

Krzysztof BOCHENEK

MERA-PNEFAL, Warszawa-Falenica

OPTIMALIZACJA WYKORZYSTANIA ZASOBÓW TRANSPORTOWYCH SIECI TELEINFORMATYCZNEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono rozwiązanie problemu optymalizacji wykorzystania zasobów transportowych sieci teleinformatycznej. Optymalizację wykorzystania tych zasobów uzyskać można zarówno na etapie projektowania, jak i w czasie jej eksploatacji. W pierwszym przypadku zaproponowano rozwiązanie polegające na przyjęciu na etapie projektowania sieci realistycznego założenia, że koszt budowy i eksploatacji kanału jest wklęsło-wypukłą funkcją jego przepustowości. W drugim przypadku pokazano, że optymalizację wykorzystania zasobów transportowych eksploatowanej sieci uzyskać można poprzez rozszerzenie tradycyjnych algorytmów sterowania przepływem pakietów przez sieć o pewne procedury, które mają zapobiegać krążeniu pakietów po pętlach zamkniętych.

W artykule przedstawiono rozwiązanie niektórych problemów, jakie pojawiają się na etapie projektowania i eksploatacji sieci teleinformatycznej. Jednym z podstawowych problemów jest zagadnienie optymalizacji wykorzystania zasobów sieci. W skład sieci wchodzi:

- zasoby obliczeniowe, tj. komputery użytkowników sieci,
- zasoby transportowe, na które składają się łącza transmisyjne (zwane dalej kanałami) oraz węzły komunikacyjne, które są specjalizowanymi komputerami, wykonującymi algorytmy sterowania przepływem wiadomości przez sieci.

Ze względów organizacyjnych, jak i ze względu na trudności rozwiązania skomplikowanego problemu łącznego wykorzystania kanałów i węzłów komunikacyjnych oddziela się od zagadnienia wykorzystania zasobów obliczeniowych. W artykule omówiono zagadnienie możliwie sprawnego wykorzystania zasobów transportowych sieci. Optymalizację wykorzystania zasobów transportowych sieci teleinformatycznej uzyskać można zarówno na etapie projektowania sieci, jak i w czasie jej eksploatacji.

Jeżeli autor pisać będzie o problemie optymalizacji zasobów transportowych nie określając wskaźnika jakości, oznaczać to będzie, że ma na myśli dowolny ze wskaźników jakości używany przy tego typu optymalizacji. Może to być np. wskaźnik kosztów eksploatacji sieci, czy też wskaźnik opisujący zyski z opłat.

Optymalizację wykorzystania zasobów transportowych eksploatowanej sieci uzyskuje się przez poszukiwanie optymalnych reguł doboru trasy. Rozwiązując problem poszukiwania optymalnych reguł doboru trasy wykorzystuje się modele uproszczone sieci.

Jednakże oparcie się na modelach uproszczonych powoduje, że rozwiązanie problemu optymalizacji reguł doboru trasy jest rozwiązaniem nieoptymalnym. Nieoptymalność ta przejawia się między innymi w tym, że pakiety mogą krążyć po pętlach zamkniętych, co jest zjawiskiem bardzo niekorzystnym, gdyż powoduje nie tylko opóźnienie danego pakietu do węzła przeznaczenia, ale powodując dodatkowe obciążenie kanału, wpływa na opóźnienie innych pakietów (pakiet jest to porcja informacji, na jakie dzieli się wiadomości przesyłane między użytkownikami sieci). Dlatego autor zaproponował rozwiązanie polegające na rozszerzeniu tradycyjnych algorytmów sterowania przepływem pakietów o pewne procedury, które mają zapobiegać krążeniu pakietów po pętlach zamkniętych.

Jeżeli mimo stosowania optymalnych reguł doboru trasy sieć pracuje źle, powstaje wtedy konieczność zmiany przepustowości kanałów. Jeżeli zmiana przepustowości kanałów nie wystarcza dla pożądanej pracy sieci, wówczas zmienia się topologię sieci.

Sytuacja wtedy komplikuje się, gdyż musimy uwzględnić zarówno reguły doboru trasy, nowe przepustowości kanałów i ewentualne zmiany w topologii. Problem ten pojawia się również na etapie projektowania sieci. Rozwiązując problem optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów przyjmowano założenie, że koszt budowy i eksploatacji kanału jest wklęsłą funkcją jego przepustowości, co bardzo ułatwiało rozwiązanie problemu optymalizacyjnego, gdyż funkcja kryterialna posiada w tym wypadku jedno ekstremum globalne.

