

ROZDZIAŁ 11

MODEL ANALITYCZNY KONTROLERA TNC

Kontrolery TNC są układami mikroprocesorowymi, służącymi do przesyłu informacji w sieci Packet Radio. Sieć ta może być rozważana jako przykład bezprzewodowej sieci rozległej. Na bazie infrastruktury Packet Radio można tworzyć sieci telemetryczne i pomiarowo-kontrolne, wykorzystujące protokół APRS. Kontrolery TNC mogą także współpracować z innymi sieciami tego typu. W niniejszym rozdziale przedstawiono analityczny model pracy kontrolera TNC, uwzględniający podstawowe zależności wynikające z właściwości protokołu transmisyjnego oraz zasady pracy kontrolera. Model ten może posłużyć do oceny wydajności poszczególnych typów kontrolerów.

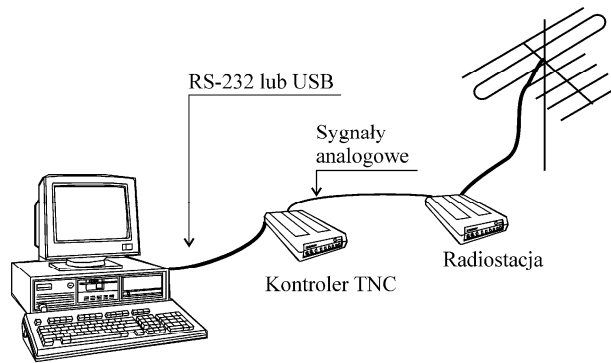
1. WPROWADZENIE

Sieć Packet Radio 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*) [5].

Kompletna stacja sieci Packet Radio zawiera komputer (lub inne urządzenie DTE) oraz nadajnik-odbiorcę radiowy [1]. 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 (ang. *Terminal Node Controller*).

2. KONTROLERY TNC

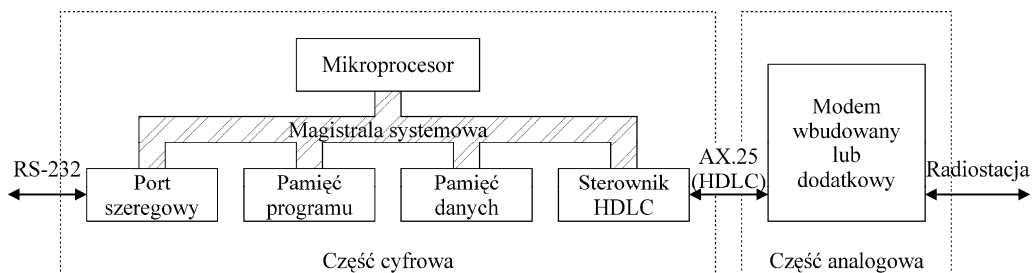
Kontroler TNC jest autonomicznym układem mikroprocesorowym, zapewniającym możliwość podłączenia urządzenia DTE (np. komputera) do sieci Packet Radio. Budowę typowej stacji sieci Packet Radio, zbudowanej z wykorzystaniem kontrolera TNC, pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Budowa stacji sieci Packet Radio zawierającej kontroler TNC

2.1. BUDOWA KONTROLERA TNC

Kontroler TNC składa się z części cyfrowej, zapewniającej przetworzenie postaci danych napływających z komputera zgodnie z wymogami sieci i zasadami działania protokołu AX.25, oraz części analogowej, pełniącej funkcje modemu i umożliwiającej sterowanie radiostacją bezpośrednio z kontrolera. Schemat blokowy kontrolera przedstawiono na rys. 2. Dokładniejsze omówienie właściwości poszczególnych typów kontrolerów znajduje się w pracy [6].



