

ROZDZIAŁ 29

ANALIZA OPÓŹNIEŃ W SIECI PACKET RADIO ZAWIERAJĄCEJ KONTROLERY TNC

Bartłomiej ZIELIŃSKI¹

Kontrolery TNC są układami mikroprocesorowymi, służącymi do przesyłu informacji w sieci Packet Radio. Ze względu na właściwości protokołu transmisyjnego i zasady pracy kontrolera transmisja w takiej sieci charakteryzuje się większymi opóźnieniami, niż transmisja przewodowa. W niniejszym rozdziale przedstawiono teoretyczną analizę opóźnień transmisji, wynikających z wprowadzenia do sieci kontrolerów TNC. Przedstawione rozważania mogą posłużyć do oceny możliwości zastosowania kontrolerów TNC w określonych aplikacjach uwarunkowanych czasowo.

1. WPROWADZENIE

Sieć Packet Radio [3] można rozpatrywać jako przykład prostej bezprzewodowej sieci rozległej. Sieć ta powstała w początku lat 80. XX wieku, a więc w czasach, gdy inne popularne obecnie środki łączności, takie jak sieć Internet i telefonia komórkowa, nie były jeszcze powszechnie dostępne. Niestety, jako dzieło radioamatorów sieć Packet Radio nigdy nie była popularnym rozwiązaniem, o czym może świadczyć niewiele publikacji na ten temat. Obecnie, ze względu na powszechność Internetu i telefonii komórkowej, zmienia się jej zastosowanie – istniejąca infrastruktura jest używana jako medium dla transmisji informacji w amatorskich systemach telemetrycznych i pomiarowo-kontrolnych pracujących zgodnie z wymogami protokołu APRS (*Automatic Position Reporting System*) [4].

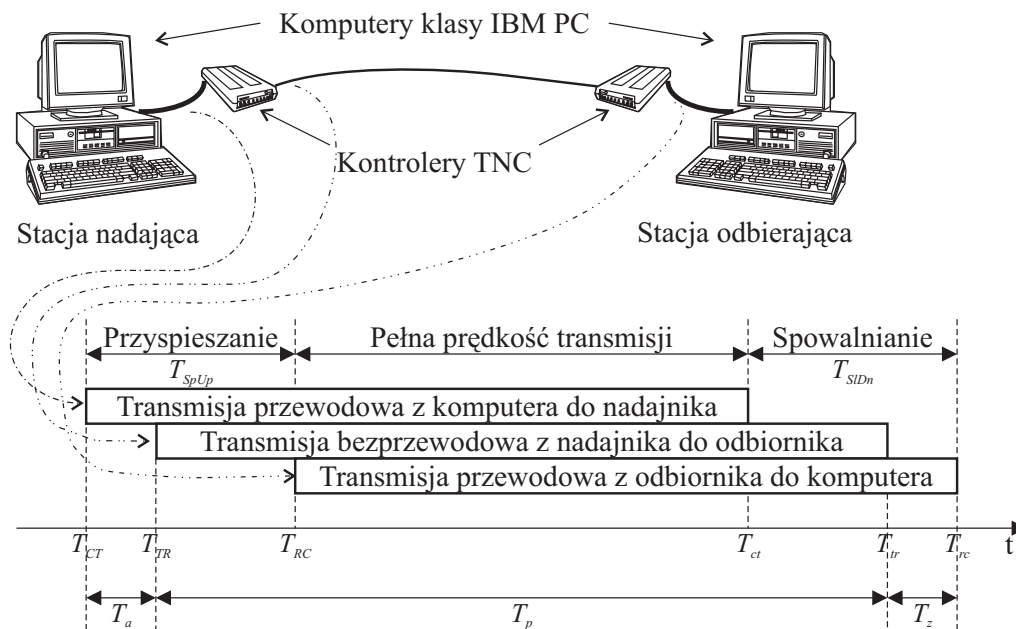
Kompletna stacja sieci Packet Radio zawiera komputer (lub inne urządzenie DTE) oraz nadajnik-odbiornik radiowy [2]. Ze względu na odmienne sposoby przesyłania informacji urządzenia te na ogół nie mogą współpracować ze sobą bezpośrednio. Konieczne jest zatem zastosowanie określonych technik przetwarzania postaci danych. Przetwarzanie takie można zrealizować całkowicie w komputerze lub przez dołączenie układów zewnętrznych. Przykładem takiego układu jest kontroler TNC (*Terminal Node Controller*).

