




ANALYSIS OF MULTI-CRITERIAL APPROACHES AND SELECTION OF TRANSPORT ALTERNATIVES IN MULTIMODAL TRANSPORT SYSTEM

Abstract: A multimodal system for transportation of goods with a limited number of known alternatives, determined by the routes and modes, is considered. The aim of the study is to propose an approach for evaluating and selecting alternatives to freight transport. The following main tasks are considered: selection of indices characterizing the efficiency of multimodal transport, formation of criteria for optimization of multimodal transport, building the model of the multimodal transport system, calculation of the criteria for efficiency of freight transport through the Analytical hierarchical process (AHP) as the most appropriate approach for comparative assessment of different routes and modes of freight transport.

Author information:

Mariyan Rahnev

eng.

 Bulgaria

Keywords:

analytic hierarchy process, multi-criteria analysis, multi-criteria optimization, multimodal transport system

Мениджмънтът е процес, при който предварително определени цели се постигат чрез използване на известни ресурси, които се разглеждат като входни параметри, а целите - като изходни параметри на процеса на управление. Степента на успеха от работата на мениджърите се измерва с различни критерии. Най-често един такъв критерий е отношението между входните и изходните параметри на процеса на управление. Това отношение е показателно за производителността на дадена организация. Нивото на производителност или успехът на процеса на управление зависи от изпълнението на известни управленски функции като планиране, организиране, направляване и контролиране. За изпълнението на тези функции мениджърите са ангажирани в един непрекъснат процес на вземане на решения. В този смисъл, мениджърът може да се отъждестви с лице, вземащо решение (ЛВР).

С течение на времето, бизнесът и неговата обкръжаваща среда стават все по-динамични, а процесът на вземане на решения се усложнява.

Голям брой задачи за вземане на решения се формализират в термините на многокритериалното вземане на решения и в зависимост от постановката биват *дискретни* или *непрекъснати* и съответно се наричат задачи на многокритериална оптимизация (МКО) или многокритериален анализ (МКА).

Задачи на многокритериалния анализ

Задачите на МКО и МКА, са задачи за вземане на решения при наличието на много критерии, когато броят на алтернативите е неограничен, но множеството на алтернативите е определено от краен брой ограничения. Основната им характеристика е, че при тях се

оптимизират едновременно повече от един противоречиви и несъизмерими критерия (целеви функции) върху някаква непразна допустима област на изменение на променливите.

При тези задачи в общия случай се оказва, че поради противоречивост на критериите или целевите функции е невъзможно да се намери едно решение, което би било оптимално за всички критерии едновременно, т.е. задачите на многокритериалната оптимизация принадлежат към класа на т. нар. зле дефинирани математически задачи. Оказва се обаче, че съществуват множество от допустими стойности на критериите (респективно, множество от допустими стойности на променливите), за които е изпълнено следното важно условие: не е възможно подобряването на допустимите стойности на някой критерий без да се влоши допустимата стойност на друг – това е т. нар. множество на Парето. Вместо концепцията за оптималност, която се използва при еднокритериалната оптимизация, при многокритериалната говорим за концепция за оптималност по Парето. На основата на такава концепция обаче се достига не до единствено решение, а до множество от оптимални (крайни) решения, които от математическа гледна точка са равностойни, т.е. те са еднакво добри да бъдат оптимално решение на задачата на МКО. Но за практиката е необходимо да бъде избрано само едно крайно решение на задачата. Критериите и ограниченията на многокритериалната задача не съдържат информация за определянето на едно решение. Тази информация трябва да бъде зададена допълнително от ЛВР.

Общата формулировка на задачата на многокритериалната оптимизация има следния вид:

$$„\max”\{f_k(x), k \in K\} \quad (1)$$

при ограниченията:

$$g_i(x) \leq b_i, i \in M \quad (2)$$

$$0 \leq x_j \leq d_j, j \in M \quad (3)$$

където:

- символът “max” означава, че трябва да се намери максимума на всички критерии (целеви функции) едновременно;

- $K = \{1, 2, \dots, p\}$, $M = \{1, 2, \dots, m\}$ и $N = \{1, 2, \dots, n\}$ са индексните множества на критериите, на ограниченията и на променливите;

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n)^T$ е векторът на променливите;

- $f_k(x), k \in K$ са критериите;

- $f_x = (f_1(x), \dots, f_p(x))^T$ или $z = (z_1, \dots, z_n)^T$ е векторът на критериите,

$z_k = f_k(x), k \in K$;

- $g_i(x), i \in M$ са функциите на ограниченията на задачата.

Критериите $f_k(x), k \in K$ и функциите на ограниченията $g_i(x), i \in M$ са реални функции: $f_k: R^n \rightarrow R, k \in K$ и $g_i: R^n \rightarrow R, i \in M$, където R е множеството на реалните числа.

Ограниченията (2) и (3) определят допустимото множество на променливите $X \subset R^n$.

С $f_x = Z$ се означава образът на множеството X в критериалното пространство $R^p, Z \subset R^p$. Z се нарича допустимо множество в критериалното пространство.

Алтернативен запис на задачата на многокритериалната оптимизация е следният:

$$\text{„max“}\{f_k(x), k \in K\}, x \in X \quad (4)$$

В зависимост от вида на функциите $f_k(x), k \in K$ и $g_i(x), i \in M$ по отношение на променливите $x_i, i \in N$, както и от вида на тези променливи, се различават следните видове задачи на многокритериалната оптимизация: линейни и нелинейни, непрекъснати и дискретни (наричани още задачи на многокритериалния анализ), детерминирани и стохастични, мрежови и немрежови.

Методи на многокритериалния анализ

Методите за решаване на задачи на многокритериалния анализ се класифицират в зависимост от начина на получаване и обработка на информацията за предпочитанията на ЛВР и от това дали се счита, че съществува ограничение във възможностите на ЛВР за сравнение между алтернативите. Методите се разделят на три отделни класа :

1. Методи, в които глобалните предпочитания на ЛВР се обобщават в резултат на синтеза на един обобщен критерий (*подход на многоатрибутната теория за полезност*).

