

Jerzy KLAMKA, Jolanta TAŃCULA

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk

ANALIZA D-STABILNOŚCI PROTOKOŁU TCP-DCR¹

Streszczenie. Praca zawiera analizę stabilności sieci na podstawie protokołu TCP-DCR, będącego modyfikacją tradycyjnego TCP. Utworzono model matematyczny sieci i opisano go równaniami. Schemat blokowy modelu sieci przekształcono do takiej postaci, aby zbadać jego D-stabilność stosując metodę przestrzeni niepewnych parametrów.

Słowa kluczowe: sieci komputerowe, D-stabilność, protokół TCP-DCR

ANALYSIS D-STABILITY OF TCP-DCR PROTOCOL

Summary. The paper contains an analysis of the stability of the network based on TCP-DCR, which is a modification of the traditional TCP. Created mathematical model of the network and it is described by equations. Block diagram of the network model was converted to a form in order to investigate the D-stability using the method of the space of uncertain parameters.

Keywords: computer networks, D-stability, TCP-DCR protocol

1. Model matematyczny TCP-DCR

Wydajność protokołu TCP w sieciach bezprzewodowych jest obecnie tematem badań [3]. W sieciach bezprzewodowych trudno stwierdzić, czy obniżenie wydajności TCP jest spowodowane błędami transmisji czy przeciążeniem łącza. Modyfikacją TCP jest protokół TCP-DCR (*Delay Control Rate*), który zwiększa odporność na błędy. Uzyskuje się to przez dodanie niewielkiego czasu opóźnienia uruchomienia algorytmów reakcji na zatory w transmisji [6]. Jeśli połączymy stację bazową przewodową z siecią bezprzewodową [8], to model działania takiej sieci na podstawie protokołu TCP-DCR można opisać nieliniowymi równaniami różniczkowymi:

¹ Praca finansowana z grantu Narodowego Centrum Nauki Nr N/519 012 31/1957.

$$W'(t) = \frac{1-P_D}{R(t)} + \frac{P_D\alpha}{R(t)+rtt} - \frac{W(t)}{2} \cdot \frac{W(t-R(t)-\tau)}{R(t-R(t)-\tau)} [p(t-R(t)-\tau) + P_D(1-\alpha)] \quad (1.1)$$

$$\tilde{q}'(t) = \begin{cases} -C + \frac{N(t)}{R(t)(1-P_D) + (R(t)+rtt)P_D} W(t) & \tilde{q} > 0 \\ \max\left\{0, -C + \frac{N(t)}{R(t)(1-P_D) + (R(t)+rtt)P_D\alpha} W(t)\right\} & \tilde{q} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

gdzie:

- P_D – prawdopodobieństwo utraty pakietu w sieci,
- rtt – czas, po którym protokół wykazuje błąd z prawdopodobieństwem α ,
- τ – dodatkowy czas oczekiwania na potwierdzenie wykazania błędu transmisji ze względu na niedoskonałość mediów transmisyjnych,
- W – rozmiar okna (w pakietach),
- \tilde{q} – długość kolejki (w pakietach),
- $R(t)$ – czas $rtt = \frac{\tilde{q}}{C} + T_p$ (s),
- p – prawdopodobieństwo znakowania / odrzucania pakietów,
- T_p – czas propagacji (s),
- N – liczba sesji TCP.

Wyznaczone wzory na wielkość okna i długość kolejki \tilde{q} protokołu TCP zostały wyprowadzone w pracy [5]. W pracy [7] model działania sieci na podstawie protokołu TCP-DCR został poszerzony, przedstawiają to wzory (1.1), (1.2).