¹ Politechnika Śląska, Instytut Informatyki; ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice; Bartłomiej.Zielinski@polsl.pl.

W opublikowanych wcześniej pracach przedstawiono analityczny model protokołu AX.25 [5], stosowanego jako warstwa liniowa w sieci Packet Radio [1]. Model ten pozwala oszacować wpływ poszczególnych parametrów protokołu na jego wydajność oraz – co się z tym wiąże – na efektywną prędkość transmisji widzianą przez użytkownika. Przedstawiono również model analityczny kontrolera TNC [6]. Pozwala on oszacować wpływ obecności kontrolera na parametry użytkowe sieci, jak np. efektywna prędkość czy opóźnienia transmisji, a także oszacować rozmiar bufora kontrolera, niezbędny do spełnienia wymagań niektórych aplikacji w określonych warunkach. W pracy pokazano jedynie przykładowe obliczenia, przeprowadzono natomiast dokładną analizę opóźnień transmisyjnych wynikających z użycia kontrolerów TNC.

2. ANALIZA PRACY KONTROLERA TNC

Analiza pracy kontrolera TNC dotyczy przypadku przesyłania informacji między dwoma komputerami (lub innymi urządzeniami), połączonymi za pośrednictwem dwóch kontrolerów TNC. Ze względu na buforowanie przesyłanych danych i przetwarzanie ich formatu – transmisja przebiega w kilku etapach. Konfigurację sieci wraz z etapami transmisji wyjaśniono na rys. 1.



Rys. 1. Konfiguracja rozwiązanej sieci i etapy transmisji

Przyjmijmy następujące założenia:

- sieć składa się z dwóch stacji, komunikujących się między sobą łączem bezprzewodowym dwukierunkowym naprzemiennym (*half-duplex*) lub jednoczesnym (*full-duplex*),
- transmisja wolna jest od kolizji i błędów transmisji, nie występują zatem retransmisje,
- czas przetwarzania ramek w kontrolerze TNC jest pomijalny.

2.1. CZAS TRANSMISJI ŁĄCZEM BEZPRZEWODOWYM

Czas transmisji łączem bezprzewodowym odpowiada transmisji z wykorzystaniem protokołu AX.25. Przyjmijmy następujące oznaczenia:

k – maksymalna wielkość okna (liczba ramek wspólnie potwierdzanych) – zakres 1÷7,

N_1 – maksymalna pojemność pola informacyjnego ramki – zakres 1÷256,

T_2 – czas opóźnienia potwierdzenia – od kilku milisekund do kilku sekund, zależnie od prędkości transmisji łącza bezprzewodowego,

T_{102} – czas trwania szczeliny protokołu CSMA – typowe wartości należą do zakresu 50÷300 ms,

T_{103} – czas włączania nadajnika, typowe wartości wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset milisekund,

p – trwałość protokołu CSMA – typowa wartość 63 odpowiada 25% prawdopodobieństwu rozpoczęcia transmisji,

R_w – prędkość transmisji łącza przewodowego,

R_{wl} – prędkość transmisji łącza bezprzewodowego.

W przypadku łącza naprzemiennego czas przesyłu danych, zawierających L_D bajtów, wynosi [6]

$$T_p = \left\lceil \frac{L_D}{kN_1} \right\rceil (T_2 + T_{CS} + 2T_{103} + T_{RR}) + \left\lceil \frac{L_D}{N_1} \right\rceil T_I, \quad (1)$$

gdzie

$$T_{RR} = \frac{63}{62} \frac{160}{R_{wl}} \quad (2)$$

oraz

$$T_I = T_{RR} + \frac{63}{62} \frac{8N_1}{R_{wl}} = \frac{63}{62} \frac{160 + 8N_1}{R_{wl}}. \quad (3)$$