Включват се методите на теорията на многоатрибутната полезност (директния тегловен метод (Von Winterfeldt and Edwards, 1986), метод на компромиса (Keeney and Raiffa, 1993), тегловните методи АНР (Saaty, 1994), (Ngai and Chan, 2005) метод UTA (Beuthe and Scannella, 2001), метод МАСВЕТН (Bana e Costa, De Corte and Vansnick, 2005) и др. В този клас методи могат да се отделят два подкласа, които се различават по начина на обобщаване на глобалните предпочитания на ЛВР. Разликата между тях е, че при първия подклас директно се синтезира обобщен функционален критерий, докато при втория подклас (тегловните методи) такъв критерий (адитивна форма) се синтезира индиректно.

Въпреки различията в начините за получаване на глобалните предпочитания на ЛВР, и при двата подкласа методи се допуска, че не съществува ограничение във възможностите на ЛВР за сравнение между алтернативите. За изразяване на предпочитанията на ЛВР при сравняването на две алтернативи се използва бинарна релация на силно предпочитание P (нерефлексивна, асиметрична и транзитивна) и бинарна релация на неразличимост I (рефлексивна, симетрична и транзитивна).

2. Методи, в които глобалните предпочитания на ЛВР се обобщават в резултат на синтеза на едно или няколко обобщени отношения (релации) на предпочитания между алтернативите (*аутранкиращ подход*). Това са т. нар. аутранкиращи методи, обхващащи методите TACTIC (Vansnick, 1986), методи PROMETHEE (Brans and Mareschal, 2005), методи ELECTRE (Figueira, Mousseau, and Roy, 2005) и др. Те използват допускането за съществуване на ограничена сравняемост между алтернативите.

При тях първоначално се построява една (или няколко) аутранкираща(и) релация(и), която отразява глобалните предпочитания на ЛВР. След това тази аутранкираща релация се използва, за да подпомогне ЛВР при решаването на задачата за вземане на решение на многокритериалния анализ. При сравняването на две алтернативи се използват четири бинарни релации:

- на неразличимост I (рефлексивна и симетрична),
- на слабо предпочитание Q (нерефлексивна и асиметрична);
- на силно предпочитание P (нерефлексивна и асиметрична);
- на несравнимост R (нерефлексивна и асиметрична).

Аутранкиращата релация “покрива” тези четири релации;

3. Методи, в които локалните предпочитания на ЛВР се натрупват итеративно посредством директни или индиректни сравнения между две или повече алтернативи (*интерактивен подход*).

Третия клас методи са т. нар. интерактивни методи (метод VIMDA (Korhonen, 1991), метод на аспирационните нива (Lotfi, Stewart and Zionts, 1992) метод InterQuad (Sun and Steuer, 2000), метод LBS (Jaszkiewicz and Slowinski, 1997), метод СВIM (Narula, Vassilev, Genova and Vassileva, 2003) и др.) са “оптимизационно мотивирани”.

Интерактивните методи се използват за задачи с голям брой алтернативи и сравнително малък брой количествени критерии, в които ЛВР не е в състояние да оцени едновременно всички алтернативи, са близки до задачите на многокритериалната оптимизация.

Тегловни методи. Метод АНР

Методът АНР (*Analytic Hierarchy Process*) представлява един от най-популярните методи за научен анализ на сценарии и вземане на решения, чрез последователна оценка на йерархията, чиито елементи представляват целите, критериите, подкритериите и алтернативите, затова и спада към класа на методите за оптимизация. Теглата на критериите се определят, чрез изчисляване на собствените вектори и стойности на определена матрица на оценките, която се получава от информацията, задавана от лицето вземащо решение, получена чрез сравнение по двойки на критериите на основата на т.нар. фундаментална скала за оценка на критериите (скала на Саати). В таблица 1 е показана скалата за оценяване на Saaty.

Таблица 1

Определение	Скала за оценяване на Saaty	
	Ниво на значимост	Реципрочни стойности
Еднакво значими	1	1
Умерено(средно) значим	3	1/3
Съществено(силно) значим	5	1/5
Много силно значим	7	1/7
Изключително значим	9	1/9
Средни стойности между две близки преценки	2,4,6,8	1/2 ; 1/4 ; 1/6; 1/8

АНР разглежда набор от критерии за оценка и набор от алтернативни варианти, сред които трябва да се вземе най-доброто решение. Важно е да се отбележи, че тъй като някои от критериите могат да бъдат контрастни, като цяло не е вярно, че най-добрият вариант е този, който оптимизира всеки един критерий, а не този, който постига най-подходящия компромис сред различните критерии. АНР генерира тежест за всеки критерий за оценка в съответствие с двойните сравнения на критериите на вземащия решение. Колкото по-голямо е теглото, толкова по-важен е съответният критерий. На следващо място, за фиксиран критерий, АНР присвоява резултат на всяка опция в съответствие с двойните сравнения на вземащия решение на опциите въз основа на този критерий. Колкото по-висок е резултатът, толкова по-добра е ефективността на варианта по отношение на разглеждания критерий. И накрая, АНР комбинира критериите тежест и оценките на опциите, като по този начин определя глобален резултат за всяка опция и последващо класиране. Общият резултат за дадена опция е претеглена сума от получените резултати по отношение на всички критерии.

АНР е много гъвкав и мощен инструмент, тъй като оценките и следователно окончателното класиране се получават въз основа на двойно относителните оценки както на критериите, така и на опциите, предоставени от потребителя. Изчисленията, направени от АНР, винаги се ръководят от опита на вземащия решение и по този начин АНР може да се разглежда като инструмент, който може да преведе оценките (както качествени, така и количествени), направени от вземащия решение, в многокритерийна класация. От друга страна, АНР може да изисква голям брой оценки от потребителя, особено при проблеми с много критерии и опции. Въпреки че всяка отделна оценка е много проста, тъй като изисква само от ЛВР да изрази как две опции или критерии се сравняват помежду си, натоварването на задачата за оценка може да стане неразумно. Всъщност броят на двойните сравнения нараства квадратично с броя на критериите и опциите. Например, когато се сравняват 10 алтернативи по 4 критерия, се изисква $4 \cdot 3/2 = 6$ сравнения за изграждане на тегловия вектор, а $4 \cdot (10 \cdot 9/2) = 180$ двойни сравнения са необходими за изграждането на матрицата за оценка. АНР може да се реализира в три прости последователни стъпки:

1) *Изчисляване на вектора на критериите тегла*

За да изчисли теглата за различните критерии, АНР започва да създава матрица за сравняване на двойки А. Матрицата А е $m \times m$ реална матрица, където m е броят на разгледаните критерии за оценка.