Autor przyjął realistyczne założenie, że koszt budowy i eksploatacji kanału jest wklęsło-wypukłą funkcją jego przepustowości. To założenie skomplikowało problem optymalizacyjny, gdy funkcja kryterialna posiada w tym przypadku kilka ekstremów lokalnych, co z kolei powoduje, że warunki konieczne optymalności nie wystarczają do rozwiązania zadania optymalizacyjnego.

W artykule podano warunki wystarczające optymalności dla rozważanego problemu i zaproponowano algorytm poszukiwania rozwiązania optymalnego dla problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów.

1. Metody bezpętlowego prowadzenia pakietów w sieciach teleinformatycznych

Wiadomości przesyłane między użytkownikami sieci teleinformatycznej dzielone są na pakiety (najczęściej o objętości 1 kbita) i takimi porcjami przesyłane przez sieć.

Ponieważ z każdego węzła sieci prowadzi kilka alternatywnych tras do węzła przeznaczenia, dlatego trzeba określić regułę, zgodnie z którą pakiety należy wysłać do węzłów sąsiednich w kierunku węzła przeznaczenia. Reguła ta zwana jest regułą doboru trasy i jest realizowana przez algorytm sterowania pracą węzła, umieszczony w pamięci każdego komputera komunikacyjnego sieci. Optymalizację wykorzystania zasobów transportowych pracującej sieci uzyskuje się przez poszukiwanie optymalnych reguł doboru trasy.

Przy poszukiwaniu reguł doboru trasy najlepiej byłoby dokonać takiej analizy przesyłania pakietów przez sieć, w wyniku której otrzymano by informacje o każdym pakiecie oddzielnie, tzn. znaleziono by trasę każdego pakietu oraz przedziały, w których pakiet jest przetwarzany, transmitowany i przebywa w kolejkach tworzonych w węzłach sieci. Sterowanie pakietami w sieci na podstawie modelu dokładnego:

- wymaga idealnego, nierealnego do zrealizowania w dużych sieciach podsystemu identyfikacji stanu sieci,
- jest bardzo skomplikowane obliczeniowo.

Dlatego też sterowanie ruchem pakietów w sieci należy przeprowadzać na podstawie modeli uproszczonych sieci. Cechą wspólną tych modeli jest to, że tworząc je zakładamy, że dysponujemy informacją nie o pojedynczych pakietach, ale o średnich natężeniach przepływu w kanałach oraz wyciągamy wnioski, jakie mają być średnie natężenia przepływu w kanałach. Aby na podstawie wniosków dotyczących optymalnych średnich natężeń podejmować decyzje o trasie pojedynczego pakietu, musimy stosować elementy postępowania heurystycznego, np. pakiety kierujemy do kanałów zgodnie z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do wielkości optymalnego średniego natężenia przepływu w tym kanale. Dlatego są to algorytmy nieoptymalne.

Wynikiem tego może być krążenie pakietów po pętlach zamkniętych. Dlatego autor zaproponował rozwiązanie polegające na rozszerzeniu tradycyjnych reguł doboru trasy, wykorzystujących uproszczone modele sieci o procedury wykrywania i unikania pętli. Zwane są one algorytmami bezpętlowymi.

Żeby określić przyczynę powstawania pętli przy przesyłaniu pakietów przez sieci zdefiniujemy długość trasy łączącej dwa węzły sieci. Przez długość trasy rozumiemy łączną długość kanałów należących do tej trasy. Z kolei długość kanału jest parametrem związanym z jakością przesyłania pakietów przez kanał. Może to być np. czas przechodzenia pakietu przez kanał lub liczba pakietów oczekujących na transmisję przez dany kanał.

Przyczyną krążenia pakietów po pętlach zamkniętych jest to, że nie wszystkie węzły sieci dowiadują się równocześnie o zmianach długości tras prowadzących do węzłów przeznaczenia.

Podstawową metodą przeciwdziałania powstawaniu pętli jest wykorzystywanie dodatkowej informacji o stanie sieci, a w szczególności o stanie pakietu, która pozwala wykryć, że pakiet krąży po pętli. Na podstawie typu tej informacji dokonano klasyfikacji procedur unikania pętli. Często procedury

unikania pętli wykorzystują informację pomocniczą o drodze przebytej przez pakiet. Dany węzeł mając informację o drodze przebytej przez pakiet może łatwo zapobiec powstawaniu pętli poprzez nie wysyłanie pakietu do węzła, przez który pakiet ten już przechodził.

