

УДК 004.722.2

Н. И. ЛИСТОПАД, А. А. ХАЙДЕР, С. Ю. МИХНЕВИЧ, Белорусский  
государственный университет информатики и радиоэлектроники

## СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ СЕТЯХ

Представлен новый подход к маршрутизации информационных потоков в мультисервисных сетях, базирующийся на сервисориентированной архитектуре. Показано, что по сравнению с известными подходами, учитывающими только требования заданного качества обслуживания, выбор оптимального пути с учетом требований QoS и величины стоимости является более корректным и позволяет из двух или нескольких примерно одинаковых путей выбрать один более оптимальный.

New approach for optimal routing of information flows is developed based on service-oriented architecture. To find the shortest path it's require to take into account the QoS-parameters such as delay, jitter, bandwidth, lost of the packets and cost of telecommunication resources.

### Введение

Для мультисервисных сетей характерен комплекс услуг, таких как широкополосный доступ в Интернет, IP-телефонию, цифровое телевидение, видеоконференцсвязь и другие [1]. Для таких сетей кроме полосы пропускания важны такие параметры как потери пакетов, задержка пакетов, вариация времени задержки (джиттер). Задача маршрутизации в мультисервисных сетях должна решаться как на основе перечисленных критериев, так и с учетом

требований конкретных приложений. В целом, обеспечение заданного качества обслуживания (QoS) в этих сетях является сложной задачей многокритериальной оптимизации, для решения которой необходимы новые методы и подходы [1–3].

### 1. Модель резервирования информационных ресурсов

Пример оптимальной маршрутизации информационных потоков описан в работе [1], где сеть передачи данных представлена в виде графа (рис. 1). На рис. 1 приведены следующие

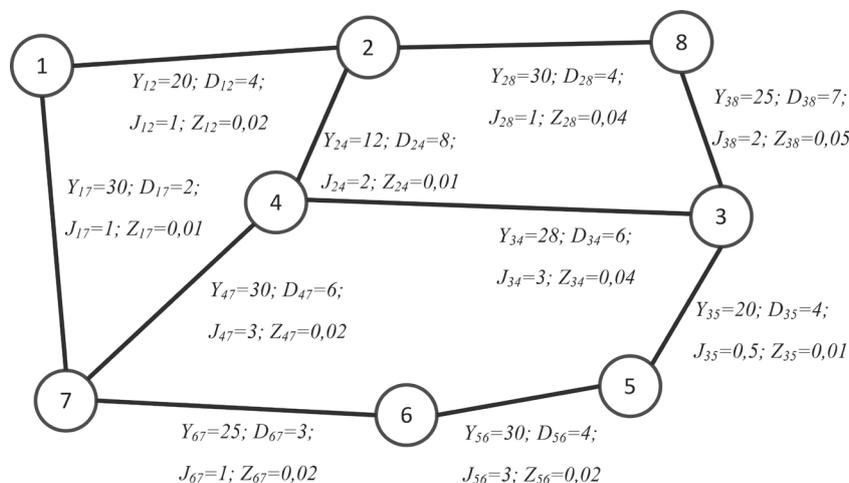


Рис. 1. Схема сети

щие обозначения.  $V$  – множество узлов сети,  $E$  – множество дуг  $e_{ij}$ , соединяющие узлы  $i, j \in V$  телекоммуникационной сети (рис. 1) [4–5].

Пусть путь  $p$  – множество ребер, соединяющих узел источника и узел получателя  $t$  [1, 4–5]. В качестве  $QoS$  параметров каждого канала связи (ребра графа) будем рассматривать полосу пропускания  $Y_e$ , задержку  $D_e$ , вариации задержки  $J_e$  и вероятность потери пакетов  $Z_e$ . Численные значения параметров на рис. 1 взяты из работы [1].