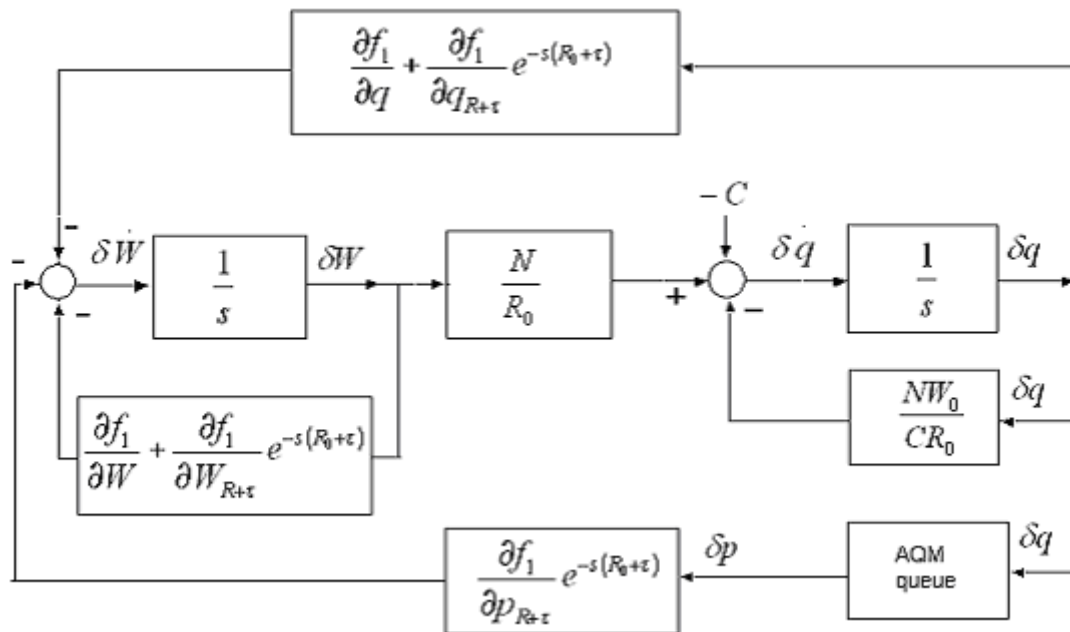
Stosujemy aproksymację dynamiki układu poprzez linearyzację nieliniowego modelu wokół ustalonego punktu pracy. Biorąc rozmiar okna W i długość kolejki \tilde{q} jako stałe oraz prawdopodobieństwo znakowania pakietu p jako dane wyjściowe, ustalony punkt pracy (W_0, \tilde{q}_0, p_0) jest zdefiniowany przez $W'(t) = 0$ oraz $\tilde{q}'(t) = 0$. Przyjmując dla uproszczenia $(t - R(t)) = (t - R_0)$, po linearyzacji wokół ustalonego punktu pracy uzyskujemy równania:

$$\frac{1-P_D}{R_0} + \frac{P_D\alpha}{R_0+rtt} - \frac{W_0^2(t)}{2R_0} \cdot [p_0 + P_D(1-\alpha)] = 0 \quad (1.3)$$

$$-C + \frac{NW_0(t)}{R_0(1-P_D) + (R_0+rtt)P_D} = 0 \quad (1.4)$$

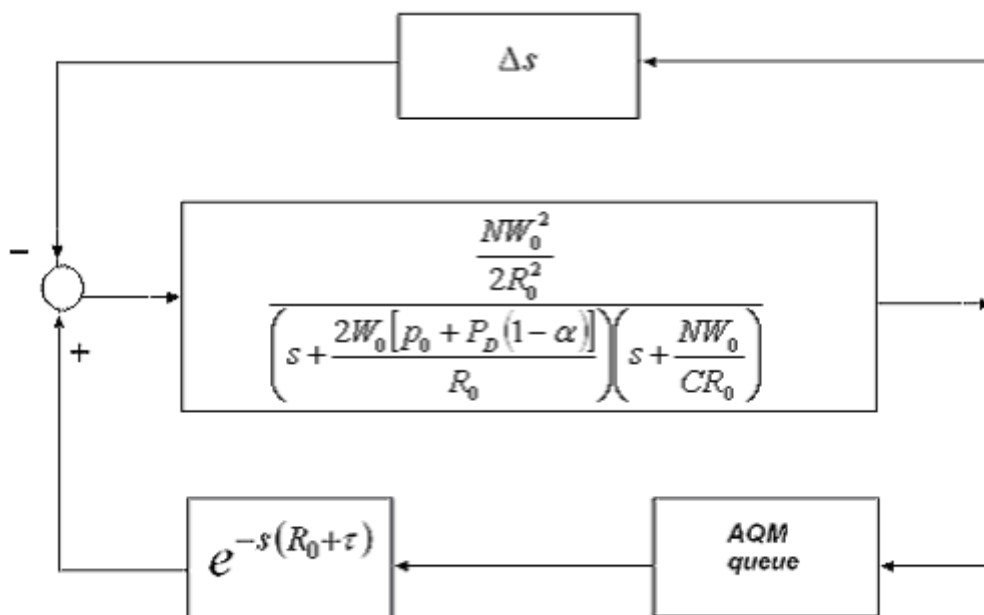
2. Linearyzacja modelu

Po linearyzacji równań (1.3) i (1.4) uzyskujemy model sieci przedstawiony na schemacie blokowym [7]:



