

**Sławomir GRZYB, Przemysław ORŁOWSKI**  
 ZACHODNIOPOMORSKI UNIwersYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE,  
 ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

## Model matematyczny kanału komunikacyjnego z zatoryem w sieciach o zmiennych w czasie parametrach

Mgr inż. Sławomir GRZYB

Doktorant na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w Katedrze Sterowania i Pomiarów. Od ponad dziesięciu lat zajmuje się problematyką sieci komputerowych. Pracuje jako starszy specjalista ds. informatyki w Enea Operator. Prowadzi wykłady i laboratoria z technologii sieciowych w szczecińskiej fundacji uczelnia.it.



e-mail: slawomir.grzyb@zut.edu.pl

Dr hab. inż. Przemysław ORŁOWSKI

Uzyskał dyplom magistra inżyniera elektronika oraz magistra inżyniera elektryka w roku 1999 na Wydziale Elektrycznym Politechniki Szczecińskiej. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym Wydziale w roku 2002. W roku 2012 uzyskał stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie automatyka i robotyka. Główne kierunki badań naukowych to analiza i synteza układów sterowania, w szczególności układy dyskretne, układy niestacjonarne, układy nieliniowe i układy niepewne.



e-mail: przemyslaw.orlowski@zut.edu.pl

### Streszczenie

W pracy zaproponowano model matematyczny kanału komunikacyjnego z zatoryem w węzle zatłoczonym, blokadami w węzłach pośrednich i parametrach zmiennych w czasie. Do opisu matematycznego wykorzystany jest liniowy, niestacjonarny, dyskretny model układu dynamicznego. Umożliwia on modelowanie opóźnień o dowolnie długim czasie trwania. Model taki zapisany w przestrzeni zmiennych stanu daje możliwość wykorzystania istniejących metod syntezy sterowania do unikania zatorów i minimalizacji ich skutków. W pracy przedstawiono wyniki symulacji komputerowej opracowanego modelu.

**Słowa kluczowe:** układ niestacjonarny, model kanału komunikacyjnego, zmienne opóźnienie.

### A mathematical model of a congested communication channel in networks with time-varying parameters

#### Abstract

The paper presents a mathematical model of a communication channel with frequent congestion in intermediate nodes and time-varying delay. The first part of the paper is focused on description of some TCP protocol modifications, which adapted this protocol to be more effective and fault resistant in data transporting. This efficiency can be observed especially in an environment with frequent congestion and data loss. Regardless of the modifications of different transport protocols and the increase in the link bandwidth, to make full use of the computer network bandwidth it is necessary to develop some mechanisms allowing control of the transmitted packets at the network nodes. There is presented mathematical estimation of a real network segment built of many active network nodes and connections. This solution is a linear, non-stationary, discrete dynamical system model that allows modelling of delays for any long duration. Such a model stored in the state variables enables the use of existing synthesis methods of control to avoid congestion and minimize their effects. A block diagram of a network part with delay varying in time is presented in Fig. 1. A network part participating in packet forwarding may consist of a significant number of nodes. The last part of this paper presents the results of a simulation of the developed model in a form of the step response. The graph of this response is shown in Figs. 2 and 3.

**Keywords:** congestion, time-varying systems, communication channel, variable delay, discrete-time systems.

### 1. Wstęp

Występowanie zatorów w sieciach komunikacyjnych jest związane zarówno z ograniczoną przepustowością łącz jak i skończonymi zasobami sprzętowymi węzłów biorących udział w przekazywaniu informacji. Jedną z metod pozwalających na zminimalizowanie negatywnych skutków zatorów jest opracowanie protokołów sieciowych dostosowujących ilość przesyłanych danych do warunków panujących w torze transmisyjnym między nadawcą

