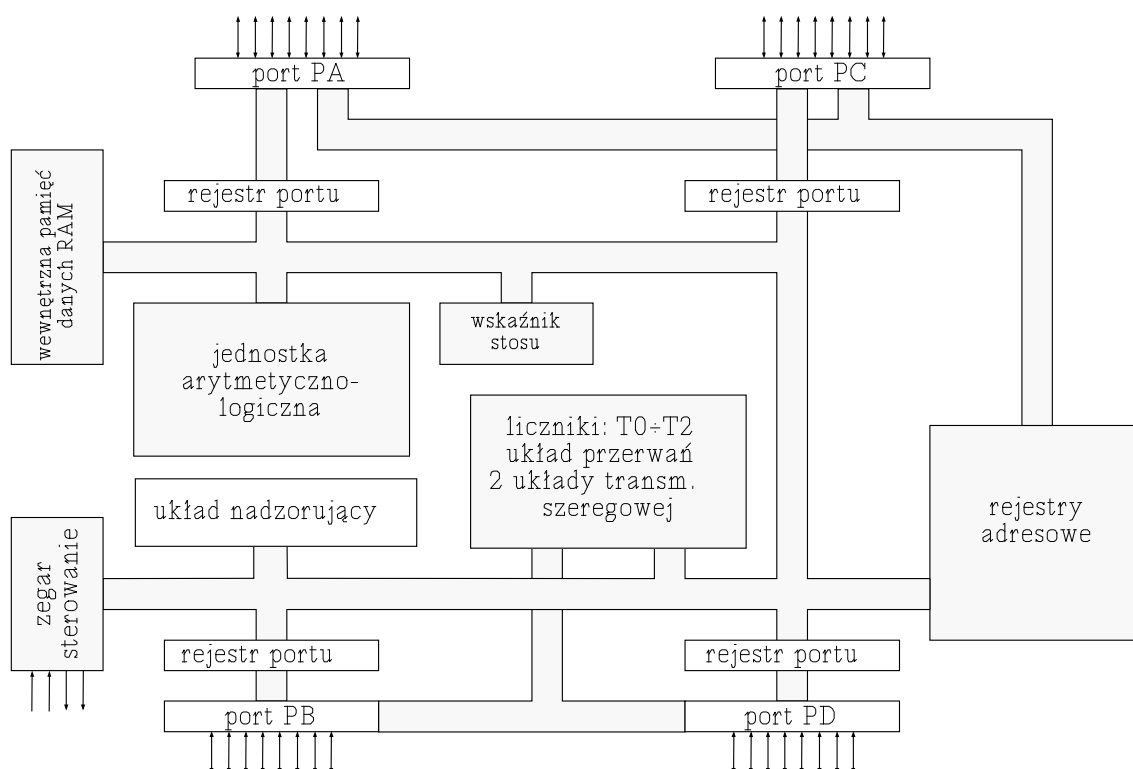
Do realizacji części sprzętowej konwertera wykorzystano [93, 94]:

- płytke μM -31 firmy Micromax [95], zawierającą kompletną jednostkę centralną dla mikrosterownika jednocukłowego rodziny MCS-51, w tym podstawki dla pamięci EPROM i SRAM oraz konwerter napięć RS-232C/TTL dla jednego łącza szeregowego,
- płytke μM -uni firmy Micromax [96], zawierającą stabilizator napięcia zasilającego oraz pole druku uniwersalnego,
- mikrosterownik jednocukłowy Dallas 80C320 [82, 97], zawierający m. in. 2 wewnętrzne porty szeregowy, asynchronicznej transmisji danych oraz porty równoległe,
- moduł nadajnika-odbiornika radiowego BiM-433-F firmy Radiometrix [70] o prędkości transmisji do 40 kb/s i mocy nadajnika około 10 mW,
- zewnętrzny układ dopasowania napięć RS-232C/RS-485 firmy Yuko [98], który po dołączeniu do konwertera protokołu umożliwia pracę z sieciami wykorzystującymi interfejs RS-485.

5.2.3.1. Mikrosterownik Dallas DS80C320

Mikrosterownik DS80C320 firmy Dallas Semiconductor [82, 97] jest rozbudowaną i nieco zmodyfikowaną wersją mikrosterowników jednocukłowych rodziny MCS-51. Jego struktura odpowiada strukturze układu 80C32 (rys. 35), identyczna jest także topografia wyprowadzeń (rys. 36). W porównaniu z układem 80C32, DS80C320 charakteryzują następujące cechy:

- cykl maszynowy skrócony do 4 taktów zegara (wobec 12 taktów w układzie 80C32),
- możliwość wydłużania cykli dostępu do zewnętrznej pamięci danych i układów peryferyjnych (w zakresie $8 \div 36$ taktów zegara), w celu dopasowania szybkości pracy układów,



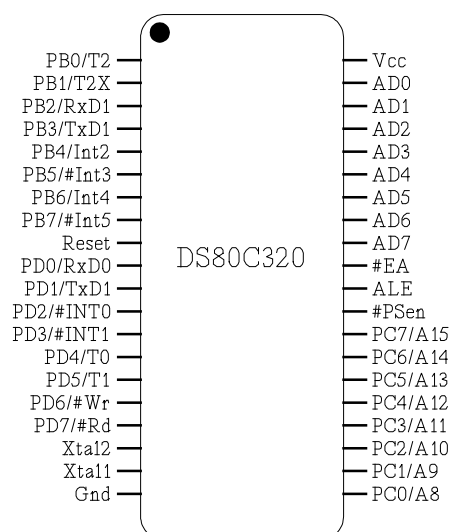
Rys. 35. Struktura wewnętrzna mikrosterownika DS80C320

- maksymalna częstotliwość taktowania 33 MHz,
- możliwość zgłoszenia przerwania wskutek zaniku zasilania,
- podwójny wskaźnik danych (DPTR0 i DPTR1),
- automatyczne zerowanie po załączeniu zasilania (bez dodatkowych elementów zewnętrznych),
- programowany czasowy układ nadzorujący (ang. *watchdog timer*),
- drugi (dodatkowy) port szeregowy, w pełni zgodny z portem szeregowym układu 80C32 (linia danych nadawanych TxD na wyprowadzeniu PB₃, a danych odbieranych – PB₂),
- rozbudowany układ przerwań, obsługujący również drugi port szeregowy i dodatkowe przerwania zewnętrzne, zgłaszane na liniach PB₄ ÷ PB₇.

Dzięki odpowiedniej architekturze, układ DS80C320 wykonuje każdy rozkaz 1.5 ÷ 3 razy szybciej, niż wersja 80C32 o tej samej częstotliwości zegara. Lista rozkazów jest zgodna na poziomie kodu wynikowego z listą rozkazów mikrosterownika 80C32.

5.2.3.2. Moduł Micromax μM-31

Moduł μM-31 firmy Micromax [95] jest uniwersalnym sterownikiem mikroprocesorowym przeznaczonym do wielorakich zastosowań w dziedzinie pomiarów i sterowania. Moduł ten zawiera:



Rys. 36. Wyprowadzenia mikrosterownika DS80C320 w obudowie DIP-40

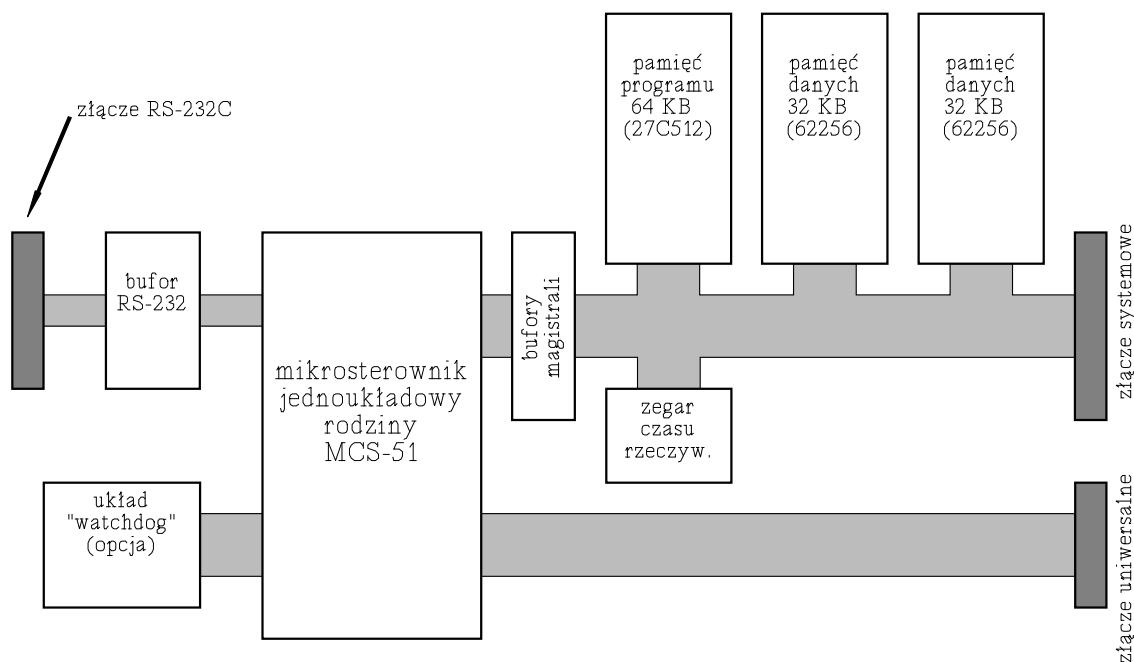
- podstawkę dla procesora rodziny MCS-51 (w obudowie PLCC-44),
- bufony magistrali adresowej i danych,
- podstawkę dla pamięci stałej (EPROM) o pojemności do 64 KB (w obudowie DIP-28),
- podstawki dla dwóch układów pamięci statycznej RAM o pojemności 32 KB (w obudowie DIP-28),
- zegar czasu rzeczywistego (opcja),
- układ "watchdog" MAX691 (opcja),
- łącze szeregowe zgodne ze standardem RS-232C (złącze DB-9),
- złącza do podłączenia innych modułów firmy Micromax poprzez porty wejścia-wyjścia lub do magistrali.

Schemat blokowy modułu μ M-31 przedstawiony jest na rys. 37.

5.2.3.3. Moduł Micromax μ M-uni

Moduł μ M-uni firmy Micromax [96] jest przeznaczony do realizacji własnych aplikacji sprzętowych, współpracujących z modułem μ M-31 lub innymi modułami procesorów tej firmy. Moduł zawiera:

- stabilizator napięcia +5 V,
- interfejs wyświetlacza LCD (opcja),
- pole druku uniwersalnego o powierzchni około 30 cm²,
- złącza do podłączenia innych modułów firmy Micromax.



Rys. 37. Schemat blokowy płytki μ M-31

5.2.3.4. Moduł radiowy Radiometrix BiM-433-F

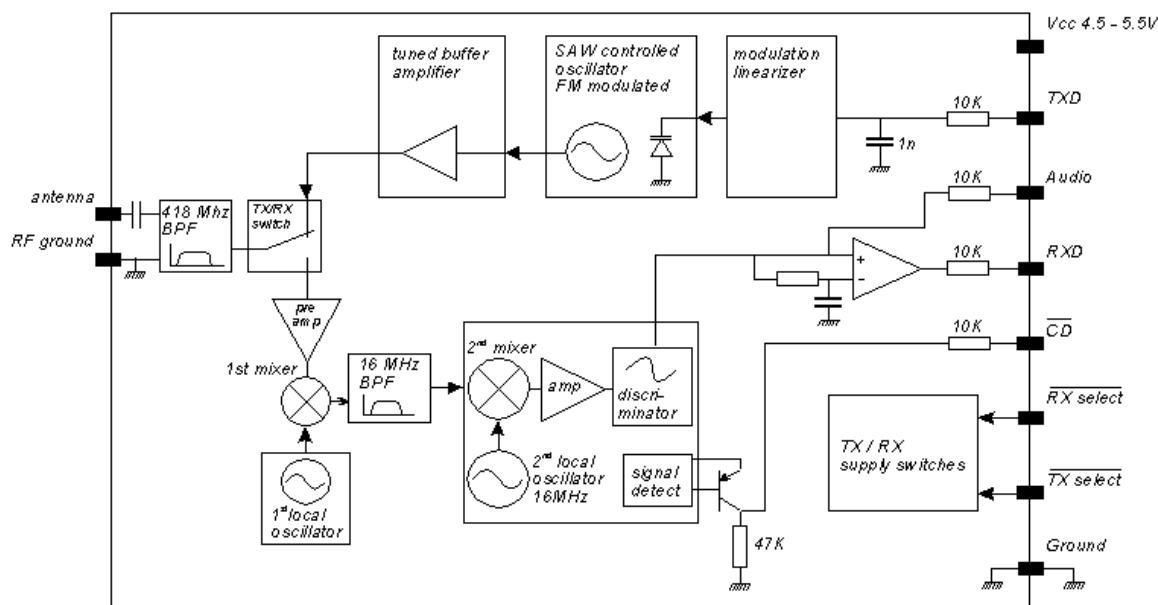
Układ BiM-433-F [70] jest modułem radiowego nadajnika-odbiornika UHF małej mocy, produkowanym przez firmę Radiometrix Ltd. Moduł zapewnia półduplexową transmisję danych z szybkością do 40 kb/s na odległość do 30 m w przestrzeni zamkniętej i do 120 m w terenie otwartym. Wykorzystywana częstotliwość fal radiowych wynosi 433.92 MHz. Układ może być zasilany napięciem z zakresu $4.5 \div 5.5$ V i jest przystosowany do współpracy z cyfrowymi układami CMOS, zasilanymi napięciem 5 V. Schemat blokowy modułu przedstawiono na rys. 38, a wymiary i topografię wyprowadzeń – na rys. 39. Opis wyprowadzeń i parametry techniczne modułu zebrano w tabelach 8 i 9.

5.2.3.5. Układ dopasowania napięć Yuko KA-485

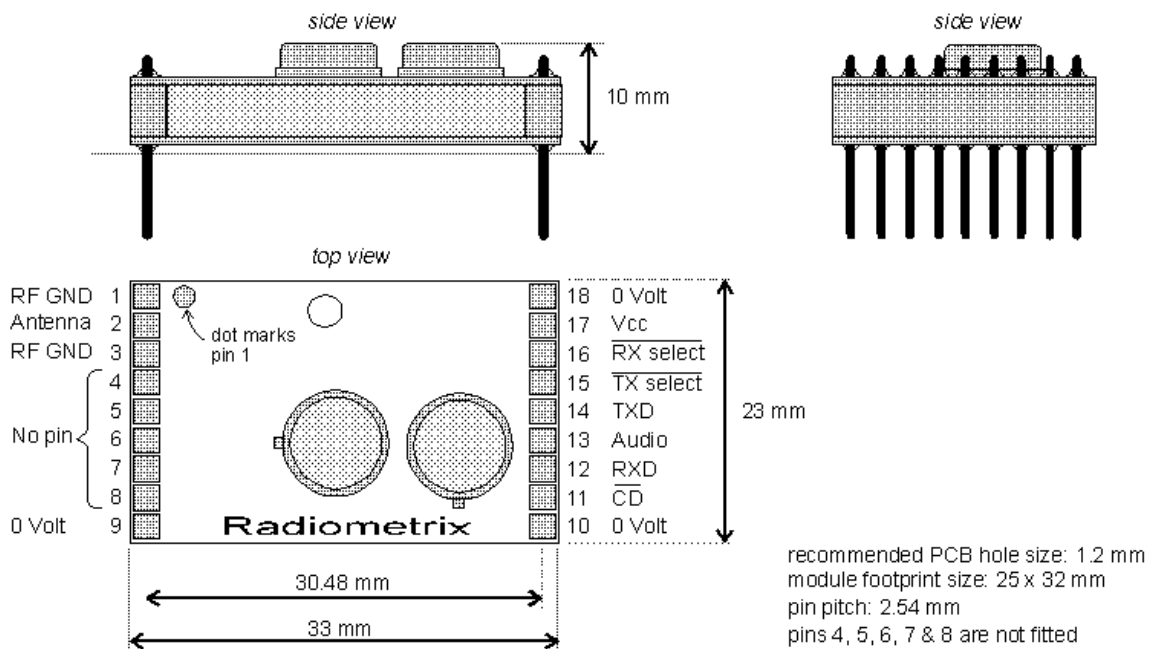
Układ dopasowania napięć KA-485 firmy Yuko [98] jest konwerterem interfejsu RS-232C na RS-485 i umożliwia podłączenie urządzeń wyposażonych w łącze RS-232C do dwuprzewodowej linii standardu RS-485. Układ umożliwia szeregową, asynchroniczną transmisję danych w trybie dwukierunkowym naprzemiennym. Zestaw dwóch układów KA-485 umożliwia też połączenie dwóch urządzeń, posiadających łącze standardu RS-232C.