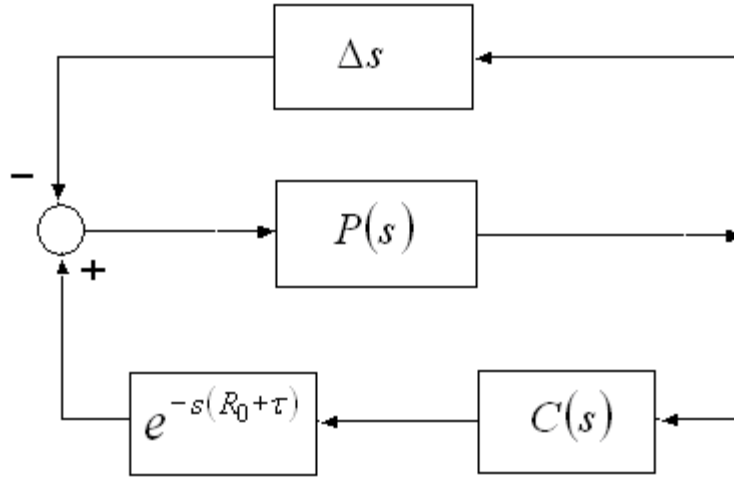
Rys. 1. Schemat blokowy zlinearyzowanych równań modelu TCP-DCR
 Fig. 1. Block diagram of model TCP-DCR after linearization

Podstawiając wartości różniczek do powyższego schematu i upraszczając schemat, otrzymujemy:



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy
 Fig. 2. Simplified block diagram

Wprowadzając transmitancję operatorową $C(s)$ algorytmu RED, schemat blokowy z rys. 2 można przedstawić w następującej postaci:



Rys. 3. Uproszczony schemat blokowy z transmitancją operatorową algorytmu RED
Fig. 3. Simplified block diagram with transfer function of algorithm RED

Określamy transmitancję operatorową $P(s)$:

$$P(s) = \frac{\frac{NW_0^2}{2R_0^2}}{\left(s + \frac{2W_0[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{R_0}\right) \left(s + \frac{NW_0}{CR_0}\right)} \cdot e^{-s(R_0 + \tau)} \quad (2.1)$$

$$P(s) = \frac{\frac{NW_0^2}{2R_0^2}}{s^2 + \frac{NW_0 + 2W_0C[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0} s + \frac{2NW_0^2[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0^2}} \cdot e^{-s(R_0 + \tau)} \quad (2.2)$$

Powyższa transmitancja operatorowa reprezentuje element inercyjny drugiego rzędu z opóźnieniem oraz zostanie wykorzystana przy definiowaniu quasi-wielomianu charakterystycznego modelu.

3. Stabilność quasi-wielomianu modelu sieci TCP-DCR

Stabilność jest jedną z podstawowych cech charakteryzujących układy dynamiczne. Jeśli przyjąć, że sieć komputerowa jest specyficznym układem dynamicznym, to możemy poddać badaniu stabilności taki układ.

W przypadku sieci komputerowej opisanej równaniami różniczkowymi (1.1), (1.2) na podstawie definicji stabilności [1, 2] mamy:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = 0 \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{q}(t) = 0.$$

Zatem, dla dowolnego $t \in [0; \infty)$ wielkość okna $W(t)$ oraz długość kolejki $\tilde{q}(t)$ są ograniczone. Ma to istotne znaczenie dla projektowania sieci komputerowych.

Ponieważ w układzie występuje opóźnienie, zatem o stabilności układu decydują pierwiastki quasi-wielomianu charakterystycznego transmitancji operatorowej.

W celu określenia quasi-wielomianu przyjmujemy oznaczenia dla parametrów:

$$q_1 = \frac{NW_0^2}{2R_0^2}; \quad (3.1)$$

$$q_2 = \frac{NW_0 + 2W_0C[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0} \quad (3.2)$$

$$q_3 = \frac{2NW_0^2[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0^2} \quad (3.3)$$

Zależności, które otrzymaliśmy, pozwolą analizować stabilność sieci komputerowej. Parametry te zależą od liczby sesji TCP N , pojemności łącza C oraz prawdopodobieństwa utraty pakietu P_D i prawdopodobieństwa wystąpienia błędu α .