Для каждого из возможных путей  $is, t$  в  $t$  будут справедливы следующие соотношения [1]:

$$\begin{aligned} Y_{s,t} &= \max_{e \in p} \{Y_e\}; D_{s,t} = \sum_{e \in p} D_e; \\ J_{s,t} &= \sum_{e \in p} J_e; Z_{s,t} = \prod_{e \in p} Z_e. \end{aligned} \quad (1)$$

В работе [1] показано, что если на всем пути  $p$  для каждого из  $QoS$  параметров будут выполнены ограничения вида:

$$\begin{aligned} Y_{s,t} &\geq Y^{min}; Z_{s,t} \leq Z^{max}; \\ D_{s,t} &\leq D^{max}; J_{s,t} \leq J^{max}, \end{aligned} \quad (2)$$

то такой путь называют  $QoS$  осуществимым (*feasible*) путем.

Как и в работе [1] для удобства дальнейшего анализа вместо вероятности потери пакетов  $Z_e$  будем рассматривать логарифм вероятности прохождения пакетов  $X_e = \ln(1 - Z_e)$  [6], что позволяет значение  $X_e$  данного параметра на всем пути маршрутизации вычислять суммированием:

$$X_{s,t} = \sum_{e \in p} X_e, \quad (4)$$

Учет нескольких  $QoS$  параметров и различных требований приложений к значениям этих параметров значительно усложняет задачу маршрутизации. Для ее решения более эффективным представляется подход, базирующийся на сервис-ориентированной архитектуре (SOA) [6]. Следуя методике, изложенной в [6], SOA можно представить в виде двух уровней:

1. Уровень резервирования необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания.

2. Уровень предоставления соответствующих телекоммуникационных услуг для обеспечения требуемого качества обслуживания.

Задача резервирования ресурсов может быть сформулирована следующим образом: телеком-

муникационные ресурсы необходимо зарезервировать таким образом, чтобы пропускные способности каналов связи обеспечивали маршрутизацию требуемого объема трафика при соблюдении требований заданного качества обслуживания ( $QoS$ ) в безаварийной и во всех аварийных ситуациях [5]. Другими словами, необходимо выбрать такой путь (пути), чтобы была обеспечено выполнение основных  $QoS$  требований вида (2) [5]. Данная задача успешно решена в работе [1]. Из работы [1] запишем следующую свертку функции  $r$ , объединяющей в себя все четыре требования заданного качества обслуживания: полосы пропускания  $Y_{s,t}$ , величины задержки  $D_{s,t}$ , джиттера  $J_{s,t}$ , и вероятности прохождения пакетов  $X_{s,t}$ .

$$r = -w_Y \frac{Y_{s,t}}{Y^{min}} + w_D \frac{D_{s,t}}{D^{max}} + w_J \frac{J_{s,t}}{J^{max}} + w_X \frac{X_{s,t}}{X^{min}} \quad (5)$$

Где из [1]:

$$\max_{P_{fes}} Y_{s,t} \Leftrightarrow \min_{P_{fes}} -Y_{s,t}; \min_{P_{fes}} X_{s,t}; \min_{P_{fes}} D_{s,t}; \min_{P_{fes}} J_{s,t}; \quad (6)$$

$$Y_{s,t} - Y^{min} \geq 0; X_{s,t} - X^{min} \geq 0; \quad (7)$$

$$D^{max} - D_{s,t} \geq 0; J^{max} - J_{s,t} \geq 0,$$

$$Y_{s,t} = \max_{e \in p} \{Y_e\}; D_{s,t} = \sum_{e \in p} D_e; \quad (8)$$

$$J_{s,t} = \sum_{e \in p} J_e; X_{s,t} = \sum_{e \in p} X_e.$$

В работе [1] показано, что поиск оптимального маршрута может быть осуществлен как решение задачи минимизации на графе скалярной функции  $R_{s,t}$

$$\begin{aligned} \min_p R_{s,t} &= \min_p \left( -w_Y \frac{Y_{s,t}}{Y^{min}} + w_D \frac{D_{s,t}}{D^{max}} + \right. \\ &\quad \left. + w_J \frac{J_{s,t}}{J^{max}} + w_X \frac{X_{s,t}}{X^{min}} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь  $w_Y, w_D, w_J, w_X$  – весовые коэффициенты, определяющие значимость соответствующих параметров  $QoS$ .