Rys. 2. Schemat blokowy kontrolera TNC

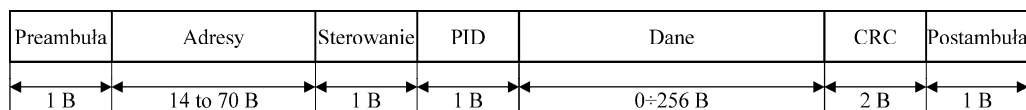
2.2. FUNKCJE KONTROLERA TNC

Podstawowym zadaniem kontrolera TNC jest takie przetworzenie postaci danych napływających z dołączonego komputera, aby odpowiadały one wymogom protokołu AX.25, stosowanego w sieci Packet Radio. W tym celu kontroler buforuje dane, a następnie umieszcza je w odpowiednio uformowanych ramkach. Podczas wysyłania łączem radiowym stosowana jest modulacja odpowiednia do ustalonej prędkości transmisji. Umożliwia ona bezpośrednie podłączenie radiostacji i sterowanie jej pracą z kontrolera. Można zatem powiedzieć, że TNC jest układem odpowiedzialnym za prawidłową realizację protokołu AX.25, jednak sam nie ma możliwości komunikacji radiowej. Dzięki takiemu podejściu TNC można stosować nie tylko w pasmach radioamatorskich.

Opisane funkcje kontrolera nadzorowane są przez odpowiednie oprogramowanie. Jest ono odpowiedzialne za prawidłową realizację mechanizmów sieciowych, a ponadto zawiera odpowiedni interfejs użytkownika, umożliwiający między innymi konfigurowanie niektórych parametrów kontrolera i łącza radiowego, a także zarządzanie połączeniami z innymi stacjami sieci. W zależności od użytego kontrolera, dostępne są różne sposoby komunikacji komputera (użytkownika) z kontrolerem. Mogą one być optymalizowane pod kątem współpracy kontrolera z człowiekiem (zbiory poleceń TAPR i TF) lub urządzeniem (tryby HOST i KISS). Dostępność poszczególnych trybów pracy zależy od typu kontrolera.

2.3. POTOKÓŁ AX.25

Protokół AX.25, pełniący funkcję warstwy liniowej sieci Packet Radio, jest zmodyfikowaną wersją protokołu HDLC. W protokole tym używa się większości typów ramek protokołu HDLC. Również zasady wymiany ramek są te same [1]. Modyfikacje obejmują elementy charakterystyczne dla sieci Packet Radio i uwzględniają specyfikę łączności radioamatorskiej. Ogólny format ramki protokołu AX.25 przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Ogólny format ramki protokołu AX.25

Pole adresowe zawiera adresy od 2 do 10 stacji. Oprócz adresu nadawcy i odbiorcy ramki może się tu zmieścić do 8 adresów stacji pośredniczących. Każdy adres stacji zawiera do 7 bajtów, co wynika z zastosowania tzw. „znaków wywoławczych” nadawanych radioamatorom po uzyskaniu licencji. Najkrótsze pole adresowe zawiera zatem 14 bajtów, najdłuższe zaś – 70.

Pole sterujące określa między innymi typ ramki. Podobnie jak w HDLC, wyróżnia się ramki informacyjne (I, ang. *information*), nienumerowane (U, ang. *unnumbered*), sterujące (C, ang. *control*) oraz zarządzające (S, ang. *supervisory*). Pierwsze dwa typy ramek wykorzystuje się do przenoszenia danych, przy czym ramki informacyjne po nawiązaniu połączenia logicznego, nienumerowane zaś – w pozostałych przypadkach. Ramki nienumerowane nie są potwierdzane.

Pole danych, występujące jedynie w ramach informacyjnych i nienumerowanych, może zawierać do 256 bajtów. Rozmiar ten można dalej ograniczać za pomocą parametru *PacLen* w zależności od aktualnej jakości łącza lub innych czynników.

Suma kontrolna CRC obliczana jest zgodnie z algorytmem CRC-CCITT. Zależnie od tego, czy suma odebrana jest zgodna z obliczoną na podstawie zawartości odebranej ramki, odbiorca wysyła potwierdzenie pozytywne lub negatywne. Podobnie jak w protokole HDLC, przed wysłaniem potwierdzenia można przesłać do 7 ramek. Wielkość tę (tzw. rozmiar okna) można dalej ograniczyć za pomocą parametru *MaxFrame* w zależności np. od jakości łącza. Liczba ramek wysłanych nie zawsze jest równa tej wartości. Zależy to od formatu przesyłanych danych oraz możliwości sprzętu i oprogramowania transmisyjnego.