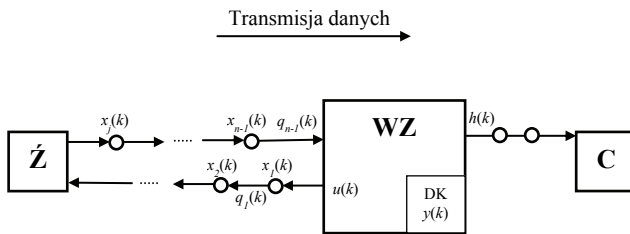
i odbiorcą. Przykładem takiego podejścia jest wprowadzona w 1988 roku modyfikacja protokołu TCP, zawierająca mechanizm kontroli zatorów TCP Tahoe [1]. Kolejne modyfikacje polegały na zmianie sposobu obliczania czasu oczekiwania na potwierdzenie, zmiany zachowania nadawcy po wykryciu utraty segmentu, lub większej ilości segmentów. Pojawiały się również implementacje mające za zadanie unikanie przeciążenia poprzez szacowanie możliwej przepustowości łącza. TCP Vegas [2] oraz TCP Westwood [3]. Rozwój algorytmów zarządzania zatorami doprowadził do zaimplementowania w routerach mechanizmu RED (ang. Random Early Discard) [4], który aktywnie zarządza długością kolejki poprzez wczesne losowe odrzucanie pakietów, co powoduje zmniejszenie prędkości wysłania danych przez nadawców. Wprowadzenie modyfikacji umożliwiającej wyraźne powiadomienie o przeciążeniach ECN (ang. Explicit Congestion Notification) [5], pozwoliło na współpracę algorytmu RED z protokołem TCP. W sytuacji, gdy średnia długość kolejki przekroczy wartość progową, router zamiast odrzucać pakiety, ustawia flagę CE w nagłówku IP i przekazuje ją dalej. Odbiorca po otrzymaniu takiego pakietu modyfikuje potwierdzenie ACK do nadawcy wstawiając flagę ECE w miejsce zarezerwowanych bitów nagłówka TCP. Nadawca reaguje tak, jakby pakiet został zgubiony i zmniejsza prędkość nadawania.

Niezależnie od modyfikacji poszczególnych protokołów transportowych i zwiększania szerokości pasma danego łącza, do pełnego wykorzystania przepustowości sieci komputerowych konieczne jest opracowanie pewnych mechanizmów umożliwiających kontrolę nad przesyłanymi pakietami na poziomie węzłów sieciowych. Główną trudnością w unikaniu zatorów jest opóźnienie pomiędzy momentem, w którym węzeł zatłoczony wyśle informację o aktualnej dostępności łącza a momentem dotarcia skorygowanej ilości danych. Zmienność opóźnienia rozważano m.in. w [6] a jego uwzględnienie jest istotne ze względu na możliwość poważnego zmniejszenia wydajności układu sterowania, wystąpienia oscylacji bądź wręcz niestabilności systemu [6, 7, 8]. W pracach [7, 14], rozważany jest liniowy stacjonarny układ dyskretny ze stałym opóźnieniem. Do sterowania przepływem wykorzystywane są głównie metody oparte na sterowaniu ślizgowym. Główną słabością modelu stacjonarnego i opartych na nim metod jest brak możliwości uwzględnienia zmienności opóźnień występujących przy transmisji danych w sieciach komputerowych. Opóźnienia te podlegają ciągłym wahaniom związanym m.in. z aktualnym obciążeniem sieci, jej konfiguracją oraz występowaniem sytuacji awaryjnych.

Celem niniejszej pracy jest zaproponowanie zmiennego w czasie liniowego modelu kanału komunikacyjnego w oparciu o wyniki analizy w pracy [15]. Model ten przy ustalonym skończonym rzędzie umożliwia modelowanie opóźnień o dowolnie długim czasie trwania.

## 2. Opis sieci

Rozważany kanał transmisyjny jest podobny do występującego w pracach [7, 14, 15]. Stanowi on wycinek sieci rozległej. Składa się ze źródła danych  $\dot{Z}$ , miejsca docelowego  $C$  oraz znajdującego się pomiędzy nimi węzła w którym może wystąpić zator, zwanego dalej węzłem zatłoczonym WZ. Pomiędzy źródłem  $\dot{Z}$  a węzłem zatłoczonym, oraz pomiędzy węzłem zatłoczonym a celem  $C$  mogą występować węzły pośrednie, co zilustrowano na rys. 1 [15].



