

## ROZDZIAŁ 22

### WPŁYW KONTROLERA TNC NA OPÓŹNIENIA W SIECI PACKET RADIO

Bartłomiej ZIELIŃSKI<sup>1</sup>

Kontrolery TNC są układami mikroprocesorowymi, służącymi do przesyłu informacji w sieci Packet Radio. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań opóźnień rozpoczęcia i zakończenia transmisji w doświadczalnej sieci Packet Radio, uzyskane przy użyciu różnych typów kontrolerów TNC. Wyniki te skonfrontowano z wynikami obliczeń z wykorzystaniem wprowadzonego wcześniej analitycznego modelu kontrolera TNC. Przedstawione rozważania mogą posłużyć do oceny możliwości zastosowania kontrolerów TNC w określonych aplikacjach uwarunkowanych czasowo.

#### 1. WPROWADZENIE

Sieć Packet Radio [6] można rozpatrywać jako przykład prostej bezprzewodowej sieci rozległej. Sieć ta powstała w początku lat 80-tych XX wieku, a więc w czasach, gdy inne popularne obecnie środki łączności, takie jak sieć Internet i telefonia komórkowa, nie były jeszcze szeroko dostępne. Niestety, jako dzieło radioamatorów, sieć Packet Radio nigdy nie była rozwiązaniem popularnym, o czym może świadczyć niewielka ilość literatury poruszającej 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 (ang. *Automatic Position Reporting System*) [13].

Kompletna stacja sieci Packet Radio zawiera komputer (lub inne urządzenie DTE) oraz nadajnik-odbiorcę 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 do-

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Instytut Informatyki; ul. Akademicka 16, 44-101 Gliwice; Bartlomiej.Zielinski@polsl.pl.

łączenie układów zewnętrznych. Przykładem takiego układu jest kontroler TNC (ang. *Terminal Node Controller*).

W poprzednich pracach przedstawiono analityczny model protokołu AX.25 [15], stosowanego jako warstwa liniowa w sieci Packet Radio [1]. Model ten pozwala oszacować wpływ poszczególnych parametrów protokołu na jego wydajność i, co za tym idzie, efektywną prędkość transmisji widzianą przez użytkownika. Przedstawiono również model analityczny kontrolera TNC [16]. Model ten pozwala oszacować wpływ obecności kontrolera na parametry użytkowe sieci, jak np. efektywna prędkość czy opóźnienia transmisji, a także oszacować rozmiar bufora kontrolera, niezbędny dla spełnienia wymagań niektórych aplikacji w określonych warunkach. W pracy [19] przeprowadzono natomiast dokładniejszą analizę opóźnień transmisyjnych wynikających z użycia kontrolerów TNC. W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów opóźnień rozpoczęcia i zakończenia transmisji w doświadczalnej sieci Packet Radio, zbudowanej z wykorzystaniem dostępnych w handlu kontrolerów. Celem tych badań jest określenie wpływu cech użytego kontrolera na osiągi sieci. Wyniki te można potraktować jako próbę praktycznej weryfikacji analitycznego modelu pracy kontrolera TNC.

## 2. ANALIZA TEORETYCZNA

Analiza pracy kontrolera TNC [19] dotyczy przypadku przesyłania informacji między dwoma komputerami (lub innymi urządzeniami), połączonymi ze sobą za pośrednictwem dwóch kontrolerów TNC. W takim przypadku – 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.