Układ KA-485 jest zamontowany w obudowie 25-stykowego złącza do bezpośredniego przyłączenia do złącza RS-232C. Do zasilania wykorzystywane są sygnały TxD, RTS i DTR złącza RS-232C. Sygnały RTS i DTR tego złącza zwarte są odpowiednio z sygnałami CTS i DSR.

Kierunek transmisji można przełączać na dwa sposoby:



Rys. 38. Schemat blokowy modułu BiM-433-F



Rys. 39. Wymiary i rozkład wyprowadzeń modułu BiM-433-F

- obecnością sygnału aktywnego na linii TxD złącza RS-232C,
- sygnałem RTS (napięcie ≤ 2 V oznacza nadawanie, a napięcie ≥ 0.8 V – odbiór).

Przełączanie kierunku transmisji sygnałem RTS wymaga odpowiednich procedur sterujących tym sygnałem. Przełączanie stanem aktywnym sygnału TxD wymaga natomiast odpowiedniego ustawienia przełącznika przedłużenia czasu nadawania. Czas ten dla szybkości transmisji 4800, 9600, 19200 i 38400 b/s wynosi odpowiednio 2, 1, 0,5 i 0,25 ms.

Układ KA-485 nie zapewnia separacji galwanicznej urządzeń.

Tab. 8. Parametry techniczne modułu BiM-433-F

Parametr	Min.	Typ.	Maks.	Jednostka
Napięcie zasilania	4.5	–	5.5	V
Pobór prądu (nadawanie)	8	12	15	mA
Pobór prądu (odbior)	10	12	16	mA
Pobór prądu (pętla testowa)	–	20	25	mA
Pobór prądu (układ nieaktywny)	–	–	1	μA
Częstotliwość robocza	–	433.92	–	MHz
Moc wypromieniowana	-10	-6	-3	dBm
Stabilność częstotliwości	-95	–	+95	kHz

Tab. 9. Opis wyprowadzeń modułu BiM-433-F

Nazwa	Nóżka nr	Znaczenie
RF Gnd	1, 3	masa sygnału radiowego, wewnętrznie połączona z masą układu
Antenna	2	wejście-wyjście sygnału radiowego o impedancji 50 Ω
V _{ss}	9, 10, 18	wyprowadzenia do podłączenia potencjału 0 V (masy)
CD	11	sygnał wyjściowy wskazujący poziomem niskim, że jest odbierany sygnał radiowy o poziomie przekraczającym próg wykrywalności
RxD	12	cyfrowy sygnał wyjściowy z wewnętrznego układu danych odbiornika
RxAudio	13	wyjście demodulatora FM, używane do sterowania układów analogowych
TxD	14	wejście danych szeregowych, sterowane dowolnym sygnałem o napięciach z zakresu V _{ss} ÷ V _{cc}
TxSel	15	sygnały wyboru nadawania lub odbierania, aktywne poziomem niskim
RxSel	16	
V _{cc}	17	napięcie zasilania 4.5 ÷ 5.5 V

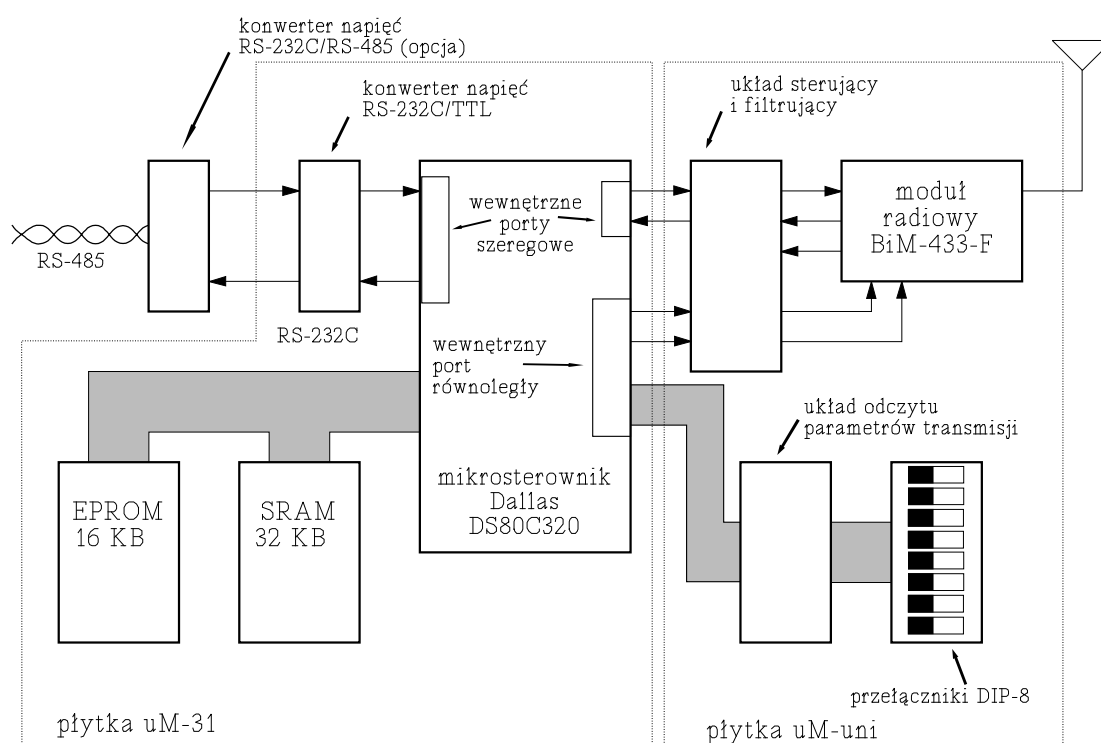
5.2.4. Projekt konwertera protokołów

Zastosowanie płytek drukowanych μM-31 i μM-uni wymusiło podział części sprzętowej konwertera na następujące fragmenty:

- jednostkę centralną, zrealizowaną na płycie μM-31 z wykorzystaniem mikrosterownika DS80C320,

- układ radiowy i konfiguracyjny, zrealizowany na płycie μ M-uni z wykorzystaniem modułu radiowego BiM-433-F,
- opcjonalny układ dopasowania napięć RS-485/RS-232C, zrealizowany w oparciu o układ KA-485 firmy Yuko.

Schemat blokowy konwertera z uwzględnieniem powyższego podziału przedstawiony jest na rys. 40. Ponieważ zarówno płytka μ M-31, jak i układ KA-485 stanowią gotowe produkty, do zaprojektowania pozostał jedynie fragment zawierający układ radiowy i układ odczytu konfiguracji.

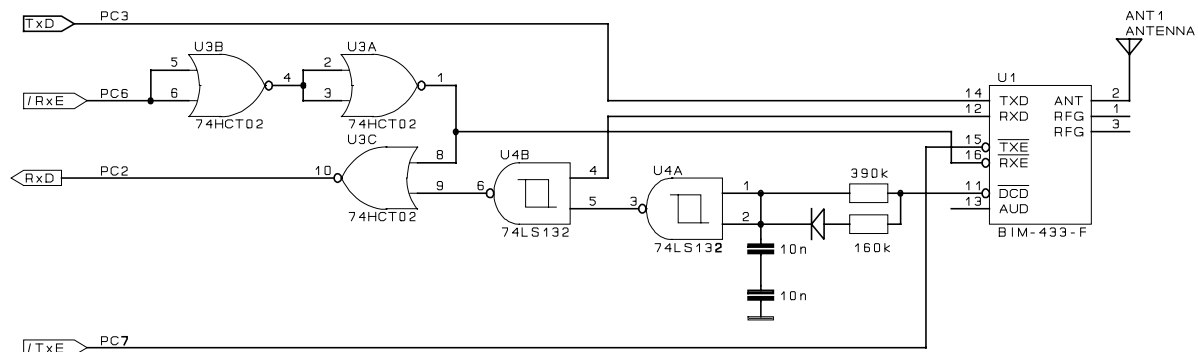


Rys. 40. Schemat blokowy konwertera protokołów

5.2.4.1. Projekt układu radiowego

Układ radiowy zrealizowano z wykorzystaniem modułu BiM-433-F firmy Radiometrix [70] (rys. 41). Współpracę tego modułu z mikrosterownikiem zapewnia układ sterujący i filtrujący, będący zmodyfikowaną wersją układu proponowanego przez producenta [70]. Modyfikacja ta polega na wprowadzeniu stałej czasowej filtru innej dla przejścia 0→1, niż dla przejścia 1→0. Wartość kondensatora dobrano doświadczalnie tak, aby odporność układu na zakłócenia była możliwie jak największa. Linie danych nadawanych (TxD) i odbieranych (RxD) modułu połączono z liniami portu odpowiednio PB₃ i PB₂, które w mikrosterowniku DS80C320 mogą pełnić funkcję wyprowadzeń drugiego portu szeregowego. Linie sterujące, ustawiające moduł radiowy w tryb nadawczy (/TxE) lub odbiorczy (/RxE), zrealizowano

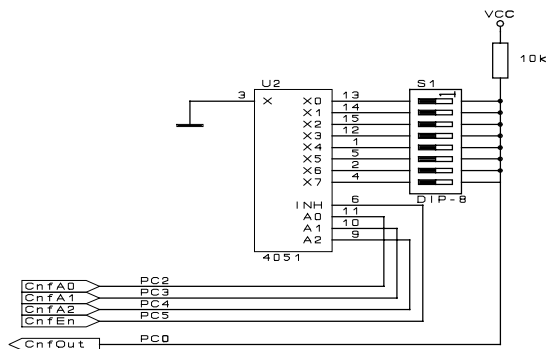
z wykorzystaniem linii odpowiednio PB_7 i PB_6 . Obsługa tych linii odbywa się na drodze programowej.



Rys. 41. Schemat układu radiowego konwertera protokołów

5.2.4.2. Projekt układu odczytu konfiguracji

Układ odczytu konfiguracji zrealizowano z wykorzystaniem mikroprzełączników DIP-8 i układu multiplexera-demultiplexera analogowego 4051 [99] (rys. 42). Zastosowano szeregowy sposób odczytu mikroprzełączników. Linie $PD_2 \div PD_4$ (CnfA0 ÷ CnfA2) stanowią

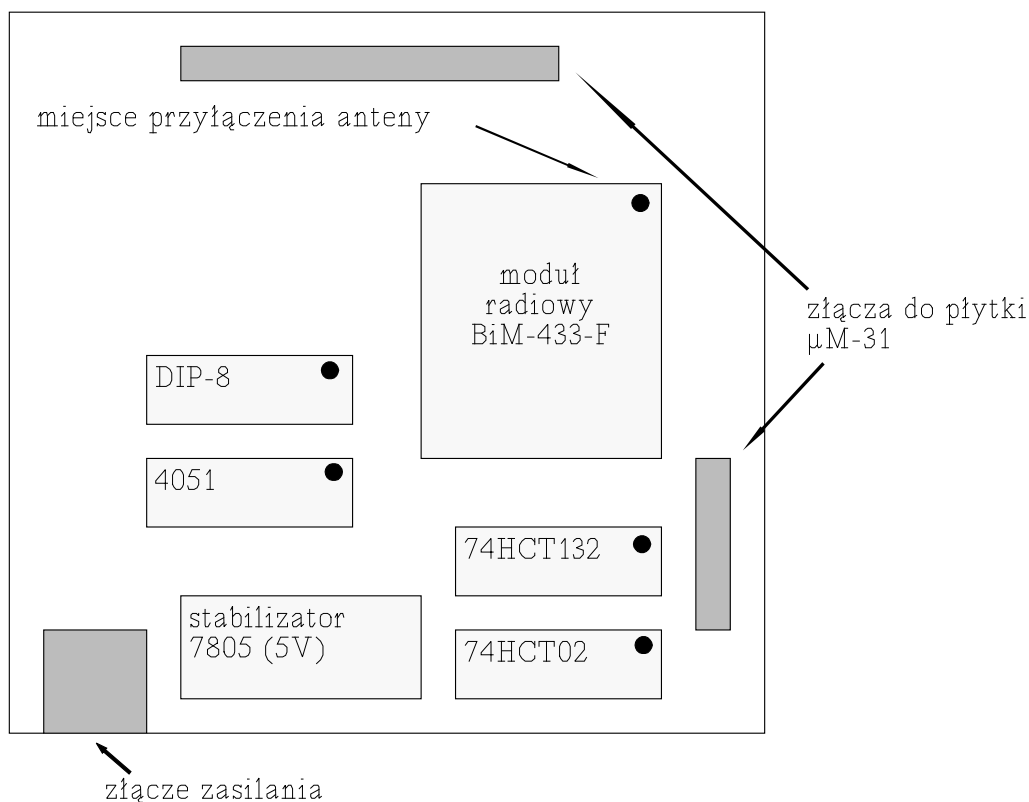


Rys. 42. Schemat układu konfiguracyjnego konwertera protokołów numer przełącznika, natomiast linia PD_5 (CnfEn) umożliwia włączenie i wyłączenie układu. Wartość bitu konfiguracyjnego, odpowiadająca aktualnie wybranemu mikroprzełącznikowi, wysyłana jest do mikrosterownika poprzez linię PA_0 (CnfOut).

5.2.5. Montaż układu

Układ radiowy i konfiguracyjny konwertera protokołów zmontowano na płycie uniwersalnej μ M-uni. Moduł radiowy BiM-433-F, układy scalone oraz mikroprzełączniki umieszczono na podstawkach. Elementy pasywne (rezystory, kondensatory), wchodzące w skład układu filtrującego, umieszczono pod modulem radiowym. Połączenia elektryczne zrealizowano za pomocą przewodów. W pobliżu wyprowadzenia antenowego modułu radiowego przylutowano antenę prętową o długości 14.5 cm (jest to długość zalecana przez producenta

modułu radiowego dla częstotliwości 433.92 MHz [70]), wykonaną z drutu miedzianego o średnicy 1 mm. Rozmieszczenie elementów na płytce μ M-uni ilustruje rys. 43.



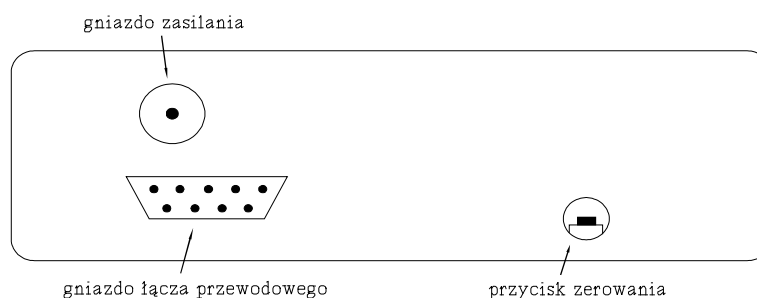
Rys. 43. Rozmieszczenie elementów na płytce uniwersalnej μ M-uni

Montaż jednostki centralnej na płytce μ M-31 ograniczył się do umieszczenia mikrosterownika DS80C320 oraz układów pamięci SRAM (62256) i EPROM (27512) w odpowiednich podstawkach.

Układ umieszczono w obudowie uniwersalnej o wymiarach 15×13×5 cm, wykonanej z tworzywa sztucznego. W części tylnej wycięto w odpowiednich miejscach otwory na gniazdo przewodowego łącza szeregowego i zasilania oraz na przycisk zerowania (rys. 44). Do części dolnej obudowy przykręcono płytkę jednostki centralnej, nad którą, w odległości około 2 cm, umieszczono płytkę układu radiowego i konfiguracyjnego. Płytki te połączono elektrycznie za pomocą dwóch tasiemek, zawierających 34 i 16 przewodów. W części górnej obudowy wycięto otwór, umożliwiający zmianę położenia przełączników konfiguracyjnych bez konieczności zdejmowania obudowy.

5.2.6. Oprogramowanie konwertera

Zadaniem oprogramowania konwertera jest zapewnienie poprawnej, zgodnej z założeniami, pracy części sprzętowej. Ze względu na realizowane funkcje, w oprogramowaniu można wyróżnić cztery fragmenty:



Rys. 44. Widok tylnej części obudowy konwertera

- inicjalizację konwertera,
- obsługę łącza przewodowego,
- obsługę łącza bezprzewodowego,
- procedurę konwersji protokołów.