Procedury oparte na tym typie informacji pomocniczej możemy podzielić na procedury z wykrywaniem "pułapki" i procedury bez wykrywania "pułapki". Istota "pułapki" polega na tym, że węzeł wysyłając pakiet do swojego sąsiada nie wie, czy w zbiorze węzłów, do których sąsiad może wysłać pakiet, są jeszcze węzły, przez które pakiet jeszcze nie przechodził. Procedura unikania "pułapki" polega na tym, że węzeł wysyłając pakiet do swego sąsiada zatrzymuje kopię tego pakietu, do momentu potwierdzenia od sąsiada wysłania tego pakietu dalej.

Niektóre procedury unikania pętli oparte są na informacji o dalszych potencjalnych trasach do węzła przeznaczenia. Wykorzystują one twierdzenie, które mówi, że przyczyną powstawania pętli jest wzrost długości trasy prowadzącej do węzła przeznaczenia oraz fakt, że nie wszystkie węzły sieci otrzymują informację o tej zmianie równocześnie.

W przypadku, gdy w danym węźle nastąpi wzrost długości trasy, węzeł ten wysyła specjalny pakiet w kierunku węzła przeznaczenia w celu sprawdzenia, czy nie istnieje pętla, która uniemożliwiłaby dotarcie pakietu do węzła przeznaczenia. Jest to typ procedury opartej na informacji o możliwości powstawania pętli. Inny typ procedur unikania pętli, oparty na informacji o dalszej potencjalnej trasie, wykorzystuje informację o zmianie długości trasy prowadzącej do węzła przeznaczenia.

Wyróżniono tutaj dwa rodzaje procedur:

1) procedury oparte na fakcie, że długość optymalnej trasy maleje przy zbliżeniu się do węzła przeznaczenia. Jest to typ informacji o kierunku zmian długości trasy przy zbliżaniu się do węzła przeznaczenia;

2) procedury wykorzystujące twierdzenie, które mówi, że przyczyną powstawania pętli jest wzrost długości trasy prowadzącej z danego węzła sieci do węzła przeznaczenia.

Jak już stwierdzono, przyczyną powstawania pętli może być wzrost długości trasy prowadzącej do węzła przeznaczenia i fakt, że nie wszystkie węzły sieci otrzymują informację o tej zmianie równocześnie. Reakcja węzła sieci na informację, że nastąpił wzrost długości trasy do węzła przeznaczenia może być opóźniona lub natychmiastowa. W pierwszym przypadku węzeł oczekuje z wykorzystaniem nowej procedury pakietów przez pewien okres czasu po to, aby wszystkie węzły w sieci "dowiedziały" się o zaistniałej zmianie, nie podejmując przy tym żadnej dodatkowej akcji. Po upływie tego okresu węzeł zaczyna przysyłać pakiety zgodnie z nową uaktualnioną tablicą kierunków. W tablicy kierunków zawarta jest informacja o optymalnych regułach doboru trasy przy przesyłaniu pakietów do poszczególnych węzłów przeznaczenia.

W drugim przypadku, tj. reakcji natychmiastowej, węzeł podejmuje specjalne akcje, mające na celu jak najszybszą zmianę niekorzystnej sytuacji, polegającej na przesyłaniu pakietów zgodnie ze starą, nieaktualną tablicą kierunków. Na przykład informuje swoich sąsiadów o zaistniałej sytuacji i oczekuje z używaniem nowej tablicy kierunków do momentu, kiedy otrzyma potwierdzenie, że pozostałe węzły w sieci "dowiedziały" się o nowym stanie sieci. Można również jako kryterium podziału procedur unikania pętli wziąć zasięg wykorzystywanej informacji pomocniczej. Wtedy rozróżniano procedury globalne i regionalne.

Istota algorytmów regionalnych polega na tym, że sieć dzielimy na podsieci i dodatkowa informacja wykorzystywana przez procedury wykrywania i unikania pętli dotyczącej danej podsieci jest wykorzystywana lokalnie w tej podsieci. Chodzi tutaj o zmniejszenie objętości przekazywanej dodatkowej informacji pomocniczej.

Przeprowadzona klasyfikacja otwiera możliwości tworzenia nowych algorytmów bezpętlowych. Kojarząc ze sobą różne typy informacji pomocniczej, służącej do wykrywania i unikania pętli, można stworzyć nowe algorytmy bezpętlowe.

