

Tadeusz CZACHÓRSKI

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej PAN

Tülin ATMACA

Institut National des Télécommunications, Evry, France

Jean-Michel FOURNEAU

PRiSM, Université de Versailles, France

Ferhan PEKERGIN

LIPN, Université Paris-Nord, France

DYNAMIKA PRZEPEŁYWU STRUMIENI PAKIETÓW W SIECI, PRÓBY STEROWANIA – MODELE DYFUZYJNE

Streszczenie. Artykuł analizuje następstwa niestacjonarnego natężenia ruchu pakietów wchodzących do sieci rozległej, np. ATM lub FR, co pozwala ocenić zmienne w czasie straty wynikłe z przepelnienia buforów w węzłach sieci, opisać nieregularność przesyłu pakietów i jej kompensację, a także zbadać możliwości sterowania przesyłem w celu rozładowania powstającego w węźle sieci zatłoczenia.

THE DYNAMICS OF PACKAGE FLOWS IN A NETWORK, SOME CONTROL SCHEMES AND THEIR DIFFUSION MODELS

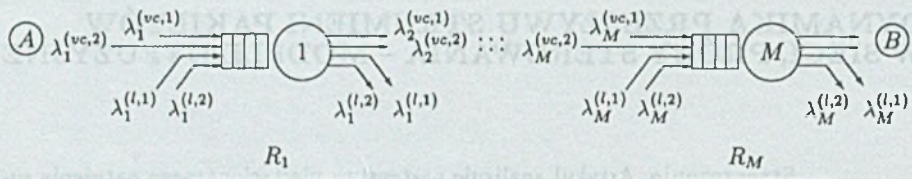
Summary. The article studies the effects of nonstationary traffic patterns in a network of ATM or FR nodes. It permits the estimation of time-varying loss rates due to limited capacity of buffers and the estimation of the jitter. We are also able to implement in the model some closed-loop control functions which react on the congestion accuring at a node.

1. Wstęp

Artykuł proponuje modele kilku zjawisk związanych z przepływem przez sieć strumienia pakietów o zmiennym w czasie natężeniu. Jako podstawę matematyczną tych modeli wykorzystano aproksymację dyfuzyjną, której zasady opisano w artykule [9], przeznaczonym dla tego samego numeru Zeszytów Naukowych. Zachowano te same oznaczenia co w pracy [9]. Szersze omówienie metody można znaleźć np. w [19, 12, 5, 7]. Artykuł podsumowuje rezultaty cząstkowe, opublikowane wcześniej przez autorów w [6, 2, 3].

2. Zmiany strumienia pakietów wzdłuż ścieżki wirtualnej

Rys. 1 przedstawia rozważany model, złożony z M stacji połączonych szeregowo. Każde stacja reprezentuje jeden węzeł sieci wchodzący w skład ścieżki wirtualnej, którą przesyłane są pakiety z punktu początkowego A do punktu końcowego B .



Rys. 1. Model ścieżki wirtualnej
Fig. 1. Queuing model of the virtual path

Do każdej stacji dochodzą dwa strumienie zadań przedstawiające komórki (pakiety) ścieżki wirtualnej oraz ruch lokalny węzła. Każdy z tych strumieni składa się z dwu klas zadań, odpowiadających komórkom priorytetowym (klasa 1) i zwykłym (klasa 2). Oznaczmy przez $\lambda_i^{(vc,k)}$ natężenie strumienia (liczone liczbą pakietów przesyłanych w jednostce czasu) pakietów klasy k , $k = 1, 2$, należących do ścieżki wirtualnej, wchodzących do stacji i , $i = 1, \dots, M$, a przez $\lambda_i^{(l,k)}$ natężenie strumieni ruchu lokalnego tej samej stacji. Indeksy górne ujęte w nawias oznaczają klasę pakietów, indeksy dolne odnoszą się do numeru stacji. W pierwszej stacji wartości $\lambda_1^{(vc,k)}$, $C_{A1}^{(vc,k)^2}$ są podane, dla następnych stacji musimy je obliczyć. Parametry ruchu lokalnego $\lambda_i^{(l,k)}$, $C_{Ai}^{(l,k)^2}$ są podane dla każdej stacji. Współczynnik C_A^2 jest współczynnikiem zmienności rozkładu określającego odstęp czasu pomiędzy nadejściem kolejnych pakietów. Czasy obsługi są stałe i takie same dla wszystkich zadań w węźle:

$$\frac{1}{\mu_i^{(vc,k)}} = \frac{1}{\mu_i^{(l,k)}} = \frac{1}{\mu}, \quad (1)$$

$$C_{Bi}^{(vc,k)^2} = C_{Bi}^{(l,k)^2} = 0, \quad k = 1, 2, \quad i = 1, \dots, M. \quad (2)$$

Dla zadań ścieżki wirtualnej przyjmujemy $C_{Ai}^{(vc,k)^2} = C_{D(i-1)}^{(vc,k)^2}$, $i = 2, \dots, M$. Parametr A odnosi się do strumienia wejściowego, parametr B do obsługi, a D do strumienia wyjściowego.

W stanie ustalonym natężenie ruchu strumienia wirtualnego jest takie samo we wszystkich stacjach:

$$\lambda_i^{(vc,k)} = \lambda_1^{(vc,k)}, \quad i = 2, \dots, M. \quad (3)$$

W stanie nieustalonym parametry λ_i , C_{Ai}^2 , C_{Di}^2 zmieniają się wraz z czasem. Musimy rozróżnić natężenie strumienia wejściowego $\lambda_{i,in}(t)$ i wyjściowego $\lambda_{i,out}(t)$ stacji. Odstęp czasu pomiędzy pakietami opuszczającymi węzeł i są opisane rozkładem o gęstości $d_i(t)$, dla którego strumień wyjściowy to

$$E[d_i(t)] = \frac{1}{\lambda_{i,out}(t)} \frac{1}{\lambda_{i,in}(t)} [1 - \varrho_i(t)] + \frac{1}{\mu}, \quad (4)$$

$$C_{Di}^2(t) = C_{Ai}^2(t)[1 - \varrho_i(t)] + \varrho_i(t)[1 - \varrho_i(t)], \quad (5)$$

gdzie $\varrho_i(t) = 1 - p_{i0}(t)$, C_{Di}^2 jest współczynnikiem zmienności rozkładu $d_i(t)$.

W momencie zmiany parametrów wejściowych skład kolejki jest określony przez poprzednie parametry, tj. jeszcze przez pewien czas prawdopodobieństwo, że wychodzący klient należy do klasy k , jest określone przez stare wartości $\lambda_i^{(k)}$ i λ_i i nową wartość ϱ_i . Gdy czas obsługi jest stały i równy $1/\mu$, ten czas wynosi x/μ , gdzie x jest liczbą klientów, a funkcja gęstości rozkładu tego czasu ma tę samą postać co funkcja f w momencie $t = t_{ch}$ zmiany parametrów strumienia wejściowego

$$q(t) = f(x, t_{ch}; x_0) \delta(t - x/\mu) = \frac{1}{\mu} f(t\mu, t_{ch}; x_0). \quad (6)$$

Nasz algorytm zakłada, że parametry zmieniają się tylko na początku każdego kolejnego przedziału czasu Δt , pozostając stałe wewnątrz przedziału. Oznaczmy wartość dowolnego parametru, np. λ_i , w czasie trwania j -tego przedziału czasowego, tj. dla $t \in [j\Delta t, (j+1)\Delta t)$, przez $\lambda_i(j)$. Niech $\theta_{i,in}^{(k)}(j)$ będzie udziałem klientów klasy k w strumieniu wejściowym stacji i w czasie j -tego przedziału czasowego: $\theta_{i,in}^{(k)}(j) = \frac{\lambda_{i,in}^{(k)}(j)}{\lambda_{i,in}(j)}$.