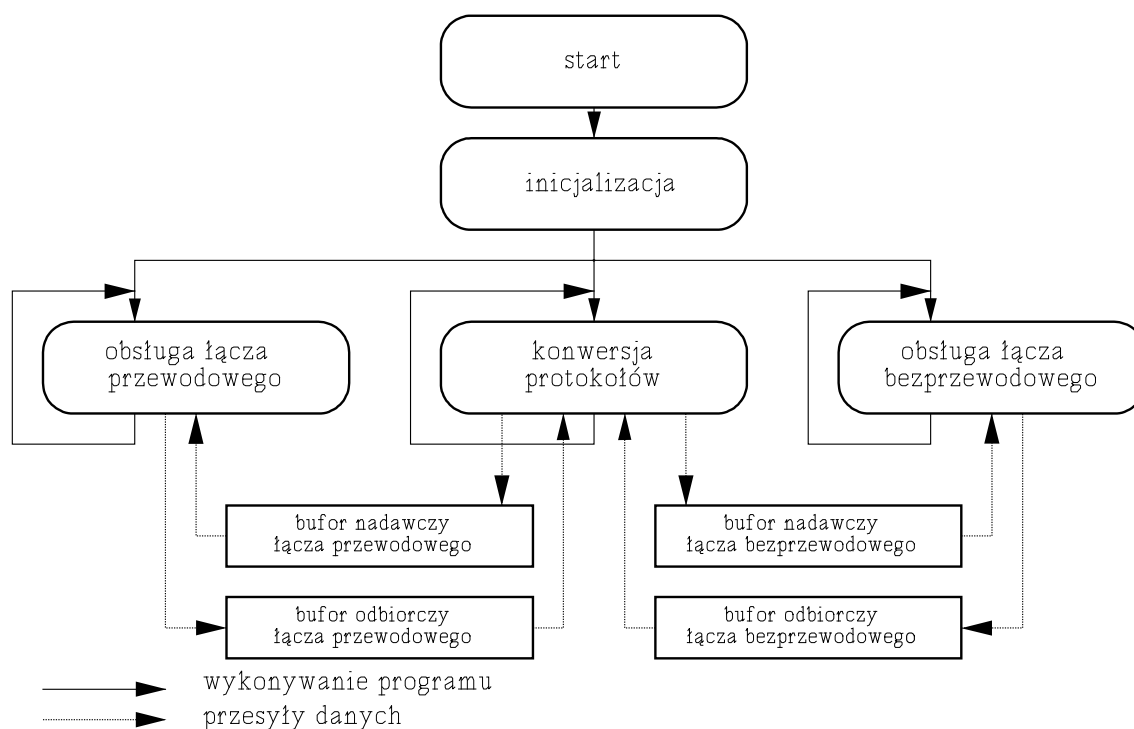
Funkcjonowanie poszczególnych fragmentów oprogramowania zostało znacznie zmienione w stosunku do konwertera prototypowego:

- uproszczono procedury komunikacyjne łącza przewodowego, rezygnując z obsługi linii sterujących interfejsu RS-232C,
- obsługę oraz format ramki łącza bezprzewodowego dostosowano do współpracy z modułem nadajnika-odbiornika radiowego BiM-433-F,
- uproszczono zasady konwersji protokołów:
 - * zrezygnowano z przesyłania ramek sterujących, zbędnych wobec braku obsługi linii sterujących interfejsu przewodowego,
 - * zrezygnowano z retransmisji informacji, przekłamaną wskutek błędów.

Oprogramowanie konwertera (z pominięciem procedury inicjalizacji) można rozpatrywać jako trzy współbieżnie wykonywane procesy, komunikujące się między sobą za pośrednictwem czterech buforów:

- bufora nadawczego łącza przewodowego,
- bufora odbiorczego łącza przewodowego,
- bufora nadawczego łącza bezprzewodowego,
- bufora odbiorczego łącza bezprzewodowego.

Podejście takie zilustrowane jest na rys. 45. Procesy obsługi łączy komunikacyjnych (przewodowego i bezprzewodowego) mają wyższy priorytet, uzyskany dzięki mechanizmowi przerwań. Proces konwersji protokołów, jakkolwiek kluczowy z punktu widzenia całości oprogramowania, ma priorytet niższy.



Rys. 45. Ilustracja działania programu konwertera

5.2.6.1. Inicjalizacja konwertera

Zadaniem procedury inicjalizującej konwertera jest ustawienie odpowiednich trybów pracy poszczególnych układów peryferyjnych (liczników, portów szeregowych itp.). Wszystkie programowalne układy konwertera znajdują się wewnątrz mikrosterownika DS80C320.

Pewne parametry są uzależnione od ustawień przełączników konfiguracyjnych, dlatego też odczyt ich stanu poprzedza dalsze operacje. Od ustawień zależą parametry łącza przewodowego, takie jak prędkość transmisji, liczba bitów informacyjnych, liczba bitów stopu i sposób sprawdzania parzystości.

Inicjalizacja pierwszego portu szeregowego, odpowiedzialnego za transmisję przewodową, składa się z następujących czynności:

- ustawienie trybu pracy portu szeregowego (w zależności od formatu znaku tryb 1 lub 3),
- wybór taktowania licznikiem nr 2,
- zaprogramowanie prędkości transmisji łącza szeregowego,
- ustawienie zmiennych, określających czasy oczekiwania i warunków rozpoczęcia nadawania znaków łączem przewodowym (w zależności od prędkości transmisji).

Inicjalizacja drugiego portu szeregowego, odpowiedzialnego za transmisję radiową, składa się z następujących czynności:

- ustawienie trybu 1 portu szeregowego,

- wybór taktowania licznikiem nr 1,
- zaprogramowanie prędkości transmisji równej 37500 kb/s,
- przełączenie modułu radiowego na odbiór.

Inicjalizacja licznika nr 0 sprowadza się do zaprogramowania go do odmierzania czasu i generowania przerwania co 1.1 ms.

5.2.6.2. Obsługa łącza przewodowego

Obsługa łącza przewodowego odbywa się na zasadzie przerwań. Procedura obsługi przerwania podejmuje odpowiednie działania w zależności od tego, czy przerwanie pochodzi od układu nadawczego, czy odbiorczego.

Jeżeli przerwanie pochodzi od układu nadawczego, następuje sprawdzenie, czy w buforze nadawczym łącza przewodowego są znaki do wysłania. Jeżeli tak, następuje wysłanie kolejnego znaku.

Jeżeli przerwanie pochodzi od układu odbiorczego, następuje wczytanie odebranego znaku i umieszczenie go w buforze odbiorczym łącza przewodowego.

Schemat działania procedury ilustruje rys. 46.

5.2.6.3. Obsługa łącza bezprzewodowego

Obsługa łącza bezprzewodowego odbywa się na zasadzie przerwań. Procedura obsługi przerwania podejmuje odpowiednie działania w zależności od tego, czy przerwanie pochodzi od układu nadawczego, czy odbiorczego.

Jeżeli przerwanie pochodzi od układu nadawczego, następuje wysłanie, w zależności od potrzeb, kolejnego znaku preambuły lub kolejnego znaku ramki łącza radiowego, znajdującego się w buforze nadawczym łącza radiowego. W przypadku, jeżeli wysłane zostały już wszystkie znaki ramki, moduł radiowy przełączany jest w tryb odbioru.

Jeżeli przerwanie pochodzi od układu odbiorczego, następuje wczytanie odebranego znaku i umieszczenie go w buforze odbiorczym łącza radiowego.

Schemat działania procedury ilustruje rys. 47.

5.2.6.4. Procedura konwersji protokołów

Zadaniem procedury konwersji protokołów jest takie przetworzenie danych, aby zapewnić poprawną, zgodną z założeniami, pracę łącza przewodowego i radiowego. W tym celu wykonywane jest cykliczne sprawdzanie i analiza stanu buforów odbiorczych obu łączy oraz bufora nadawczego łącza przewodowego. Na podstawie uzyskanych w ten sposób informacji podejmowane są decyzje, dotyczące przetwarzania i wysyłania danych.

Jeżeli bufor odbiorczy łącza przewodowego zawiera liczbę znaków, wystarczającą do skompletowania ramki, lub też od chwili odebrania ostatniego znaku upłynął czas, wystarczający na przesłanie kolejnego znaku, następuje skompletowanie ramki łącza radiowego. Jeżeli łącze radiowe jest w stanie nasłuchu łącza, następuje przełączenie na nadawanie

```

procedure przerwanie_łącza_przewodowego
  if nadajnik then
    if w_buforze_nadawczym_łącza_przewodowego_są_znaki_do_wysłania then
      wyślij_kolejny_znak
    else
      koniec_nadawania
    end if
  end if
  if odbiornik then
    umieść_odebrany_znak_w_buforze_odbiorczym_łącza_przewodowego
  end if
end

```

Rys. 46. Procedura obsługi łącza przewodowego

```

procedure przerwanie_łącza_bezprzewodowego
  if nadajnik then
    if nadawanie_preambuły then
      wyślij_kolejny_znak_preambuły
    else if w_buforze_nadawczym_łącza_radiowego_są_znaki_do_wysłania
      wyślij_kolejny_znak_ramki
    else
      przetłącz_radio_na_odbiór
    end if
  end if
  if odbiornik then
    umieść_odebrany_znak_w_buforze_odbiorczym_łącza_bezprzewodowego
  end if
end

```

Rys. 47. Procedura obsługi łącza bezprzewodowego

i wysłanie ramki.

Jeżeli bufor odbiorczy łącza radiowego zawiera ramkę o właściwej strukturze i występuje zgodność przesłanej i wyliczonej sumy kontrolnej, pole danych ramki jest kopiowane do bufora nadawczego łącza przewodowego. Jeżeli w buforze tym znajduje się odpowiednia liczba znaków (zależna od szybkości transmisji), lub jeśli od nadejścia ostatniej ramki łączem radiowym upłynął zadany czas, następuje rozpoczęcie wysyłania zawartości bufora łączem przewodowym.

Po przeanalizowaniu zawartości buforów układ przechodzi do trybu uśpienia (ang. *idle*), w celu zmniejszenia poboru mocy. W trybie tym następuje zablokowanie jednostki centralnej, ale utrzymywana jest praca wewnętrznych układów peryferyjnych [82]. Wyjście z trybu uśpienia następuje wskutek zgłoszenia przerwania.

Schemat działania procedury konwersji protokołów ilustruje rys. 48.

```
procedure konwersja_protokołów
repeat
  if bufor_odbiornicy_łączy_przewodowego_zawiera_zadaną_liczbę_znaków
    or od_chwili_odebrania_ostatniego_znaku_ułynął_zadany_czas then
    przygotuj_ramkę_łączy_radiowego
  end if
  if nadajnik_radiowy_wolny and jest_ramka_do_wysłania then
    rozpocznij_wysyłanie_ramki
  end if
  if bufor_odbiornicy_łączy_radiowego_zawiera_ramkę then
    if nie_wykryto_błędu_transmisji then
      skopiuj_pole_danych_ramki_do_bufora_nadawczego_łączy_przewodowego
    end if
  end if
  if nadajnik_przewodowy_wolny then
    if bufor_nadawczy_łączy_przewodowego_zawiera_zadaną_liczbę_znaków
      or od_chwili_odebrania_ostatniej_ramki_ułynął_zadany_czas then
      rozpocznij_wysyłanie_danych_łączem_przewodowym
    end if
  end if
  przejdź_do_trybu_uśpienia
until false
end
```

Rys. 48. Schemat procedury konwersji protokołów

5.2.7. Środki wspomagające implementację konwertera

Podczas realizacji konwertera wykorzystywano następujące narzędzia:

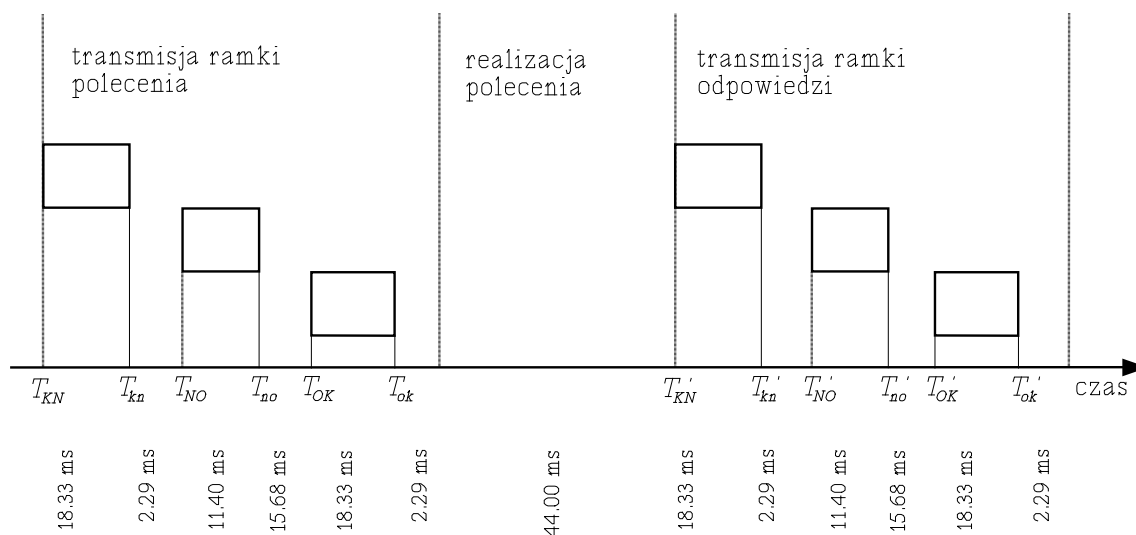
- pakiet programów OrCAD wersja 3.21:
 - * program draft do rysowania schematów,
 - * program libedit do utworzenia opisu nowych elementów,
 - * program erchk do sprawdzenia poprawności połączeń;
- kompilator języka C dla mikrosterowników rodziny MCS-51 firmy Archimedes Software,
- programator pamięci EPROM w celu umieszczenia kodu wynikowego programu konwertera,
- oscyloskop dla obserwacji przebiegów sygnałów, występujących na wyprowadzeniach modułu radiowego,
- emulator układowy mikrosterowników rodziny MCS-51 firmy Signum Systems.

5.2.8. Analiza czasowa zmodyfikowanego konwertera

Przykładowe oszacowanie wpływu konwertera na parametry czasowe sieci dotyczy sieci Modbus, pracującej w trybie RTU. Przyjęto następujące dane: długość znaku $L_b = 11$ bitów,

prędkość transmisji $V=4800$ b/s. Realizowane jest polecenie zapisu jednego słowa w sterowniku, tak więc długości ramek wynoszą $F_M=F_S=8$ znaków [1].

Stacja nadrzędna (*master*) wysyła ramkę polecenia (rys. 49). Czas transmisji tej ramki ($T_{kn}-T_{KN}$) wynosi 18.33 ms. Ponieważ liczba zebranych w konwerterze znaków jest niewys-



Rys. 49. Realizacja transakcji w sieci Modbus z użyciem konwerterów

tarczająca do rozpoczęcia transmisji, konwerter czeka przez czas równy czasowi transmisji 4 znaków, tj. 2.29 ms. Czas transmisji łączem radiowym ramki, zawierającej 8 bajtów łącza przewodowego, wynosi 11.40 ms. Również po stronie odbierającej liczba znaków nie wystarcza do rozpoczęcia transmisji, tak więc konwerter czeka na nadejście kolejnej ramki, czyli 15.68 ms. Po upływie tego czasu rozpoczyna transmisję łączem przewodowym, co zajmuje 18.33 ms. Stacja podrzędna odczeka jeszcze czas równy czasowi transmisji 4 znaków (2.29 ms) w celu stwierdzenia końca ramki. Sumaryczny czas transmisji ramki wynosi więc 68.32 ms, a opóźnienie $T_{kM}=T_{ok}-T_{kn}$ jest równe 47.70 ms.

Po otrzymaniu ramki, stacja podrzędna (*slave*) realizuje polecenie. Czas jego realizacji nie ulega wpływowi konwertera. Zmierzony doświadczalnie czas wykonania zapisu pojedynczego słowa wynosi około 44 ms.

Po zrealizowaniu polecenia, stacja podrzędna odsyła do stacji nadrzędnej ramkę odpowiedzi. Ponieważ długość tej ramki jest równa w tym przypadku długości ramki polecenia, czasy trwania poszczególnych etapów transmisji są identyczne, jak dla ramki polecenia. Identyczne jest także opóźnienie, wnoszone przez konwerter, zatem $T_{kS}=T_{kM}$. Czas transmisji ramki odpowiedzi wynosi więc 68.32 ms, a sumaryczny czas trwania transakcji jest równy 180.64 ms. Bez użycia konwerterów czas ten wynosi około 85.24 ms.

Podobną analizę można przeprowadzić również dla innych prędkości transmisji, pracy sieci w trybie ASCII lub dla przypadku, kiedy przesyłana ramka łącza przewodowego ma długość większą niż 16 znaków, zatem przesyłana jest łączem bezprzewodowym w kilku ramkach (jeżeli długość ramki łącza przewodowego nie jest całkowitą wielokrotnością liczby 16, ostatnia ramka łącza bezprzewodowego będzie krótsza).

6. Badanie właściwości konwerterów

Ponieważ konwerter jest urządzeniem, które zapamiętuje i buforuje dane przed dalszym ich wysłaniem, a zatem powoduje pewne opóźnienia w procesie transmisji, celowe jest przebadanie wpływu konwertera na pracę sieci, w szczególności zaś na jej parametry czasowe, takie jak przepustowość (sieci lokalne) lub czas realizacji określonych zadań (sieci przemysłowe). Ze względu na to, że wykonane zostały dwa różne konwertery dla dwóch odmiennych zastosowań, badania podzielono na dwie grupy.