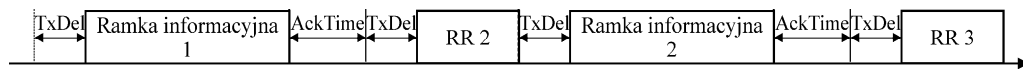
W celu zachowania przezroczystości protokołu, którą można naruszyć przez używanie specjalnych sekwencji bitów w roli preambuły i postambuły, stosuje się mechanizm zwany „szpikowaniem zerami” (ang. *bit stuffing*), a obejmujący całą ramkę z wyjątkiem preambuły i postambuły. Po każdej grupie pięciu bitów o wartości „1” automatycznie wstawia się bit „0”. Operacja ta jest odwracana w odbiorniku.

W przeciwieństwie do HDLC, protokół AX.25 wykorzystuje zrównoważony tryb asynchroniczny (ABM, ang. *Asynchronous Balanced Mode*), w którym wszystkie stacje są sobie równe. W tym trybie nadawca wysyła ramki informacyjne, które są potwierdzane przez odbiorcę. Potwierdzenie może być przy tym pozytywne (RR, ang. *Receiver Ready*) lub negatywne (REJ, ang. *Reject*). Potwierdzenie negatywne FRMR (ang. *Frame reject*) wykorzystuje się, gdy odebrano ramkę innego typu niż spodziewana w danym stanie odbiornika. Protokół posiada także pewne elementy sterowania przepływem, które można wykorzystać, gdy odbiorca nie jest w stanie odebrać większej ilości danych, ale ostatnia ramka była odebrana bezbłędnie. W takiej sytuacji odbiorca wysyła ramkę RNR (ang. *Receiver Not Ready*).

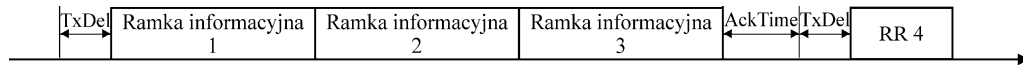
W protokole AX.25 wprowadzono dodatkowe parametry, określające właściwości łącza radiowego. Należą do nich, między innymi, *TxDel* oraz *AckTime*. Pierwszy z nich określa odstęp czasowy między włączeniem nadajnika a rozpoczęciem transmisji danych. Czas ten jest potrzebny na stabilizację parametrów nadajnika i wykrycie nośnej oraz synchronizację po stronie odbiorczej. W zależności od użytego sprzętu czas ten może wynosić od kilku do kilkuset milisekund. Parametr *AckTime* z kolei określa, jak długo odbiorca powinien czekać przed wysłaniem potwierdzenia. Czas ten zależy od wykorzystywanej prędkości transmisji i w wielu przypadkach jest ustawiany automatycznie przez urządzenia transmisyjne. Parametr ten często nie jest potrzebny, ponieważ większość urządzeń nadawczo-odbiorczych potrafi wymusić po-

twierdzenie, ustawiając bit sterujący Poll/Final w ostatniej ramce informacyjnej w ciągu. W takim przypadku odbiorca nie czeka na kolejne ramki i wysyła potwierdzenie natychmiast. Umiejętność ta zależy od oprogramowania sterującego pracą kontrolera TNC.

Przykładowe zasady wymiany ramek dla różnych wielkości okna (parametr *MaxFrame*) pokazano na rys. 2 i 3.



Rys. 4. Wymiana ramek przy rozmiarze okna równym 1



Rys. 5. Wymiana ramek przy rozmiarze okna równym 3

Protokół dostępu do łącza odpowiada szczelinowej wersji trwałego protokołu CSMA z prawdopodobieństwem p . Rywalizacja odbywa się przed rozpoczęciem transmisji ramki, a więc poprzedza czas T_{xDel} pokazany na rys. 4 i 5. Ramki potwierdzenia przesyłane są bez rywalizacji. Właściwości protokołu można ustawiać za pomocą parametrów *SlotTime* oraz *Persistence*. Pierwszy z nich określa długość szczeliny rywalizacji, drugi natomiast wpływa na prawdopodobieństwo rozpoczęcia transmisji w danej szczelinie. W kolejnych szczelinach rywalizacji każda stacja ubiegająca się o prawo transmisji losuje liczbę z zakresu 0-255. Jeśli liczba ta jest mniejsza od parametru *Persistence*, można rozpocząć nadawanie. Można więc założyć, że prawdopodobieństwo transmisji wynosi