Всяки запис a_{jk} на матрицата А представлява значението на j -ти критерий спрямо k -тия критерий. Ако $a_{jk} > 1$, тогава j -тият критерий е по-важен от k -тия критерий, докато ако $a_{jk} < 1$, тогава j -ият критерий е по-малко важен от k -тия критерий. Ако два критерия имат еднакво значение, тогава a_{jk} за въвеждане е 1. Вписванията a_{jk} и a_{kj} отговарят на следното ограничение:

$$a_{jk} \cdot a_{kj} = 1 \quad (5)$$

Очевидно е, че $a_{jj} = 1$ за всички j . Относителното значение между два критерия се измерва според числова скала от 1 до 9, показано в таблица 1, където се приема, че j -тият критерий е еднакъв или по-важен от k -тия критерий. Фразите в графата „тълкуване“ ("интерпретация") на Таблица 2 са само внушаващи (предполагащи) и могат да се използват за превеждане на качествени оценки на вземащия решение от относителното значение между два критерия в числа. Възможно е също така да се присвоят междинни стойности, които не отговарят на точна интерпретация. Стойностите в матрицата А са конструирани по двойки, от (5). От друга страна, като цяло оценките могат да показват леки несъответствия. Те обаче не създават сериозни затруднения за АНР.

Таблица 2

Стойност на a_{jk}	Интерпретация
1	j и k са еднакво важни
2	j е малко по-важно от k
5	j е по-важно от k
7	j е силно по-важно от k
9	j е абсолютно по-важно от k

След като е построена матрицата A , е възможно да се извлече от A *нормализираното двойно сравнене-анормална матрица* A_{norm} , като се прави равна на 1 сумата от записите във всяка колона, т.е. всеки запис $\overline{a_{jk}}$ на матрицата A_{norm} се изчислява като:

$$\overline{a_{jk}} = \frac{a_{jk}}{\sum_{l=1}^m a_{lk}} \quad (6)$$

И накрая, *критерият теглови вектор* w (това е m -мерния колонен вектор) се изгражда чрез усредняване записите на всеки ред от A_{norm} , т.е.

$$w_j = \frac{\sum_{l=1}^m \overline{a_{lk}}}{m} \quad (7)$$

2) Изчисляване на матрицата от опциите (от възможните резултати)

Матрицата на оценката на опциите е $n \times m$ реална матрица S . Всяко влизане s_{ij} на S представлява резултата на I вариант по отношение на j -ти критерий. За да се получат такива резултати, *матрица за двойно сравнение*

$B^{(j)}$ първо се изгражда за всеки от m критериите, $j = 1, \dots, m$. Матрицата $B^{(j)}$ е $n \times n$ истинска матрица, където n е броят на оценените опции. Всеки запис $b_{ih}^{(j)}$ на матрицата $B^{(j)}$ представлява оценката на i -тата опция в сравнение с h -та опцията по отношение на j -тия критерий. Ако $b_{ih}^{(j)} > 1$, тогава i -та опцията е по-добра от h -та опция, докато ако $b_{ih}^{(j)} < 1$, тогава i -тата опция е по-лоша от h -та опция. Ако две опции са оценени като еквивалентни по отношение на j -ия критерий, тогава записът е 1. Записите $b_{ih}^{(j)}$ и $b_{hi}^{(j)}$ отговарят на следното ограничение:

$$b_{ih}^{(j)} \cdot b_{hi}^{(j)} = 1 \quad (8)$$

и $b_{ii}^{(j)} = 1$ за всички i . Скала за оценка, подобна на тази, въведена в таблица 1, може да бъде използвана за превеждане на двойни оценки на вземания решение в числа.

АНР прилага към всяка матрица $B^{(j)}$ една и съща процедура в две стъпки, описана за матрица за двойно сравнение A , т.е. тя разделя всеки запис на сумата от записите в една и съща колона и след това тя осреднява записите на всеки ред, като по този начин се получават векторите за оценка, $j = 1, \dots, m$. Векторът S^j съдържа оценките на оценените опции по отношение на j -ия критерий. Накрая се получава матрицата за оценка S като:

$$S = [s^{(1)} \dots s^{(m)}] \quad (9)$$

т.е. j -та колона на S съответства на $s^{(j)}$.

3) Класиране на опциите

След като се изчисли векторът на тегло w и матрицата за оценка S , АНР получава вектор v на глобални резултати чрез умножаване на S и w , т.е. $v = S \cdot w$ (10)

i -то въвеждане v_i на v представлява глобалната оценка, присвоена от АНР на i -та опция. Като последна стъпка класирането на опциите се осъществява чрез подреждане на глобалните резултати в намаляващ ред.

АНР включва ефективна техника за проверка на съгласуваността на оценките, направени от вземащия решение при изграждането на всяка от двойките за сравняване на двойки, включени в процеса, а именно матрицата A и матриците $B^{(j)}$. Техниката разчита на изчисляването на подходящ индекс на консистенция и ще бъде описана само за матрицата A . Право е да се адаптира към случая на матриците $B^{(j)}$, като се замени A с $B^{(j)}$, w с $s^{(j)}$ и m с n . *Индексът на последователност (CI)* се получава, като първо се изчисли скаларната x , като средната стойност на елементите на вектора, чийто j -ти елемент е съотношението на j -ия елемент на вектора $A \cdot w$ към съответния елемент на вектора w . Тогава,

$$CI = \frac{x-m}{m-1} \quad (11)$$

Съвсем последователно ЛВР трябва винаги да получава $CI = 0$, но могат да се толерират малки стойности на несъответствие. По-специално, ако

$$\frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (12)$$

несъответствията са поносими и може да се очаква надежден резултат от АНР. В (8) RI е индексът на случайността, т.е. индексът на последователност, когато записите на A са напълно случайни. Стойностите на RI за малки проблеми ($m \leq 10$) са показани в таблица 3.