Szczegółowy opis algorytmów bezpętlowych z punktu widzenia informacji pomocniczej, służącej do wykrywania i unikania pętli, można znaleźć w [1]. Jest on ważny w tworzeniu podsystemu identyfikacji stanu sieci, którego zadaniem jest dostarczenie informacji niezbędnej dla komputerów komunikacyjnych sieci po to, aby mogły one zapobiegać krążeniu pakietów po pętlach zamkniętych.

2. Problem optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów

Jeżeli wykorzystywanie dodatkowej informacji pomocniczej o stanie sieci służącej do wykrywania i unikania pętli nie wystarczy dla pożądanej jakości pracy sieci, następuje wtedy konieczność zmiany przepustowości kanałów sieci. Problem wtedy komplikuje się, gdyż musimy uwzględnić zarówno nowe przepustowości kanałów, jak i nowe reguły doboru trasy. W artykule przedstawiono rozwiązanie problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów przy realistycznym założeniu, że koszt budowy i eksploatacji kanału jest wklęsło-wypukłą funkcją jego przepustowości. Przy tym założeniu funkcja kryterialna posiada kilka ekstremów lokalnych. Dla...go też określimy warunki wystarczające optymalności dla rozważanego problemu i w oparciu o nie sformułujemy algorytm poszukiwania rozwiązania optymalnego.

Na początek sformułujemy model sieci przydatny do rozwiązania tego problemu. W tym celu wprowadzimy następujące oznaczenia:

$\mathcal{N} = \{i, j, k, \dots\}$ - zbiór węzłów sieci,
 N = liczba węzłów sieci,
 $\mathcal{K} = \{(i, j), (j, k), \dots\}$ - zbiór kanałów sieci,
 K = liczba kanałów sieci,

$\mathcal{K}^{we}(i)$ = zbiór kanałów wchodzących do węzła i ,

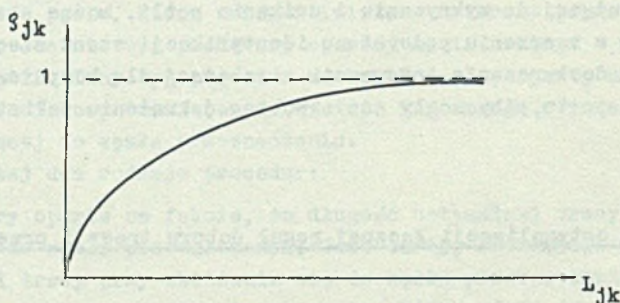
$\mathcal{K}^{wy}(i)$ = zbiór kanałów wychodzących z węzła i ,

$F(i, j)$ = natężenie przepływu w kanale (i, j) .

Natężenie przepływu w kanale jest to średnia liczba bitów, jaka przesyłana jest przez kanał w jednostce czasu. Wyraża się ona iloczynem przepustowości kanału i współczynnika wypełnienia, który jest funkcją ilości pakietów oczekujących na transmisję.

$$F(j, k) = C(j, k) \cdot \rho_{jk}(L_{jk}). \quad (1)$$

Zależność współczynnika wypełnienia od ilości pakietów oczekujących na transmisję przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zależność współczynnika wypełnienia kanału od liczby zadań oczekujących na transmisję

Fig. 1. Dependence of channel utilization factor on average number calls waiting for transmission through that channel

Niech $f_r(j, k)$ definiuje, jaką część całkowitego strumienia $F_r(\Sigma)(j)$ wchodzącego do węzła j i przesyłanego do węzła r skierować do kanału (j, k) . Z powyższej definicji mamy:

$$F_r(j, k) = f_r(j, k) \cdot F_r(\Sigma)(j), \quad (j, k) \in \mathcal{K}, \quad r \in \mathcal{N} \quad (2)$$

$$\sum_{\mathcal{K}^{wy}(j)} f_r(j, k) = 1, \quad j, r \in \mathcal{N} \quad (3)$$

$$0 \leq f_r(j, k) \leq 1, \quad (j, k) \in \mathcal{K}; \quad r \in \mathcal{N} \quad (4)$$

gdzie:

$F_r(j,k)$ jest natężeniem przepływu skierowanym do węzła r w kanale (j,k) ,

Całkowite natężenie przepływu w kanale (j,k) jest równe w sumie natężeń wszystkich składników:

$$F(j,k) = \sum_{r \in N} f_r(j,k) \cdot F_r^{(\Sigma)}(j). \quad (j,k) \in \mathcal{K} \quad (5)$$