$$p = \frac{Persistence + 1}{256}, \quad (1)$$

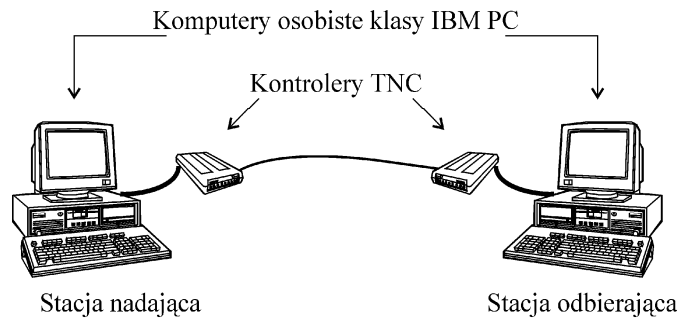
a średni czas rywalizacji

$$T_{CSMA} = \frac{256 \cdot SlotTime}{2 \cdot (Persistence + 1)}. \quad (2)$$

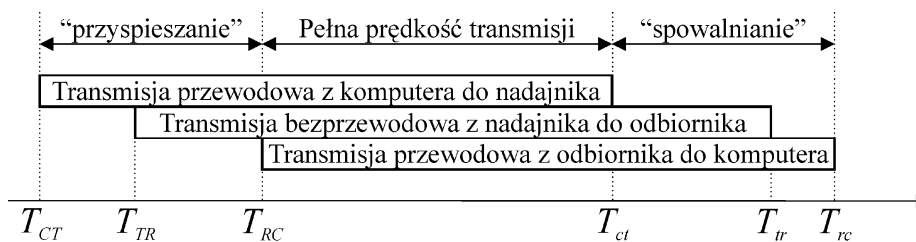
3. MODEL ANALITYCZNY KONTROLERA TNC

Analiza pracy kontrolera TNC dotyczy przypadku przesyłania informacji między dwoma komputerami (lub innymi urządzeniami), połączonymi ze sobą za pośrednictwem dwóch kontrolerów TNC. Konfiguracja opisanej sieci pokazana jest na rys. 6.

W opisywanym przypadku – ze względu na buforowanie przesyłanej informacji w pamięci kontrolera oraz przetwarzanie postaci informacji – transmisja przebiega wieloetapowo, co wyjaśnia rys. 7.



Rys. 6. Konfiguracja rozważanej sieci



Rys. 7. Przesył informacji w rozważanej sieci

3.1. EFEKTYWNA PRĘDKOŚĆ TRANSMISJI

Przyjmijmy następujące założenia:

- sieć składa się z dwóch stacji, komunikujących się łączem dwukierunkowym naprzemiennym (ang. *half duplex*),
- nie występują kolizje ani błędy transmisji, a zatem nie występują retransmisje przekłamaných ramek,
- czas przetwarzania ramek w kontrolerach TNC jest pomijalny.

Zgodnie z oszacowaniem wydajności protokołu AX.25 [7], a także przy uwzględnieniu czasu rywalizacji (2), czas przesyłu łączem bezprzewodowym danych o rozmiarze *FileSize* bajtów wynosi

$$T_p = \left\lceil \frac{FileSize}{PacLen} \right\rceil \cdot \left(\frac{64}{63} \cdot \frac{8 \cdot PacLen}{R_{wl}} \right) + \left\lceil \frac{FileSize}{PacLen \cdot MaxFr} \right\rceil \cdot \left(AckTime + T_{CSMA} + 2 \cdot TxDel + (1 + MaxFr) \cdot \frac{64}{63} \cdot \frac{160}{R_{wl}} \right), \quad (3)$$

gdzie R_{wl} oznacza prędkość transmisji łącza bezprzewodowego.

Ze względu na sposób pracy kontrolera TNC, transmisja łączem radiowym może się rozpocząć, gdy w buforze zebranych zostanie przynajmniej $PacLen$ znaków. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji łączem radiowym wynosi zatem

$$T_a = T_{TR} - T_{CT} = \frac{10 \cdot PacLen}{R_w}, \quad (4)$$

gdzie R_w oznacza prędkość transmisji łącza przewodowego (RS-232).