Rys. 1. Schemat blokowy wycinka sieci ze zmiennym w czasie opóźnieniem  
Fig. 1. Block diagram of a network part with delay varying in time

Pakiety przesyłane są ze źródła  $\dot{Z}$  poprzez węzły pośredniczące do węzła zatłoczonego WZ. Węzeł zatłoczony przekazuje otrzymane dane w kierunku celu  $C$ . Jeżeli ze względu na ograniczone zasoby sieciowe dane nie mogą być przesłane dalej, wówczas magazynowane są w buforze wyjściowym. Źródło danych otrzymuje poprzez węzły pośredniczące informacje z węzła WZ. W tej informacji zawarte jest żądanie przesłania określonej ilości pakietów do celu poprzez węzeł WZ. Ilość żądanych pakietów zależy od dostępnej aktualnie zdolności transmisyjnej. W odpowiedzi na żądanie WZ, źródło przesyła określoną ilość pakietów przez węzeł zatłoczony w kierunku celu.

W dowolnym węźle pośredniczącym pomiędzy źródłem i węzłem zatłoczonym może pojawić się zator uniemożliwiający przesłanie danych dalej w kierunku WZ. Przyjęto, że w wypadku wystąpienia zatoru w  $j$ -tym węźle pośredniczącym w chwili czasu  $k$ , żadna informacja nie zostanie przesłana do węzła  $j+1$  i pakiety zostaną zmagazynowane w buforze wyjściowym. Jeżeli jednak w dowolnym następnym momencie czasu będzie możliwość przesłania pakietów w kierunku WZ, wszystkie zbuforowane pakiety zostaną przesłane do kolejnego węzła pośredniczącego.

Dla pewnego zakresu czynników powodujących zatory sieciowe takie uproszczenie modelu jest naturalne. Należą do nich uszkodzenia warstwy fizycznej łącza lub uszkodzenia związane z funkcjonowaniem węzła aktywnego. Gdy w wyniku takiej awarii dane nie mogą zostać przesłane do kolejnego węzła sieciowego, pakiety kolejgowane są w buforach wyjściowych węzła i oczekują na możliwość przesłania w kierunku celu. Po przywróceniu prawidłowego funkcjonowania danego segmentu wszystkie zbuforowane pakiety zostaną przesłane.

Podobną sytuację obserwujemy, gdy pakiety wysłane przez źródło spotkają się na drodze do węzła zatłoczonego z innym ruchem o wyższym priorytecie, który musi zostać obsłużony w pierwszej kolejności. W chwili czasu, gdy pakiety priorytetowe są obsługiwane, inny ruch jest kolejgowany. Kiedy obsługa ważniejszych pakietów zostanie zakończona, dany węzeł wraca do obsługi ruchu o niższym priorytecie. Wówczas wszystkie pakiety mogą być przesłane do kolejnego węzła pośredniczącego.

## 3. Model matematyczny sieci

Rozpatrywana w niniejszej pracy sieć jak wspomniano wcześniej składa się ze źródła, węzła zatłoczonego, celu oraz pewnej określonej liczby węzłów pośrednich. Węzeł zatłoczony jest z założenia najsłabszym ogniwem łańcucha przepływu informacji, wynikającym z ograniczonej w czasie ilości danych, które mogą zostać wysłane w kierunku celu  $C$ . Ilość danych, które potencjal-

nie mogą być wysłane z węzła zatłoczonego WZ jest modelowana jako pewna, nieznaną z góry ograniczona funkcja czasu  $d(k)$ :