Podobnie, w przypadku łącza dwukierunkowego jednoczesnego czas transmisji wynosi [7]:

$$T_p = T_{103} + \left[\frac{L_D}{N_1} \right] \cdot T_I + T_R. \quad (4)$$

2.2. EFEKTYWNA PRZEPUSTOWOŚĆ

Znając T_p dla danego wariantu łącza, można wyznaczyć efektywną prędkość transmisji łączem bezprzewodowym:

$$V_{wl} = \frac{8 \cdot L_D}{T_p}. \quad (5)$$

Z kolei efektywna prędkość transmisji łączem przewodowym – przy założeniu, że każdy znak łącza RS-232 reprezentowany jest przez 10 bitów – wynosi

$$V_w = \frac{8 \cdot R_{wl}}{10}. \quad (6)$$

2.3. OPÓŹNIENIA TRANSMISJI

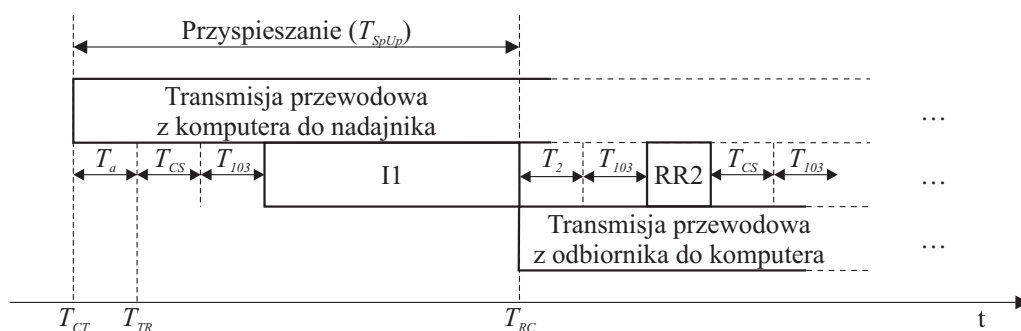
W pewnych zastosowaniach istotna może być nie tylko efektywna prędkość transmisji, lecz także opóźnienia wynikające z buforowania przesyłanych danych i przetwarzania ich formatu. Szczególnie istotne wydaje się opóźnienie od momentu rozpoczęcia transmisji przez nadawcę do momentu rozpoczęcia odbioru przez adresata oraz od momentu zakończenia transmisji przez nadawcę do momentu zakończenia odbioru przez adresata. W dalszej części rozdziału są one określane, odpowiednio, jako opóźnienie rozpoczęcia i zakończenia transmisji.

2.3.1. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji

Opóźnienie rozpoczęcia transmisji, odpowiadające fazie „przyspieszania” na rysunku 1, jest równe sumie czasu T_a wyliczonego według równania (4) oraz czasu transmisji jednej ramki łączem radiowym. Biorąc pod uwagę fakt, że właściwą transmisję ramki poprzedza rywalizacja i włączanie nadajnika radiowego, opóźnienie rozpoczęcia transmisji wynosi

$$T_{SpUp} = \frac{10 \cdot N_1}{R_w} + T_{CS} + T_{103} + \frac{63}{62} \cdot \frac{160 + 8 \cdot N_1}{R_{wl}}. \quad (7)$$

Wyjaśnienie zależności (7) znajduje się na rysunku 2. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji nie zależy od relacji między efektywną przepustowością łącza przewodowego i bezprzewodowego.



Rys. 2. Wyjaśnienie sposobu obliczania czasu przyspieszania (T_{SpUp})