Pierwsza grupa badań dotyczyła konwertera dla sieci typu biurowego, a więc sytuacji, kiedy głównym zadaniem sieci jest transmisja informacji o relatywnie dużej objętości, np. plików. Zbadano wpływ wybranych parametrów konfiguracyjnych konwertera na efektywność transmisji. Ponieważ wykonany konwerter ma strukturę i parametry zbliżone do kontrolera TNC (ang. *Terminal Node Controller*) [45, 101, 102, 103], wykorzystywanego w amatorskiej łączności w systemie Packet Radio, przebadano także pracę tej klasy układów w roli konwertera. Okazało się, że przy użyciu TNC można dodatkowo zbadać wpływ czynników niemożliwych do przetestowania przy użyciu konwertera (np. liczby wysyłanych potwierżeń), głównie ze względu na ograniczenia protokołu transmisyjnego, ale także z powodu parametrów technicznych zastosowanego modemu radiowego.

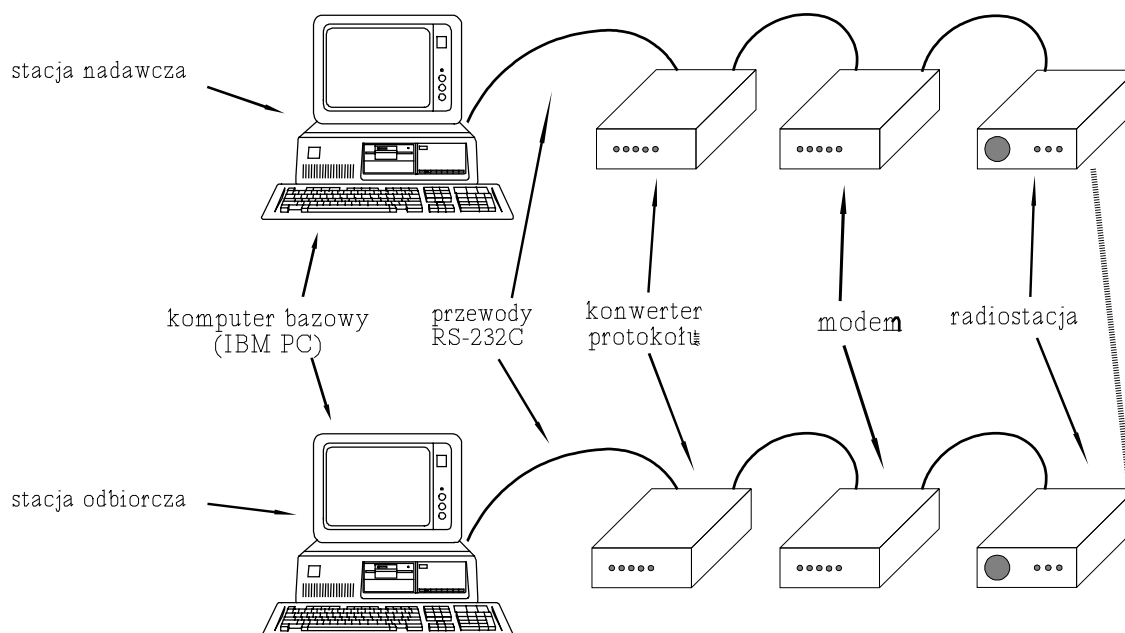
Druga grupa badań dotyczyła konwerterów, przeznaczonych do pracy w sieciach przemysłowych. Celem badań było porównanie parametrów czasowych sieci dla transmisji na łączu przewodowym i z wykorzystaniem konwerterów. Wykonano także pomiary stopy błędów łącza bezprzewodowego, zbudowanego w oparciu o konwertery.

6.1. Badanie wpływu parametrów konwertera na przebieg transmisji

W celu oceny wpływu parametrów konfiguracyjnych konwerterów utworzono specjalne stanowisko laboratoryjne [67, 78, 104]. Konwertery (nadajnik i odbiornik) zostały podłączone do dwóch komputerów typu IBM PC, pracujących pod kontrolą systemu operacyjnego MS-DOS 6.22, poprzez łącze szeregowe zgodne ze standardem RS-232C. Do testów wykorzystywano programy emulujące terminal, znajdujące się w pakiecie Norton Commander 5.0 oraz Windows for Workgroups 3.11. Do realizacji łącza bezprzewodowego wykorzystano:

- modemy radiowe zbudowane w oparciu o układ Am7911 o maksymalnej prędkości transmisji 1200 b/s (układ taki zawarty jest w strukturze TNC),
- radiostacje pracujące w zakresie 150 MHz o szerokości pasma 25 kHz i mocy nadajnika 2 W, wyposażone w rezystor obciążający zamiast anteny.

Identycznej konfiguracji użyto do testowania kontrolerów TNC. Ponadto wykonano testy kontrolera TNC podczas pracy z dodatkowym układem modemu dla szybkości 9600 b/s. Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawiony jest na rys. 50.



Rys. 50. Konfiguracja stanowiska badawczego

Za miarę efektywności systemu przyjęto użyteczną szybkość transmisji. Szybkość tę wyliczano jako stosunek długości przesyłanej informacji do sumarycznego czasu transmisji pomiędzy komputerami według poniższego wzoru:

$$\text{prędkość [b/s]} = 8 \cdot \frac{\text{długość danych [B]}}{T_{ok} - T_{KN} [s]} \quad (29)$$

W ramach testów przebadano wpływ długości ramki, liczby wspólnie potwierdzanych ramek, szybkości komunikacji z komputerem oraz długości przesyłanej informacji na użyteczną prędkość transmisji. Podjęto także próbę określenia wpływu zakłóceń na pracę systemu.

6.1.1. Wpływ długości ramki oraz liczby potwierdzeń

Ponieważ dane przesyłane łączem bezprzewodowym dzielone są na ramki zaopatrzone w informacje sterujące, celowe jest określenie wpływu długości ramki danych oraz liczby potwierdzeń na użyteczną prędkość transmisji. Ze względu na to, że zmniejszenie liczby ramek, poprzez zwiększenie ich długości, zmniejsza ilość przesyłanej informacji sterującej, oczekiwano wzrostu użytecznej szybkości transmisji wraz ze wzrostem długości ramki. Podobnie wzrost liczby ramek potwierdzanych wspólnie powoduje nie tylko zmniejszenie ilości przesyłanej informacji sterującej, lecz również zmniejszenie liczby przełączeń odbior-

nadawanie; czas takiego przełączenia wynosi około kilkudziesięciu milisekund i jest porównywalny z czasem transmisji ramki.

W celu przebadania wpływu długości ramki i liczby potwierdzeń przesyłano informacje o stałej długości 8192 B. Długość tę wybrano, aby zmniejszyć wpływ "rozpędzania" transmisji ($T_{NO} - T_{KN}$) (rys. 29) oraz błędów pomiarowych. Testy przeprowadzono dla długości pola danych w ramce 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 i 256 B przy szybkości transmisji na łączu radiowym 300, 1200 i 9600 b/s oraz szybkości komunikacji z komputerem 19200 b/s. Testy przeprowadzono dla liczby ramek wysłanych przed nadejściem potwierdzenia, z zakresu $1 \div 7$, a także bez potwierdzeń. Wyniki pomiarów zawarte są odpowiednio w tabelach 10, 11 i 12. Wpływ długości ramki zilustrowany jest na rys. 51, 52 i 53, natomiast wpływ liczby potwierdzeń ilustrują rys. 54, 55 i 56.

Tab. 10. Użyteczna szybkość transmisji przy szybkości łącza radiowego 300 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek

Długość ramki [B]	Użyteczna szybkość transmisji [b/s]							
	Maksymalna liczba wspólnie potwierdzanych ramek							
	1	2	3	4	5	6	7	bez potw.
1	3.56	5.54	6.77	7.62	8.31	8.77	9.30	31.71
2	6.98	10.94	13.47	14.88	17.07	17.29	18.03	54.11
4	13.77	20.99	25.60	28.45	31.22	32.00	33.69	78.88
8	26.67	39.39	48.33	51.16	56.87	58.18	58.24	108.48
16	46.85	67.52	79.17	86.24	90.53	93.76	94.03	141.75
32	80.63	108.48	123.60	132.32	135.60	136.45	138.17	174.55
64	124.07	156.64	172.26	180.31	181.81	181.81	182.31	213.09
128	172.26	201.94	214.48	220.98	223.24	221.73	222.48	252.43
256	208.36	233.57	243.08	247.67	248.61	245.81	248.61	273.47

Zgodnie z oczekiwaniami otrzymano wzrost użytecznej szybkości transmisji wraz ze wzrostem długości ramki oraz wzrostem maksymalnej liczby ramek, które można wysłać przed otrzymaniem potwierdzenia. Dla szybkości łącza radiowego 1200 b/s uzyskano efektywną szybkość transmisji około 750 b/s przy transmisji z potwierdzeniem poprawnego otrzymania danych i 875 b/s przy transmisji bez potwierdzenia. Dla szybkości łącza radiowego 300 b/s uzyskano szybkości odpowiednio 248 b/s i 273 b/s. Dla szybkości 9600 b/s maksymalna uzyskana prędkość efektywna wynosi około 1500 b/s. Niższa wartość szybkości efektywnej w porównaniu z szybkością bitową wynika z konieczności organizacji odpowied-

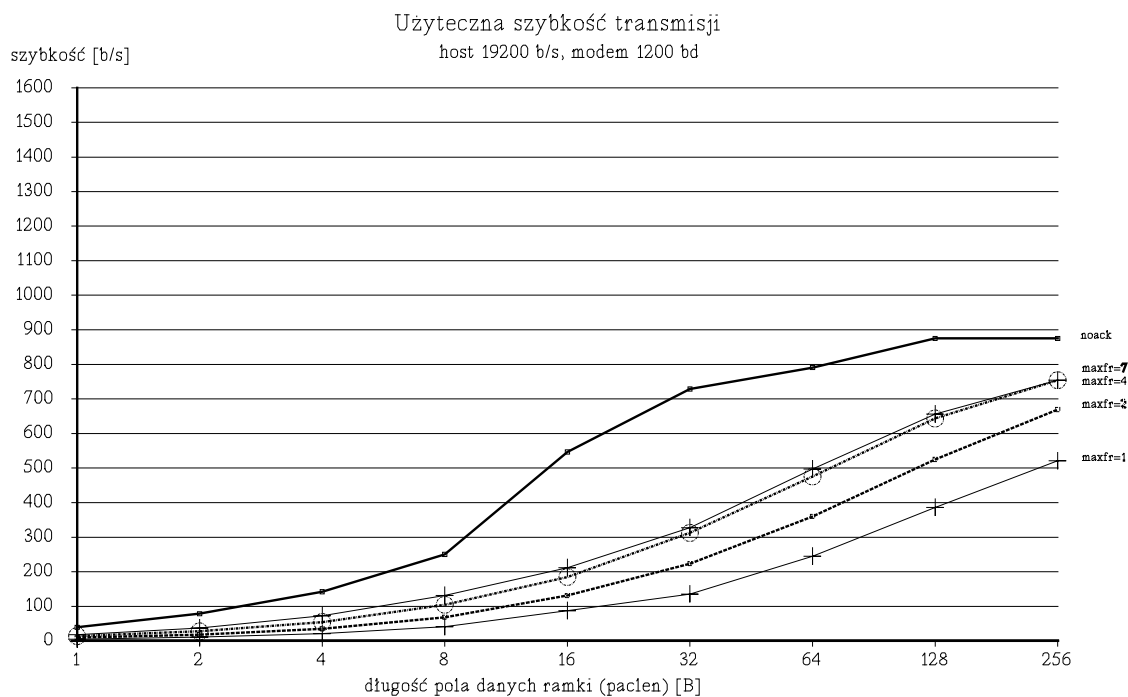
Tab. 11. Użyteczna szybkość transmisji dla szybkości łącza radiowego 1200 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek

Długość ramki [B]	Użyteczna szybkość transmisji [b/s]							
	Maksymalna liczba wspólnie potwierdzanych ramek							
	1	2	3	4	5	6	7	bez potw.
1	5.36	9.27	11.89	14.21	16.83	17.64	18.23	39.18
2	10.85	18.18	24.02	27.86	31.28	34.87	37.65	78.60
4	20.64	35.29	45.58	54.69	60.77	64.35	72.92	142.06
8	40.97	68.30	88.33	104.51	113.75	121.99	131.26	250.50
16	87.74	131.26	163.26	184.88	200.10	211.72	211.72	546.93
32	135.60	224.00	276.93	312.53	326.53	328.16	328.16	729.24
64	244.90	360.62	434.65	475.59	489.79	493.47	497.21	790.75
128	386.07	525.06	596.65	643.45	649.82	656.32	656.32	875.09
256	520.89	669.71	729.24	754.39	754.39	754.39	754.39	875.09

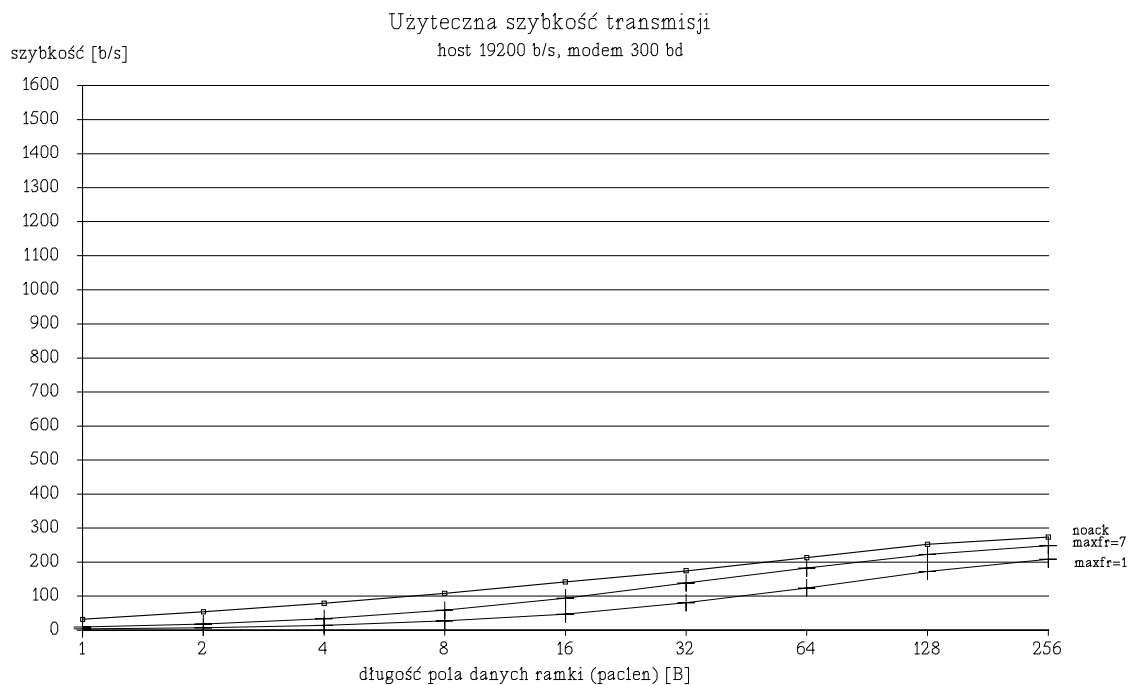
Tab. 12. Użyteczna szybkość transmisji przy szybkości łącza radiowego 9600 b/s w zależności od długości ramki oraz liczby wspólnie potwierdzanych ramek

Długość ramki [B]	Użyteczna szybkość transmisji [b/s]							
	Maksymalna liczba wspólnie potwierdzanych ramek							
	1	2	3	4	5	6	7	bez potw.
1	8.55	15.54	22.29	30.16	34.18	36.63	42.73	88.69
2	17.09	31.08	44.59	60.32	68.37	73.25	105.86	170.92
4	34.18	62.15	89.17	120.65	136.73	146.50	198.88	317.06
8	68.37	124.30	178.35	241.29	273.47	293.00	320.16	565.79
16	155.90	289.13	400.20	497.21	525.06	525.06	537.97	951.19
32	299.69	537.97	763.16	841.44	852.36	863.58	863.58	1396.43
64	560.96	951.19	1193.31	1262.15	1286.90	1286.90	1286.90	1458.49
128	979.58	1367.33	1396.43	1426.78	1442.46	1458.49	1458.49	1491.64
256	1367.33	1396.43	1426.78	1458.49	1474.88	1491.64	1491.64	1491.64

niego protokołu komunikacyjnego. Szybkość efektywna dla asynchronicznej transmisji zna-