Skład strumienia wyjściowego stacji i w czasie przedziału j można wyrazić jako

$$\theta_{i,out}^{(k)}(j) = \sum_{l=2}^h P[n_i > (l-1)\mu\Delta t; j-l+1] \theta_{i,in}^{(k)}(j-l) \prod_{m=1}^{h-1} P[n_i \leq m\mu\Delta t; m] + \theta_{i,in}^{(k)}(j-1) \prod_{m=1}^{h-1} P[n_i \leq m\mu\Delta t; m], \quad (7)$$

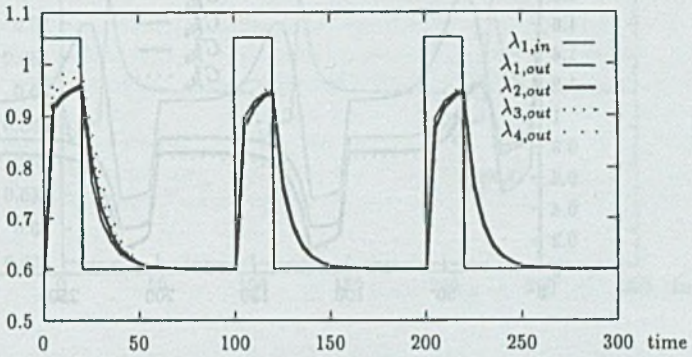
gdzie $\prod_{m=a}^b (\cdot) \equiv 1$, jeżeli $b < a$; $h = \frac{N}{\mu\Delta t}$, N jest pojemnością kolejki, $\mu\Delta t$ jest liczbą klientów, którzy mogą być obsłużeni w czasie Δt (załóżmy dla uproszczenia, że N jest wielokrotnością $\mu\Delta t$).

Przykład numeryczny. Przyjmijmy następujące parametry liczbowe: niech wirtualna ścieżka jest złożona z 4 węzłów, $M = 4$; czas transmisji komórki jest równy jednostce czasu: $\frac{1}{\mu} = 1$. Zakładamy, że parametry ruchu lokalnego są stałe i takie same dla wszystkich stacji: $\lambda_i^{(l,1)} = \lambda_i^{(l,2)} = 0.25$ oraz $C_{A_i}^{(l,1)^2} = C_{A_i}^{(l,2)^2} = 1$. Wchodzący do pierwszego węzła strumień komórek priorytetowych ścieżki wirtualnej jest funkcją czasu: w okresach niskiej aktywności $\lambda_1^{(vc',1)} = 0.05$, $C_{A_i}^{(vc',1)^2} = 1$; w okresach wysokiej aktywności $\lambda_1^{(vc'',1)} = 0.50$, $C_{A_i}^{(vc'',1)^2} = 0.50$. Okres wysokiej aktywności trwa 20 jednostek czasu, okresy niskiej aktywności trwają po 80 jednostek czasu. Strumień komórek o niższym priorytecie w ścieżce wirtualnej ma parametry niezależne od czasu $\lambda_1^{(vc,2)} = 0.05$, $C_{A_i}^{(vc,2)^2} = 1$.

Rys. 2 przedstawia natężenie ruchu $\lambda_{i,in}(t)$ na wejściu pierwszej stacji oraz strumienie wyjściowe $\lambda_{i,out}$, $i = 1, \dots, 4$ poszczególnych stacji. Zakładamy, że w $t = 0$ panuje stan ustalony przy parametrach ruchu właściwych okresowi niskiej aktywności. Przyjęto, że okres, w którym parametry modelu są stałe, wynosi $\Delta t = 5$ jednostek czasu. Czasy propagacji sygnału zostały pominięte. W czasie pierwszego okresu aktywności widać różnice pomiędzy natężeniami wyjściowymi $\lambda_{i,out}$, później różnice te zacierają się. Rys. 3 przedstawia zmiany średnich długości kolejek $E[N_i(t)]$ odpowiadające przyjętej dynamice strumieni wejściowych. Rys. 4 podaje współczynniki zmienności czasu odpowiedzi poszczególnych stacji. Jak widać, pierwsze dwie stacje ścieżki ($i = 1, 2$) mają różne charakterystyki, w których widoczny jest wpływ cech wejściowego strumienia ścieżki wirtualnej. Dla dalszych stacji wpływ ten jest już nieistotny i zachowanie się stacji jest praktycznie jednakowe, oczywiście pod warunkiem że ich ruch lokalny jest taki sam. Wtedy dla m stacji połączonych szeregowo i mających ten sam parametr C_R^2 współczynnik zmienności całkowitego czasu odpowiedzi, $C_{R_1 \dots R_m}^2 = \frac{1}{m} C_R^2$.

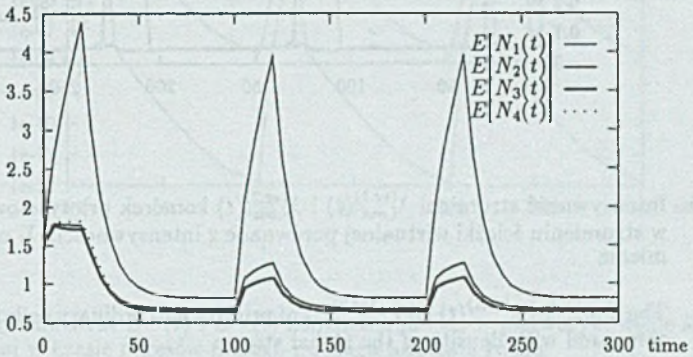
Rys. 2-4 odnoszą się do całkowitego strumienia komórek. Na rys. 5 strumienie wyjściowe $\lambda_{i,out}^{(vc,1)}(t)$, $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$ priorytetowych i zwykłych komórek ścieżki wirtualnej, a także $\lambda_{i,out}^{(l,1)}(t)$, $\lambda_{i,out}^{(l,2)}(t)$ priorytetowych i zwykłych komórek strumieni lokalnych są przedstawione i porównane z $\lambda_i(t)$. Rys. 6 powtarza w powiększeniu przebieg $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$. Na początku okresu dużej aktywności strumień $\lambda_{i,out}^{(vc,1)}(t)$ wzrasta proporcjonalnie do $\rho_i(t)$ (czyli do $\lambda_i(t)$): skład przesyłanych (obsługiwanych) komórek jest określony starymi parametrami charakterystycznymi dla okresu niskiej aktywności. Następnie strefa o zwiększonej częstotliwości występowania komórek klasy pierwszej w strumieniu wirtualnym dochodzi do czoła kolejki i strumień wyjściowy $\lambda_{i,out}^{(vc,1)}(t)$ gwałtownie wzrasta.

Rys. 7 przedstawia straty $L^{(1)}(t)$ i $L^{(2)}(t)$, definiowane jako stosunek liczby zgubionych w jednostce czasu komórek do natężenia ruchu komórek danej klasy, przy założeniu algorytmu push-out (por. [10]) i długości bufora $N = 15$.



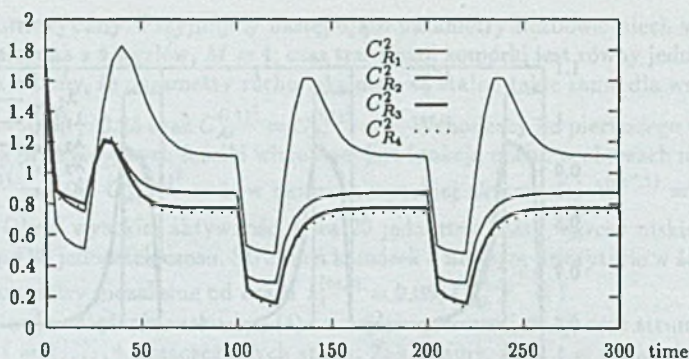
Rys. 2. Intensywność strumienia wejściowego w pierwszym węźle i intensywności strumieni wyjściowych w kolejnych węzłach ścieżki wirtualnej

Fig. 2. The density of input flow at first station and densities of output flows at successive nodes