Powyższe parametry q_1, q_2, q_3 podstawiamy do transmitancji operatorowej $P(s)$, i w efekcie otrzymujemy

$$P(s) = \frac{q_1}{s^2 + q_2s + q_3} \cdot e^{-s(R_0+\tau)} \quad (3.4)$$

Podstawowym algorytmem dla routerów internetowych jest algorytm RED [8]. Po określeniu wzoru jego transmitancji operatorowej $C(s)$ [4, 5]:

$$C(s) = \frac{KL}{s + K} \quad (3.5)$$

na podstawie schematu blokowego z rys.3 tworzymy transmitancję operatorową całego układu opisaną równaniem:

$$G(s) = \frac{\frac{q_1}{s^2 + q_2s + q_3} \cdot e^{-s(R_0+\tau)}}{1 + \frac{KL}{s + K} \cdot \frac{q_1}{s^2 + q_2s + q_3} \cdot e^{-s(R_0+\tau)}} = \frac{KL(s^2 + q_2s + q_3)}{(s + K)(s^2 + q_2s + q_3) + KLq_1 e^{-s(R_0+\tau)}} \quad (3.6)$$

Quasi-wielomian charakterystyczny powyższego układu ma postać [1, 2]:

$$W(s, R_0 + \tau, q) = w_0(s, q) + w_1(s, q)e^{-s(R_0+\tau)} \quad (3.7)$$

$$W(s, R_0 + \tau, q) = (s + K)(s^2 + q_2s + q_3) + KLq_1 e^{-s(R_0+\tau)} \quad (3.8)$$

gdzie:

$$w_0(s, q) = (s^3 + Ks^2) + (s^2 + Ks)q_2 + (s + K)q_3 \quad (3.9)$$

$$w_1(s, q) = KLq_1 \quad (3.10)$$

Quasi-wielomian charakterystyczny zostanie wykorzystany do badania D-stabilności metodą przestrzeni niepewnych parametrów.

4. Metoda przestrzeni niepewnych parametrów

Ze względu na fakt, że quasi-wielomian ma nieskończenie wiele zer, nie wszystkie metody mogą być stosowane do badania jego stabilności. Stosuje się wówczas metody graficzne, np. kryterium Michajłowa lub metodę przestrzeni niepewnych parametrów. Metoda przestrzeni niepewnych parametrów jest rozwinięciem znanej klasycznej metody podziału D i polega na wyznaczeniu wartości niepewnych parametrów i ich odchyłek, dla których rozpatrywany wielomian jest asymptotycznie stabilny [1, 2].

Problem odpornej D-stabilności będziemy badać na płaszczyźnie parametrów (q_1, q_2) w obszarze D. Rzut prostopadłością

$$Q = \{q = [q_1; q_2; q_3]: q_k \in [q_k^-; q_k^+], k = 1, 2, 3\}, \quad Q \subset R^3 \quad (4.1)$$

na tę płaszczyznę wyznacza prostokąt zbudowany z odchyłek parametrów od ich wartości nominalnych

$$Q_p = \{q_p = [q_1; q_2]: q_k \in [q_k^-; q_k^+], k = 1, 2\}, \quad Q \subset R^2 \quad (4.2)$$

Zera quasi-wielomianu na brzegu obszaru D to zera rzeczywiste $s = -\gamma$ (jeśli wektor q_p leży na granicy zer rzeczywistych) lub para zer zespolonych sprzężonych $s = -\gamma \pm j\omega$, dla $\omega > 0$ (jeśli wektor q_p leży na granicy zer zespolonych).

Zachodzą wówczas zależności:

$$Q_{gr} = \{q: w(-\gamma, h, q) = 0\} \quad (4.3)$$

jest granicą zer rzeczywistych, a

$$Q_{gz} = \{q: U(\omega, q) = 0 \text{ i } V(\omega, q) = 0 \text{ dla pewnych } \omega > 0\} \quad (4.4)$$

jest granicą zer zespolonych.

Rodzina quasi-wielomianów $W(s, h, Q) = \{w(s, h, q): q \in Q\}$ jest odporne D-stabilna wtedy i tylko wtedy, gdy powierzchnie opisane równaniem:

$$w(-\gamma, h, q) = 0 \quad (4.5)$$

oraz układem równań

$$\begin{cases} U(\omega, q) = 0 \\ V(\omega, q) = 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

dla parametru $\omega \in (0, \infty)$, nie przecinają zbioru Q_p .

5. Przykład liczbowy

Zadaniem niniejszej pracy było wykazanie, jak dobrać parametry q_3 i ω , aby krzywe powstałe w wyznaczonych przez $q_1(\omega)$ i $q_2(\omega)$ granicach stabilności przebiegały jak najbliżej prostokąta granicznego Q_p utworzonego z odchyłek wartości tych parametrów.