Niech zmienne $x_r(j)$ definiuje, jaką część strumienia oferowanego w węźle j można przyjąć do sieci. Zmienna $x_r(j)$ spełnia warunek:

$$0 \leq x_r(j) \leq 1. \quad j, r \in N \quad (6)$$

W każdym węźle muszą być spełnione warunki zachowania strumienia, dlatego prawdziwa jest zależność:

$$F_r^{(\Sigma)}(j) = x_r(j) \cdot X_{jr} + \sum f_r(1,j) \cdot F_r^{(\Sigma)}(1). \quad (7)$$

Jako wskaźnik jakości dla problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów przyjęto minimalizację kosztów eksploatacji sieci, która wyraża się wzorem:

$$Q = \sum_{(j,k) \in \mathcal{K}} \chi_{jk}^o - \sum_{(j,k) \in \mathcal{K}} \chi_{jk}^e. \quad (8)$$

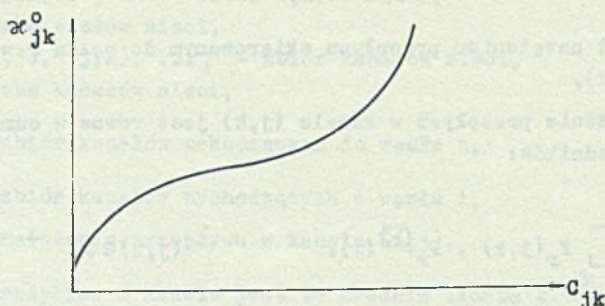
Pierwszy składnik wskaźnika jakości Q wyraża straty spowodowane niską jakością obsługi. Można go wyrazić zależnościami:

$$\sum_{(j,k) \in \mathcal{K}} \chi_{jk}^o = \frac{1}{X} \sum_{(j,k) \in \mathcal{K}} L_{jk}, \quad (9)$$

gdzie:

L_{jk} - ilość pakietów oczekujących na transmisję przez kanał (j,k)

Drugi składnik wskaźnika jakości Q określa roczne koszty inwestycji i eksploatacji kanału. Przyjmijmy realistyczne założenie, że koszt budowy i eksploatacji kanału jest wklęsło-wypukłą funkcją jego przepustowości (rys.2).



Rys. 2. Zależność kosztów budowy i eksploatacji kanału od jego przepustowości

Fig. 2. Channel construction and exploitation cost as a function of channel capacity

Celem optymalizacji było znalezienie przepustowości kanałów i zmiennych sterujących $f_r(j,k)$ dla $r \in N$, $(j,k) \in \mathcal{K}$, określających optymalne przepływy w poszczególnych kanałach sieci, tak aby zminimalizować koszty optymalizacji sieci.

Korzystając z warunków Kuhna-Tuckera sformułujemy warunki konieczne optymalności dla rozważanego problemu. Z warunków tych wynika, że:

$$f_r(j,k) \begin{cases} = 0 & \text{dla } \omega_{jk} + \eta_k^r > \eta_j^r \\ > 0 & \text{dla } \omega_{jk} + \eta_k^r = \eta_j^r \end{cases} \quad (10)$$

$$\eta_j^r = \inf [\omega_{jk} + \eta_k^r] \quad , \\ (j,k) \in \mathcal{K}^{\text{wy}}(j)$$

gdzie:

ω_{jk} , η_j^r są współczynnikami w funkcji Lagrange'a dla rozważanego problemu.

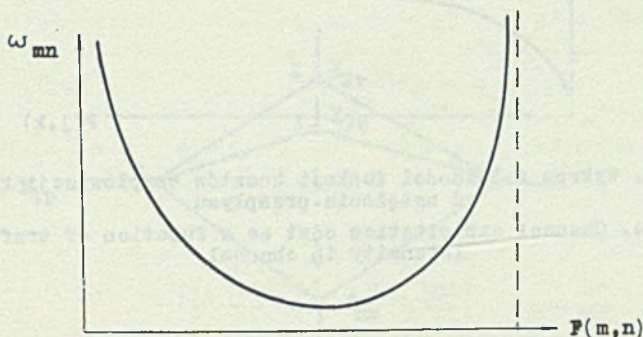
Jeżeli zdefiniować ω_{jk} jako długość kanału i uwzględnić $\eta_k^r = 0$, wtedy równanie (10) wprowadza długość trasy w następujący sposób:

$$d(\mathcal{P}_{jr}) = \eta_j^r = \sum_{(m,n) \in \mathcal{P}_{jr}} \omega_{mn} \quad . \quad (11)$$

Przy tak zdefiniowanej długości trasy warunki konieczne optymalności oznaczają, że:

Trasy używane z węzła j do węzła przeznaczenia r mają jednakową długość i są krótsze aniżeli trasy nieużywane.