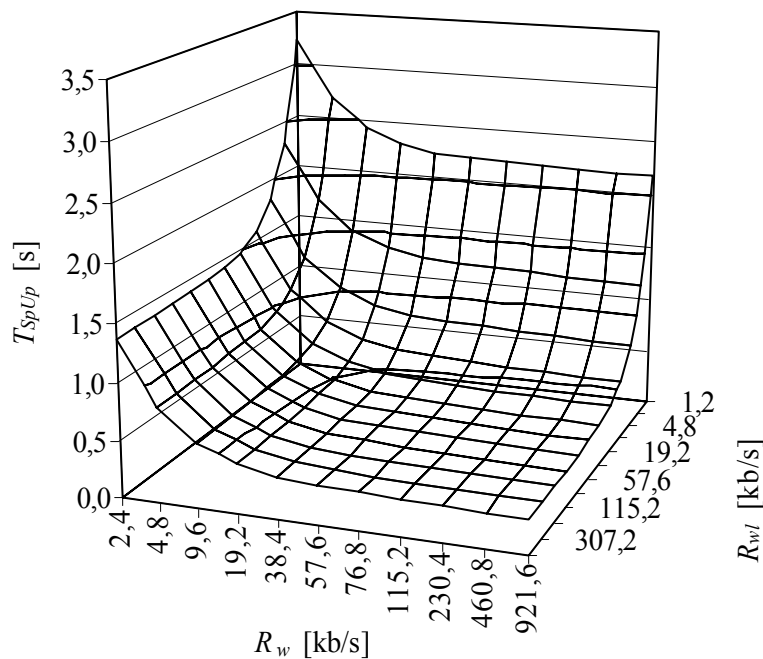
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki obliczeń czasu przyspieszania w zależności od prędkości transmisji łącza przewodowego i bezprzewodowego. Obliczenia wykonano dla najgorszego przypadku, tj. dla najdłuższych możliwych ramek ($N_1=256$), ponieważ wówczas wydłuża się czas T_a . Zgodnie z oczekiwaniami, największe opóźnienie występuje przy najniższych prędkościach transmisji ($R_w=2,4$ kb/s, $R_{wl}=1,2$ kb/s) i wynosi 3,4 s. Najmniejsze z kolei opóźnienie występuje przy największych prędkościach ($R_w=921,6$ kb/s, $R_{wl}=614,4$ kb/s) i wynosi około 0,46 s. Największe zmiany opóźnienia występują przy prędkościach nie przekraczających $R_w=38,4$ kb/s i $R_{wl}=19,2$ kb/s; dalsze zwiększanie prędkości transmisji nie przynosi już znaczącej redukcji opóźnień. Wpływ na to ma składnik $T_{CS}+T_{103}$, którego wartość w rozważanym, typowym przypadku wynosi ok. 0,45 s. W celu dalszej redukcji opóźnienia można:

- zastosować nadajnik-odbiorcę radiowego o krótkim czasie włączania nadajnika (czas T_{103} może się wówczas zmniejszyć z kilkuset do kilkudziesięciu milisekund),

- zwiększyć prawdopodobieństwo transmisji protokołu p -CSMA (przy $p=255$ czas T_{CS} skraca się do 0,05 s),
- zmniejszyć długość szczeliny protokołu p -CSMA (przy $T_{102}=0$ czas T_{CS} także wynosi 0, ale minimalna długość szczeliny może zależeć między innymi od rozległości terytorialnej sieci i zastosowanych urządzeń).

Po uwzględnieniu przedstawionych rozwiązań – z wyjątkiem ostatniego – suma czasów $T_{CS}+T_{103}$ wynosi już tylko około 0,1 s.

Warto zauważyć, że opóźnienie rozpoczęcia transmisji nie zależy od sposobu uzyskania dwukierunkowości łącza, ponieważ uwzględnia czas transmisji tylko jednej ramki informacyjnej, niezależny od typu łącza.



Rys. 3. Czas przyspieszania (T_{SpUp}) dla łącza dwukierunkowego naprzemiennego

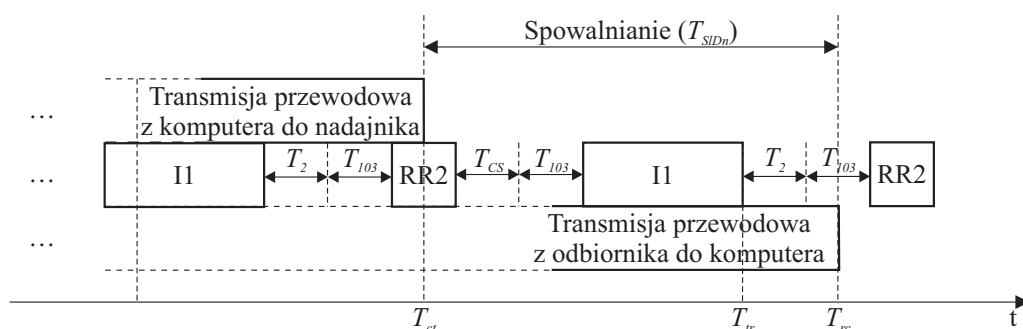
2.3.2. Opóźnienie zakończenia transmisji

