

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖИВУЧЕСТИ СЕТЕЙ С ТЕХНОЛОГИЕЙ MPLS

Юрий Зайченко, Мохаммадреза Моссавари

**Аннотация:** В статье выполнен анализ живучести и оптимизация MPLS сетей. Введен индекс выживаемости и предложен метод ее оценки. Сформулирована задача оптимизации структуры сети MPLS, исходя из ее живучести, и разработан алгоритм ее решения. Рассмотрена задача реконфигурации сети в случае отказа ее элементов и предложен метод ее решения

**Ключевые слова:** MPLS сеть, анализ живучести, оптимизация, реконфигурация маршрута

**ACM Classification Keywords:** C.2. Computer-communication networks

**Conference:** The paper is selected from XIV<sup>th</sup> International Conference "Knowledge-Dialogue-Solution" KDS 2008, Varna, Bulgaria, June-July 2008

### Введение

В последние годы в связи с резким увеличением объемов передаваемой информации в компьютерных сетях, необходимостью передачи аудио и видеоинформации, а также мультимедийной информации, возникла потребность в разработке новой коммуникационной технологии, способной обеспечить передачу разных видов информации (аудио, видео и данных) с заданным качеством обслуживания на высоких и сверхвысоких скоростях.

Первой технологией, обеспечивающей интегрированную передачу аудио, видео информации и данных стала технология ATM (Asynchronous Transfer Mode). Однако жесткое ограничение на размер передаваемых ячеек - 53 байта, а также высокая дороговизна используемого оборудования, в частности коммутаторов ATM, препятствуют ее широкому применению. Поэтому в конце 90-х годов 20 века на смену ей пришла технология многопротокольной коммутации меток MPLS (Multiprotocol Label Switching).

Эта технология предоставляет единый транспортный механизм для сетей, которые используют протоколы TCP/IP, Frame Relay, X.25, ATM. Она базируется на введении потоков различных классов обслуживания (CoS), установлении приоритетов в обслуживании различных классов и обеспечении требуемого качества обслуживания (Quality of Service – QoS) для соответствующих классов [Олвейн, 2004].

Важной задачей, возникающей при проектировании сетей MPLS, является задача анализа и оптимизации показателей живучести сетей MPLS. В работах [Зайченко, 2005; Зайченко, 2006] были предложены показатели живучести для сетей с технологией MPLS и предложен алгоритм их анализа. Целью настоящей работы является разработка и исследование метода оптимизации показателей живучести сетей с технологией MPLS и алгоритма реконфигурации сетей в случае отказов ее элементов.

### Постановка и модель задачи анализа живучести

Следуя работе [Зайченко, 2005], под живучестью системы будем понимать её способность сохранять своё функционирование и обеспечивать выполнение основных функций (в уменьшенном объеме) при заданных показателях качества обслуживания.

Поскольку основное назначение сети с технологией MPLS является передача заданных величин входящих потоков различных классов, то живучесть сети MPLS будем оценивать величиной максимального потока, который возможно передать в сети при отказах ее элементов-каналов и узлов при сохранении заданных показателей качества.

Пусть имеется сеть MPLS, которая описывается орграфом  $G = \{X, E\}$ , где  $X = \{x_j\}$  множество узлов сети (УС),  $E = \{(r, s)\}$  - множество каналов связи (КС);  $\mu_{rs}$  - пропускные способности КС.

Допустим, что в сети передается  $K$  классов потоков ( $K=1, \overline{6}$ ) (CoS) в соответствии с матрицами требований  $H(k) = \|h_{ij}(k)\|$   $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$  (Мбит/с). Для каждого класса  $k$  введен показатель качества (QoS) в виде заданной величины средней задержки  $T_{cp,k}$ , которая оценивается следующим выражением [Зайченко, 2005]:

$$T_{cp,k} = \frac{1}{H_{\Sigma}^{(k)}} \sum_{(r,s) \in E} \frac{f_{rs}^{(k)} \sum_{i=1}^k f_{rs}^{(i)}}{\left( \mu_{rs} - \sum_{i=1}^{k-1} f_{rs}^{(i)} \right) \cdot \left( \mu_{rs} - \sum_{i=1}^k f_{rs}^{(i)} \right)}, \quad (1)$$

где  $H_{\Sigma}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij}^{(k)}$ ,  $\mu_{rs}$  - пропускная способность канала связи (r,s),  $f_{rs}^{(k)}$  - величина потока k-го класса в канале (r,s).