Można łatwo wykazać, że ω_{mn} jest funkcją przepływu w kanale (m,n) i można tę zależność przedstawić na rys. 3.



Rys. 3. Zależność długości kanału ω_{mn} od natężenia przepływu $F(m,n)$
 Fig. 3. Channel length function ω_{mn} as a function of traffic intensity $F(m,n)$

Ponieważ koszt eksploatacji jest równy sumie kosztów eksploatacji kanałów wchodzących w skład sieci, dlatego prawdziwa jest zależność:

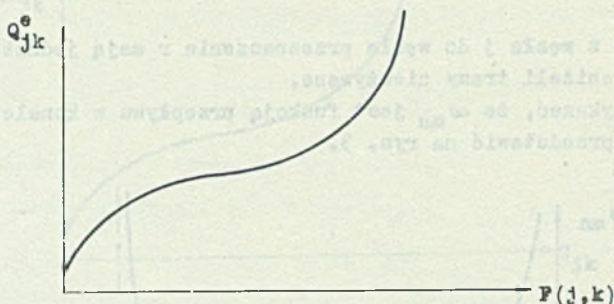
$$Q^e = \sum_{(j,k) \in \mathcal{K}} Q^e_{jk} \quad (12)$$

Udowodniono że:

$$\frac{dQ^e_{jk}}{dF(j,k)} = \omega_{jk}(F(j,k)) \quad (13)$$

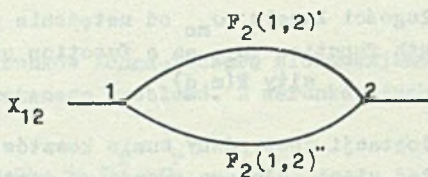
Z rozważań dotyczących własności wielkości ω wynika, że typowy wykres zależności kosztów eksploatacji kanału w funkcji natężenia przepływu w tym kanale ma postać przedstawioną na rys. 4.

Wklęsło-wypukła funkcja kosztów eksploatacji kanału Q^e_{jk} powoduje, że wskaźnik kosztów eksploatacji sieci Q^e , będący funkcją kryterialną, ma kilka ekstremów lokalnych. Dlatego stosowanie klasycznych metod polegających na przrzuceniu strumienia między trasami do momentu, kiedy długości tras używanych wyrównują się, może doprowadzić do ekstremum lokalnego. Zilustrować to można na przykładzie sieci z rys. 5.



Rys. 4. Wykres zależności funkcji kosztów eksploatacji kanału od natężenia przepływu

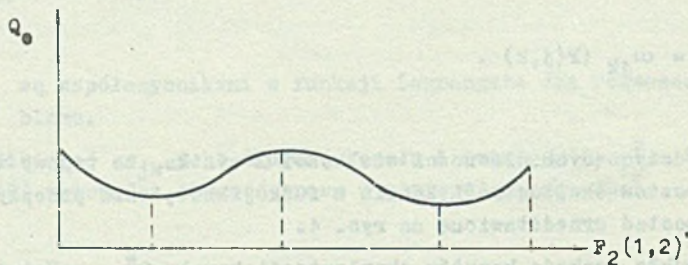
Fig. 4. Channel exploitation cost as a function of traffic intensity in channel



Rys. 5. Przykładowa sieć

Fig. 5. Network considered in example

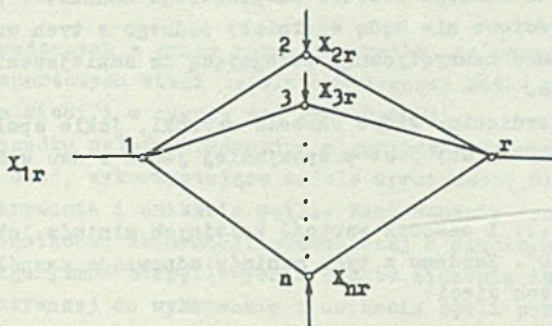
Wykres zależności kosztów eksploatacji sieci od rozdziału natężenia przepływu na alternatywne trasy przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Wykres wskaźnika jakości eksploatacji sieci w zależności od rozdziału oferowanego natężenia przepływu

Fig. 6. Dependence of values of cost exploitation index on distribution offered traffic

Ponieważ funkcja kryterialna posiada kilka ekstremów lokalnych, dlatego warunki konieczne optymalności nie wystarczają do znalezienia rozwiązania problemu optymalizacyjnego. W pracy podajemy warunki wystarczające optymalności dla tego problemu. Ponieważ przez wprowadzenie uogólnionych długości tras każdą sieć można przetransformować do sieci przedstawionej na rys. 7, dlatego warunki wystarczające optymalności znaleziono dla takiej struktury sieci.