Opóźnienie zakończenia transmisji, odpowiadające fazie „spowalniania” na rysunku 1, jest znacznie trudniejsze do oszacowania. Wynika to z faktu buforowania informacji w pamięci kontrolera TNC. Przy odpowiednio pojemnym buforze cała informacja może zostać przesłana po stronie nadającej w sposób ciągły, bez przerw spowodowanych zapełnieniem bufora. W tym czasie część danych jest już jednak przesyłana łączem radiowym. Ze względu na mniejszą prędkość efektywną tego łącza, transmisja

przewodowa po stronie odbiorczej odbywa się w sposób nieciągły. Aby zatem obliczyć moment zakończenia transmisji po stronie odbiorczej, należy uwzględnić moment ukończenia transmisji bezprzewodowej (T_{tr} na rysunku 1) oraz czas transmisji nie więcej niż N_1 znaków łączem przewodowym. Transmisja bezprzewodowa jest opóźniona w stosunku do przesyłu po stronie nadawczej także o czas transmisji N_1 znaków łączem przewodowym ($T_{CT} - T_{TR} = T_a$). Jeśli przesył ten odbywa się w sposób ciągły, można łatwo wyznaczyć moment jego zakończenia ($T_{tr} = T_{TR} + T_p$). Biorąc to pod uwagę, opóźnienie zakończenia transmisji można określić jako:

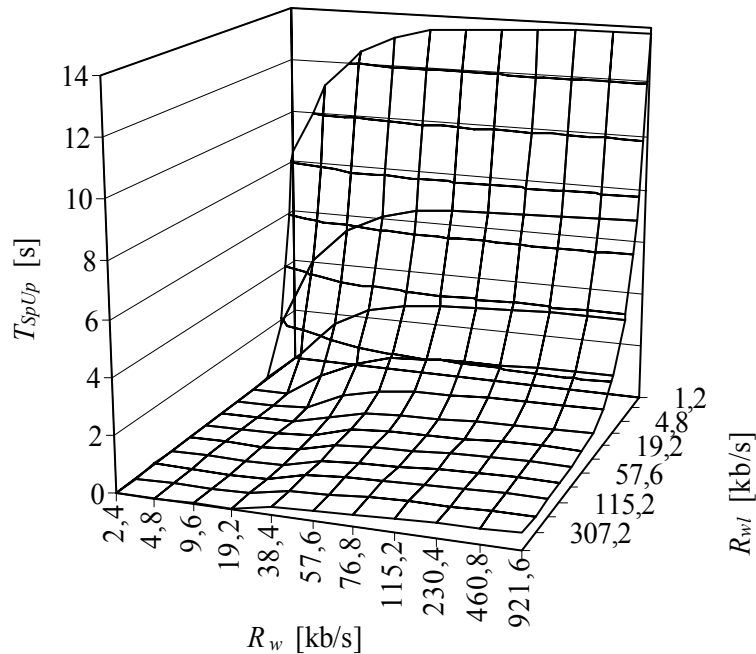
$$T_{SIDn} = 2 \cdot T_a + T_p - \frac{10 \cdot L_D}{R_w}. \quad (8)$$

Wyjaśnienie zależności (8) pokazano na rysunku 4. Warto zauważyć, że transmisja bezprzewodowa może się zakończyć już po upływie czasu T_{SIDn} . Jest to prawdopodobne zwłaszcza w przypadku łącza dwukierunkowego naprzemiennego, jeśli jego prędkość transmisji jest znacznie mniejsza niż prędkość łącza przewodowego. W przypadku łącza dwukierunkowego jednoczesnego nie występuje czas T_2 . Jeśli ostatnia ramka danych jest odpowiednio krótka, odpowiadająca jej ramka potwierdzenia (RR) może zostać wysłana zaraz po zakończeniu transmisji poprzedniego potwierdzenia – nie wystąpi wówczas także czas T_{103} . Opisane zjawisko nie jest jednak istotne z punktu widzenia transmisji pomiędzy komputerami.