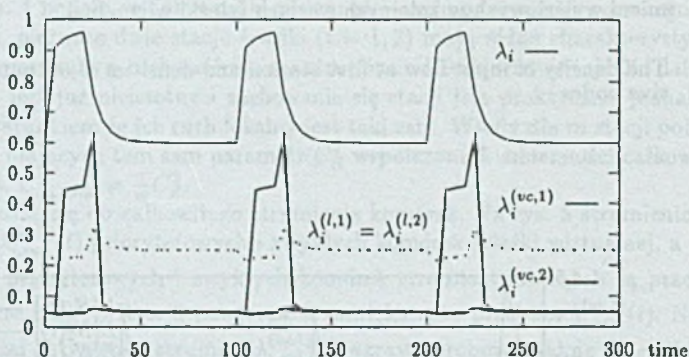


Rys. 3. Średnia liczba komórek $E[N_i(t)]$ w węzłach i ścieżki wirtualnej

Fig. 3. Time-dependent mean queue lengths $E[N_i(t)]$ at nodes i

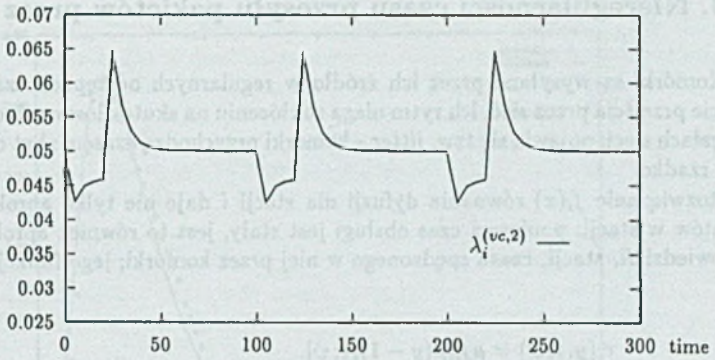


Rys. 4. Współczynnik zmienności czasu odpowiedzi poszczególnych węzłów w ścieżce
 Fig. 4. Squared coefficient of variation of response time at nodes of virtual circuit



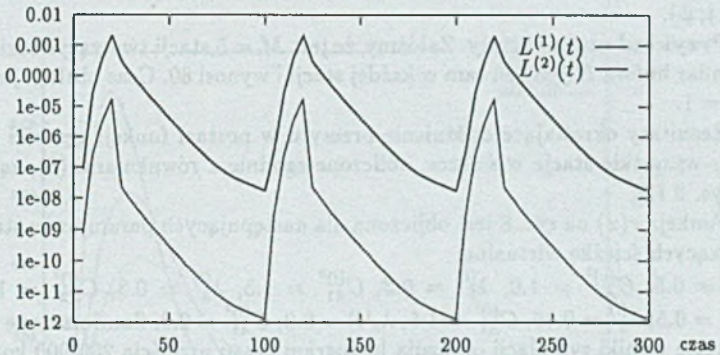
Rys. 5. Intensywność strumieni $\lambda_{i,out}^{(vc,1)}(t)$ i $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$ komórek priorytetowych i zwykłych w strumieniu ścieżki wirtualnej porównane z intensywnością λ_i całkowitego strumienia

Fig. 5. The densities $\lambda_{i,out}^{(vc,1)}(t)$ and $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$ of priority and ordinary cells in virtual circuit compared with density of the global stream



Rys. 6. Intensywność strumienia wyjściowego $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$ komórek niższego priorytetu w strumieniu ścieżki wirtualnej

Fig. 6. The density $\lambda_{i,out}^{(vc,2)}(t)$ of ordinary cells output stream in virtual circuit stream



Rys. 7. Współczynnik strat $L^{(1)}(t)$ i $L^{(2)}(t)$ komórek obu klas w pierwszym węźle ścieżki wirtualnej w czasie okresów małego i dużego nasilenia ruchu

Fig. 7. Relative loss $L^{(1)}(t)$ and $L^{(2)}(t)$ of class-1 and class-2 cells at node 1 for bursty and interbursty periods

3. Nieregularności czasu przesyłu pakietów przez sieć

Komórki są wysyłane przez ich źródło w regularnych odstępach czasu. Później, w trakcie przejścia przez sieć, ich rytm ulega zakłóceniu na skutek losowych czasów czekania w węzłach sieci: pojawia się tzw. *jitter* – komórki przychodzą czasem zbyt często, a czasem zbyt rzadko.

Rozwiązanie $f_i(x)$ równania dyfuzji dla stacji i daje nie tylko aproksymację liczby klientów w stacji: ponieważ czas obsługi jest stały, jest to również aproksymacja czasu odpowiedzi R_i stacji, czasu spędzonego w niej przez komórki; jego funkcja gęstości $r_i(y)$ to

$$r_i(y, t; \psi) = \mu f_i[\mu(y-1), t; \psi]. \quad (8)$$

Argument funkcji jest przesunięty o 1, by wziąć pod uwagę także czas obsługi rozważanego klienta. Możemy oszacować łączny czas przejścia przez m kolejnych stacji ścieżki wirtualnej jako m -krotny spłot funkcji $r_i(y, t; \psi)$:

$$r_{1\dots m}(y) = r_1(y) * \dots * r_m(y), \quad m = 2, \dots, M. \quad (9)$$

Czas odpowiedzi ma zależną od czasu funkcję gęstości rozkładu $r_i(y, t; \psi) = \mu f_i(\mu y - 1, t; \psi)$. Funkcja gęstości $r_{1\dots m}(y, t; \psi)$ łącznego czasu przejścia przez m stanowisk może być wyznaczona w ten sam sposób jak w równaniu (9), tj. poprzez m -krotny spłot funkcji $r_i(y, t; \psi)$.

Przykład numeryczny. Załóżmy, że jest $M = 5$ stacji tworzących ścieżkę wirtualną. Rozmiar bufora N jest ten sam w każdej stacji i wynosi 80. Czas obsługi jest stały i równy $1/\mu = 1$.

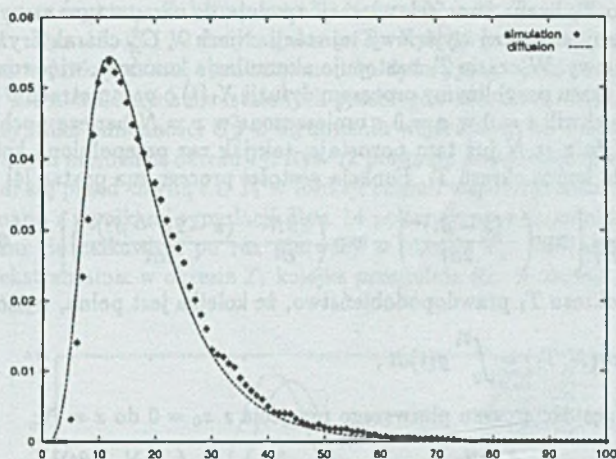
Rezultaty określające opóźnienie przesyłu w postaci funkcji gęstości czasu przejścia przez wszystkie stacje w ścieżce, obliczone zgodnie z równaniami (8), są przedstawione na rys. 8 i 9.

Funkcja $r(x)$ na rys. 8 jest obliczona dla następujących parametrów strumienia 5 stacji tworzących ścieżkę wirtualną:

$\lambda_1^{(v)} = 0.5$, $C_{A1}^{(v)^2} = 1.0$, $\lambda_1^{(l)} = 0.3$, $C_{A1}^{(l)^2} = 1.5$, $\lambda_2^{(l)} = 0.3$, $C_{A2}^{(l)^2} = 1.0$, $\lambda_3^{(l)} = 0.4$, $C_{A3}^{(l)^2} = 0.5$, $\lambda_4^{(l)} = 0.45$, $C_{A4}^{(l)^2} = 1.5$, $\lambda_5^{(l)} = 0.2$, $C_{A5}^{(l)^2} = 2.0$. Zamieszczone na tym samym wykresie wyniki symulacji obrazują histogram czasu przejścia 200 000 komórek.