Для решения задачи (9) с учетом ограничений (7–8) в работе [1] предлагается использовать эвристический алгоритм, представляющий собой модификацию алгоритма Дейкстры [8]. Модификация заключается в отбрасывании в процессе поиска тех путей, на которых не выполняются ограничения (7), и новом способе описания и вычисления меток узлов.

Таким образом, в [1] решена задача первого уровня сервис-ориентированной архитектуры – резервирование необходимых телекоммуникационных ресурсов для обеспечения заданного качества обслуживания.

$$R_{sj} \begin{cases} r, & \text{если для } D_{st}, J_{st}, X_{st}, Y_{st} \text{ выполняются условия (7)} \\ \infty, & \text{если для } D_{st}, J_{st}, X_{st}, Y_{st} \text{ не выполняется хотя бы одно из условий (7)} \end{cases} \quad (10)$$

Используя численные значения параметров  $QoS$  ( $Y, D, J, X$ ) для каждой из дуг, представленные на рис. 1, по формулам (8) рассчитаем их значения для каждого из возможных путей. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Выберем следующие предельные параметры требований  $QoS$ :  $Y^{\min} = 12$  МВ/с,  $D^{\max} = 12$  мс,  $J^{\max} = 7$  мс,  $X = -0.07$

Из таблицы следует, что принятых предельных значениях параметров  $QoS$  только

три пути удовлетворяют требованиям (7): P2, P4, P5.

В табл. 2 представлены результаты расчета функции  $r$  при различных весовых коэффициентах  $w_i$ . Из таблицы следует, что при определенных комбинациях значений весовых коэффициентов  $w_i$  ряд путей имеет примерно одно и тоже значение функции  $r$ . Это комбинации под номерами 1 (пути P4 и P5); 3 (P4 и P5); 6 (P4 и P5); 7 (P2 и P4).

Критерии утверждения «имеют примерно одно и тоже значение» могут быть разными. В данном случае под примерно равными значениями функции  $r$  мы рассматривали все случаи, когда значения  $r$  не отличаются друг от друга более, чем на 10%.

## 2. Модель предоставления телекоммуникационных услуг с учетом требований заданного качества обслуживания

Рассмотрим более подробно задачу второго уровня – предоставление из набора зарезервированных самих услуг. Используя ранее вве-

Таблица 1. Результаты расчета параметров

Путь	$Y$ [МВ/с]	$D$ [МС]	$J$ [МС]	$X$
1-2-8-3 (P1)	20	15	4	-0.11
1-2-4-3 (P2)	12	18	6	-0.07
1-2-4-7-6-5-3 (P3)	12	29	10.5	-0.1
1-7-6-5-3 (P4)	20	13	5.5	-0.06
1-7-4-3 (P5)	28	14	7	-0.07
1-7-4-2-8-3 (P6)	12	27	9	-0.13

Таблица 2. Результаты расчета функции  $r$  при различных значениях весовых коэффициентов

	$w_Y$	$w_D$	$w_J$	$w_X$	P2	P4	P5	Кратчайший путь
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.75	0.54	0.6	P4≈P5
2	0.7	0.1	0.1	0.1	-0.41	-0.93	-1.35	P5
3	0	0.8	0.1	0.1	0.98	0.74	0.82	P4
4	0.6	0.2	0.2	0	-0.22	-0.69	-1.04	P5
5	1	0	0	0	-1	-1.66	-2.33	P5
6	0	1	0	0	1	0.72	0.77	P4≈P5
7	0	0	1	0	0.85	0.78	1	P2»P4
8	0	0	0	1	1	0.85	1	P4
9	0.5	0.5	0	0	0	-0.47	-0.77	P5
10	0	0.5	0.5	0	0.92	0.75	0.88	P4
11	0	0	0.5	0.5	0.92	0.82	1	P4
12	0.5	0	0	0.5	0	-0.40	-0.66	P5
13	0.25	0.25	0.25	0.25	0.46	0.17	0.11	P4≈P5
14	0.33	0.33	0.33	0	0.28	-0.05	-0.18	P5
15	0	0.33	0.33	0.33	0.94	0.78	0.91	P4
16	0.33	0	0.33	0.33	0.28	-0.007	-0.11	P5
17	0.33	0.33	0	0.33	0.33	-0.02	-0.18	P5