Dla potrzeb analizy założmy, iż transmisja przebiega w warunkach idealnych. Przyjmijmy zatem następujące założenia:

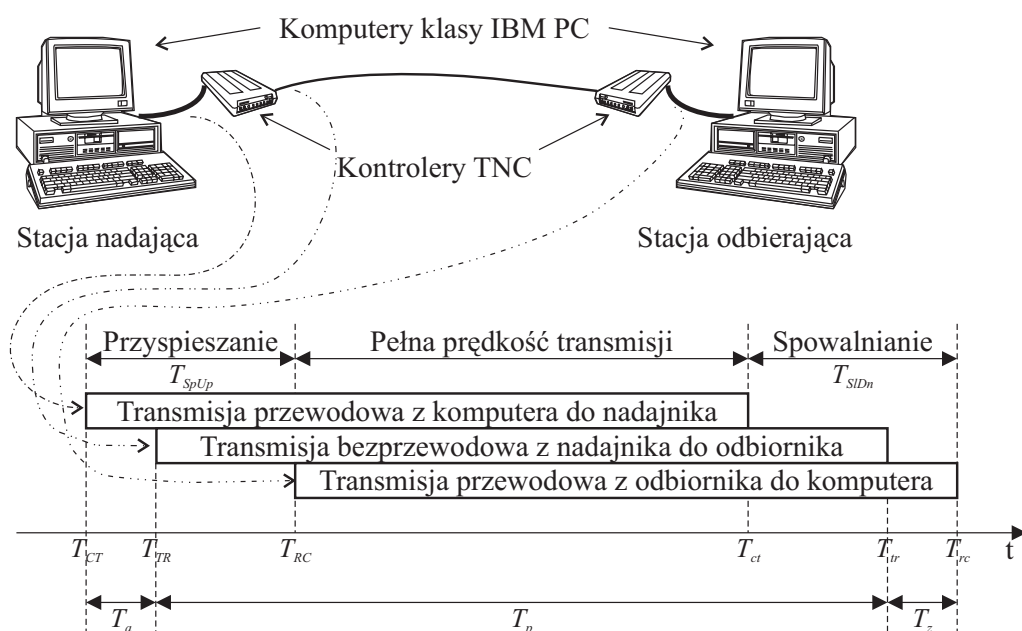
- sieć składa się z dwóch stacji, komunikujących się między sobą łączem bezprzewodowym dwukierunkowym naprzemiennym (ang. *half-duplex*),
- transmisja wolna jest od kolizji i błędów transmisji, nie występują zatem retransmisje,
- czas przetwarzania ramek w kontrolerze TNC jest pomijalny.

### 2.1. CZAS TRANSMISJI I PRZEPUSTOWOŚĆ W PROTOKOLE AX.25

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

- $k$  – maksymalna wielkość okna (liczba ramek wspólnie potwierdzanych) – zakres  $1 \div 7$ ,

- $N_1$  – maksymalna pojemność pola informacyjnego ramki – zakres 1÷256 B,
- $T_2$  – 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 od kilkudziesięciu do kilkuset milisekund,
- $p$  – trwałość protokołu CSMA – typowa wartość 63 odpowiada 25% prawdopodobieństwu rozpoczęcia transmisji,
- $R_w$  – prędkość transmisji łącza przewodowego [b/s],
- $R_{wl}$  – prędkość transmisji łącza bezprzewodowego [b/s].



Rys. 1. Konfiguracja rozważanej sieci i etapy transmisji

W przypadku łącza dwukierunkowego naprzemiennego czas przesyłu danych, zawierających  $L_D$  bajtów, wynosi [16]

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

gdzie  $T_{RR}$  – czas transmisji ramki potwierdzenia (ang. *Receiver Ready*), równy

$$T_{RR} [s] = \frac{63 \cdot 160 [b]}{62 R_{wl} [b/s]} \quad (2)$$

oraz  $T_I$  – czas transmisji ramki informacyjnej (ang. *Information*), równy

$$T_I = T_{RR} + \frac{63 \cdot 8N_1}{62 R_{wl}} = \frac{63 \cdot 160 [b] + 8N_1}{62 R_{wl} [b/s]}. \quad (3)$$