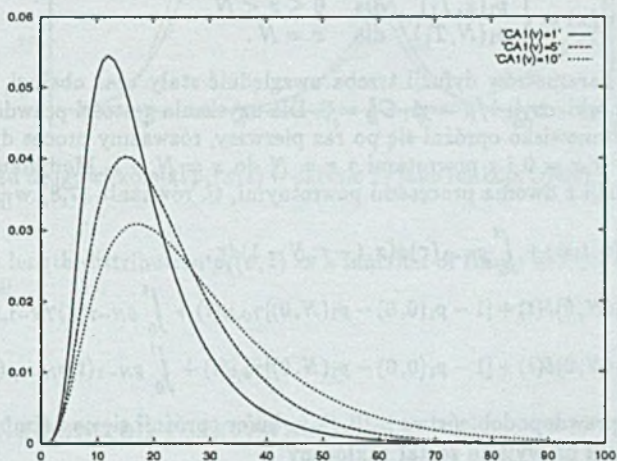
Rysunek 9 uwidacznia wpływ współczynnika zmienności $C_{A1}^{(v)^2}$ na czas przejścia. Trzy przedstawione krzywe różnią się wartością współczynnika zmienności strumienia wejściowego zadań przechodzących przez ścieżkę wirtualną: $C_{A1}^{(v)^2} = 1.0, 5.0$ oraz 10.0 .

Kompensacja nieregularności przepływu. Nieregularność nadchodzenia komórek do punktu ich przeznaczenia można usunąć wprowadzając na końcu drogi komórek, tuż przed odbiornikiem, dodatkową stację, która gromadzi komórki i regularnie wysyła je dalej. Praca tej stacji zakłada dwa naprzemiennie następujące po sobie okresy: w czasie T_1 komórki są gromadzone w kolejce, w okresie T_2 są wysyłane dalej w stałych odstępach czasu. Bufor stacji jest ograniczony i może pomieścić N komórek. Posługując się aproksymacją dyfuzyjną chcemy określić prawdopodobieństwo, że w czasie okresu T_1 pojemność bufora zostanie przekroczone (nastąpią straty komórek) oraz prawdopodobieństwo, że



Rys. 8. Gęstość $r(y)$ rozkładu czasu przesyłu poprzez sieć, wyniki aproksymacji dyfuzyjnej i symulacji

Fig. 8. Density $r(y)$ of the distribution of the end-to-end transmission delay, simulation and diffusion results



Rys. 9. Gęstość rozkładu $R(y)$ czasu przesyłu poprzez sieć jako funkcja współczynnika $C_{A1}^{(v)^2}$

Fig. 9. Density of the distribution $R(y)$ of the end-to-end transmission delay as a function of $C_{A1}^{(v)^2}$

w czasie okresu T_2 liczba komórek w stacji spadnie do zera, a tym samym zostanie zakłócony regularny strumień wyjściowy tej stacji. Niech λ , C_A^2 charakteryzują jak zwykle strumień wejściowy. W czasie T_1 następuje akumulacja komórek, więc rozkład ich liczby $N(t)$ w funkcji czasu przybliżymy procesem dyfuzji $X_1(t)$ o parametrach $\beta = \lambda$, $\alpha = \lambda C_A^2$, rozpoczętym w chwili $t = 0$ w $x = 0$ z umieszczoną w $x = N$ barierą pochłaniającą; proces doszedłszy do $x = N$ już tam pozostaje, tak jak raz przepełniona kolejka pozostaje przepełniona do końca okresu T_1 . Funkcja gęstości procesu ma postać [4]

$$p_1(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\alpha\pi t}} \left[\exp\left(-\frac{(x-\beta t)^2}{2\alpha t}\right) - \exp\left(\frac{2\beta N}{\alpha} - \frac{(x-2N-\beta t)^2}{2\alpha t}\right) \right] \quad 0 \leq x < N,$$

a w końcu okresu T_1 prawdopodobieństwo, że kolejka jest pełna, wynosi

$$p_1(N, T_1) = \int_0^{T_1} g(t) dt, \quad (10)$$

gdzie $g(t)$ jest gęstością czasu pierwszego przejścia z $x_0 = 0$ do $x = N$:

$$g(t) = -\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^N p_1(x, t) dx = \frac{N}{\sqrt{2\alpha\pi t^3}} \exp\left(-\frac{(N-\beta t)^2}{2\alpha t}\right). \quad (11)$$

W okresie T_2 stanowisko przyjmuje nowe komórki, nadchodzące z sieci strumieniem o tych samych co poprzednio parametrach i wysyła je w stałych odstępach czasu Δ . Liczbę komórek w okresie T_2 przybliżymy dyfuzyjnym modelem stanowiska $G/G/1/N$, por [9], równ. (7,12) o warunku początkowym w postaci funkcji $\psi(x)$

$$\psi(x) = \begin{cases} p_1(x, T_1) & \text{dla } 0 \leq x < N \\ p_1(N, T_1) & \text{dla } x = N. \end{cases}$$

Przy doborze parametrów dyfuzji trzeba uwzględnić stały czas obsługi, równy czasowi transmisji komórki, czyli $1/\mu = \Delta$, $C_B^2 = 0$. Dla uzyskania gęstości prawdopodobieństwa, że w chwili t stanowisko opróżni się po raz pierwszy, rozważmy proces dyfuzji z barierą pochłaniającą w $x = 0$ i z powrotami z $x = N$ do $x = N - 1$. Modyfikujemy równania dotyczące dyfuzji z dwoma procesami powrotnymi, tj. równania (7,8) w [9], do postaci

$$f(x, t; \psi) = \phi(x, t; \psi) + \int_0^t g_{N-1}(\tau) \phi(x, t - \tau; N - 1) d\tau, \quad (12)$$

$$\gamma_N(t) = p_1(N, 0)\delta(t) + [1 - p_1(0, 0) - p_1(N, 0)]\gamma_{\psi, N}(t) + \int_0^t g_{N-1}(\tau)\gamma_{N-1, N}(t - \tau) d\tau, \quad (13)$$

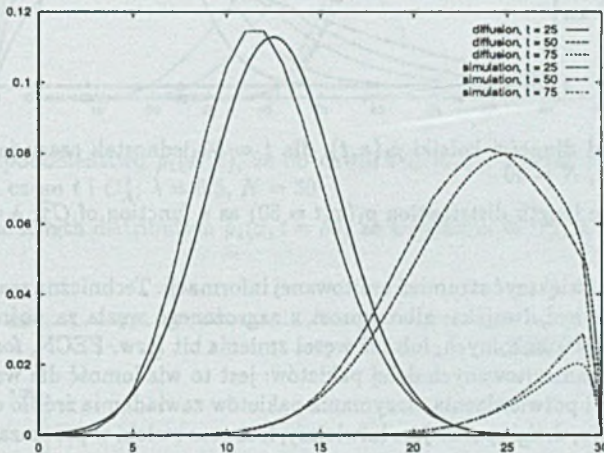
$$\gamma_0(t) = p_1(N, 0)\delta(t) + [1 - p_1(0, 0) - p_1(N, 0)]\gamma_{\psi, 0}(t) + \int_0^t g_{N-1}(\tau)\gamma_{N-1, 0}(t - \tau) d\tau, \quad (14)$$

by wyznaczyć prawdopodobieństwo $p_2(0, t)$, że bufor opróżnił się co najmniej raz do czasu t i rytm komórek na wyjściu został zakłócony

$$p_2(0, t) = \int_0^t \gamma_0(\tau) d\tau. \quad (15)$$

Współczynnik strat komórek związany z ograniczonym rozmiarem bufora L_1 w okresie T_1 i L_2 w okresie T_2 obliczamy jako $L_i = p_i(N, T_i)$, $i = 1, 2$. Prawdopodobieństwo, że w czasie okresu T_2 stanowisko nigdy się nie opróżni, to $1 - p_2(0, T_2)$; otrzymujemy je z równania (15).