Przyjmujemy, że obszarem D-stabilności jest przesunięta otwarta lewa półpłaszczyzna, której brzeg ma opis parametryczny

$$f(\omega) = -\gamma + j\omega, \quad \omega = [0, \infty), \quad \text{gdzie } \gamma = 0.05 \quad (5.1)$$

Stosując podstawienie $s=f(\omega)$, quasi-wielomian $W(s, R_0 + \tau, q)$ można przedstawić w postaci

$$w(f(\omega), R_0 + \tau, q) = U(\omega, q) + jV(\omega, q) \quad (5.2)$$

gdzie:

$$U(\omega, q_1, q_2) = R_0(\omega) + q_1 R_1(\omega) + q_2 R_2(\omega) + q_3 R_3(\omega) \quad (5.3)$$

$$V(\omega, q_1, q_2) = I_0(\omega) + q_1 I_1(\omega) + q_2 I_2(\omega) + q_3 I_3(\omega). \quad (5.4)$$

Obliczamy granicę zer zespolonych, to znaczy rozwiązujemy równanie:

$$A(\omega)q_p(\omega) = b(\omega, q_3) \quad (5.5)$$

$$A(\omega) = \begin{bmatrix} R_1(\omega) & R_2(\omega) \\ I_1(\omega) & I_2(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$q_p(\omega) = \begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ q_2(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$b(\omega, q_3) = \begin{bmatrix} -R_0(\omega) - q_3 R_3(\omega) \\ -I_0(\omega) - q_3 I_3(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$\begin{cases} R_0(\omega) + R_1(\omega)q_1 + R_2(\omega)q_2 + R_3(\omega)q_3 = 0 \\ I_0(\omega) + I_1(\omega)q_1 + I_2(\omega)q_2 + I_3(\omega)q_3 = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} R_1(\omega) & R_2(\omega) \\ I_1(\omega) & I_2(\omega) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ q_2(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_0(\omega) - q_3 R_3(\omega) \\ -I_0(\omega) - q_3 I_3(\omega) \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

czyli

$$\begin{bmatrix} KL & \gamma^2 - \omega^2 - K\gamma \\ 0 & K\omega - 2\gamma\omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ q_2(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma^3 - K\gamma^2 + K\omega^2 - 3\omega^2\gamma + \gamma q_3 - Kq_3 \\ -3\gamma^2\omega + \omega^3 + 2K\gamma\omega - \omega q_3 \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

Z powyższego równania obliczamy:

$$\begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ q_2(\omega) \end{bmatrix} = A(\omega)^{-1} \cdot b(\omega), \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} q_1(\omega) \\ q_2(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{KL} & 0 \\ \frac{\gamma^2 - \omega^2 - K\gamma}{KL\omega(K-2\gamma)} & \frac{1}{\omega(K-2\gamma)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma^3 - K\gamma^2 + K\omega^2 - 3\omega^2\gamma + \gamma q_3 - Kq_3 \\ -3\gamma^2\omega + \omega^3 + 2K\gamma\omega - \omega q_3 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Stąd mamy:

$$q_1(\omega) = \frac{(\gamma^3 - K\gamma^2 + K\omega^2 - 3\omega^2\gamma + \gamma q_3 - Kq_3)}{KL}, \quad (5.14)$$

$$q_2(\omega) = \frac{(\gamma^2 - \omega^2 - K\gamma)(\gamma^3 - K\gamma^2 + K\omega^2 - 3\omega^2\gamma - \gamma q_3 + Kq_3) + KL\omega(-3\gamma^2 + \omega^2 + 2K\gamma - q_3)}{KL\omega(K-2\gamma)} \quad (5.15)$$

Odchyłki dla poszczególnych wartości parametrów q_1, q_2 i q_3 od ich wartości nominalnych są liczone według wzorów:

$$q_1^0 = \frac{NW_0^2}{2R_0^2}$$

$$q_1^+ = \frac{(N + 0.1N)(W_0 + 0.1W_0)^2}{2(R_0 - 0.1R_0)^2}$$

$$q_1^- = \frac{(N - 0.1N)(W_0 - 0.1W_0)^2}{2(R_0 + 0.1R_0)^2}$$

$$q_2^0 = \frac{NW_0 + 2W_0C[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0}$$

$$q_2^+ = \frac{(N + 0.1N)(W_0 + 0.1W_0) + 2(W_0 + 0.1W_0)(C + 0.1C)\{(p_0 + 0.1p_0) + (P_D + 0.1P_D)[1 - (\alpha - 0.1\alpha)]\}}{(C - 0.1C)(R_0 - 0.1R_0)}$$