Требуется определить для данной сети показатели живучести.

В работе [Зайченко, 2005] для анализа живучести сетей MPLS был введен следующий комплексный показатель;

$$P\{H_{\Sigma}^{\Phi}(1) \geq r\%H_{\Sigma}^0(1)\}, P\{H_{\Sigma}^{\Phi}(2) \geq r\%H_{\Sigma}^0(2)\}, \dots, P\{H_{\Sigma}^{\Phi}(k) \geq r\%H_{\Sigma}^0(k)\}, \quad (2)$$

где  $H_{\Sigma}^0(k)$  - величина потока  $k$ -го класса в безотказовом состоянии сети;  $H_{\Sigma}^{\Phi}(k)$  - фактическая величина потока класса  $k$  в случае действия отказов,  $r = (50 \div 100)\%$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Таким образом для оценки живучести сетей с технологией MPLS используется векторный показатель вида (2).

### Алгоритм оценки показателей живучести сети MPLS

Рассмотрим сеть MPLS  $G=(X,E)$ , состоящую из элементов (каналов и узлов), подверженных воздействию внешней среды, в результате которого они выходят из строя. Предполагается, что заданы надежностные характеристики элементов сети - коэффициенты готовности каналов  $k_{\Gamma r,s}$  и узлов  $k_{\Gamma i}$ ,  $(r,s) \in E$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Используя модель активной внешней среды, можно определить вероятность каждого состояния  $P\{Z_0\}$ . Например, если  $Z_i$  - это выход из строя КС  $(r_i, s_i)$ , то

$$P(Z_i) = (1 - K_{\Gamma r,s}) \prod_{(r,s) \neq (r_i, s_i)} K_{\Gamma r,s}, \quad (3)$$

где  $K_{\Gamma r,s}$  - вероятность исправного состояния КС,  $(r,s) \neq (r_i, s_i)$ ,  $1 - K_{\Gamma r,s}$  - вероятность вывода из строя КС  $(r,s)$ .

В работе [2] был предложен алгоритм оценки показателей живучести сети MPLS, суть которого состоит в следующем.

1. Вычисляем общую величину потока в безотказном состоянии для всех классов сервиса:  $H_{\Sigma}^{(0)}(1), H_{\Sigma}^{(0)}(2), \dots, H_{\Sigma}^{(0)}(K)$ .
2. Моделируем различные отказовые состояния:  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$ . Для каждого из них рассчитываем вероятности  $P(Z_i)$  согласно (3).
3. Находим величину максимального потока всех классов в состоянии  $Z_j$ :  $H_{\Sigma}^{\Phi}(k, z_j)$ ,  $k = \overline{1, K}$ . Для этого используется специально разработанный алгоритм нахождения максимального потока
4. Вычисляем комплексный показатель живучести для каждого класса сервиса:

для первого класса

$$P\{H_{\Sigma}^{\phi}(1) \geq r\%H_{\Sigma}^0(1)\} = \sum_{Z_j} P(Z_j) \quad (4)$$

где суммирование в (4) происходит по всем  $Z_j$  таким что  $H_{\Sigma}^{\phi}(1) \geq r\%H_{\Sigma}^0(1)$ ;

для  $k$ -го класса

$$P\{H_{\Sigma}^{\phi}(k) \geq r\%H_{\Sigma}^0(k)\} = \sum_{Z_i} P(Z_i) \quad (5)$$

где суммирование в (5) происходит по всем состояниям  $Z_i$  таким, что:

$H_{\Sigma}^{\phi}(k) \geq rH_{\Sigma}^0(k)$ ;  $H_{\Sigma}^0(k)$  - величина потока  $k$ -го класса в безотказовом состоянии сети;  $H_{\Sigma}^{\phi}(k)$  - фактическая величина потока класса  $k$  в случае действия отказов,  $r=(50\div 100)\%$ ,  $k = \overline{1, K}$ ;

$$Z_i: H_{\Sigma}^{\phi}(r) \geq kH_{\Sigma}^0(r).$$

Полученные зависимости  $P\{H_{\Sigma}^{\phi}(1) \geq r\%H_{\Sigma}^0(1)\}, P\{H_{\Sigma}^{\phi}(2) \geq r\%H_{\Sigma}^0(2)\}, \dots, P\{H_{\Sigma}^{\phi}(k) \geq r\%H_{\Sigma}^0(k)\}$  построим в координатах  $P\{H_{\Sigma}^{\phi}(k)\} - r\%H_{\Sigma}^0$ .