Rys. 7. Sieć, dla której podano warunki wystarczające optymalności dla problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów

Fig. 7. Network for which was given sufficient condition for joint optimization of traffic control rules and channel capacity

Warunki wystarczające optymalności dla rozważanego problemu określimy przy pewnych ograniczeniach na wielkość oferowanego natężenia w poszczególnych węzłach sieci.

Ograniczenia te mają postać:

$$W1: \frac{\sum_{i=1}^n x_{1r}}{n-1} \geq B$$

Gdzie: $B: \left. \frac{dQ^e(F(j,k))}{dF(j,k)} \right|_{F(j,k) > B} > \left. \frac{dQ^e(F(j,k))}{dF(j,k)} \right|_{F(j,k) < B}$

$$W2: x_{1r} > A(n-1), \text{ gdzie: } A = F(j,k); \left. \frac{d^2Q^e(F(j,k))}{dF(j,k)} \right|_{F(j,k)=A} = 0$$

Ograniczenie pierwsze mówi, że średnie natężenie przepływu w kanałach wchodzących do węzła przeznaczenia musi być większe od liczby B, gdzie liczba B jest taką wartością przepływu, dla której pochodna kosztów dla przepływu większego od B jest większa aniżeli ta sama pochodna dla przepływu mniejszego od B.

Ograniczenie drugie mówi, że średnie natężenie przepływu na kanałach wychodzących z węzła źródłowego musi być większe od wartości przepływu w punkcie przegięcia funkcji kosztów eksploatacji kanału. W przypadku, gdy strumienie wejściowe nie będą spełniały żadnego z tych warunków, zaproponowano procedurę heurystyczną, polegającą na zmniejszeniu o 1 liczby wykorzystanych tras.

Podamy obecnie twierdzenie, które określa warunki, jakie spełnia ekstremum globalne, gdy spełniony jest przynajmniej jeden z dwu wymienionych warunków.

Niech Q^i_{\min} , $i=1,2,\dots$ I oznacza wartość kolejnych minimów lokalnych funkcji kryterialnej Q^0 . Każdemu z tych minimów odpowiada zespół natężeń przepływów w kanałach sieci:

$$F^i = \{F^i_r(j,k), (j,k) \in \mathcal{K}\} .$$

Udowodniono następujące twierdzenie:

Jeżeli spełniony jest warunek W1 lub W2, to:

$$Q^i_{\min} = Q^i_{\min} \iff \min_m \left\{ \max_{j=2,\dots,n} (F^m_r(j,r)) - \min_{j=2,\dots,n} (F^m_r(j,r)), m=1,2,\dots,I \right\} = \\ = \max_{j=1,\dots,n} F^i_r(j,r) - \min_{j=2,\dots,n} F^i_r(j,r) .$$

Twierdzenie powyższe mówi, że spośród ekstremów to ekstremum jest globalne, dla którego różnica wartości maksymalnej i minimalnej przepływu w kanałach wchodzących do węzła przeznaczenia osiąga minimum.

W oparciu o to twierdzenie, podaje się algorytm poszukiwania rozwiązania optymalnego. W pierwszej części algorytmu, korzystając z warunku wystarczającego, znajduje się punkt leżący w pobliżu ekstremum globalnego. Następnie, wykorzystując warunki konieczne optymalności, znajduje się jego dokładne współrzędne.

W wyniku zastosowania procedury optymalizacyjnej otrzymamy wartość przepływu kanałów oraz optymalne natężenie przepływów w kanałach. Ażeby w oparciu o natężenie przepływu sterować pojedynczym pakietem, trzeba stosować pewną procedurę heurystyczną, polegającą np. na kierowaniu pakietów do kanałów z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do wielkości optymalnego natężenia przepływu w tych kanałach.

To heurystyczne przejście od rozwiązania niedokładnego do rozwiązania dokładnego powoduje, że reguły sterowania pakietami są nieoptymalne. Nieoptymalność ta może przejawiać się w krążeniu pakietów po pętłach zamkniętych. Dlatego algorytm sterowania pakietami trzeba uzupełnić o jedną z procedur bezpętlowych opisanych wcześniej.