$$0 \leq d(k) \leq d_{\max} \quad (1)$$

Maksymalna przepustowość łącza w dowolnej chwili czasu jest ograniczona wielkością  $d_{\max}$ , chwilowe wartości  $d(k)$  podlegają wahaniom w czasie i zależą od ruchu w węzłach sieci znajdujących się pomiędzy węzłem zatłoczonym WZ a celem  $C$ . Zmienność dostępnego pasma w czasie może być uwarunkowana również ruchem o wyższym priorytecie, który ma pierwszeństwo w dostępie do łącza wyjściowego. Ilość danych wysłanych z węzła zatłoczonego WZ  $h(k)$  jest dodatkowo zależna od ilości danych w buforze wyjściowym  $y(k)$  i spełnia następujące nierówności:

$$0 \leq h(k) \leq d(k) \leq d_{\max} \quad (2)$$

oraz

$$0 \leq h(k) \leq y(k) \quad (3)$$

Jeżeli ilość danych w buforze wyjściowym jest wystarczająco duża  $y(k) \geq d(k)$ , wówczas wykorzystane zostanie całe dostępne w chwili  $k$  pasmo  $d(k)$ .

Z punktu widzenia sterowania w węźle zatłoczonym istotne jest utrzymanie określonej ilości danych w buforze wyjściowym, niezależnie od chwilowej przepustowości łącza pomiędzy WZ i  $C$ , tak aby nie doszło do sytuacji w której bufor zostanie przepełniony bądź nadmiernie opróżniony.

Dostępne pasmo po stronie celu  $C$  jest modelowane zmienną losowo funkcją  $d(k)$ . Bardzo istotną dla analizy i sterowania przepływem pakietów w układzie jest wprowadzenie odpowiedniego modelu opóźnienia pomiędzy węzłem zatłoczonym WZ, źródłem  $Z$  i węzłem zatłoczonym WZ. W modelach wykorzystywanych w pracach [7, 14] wykorzystuje się opóźnienie stałe w czasie.

Niemniej w przypadku przepływu danych w sieciach Ethernet, opóźnienie te często ulega zmianom. W niniejszej pracy model sieci został rozszerzony tak, aby umożliwić uwzględnienie zmiennego w czasie opóźnienia komunikacyjnego.

W tym celu wprowadzono współczynnik kolejgowania w  $j$ -tym węźle sieci w chwili czasu  $k$ , określony w następujący sposób:

$$q_j(k) = \begin{cases} 0 & \text{- transmisja} \\ 1 & \text{- kolejgowanie} \end{cases} \quad (4)$$

Ilość pakietów w  $j$ -tym węźle sieci w chwili czasu  $k$  jest oznaczona  $x_j(k)$ , natomiast ilość pakietów opuszczających  $j$ -ty węzeł sieci w chwili czasu  $k$  będzie spełniać następującą zależność:

$$p_j^o(k) = (1 - q_j(k))x_j(k) \quad (5)$$

Ilość pakietów zgromadzonych w  $j$ -tym węźle sieci w chwili czasu  $k+1$ , będzie zatem równa:

$$p_j^a(k) = \sum_{l=0}^k x_j(l) \prod_{i=1}^k q_j(i) \quad (6)$$

Ilość pakietów zgromadzonych w zatłoczonym węźle sieci WZ w chwili czasu  $k+1$ , zwana długością kolejki będzie zatem dana w następujący sposób:

$$x_n(k+1) = (1 - q_{n-1}(k))x_{n-1}(k) + x_n(k) - h(k) \quad (7)$$

Dla uproszczenia notacji zostanie wprowadzone oznaczenie

$$\bar{q}_j(k) = 1 - q_j(k) \quad (8)$$

Pełny model w przestrzeni zmiennych stanu zostanie zapisany w następujący sposób:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= q_1(k)x_1(k) + u(k) \\ &\vdots \\ x_{j+1}(k+1) &= \bar{q}_j(k)x_j(k) + q_{j+1}(k)x_{j+1}(k) \\ &\vdots \\ x_n(k+1) &= \bar{q}_{n-1}(k)x_{n-1}(k) + x_n(k) - h(k) \\ y(k) &= x_n(k) \end{aligned} \quad (9)$$