денные обозначения, сформулируем задачу следующим образом [6]:

$$\min \sum_{e \in p} \sum_{k=1}^m k_p(e) x_p(e) + d_k(e) L_k(e) \quad (11)$$

где  $k_p$  – стоимость выбора пути на всем отрезке от  $s$  к  $t$ ;  $x_p(e) \in \{0, 1\}$ ;  $d_p(e)$  – единица дополнительной стоимости, необходимой для обеспечения  $QoS$  требования;  $L_k(e)$  – емкости зарезервированных телекоммуникационных ресурсов, необходимых для обеспечения заданного качества обслуживания: полосы пропускания, величины задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов;  $m$  – количество  $QoS$  требований (в нашем случае  $m = 4$ ).

Для  $L_k(e)$  справедливо следующее: если  $x_p(e) = 0$ , то  $L_k(e) = 0$ ; если  $x_p(e) = 1$ , то  $L_k(e) \geq 0$  [7].

Таким образом, дальнейшая модификация алгоритма выбора кратчайшего пути состоит в том, чтобы из всех возможных путей, являющихся кратчайшими и удовлетворяющих требованиям заданного качества обслуживания  $QoS$ , выбрать такие из них, которые при этом обладали минимальной стоимостью. С учетом требований минимальной стоимости формула (5) может быть модифицирована следующим образом.

$$r = -w_Y d_Y (Y_{st}/Y_{min}) + w_D d_D (D_{st}/D_{max}) + w_J d_J (J_{st}/J_{max}) + w_X d_X (X_{st}/X_{min}), \quad (12)$$

где  $d_i$  – стоимости резервирования (использования, эксплуатации) соответствующих телекоммуникационных ресурсов. Смысл выражения (12) состоит в том, при примерно одинаковых значениях функции, определяющей выбор кратчайшего пути, выбирается тот путь, стоимость ресурсов которого минимальна. По сути дела речь идет о том, как из зарезервированных комбинаций 1, 3, 6, 7 выбрать оптимальный путь с точки зрения его стоимости.

Таблица 4. Результаты поиска кратчайшего пути

	$d_Y$				$d_D$	$d_J$	$d_X$	
	0.5				0.3	0.3	0.5	
	$w_Y$	$w_D$	$w_J$	$w_X$	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.267143	0.180952	0.193333	P4
2	0	1	0	0	0.3	0.216667	0.233333	P4
3	0	0	1	0	0.257143	0.235714	0.3	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.315714	0.239762	0.266667	P4

Для реализации предложенного подхода была проведена дальнейшая модификация алгоритма, которая позволяет выбирать кратчайший путь не только с учетом требований заданного качества обслуживания, но и среди множества  $QoS$  осуществимых путей учитывать также стоимость выбираемого маршрута передачи информации.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2. Алгоритм состоит 5 основных частей.

I – выбор и ввод предельных значений параметров  $QoS$ : полосы пропускания, задержки, джиттера, вероятности потерь пакетов.

II – нахождение свертки функции  $r$  с целью определения множества  $QoS$  осуществимых путей.

III – алгоритм Дейкстры по поиску кратчайшего пути с учетом сформулированных требований.

IV – определение стоимости обеспечения требований  $QoS$  среди множества осуществимых путей.

V – поиск оптимального пути с учетом требований  $QoS$  и стоимости.

Результаты расчета выбора кратчайшего пути с учетом требований заданного качества обслуживания и стоимости представлены в таблицах 4–6. В таблице представлены коэффициенты стоимости  $d_j$  для обеспечения требований различных параметров  $QoS$ . Безразмерные значения  $d_j$  выбраны произвольным образом для иллюстрации предложенного метода поиска оптимального пути.