Przykład numeryczny. Załóżmy rozmiar bufora $N = 30$, $T_1 = 100$, $T_2 = 500$. Czas przesyłu $\Delta = 1$. Rys. 10, 11 i 12 dotyczą okresu T_1 . Rys. 10 przedstawia rozkład $p_1(x, t)$ długości kolejki w funkcji czasu; rezultaty modelu dyfuzyjnego porównano z symulacją, uśredniając 50 000 niezależnych nieustalonych przebiegów symulacji. Rys. 11 przedstawia wpływ współczynnika zmienności C_A^2 w strumieniu wejściowym na rozkład długości kolejki w wybranym momencie okresu T_1 . Rys. 12 pokazuje prawdopodobieństwo $p_1(N, t)$, że bufor zapełni się przed chwilą $t \in T_1$ w funkcji czasu i współczynnika C_A^2 . Wykres dla $C_A^2 = 1$ porównano z wynikami symulacji. Rys. 14 pokazuje prawdopodobieństwo $p_2(0, t)$, że bufor opróżni się całkowicie po raz pierwszy w okresie T_2 . Dobrane w przykładzie parametry są ekstremalne: w okresie T_1 kolejka przepelnia się; w okresie T_2 opróżnia się prawie całkowicie.

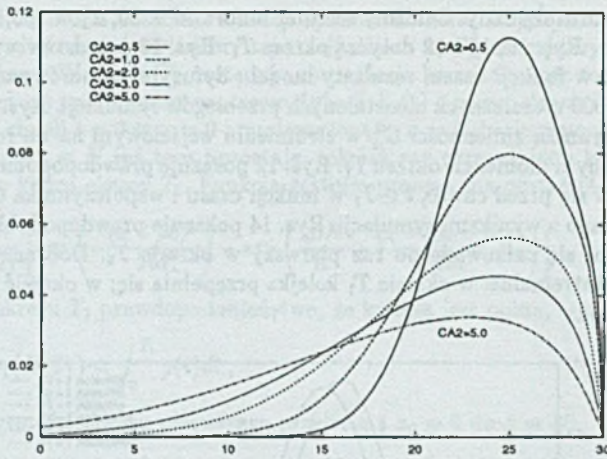


Rys. 10. Rozkład długości kolejki $p_1(x, t)$ w okresie T_1 jako funkcja czasu; $\lambda = 0.5$, $C_A^2 = 1$, $N = 30$

Fig. 10. Queue length distribution $p_1(x, t)$ as a function of time $t \in T_1$; $\lambda = 0.5$, $C_A^2 = 1$, $N = 30$

4. Modele kontroli reaktywnej

Mechanizm *ECN* (*Explicit Congestion Notification*) zawarty w interwencyjnej funkcji kontroli ruchu działa na zasadzie sprzężenia zwrotnego: w momencie gdy dany węzeł sieci osiąga przyjęty poziom zatłoczenia (może to być określona długość kolejki pakietów oczekujących na przesłanie lub określona liczba straconych w pewnym okresie czasu pakietów), węzeł wysyła do źródła wiadomość o zagrożeniu, a źródło jest zobowiązane do ograniczenia swojej aktywności. Po okresie, w którym jest brak takich alarmów, źródło



Rys. 11. Rozkład długości kolejki $p_1(x, t)$, dla $t = 50$ jednostek czasu jako funkcja C_A^2 ; $\lambda = 0.5$, $N = 30$

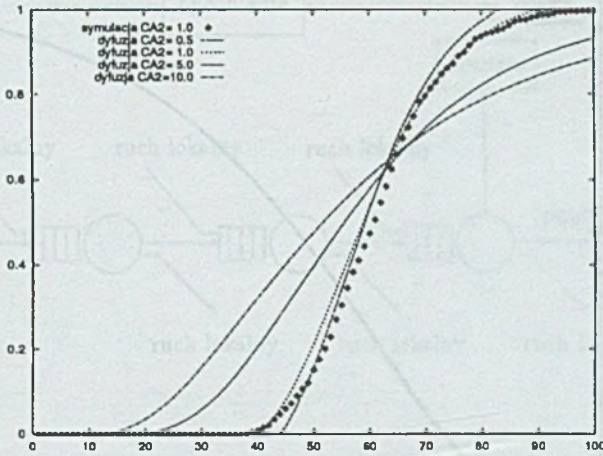
Fig. 11. Queue length distribution $p_1(x, t = 50)$ as a function of C_A^2 ; $\lambda = 0.5$, $N = 30$

znów ma prawo zwiększyć strumień emitowanej informacji. Techniczna realizacja przesyłu informacji może być dwojaka: albo wprost z zagrożonego węzła za pośrednictwem specjalnych pakietów kontrolnych, lub też węzeł zmienia bit (tzw. FECN, forward ECN bit) w nagłówkach transmitowanych dalej pakietów: jest to wiadomość dla węzła końcowego, który przy okazji potwierdzenia otrzymania pakietów zawiadamia źródło o powstałym na trasie zatłoczeniu; drugi sposób jest łatwiejszy, lecz czas zwłoki w przekazaniu wiadomości jest większy.

Model wirtualnej ścieżki z mechanizmem sprzężenia zwrotnego jest przedstawiony na rys. 15. Liczba węzłów (stanowisk obsługi) jest dowolna. Dla uproszczenia pomijamy w dalszym modelu rozpatrywane w poprzednich przykładach klasy komórek i mechanizmy szeregowania.

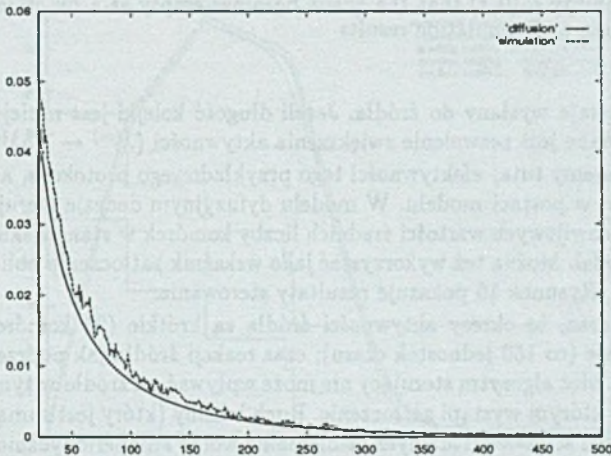
Przykład numeryczny. Załóżmy, że czas ten jest stosunkowo krótki, $\Delta = 100$ jednostek czasu, a okres aktywności jest stosunkowo długi, tak że wpływ sterowania jest widoczny wewnątrz jednego okresu aktywności. Przyjmijmy, że w czasie okresu aktywnego jest transmitowanych 300 komórek. Poza okresami aktywnymi, które powtarzają się co 1000 jednostek czasu, źródło pozostaje nieme. Natężenie ruchu lokalnego jest stałe: $\lambda^{(l)} = 0.5$ komórki na jednostkę czasu. Zakładamy, że bufor może pomieścić 150 komórek. Na początku każdego okresu aktywności źródło zaczyna emitować z maksymalnym natężeniem $\lambda^{(cv)} = 1$ komórki na jednostkę czasu.

Gdy długość kolejki przekracza poziom $S_0 = 20$ komórek, wysłane jest żądanie, by źródło ograniczyło swój maksymalny poziom aktywności ($\lambda^{(cv)} \leftarrow 0.667\lambda^{(cv)}$). Rozkaz ten dochodzi do źródła i jest wykonany po Δ jednostkach czasu. Po okresie $\Delta_1 = 140$ jednostek czasu, a więc 40 jednostek po zmianie natężenia ruchu, kolejka jest badana ponownie: jeżeli jej długość wciąż przekracza poziom S_0 , następnym rozkazem ograniczenia