We wzorze (1)  $T_{CS}$  oznacza czas uzyskiwania dostępu do łącza, który, wobec poczynionych założeń o idealnych warunkach transmisji, można określić jako

$$T_{CS} = \frac{256 \cdot T_{102}}{2(p+1)}. \quad (4)$$

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

$$V_{wl} [b/s] = \frac{8 \cdot L_D}{T_p}. \quad (5)$$

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

$$V_w [b/s] = \frac{8 \cdot R_w}{10}. \quad (6)$$

## 2.2. OPÓŹNIENIA TRANSMISJI

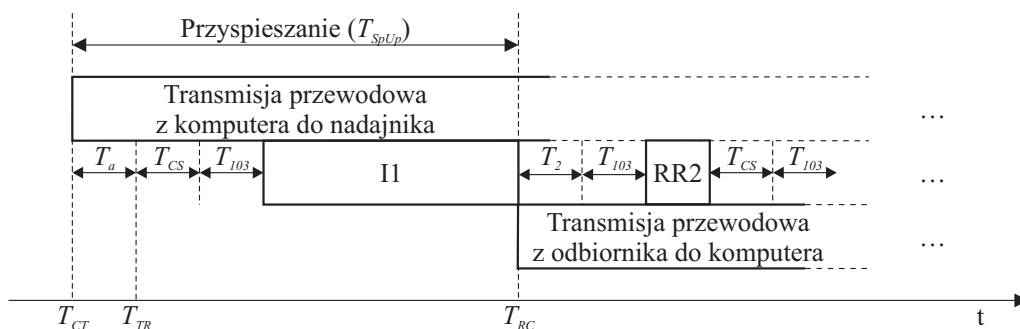
W pewnych zastosowaniach istotna może być nie tylko efektywna prędkość transmisji, lecz także opóźnienia wynikające z buforowania przesyłanych danych i przetwarzania ich formatu. Szczególnie istotne wydaje się opóźnienie od momentu rozpoczęcia transmisji przez nadawcę do momentu rozpoczęcia odbioru przez 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.

### 2.2.1. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji

Opóźnienie rozpoczęcia transmisji, odpowiadające fazie „przyspieszania” na rys. 1, jest równe sumie czasu  $T_a$  wyliczonego według równania (4) oraz czasu transmisji jednej ramki łączem radiowym. Biorąc pod uwagę, 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 rys. 2. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji nie zależy od relacji między efektywną przepustowością łącza przewodowego i bezprzewodowego.



Rys. 2. Wyjaśnienie obliczenia czasu przyspieszania ( $T_{SpUp}$ )

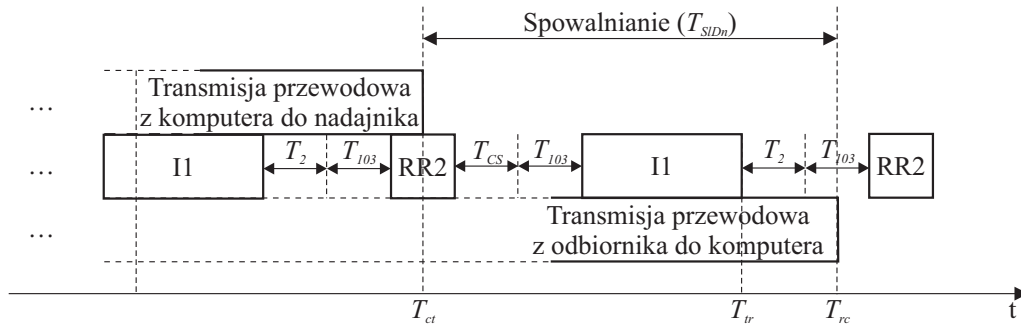
### 2.2.2. Opóźnienie zakończenia transmisji

Opóźnienie zakończenia transmisji, odpowiadające fazie „spowalniania” na rys. 1, jest znacznie trudniejsze do oszacowania. Wynika to z faktu buforowania informacji w pamięci kontrolera TNC. Przy odpowiednio pojemnym buforze cała informacja przesłana może zostać przesłana po stronie nadawczej w sposób ciągły, bez przerw spowodowanych zapelnieniem 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 rys. 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. Jeśli przesył ten odbywa się w sposób ciągły,

można łatwo wyznaczyć moment jego zakończenia ( $T_{tr} = T_{TR} + T_p$ ). Biorąc powyższe pod uwagę, opóźnienie zakończenia transmisji można określić jako

$$T_{SIDn} = 2 \cdot \frac{10 \cdot N_1}{R_w} + T_p - \frac{10 \cdot L_D}{R_w}. \quad (8)$$