$$q_2^- = \frac{(N - 0.1N)(W_0 - 0.1W_0) + 2(W_0 - 0.1W_0)(C - 0.1C)\{(p_0 - 0.1p_0) + (P_D - 0.1P_D)[1 - (\alpha + 0.1\alpha)]\}}{(C + 0.1C)(R_0 + 0.1R_0)}$$

$$q_3^0 = \frac{2W_0^2N[p_0 + P_D(1-\alpha)]}{CR_0^2}$$

$$q_3^+ = \frac{2(W_0 + 0.1W_0)^2(N + 0.1N)[(p_0 + 0.1) + (P_D + 0.1P_D)(1 - (\alpha - 0.1\alpha))]}{(C - 0.1C)(R_0 - 0.1R_0)^2}$$

$$q_3^- = \frac{2(W_0 - 0.1W_0)^2(N - 0.1N)[(p_0 - 0.1) + (P_D - 0.1P_D)(1 - (\alpha + 0.1\alpha))]}{(C + 0.1C)(R_0 + 0.1R_0)^2}$$

Po wyznaczeniu odchyłek sporządzimy wykresy krzywych. Przyjmujemy $N=60, C=1000, p_0=0.05, W_0=10, R_0=0.2, \alpha=0.1, P_D=0.25$ [7].

Otrzymujemy odpowiednie wartości parametrów:

$$q_1^0 = 75000 \quad q_1^+ = 123240 \quad q_1^- = 45186$$

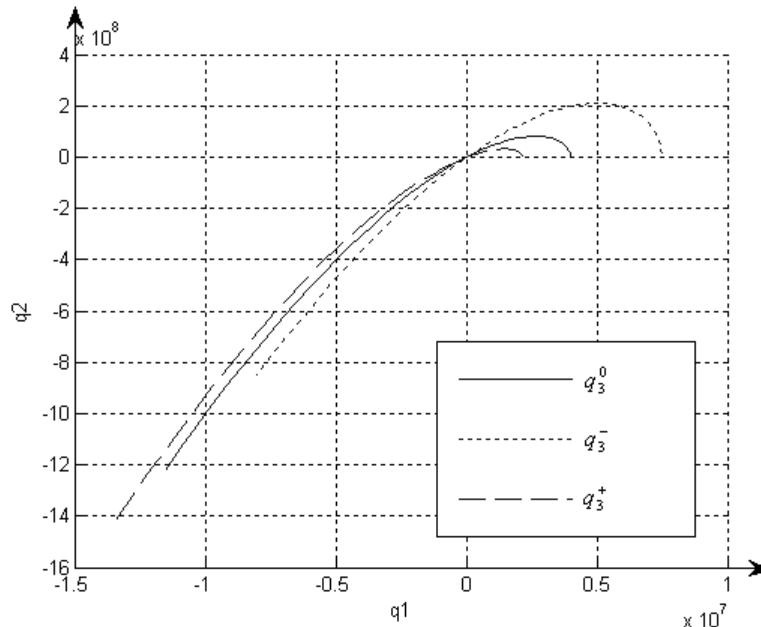
$$q_2^0 = 30.5 \quad q_2^+ = 50.1 \quad q_2^- = 18.4$$

$$q_3^0 = 82.5 \quad q_3^+ = 154.5 \quad q_3^- = 44$$

Prostokąt Q_p utworzony z odchyłek tych parametrów ma wówczas wymiary

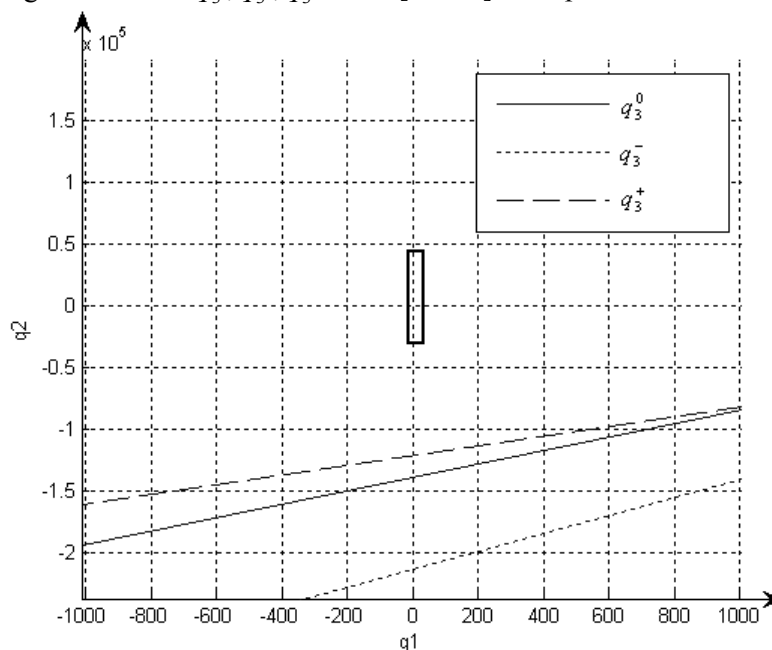
$$Q_p = \{q_p = [q_1; q_2]: q_1 \in [-29814; 48240], q_2 \in [-12.1; 19.6]\}$$