Таблица 3. Численные значения коэффициентов стоимости

$d_Y$	$d_D$	$d_J$	$d_X$
0.5	0.3	0.3	0.5
1	0.2	0.3	0.2
0.7	0.7	0.5	1

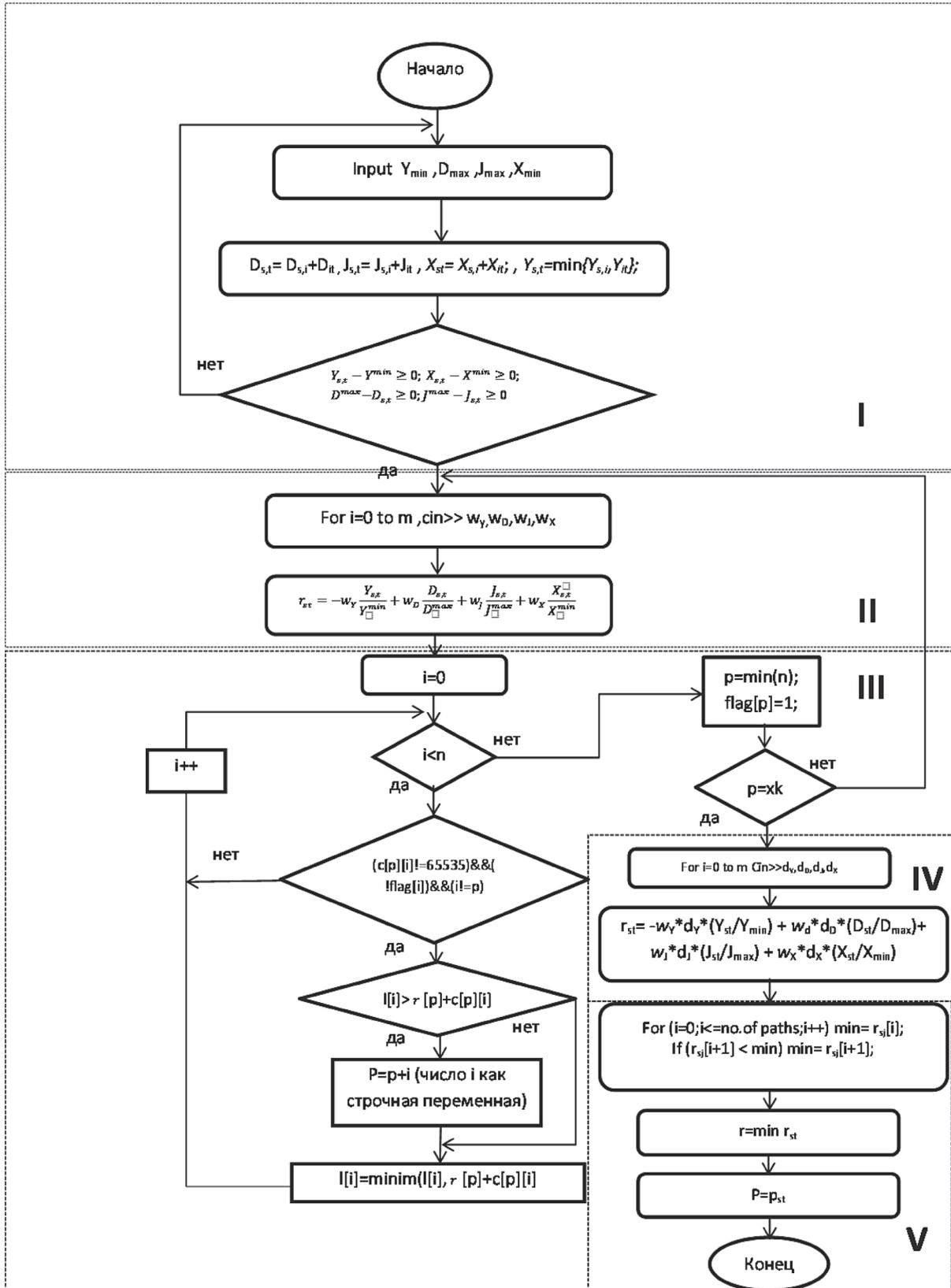


Рис. 2. Блок-схема модифицированного алгоритма поиска оптимального пути

Таблица 5. Результаты поиска кратчайшего пути

	$d_Y$				$d_D$	$d_J$	$d_X$	
	1				0.2	0.3	0.2	
	$w_Y$	$w_D$	$w_J$	$w_X$	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.097143	-0.00119	-0.036667	P5
2	0	1	0	0	0.2	0.144444	0.155556	P4
3	0	0	1	0	0.257143	0.235714	0.3	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.205714	0.15627	0.174444	P4

Таблица 6. Результаты поиска кратчайшего пути

	$d_Y$				$d_D$	$d_J$	$d_X$	
	0.7				0.7	0.5	1	
	$w_Y$	$w_D$	$w_J$	$w_X$	$r(P2)$	$r(P4)$	$r(P5)$	Кратчайший путь с минимальной стоимостью
1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.568571	0.41	0.45	P4
2	0	1	0	0	0.7	0.505556	0.544444	P4
3	0	0	1	0	0.428571	0.392857	0.5	P4
6	0	0.8	0.1	0.1	0.702857	0.529444	0.585556	P4

### Заключение

Для четырех различных значений коэффициентов стоимости был произведен выбор оптимального пути. Выбор производился из трех путей, которые удовлетворяли требованиям (7) QoS и которые были получены с помощью алгоритма Дейкстры.

Из полученных расчетов следует, что при различных заданных комбинациях весовых коэффициентов  $w_i$  и коэффициентов стоимости  $d_j$  выбор оптимального пути с учетом требований QoS и величины стоимости является более корректным и позволяет из двух или нескольких примерно одинаковых путей выбрать один более оптимальный.

### Литература

1. Листопад Н. И., Воротницкий Ю. И., Хайдер А. А. Оптимальная маршрутизация в мультисервисных сетях телекоммуникаций на основе модифицированного алгоритма Дейкстры. // Вестник БГУ. Сер. 1. 2015. № 1. С. 70–76