Wyjaśnienie zależności (8) pokazano na rys. 3. Warto zauważyć, że transmisja bezprzewodowa może się zakończyć się już po upływie czasu  $T_{SIDn}$ . Jest to szczególnie prawdopodobne 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; w takim przypadku nie wystąpi także czas  $T_{103}$ . Opisane zjawisko nie jest jednak istotne z punktu widzenia transmisji pomiędzy komputerami.



Rys. 3. Wyjaśnienie obliczenia czasu spowalniania ( $T_{SIDn}$ )

### 3. WYNIKI DOŚWIADCZALNE

Pomiary rzeczywistych opóźnień transmisji w sieci Packet Radio prowadzono w doświadczalnej sieci, złożonej z dwóch kontrolerów TNC, podłączonych do komputera osobistego klasy IBM PC za pomocą łącza szeregowego RS-232 lub USB. Transmisja między kontrolerami TNC także odbywała się przewodowo w celu uniknięcia możliwego wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na transmisję radiową, a co za tym idzie – na uzyskane wyniki. Można zatem przyjąć, iż badania prowadzone były w warunkach możliwie jak najbardziej zbliżonych do idealnych. Jedynym bowiem czynnikiem obniżającym wydajność transmisji są wówczas właściwości kontrolerów TNC,

a w szczególności ich moc obliczeniowa i szczegóły implementacji protokołu. Wybrane parametry użytych kontrolerów zestawiono w tabeli 1 [18]. Konfigurację sieci i etapy transmisji przedstawiono na rys. 1.

### 3.1. OPÓŹNIENIE ROZPOCZĘCIA TRANSMISJI

Opóźnienie rozpoczęcia transmisji mierzono, przesyłając plik o rozmiarze 256 B przy maksymalnej wielkości okna ( $k=7$ ) dla różnych maksymalnych pojemności pola informacyjnego ramki ( $N_1$ ). W każdym teście oba badane kontrolery TNC były tego samego typu i działały pod kontrolą tego samego typu oprogramowania. Prędkości transmisji wynosiły:  $R_w=9,6$  kb/s,  $R_{wl}=1,2$  kb/s. Prędkości te wybrano ze względu na większą dokładność pomiarów przy małej prędkości transmisji. Zmierzony czas przyspieszania odpowiada opóźnieniu, upływającemu od chwili rozpoczęcia transmisji w stacji nadającej do chwili otrzymania pierwszego znaku w stacji odbierającej. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 4.