### Постановка задачи оптимизации сети MPLS по показателям живучести

В ходе проектирования сетей по результатам анализа ее показателей живучести возникает проблема обеспечения требуемого уровня живучести. Естественно, что эта задача может быть решена путем резервирования ее каналов и узлов, структурной оптимизации сети и требует дополнительных затрат материальных средств. Поэтому далее в работе рассматривается постановка задачи структурной оптимизации сети по показателям живучести.

Пусть имеется сеть MPLS, которая описывается орграфом  $G = \{X, E\}$ , где  $X = \{x_j\}$  множество узлов сети (УС),  $E = \{(r, s)\}$  - множество каналов связи (КС);  $\mu_{rs}$  - пропускные способности КС.

Допустим, что в сети передается  $K$  классов потоков ( $K=1, \overline{6}$ ) (CoS) в соответствии с матрицами требований  $H(k) = \|h_{ij}(k)\|$   $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, N}$  (Мбит/с). Для каждого класса  $k$  введен показатель качества (QoS) в виде заданной величины средней задержки  $T_{cp,k}$ . Пусть, исходя из функционального назначения сети, установлены следующие значения показателей живучести для потока  $k$ -го класса;  $P_{0зад}^{(k)}, P_{1зад}^{(k)}, \dots, P_{5зад}^{(k)}$ .

Требуется определить такую структуру сети, для которой для всех классов  $K$  будут обеспечиваться следующие ограничения по уровню живучести:

$$P\{H_{\Sigma}^{\phi}(k) \geq r\%H_{\Sigma}^0(k)\} \geq P_{кзад}, r=(50\div 100)\%, k = \overline{1, K} \quad (6)$$

а дополнительные затраты средств будут при этом минимальными.

Достижение требуемого уровня живучести будем обеспечивать путем введения соответствующего резервирования наиболее ответственных элементов сети (КС и УС).

Для оценки эффективности резервирования каналов и узлов вводится следующий показатель

$$\alpha_{r_i s_i} = -\frac{\Delta P(Z_i)}{C_{r_i s_i}} \quad (7)$$

где  $Z_i$  - состояние выхода из строя КС ( $r_i s_i$ );  $\Delta P(Z_i)$  - изменение вероятности состояния  $Z_i$  в случае резервирования,  $C_{r_i s_i}$  - стоимость такого резервирования. Величина  $\Delta P(Z_i)$  оценивается по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
P_{рез}(Z_i) - P(Z_i) &= (P_{отк\ r_i s_i}^2 \cdot \prod_{(r,s) \neq (r_i, s_i)} K_{\Gamma\ r, s} - P_{отк\ r_i s_i} \prod_{(r,s) \neq (r_i, s_i)} K_{\Gamma\ r, s} = \\
&= -(1 - P_{отк\ r_i s_i}) \cdot P_{отк\ r_i s_i} \prod_{(r,s) \neq (r_i, s_i)} K_{\Gamma\ r, s} = -(1 - P_{отк\ r_i s_i}) \cdot P(Z_i)
\end{aligned} \tag{8}$$

Аналогичные соотношения используем и для оценки резервирования УС.

Показатель  $\alpha_{r_i s_i}$  используется для выбора первоочередных элементов (КС и УС) для резервирования.

Предложим следующий алгоритм оптимизации сети MPLS по показателям живучести.

### Оптимальная реконфигурация маршрутов в сетях MPLS при отказах в задаче обеспечения заданного уровня живучести

Выше была сформулирована задача анализа живучести сети при отказах её элементов и предложен алгоритм оценки показателей живучести, основанный на решении задачи нахождения максимального потока (НМП) в сети при отказах её элементов.