3. UWAGI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych w pracy rozważań wynika, że poprawę wykorzystania zasobów transportowych sieci teleinformatycznej można uzyskać na etapie projektowania sieci i w czasie jej eksploatacji.

W drugim przypadku należy tradycyjne algorytmy sterowania przepływem pakietów przez sieć, wykorzystujące modele uproszczone sieci, rozszerzyć o procedury wykrywania i unikania pętli. Zastosowanie tych procedur wymaga posiadania dodatkowej informacji pomocniczej o stanie sieci. Przeprowadzona analiza algorytmów bezpętlowych z punktu widzenia informacji pomocniczej wykorzystywanej do wykrywania i unikania pętli pozwala na tworzenie podsystemu identyfikacji stanu sieci, którego zadaniem jest dostarczanie informacji niezbędnej dla komputerów węzłowych sieci po to, aby mogły sterować przepływem pakietów w sposób bezpętlowy.

Przedstawiona klasyfikacja algorytmów bezpętlowych otwiera możliwości tworzenia nowych procedur bezpętlowych. Kojarząc ze sobą różne typy informacji pomocniczej, służącej do wykrywania i unikania pętli, można tworzyć nowe algorytmy bezpętlowe. Celowe byłoby podjęcie takiej próby i porównanie tych algorytmów z punktu widzenia jakości przesyłania pakietów przez sieć.

Jeżeli mimo stosowania optymalnych reguł doboru trasy sieć pracuje źle, pozostaje wtedy konieczność zmiany przepustowości kanałów, a niekiedy nawet topologii. Sytuacja wtedy komplikuje się, gdyż musimy uwzględnić nie tylko nowe reguły doboru trasy, ale również nowe przepustowości kanałów. Problem ten pojawia się również na etapie projektowania sieci.

W artykule podano algorytm rozwiązania problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów przy realistycznym założeniu, że koszt budowy i eksploatacji jest wklęsło-wypukłą funkcją jego przepustowości. Algorytm ten został opracowany dla szczególnej struktury sieci. Przyjęcie określonej struktury motywowano tym, że poprzez odpowiednią transformację, można każdą sieć sprowadzić do rozważanej w pracy sieci. Dlatego też dobrze byłoby rozszerzyć rozwiązanie problemu optymalizacji łącznej reguł doboru trasy i przepustowości kanałów, przy założeniu wklęsło-wypukłej funkcji kosztów budowy kanału na dowolną strukturę sieci.

LITERATURA

- [1] K. BOCHENEK: "Routing algorithm for data communication networks", Preprints of 11th IMACS World Congress on System Simulation and Scientific Computation, pp.9-13, Oslo 1985.
- [2] K. BOCHENEK: "An algorithm for optimization of packet flow in telecommunication network", Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol.67, Springer Verlag, 1985.
- [3] K. BOCHENEK: "Procedure of the suboptimal network synthesis with a concave-convex link construction cost. Preprints of MEGO 83/EE 83 Symposium, Ateny 1983.
- [4] K. BOCHENEK: "Design of optimal control systems for large telecommunication networks", Preprints of IMA/SERC Symposium on Control Theory, University of Warwick, Coventry 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. Andrzej Grzywek

Wpłynęło do Redakcji 6.12.1988.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ РЕСУРСОВ ТЕЛЕИНФОРМАТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Р е з ю м е

В статье представлено решение проблемы оптимизации использования транспортных ресурсов телеинформатической сети. Такую оптимизацию можно получить как на этапе проектирования так и во время её эксплуатации. В первом случае предложено решение состоящее в принятии на этапе проектирования сети реалистического предположения, что стоимость конструкции и эксплуатации канала является вогнуто-выпуклой функцией его производительности. В другом случае показано, что оптимизацию использования транспортных ресурсов эксплуатированной сети можно получить путем расширения традиционных алгоритмов управления ходом пакетов в сети на некоторые процедуры, которые могут препятствовать в кругообороте пакетов по замкнутым контурам.

OPTIMIZATION OF UTILIZATION OF TRANSPORTATION RESOURCES IN TELECOMMUNICATION NETWORK

S u m m a r y

In the paper, the solution of problem optimal utilization of transportation resources in telecommunication network has been presented. Optimization of utilization this resources can be obtain while designs of the network and in existing network. In the first case it is proposed solution which consist in taking realistic assumption that channel exploitation

and construction cost is concave-convex function of channel capacity. In the second case, it is shown that solution consists completing routing rules on loop-free procedure.