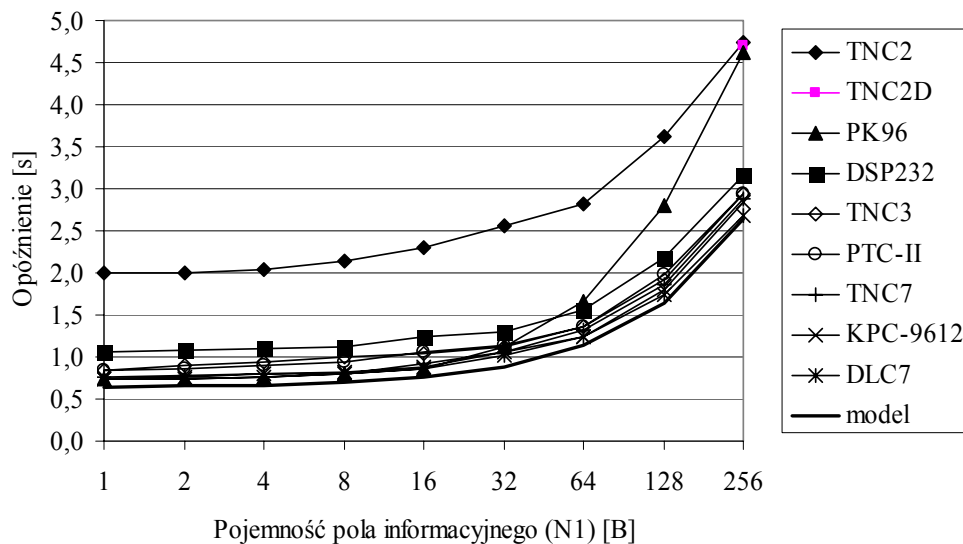
Typ	Producent	Procesor	$f_{clk}$ [MHz]	ROM [KB]	RAM [KB]	$R_w$ [kb/s]	$R_{wl}$ [kb/s]
TNC2	?	Z80	2,4576	32	16-32	9,6	1,2
TNC2D [6]	Muel	Z80	4,9152	2×32	32	19,2	1,2
TNC2H [11]	Symek	Z80	9,8304	2×32	32	38,4	9,6
Spirit-2 Std. [9]	Paccomm	Z80	9,8304	2×32	32	57,6	57,6
Spirit-2 HS	Paccomm	Z80	19,6608	2×32	32	57,6	57,6
KPC-9612+ [5]	Kantronics	68HC11	16,0000	128	128-512	38,4	38,4
PK-96 [12]	Timewave	Z180	12,2880	64	128	38,4	38,4
KAM-XL	Kantronics	68HC902	9,8304	512	512	38,4	9,6
DSP-232	Timewave	68340	3,6864	128	256	19,2	9,6
PTC-II [10]	SCS	68360	25,0000	256-512	512-2048	115,2	19,2
TNC3S [11]	Symek	68302	14,7456	256-1024	64-2048	115,2	614,4
TNC31S [11]	Symek	68302	14,7456	128-512	128-512	115,2	614,4
TNC4e [4]	HBTron	68EN302	19,6608	1024	4096	115,2	1228,8
TNC7multi	NtG	LPC2106	58,9824	128	64	115,2	115,2
DLC7 [8]	NtG	S3C4530	49,1520	4096	32768	115,2	1536,0

Tabela 1. Wybrane parametry niektórych kontrolerów TNC ([18], str. 139)

Na przedstawionym wykresie widać, że wraz ze zwiększającą się pojemnością pola informacyjnego ramki rośnie mierzone opóźnienie. Jest to zgodne z oczekiwaniami, gdyż przesyła się wówczas większą ilość informacji, dłuższy jest także czas przygotowania ramki do wysłania. Drugi z wymienionych czynników jest szczególnie istotny w przypadku kontrolerów TNC starszych typów, zbudowanych z wykorzystaniem mikroprocesorów 8-bitowych, szczególnie Zilog Z-80 (np. TNC2). Różnice między kontrolerami, zawierającymi mikroprocesory 16- i 32-bitowe, są znacznie

mniej, a ich osiągi tylko nieznacznie odbiegają od wartości wyznaczonych według modelu analitycznego. Nieco zaskakująco zachowuje się kontroler PK96 z mikroprocesorem Zilog Z180, który przy mniejszych wartościach  $N_1$  zachowuje się jak kontrolery szybsze, jednak gdy wartość ta przekracza 32, widać znaczny wzrost opóźnienia. Osiąga ono nawet wartości zmierzone dla najwolniejszego kontrolera TNC2.

Podczas testów udało się także wykazać, zgodnie z oczekiwaniami, niezależność czasu przyspieszania od maksymalnej wielkości okna. Jest to oczywiste, biorąc pod uwagę, iż transmisja bezprzewodowa może się zacząć, gdy kontroler zbierze w buforze  $N_1$  znaków do wysłania. Nie musi on zatem czekać na  $k \cdot N_1$  znaków, a zatem  $k$  nie ma wpływu na opóźnienie rozpoczęcia transmisji. Podczas transmisji pierwszej ramki kontroler może zebrać kolejne  $N_1$  znaków, które będą wysłane w kolejnej ramce. Proces ten będzie trwał do chwili, gdy albo skończy się pojemność bufora, albo przesłana zostanie cała informacja.