Wykresy krzywych powstałe z podanych wartości, zgodnie ze wzorami (5.14) i (5.15) dla wartości $\omega=[0.2; 10]$ z krokiem 0.2, wyglądają następująco.



Rys. 4. Wykres krzywych q_3^0, q_3^+, q_3^- dla $\omega=[0.2:10]$ z krokiem 0.2

Fig. 4. Curves q_3^0, q_3^+, q_3^- for $\omega=[0.2:10]$ of step 0.2



Rys. 5. Powiększenie wykresu i zaznaczenie prostokąta Q_p

Fig. 5. The enlargement of the graph and select the rectangle Q_p

Z powyższych wykresów wynika, że krzywe nie przecinają prostokąta Q_p . Oznacza to, że dla zbioru Q_{gz} , czyli granicy zer zespolonych nie istnieje obszar niestabilny.

W celu zbadania D-stabilności pozostaje nam wyznaczenie granic zer rzeczywistych, czyli rozwiązanie równania

$$B_0 + \sum_{k=1}^l q_k B_k = 0, \quad (5.16)$$

gdzie $B_k = w_0(-\gamma) + \sum_{i=1}^m w_{ik}(-\gamma) \exp(\gamma h_i)$, $k=0,1,\dots,l$. (5.17)

Na podstawie badań literaturowych [1, 5] przyjmujemy $s = -\gamma$, gdzie $\gamma = 0.05$, $K = 0.005$ i $L = 1.86 \cdot 10^{-4}$. Otrzymujemy równanie liniowe:

$$q_2 = -0.0004q_1 + 20q_3 + 0.05 \quad (5.18)$$

Dla wartości $q_3^- = -38.5$, równanie liniowe ma postać

$$q_2 = -0.0004q_1 - 769.95 \quad (5.19)$$

a dla $q_3^+ = 72$, równanie przedstawia się następująco:

$$q_2 = -0.0004q_1 + 1440.05 \quad (5.20)$$

Otrzymujemy dwie proste na płaszczyźnie (q_1, q_2) , które są od siebie bardzo oddalone. Należy zatem przekształcić wzór (5.18) i wyznaczyć q_3 . Mamy wówczas

$$q_3 = \frac{q_2 + 0.0004q_1 - 0.05}{20} \quad (5.21)$$

Do wzoru (5.21) podstawimy wartości odchyłek $q_1 = -29814$ i $q_2 = -12.1$ oraz $q_1 = 48240$ i $q_2 = 19.6$, otrzymujemy:

$$q_3' = \frac{-12.1 + 0.004 \cdot (-29814) - 0.05}{20} = -6.6$$

$$q_3'' = \frac{19.6 + 0.004 \cdot (48240) - 0.05}{20} = 10.6$$

Przedział określony na podstawie powyższych obliczeń $[-6.6; 10.6]$ mieści się w przedziale $q_3 \in [-38.5; 72]$. Oznacza to, że proste dla wartości z tego przedziału przecinają prostokąt Q_p . Należy więc wykluczyć wartości z tego przedziału ze zbioru rozwiązań. W efekcie końcowym obszar D-stabilności granicy zer rzeczywistych znajduje się dla wartości q_3 w przedziale $[-38.5; -6.6) \cup (10.6; 72]$.

Skoro nie można określić granic stabilności zer zespolonych, bo układ zawsze jest stabilny, to zbiór $Q_{gz} = \emptyset$. Wynika z tego, że o D-stabilności decyduje granica zer rzeczywistych. To z kolei jest warunkiem D-stabilności całego quasi-wielomianu, czyli quasi-wielomian jest odpornie D-stabilny w granicach zer rzeczywistych dla $[-38.5; -6.6) \cup (10.6; 72]$.