Таблица 3

Стойности на индекса на случаен принцип (RI) за малки проблеми									
m	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Матриците A , съответстващи на случаите, разгледани в горния пример, са показани по-долу, заедно с тяхната оценка на последователност въз основа на изчисляването на индекса на консистенция.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/3 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow CI/RI = 1.150 \Rightarrow \text{непоследователни}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow CI/RI = 0.118 \Rightarrow \text{леко непоследователни}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow CI/RI = 0.033 \Rightarrow \text{последователен}$$

Въпреки че всяка отделна оценка на АНР е много проста (от ЛВР се изисква само да изрази как два критерия или алтернативи се сравняват помежду си), натоварването на задачата за оценка може да стане неразумно и досадно за този, който взема решение, когато се вземат предвид много критерии и алтернативи. Въпреки това, за да се облекчи натовареността на вземащия решение, някои двойни сравнения могат да бъдат напълно или частично автоматизирани. По-долу е предложен прост метод.

Нека j -тият критерий се изрази с атрибут, който приема стойности в интервала $[I_{j,min}, I_{j,max}]$, и нека инстанциите (екземплярите на атрибута под опциите за управление на i и h съответно.) на атрибута съответно под i -тата и h -тата опция за управление. Да приемем, че колкото по-голяма е стойността на атрибута, толкова по-добра е производителността на системата според j -тия критерий. Ако $I_j^{(i)} \geq I_j^{(h)}$ елементът $b_{ih}^{(j)}$ на $B^{(j)}$ може да се изчисли като:

$$b_{ih}^{(j)} = 8 \frac{I_j^{(i)} - I_j^{(h)}}{I_{j,min} - I_{j,max}} + 1 \quad (13)$$

Подобен израз е валиден, ако колкото по-малка е стойността на атрибута, толкова по-добра е производителността на системата според j -тия критерий. Ако $I_j^{(i)} \leq I_j^{(h)}$ елементът $b_{ih}^{(j)}$ на $B^{(j)}$ може да се изчисли като:

$$b_{ih}^{(j)} = 8 \frac{I_j^{(h)} - I_j^{(i)}}{I_{j,min} - I_{j,max}} + 1 \quad (14)$$

(13) и (14) са линейни функции на разликата $I_{ij} - I_{hj}$.

Избор на транспортни алтернативи. Модел за изпълнение на мултимодалната транспортна система чрез метод на теорията на многоатрибутната полезност

Използването на няколко вида транспорт в мултимодалния транспорт прави процесите на управление, товарене и складиране по-сложни. Като се има предвид големите обеми на транспортиране, грешките в организацията и управлението на тези процеси, те водят до значителни материални и финансови загуби.

Основен принцип на транспортната логистика е оптимизирането на разходите, който тук се реализира за сметка на икономии от мащаба на превозите на товари и дължината на маршрутите. Икономии от мащаба се свързват с това, че колкото е по-голям товара, толкова по-малки си транспортните разходи на единица. По същия начин по-мощните видове транспорт /жп и воден/ са по-евтини на единица товар. За икономии от мащаба съдейства преди всичко постоянната част на транспортните разходи, които не се влияят от размера на товарните пратки и в състава, на която се включват: разходите за управление и преди всичко свързаните с обработката на заявки за транспортиране; разходите за престой на транспортните средства;

разходи за оформяне на платежни документи; експлоатационните разходи и др. Икономите за сметка на дължината на маршрута се свързват с факта, че колкото е по-дълъг той, толкова по-малко транспортни разходи се падат на единица разстояние. Качеството на транспортното обслужване на материалните потоци в снабдяването, производството и разпределението е определящо за ефективното функциониране на логистичната система. От друга страна изборът на рационален вид транспорт и транспортни средства е определящ за ефективното функциониране на логистичната система. В този аспект мениджърите по логистика често се изправят пред редица предизвикателства, едно от които е транспортното решение, което е свързано с избора на превозвач, респективно на транспортно средство и сключване на превозен договор. Един нерационален избор в тази насока неминуемо рефлектира върху нивото на логистичните разходи, като ги завишава и върху нивото на обслужване на клиентите, като го занижава.[1, 5]

По правило за всеки мултимодален превоз, ЛВР може да предложи няколко алтернативи за доставка на товари, определени от различни маршрути или/и режими. Търсенето на най-доброто решение или намирането на набор от добри алтернативи за реализиране на мултимодален превоз трябва да се основава на набор от първоначални данни, като се вземат предвид логистичните принципи, и се извършва с помощта на съвременни математически методи. При решаването на този проблем трябва се вземат в предвид важни фактори като: сложната структура на мултимодалния транспорт, високата динамика и бързина на транспортните процеси, случайните фактори, влияещи върху тези процеси и географското разположение на участниците в транспорта.

Целта е да се предложи многокритериалния подход за оценка и избор алтернативите на превоз на товари. Счита се, че мултимодалната транспортна система е с ограничен брой от известни алтернативи, определени от маршрутите и видовете транспорт. Всяка алтернатива е представена от множество критерии. За да се открият решенията в мултимодалната транспортна система са посочени следните основни задачи:

- изграждане на математически модел на мултимодалната транспортна система;
- избор на набор от индекси, характеризиращи ефективността на мултимодалния транспорт и формирането на критерии за оптимизация на мултимодалната транспортна система на тяхна основа;
- разработване на метод за оценка и подбор на маршрути и начини за превоз на товари.

Мултимодалната транспортна система е класическа логистична система (LS). Съществуват много определения за система.

Система – множество на елементи намиращи се в отношения и връзки помежду си, образуващи цялост или органическо единство.

Система – това е пълен, цялостен набор от елементи (компоненти), взаимосвързани и взаимодействащи между себе си така, че да е възможно реализирането на функцията на системата. [3]

Мултимодалната транспортна логистичната система се разглежда като сложна система, състояща се от отделни взаимно свързани подсистеми, поради което трябва да бъде декомпозирана.

Декомпозицията е разделяне на системата на части, с последващо самостоятелно разглеждане на отделните части. [3]

При декомпозицията, всяко разчленяване образува свое ниво. Изходната система се разполага на нулевото ниво. След нейното разчленяване се получават подсистемите от първо ниво. Разчленяването на тези подсистеми води до появяването на подсистемите от второ ниво и т.н. Опростеното графично представяне на декомпозираната система се нарича нейна *йерархична структура*.

Невъзможността задачата, осигуряваща оптимално управление, да се реши директно и да се реализира с централизирано управление определя основния момент от декомпозирането на системата. Декомпозирането се състои в разделянето на задачата на подзадачи, такива че съвкупното им решаване да доведе до решение на изходната задача и съответното разпределение на подзадачите по нива и елементи (подсистеми). Основната идея за използването на методите на декомпозицията е да се реши изходната задача чрез решаване на няколко по-прости задачи.