Rys. 4. Zmierzony czas przyspieszania ( $T_{SpUp}$ ) dla różnych kontrolerów TNC

### 3.2. OPÓŹNIENIE ZAKOŃCZENIA TRANSMISJI

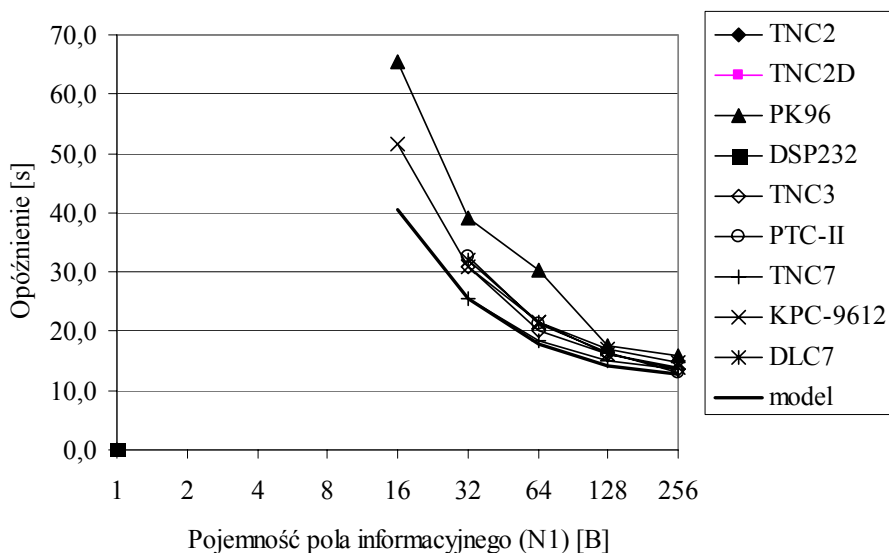
Opóźnienie zakończenia transmisji mierzono, przesyłając plik o rozmiarze 1792 B przy maksymalnej wielkości okna ( $k=7$ ) dla różnych maksymalnych pojemności pola informacyjnego ramki ( $N_1$ ). Wybrany rozmiar pliku jest iloczynem największych możliwych wartości  $k$  oraz  $N_1$ , zapewnia zatem najwyższą teoretyczną efektywność protokołu, a zatem i najwyższą efektywną prędkość transmisji. Od prędkości tej zależy opóźnienie zakończenia transmisji. W każdym teście oba badane kontrolery TNC były



tego samego typu i działały pod kontrolą tego samego typu oprogramowania. Prędkości transmisji wynosiły:  $R_w=9,6$  kb/s,  $R_{w'}=1,2$  kb/s. Prędkości te wybrano ze względu na większą dokładność pomiarów przy małej prędkości transmisji. Zmierzony czas spowalniania odpowiada opóźnieniu, wpływającemu od chwili zakończenia transmisji w stacji nadającej do chwili otrzymania ostatniego znaku w stacji odbierającej. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5. Pominięto na nim wyniki uzyskane dla  $N_1 < 16$  ze względu na to, że wartości opóźnień były wówczas bardzo duże.

Podczas badań okazało się, że niektóre kontrolery TNC wstrzymują transmisję na łączu przewodowym po stronie nadającej, zapewne po to, aby zapobiec przepełnieniu bufora. Są to kontrolery: TNC2, TNC2D oraz DSP-232. W przypadku dwóch pierwszych kontrolerów zachowanie to można uzasadnić małą pojemnością pamięci RAM (16÷32 KB). Trzeci kontroler jest jednak wyposażony w pamięć o większej pojemności (256 KB), tak więc za przyczynę opisanego zachowania kontrolera można uznać celowe ograniczenia wprowadzone w oprogramowaniu sterującym jego pracą. Ponieważ w przyjętym modelu analitycznym założono, iż transmisja po stronie nadającej powinna być ciągła, wyniki uzyskane dla tych kontrolerów odrzucono jako niemiarodajne.