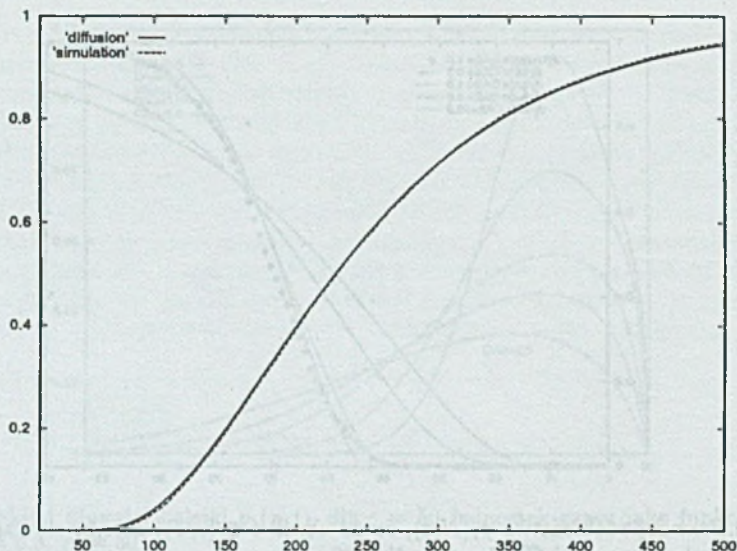
Rys. 12. Prawdopodobieństwo $p_1(N, t)$, że do chwili $t \in [0, T_1]$ kolejka się zapełni, jako funkcja czasu t i C_A^2 ; $\lambda = 0.5$, $N = 30$

Fig. 12. Queue length distribution $p_1(x, t = 50)$ as a function of C_A^2 ; $\lambda = 0.5$, $N = 30$



Rys. 13. Prawdopodobieństwo L_2 straty komórki jako funkcja czasu $t \in T_2$ dla $\lambda = 0.9$; rezultaty aproksymacji dyfuzyjnej i symulacji

Fig. 13. Cell loss probability L_2 as a function of time $t \in T_2$ for $\lambda = 0.9$; comparison of diffusion and simulation results



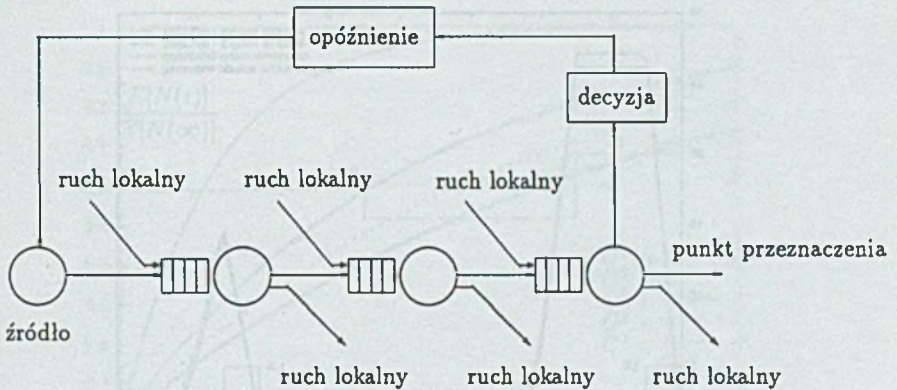
Rys. 14. Prawdopodobieństwo $p_2(0, t)$ że do czasu $t \in [0, T_2]$ kolejka co najmniej raz się opróżni, jako funkcja czasu t ; $\lambda = 0.9$, $N = 30$, $C_A^2 = 1$

Fig. 14. Probability $p_2(0, t)$ that the queue becomes empty as a function of time $t \in T_2$, diffusion and simulation results

aktywności zostaje wysłany do źródła. Jeżeli długość kolejki jest mniejsza niż $S_i = 10$, do źródła wysłane jest zezwolenie zwiększenia aktywności ($\lambda^{(cv)} \leftarrow 1.5\lambda^{(cv)}$).

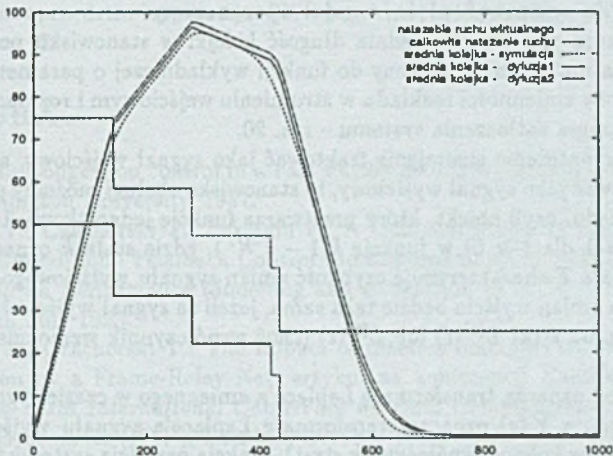
Nie analizujemy tutaj efektywności tego przykładowego protokołu, a jedynie chcemy przedstawić go w postaci modelu. W modelu dyfuzyjnym decyzje sterujące są powzięte na podstawie chwilowych wartości średnich liczby komórek w stanowisku przewidzianych przez model. Można też wykorzystać jako wskaźnik zatłoczenia obliczaną w modelu wartość $p_N(t)$. Rysunek 16 pokazuje rezultaty sterowania.

Załóżmy teraz, że okresy aktywności źródła są krótkie (25 komórek wysłanych w jednym) i częste (co 150 jednostek czasu); czas reakcji źródła jak poprzednio ($\Delta = 100$) jednostek, tak więc algorytm sterujący nie może wpływać na źródło w tym samym okresie aktywności, w którym wystąpi zatłoczenie. Ruch lokalny (który jest sumą strumieni należących do innych ścieżek wirtualnych) zmienia się wolno i nieperiodycznie. Progi $S_o = 20$, $S_i = 10$, jak również okres sterowania $\Delta_1 = 140$ są takie same jak poprzednio. Algorytm sterowania zmniejsza ($\lambda^{(cv)} \leftarrow 0.5\lambda^{(cv)}$) lub zwiększa ($\lambda^{(cv)} \leftarrow 2\lambda^{(cv)}$) dwukrotnie dopuszczalną maksymalną aktywność źródła. Rys. 16 przedstawia przykładową realizację: pierwszy okres aktywny wraz z dużym ruchem lokalnym powoduje zmniejszenie o połowę aktywności źródła w czasie następnego okresu aktywności (który w związku z tym trwa dwukrotnie dłużej), później kolejka maleje i algorytm zezwala na pełną aktywność źródła w czasie trzeciego okresu.



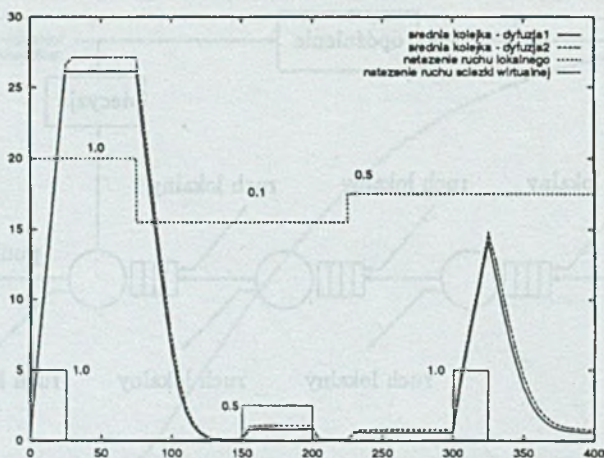
Rys. 15. Model kolejkowy ścieżki wirtualnej z zawiadomieniem o zatłoczeniu typu (FN) i (BN)

Fig. 15. Queueing model with forward (FN) and backward (BN) congestion notification



Rys. 16. Sterowanie w czasie okresu aktywnego obejmującego transmisję 300 komórek. Decyzje sterujące widoczne w skokowych zmianach przepustowości strumienia wejściowego; wyniki symulacji i modelu dyfuzyjnego

Fig. 16. Traffic control for a bursty period of 300 cells: mean buffer queue length as a function of time; control decisions visible in changes of virtual connection throughput; simulation and diffusion results



Rys. 17. Sterowanie strumieniem generowanym przez źródło w czasie trzech kolejnych okresów aktywności po 25 komórek każdy, rezultaty modelu dyfuzyjnego i symulacji

Fig. 17. Traffic control for during three consecutive bursty periods of 25 cells each; simulation and diffusion results

Sterowanie ze sprzężeniem, model uproszczony

Jak pokazują rys. 18, 19, średnia długość kolejki w stanowisku po skokowej zmianie obciążenia ma przebieg zbliżony do funkcji wykładniczej o parametrze zależnym od współczynników zmienności rozkładu w strumieniu wejściowym i rozkładu czasu obsługi, a także od stopnia zatłoczenia systemu – rys. 20.