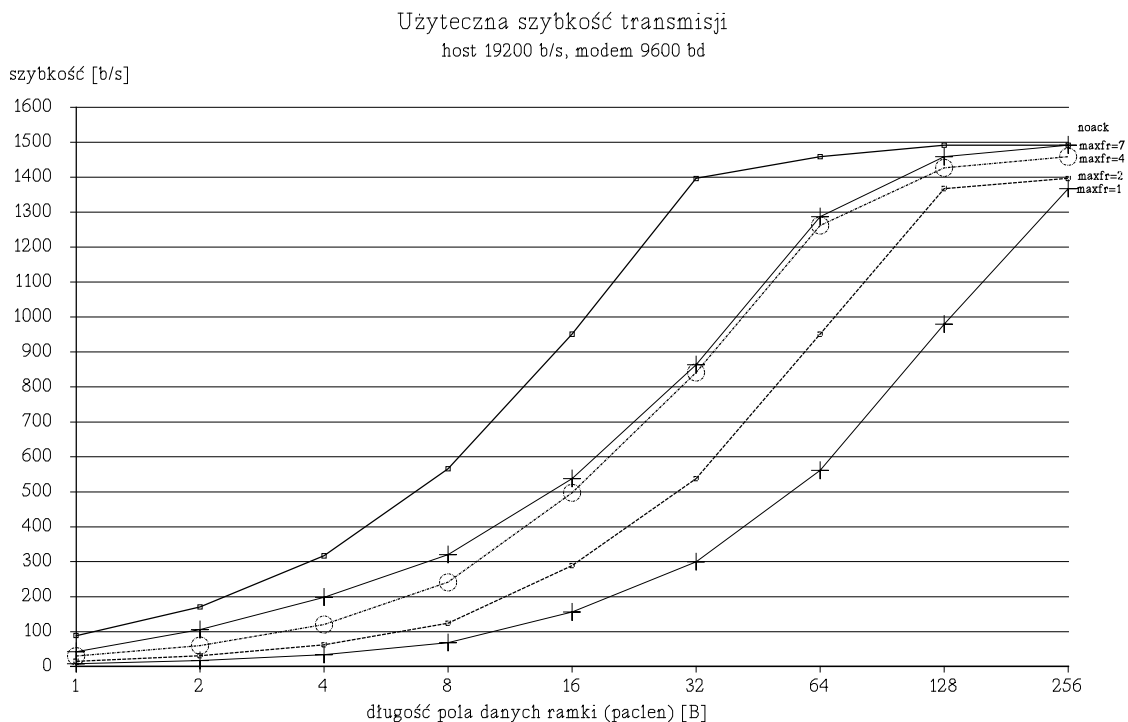


Rys. 51. Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (1200 bd)

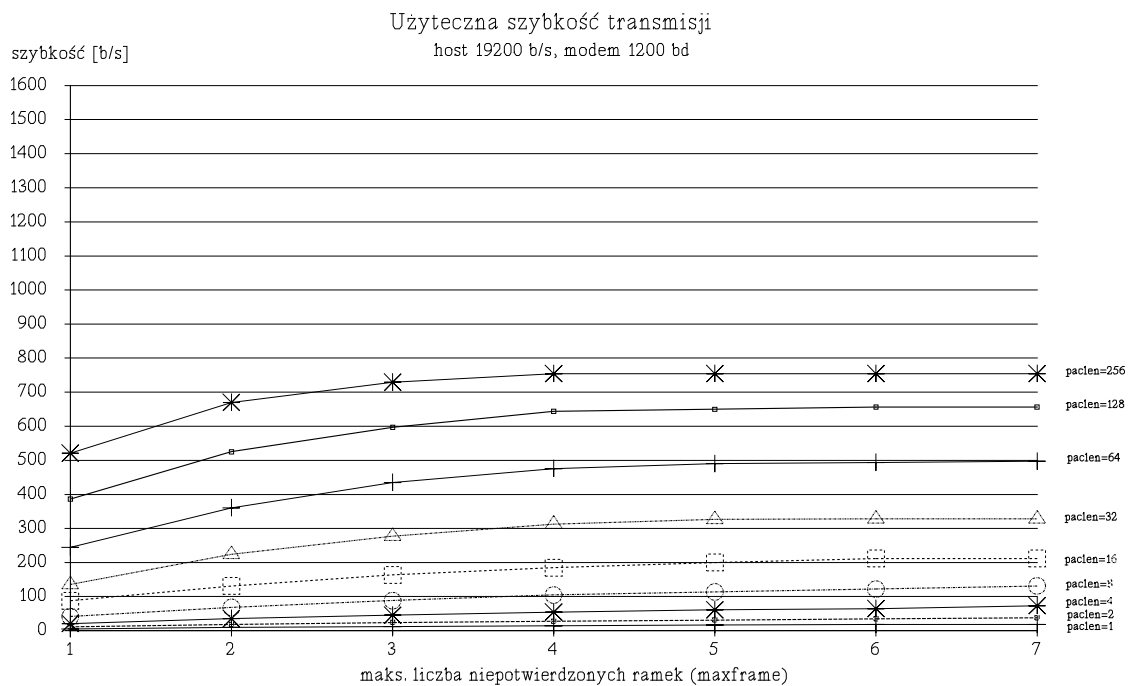


Rys. 52. Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (300 bd)

kowej przez łącze RS-232C jest również niższa od szybkości bitowej, ponieważ każdy przesyłany znak zaopatrywany jest w bit startu, stopu i ewentualnie parzystości. Zmierzone szybkości efektywne dla transmisji przewodowej z szybkością 300, 1200 oraz 9600 b/s

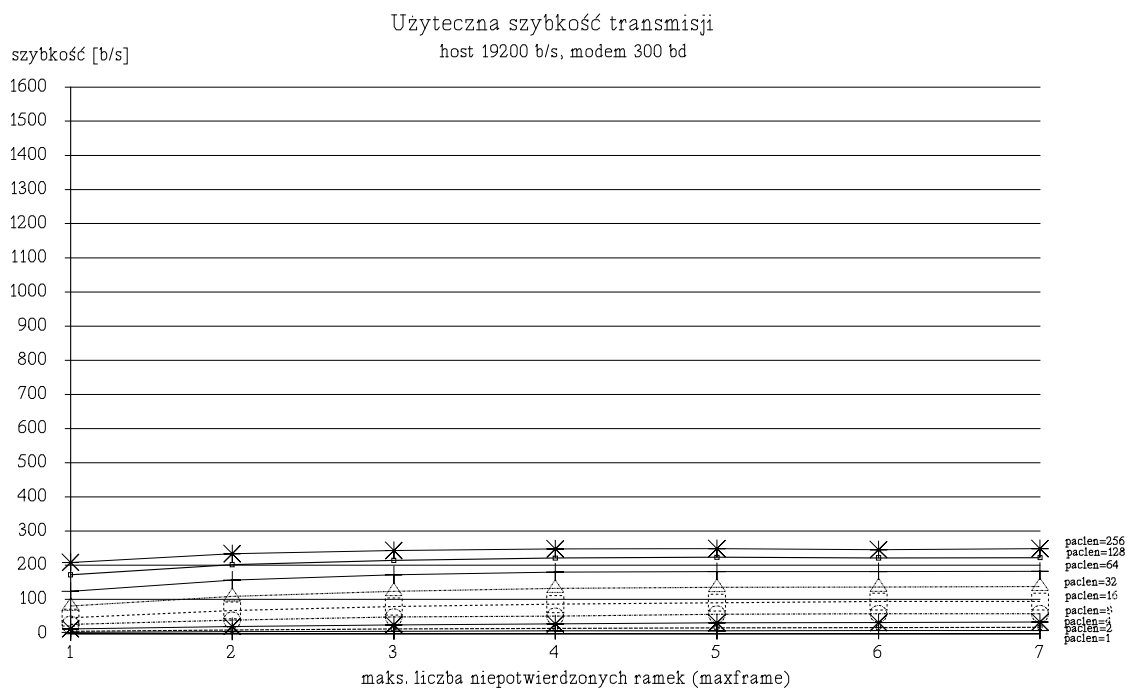


Rys. 53. Wpływ długości ramki na użyteczną szybkość transmisji (9600 bd)

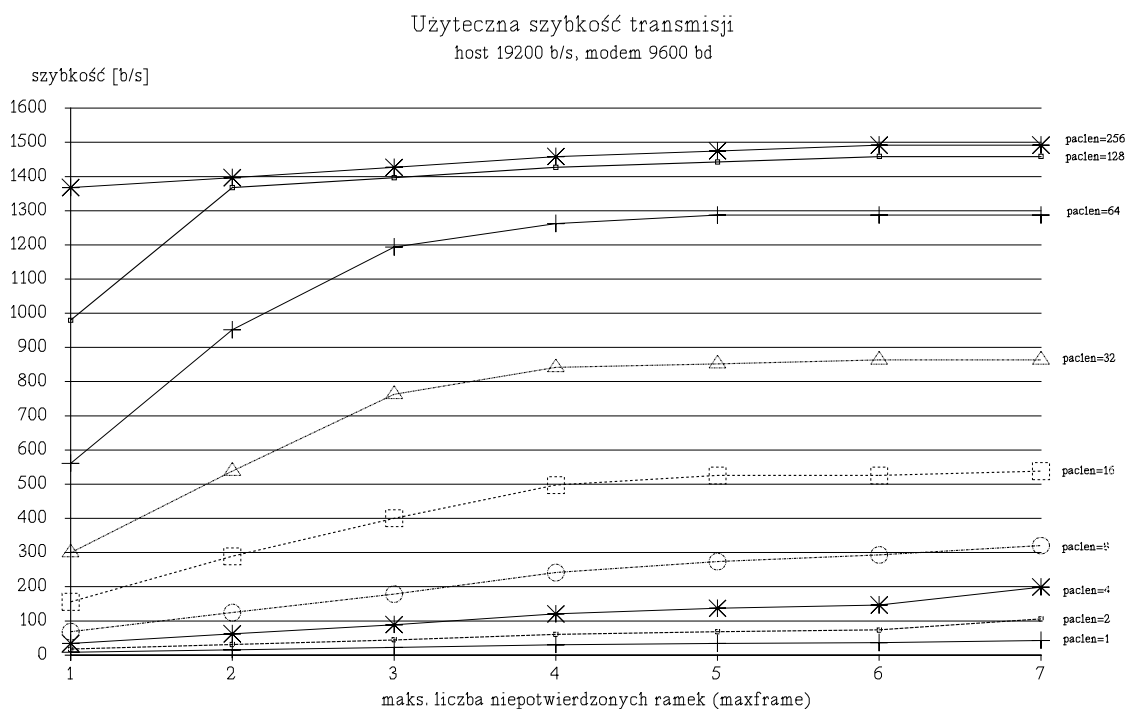


Rys. 54. Wpływ liczby potwierżeń na użyteczną szybkość transmisji (1200 bd)

wynoszą odpowiednio 218, 873 i 6980 b/s.



Rys. 55. Wpływ liczby potwierżeń na użyteczną szybkość transmisji (300 bd)



Rys. 56. Wpływ liczby potwierżeń na użyteczną szybkość transmisji (9600 bd)

Dla małych długości ramki (do 32 ÷ 64 B) dwukrotny wzrost jego długości powoduje około dwukrotny wzrost szybkości efektywnej. Dalsze zwiększanie długości ramki nie powoduje już tak dużego przyrostu szybkości, prawdopodobnie ze względu na dłuższy czas

składania ramek. Dla długości ramki powyżej 16 B zwiększanie liczby wspólnie potwierdzanych ramek powyżej 4 daje bardzo niewielki wzrost szybkości efektywnej. Jest to zapewne spowodowane koniecznością przygotowania większej liczby stosunkowo długich ramek, co wiąże się zarówno z wydłużeniem czasu ich przygotowywania, jak i z większym zapotrzebowaniem konwertera na pamięć danych. Obserwacja kontrolera TNC podczas pracy z długością ramki 256 B i maksymalną liczbą wspólnie potwierdzanych ramek równą 7 wykazała, że na ogół wysyłanych jest razem $2 \div 5$ ramek, nie zauważono natomiast, aby kiedykolwiek wysłanych zostało razem 7 ramek.

Przy szybkości łącza radiowego 9600 b/s zaobserwowano zatrzymanie wzrostu szybkości efektywnej prędkiej, niż dla mniejszych szybkości. Jest to spowodowane zbyt małą mocą obliczeniową procesora, zastosowanego w konwerterze i kontrolerze TNC, co wiąże się z niemożnością przetworzenia dużej ilości danych w odpowiednio krótkim czasie.

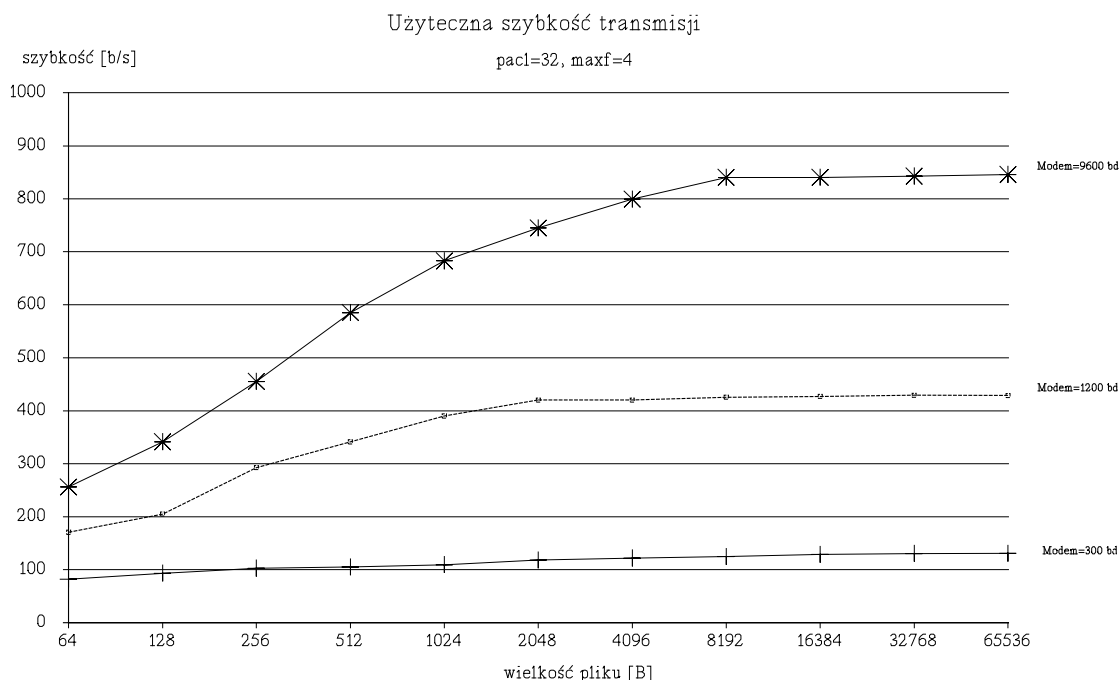
Uzyskane wyniki dla liczby wspólnie potwierdzanych ramek równej 1 oraz długości pola danych ramki równej 128 B przy szybkościach transmisji łącza przewodowego i radiowego, wynoszących odpowiednio 9600 i 1200 b/s, można porównać z wartościami wyliczonymi podczas analizy czasowej konwertera. Zmierzona efektywna prędkość transmisji jest równa 386 b/s, podczas gdy wartość wyliczona wynosi 650 b/s. Tak duża różnica spowodowana jest nieuwzględnieniem w analizie pewnych czynników, jak np. czas wykonywania konwersji protokołów.

6.1.2. Wpływ szybkości komunikacji z komputerem oraz długości przesyłanej informacji

W przypadku stosowania mikroprocesorowego układu konwertera protokołów szybkość transmisji na łączu radiowym nie musi być równa szybkości komunikacji z komputerem nadrzędnym i dlatego celowe jest określenie wpływu drugiej z nich na użyteczną prędkość transmisji. Oczekiwano, że wzrost tej szybkości powinien spowodować wzrost efektywnej szybkości transmisji. Z kolei wieloetapowość transmisji oraz różnice w czasie rozpoczęcia poszczególnych etapów powodują, że wzrost długości przesyłanej informacji powinien także spowodować wzrost użytecznej szybkości transmisji, ponieważ dla dłuższej porcji informacji maleje wpływ opóźnienia ($T_{NO} - T_{KN}$) (rys. 29).

W celu zbadania wpływu szybkości komunikacji z komputerem oraz długości informacji na użyteczną prędkość transmisji przesyłano pliki o długościach 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384, 32768 i 65536 B przy prędkościach transmisji z komputerem 300, 1200, 2400, 4800 i 9600 b/s. Prędkości transmisji na łączu radiowym wynosiły 300, 1200 lub 9600 b/s. Długość pola danych ramki wynosiła 16 B, a maksymalna liczba ramek potwierdzanych wspólnie – 4. Takie ograniczenia przyjęto, aby zapobiec wysyłaniu krót-

szych ramek przy małej długości przesyłanej informacji. Zależność użytecznej szybkości transmisji od rozmiaru danych dla obu szybkości ilustruje rys. 57.