Podobne ograniczenia występują także w innych typach kontrolerów – zwiększenie pojemności pamięci RAM nie wpływa na zmianę zachowania kontrolera. Tym niemniej, pojemność bufora okazała się wystarczająca dla pomieszczenia 1792 B, co pozwoliło na zachowanie ciągłości transmisji po stronie nadawcy.



Rys. 5. Zmierzony czas spowalniania ( $T_{SIDn}$ ) dla różnych kontrolerów TNC

Jak widać na przedstawionym wykresie, zmierzone wartości opóźnień zależą od parametrów kontrolera TNC. Warto zauważyć, że pomiędzy kontrolerem KPC-9612, wyposażonym w mikroprocesor 8-bitowy, a TNC3, DLC7 i TNC7, zawierającymi mikroprocesory 16- i 32-bitowe, różnice nie są znaczne. Jedyne układy PK96 jest zauważalnie wolniejszy. Może to wynikać nie tylko z różnic w mocy obliczeniowej, lecz także drobnych różnic w implementacji protokołu. Mała moc obliczeniowa kontrolera, podobnie jak i niewystarczająca optymalizacja oprogramowania, wydłużają czas przygotowania ramek do transmisji.

Wiele różnic w implementacji protokołu można zaobserwować, gdy odbierający kontroler pracuje w trybie monitorowania sieci. Przykładowo, kontroler KPC-9612, rozpoczynając transmisję, stopniowo zwiększa rzeczywistą wielkość okna od 1 do ustawionej wartości  $k$  w kilku krokach (np. 1, 4, 7). Z kolei kontrolery TNC3, TNC7 i DLC7 stosują maksymalną ustawioną wielkość okna od samego początku.

Kolejnym czynnikiem, który może mieć wpływ na opóźnienie zakończenia transmisji, jest czas  $T_2$  oraz reakcja na bit P/F (ang. *Poll/Final*), występujący w polu sterującym ramki informacyjnej. Gdy bit P/F jest ustawiony, odbierający kontroler wysyła w odpowiedzi ramkę RR natychmiast. W przeciwnym przypadku czeka przez czas  $T_2$  na ewentualne kolejne ramki informacyjne i dopiero w przypadku braku takich wysyła potwierdzenie (ramkę RR). W czasie  $T_2$  nie zachodzi zatem wymiana informacji, co zmniejsza efektywną prędkość transmisji i zwiększa opóźnienie jej zakończenia. Obecnie obowiązująca definicja protokołu [1] ani nie wymusza, ani nie zabrania oznaczania ostatniej ramki okna ustawionym bitem P/F, co pozostawia pewną dowolność interpretacji. Można zatem przyjąć, iż jest to czynnik zależny wyłącznie od oprogramowania sterującego pracą kontrolera TNC, a mający dość istotne znaczenie zarówno dla efektywnej prędkości transmisji [18], jak i dla opóźnienia jej zakończenia.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki doświadczalne wykazują wystarczającą dokładność analitycznego modelu opisującego zachowanie kontrolera TNC. Wyniki uzyskane dla poszczególnych kontrolerów odbiegają w różnym stopniu od rezultatów obliczonych za pomocą modelu. Może to świadczyć o dużej zależności opóźnień transmisji – szczególnie opóźnienia zakończenia transmisji – zarówno od mocy obliczeniowej kontrolera, jak i od szczegółów implementacji protokołu, zależnych od oprogramowania sterującego jego pracą. Opisane badania mogą zatem posłużyć jako pomoc przy doborze odpowiedniego kontrolera TNC dla danej aplikacji. Pozwalają także określić, czy zastosowanie kontrolera TNC jest w ogóle możliwe ze względu na wymagania czasowe sieci oraz możliwość ich niedotrzymania po wprowadzeniu kontrolerów. Należy pa-

miętać też o tym, że wyniki uzyskano w warunkach idealnych, a zatem można je traktować jako minimalne wartości opóźnień.