Co można alternatywnie zapisać w notacji wektorowo-macierzowej

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} q_1(k) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \bar{q}_1(k) & q_2(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \bar{q}_2(k) & q_3(k) & 0 & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & q_{n-1}(k) & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} h(k) \quad (10)$$

$$y(k) = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \mathbf{x}(k) \quad (11)$$

Wektor stanu dany jest w następującej postaci:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \quad (12)$$

Przy założeniu, że znane są funkcje  $q_j(k)$  dla  $j=1,2,\dots,n-1$  oraz  $k \in \mathbb{N}$  powyższy model sieci jest typowym liniowym, niestacjonarnym, dyskretnym modelem układu dynamicznego, dla którego można stosować metody podane m.in. w pracach [9, 10, 11, 12, 13].

Węzeł  $j-1$  przesyła w chwili czasu  $k$  do węzła zatłoczonego wartość swojego bufora  $x_{n-1}$  do kolejnego węzła, gdy współczynnik kolejowania  $q_{j-1} = 0$  oraz przechowuje zawartość bufora, gdy wystąpi zator tzn.  $q_{j-1} = 1$ . Zmienna  $h$  reprezentuje ilość pakietów skutecznie przesłanych z węzła zatłoczonego w kierunku celu. Różnica pomiędzy pakietami wpływającymi do węzła zatłoczonego oraz pakietami przesłanymi do celu zwiększa zajętość bufora w węźle zatłoczonym, gdy jest dodatnia lub zmniejsza gdy jest ujemna. Długość kolejki w węźle zatłoczonym  $y$  jest sterowana za pomocą regulatora. Zmienna  $u(k)$  jest sygnałem sterującym wysylnym w kierunku źródła, aby dostosować ilości danych do warunków panujących w sieci, tj. długości kolejki  $y(k)$  oraz bieżącej predykcji ilości danych odbieranych przez cel  $h(k)$ .

#### 4. Symulacja kanału komunikacyjnego ze zmiennym opóźnieniem

W przykładzie dokonano symulacji komputerowej kanału komunikacyjnego ze zmiennym w czasie opóźnieniem. Przedmiotem analizy jest długość wyjściowej kolejki pakietów w węźle zatłoczonym. Na potrzeby symulacji przyjęto, iż układ może być opisany następującym dyskretnym, niestacjonarnym modelem liniowym:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)u(k) + \mathbf{F}(k)h(k) \\ y(k) &= \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (13)$$

w którym:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(k) &= \mathbf{A}_\kappa, \\ \mathbf{B}(k) &= [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \\ \mathbf{F}(k) &= [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \\ \mathbf{C}(k) &= [0 \ 0 \ 0 \ 1] \end{aligned} \quad (14)$$

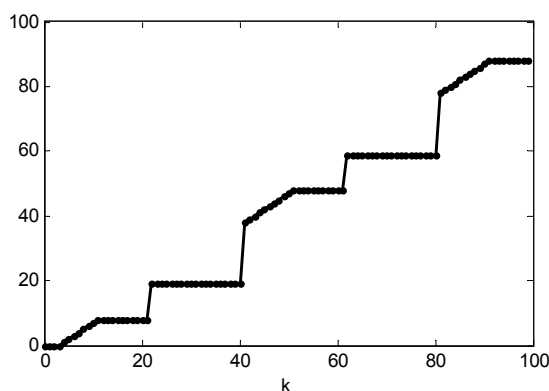
gdzie:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \kappa &= \text{floor}\left(\text{rem}\left(\frac{k}{\varepsilon}, 4\right)\right) \end{aligned} \quad (15)$$

Zmienna  $\kappa$  oznacza zaokrąglenie w dół (floor) reszty z dzielenia  $k/\varepsilon$  przez 4. Macierz  $\mathbf{A}_0$  reprezentuje model kanału komunikacyjnego bez zatorów w węzłach pośredniczących. W modelu opisanym przez macierz  $\mathbf{A}_1$  zator występuje w węźle drugim. Stan układu, w którym węzeł pierwszy nie może przesyłać dalej pakietów, odwzorowany jest przez macierz  $\mathbf{A}_2$ . Macierz  $\mathbf{A}_3$  reprezentuje model z zatorem w węźle trzecim.