Rys. 57. Wpływ wielkości przesyłanej informacji na użyteczną szybkość transmisji

Badania wykazały, że szybkość transmisji między konwerterem protokołu a komputerem bazowym ma bardzo niewielki wpływ na użyteczną szybkość transmisji. Ogólnie jednak, zgodnie z przypuszczeniami, stwierdzono, że wzrost szybkości komunikacji z komputerem powoduje nieznaczny wzrost efektywnej szybkości transmisji. Wyjątkiem od tej reguły są wyniki dla szybkości łącza radiowego 300 b/s, dla których szybkość komunikacji z komputerem 1200 b/s okazała się mniej efektywna niż 300 b/s.

Zwiększenie długości przesyłanej informacji powoduje wzrost efektywnej szybkości transmisji. Przyrost ten w zakresie wielkości danych 64 ÷ 1024 B jest dwukrotny. Dalsze zwiększanie przesyłanej informacji nie powoduje już tak znacznego zwiększenia szybkości efektywnej, zaś powyżej 4096 B wzrost szybkości jest praktycznie niewidoczny. Dzieje się tak dlatego, że czas "rozpędzania" transmisji ($T_{OK} - T_{KN}$) jest wówczas znacznie mniejszy od sumarycznego czasu transmisji ($T_{ok} - T_{KN}$) (rys. 29) i jego wpływ na całkowity czas transmisji jest pomijalny.

Wyniki, uzyskane w ramach tej grupy testów, można porównać z wynikami analizy czasowej konwertera. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że obliczenia i pomiary wykonane są dla różnych wartości parametrów. Wnioski, jakie można wyciągnąć z analizy tych wykresów, są jednak identyczne.

6.1.3. Wpływ zakłóceń

Celem badania wpływu zakłóceń zewnętrznych było otrzymanie wyników, pozwalających określić zależność użytecznej szybkości transmisji od długości ramki w obecności zakłóceń. Jak wynika z badań, stosowanie dłuższych ramek w środowisku nie powodującym błędów daje w rezultacie wzrost użytecznej szybkości transmisji. Prawidłowe przesłanie ramki następuje, gdy każdy jej bit został przesłany bezbłędnie. Można zatem wyrazić prawdopodobieństwo poprawnego przesłania ramki jako iloczyn prawdopodobieństw poprawnego przesłania każdego bitu. Zależność tę można wyrazić wzorem:

$$P_p = \prod_{i=1}^n P_b = P_b^n \quad (30)$$

gdzie P_p i P_b oznaczają odpowiednio prawdopodobieństwa poprawnego przesłania ramki i bitu, zaś n – liczbę bitów w ramce.

Prawdopodobieństwo poprawnego przesłania bitu można wyznaczyć zgodnie z poniższą zależnością:

$$P_b = \frac{n_{popr}}{n_{całk}} \quad (31)$$

gdzie n_{popr} oznacza liczba bitów przesłanych poprawnie, zaś $n_{całk}$ – całkowitą liczbę przesłanych bitów.

Różnica $(1 - P_b)$ jest równa *elementowej (bitowej) stopie błędu*.

Z powyższej zależności wynika, że zwiększanie długości ramki zwiększa ryzyko błędnego przesłania ramki. Jeżeli protokół transmisyjny zapewnia jedynie kontrolę poprawności transmisji, nie zapewnia zaś korekcji błędów, konieczna jest retransmisja przekłamaney ramki. Wzrost długości ramek powoduje zatem spadek użytecznej szybkości transmisji z dwóch powodów – wzrasta prawdopodobieństwo przekłamaney ramek i wzrasta długość danych, retransmitowanych w przypadku przekłamaney [2].

Z powyższych powodów oczekiwano, że wyniki badań pozwolą na dobranie optymalnej długości ramki, tzn. takiej, przy której, w danym środowisku, użyteczna szybkość transmisji jest największa. Niestety, nie udało się znaleźć sposobu zakłócaney, który charakteryzowałby się stałym prawdopodobieństwem przekłamywania. Próby osłabieney sygnału polegały na umieszczeniu stacji w oddzielnych pomieszczeniach, wykorzystywano także metalowy pojemnik w roli ekranu. Żadna z powyższych prób nie doprowadziła jednak do pożądaney rezultatu.

W trakcie badań okazało się, że zastosowane układy radiowe są bardzo czułe na zakłóceney pochodzące od komputerowych zasilaczy impulsowych. Umieszczenie stacji w pobliżu niektórych komputerów całkowicie uniemożliwiło nawiązanie łączności, ponieważ demodulator odbierał zakłóceney jako falę podnośną pochodzącą z odbiornika radiowey.

Wskutek tego konwerter protokołu otrzymywał z modemu ciąg przypadkowych bitów. Oczywiście nie były one przesyłane do komputera dzięki sposobowi wykrywania błędów. Istotne jest natomiast, że w czasie trwania tych zakłóceń niemożliwe było odebranie jakiegokolwiek poprawnej informacji. Niemożliwe było także wysłanie informacji, ponieważ układ wstrzymuje nadawanie do momentu zwolnienia łącza.

Obserwacja zachowania się układów radiowych pozwala stwierdzić, że na ogół albo możliwa jest transmisja bezbłędna bądź praktycznie bezbłędna, albo też uzyskanie łączności między stacjami jest niemożliwe.

Jako źródła zakłócające użyte zostały także:

- modelarski silniczek elektryczny, powodujący słyszalne zakłócenia na falach UKF w radiodbiorniku,
- lutownica, której włączanie i wyłączanie powoduje zakłócenia podobne, jak silnik elektryczny.

Nie stwierdzono istotnego wpływu wymienionych źródeł zakłóceń na pracę układów radiowych – liczba przekłamanych ramek była pomijalna.

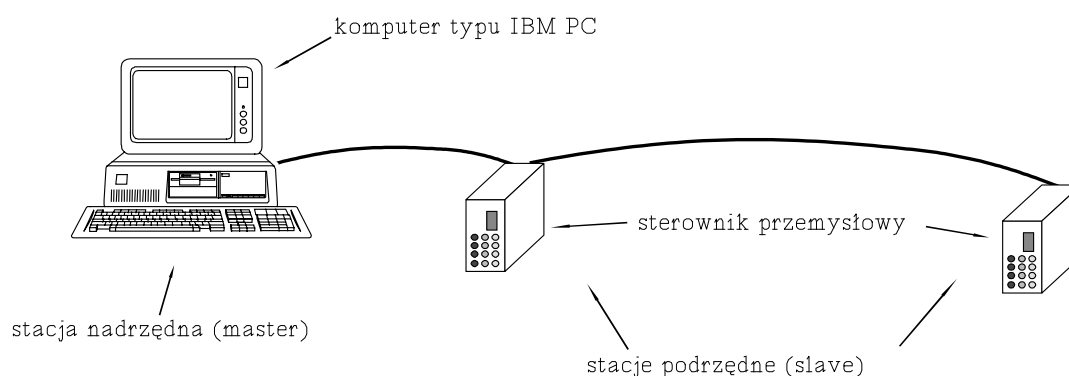
Badania odporności układu na zakłócenia elektromagnetyczne powinny być wykonywane w specjalnych laboratoriach, umożliwiających uzyskanie dokładnych charakterystyk wpływu poziomu zakłóceń określonego typu na pracę układu oraz stopę błędu [105]. Badaniom takim poddawane są jednak prototypy urządzeń, a nie rozwiązania modelowe. Ponadto, zaniechanie przeprowadzenia takich badań spowodowane było brakiem odpowiedniego laboratorium w Gliwicach i okolicy, a także wysokimi kosztami, wiążącymi się ze zleceniem testów np. Laboratorium we Wrocławiu [93].

6.2. Współpraca konwerterów z siecią Modbus

W celu porównania parametrów czasowych sieci przemysłowych, zastosowano konwertery, przeznaczone do pracy w tych sieciach. Badania przeprowadzono w oparciu o sieć Modbus [93, 94].

Skonstruowany konwerter protokołów został zastosowany do realizacji doświadczalnego segmentu sieci Modbus. Badania te wykonano w oparciu o sterowniki przemysłowe C50, C170 oraz ALSPA 8000 firmy Cegelec [106], stanowiące jednostki podrzędne (ang. *slave*), oraz komputer IBM PC z oprogramowaniem diagnostycznym Kronos 2.0 firmy Proloc [107], stanowiący jednostkę nadrzędną (ang. *master*). Schemat doświadczalnego segmentu sieci, pracującego na łączu przewodowym, ilustruje rys. 58. Konfiguracja segmentu po wprowadzeniu konwerterów przedstawiona jest na rys. 59.

Celem badań było sprawdzenie, czy wprowadzenie zmian w warstwie fizycznej sieci Modbus pozostanie niewidoczne dla warstwy liniowej tej sieci, tzn. nie wymusi zmian



Rys. 58. Konfiguracja doświadczalnego segmentu sieci Modbus z wykorzystaniem łącza przewodowego

w realizacji technicznej tej warstwy, oraz określenie wpływu tej zmiany na wydajność sieci. Stąd testy przeprowadzone podczas badań konwerterów można podzielić na dwie grupy:

- testy ogólne,
- testy porównawcze.

W ramach testów ogólnych sprawdzono:

- przezroczystość konwertera dla kodów stosowanych w sieci Modbus w binarnym trybie transmisji RTU (znaki o wartościach z zakresu 00h ÷ FFh),
- zachowanie odpowiednich, charakterystycznych dla sieci Modbus, parametrów czasowych,
- zachowanie sieci w sytuacji, gdy brak jednej z jednostek podrzędnych,
- reakcję sieci na błędy transmisji,
- pracę sieci przy próbie stworzenia zakłóceń elektrycznych,
- pracę sieci w sytuacji, gdy konwerter sprzężony z jedną z jednostek podrzędnych zostaje umieszczony w skrzyni metalowej pełniąc funkcję ekranu.

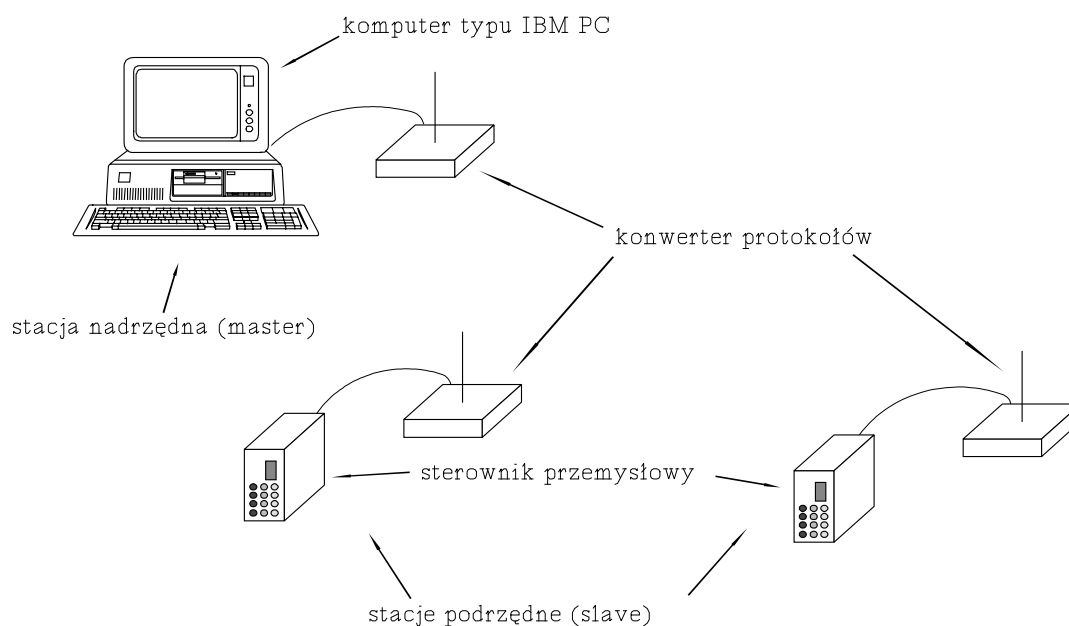
Przeprowadzone testy porównawcze miały na celu:

- porównanie szybkości transmisji dla łącza kablowego i po zmianie na łącze bezprzewodowe w wybranym segmencie sieci,
- porównanie wpływu ilości wysyłanych danych na poprawność i szybkość działania,
- sprawdzenie zasięgu układów radiowych.

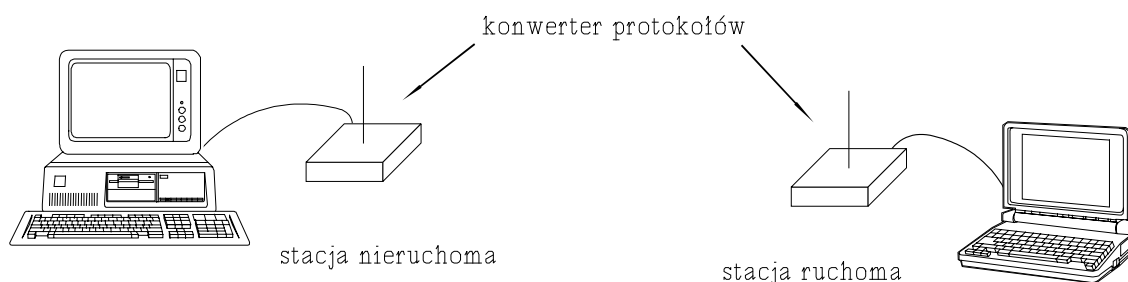
Badanie stopy błędów wykonano w celu sprawdzenia, jak odległość między konwerterami wpływa na jakość transmisji.

6.2.1. Testy ogólne

Przezroczystość konwertera sprawdzono przy użyciu stanowiska identycznego, jak w przypadku testów konwertera dla sieci typu biurowego (rys. 60). Łączem RS-232C przesyłano znaki z zakresu 00h ÷ FFh. Znaki odbierane były zgodne ze znakami nadawanymi, co świadczy o przezroczystości konwertera. Wykonano także próby przesyłu plików, ko-



Rys. 59. Konfiguracja doświadczalnego segmentu sieci Modbus z wykorzystaniem konwerterów



Rys. 60. Konfiguracja stanowiska dla badania przezroczystości konwerterów i stopy błędów łącza radiowego

rzystając z protokołów takich, jak Kermit i Z-Modem. Stosowanie konwerterów nie powodowało błędów transmisji, co także świadczy o tym, że przejście na inny rodzaj łącza pozostaje niewidoczne dla sprzętu i oprogramowania transmisyjnego.

Kolejne testy wykonywane były już w doświadczalnym segmencie sieci Modbus (rys. 59). Sprawdzono, czy po zastąpieniu łącza przewodowego konwerterami protokołów komunikacja w sieci będzie odbywać się prawidłowo. Testy wykazały, że stacja nadrzędna może komunikować się ze stacjami podrzędnymi za pośrednictwem konwerterów. Oznacza to, że oprogramowanie konwerterów nie narusza zależności czasowych, obowiązujących w sieci Modbus, a w szczególności nie powoduje błędów rozpoznawania początku i końca ramki.

Sytuacja, w której na zapytanie jednostki nadrzędnej nie nadchodzi żadna odpowiedź, może wynikać z dwóch przyczyn:

- jednostka nadrzędna wysłała zapytanie do nie istniejącej jednostki podrzędnej,
- wystąpiły błędy transmisji.

Wystąpienie takiej sytuacji jest w jednostce nadrzędnej sygnalizowane upływem czasu oczekiwania na odpowiedź. Przeprowadzone badania segmentu bezprzewodowego sieci Modbus wykazały, że zachowanie tej sieci w takich przypadkach pozostało nie zmienione. Ta część badań współpracy konwerterów z węzłami sieci Modbus dała odpowiedź pozytywną, tzn. zastąpienie łącza kablowego łączem bezprzewodowym pozostało niewidoczne dla warstwy liniowej tej sieci.

Podczas badań podjęto próbę wygenerowania zakłóceń elektrycznych. Możliwości w tym zakresie były jednak ograniczone – w wyposażeniu laboratorium brak jest obciążen indukcyjnych dużej mocy. Jedyne źródłem zakłóceń była lutowica transformatorowa, którą załączano blisko anteny jednego z konwerterów. Objawów błędnego działania sieci nie stwierdzono.

Przetestowano również komunikację pomiędzy jednostkami sieci w sytuacji, kiedy jedną z jednostek podrzędnych zamknięto w metalowej skrzyni. Sieć w dalszym ciągu działała poprawnie. Odległość pomiędzy komunikującymi się węzłami była jednak niewielka – rzędu kilku metrów.