Для вычисления величины  $H_{\Sigma}(z_j)$  при отказе, например, КС  $(r_j, s_j)$  предполагалось, что в этом состоянии находится полностью новое распределение потоков всех требований и новые маршруты, которые устанавливаются в сети. Однако такой случай является идеальным, и не соответствует реальным условиям функционирования маршрутов сети MPLS, так называемых LSR (Label Switching Routers). На практике, в случае отказа некоторого КС, соседние маршрутизаторы реконфигурируют потоки всех соединений, проходившие через КС  $(r_j, s_j)$  на другие маршруты, причем так, чтобы по возможности не нарушить другие соединения в сети и сохранить установленные показатели качества сервиса (QoS) для них.

**Постановка задачи.** Пусть задана сеть MPLS со структурой  $G = \{X, E\}$ ,  $X = \{x_j\}$   $j = \overline{1, n}$  - множество узлов сети (УС),  $E = \{r, s\}$  - множество каналов связи (КС) сети, заданы также пропускные способности (ПС) всех КС  $\mu_{r,s}$ ,  $(r, s) \in E$ , матрицы требований  $H(k) = \|h_{ij}(k)\|$   $i, j = \overline{1, n}$ ,  $h_{ij}(k)$  - интенсивность потока  $k$ -го класса, который необходимо передавать из узла  $i$  в  $j$  (Кбит/с), распределение потоков всех классов  $F(k) = [f_{rs}(k)]$ , где  $f_{rs}(k)$  - величина потока класса  $k$ , передаваемого по КС  $(r, s)$ , соответствующая матрице  $H_{\Sigma}(k)$ . Введены также ограничения на значения показателя качества (QoS) для всех классов в виде  $T_{cp}^{(k)} \leq T_{зад, k}$ ,

Известны также маршруты коммутации меток LSP  $\{T_{ij}(k)\}$  для каждого соединения (пары)  $(i, j)$ , которые устанавливаются с помощью протокола RSVP или SNMP.

Допустим, что произошел отказ КС  $(r_j, s_j)$ , обозначим это отказовое состояние  $z_j$ . Требуется реконфигурировать все маршруты отказавшего соединения КС  $(r_j, s_j)$  таким образом, чтобы в максимальной степени удовлетворить соответствующие требования, получившие отказ в обслуживании при сохранении остальных соединений по объему трафика и заданному качеству QoS -  $T_{cp}$ . Назовём эту задачу оптимальной реконфигурацией сети MPLS при отказах.

Математическая модель данной задачи имеет следующий вид:

Требуется найти такое распределение потоков  $[f_{rs}(k)]$ , при котором обеспечивается:

$$H_{\Sigma} = \sum_{(i,j):(r_j, s_j) \in \Pi_{ij}} h_{ij}^{(копп)} \rightarrow \max, \tag{9}$$

при условиях

$$T_{cp}(F_{корр}^{(k)}) \leq T_{зад}, k = \overline{1, K}, \quad (10)$$

$F_{корр}^{(k)}$  - скорректированный поток в КС  $(r, s)$  после реконфигурации  $k$ -го класса сервиса.

Приведем алгоритм оптимальной реконфигурации сети MPLS, состоящий из 2-х этапов.

На первом этапе определяются все требования (соединение)  $(i, j)$ , которые использовали КС  $(r_j, s_j)$  и отключаются временно от сети и пересчитываются потоки в КС  $F^{(k)} = [f_{rs}^{(k)}], (r, s) \in E$ .

На втором этапе определяются резервы по ПС всех КС и оптимальным образом перераспределяются потоки отказанных требований так, чтобы обеспечить достижение критерия  $H_{\Sigma} \rightarrow \max$  (назовём их отказовыми требованиями).