Kontroler TNC można uznać za model konwertera protokołów, umożliwiającego wprowadzenie łączności bezprzewodowej do istniejącej sieci bez konieczności modyfikacji już pracujących w niej urządzeń [14]. Przedstawione wyniki pokazują jednak, że odbywa się to kosztem pogorszenia – nieraz znacznego – parametrów czasowych takiej zintegrowanej sieci.

Bardziej szczegółowe porównanie właściwości programów sterujących pracą TNC można uzyskać wówczas, gdy istnieje platforma sprzętowa, dla której dostępnych jest wiele rodzajów i wersji oprogramowania. Platformę taką tworzy rodzina kontrolerów zawierających mikroprocesor Z80. Niektóre wyniki [20] pokazują, że oprogramowanie sterujące pracą kontrolera TNC może mieć podobny wpływ na wydajność sieci, jak moc obliczeniowa kontrolera. Można zatem oczekiwać, iż opóźnienia transmisji mogą się różnić, zależnie od właściwości oprogramowania, pod kontrolą którego pracują użyte w testach kontrolery. Badania, które mogą wykazać tę zależność, będą wykonane w niedalekiej przyszłości.

#### 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] Giese H. G., Gülzow P.: 'C'-Sources for TheFirmware for TNC-2. [@:] <http://www.nordlink.org/eng/index.htm>.
- [4] Harald Baumgart - Entwicklung elektronischer Komponenten. [@:] <http://www.hbtron.de/>.
- [5] Kantronics Radio Modems/TNC's. [@:] <http://www.kantronics.com/modems.html>.
- [6] 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.
- [7] Muel – Radiowe systemy transmisji danych. [@:] <http://www.muel.internet.pl/>.
- [8] Nachrichtentechnik Marten Güttner. [@:] <http://www.nt-g.de/>.
- [9] PacComm Packet Radio Systems. [@:] <http://www.paccomm.com/>.
- [10] SCS - the PACTOR creators – controller. [@:] <http://www.scs-ptc.com/controller.html>.
- [11] Symek Packet-Radio. [@:] <http://www.symek.de/>.
- [12] TimeWave Main Page. [@:] <http://www.timewave.com/>.
- [13] Wade I. (ed.): Automatic Position Reporting System. APRS Protocol Reference. Protocol Version 1.0. Tucson Amateur Packet Radio Corporation. Tucson 2000.
- [14] Zieliński B.: Using TNC controller as a model of protocol converter. In: Pułka A., Hrynkiewicz E., Kłosowski P. (eds.): Proceedings of IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems PDS2004, Kraków 2004, pp. 269-273.

- [15]Zieliński B.: Ocena efektywności protokołu AX.25. W: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.): Współczesne aspekty sieci komputerowych. Tom 1. WKŁ, Warszawa 2008, rozdz. 12, pp. 127-136.
- [16]Zieliński B.: Model analityczny kontrolera TNC. W: Mazur Z., Huzar Z. (red.): Modele i zastosowania systemów czasu rzeczywistego. WKŁ, Warszawa 2008, rozdz. 11, pp. 127-136.
- [17]Zieliński B.: Efficiency estimation of AX.25 protocol. Theoretical and Applied Informatics, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 199-214.
- [18]Zieliński B.: Porównanie wydajności różnych wersji kontrolerów TNC. W: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.): Współczesne aspekty sieci komputerowych. Tom 1. WKŁ, Warszawa 2008, rozdz. 13, pp. 137-146.
- [19]Zieliński B.: Analiza opóźnień w sieci Packet Radio zawierającej kontrolery TNC. W: Zieliński Z. (red.): Systemy czasu rzeczywistego. Postępy badań i zastosowania. WKŁ, Warszawa 2009, rozdz. 29, pp. 333-342.
- [20]Zieliński B.: Performance Evaluation of Various Implementations of AX.25 Protocol. Theoretical and Applied Informatics, Vol. 21 (2009), No. 3-4, pp. 225-237.