6.2.2. Testy porównawcze

Dla zbadania wpływu zmiany w sieci Modbus łącza kablowego na łącze bezprzewodowe na wydajność sieci dokonywano pomiarów czasów trwania wybranych transakcji w sieci. W trakcie tych badań przeprowadzano następujące transakcje:

- zapis jednego słowa w sterowniku,
- odczyt jednego słowa ze sterownika,
- odczyt bloku: 16, 32, 48, 64, 80 oraz 96 słów ze sterownika.

Uzyskane wyniki pomiarów zgromadzono w tabelach 13 ÷ 24. Pomiarów czasu dokonywano z rozdzielczością 60, 20 oraz 10 ms. Zapis *Z1* oznacza zapis jednego słowa do sterownika, natomiast *Ox* - odczyt *x* słów.

Tab. 13. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu kablowym (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	60	120	210	300	360	450	540	600
9600 b/s	60	120	180	210	240	300	360	420
19200 b/s	60	120	120	180	180	240	240	300

Z danych zawartych w zamieszczonych tabelach wynika, że:

Tab. 14. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu bezprzewodowym (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	180	240	330	420	480	570	660	720
9600 b/s	180	180	270	300	360	390	450	480
19200 b/s	120	180	240	300	360	360	420	480

Tab. 15. Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łączu (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	120	120	120	120	120	120	120	120
9600 b/s	120	60	90	90	120	90	90	60
19200 b/s	60	60	120	120	180	120	180	180

Tab. 16. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na łączu kablowym (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	60	60	120	180	270	360	420	480
9600 b/s	60	60	60	120	180	180	210	240
19200 b/s	60	60	60	60	120	120	120	120

Tab. 17. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na łączu bezprzewodowym (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	180	180	240	300	420	480	540	600
9600 b/s	120	120	180	240	270	300	330	360
19200 b/s	120	120	180	240	240	240	300	300

- różnice czasów występujące dla prędkości 4800 b/s są prawie jednakowe i niezależne od długości ramek,
- również dla prędkości 9600 b/s różnice te są słabo zależne od długości ramek,
- dla prędkości 19200 b/s różnice czasów wykonania poszczególnych transakcji są wyraźnie uzależnione od rozmiaru przesyłanych danych,

Tab. 18. Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C170 na obu typach łączy (rozdzielczość 60 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	120	120	120	150	120	120	120	120
9600 b/s	60	60	120	120	90	120	120	120
19200 b/s	60	60	120	180	120	120	180	180

Tab. 19. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączy kablowym (rozdzielczość 20 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	80	100	180	260	340	440	520	600
9600 b/s	60	80	140	180	240	280	340	400
19200 b/s	60	80	120	140	180	220	240	280

Tab. 20. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączy bezprzewodowym (rozdzielczość 20 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	180	220	300	400	480	560	620	700
9600 b/s	140	180	240	300	320	400	420	480
19200 b/s	120	140	220	280	320	360	380	440

Tab. 21. Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łączy (rozdzielczość 20 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	100	120	120	140	140	120	100	100
9600 b/s	80	100	100	120	80	120	80	80
19200 b/s	60	60	100	140	140	140	160	160

- najbardziej efektywna prędkość komunikacji pomiędzy jednostkami sieci Modbus poprzez łączy bezprzewodowe to 9600 b/s.

Pomiar czasu z większą rozdzielczością również wykazał, że sieć pracuje najefektywniej przy prędkości transmisji równej 9600 b/s. Także zależności pomiędzy prędkościami a rozmiarem przesyłanych danych są takie same jak poprzednio.

Tab. 22. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu kablowym (rozdzielczość 10 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	80	110	180	260	350	420	500	580
9600 b/s	50	80	130	180	230	280	340	390
19200 b/s	40	70	110	140	180	210	230	280

Tab. 23. Czasy wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na łączu bezprzewodowym (rozdzielczość 10 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	180	210	300	390	470	540	620	700
9600 b/s	140	170	230	290	320	380	430	470
19200 b/s	120	150	210	280	310	360	380	440

Tab. 24. Różnice czasów wykonania transakcji ze sterownikiem C50 na obu typach łącz (rozdzielczość 10 ms)

prędkość	Z1	O1	O16	O32	O48	O64	O80	O96
4800 b/s	100	110	120	130	130	140	120	120
9600 b/s	90	90	100	110	90	100	90	80
19200 b/s	80	80	100	140	130	140	150	160

Badania wykazały też zgodność wielkości zmierzonych z wyliczonymi podczas analizy czasowej konwertera. Dla prędkości 4800 b/s zmierzony czas realizacji transakcji zapisu jednego słowa wynosi 80 ms dla łącza przewodowego i 180 ms dla łącza radiowego, zrealizowanego z zastosowaniem konwerterów. Wyliczone wartości wynoszą odpowiednio 85.24 i 180.64 ms. Drobne różnice między wartościami wyliczonymi i zmierzonymi spowodowane są niedokładnością pomiaru, dokonywanego z rozdzielczością 10 ms.

6.2.3. Pomiar stopy błędów

Przy użyciu wykonanych konwerterów protokołów bez ich modyfikacji można wykonać badanie blokowej stopy błędów na łączu radiowym. W tym celu skonfigurowano stanowisko badawcze, składające się z jednej stacji nieruchomej i jednej ruchomej (rys. 60). Każda ze stacji składała się z komputera typu IBM PC wyposażonego w port szeregowy RS-232C oraz konwertera protokołów.

Pomiar wykonywano, wysyłając łączem przewodowym pojedyncze znaki z szybkością 19200 b/s. Odstęp czasowy między znakami był tak dobrany, że przed odebraniem kolejnego znaku przez konwerter wysyłana była ramka, zawierająca w polu danych pojedynczy znak łącza przewodowego. Wobec tego liczba znaków nadanych równa jest liczbie nadanych ramek; podobna równość zachodzi między znakami i ramkami odebranymi. Ponieważ konwerter odrzuca każdą przekłamaną ramkę, do komputera odbierającego dociera tyle znaków, ile ramek zostało przesłanych poprawnie.

Pomiar liczby znaków nadanych i odebranych dokonywany był za pomocą specjalnie napisanego programu, zliczającego znaki nadawane w komputerze nadającym i odbierane w komputerze odbierającym. Dla każdej odległości przesyłano po 10^6 znaków; całość pomiarów przeprowadzono pięciokrotnie. Wyniki końcowe stanowią średnią wyników z poszczególnych serii.

Stopę błędu badano w funkcji odległości transmisji, mierząc stosunek liczby znaków odebranych do liczby znaków nadanych. Stacje były umieszczone naprzeciw siebie w korytarzu o przekroju 3×3 m, wolnym od dodatkowych przeszkód w postaci np. mebli.

Stopę błędów wyliczano według wzoru:

$$\text{stopa błędu} = 1 - \frac{\text{liczba znaków poprawnie odebranych}}{\text{liczba znaków wysłanych}}$$

Zmierzone wartości stopy błędów w funkcji odległości zawiera tabela 25.

Tab. 25. Wyniki pomiarów stopy błędów łącza radiowego

Odległość [m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stopa błędu	0	0	0	0	$3.27 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$9.93 \cdot 10^{-5}$	$3.08 \cdot 10^{-4}$	$2.34 \cdot 10^{-2}$	$6.57 \cdot 10^{-2}$	$2.38 \cdot 10^{-1}$

Z uzyskanych wielkości wynika, że dla odległości do około $4 \div 5$ m stopa błędów jest mniejsza niż 10^{-6} (w czasie badań nie stwierdzono jakichkolwiek przekłamań), natomiast dla odległości $5 \div 9$ m – stopa błędu jest rzędu 10^{-5} . Powyżej 10 m stopa błędu jest rzędu 10^{-2} lub większa, tak że transmisja jest praktycznie niemożliwa.

Uzyskane wyniki dotyczą blokowej stopy błędów, natomiast normy i standardy określają zazwyczaj elementową (bitową) stopę błędów. Ponieważ przekłamanie ramki powstaje w wyniku przekłamania zarówno pojedynczego bitu, jak większej liczby bitów, wartości blokowej i elementowej stopy błędów nie można porównać.

Badania te prowadzone były w pobliżu laboratoriów badawczych Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej, których aparatura mogła powodować zakłócenia transmisji. Podobne

testy przeprowadzono także w hali o wymiarach 14×8 m w IITiS PAN, w której znajdują się komputery. W obrębie całego pomieszczenia stopa błędu była rzędu 10^{-5} lub niższa.

Przy użyciu elementów radiowych tego samego typu wykonano próbę transmisji z prędkością 4800 b/s, a więc znacznie niższą, niż stosowana w konwerterze protokołów. Uzyskano zasięg rzędu 30 ÷ 40 m w przestrzeni zamkniętej i około 100 m w terenie otwartym. Wpływu odległości stacji na stopę błędów w tych warunkach nie badano, można jednak przypuszczać, że dla tych samych odległości będzie ona niższa; wskazuje na to uzyskany maksymalny zasięg transmisji, około 3-krotnie większy (w porównywalnych warunkach), niż dla szybkości 37500 b/s.

7. Kierunki dalszych prac

Wykonany konwerter protokołów dla sieci przemysłowych ma możliwość konfigurowania parametrów łącza przewodowego, takich jak format znaku i prędkość transmisji. Do ustalenia takich parametrów wystarczają przełączniki. W przypadku jednak, kiedy wystąpiłaby potrzeba znacznie większej możliwości konfigurowania konwertera, rozwiązanie takie może okazać się niewystarczające.

Jednym z możliwych rozwiązań tego problemu jest wprowadzenie możliwości konfigurowania konwertera z wykorzystaniem łącza szeregowego. Układ można wówczas połączyć z komputerem, na którym uruchomione jest oprogramowanie konfiguracyjne. Łączem szeregowym przesyłana jest informacja o dokonanych ustaleniach.

Rozwiązanie takie jest jednak mało elastyczne, gdyż narzuca wymagania na typ komputera, używanego do konfiguracji, ogranicza także wybór systemu operacyjnego. Dlatego też lepszym rozwiązaniem wydaje się zawarcie całego oprogramowania konfiguracyjnego w konwerterze i sprowadzenie komputera do roli terminala. Programy, emulujące terminal z wykorzystaniem łącza typu RS-232C realizowane są na wielu platformach sprzętowo-programowych. Kosztem, jaki ponosi się w tym rozwiązaniu, jest znaczne skomplikowanie programu konwertera, a co za tym idzie, zwiększona zajętość pamięci programu.

Konwerter protokołów dla łącza RS-232C może, w zależności od położenia jednego tylko przełącznika, wykorzystywać to łącze do konwersji protokołów lub w celach konfiguracyjnych. Istnieje także możliwość zdalnej rekonfiguracji konwertera dla innych typów łączy, bądź za pośrednictwem tegoż łącza, bądź też za pośrednictwem dodatkowego łącza, np. pracującego według standardu RS-232C.

Jak już wspomniano wcześniej, uniwersalny konwerter protokołów wnosiłby zapewne mniejsze opóźnienia w proces transmisji danych, gdyby miał możliwość rozpoznania końca ramki. Sposób określania końca ramki w stosowanym protokole transmisyjnym może być jednym z ważnych parametrów konfiguracji konwertera.

Wykonane konwertery protokołów mają taką strukturę sprzętowo-programową, że zmiana założeń w pewnym zakresie nie powoduje konieczności konstrukcji układu od nowa. Przykładowo, w konwerterze dla sieci przemysłowych można łatwo wymienić płytke z układem radiowym na inną, w której wykorzystany byłby inny typ układu. Zmiana taka wiązałaby się z koniecznością dokonania pewnych zmian w oprogramowaniu konwertera.

Można jednak wyobrazić sobie taką strukturę sprzętowo-programową, w której odpowiednio przygotowane części składowe mogą ze sobą współpracować w taki sposób, że wymiana którejs z nich nie powoduje konieczności wnoszenia jakichkolwiek dalszych zmian. W tym przypadku konwerter składałby się z trzech elementów:

- modułu łącza przewodowego,
- modułu łącza bezprzewodowego,
- modułu konwertera.

Moduły łącza przewodowego i bezprzewodowego powinny stanowić podzespoły sprzętowo-programowe, które komunikowałyby się z modułem konwertera w sposób umożliwiający ich wymianę. Przykładowo, oprogramowanie modułu może zajmować ustaloną przestrzeń adresową w pamięci programu i danych i powinno zawierać procedury, umożliwiające np. nadanie czy odbiór znaku lub ramki. Sposób wywołania poszczególnych procedur transmisyjnych powinien być z góry ustalony, tak, by wymiana modułu pozostała niewidoczna dla procedur konwersji protokołów. Każdy moduł powinien także zawierać blok danych z informacją o możliwościach modułu, takich jak np.: zakres prędkości transmisji, format znaku czy parametry czasowe i logiczne protokołu. Odczyt tych informacji, zapisanych również w jednaki sposób, pozwalałby w czasie inicjalizacji na możliwie dobre dopasowanie parametrów obu łączy.

Silna zależność właściwości bezprzewodowego kanału transmisyjnego od otoczenia powoduje, że dobrane w pewnych warunkach parametry transmisji będą niewłaściwe w innym środowisku. Przykładem takich parametrów są: prędkość transmisji łącza bezprzewodowego, długość ramki protokołu tego łącza czy też liczba wspólnie potwierdzanych ramek. Np. zwiększenie zasięgu może wiązać się z koniecznością zmniejszenia prędkości transmisji (wskazują na to uzyskane wyniki doświadczalne) lub, ze względu na rosnącą stopę błędów, zmniejszenie długości ramek. Wydaje się, że działanie takie może spowodować istotne pogorszenie przepustowości łącza, jednak zmniejszenie częstości retransmisji może nawet poprawić charakterystykę łącza. Konwerter uniwersalny powinien zatem mieć możliwość dynamicznego doboru pewnych parametrów transmisji w zależności od jej przebiegu, tak, aby możliwie jak najlepiej wykorzystać przepustowość łącza.

8. Podsumowanie i wnioski

Wykonane konwertery protokołów spełniają postawione przed nimi zadania. Umożliwiają one bowiem współpracę przewodowego i bezprzewodowego segmentu sieci komputerowej, a przy tym wykorzystanie innego typu medium transmisyjnego pozostaje niezauważone przez komunikujące się urządzenia. Ceną, jaką trzeba ponieść, jest natomiast negatywny wpływ na parametry czasowe sieci, spowodowany wprowadzeniem dodatkowych opóźnień w proces transmisji danych.

Badania, przeprowadzone w oparciu o wykonane konwertery protokołów, wykazały, że transmisja bezprzewodowa może być alternatywą dla transmisji przewodowej. Można także zastosować urządzenia do transmisji bezprzewodowej bez konieczności modyfikacji istniejących konfiguracji sprzętowo-programowych sieci. Jakkolwiek wykonane urządzenia charakteryzują się małymi szybkościami transmisji (rzędu kilku do kilkunastu kb/s), mogą stanowić model dla prostych urządzeń stosowanych np. w telemetrii czy systemach zdalnego sterowania. Należy podkreślić, że proponowane rozwiązanie transmisji radiowej w ramach standardu sieci Fieldbus zakłada prędkości 1.2 i 31.25 kb/s [7], a więc porównywalne z parametrami wykonanych urządzeń. Prędkości te są wystarczające do realizacji pewnych zadań w systemach monitorowania i zdalnego sterowania [8]. Tym niemniej prowadzone są też prace, których celem jest uzyskanie bezprzewodowych fragmentów sieci przemysłowych o większej szybkości transmisji (rzędu 1 Mb/s) [108, 109].

Wykonane konwertery protokołów są rozwiązaniami modelowymi, dlatego też nie zostały przeprowadzone badania ich odporności na zakłócenia elektromagnetyczne. Wskazane byłoby zatem doprowadzenie ich do stadium prototypu i przebadanie wpływu tych zakłóceń na parametry użytkowe sieci, pracującej z wykorzystaniem konwerterów. Wyniki tych badań powinny być cennym materiałem doświadczalnym, związanym z eksploatacją sieci, zawierających segmenty bezprzewodowe. W szczególności mogłoby być możliwe wyprowadzenie ogólnych zależności jakości transmisji (np. użytecznej prędkości i zasięgu transmisji, stopy błędów) od otoczenia sieci (rodzaju i natężenia zakłóceń). Pozwoliłoby to na oszacowanie możliwości sieci jeszcze przed ich uruchomieniem, a także dałoby możliwość wyboru takiego łącza bezprzewodowego, które, spośród wielu wariantów, najlepiej nadaje się do stosowania w konkretnej sytuacji.