Przy założeniu, że prędkość efektywna łącza przewodowego znacznie przekracza prędkość efektywną łącza radiowego, po zakończeniu transmisji bezprzewodowej odbierający kontroler TNC wyśle jeszcze do komputera nie więcej niż $PacLen$ znaków. Można zatem przyjąć, że $T_z = T_{rc} - T_r = T_a$.

Efektywna prędkość transmisji wynosi zatem

$$V_{ef} = \frac{8 \cdot FileSize}{2 \cdot T_a + T_p}. \quad (5)$$

Warto zauważyć, że wpływ czasu T_a na efektywną prędkość transmisji maleje wraz ze wzrostem całkowitego rozmiaru przesyłanej informacji lub wraz ze zmniejszaniem się efektywności łącza bezprzewodowego.

3.2. OPÓŹNIENIA TRANSMISJI

W pewnych zastosowaniach istotna może być nie tylko efektywna prędkość transmisji, lecz także opóźnienia wynikające z faktu buforowania i przetwarzania postaci przesyłanych danych. Opóźnienie rozpoczęcia transmisji, odpowiadające fazie „przyspieszania” na rys. 7, jest równe sumie czasu T_a wyliczonego według równania (4) oraz czasu transmisji jednej ramki łączem radiowym, wynosi zatem

$$T_{przysp} = \frac{10 \cdot PacLen}{R_w} + \frac{64}{63} \cdot \frac{160 + 8 \cdot PacLen}{R_{wl}}. \quad (6)$$

Z kolei opóźnienie zakończenia transmisji, odpowiadające fazie „spowalniania” na rys. 7, 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 nadającej 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. 7) oraz czas transmisji nie więcej niż $PacLen$ znaków łączem przewodowym. Transmisja bezprzewodowa jest opóźniona w stosunku do przesyłu po stronie nadawczej także o czas transmisji $PacLen$ 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 powyższe pod uwagę, opóźnienie zakończenia transmisji można określić jako

$$T_{spow} = 2 \cdot \frac{10 \cdot PacLen}{R_w} + T_p - \frac{10 \cdot FileSize}{R_w}. \quad (7)$$

3.3. DOBÓR ROZMIARU BUFORA

W niektórych zastosowaniach konieczne może być zapewnienie ciągłości transmisji po stronie nadawczej. Ponieważ w większości przypadków łącze przewodowe jest „szybsze” od radiowego (większa prędkość efektywna), przesyłane dane muszą być umieszczone w buforze. Minimalna pojemność bufora zależy od całkowitego rozmiaru przesyłanych danych, a także od różnicy prędkości transmisji łącza przewodowego i bezprzewodowego. Można bowiem przyjąć, iż efektywna prędkość transmisji łącza przewodowego (po stronie nadawczej) odpowiada średniej prędkości napełniania bufora, zaś efektywna prędkość łącza radiowego – średniej prędkości jego opróżniania. Mnożąc ich różnicę przez czas transmisji informacji łączem przewodowym można otrzymać przybliżony rozmiar bufora, gwarantujący ciągłość transmisji na tym łączu:

$$C = \left(\frac{8 \cdot R_w}{10} - \frac{8 \cdot FileSize}{T_p} \right) \cdot \frac{10 \cdot FileSize}{8 \cdot R_w} = FileSize \cdot \left(1 - \frac{10 \cdot FileSize}{R_w \cdot T_p} \right). \quad (8)$$

Zachowanie ciągłości transmisji po stronie odbierającej także jest możliwe, wymaga jednak znajomości całkowitej wielkości przesyłanych danych. Konieczne jest wówczas dodatkowe opóźnienie rozpoczęcia transmisji po stronie odbierającej.

4. PRZYKŁADOWE OBLICZENIA

W tabeli 1 zebrano wyniki obliczeń, wykonanych zgodnie z wyprowadzonymi powyżej zależnościami dla kilku przykładowych zestawów parametrów. Obliczono następujące wartości:

- czas przesyłu pliku łączem bezprzewodowym (T_p),
- efektywną prędkość transmisji protokołu AX.25 ($V_{ef} AX.25$) – między kontrolerami TNC,
- efektywną prędkość transmisji między komputerami ($V_{ef} TNC$), uwzględniającą także przesył między kontrolerami TNC a komputerami,
- czas „przyspieszania” (T_{przysp}),
- czas „spowalniania” (T_{spow}),
- pojemność bufora, gwarantującą ciągłość transmisji po stronie nadawczej (C).