Мултимодалната транспортна логистичната система се декомпозира на набор от *подсистеми*. На следващата стъпка подсистемите са представени като набор от *логистични функции*. Накрая, всяка логистична функция се представя като набор от *логистични операции*, които се характеризират със собствен набор от индекси.

Процесът на разчленяване, включва следните четири стъпки, показани на фигура 1:

- 1) логистичната система LS_j е разделена на набор от подсистеми

$$LT = \{LT_1, LT_2, \dots, LT_q\};$$

- 2) всяка подсистема LT_k е представена като набор от логистични процеси

$$LP = \{LP_1, LP_2, \dots, LP_z\};$$

- 3) всеки логистичен процес LP_m се представя набор от логистични функции

$$LF = \{LF_1, LF_2, \dots, LF_r\};$$

- 4) всяка функция LF_q е представена като набор от логистични операции

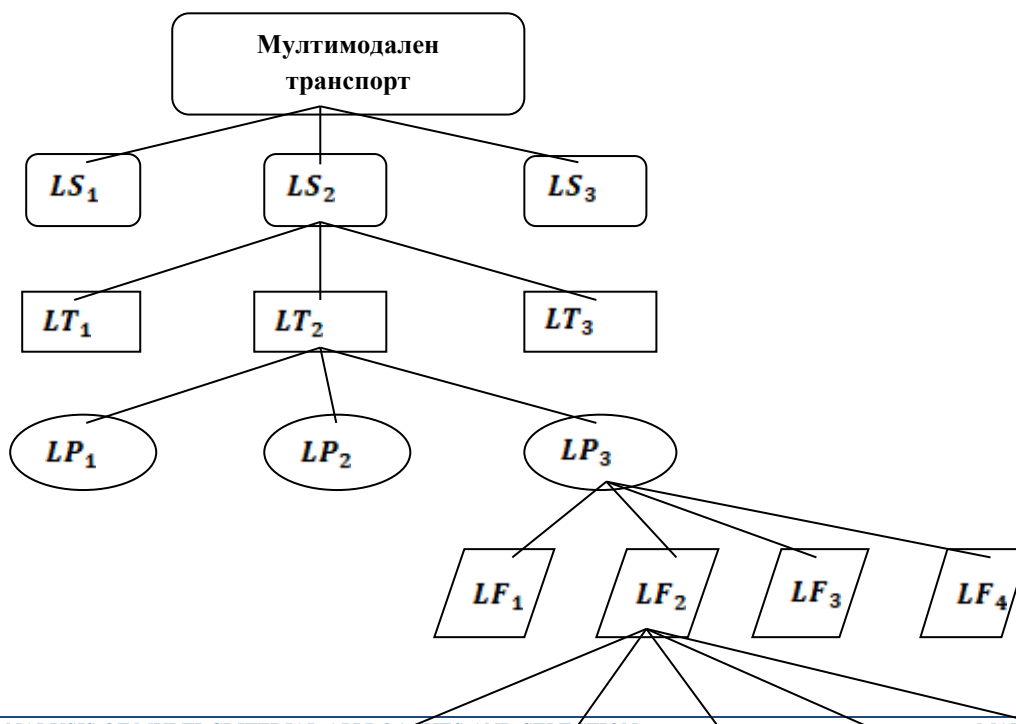
$$LO = \{LO_1, LO_2, \dots, LO_h\},$$

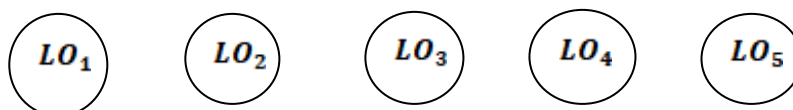
които се характеризират със собствени набори от индекси.

Така конструирана, системата позволява да се правят изчисления на ефективността на логистичната система LS , като се вземат предвид различни индекси - индекси на *разходите* и индекси на *времето*. Освен това тези изчисления се правят „отдолу-нагоре“ като се започне от долното ниво (ниво на LO) и завърши с горното ниво (ниво на LS).

И така, изчислителният процес може да се представи като веригата

$$\rightarrow LF \rightarrow LP \rightarrow LT \rightarrow LS \text{ (фиг.1).}$$





Фиг.1. Декомпозиция на мултимодална транспортна логистична система

Индексите на разходите на следващото ниво на йерархична система отдолу нагоре се изчислява чрез просто сумиране на съответните индекси от предходното ниво. Тогава индекс на разходите $E(LS_j)$ за логистичната система LS_j се изчислява по формулата:

$$\begin{aligned}
 E(LS_j) &= \sum_{LT_i \in LS_j} E(LT_i) = \sum_{LT_i \in LS_j} \sum_{LP_m \in LT_i} E(LP_m) \\
 &= \sum_{LT_i \in LS_j} \sum_{LP_m \in LT_i} \sum_{LF_h \in LP_m} E(LF_h) \\
 &= \sum_{LT_i \in LS_j} \sum_{LP_m \in LT_i} \sum_{LF_h \in LP_m} \sum_{LO_p \in LF_h} E(LO_p) \quad (15)
 \end{aligned}$$

където $E(S)$ е индекс на разходите за позиция S .

Монокритериалният подход предполага използването на един обобщен критерий за оптимизация и признава, че могат да бъдат използвани различни индекси (време за доставка, надеждност на доставката, безопасност на товара и т.н.), оценявани в един израз като стойност. Той позволява изграждането на обобщен критерий за общите разходи E_Σ , за реализиране на мултимодален транспорт, който обединява набор от локални критерии, сред които:

- директни разходи за превоз на товари, т.е. разходи за транспорт, претоварване и складиране, митнически операции, документация и др.;
- загуби, възникващи в резултат на забавяне в графика за доставка (включително неустойки за неизпълнение на условията за доставка и загубената и / или получената печалба);
- загуби от загуба на товари и влошаване на неговите потребителски свойства (частична или пълна повреда на товар, който намалява цената му);
- разходи за замразяване на капитал (те се определят като се вземат предвид разходите за превозени товари и време на доставка);
- загуби, свързани с колебанията на валутните курсове;
- разходи за допълнителна застраховка на товари;
- разходи за държане на запаси при нередовни доставки;
- загуби, свързани с въздействието върху околната среда от товарния транспорт.