Rys. 4. Wyjaśnienie sposobu obliczania czasu spowalniania (T_{SIDn})

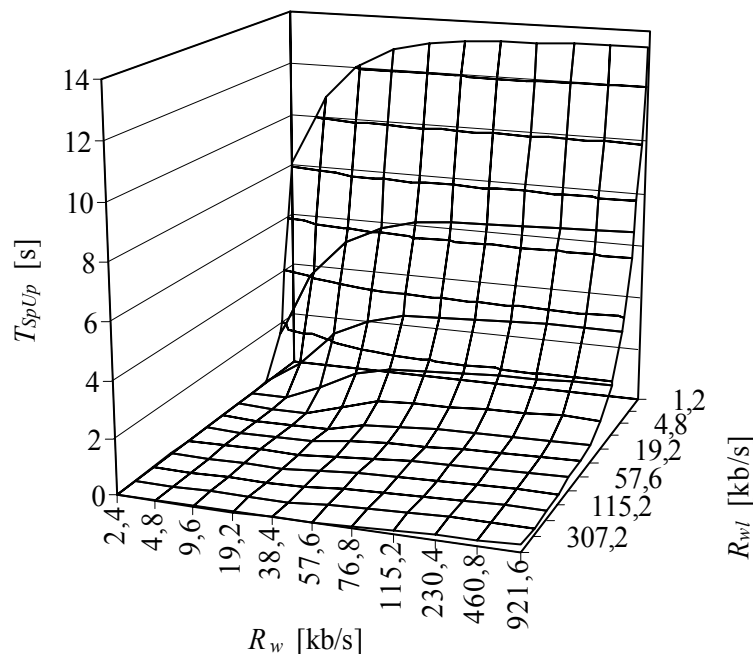
Na rysunku 5 przedstawiono wyniki obliczeń czasu spowalniania w zależności od prędkości transmisji łącza przewodowego i bezprzewodowego dla łącza dwukierunkowego naprzemiennego. Przyjęto następujące wartości parametrów: $N_1=256$, $k=7$, $L_D=1792$. Ostatnia z tych wartości jest iloczynem dwóch poprzednich, co zapewnia maksymalną wydajność protokołu AX.25. Nie jest to zatem najgorszy przypadek – występuje on dla $N_1=1$ oraz $k=1$, ale czas spowalniania i tak zależy przede wszystkim od rozmiaru przesyłanej informacji.

Rys. 5. Czas spowalniania (T_{SIDm}) dla łącza dwukierunkowego naprzemiennego

Najniższe wartości opóźnienia występują przy małych prędkościach łącza przewodowego ($R_w \leq 19,2$ kb/s) i dużych – bezprzewodowego ($R_w \geq 38,4$ kb/s), ponieważ wówczas efektywna przepustowość łącza bezprzewodowego jest większa, niż przewodowego. Dla takiego przypadku przyjęty model nie prowadzi do prawidłowych wartości, gdyż obliczone opóźnienia są ujemne. Należy wówczas założyć, że czas spowalniania nie powinien być krótszy od czasu przyspieszania, ponieważ odpowiada on także czasowi transmisji ramki informacyjnej zawierającej N_1 bajtów danych oraz transmisji tych danych łączem przewodowym.

Największe opóźnienia występują przy małych prędkościach łącza bezprzewodowego ($R_w \leq 19,2$ kb/s) i dużych – przewodowego ($R_w \geq 38,4$ kb/s). O ile jednak duża prędkość łącza przewodowego powoduje wzrost opóźnienia najwyżej do około 1 s, o tyle mała prędkość łącza bezprzewodowego bardziej sprzyja wzrostowi opóźnienia – przy $R_w = 1,2$ kb/s opóźnienie przekracza 10 s praktycznie dla wszystkich R_w .