### **1 ЭТАП**

1. Находим все требования  $(i, j)$  проходившие через отказанные соединения КС  $(r_j, s_j)$ . Обозначим их

$$P_{r_j, s_j} = \{(i, s): (r_j, s_j) \in \Pi_{ij}\}. \quad (11)$$

2. Временно отключаем передачу информации для требований множества  $P_{r_j, s_j}$  и вычисляем новые значения потоков -  $F^H(k) = [f_{rs}^H(k)]:$

$$f_{rs}^H = \begin{cases} f_{rs} - \sum_{(i,j): \Pi_{ij} \ni (r,s)} h_{ij}, & \text{где } (i, j) \in P_{r_j, s_j} \\ f_{rs}, & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Это выполняется следующим образом:

1. Находим первое требование  $(i_1, j_1) \in P_{r_j, s_j}$ .
2. Полагаем  $h_{i_1, j_1} = 0$  и вычисляем новое распределение потоков:

$$f_{rs}^H(k) = \begin{cases} f_{rs}(k) - h_{i_1, j_1}, & \text{если } (r, s) \in \Pi_{i_1, j_1} \\ f_{rs}(k), & \text{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (12)$$

3. Проверка условия:  $P_{r_j, s_j} \setminus (i_1, j_1) \neq \emptyset$ , если ДА, то на шаг 1 и повторяем шаги 1-3 до исчерпания множества  $P_{r_j, s_j}$ . В результате получим новое распределение потоков всех классов

$$F^H(k) = [f_{rs}^H(k)], \text{ включающее потоки только от неотказанных требований } (i, j) \setminus P_{r_j, s_j}.$$

4. Определяем резервы по ПС всех КС:

$$Q_{рез, r, s} = \mu_{rs} - \sum_{k=1}^K f_{rs}^H(k). \quad (13)$$

Переходим ко второму этапу.

### **2 ЭТАП**

Для требований множества  $P_{r_j, s_j}$  находим новые маршруты (реконфигурируем маршруты) так, чтобы обеспечить выполнение условий:

$$T_{cp}(F_{корр}^{(k)}) \leq T_{зад}, k = \overline{1, K}, \quad (14)$$

и при этом  $\sum_{(i,j) \in P_{r_j, s_j}} h_{ij}^{(кopp)} \rightarrow \max$ .

Второй этап состоит из  $k$  подэтапов, на каждом из которых осуществляем реконфигурацию маршрутов и переопределение потоков для  $k$ -го класса.

#### Подэтап 1

1.  $k = 1$ . Сначала распределяем отказанные требования класса 1.

2. Находим условную метрику  $\frac{\partial T_{cp}}{\partial f_{rs}^{(1)}} | f_{rs}^H(1)$ .

3. Находим кратчайшие пути  $\Pi_{ij}^{\min}(1)$  для всех отказанных требований класса  $k = 1$ .

4. Выбираем первое требование  $(i_1, j_1) \in P_{r_j, s_j}$  такое, что  $l(\Pi_{i_1, j_1}^{\min}(1)) = \min_{(i,j)} l(\Pi_{i,j}^{\min})$ .

5. Проверяем возможность передачи его в полном объеме по пути  $\Pi_{i_1, j_1}^{\min}$

$$h_{i_1, j_1} < Q_{pez}(\Pi_{i_1, j_1}^{\min}), \quad (15)$$

где  $Q_{pez}(\Pi_{i_1, j_1}^{\min})$  - свободная ПС маршрута  $\Pi_{i_1, j_1}^{\min}$

$$Q_{pez}(\Pi_{i_1, j_1}^{\min}) = \min_{(r,s) \in \Pi_{i_1, j_1}^{\min}} \{\mu_{rs} - f_{rs}\}. \quad (16)$$

Если условие (15) выполняется, то распределяем полностью поток требования  $h_{i_1, j_1}$  по маршруту  $\Pi_{i_1, j_1}^{\min}$  и находим скорректированное распределение потоков (РП):

$$f_{rs}^H(k) = \begin{cases} f_{rs}^H(1) + h_{i_1, j_1}, & \text{если } (r, s) \in \Pi_{i_1, j_1}^{\min} \\ f_{rs}^H(1), & \text{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (17)$$

Иначе - на шаг 6.

6. Полагаем  $h_{i_1, j_1}^{(a)} = Q_{pez}(\Pi_{i_1, j_1}^{\min}) - \Delta$ . Здесь  $h_{i_1, j_1}^{(a)}$  - доля требования  $h_{i_1, j_1}$ , передаваемая по маршруту  $\Pi_{i_1, j_1}^{\min}$ ,  $\Delta$  - некоторая заданная величина.