В същото време даденият критерий може да бъде допълнен с нови компоненти, като се има предвид конкретната транспортна система.

Като цяло общите разходи $E_\Sigma(LS_j)$ за реализиране на мултимодален транспорт на логистичната система LS_j ще се изчислява по следната формула:

$$E_\Sigma(LS_j) = \sum_{i=1}^n E_i \quad (16)$$

където n е количество компоненти (артикули), които формират общите разходи за реализиране на мултимодалния транспорт; E_i е стойност на i -ти компонент на разходите за реализиране на мултимодалния транспорт (например, директни разходи за превоз на товари; загуби, възникващи в резултат на забавяне в графика за доставка и т.н.).

В този случай проблемът с търсенето на оптимална мултимодална система за превоз на товари LS_{opt} на основата на ограничения набор от възможни логистични системи LS има следния вид:

$$E_{\Sigma}(LS_{opt}) = \min_{LS_j \in LS} [E_{\Sigma}(LS_j)] \quad (17)$$

В редица случаи допълнително се въвеждат ограниченията за използваните ресурси (време, техника, средства и т.н.):

$$p_k(LS_j) \leq p_k^{max}, \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad \forall LS_j \in LS \quad (18)$$

където $p_k(LS_j)$ е стойността на k -ти индекс на логистичната система LS_j ; p_k^{max} е максималната възможна стойност за k -ти индекс за дадения мултимодален транспорт; m е количество индекси, чиито ограничения се налагат.

За фиксиран брой варианти на системите, определени от набор LS , изборът на оптималният вариант LS_{opt} по критерий (3) се състои от проверка на условията (4) и изчисляване на общия брой разходи за реализация на мултимодален транспорт за $\forall LS_j \in LS$.

Вторият подход разглежда многокритериален проблем на мултимодалния транспорт, когато се използва системата от q различни критерии $C_1(LS_j)$, $C_2(LS_j)$, ..., $C_q(LS_j)$. Тези критерии се измерват с различни физически величини.

Част от критериите се свеждат до минимум (например разходи и време), а част от тях е максимизирана (например безопасност на транспорта, безопасност на товара). В този случай имаме един вид векторна оптимизация:

$$C_l(LS_{opt}) \rightarrow \begin{matrix} extremum \\ LS_j \in LS \end{matrix}, \quad l = 1, 2, \dots, q; \quad LS_{opt} \in LS, \quad (19)$$

където екстремумът за отделни критерии отговаря на минимум а за други - на максимум.

В процеса на формиране на критерийната система се акцентира върху четири групи от критерии: разходи за доставка на товари, време за доставка, надеждност на превоза на товари и екологично въздействие (или въздействие върху околната среда от транспорта), представени в таблица 4.

Таблица 4

Име на групата	Критерии за оценка на превоз на товари	Критерии
разходи за доставка на товари	разходи за транспорт; разходи за обработка; сезонно колебание на тарифите, разходи за обработка на документацията; неустойки (липсващи условия за доставка);	
време за доставка	възможни допълнителни разходи по време на транспортиране; допълнителна застраховка (недостатъчна безопасност)	време за транспорт; време за преминаване на границата; време за митническо оформяне; колебание на скоростта по време на доставката
надеждност на товара при	превишаване на срока за доставка; безопасност на товара (загуба, повреда на товари); наличие на транспортни единици; безопасност (кражба, неоторизиран достъп до товари); надеждност на	транспортните средства
транспортиране екологично въздействие	емисии на CO ₂ ; емисии на вредни вещества; шум и вибрации; аварии и бедствия от екологична гледна точка	

За да се онагледят предлагания подход е разгледан мултимодален превоз на товари от Шанхай до Москва, като пет алтернативни маршрута. Предложените маршрути са следните:

• *Шанхай - Хамбург - Рига - Твер – Москва*

Този маршрут обхваща транспортирането на товари в контейнер от Шанхай до Хамбург чрез плавателен съд – „корабът майка”. След това контейнерът се претоварва на по-малък плавателен съд, чрез морски превози на къси разстояния в Балтийско море за доставка до пристанище в Рига. В Рига контейнерът се претоварва на камион и се доставя на митнически терминал в Твер. След митническо освобождаване контейнерът се доставя на склад в Москва за разтоварване;

• *Шанхай - Владивосток - жп терминал в Москва - Склад в Москва*

Товарът е в контейнер и се доставя от Шанхай до Владивосток с кораб, където се извършва митническо освобождаване. След което контейнерът се претоварва на железопътна платформа (вагон) и се доставя до железопътния терминал в Москва по Транссибирската жп магистрала. На терминала контейнерът се претоварва с камион и се доставя до склада на получателя;

• *Шанхай - Хамбург - Котка - Твер – Москва*

Този маршрут обхваща транспортирането на товари от Шанхай до Хамбург от плавателен съд – „корабът майка”. След което контейнерът се претоварва на по-малък плавателен съд чрез морски превози на къси разстояния в Балтийско море за доставка до пристанището в Котка (Естония). В Котка контейнерът се претоварва на камион и се доставя на митнически терминал в Твер. След митническо освобождаване контейнер се доставя на склад в Москва за разтоварване;

• *Шанхай - Хамбург - Клайпеда - Твер – Москва*

Този маршрут обхваща транспортирането на товари от Шанхай до Хамбург с плавателен съд – „корабът майка”. След това контейнерът се претоварва на по-малък плавателен съд чрез морски превози на къси разстояния в Балтийско море за доставка до пристанището в Клайпеда