W przypadku łącza dwukierunkowego jednoczesnego (rys. 6) czas spowalniania ma charakterystykę podobną jak łącza naprzemiennego, największe i najmniejsze opóźnienie występują bowiem dla tych samych wartości parametrów. Nieco większy jest natomiast obszar, w którym przyjęty model wylicza ujemne wartości opóźnień. Jest to spowodowane większą przepustowością efektywną łącza dwukierunkowego jednoczesnego, w związku z czym większa, niż w przypadku łącza naprzemiennego, wartość prędkości transmisji łącza przewodowego charakteryzuje się niższą przepustowością efektywną.



Rys. 6. Czas spowalniania (T_{SIDn}) dla łącza dwukierunkowego jednoczesnego

3. PODSUMOWANIE

W rozdziale przeprowadzono teoretyczną analizę opóźnień transmisji, wynikających z faktu użycia kontrolerów TNC jako urządzeń transmisyjnych. Obliczone zależności wynikają z cech protokołu AX.25, używanego jako warstwa liniowa w sieci Packet Radio. Protokół ten, podobnie jak i kontrolery TNC, można jednak wykorzystywać także i w innych zastosowaniach, wykraczających poza tradycyjny sposób ich użycia. Przykładem takich zastosowań mogą być sieci telemetryczne oraz pomiarowo-kontrolne, szczególnie takie, w których konieczna jest łączność bezprzewodowa, a modyfikacja istniejących urządzeń jest trudna bądź niemożliwa.

Przedstawione wyniki obliczeń pozwalają ocenić, czy wprowadzenie kontrolerów TNC do istniejącej sieci nie naruszy jej parametrów czasowych, na przykład czasu cyklu sieci czy czasu pojedynczej wymiany informacji. W pewnych przypadkach możliwe jest dostrojenie niektórych parametrów sieci. Wówczas obliczenia będą przydatne do oszacowania nowych wartości parametrów.

Należy jednak pamiętać, iż przedstawione wyniki są efektem obliczeń teoretycznych, które zakładają idealne warunki transmisji. W rzeczywistej sieci warunki takie mogą być trudne do spełnienia. Z tego powodu konieczna jest praktyczna wery-

fikacja uzyskanych rezultatów w doświadczalnej sieci Packet Radio, zawierającej kontrolery TNC. Biorąc pod uwagę wcześniejsze badania [8] można się spodziewać, że wyniki doświadczalne mogą zależeć między innymi od rodzaju kontrolera TNC, zwłaszcza od użytego w nim mikroprocesora i częstotliwości jego taktowania, a także od rodzaju i wersji oprogramowania sterującego jego pracą.

LITERATURA DO ROZDZIAŁU

- [1] Beech W.A., Nielsen D.E., Taylor J., *AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio*, Tucson Amateur Packet Radio Corporation, 1997.
- [2] Dąbrowski A., *Amatorska komunikacja cyfrowa*, Warszawa. PWN. 1994.
- [3] Karn P., Price H., Diersing R., *Packet Radio in the Amateur Service*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 3, No. 3, May 1985, pp. 431-439.
- [4] Wade I. (ed.), *Automatic Position Reporting System. APRS Protocol Reference. Protocol Version 1.0*, Tucson Amateur Packet Radio Corporation. Tucson 2000.
- [5] Zieliński B., *Ocena efektywności protokołu AX.25*, w: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.): *Współczesne aspekty sieci komputerowych*. t. 1. WKŁ, Warszawa 2008, s. 127-136.
- [6] Zieliński B., *Model analityczny kontrolera TNC*, w: Mazur Z., Huzar Z. (red.), *Modele i zastosowania systemów czasu rzeczywistego*, WKŁ, Warszawa 2008, s. 127-136.
- [7] Zieliński B., *Efficiency estimation of AX.25 protocol*, Theoretical and Applied Informatics, 2008, 20, 3, s. 199-214.
- [8] Zieliński B., *Porównanie wydajności różnych wersji kontrolerów TNC*, w: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.), *Współczesne aspekty sieci komputerowych*, t. 1. WKŁ, Warszawa 2008, s. 137-146.