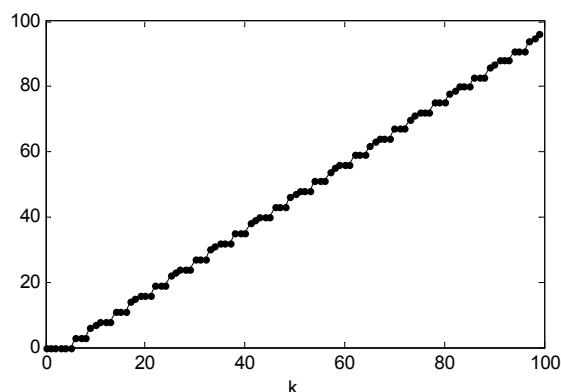
Na potrzeby symulacji numerycznej modelu (13)-(15) przyjęto, że przepustowość łącza wyjściowego z węzła zatłoczonego jest równa zero w całym horyzoncie symulacji  $d(k)=0$  oraz jednostkową znormalizowaną dopuszczalną ilość dostarczanych pakietów  $u(k)=1$ .

Na rys. 2 pokazana jest odpowiedź skokowa układu - długość kolejki w buforze wyjściowym węzła zatłoczonego przy braku transmisji pakietów z węzła zatłoczonego w kierunku celu. Charakterystykę wyznaczono dla wartości parametru  $\varepsilon=10$  tj. macierzy stanu zmienianej cyklicznie, co 10 kroków.

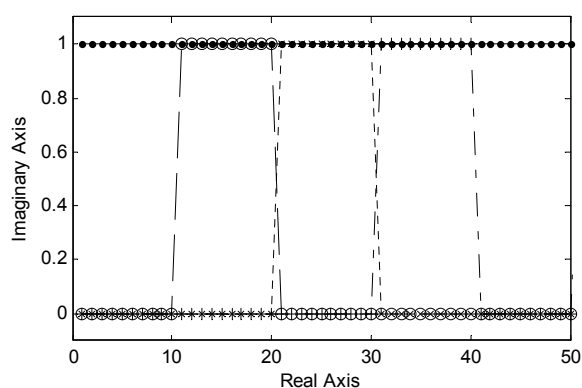


Rys. 2. Odpowiedź skokowa układu dla  $\varepsilon=10$   
Fig. 2. Step response of the system for  $\varepsilon=10$

Rysunek 3 prezentuje odpowiedź skokową układu dla  $h(k)=0$  dla macierzy stanu  $A(k)$  zmienianej cyklicznie co 2 kroki czasowe.



Rys. 3. Odpowiedź skokowa układu dla  $\varepsilon=2$   
Fig. 3. Step response of the system for  $\varepsilon=2$



Rys. 4. Wartości własne macierzy A dla  $\varepsilon=10$   
Fig. 4. Eigenvalues of matrix A for  $\varepsilon=10$

Zmienne w czasie wartości własne macierzy stanu układu  $A(k)$  zmienianej cyklicznie, co 10 kroków w funkcji czasu zostały przedstawione na rys 4. Przyjmując one wartości 0 lub 1, poszczególne wartości własne zostały wykreślone odpowiednio linią przerywaną z kółkami, linią kropkowaną z gwiazdkami, linią kreska-kropka z plusami oraz linią ciągłą z kropkami.