Należy podkreślić, że obowiązujące w Polsce przepisy znacznie ograniczają stosowanie sieci bezprzewodowych. W szczególności dotyczy to lokalnych sieci radiowych, które, ze względu na sposób przetwarzania sygnałów oraz wykorzystywane pasmo częstotliwości radiowych, nie są dopuszczone do użytku. Istotnym ograniczeniem są także wysokie ceny

sprzętu do transmisji bezprzewodowej, szczególnie z dużymi szybkościami. Wydaje się zatem, że dopóki sytuacja ta nie ulegnie zmianie, stosować będzie można:

- urządzenia radiowe (radiomodemy) o małej szybkości (do 19.2 kb/s) i dużym zasięgu (rzędu kilkudziesięciu kilometrów),
- urządzenia na podczerwień, pozwalające uzyskać szybkości 115.2 ÷ 1152 kb/s, ale o bardzo małym zasięgu (rzędu kilku-kilkunastu metrów)

Nie będą używane natomiast (ze względu na przepisy i ceny):

- karty radiowych sieci lokalnych o szybkości 1.5 ÷ 2 Mb/s i zasięgu 30 ÷ 250 m,
- mosty radiowe o szybkościach transmisji rzędu 2 Mb/s i zasięgu nawet do 40 km,
- mosty na podczerwień i światło laserowe o szybkości transmisji do 155 Mb/s i zasięgu do około 1 km.

Widać zatem, że istniejąca w Polsce sytuacja ogranicza lub wręcz uniemożliwia wiele ciekawych zastosowań bezprzewodowych mediów komunikacyjnych.

9. Literatura

- [1.] Grzywak A. (red.): Rozproszone systemy komputerowe. PRO-net, Gliwice 1994.
- [2.] Tannenbaum A. S.: Sieci komputerowe. WNT, Warszawa 1988.
- [3.] Roberts L. G., Wessler B. D.: Sieć ARPA. W: Abramson N, Kuo F. F. (red.): Sieci telekomunikacyjne komputerów. WNT, Warszawa 1978.
- [4.] Davies D. W., Barber D. L. A.: Sieci teleinformatyczne. WNT, Warszawa 1979.
- [5.] Abramson N. Sieć Aloha. W: Abramson N, Kuo F. F. (red.): Sieci telekomunikacyjne komputerów. WNT, Warszawa 1978.
- [6.] Kleinrock L., Lam S. S.: Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-23, No. 4., April 1975.
- [7.] Neve B. D.: Progress on Radio Fieldbus. Measurement+ Control, Vol. 23, Feb. 1990.
- [8.] Bell C. R., Neve B. D.: Process Plant Telemetry by Radio. Sensor Review, Vol. 7, No. 4, Oct. 1987.
- [9.] Neve B. D.: Radio Fieldbus. Telemetry UK, 1989.
- [10.] Knights M. N., Imrie A.: Networks for Low Power Radio. Telemetry UK, 1989.
- [11.] Freeburg T. A.: Enabling Technologies for Wireless In-Building Network Communications – Four Technical Challenges, Four Solutions. IEEE Communications Magazine, Apr. 1991.
- [12.] Rappaport T. S.: Indoor Radio Communications for Factories of the Future. IEEE Communications Magazine, May 1989.
- [13.] Zieliński B.: Wybrane zagadnienia bezprzewodowej transmisji danych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 31, Gliwice 1996.
- [14.] Lessard A., Gerla M.: Wireless Communications in the Automated Factory Environment. IEEE Network, Vol. 2, No. 3., May 1988.
- [15.] Buchholz D., Odlyzko P., Taylor M., White R.: Wireless In-Building Networks Architecture and Protocols. IEEE Network Magazine, Nov. 1991, pp. 68-73.
- [16.] Berline G., Perratore E.: Wireless LANs. PC Magazine, 11.02.1992, pp. 291-314.
- [17.] Green P. E. Jr.: The Structure of Computer Networks. W: Green P. E. Jr. (ed.): Computer Network Architectures and Protocols. Plenum Press, 1983.
- [18.] Zydorowicz T.: PC i sieci lokalne. PLJ, Warszawa 1993.
- [19.] Sachs S. R.: Alternative Local Area Network Access Protocols. IEEE Communications Magazine, Vol. 26, No. 3, Mar. 1988.
- [20.] Tobagi F. A.: Multiaccess Link Control. W: Green P. E. Jr. (ed.): Computer Network Architectures and Protocols. Plenum Press, 1983.

-
- [21.] Wolisz A.: Podstawy lokalnych sieci komputerowych. Tom 1: Sprzęt sieciowy. WNT, Warszawa 1992.
 - [22.] Pouzin L., Zimmermann H.: A Tutorial on Protocols. Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No. 11, Nov. 1978.
 - [23.] McClelland F. M.: Services and Protocols of the Physical Layer. Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 12, Dec. 1983.
 - [24.] Bertine H. V.: Physical Interfaces and Protocols. W: Green P. E. Jr. (ed.): Computer Network Architectures and Protocols. Plenum Press, 1983.
 - [25.] Conard J. W.: Services and Protocols of the Data Link Layer. Proceedings of the IEEE, Vol. 71, No. 12, Dec. 1983.
 - [26.] Halsall F.: Data Communication, Computer Networks And Open Systems. Addison-Wesley, 1992.
 - [27.] Conard J. W.: Character-Oriented Link Control. W: Green P. E. Jr. (ed.): Computer Network Architectures and Protocols. Plenum Press, 1983.
 - [28.] Carlson D. E.: Bit-Oriented Data Link Control. W: Green P. E. Jr. (ed.): Computer Network Architectures and Protocols. Plenum Press, 1983.
 - [29.] Grzywak A.: Problemy integracji sieci komputerowych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 23, Gliwice 1993.
 - [30.] Mielczarek W.: Szeregowe interfejsy cyfrowe. Helion, Gliwice 1993.
 - [31.] Low Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers. Maxim, Sunnyvale 1995.
 - [32.] 20 μ A, 1/8-Unit-Load, Slew-Rate-Limited RS-485 Transceivers. Maxim, Sunnyvale 1995.
 - [33.] Modicon Modbus Protocol Reference Guide. PI-MBUS-300 rev. D, Modicon.
 - [34.] Pimentel J. R.: Communication Architectures for Fieldbus Networks. Control Engineering, October 1989.
 - [35.] Jordan J. R.: Serial Networked Field Instrumentation. John Wiley & Sons, 1995.
 - [36.] Profibus. Norma DIN 19245.
 - [37.] Manufacturing Message Specification. Standard ISO 9506.
 - [38.] Małyśiak H., Caban D., Zieliński B.: Bezprzewodowe media komunikacyjne. Etap 2: Zasady stosowania transmisji bezprzewodowej w systemach CIM. PBZ-31-05. IITiS PAN, Gliwice 1996.
 - [39.] Halliday D., Resnick R.: Fizyka. Tom II. PWN, Warszawa 1984.
 - [40.] Bem D. J.: Anteny i rozchodzenie się fal radiowych, WNT, Warszawa 1973.
 - [41.] Regulamin Radiokomunikacyjny, Genewa 1969.

-
- [42.] Schwartz J. W.: Wielodostępowe systemy komunikacji radiowej dla sieci komputerowych. W: Abramson N., Kuo F. F. (red.): Sieci telekomunikacyjne komputerów. WNT, Warszawa 1978.
- [43.] Kahn R. E., Gronemeyer S. A., Burchfiel J., Kunzelman R. C.: Advances in Packet Radio Technology. Proceedings of the IEEE, Vol. 66, No. 11, Nov. 1978.
- [44.] Pieniak J.: Anteny telewizyjne i radiowe, WKiŁ, Warszawa 1995.
- [45.] Dąbrowski K.: Amatorska komunikacja cyfrowa. PWN, Warszawa 1994.
- [46.] Wojnar A.: Systemy radiokomunikacji ruchomej lądowej: zasady analizy i syntezy, WKiŁ, Warszawa 1989.
- [47.] Mitzlaff J. E.: Radio Propagation and Anti-Multipath Techniques in the WIN Environment. IEEE Network Magazine, Nov. 1991, pp. 21-26.
- [48.] McKown J. W., Hamilton R. L.: Ray Tracing as a Design Tool for Radio Networks. IEEE Network Magazine, Nov. 1991, pp. 27-30.
- [49.] Bertoni H. L., Honcharenko W., Maciel L. R., Xia H. H.: UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications. Proceedings of the IEEE, vol. 82, No. 9, Sept. 1994, pp. 1333-1359.
- [50.] Molkdar D.: Review on radio propagation into and within buildings. IEE Proceedings-H, Vol. 138, No. 1, Feb. 1991.
- [51.] Hołubowicz W., Płóciennik P., Róžański A.: Systemy łączności bezprzewodowej. Wydawnictwa EFP, Poznań 1996.
- [52.] Killen H. B.: Transmisja cyfrowa w systemach światłowodowych i satelitarnych. WKiŁ, Warszawa 1992.
- [53.] Klejman H., Dzieciołowski K., Rzewuski M.: Lasery w telekomunikacji, WNT, Warszawa 1970.
- [54.] Oetting J. D.: A Comparison of Modulation Techniques for Digital Radio. IEEE Transactions on Communication, Vol. COM-27, No. 12., Dec. 1979.
- [55.] Shannon C. W.: Communication in the Presence of Noise. Proceedings of the IRE, Vol. 37, No. 1, Jan. 1949.
- [56.] Costas J. P.: Poisson, Shannon and the Radio Amateur. Proceedings of the IRE, Vol. 47, No. 12, Dec. 1959. Przedruk w: Abramson N. (ed.): Multiple Access Communications – Foundations for Emerging Technologies. IEEE Press, 1993.
- [57.] Wojnar A.: Problemy systemowe radiokomunikacji ruchomej lądowej. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 5, 1980.
- [58.] Egli J. J.: Radio Propagation Above 40 MC over Irregular Terrain. Proceedings of the IRE, Vol. 45, No. 10, Oct. 1957.
- [59.] Grzybkowski M. J., Wojnar A.: Uprozczone modele propagacji przyziemnej fal radiowych. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 7, 1977.

- [60.] Kahn M. J., Barry J. R.: Wireless Infrared Communications. Proceeding of the IEEE, Vol. 85, No. 2, Feb. 1997.
- [61.] Państwowa Agencja Radiokomunikacyjna. Informacja ustna.
- [62.] Harvey D. A., Santalessa R.: Wireless gets real. Byte, May 1994.
- [63.] Feher K.: Wireless Digital Communications: Modulation & Spread Spectrum Applications. Prentice Hall, 1995.
- [64.] Chelouche M., Héthuin S., Ramel L.: Digital Wireless Broadband Corporate and Private Networks: RNET Concepts and Applications. IEEE Communications Magazine, Jan. 1997.
- [65.] Links C., Diepstraten W., Hayes V.: Universal wireless LANs. Byte, May 1994.
- [66.] Caban D., Małyśiak H., Zieliński B.: Możliwości realizacji bezprzewodowych segmentów sieci komputerowych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 30, Gliwice 1996.
- [67.] Zieliński B.: Bezprzewodowa transmisja danych poprzez łącze RS-232C. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 32, Gliwice 1997.
- [68.] Gofton P. W.: Mastering Serial Communications. Sybex, Alameda 1994.
- [69.] Weinmiller J., Schläger M., Festag A., Wolisz A.: Performance Study of Access Control in Wireless LANs – IEEE 802.11 DFWMAC and ETSI RES 10 HIPER-LAN. W: Mobile Networks and Applications. Baltzer Science Publishers, July 1997.
- [70.] BiM-433-F Low Power UHF Transceiver. Radiometrix 1995.
- [71.] Kozłowski A., Woźniak J.: Radiowe systemy teleinformatyczne. W: Sobczak W. (red.): Problemy teleinformatyki. WKiŁ, Warszawa 1984.
- [72.] Chen K.-C.: Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing. IEEE Network, Sept./Oct. 1994.
- [73.] Pahlavan K., Levesque A. H.: Wireless Data Communications. Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, Sept. 1994.
- [74.] Tobagi F. A., Kleinrock L.: Packet Switching in Radio Channels: Part II – The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution. IEEE Transactions on Communications, Vol. COM-23, No.12, Dec. 1975.
- [75.] Bhargavan V., Demers A., Shenker S., Zhang L.: MACAW: A Media Access Protocol for Wireless LAN's. SIGCOM '94, <http://piggy.cs.nthu.edu.tw/paper/-Mobile/PS/macaw-cr.ps.gz>.
- [76.] Karn P.: MACA – A New Channel Access Method for Packet Radio. ARRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference, 22.09.1990.
- [77.] Kutlu A., Ekiz H., Powner E. T.: Implementation of "Comb" Based Wireless Access Method for Control Area Network. 11th International Symposium on Computer and Information Sciences, Nov. 1996.

-
- [78.] Zieliński B.: Analiza możliwości zastosowania bezprzewodowych mediów transmisyjnych do szeregowego transferu danych. Sprawozdanie z grantu KBN nr 8 T11C 024 08.
- [79.] Zieliński B.: Wykonanie i badanie modemu radiowego. Sprawozdanie z badań własnych, Instytut Informatyki Pol. Śl., Gliwice 1995.
- [80.] Małysiak H.: Mikrokomputery jednoukładowe serii MCS48, MCS51, MCS96. Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 1992.
- [81.] Rydzewski A.: Mikrokomputery jednoukładowe rodziny MCS-51. WNT, Warszawa 1992.
- [82.] Starecki T.: Mikrokontrolery jednoukładowe rodziny 51. NOZOMI, Warszawa 1996.
- [83.] Małysiak H., Pochopień B., Podsiadło P, Wróbel E.: Modułowe systemy mikrokomputerowe. WNT, Warszawa 1990.
- [84.] *Microsystem Components Handbook: Microprocessors and Peripherals*. Intel, Santa Clara 1985.
- [85.] *MCS®51 NMOS Single-Chip 8-Bit Microcontrollers*. Intel, Santa Clara 1995.
- [86.] *Microprocessors and Peripherals Data Book*. NEC, 1991.
- [87.] *MC1488 Quadruple Line Drivers*. Texas Instruments, Dallas 1995.
- [88.] *MC1489 Quadruple Line Receivers*. Texas Instruments, Dallas 1995.
- [89.] *PC16550D Universal Asynchronous Receiver/Transmitter with FIFOs*. National Semiconductor, 1995.
- [90.] *Modem Technical Manual*. AMD, Sunnyvale, 1988.
- [91.] *Personal Computer Products Data Book*. AMD, Sunnyvale 1989.
- [92.] *Components Data Book*. Zilog, 1983.
- [93.] Małysiak H., Caban D., Zieliński B., Fojcik M.: Bezprzewodowe media komunikacyjne. Etap 5: Realizacja i badanie współpracy segmentów przewodowych i bezprzewodowych sieci CIM. PBZ-31-05. IITiS PAN, Gliwice 1996.
- [94.] Caban D., Fojcik M., Małysiak H., Zieliński B.: System transmisji radiowej dla sieci przemysłowych. ZN Pol. Śl. s. Informatyka z. 32, Gliwice 1997.
- [95.] *Moduł μM-31, Instrukcja użytkownika*. Micromax, Wrocław 1993.
- [96.] *Moduł μM-UNI, Instrukcja użytkownika*. Micromax, Wrocław 1993.
- [97.] *DS80C320 High Speed Microcontroller*. Dallas Semiconductor, 1996.
- [98.] *KA-485, Konwerter interfejsu RS-232/RS-485, Dokumentacja techniczna*. Yuko, Gliwice 1995.
- [99.] *High-speed CMOS Logic Data*. Motorola, 1989.
- [100.] Metcalfe R. M., Boggs D. R.: Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks. *Communications of the ACM*, Vol. 19, no. 7, Jul. 1976.

- Przedruk w: Abramson N. (ed.): Multiple Access Communications – Foundations for Emerging Technologies. IEEE Press, 1993.
- [101.] Instrukcja obsługi kontrolera TNC-12. MUEL, Warszawa 1994.
 - [102.] Instrukcja obsługi kontrolera TNC-12ISA. MUEL, Warszawa 1994.
 - [103.] Modem PM-96 dla Packet Radio. MUEL, Warszawa 1994.
 - [104.] Zieliński B.: Bezprzewodowa transmisja danych. Sprawozdanie z badań własnych, Instytut Informatyki Pol. Śl., Gliwice 1996.
 - [105.] Bem D. J. (red.): Impulsowe narażenia elektromagnetyczne. Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
 - [106.] Dokumentacja sterowników przemysłowych firmy Cegelec. Cegelec, Massy 1991.
 - [107.] Dokumentacja systemu Kronos v. 2.0. Proloc, Katowice 1994.
 - [108.] Morel P., Muralt R., Decotignie J.-D.: A Wireless Extension for Fieldbus. Proceedings of the AIAI'95, Nancy, France, 7-9.06.1995, <http://litwww.epfl.ch/~morel/paper/aiai'95.pdf>.
 - [109.] Morel P.: Mobility in MAP networks using the DECT wireless protocols. Proceedings of the WCFS'95, Lausanne, Switzerland, Oct. 1995, <http://litwww.epfl.ch/~morel/paper/wfcs'95.pdf>.