7. Находим скорректированное распределение потоков:

$$f_{rs}^{кopp}(k) = \begin{cases} f_{rs}^H(1) + h_{i_1, j_1}^{(a)}, & \text{если } (r, s) \in \Pi_{i_1, j_1}^{\min} \\ f_{rs}^H(1), & \text{в остальных случаях} \end{cases}. \quad (18)$$

Проверяем, выполняется ли ограничение на  $T_{cp,1}$ :

$$T_{cp}(F_{кopp}^{(1)}) \leq T_{зад,1}. \quad (19)$$

Если условие (19) выполняется, то  $P_{r_j, s_j}^H = P_{r_j, s_j} \setminus (i_1, j_1)$  и переход на шаг 9.

8. Проверка условия:  $P_{r_j, s_j}^H \neq 0$ ? Если ДА, то переходим к следующей итерации и распределяем очередное требование класса  $k = 1$ . Иначе - на шаг 9.

9. Конец первого подэтапа.

Далее для всех  $k = \overline{1, K}$  следующие подэтапы выполняются по вышеприведенной схеме. На каждом из них выполняем перераспределение отказанных требований второго класса, причем так, чтобы не нарушалось условие:

$$T_{cp}(F_{корр}^{(k)}) \leq T_{зад,k}. \quad (20)$$

Последовательность этих подэтапов заканчивается либо полным распределением всех отказанных требований (что маловероятно), либо при выходе на границу по всем ограничениям:

$$T_{cp}(F_{корр}^{(k)}) \geq T_{зад,k}, \text{ для всех } k = \overline{1, K}. \quad (21)$$

Это означает полное исчерпание всех свободных ресурсов (свободной полосы) каналов связи.

В результате работы алгоритма находятся оптимальные реконфигурированные пути (LSP) для соединений  $(i, j)$ , получивших отказ в обслуживании из-за отказа соответствующего КС или УС. Естественно, что в силу ограниченной ПС сети при этом некоторые соединения обслуживаться не будут. При этом, учитывая очередность реконфигурации, отказ в обслуживании получают наименее приоритетные соединения, а величина общего потока, передаваемого в сети после реконфигурации – минимальной.

---

## Выводы

Сформулирована задача оптимизации показателей живучести сети с технологией MPLS в случае отказов её элементов-каналов и узлов.

1. Введены показатели живучести сетей и предложен алгоритм их оценки, учитывающий специфику сетей с технологией MPLS.
2. Сформулирована задача оптимизации сетей по показателям живучести и предложен алгоритм ее решения, позволяющий достичь заданных значений показателей живучести при минимальных дополнительных затратах
3. Предложен алгоритм оптимальной реконфигурации сети MPLS в случае отказов, позволяющий максимально использовать коммуникационные ресурсы сети и максимизировать величину потока передаваемого через сеть в случае отказов.

---

## Литература

- [Олвейн, 2004] Олвейн Вивьен. Структура и реализация современной технологии MPLS. Перевод с английского. Изд. дом «Вильямс», 2004. – 480 с.
- [Зайченко, 2005] Зайченко Ю.П., Мохаммадреза Моссавари. Анализ показателей живучести компьютерной сети с технологией MPLS // Вісник національного технічного університету «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. - Вип. 43. – 2005. - С. 73-80.
- [Зайченко, 2006] Зайченко Ю.П., Мохаммадреза Моссавари. Оптимизация компьютерных сетей с технологией MPLS по показателям живучести в случае активной внешней среды // Вісник національного технічного університету «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. Вип. 45. – 2006. - С.163-172.
- [Зайченко, 2006] Зайченко Ю.П., Аникиев А.С., Мохаммадреза Моссавари, Ашраф Абдель-Карим Хилал Абу-Аин. Синтез структуры глобальных компьютерных сетей с технологией MPLS при ограничениях на показатели качества и живучести // Електроніка і зв'язь. - 2006. - № 2. - С. 68-71.

---

## Информация об авторе

**Зайченко Юрий Петрович**, профессор, д.т.н., декан факультета, «Институт прикладного системного анализа». Киев, НТУУ «КПИ», ул. Политехническая 14. тел: +8(044)241-86-93, e-mail: [zaych@i.com.ua](mailto:zaych@i.com.ua)

**Мохаммадреза Моссавари** (Иран), аспирант кафедры «Прикладная математика» НТУУ «КПИ», проспект Победы 37, тел +380677099063