## 5. Wnioski

Wyniki symulacji prezentowanego modelu wskazują na jego działanie zgodne z oczekiwaniami. Na rys. 2 możemy obserwować kumulację pakietów w węźle zatłoczonym. Poziome fragmenty wykresu odpowiadają sytuacji, kiedy do węzła WZ nie docierają żadne dane. Linie pionowe wskazują na skokowy wzrost ilości otrzymanych pakietów po ustąpieniu zatoru w węźle pośredniczącym. Fragmenty nachylone wskazują, że węzeł WZ otrzymuje pakiety równomiernie w każdym kroku czasowym. W rzeczywistych sieciach komunikacyjnych opóźnienie związane z czasem przejścia pakietów od źródła do celu jest zmienne w funkcji czasu. Uwzględnienie zmienności opóźnienia jest istotnym czynnikiem wpływającym na zwiększenie wydajności sieci oraz na stabilność układu. Do opisu kanału komunikacyjnego z opóźnieniem zmien-

nym w czasie konieczne było stworzenie zaawansowanego dynamicznego modelu matematycznego. Model taki zapisany w przestrzeni zmiennych stanu umożliwił wykorzystanie istniejących metod syntezy sterowania do unikania zatorów i minimalizacji ich skutków.

## 6. Literatura

- [1] Stevens W.: TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms, RFC 2001, IETF, 1997
- [2] Brakmo L., Peterson L.: Tcp Vegas: end to end congestion avoidance on a global internet, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 13(8):1465-1480, październik 1995.
- [3] Casetti C., Gerla M., Mascolo S., Sanadidi M.Y., Wang R.: TCP Westwood: Bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links, Wireless Network 8(5):467-479, 2002.
- [4] Floyd S., Jacobson V.: Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance, IEEE/ACM Transactions on Networking, 1(4):397-413, sierpień 1993.
- [5] Ramakrishnan K., Floyd S.: The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP, RFC 3168, IETF, 2001.
- [6] Richard J.P.: Time-delay systems: An overview of some recent advances and open problems, Automatica, vol. 39, no. 10, pp.1667-1694, 2003.
- [7] Ignaciuk P. and Bartoszewicz A.: Discrete-time sliding-mode congestion control in multisource communication networks with time-varying delay, IEEE Trans. on Control Systems Technology 19, (2010).
- [8] Orłowski P.: System Degradation Factor for Networked Control Systems. Information Technology And Control, 2008, Vol. 37, No. 3, pp. 233-244.
- [9] Orłowski P.: Simplified Design of Low-Pass, Linear Parameter-Varying, Finite Impulse Response Filters. Information Technology and Control, Vol. 39, No. 2, pp. 130-137, 2010.
- [10] Orłowski P.: Fractional Indexes Impulse Responses Approximation for Discrete-Time Weyl Symbol Computation. Electronics and Electrical Engineering, Vol. 104, No. 8, pp. 9-12, 2010.
- [11] Orłowski P.: Discrete-time, linear periodic time-varying system norm estimation using finite time horizon transfer operators. Automatyka, 2010, 51 (4), pp. 325-332.
- [12] Orłowski P.: Convergence of the Discrete-Time Nonlinear Model Predictive Control with Successive Time-Varying Linearization along Predicted Trajectories. Electronics and Electrical Engineering, Vol. 113, No. 7, pp. 27-31, 2011.
- [13] Orłowski P.: Zastosowania dekompozycji SVD-DFT. Część 1: Wprowadzenie do analizy częstotliwościowej dla układów niestacjonarnych. Pomiary Automatyka Kontrola, 2007 vol. 2, s. 39-43.
- [14] Ignaciuk P., Bartoszewicz A.: Linear quadratic optimal sliding mode controllers for a single virtual circuit in a connection-oriented communication network, Proceedings of the 13th IEEE/IFAC International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Szczecin, Poland, pp. 121-128, August 2007.
- [15] Grzyb S., Orłowski P.: Mechanizmy powstawania zatorów i blokad komunikacyjnych w sieciach o zmiennych w czasie parametrach, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 59, nr 7, s. 704-707, 2013.

otrzymano / received: 19.08.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2013

artykuł recenzowany / revised paper