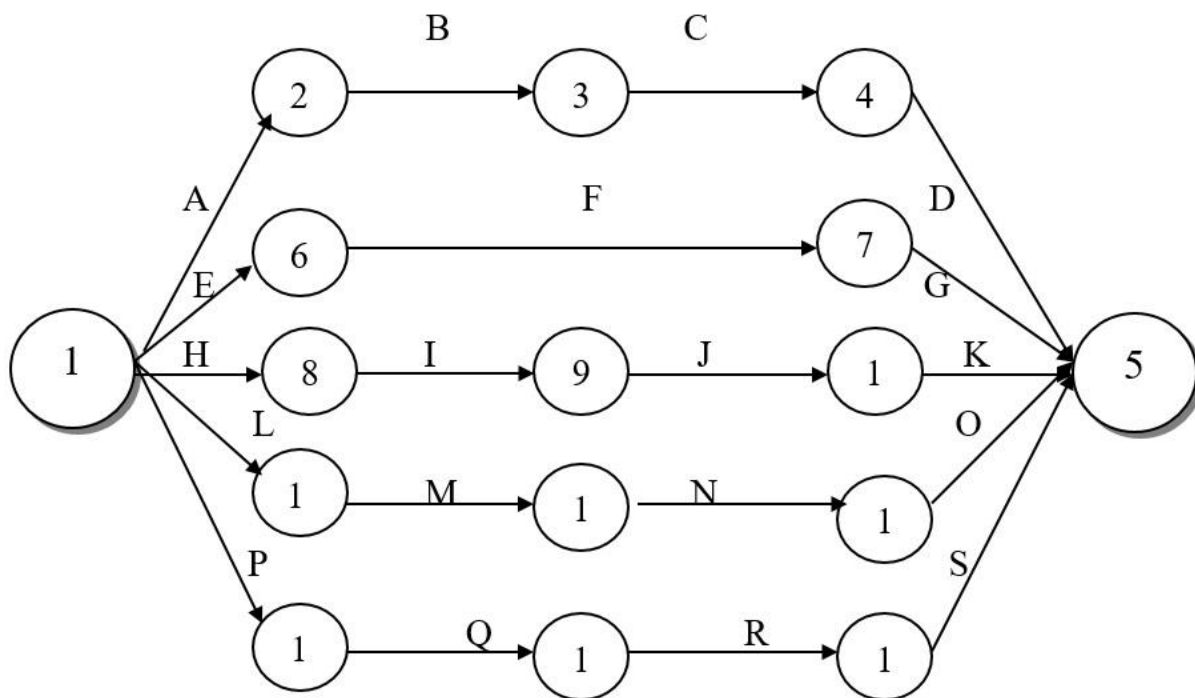
(Естония). В Клайпеда контейнерът се претоварва на камион и се доставя до митнически терминал в Твер. След митническо освобождаване контейнер се доставя на склад в Москва за разтоварване;

- *Шанхай - Алашанку - Достик – ж.п. терминал в Москва – Склад в Москва*

Товари в контейнер се доставят от Шанхай до Alashankou чрез морски превоз на къси разстояния. В Алашанку/Alashankou (граничен град в Китай, свързващ се с Казахстан) контейнерът се претоварва на железопътна платформа (вагон) и е доставен до граничния пункт Достик, Китай / Казахстан. В Достик контейнерът се претоварва на друга ж.п. платформа на казахстанските железници (промяна на междурелсието). По-нататък контейнерът се доставя на ж.п. терминал в Москва, където се извършва митническото освобождаване. След митническо освобождаване контейнерът се презарежда на камион и се доставя до склада на получателя.

Пристанищата представляват сложни транспортни възли, от които могат да бъдат организирани мултимодалните логистични потоци по транспортната мрежа, като се използват връзки чрез морски превози на къси разстояния, железопътни линии, автомобили и вътрешни водни пътища за свеждане до минимум на натоварването на пътната инфраструктура. Пристанищата трябва да функционират като дистрибуционни центрове, предлагащи услуги с добавена стойност по привличане и разпределение на товари. [2, 4]

Всъщност са разгледани пет логистични системи, представени от графиката на фигура 2. Ръбът на графиката съответства на логистична подсистема (или на етап на маршрута).



Фиг.2. Логистични системи

Описание на маршрутите LS_j , $j = 1, 2, \dots, 5$ е представено в таблица 5.

Подсистеми (етапи) на маршрутите		
LS_j	етап LT_K Описание на етапите	
LS_1	A	Превоз на товари в контейнер в корабът „майка” от Шанхай до Хамбург. Разтоварване на контейнер в пристанище Хамбург
	B	Товарене на контейнер в кораб, доставка от Хамбург до Рига, разтоварване на контейнер на пристанище Рига
	C	Товарене на контейнер в камион в пристанище Рига, доставка от Рига до митнически терминал в Твер. Митническо оформяне
	D	Доставка от митнически терминал до склад в Москва
	E	Превоз на товари в контейнер в кораб от Шанхай до Владивосток. Разтоварване на контейнер в пристанище Владивосток. Митническо оформяне
LS_2	F	Товарене на контейнер на железопътна платформа (вагон), доставка от Владивосток до железопътния терминал в Москва, разтоварване на контейнер в терминала
	G	Товарене на контейнер в камион, доставка от железопътния терминал до склада на получателя
	H	Превоз на товари в контейнер в корабът „майка” от Шанхай до Хамбург. Разтоварване на контейнер в пристанище Хамбург
LS_3	I	Товарене на контейнер в кораб, доставка от Хамбург до Котка, разтоварване на контейнер в пристанище Котка
	J	Товарене на контейнер в камион на пристанище Котка, доставка от Котка до митнически терминал в Твер. Митническо оформяне
	K	Доставка от митнически терминал до склад в Москва
	L	Превоз на товари в контейнер от Шанхай до Хамбург в корабът „майка”. Разтоварване на контейнер в пристанище Хамбург
LS_4	M	Товарене на контейнер в кораб, доставка от Хамбург до Клайпеда, разтоварване на контейнер в пристанище Клайпеда
	N	Товарене на контейнер на камион в пристанище Клайпеда, доставка от Клайпеда до митнически терминал в Твер. Митническо оформяне
	O	Доставка от митнически терминал до склад в Москва
	P	Превоз на товари в контейнер в кораб от Шанхай до Alashankou. Разтоварване на контейнер в пристанище Алашанку
	Q	Товарене на контейнер върху железопътна платформа в Alashankou. Железопътен транспорт Alashankou - Dostyk, разтоварване на контейнер на граничния терминал Dostyk
LS_5	R	Товарене на контейнер във вагон за друго междурелсие в Казахстан, доставка до железопътен терминал в Москва. Митническо оформяне
	S	Товарене на контейнер в камион, доставка от железопътния терминал до склада на получателя

Първият маршрут LS_1 (Шанхай - Хамбург - Рига - Алмати) е разглеждан с повече детайли. Той е представен от върхове 1-2-3-4-5 (или чрез ръбове А-В-С-Д) на графиката на фигура 2. Както се вижда, логистичната система LS_1 включва четири подсистеми (етапи на маршрутите):