6. Podsumowanie

Praca dotyczy analizy D-stabilności sieci komputerowej na podstawie protokołu TCP-DCR, będącego modyfikacją tradycyjnego TCP. Utworzono model matematyczny, który oprócz sieci bazowej przewodowej zawiera sieć bezprzewodową. Model został opisany równaniami różniczkowymi, na podstawie których opracowano schemat blokowy. Po linearyzacji i uproszczeniu schematu blokowego wyznaczono transmitancję operatorową układu. Na tej podstawie określono wzór quasi-wielomianu charakterystycznego. Do zbadania jego stabilności zastosowano metodę D-stabilności przestrzeni niepewnych parametrów. Metoda przestrzeni niepewnych parametrów jest rozwinięciem znanej klasycznej metody podziału D.

Podany przykład liczbowy wykazał stabilność układu dla zer zespolonych przedstawionych na wykresach, natomiast wymagał sprawdzenia granicy stabilności dla zer rzeczywistych. Część wspólna obu podzbiorów pozwoliła określić D-stabilność quasi-wielomianu. Stabilność układu gwarantuje ograniczona długość kolejki $\tilde{q}(t)$ dla okna $W(t)$. Wyznaczenie granic stabilności układu pozwoli zaprojektować sieć bezprzewodową bardziej wydajną, szybszą i bardziej odporną na błędy związane z niedoskonałościami mediów transmisyjnych.

BIBLIOGRAFIA

1. Busłowicz M.: Odporna stabilność układów dynamicznych liniowych stacjonarnych z opóźnieniami. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 2002.
2. Busłowicz M.: Stabilność układów liniowych stacjonarnych o niepewnych parametrach. Dział Wydawnictw i Poligrafii, Białystok 1997.
3. Tanenbaum A.: Sieci komputerowe, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2004.
4. Hollot C. V., Misra V., Towsley D., Wei Bo Gong: A Control Theoretical Analysis of Red, Infocom 2001, Vol. 3, s. 1510÷1519.
5. Hollot C. V., Misra V., Towsley D., Wei Bo Gong: Analysis and Design of Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows, IEEE System and Control Methods for Communication Networks 2002, Vol. 47, No. 6.
6. Bhandarkar S., Sadry N., Reddy A. L. N., Vaidya N.: TCP-DCR: A novel protocol tolerating wireless channel errors, IEEE Transaction on Mobile Computing 2005, Vol. 4, No. 5.
7. Czachórski T., Grochla K., Pekergin F.: Stability and Dynamics of TCP-NCR(DCR) protocol in presence of UDP flows, Proceedings of Third international EURO-NGI network of excellence conference on Wireless systems and mobility in next generation internet. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006, s. 241÷254.
8. Hassan M., Raj J.: Wysoko wydajne sieci TCP/IP, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2004.

Wpłynęło do Redakcji 8 marca 2012 r.

Abstract

Stability similarly is one of the fundamental concept in modern mathematical control theory and plays an essential role in the development of the theory of ordinary and partial differential equations. Stability is qualitative property of control systems and are of particular importance in control theory. Systematic study of stability was started at the beginning of the previous century, when the theory of stability based on the description in the form of differential state equations for both time-invariant and time-varying linear control systems was worked out.

On the other hand, very often in real processes it is possible to observe unstable modes on a certain part of the complete state of the dynamical system. Therefore, it is very important to determine whether or not the complete state of the dynamical system is stable. Roughly speaking, stability generally means, that it is possible to steer dynamical system from an arbitrary initial state to zero final state.

The work concerns the analysis of D-stability of the computer network with the RED algorithm and based on TCP-DCR protocol, which is a modification of the traditional TCP protocol. Mathematical model in addition to the wired core network includes a wireless network. The model was described by set of two nonlinear differential equations with constant point delay in state variables, which were developed based on the flowchart. After linearization and simplified block diagram the transfer function were determined. The model equations is linearized around the set operating point and next block diagrams of the system presented. On this basis the quasi-characteristic polynomial was determined.

In order to investigate D-stability of the model, the method of uncertain parameters is used. The method of the space of uncertain parameters is a development of well-known classical methods of D-distribution. Finally, example of D-stability examination prepared on the basis of the data for a real computer network is also given.

Adresy

Jerzy KLAMKA, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk,
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, Polska, jerzy.klamka@iitis.pl

Jolanta TAŃCULA, Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk,
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice, Polska