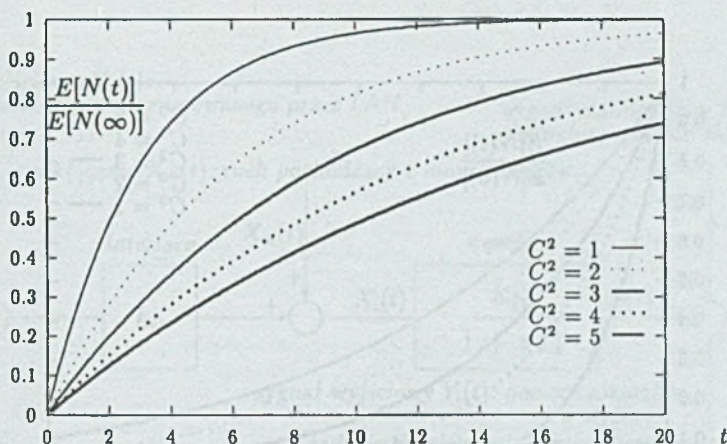
Jeżeli więc natężenie strumienia traktować jako sygnał wejściowy, a średnią długość kolejki traktować jako sygnał wyjściowy, to stanowisko obsługi możemy uważać za inercję pierwszego rzędu, czyli obiekt, który przetwarza funkcję jednostkową $1(t)$ ($1(t) = 0$ dla $t < 0$, $1(t) = 1$ dla $t \geq 0$) w funkcję $k(1 - e^{-t/T})$, gdzie stała k oznacza wzmocnienie systemu, a stała T charakteryzuje szybkość zmian sygnału wyjściowego.

Dynamika zmian wyjścia będzie taka sama, jeżeli za sygnał wyjściowy będziemy uważać współczynnik strat $L^{(1)}(t)$ lub $L^{(2)}(t)$ (choć współczynnik wzmocnienia będzie oczywiście inny).

Niech $\bar{X}_i(s)$ oznacza transformatę Laplace'a zmiennego w czasie sygnału wejściowego w węzle i sieci, a $\bar{Y}_i(s)$ oznacza transformatę Laplace'a sygnału wyjściowego (średnia liczba pakietów w kolejce, współczynnik strat); funkcja przejścia systemu to $\bar{K}_i(s) = \frac{k_i}{1+sT_i}$, a sygnał wyjściowy jest dany przez

$$\bar{Y}_i(s) = \bar{K}_i(s)\bar{X}_i(s) = \frac{k_i}{1+sT_i}\bar{X}_i(s). \quad (16)$$

Parametry k_{1i} , T_i dla stanowiska i zależą nieliniowo od stopnia wykorzystania systemu i dwu pierwszych momentów rozkładów na wejściu i czasu obsługi, $k_{1i} = k_{1i}(\rho_i, C_{\lambda_i}^2, C_{B_i}^2)$, $T_i = T_i(\rho_i, C_{\lambda_i}^2, C_{B_i}^2)$.



Rys. 18. Średnia długość kolejki w czasie jej wzrostu od wartości zerowej do wartości w stanie ustalonym

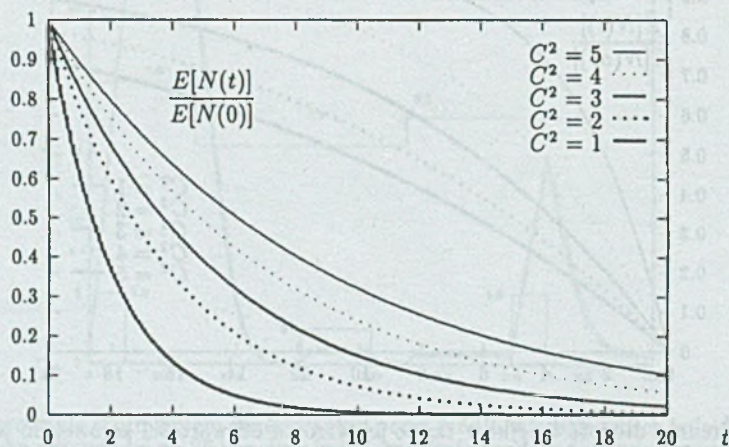
Fig. 18. Mean queue length during its grow from empty queue to steady state value

Opóźnienie sygnału przekazywanego do źródła jest modelowane przez element, którego funkcja przejścia ma postać $k_2 e^{-sD_1}$.

Cały model jest przedstawiony na rys. 21, a przykładowy przebieg sygnałów w funkcji czasu zawiera rys. 22.

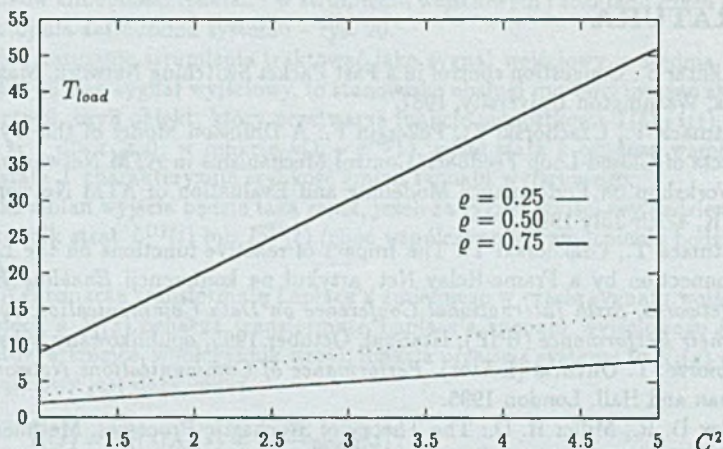
LITERATURA

- [1] Akhtar S.: Congestion control in a Fast Packet Switching Network. Master's Thesis, Washington University, 1987.
- [2] Atmaca T., Czachórski T., Pekergin F.: A Diffusion Model of the Dynamic Effects of Closed-Loop Feedback Control Mechanisms in ATM Networks. 3rd IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks, Ilkley, UK, 4-7th July 1995.
- [3] Atmaca T., Czachórski T.: The Impact of reactive functions on the LAN Interconnection by a Frame-Relay Net, artykuł na konferencji *Enabling High Speed Networks, Sixth International Conference on Data Communication Systems and Their Performance (IFIP)*, Istanbul, October 1995, opublikowany w książkowym zbiorze: T. Onvural (Editor), *Performance of Communications Networks*, Chapman and Hall, London 1995.
- [4] Cox D. R., Miller H. D.: *The Theory of Stochastic Processes*, Methuen, London 1965.
- [5] Czachórski T.: A method to solve diffusion equation with instantaneous return processes acting as boundary conditions. *Bulletin of Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 1993, vol. 41, no. 4 s.