Podczas obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów transmisji:

- $PacLen=256$ B,
- $MaxFrame=7$,
- $TxDel=300$ ms,
- $Persistence=63$,
- $SlotTime=100$ ms.

Tabela 1. Przykładowe obliczenia

R_w [b/s]	R_{wt} [b/s]	$FileSize$ [B]	T_p [s]	$V_{ef} AX.25$ [b/s]	$V_{ef} TNC$ [b/s]	T_{przysp} [s]	T_{spow} [s]	C [B]
19200	1200	8192	64,90	1009,93	1005,70	2,00	60,90	7654
38400	9600	8192	11,61	5643,68	5579,62	0,30	9,61	6688
115200	38400	16384	11,81	11102,02	11060,39	0,08	10,43	14411

Obliczone czasy oraz prędkości transmisji są zbieżne z wynikami pomiarów dokonanych w doświadczalnej sieci Packet Radio przy użyciu kontrolerów Symek TNC3 [4] oraz NT-G TNC7multi [3]. Wielkość bufora trudno natomiast porównać, ponieważ nawet podczas przesyłu pliku o rozmiarze 8 KB zaobserwowano wstrzymanie przez kontroler TNC transmisji na łączu RS-232. Nie oznacza to jednak, że bufor ma mniejszą pojemność – wstrzymanie transmisji może nastąpić na długo przez ewentualnym przepełnieniem bufora, na wypadek gdyby reakcja uruchomionej na dołączonym komputerze aplikacji nie była natychmiastowa.

5. PODSUMOWANIE

W niniejszym rozdziale pokrótce opisano podstawowe właściwości kontrolerów TNC oraz stosowanego w sieci Packet Radio protokołu AX.25. Na podstawie tej charakterystyki opracowano model analityczny, opisujący pracę kontrolera TNC i wpływ poszczególnych parametrów transmisji na wydajność sieci. Przedstawiony model pozwala oszacować nie tylko efektywną prędkość transmisji z użyciem kontrolerów TNC – w przeciwieństwie do pracy [7], gdzie uwzględniono jedynie sam protokół AX.25 – lecz także opóźnienie rozpoczęcia i zakończenia transmisji po stronie odbierającej przesyłane informacje. Ponadto, opisany model pozwala oszacować minimalną pojemność bufora, wymaganą do zapewnienia ciągłości transmisji po stronie nadawczej. Jest to istotne o tyle, że – ze względu na nierzadko znacznie mniejszą efektywną prędkość transmisji łącza radiowego – w przypadku zbyt małego bufora transmisja ta może być wstrzymywana, aby zapobiec przepełnieniu, a co za tym idzie, utracie części informacji.

Opracowany model wykazuje wystarczającą zgodność z rzeczywistymi kontrolerami TNC. Może on zatem posłużyć jako punkt odniesienia, pozwalający oszacować wpływ parametrów konstrukcyjnych kontrolera na wybrane parametry użytkowe sieci.

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. PWN, Warszawa 1994.
- [3] Güttner M.: TNC7multi Instruction manual. Nachrichtentechnik Güttner, Kall 2006.
- [4] Kumm U.: Software-User-Manual for the 16 bit High-Speed Packet-Radio-Controller TNC3S, TNC31S. SYMEK GmbH, Stuttgart, 1999.
- [5] Wade I. (red.): Automatic Position Reporting System. APRS Protocol Reference. Protocol Version 1.0. Tucson Amateur Packet Radio Corporation, Tucson 2000.
- [6] Zieliński B.: Porównanie różnych wersji kontrolerów TNC. W: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.): Współczesne aspekty sieci komputerowych. Tom 1. WKŁ, Warszawa 2008, pp. 137-146.
- [7] Zieliński B.: Ocena efektywności protokołu AX.25. W: Gaj P., Pochopień B., Kozielski S. (red.): Współczesne aspekty sieci komputerowych. Tom 1. WKŁ, Warszawa 2008, pp. 127-136.