2. Листопад Н. И. Модели оптимальной маршрутизации в компьютерных сетях / Н. И. Листопад, А. А. Матрук // Труды БГТУ. Серия VI. Физ.-мат. Науки и информ. – 2006. – Вып. XVI. – С. 130–132.
3. Листопад Н. И., А. Матрук Аль Даллаен, Копачев А. Г. Модели обеспечения живучести компьютерных сетей при оптимальной маршрутизации информационных потоков – Информатика. – 2006. – Вып.4. с. 39–48
4. Листопад Н. И., Величквич И. О. Оптимальная маршрутизация информационных потоков с учетом параметров QoS. // Доклады БГУИР. – 2012, № 4(66). – С. 111–116.
5. Girlich E., Kovalev M. M., Listopad N. I. Optimal choice of the capacities of telecommunication networks to provide QoS-routing // Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Germany), Preprint N 21, 2009. – 14p.
6. Cardellini V., Casalicchio E., Grassi V., Pres ti F. L., Mirandola R. A Scalable Approach to QoS-Aware Self-adaptation in Service-Oriented Architectures / Quality of Service in Heterogeneous Networks / 6th International ICST Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Q Shine 2009 and 3rd International Workshop on Advanced Architectures and Algorithms for Internet Delivery and Applications, AAA-IDEA 2009, Las Palmas, Gran Canaria, November 23–25, 2009, Proceedings. P. 431–447.
7. Listopad N. I., Kopachev A. G., Matruk A. A. Quality of Service at the Computer Networks Based on Internet // Системні дослідження та інформаційні технології, Київ, № 4. – 2006. – С 71–76.
8. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. // NumerischeMathematik. V. 1 (1959), P. 269–271.