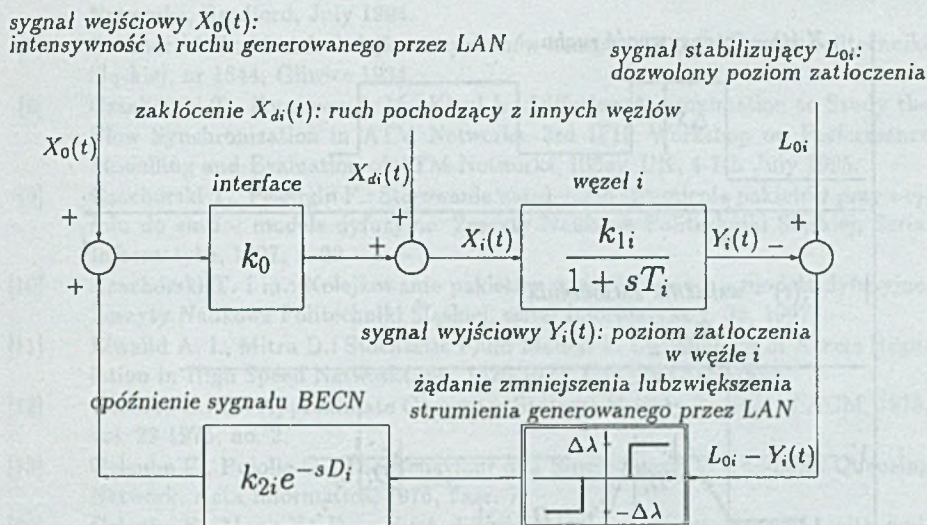
Rys. 19. Średnia długość kolejki w czasie jej spadku od wartości w stanie ustalonym do zera

Fig. 19. Mean queue length during its deminishing from steady state value to zero



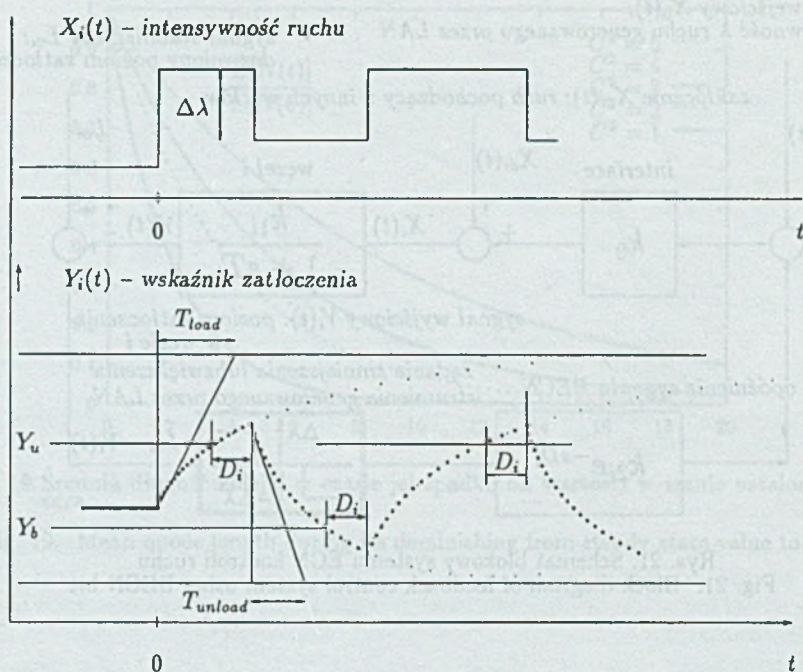
Rys. 20. Stała czasowa T_{load} w czasie wzrostu kolejki jako funkcja $C^2 = C_A^2 = C_B^2 = C_C^2$

Fig. 20. Constant T_{load} during growing of the queue as a function of $C^2 = C_A^2 = C_B^2 = C_C^2$



Rys. 21. Schemat blokowy systemu ECN kontroli ruchu
Fig. 21. Block diagram of feedback control system using BECN bit

113. G. Gallager, P. Papanicolaou, R. M. Mittleman, F. D. Stacey, in *Mobile Computing and Communications*, IEEE Press, New York, 1983, pp. 105-112.
114. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
115. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
116. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
117. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
118. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
119. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
120. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
121. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
122. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.
123. G. Gallager, D. S. Reed, in *Information Theory and Coding*, McGraw-Hill, New York, 1963, pp. 246-250.



Rys. 22. Przykład zmian natężenia ruchu i zatłoczenia w węzle sieci przy zastosowaniu mechanizmu ECN kontroli ruchu

Fig. 22. An example of evolution of traffic and congestion in the feedback control system using BECN bit

- [6] Czachórski T., Fourneau J. M., Pekergin F.: Diffusion Models to Study Nonstationary Traffic and Cell Loss in ATM Networks. ACM 2nd Workshop on ATM Networks, Bradford, July 1994.
- [7] Czachórski T.: Modele kolejkowe systemów komputerowych. Skrypt Politechniki Śląskiej, nr 1844, Gliwice 1994.
- [8] Czachórski T., Fourneau J. M., Kloul L.: Diffusion Approximation to Study the Flow Synchronization in ATM Networks. 3rd IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks, Ilkley, UK, 4-7th July 1995.
- [9] Czachórski T., Pekergin F.: Sterowanie natężeniem strumienia pakietów przy wejściu do sieci – modele dyfuzyjne. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Informatyka, 1997, z. 32.
- [10] Czachórski T. i in.: Kolejkowanie pakietów w węzłach sieci – modele dyfuzyjne. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Informatyka z. 32, 1997.
- [11] Elwalid A. I., Mitra D.: Stochastic Fluid Models in the Analysis of Access Regulation in High Speed Networks, pp. 1626-1633, GLOBECOM 1991.
- [12] Gelenbe E.: On Approximate Computer Systems Models, Journal of ACM, 1975, vol. 22 1975, no. 2.
- [13] Gelenbe E., Pujolle G.: The Behaviour of a Single Queue in a General Queueing Network, Acta Informatica, 1976, Fasc. 7.
- [14] Gelenbe E., Mang X., Feng Y.: A diffusion cell loss estimate for ATM with multiclass bursty traffic. in: D. D. Kouvatsos (Editor), Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks, Vol. 2, Chapman and Hall, London 1996.
- [15] Hébuterne G., Gravey A.: A Space Priority Queueing Mechanism for Multiplexing ATM Channels, Race 1022 Meeting, 24 Janvier 1989, extended version in ITC Specialist Seminar, Adelaide, September 1989.
- [16] Holtsinger D. S.: Performance Analysis of Leaky Bucket Policing Mechanisms. Ph.D. thesis, Dept. of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, 1992.
- [17] Kröner H., Hébuterne G., Boyer P., Gravey A.: Priority management in ATM switching nodes. IEEE Journal on Selected Areas of Communications, 1991, vol. 9, no. 3, s. 418-427.
- [18] Meyer J. F., Montagna S., Paglino R.: Dimensioning of an ATM switch with shared buffer and threshold priority. Computer Networks and ISDN Systems, 1993, vol. 26, s. 95-108.
- [19] Newell G. F.: Applications of Queueing Theory. Chapman and Hall, London 1971.
- [20] Stehfest H.: Algorithm 368: Numeric Inversion of Laplace Transform. Communications of ACM, 1970, vol. 13, no. 1, s. 47-49.
- [21] Ōrs T., Jones S. P. W.: Performance Optimization of ATM Input Control using Multiple Leaky-Buckets. ACM 3rd Workshop on ATM Networks, Ilkley 1995.
- [22] Veillon F.: Algorithm 486: Numerical Inversion of Laplace Transform. Communications of ACM, 1974, vol. 17, no. 10, s. 587-589.

Recenzent: Dr inż. Ewa Starzewska-Karwan

Abstract

We study the effects of nonstationary traffic patterns in a network of ATM nodes. Dynamic behaviour of ATM networks is of interest due to the highly nonhomogenous nature of the load: periods of basic activities are interleaved with bursty periods of demands. The models frequently used to predict transient behaviour of these networks are based on fluid approximation. Usually they assume Poisson arrivals and consider only mean values of queues. Here, we propose a diffusion model which takes into account general input process and allows us to study the dynamics of nonstationary traffic along virtual path, to approximate transient distributions of queues and transient distributions of response times of one or several nodes. It also permits the estimation of time-varying loss rates due to limited capacity of buffers. Queue length distribution obtained at each node is used to estimate the jitter.

We are also able to implement in the model some reactive control functions used e.g. in a Frame-Relay network interconnecting LAN networks. These functions are based on two mechanisms: *discard eligibility* which differentiates frames coming from LAN that can be discarded with low priority and *explicit congestion notification* which allows a node to notify the source that the danger of congestion arises and the activity of the source (i.e. of LAN) should be lowered. Diffusion models allow us to define how the input stream issued by LANs is changed by the DE mechanism and to estimate the losses due to queue overflow when either push-out or threshold policy is used to manage the queue. The transient solution to diffusion equation serves to estimate the dynamics of queues evolution during the changes of input flow issued by LANs and moderated by ECN mechanism. It is the basis of a closed-loop, control theory model describing the influence of ECN mechanism on a FR network performance.