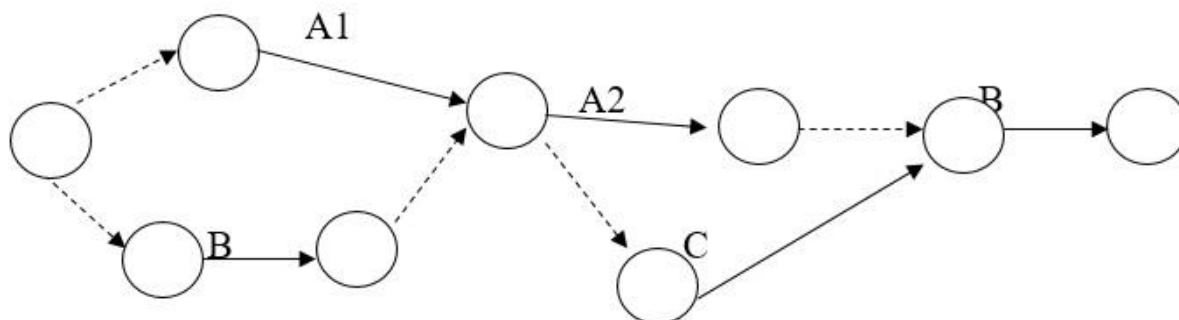
- етап А - превоз на товари от Шанхай до Хамбург, разтоварване на товара в пристанище Хамбург;

- етап В - товарене на контейнер върху плавателен съд, доставка от Хамбург до Рига, разтоварване на контейнер на пристанище в Рига;

- етап С - товарене на контейнер на камион в пристанище Рига, доставка от Рига до терминал Алмати;

- етап D - доставка от митнически терминал до склад в Москва.

Всяка подсистема (етап) се състои от един или няколко логистични процеса. Разгледан е подробно етап С, който се състои от три логистични процеса, показани на фигура 3: трансбордиране на контейнери, митническо освобождаване и транспорт.



Фиг. 3. Логистични процеси на подсистема С

Всеки ръб на фигура 3 съответства на един процес на етапа: А1 - митническо освобождаване на входящ контейнер; В - трансбордиране на контейнер, А2 - митническо освобождаване на изходящ контейнер, С - превоз на товари. Чрез пунктирани линии са дадени ръбовете, използвани за маркиране на „фиктивни процеси“ (изместване във времето; паралелно изпълнение на процесите и др.).

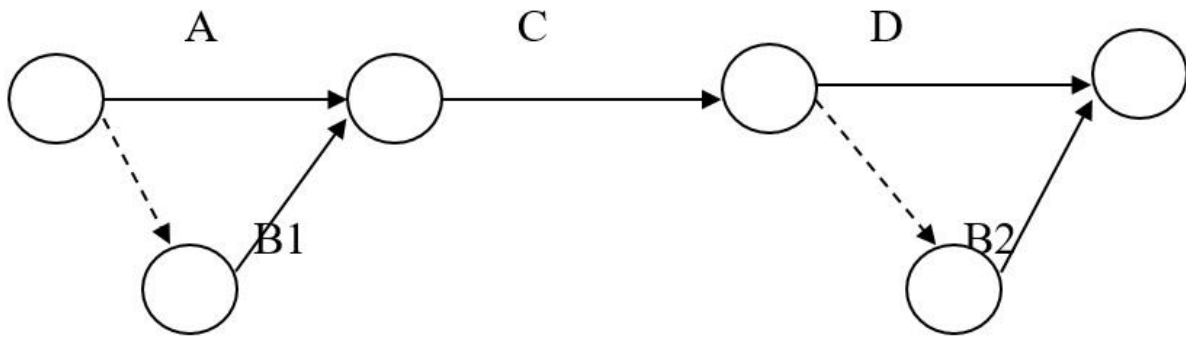
Извършена е декомпозиция на процесите в логистични функции, показан в пример за процес на прехвърляне на контейнери в пристанище Рига – разпределят се следните логистични функции в процес на трансбордиране:

- обработване на входящ контейнер;
- съхранение;
- обработване на изходящ контейнер;
- обработка на документи.

Схематично този процес е представен на фигура 4. Всеки ръб на графиката съответства на конкретна функция: А - обработка на входящия контейнер; В1 - обработка на документи за входящи контейнер, В2 - обработка на документи за изходящ контейнер, С - съхранение, D - обработка на изходящи контейнер.

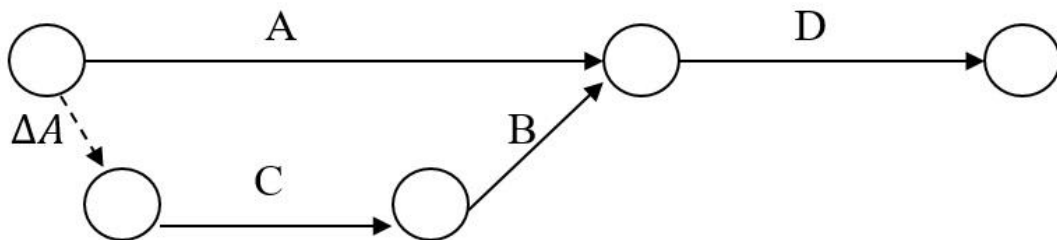
Разчленяването на функциите е показано в пример „Работа с изходящ контейнер“. Тази функция се състои от набор от следните логистични операции:

- получаване на номер на камион и изпращане на камиона за товарене;
- регистрация на зареждане в информационната система на терминала;
- генериране на код за натоварване;
- натоварване на контейнер.



Фиг. 4. Процес на прехвърляне на контейнери на пристанище в Рига

Схематично функция „Работа с изходящ контейнер“ е представена на фигура 5. Всеки ръб на графиката съответства на конкретната логистична операция: А - получаване на номер на камиона и изпращане камионът за товарене, В - регистрация на товарене в ИТ системата на терминала, С - генериране на код за натоварване, D - натоварване на контейнер.



Фиг. 5 . Логистична функция „Работа с изходящ контейнер“

Разчленението на всички елементи на логистичната система (маршрути) е изпълнено по подобен начин, което ще позволи да се определи цената на превоза на товарите, като се използва формулата (15) и ще се изчисли времето за транспортиране от връх 1 до връх 5 на фиг.2.

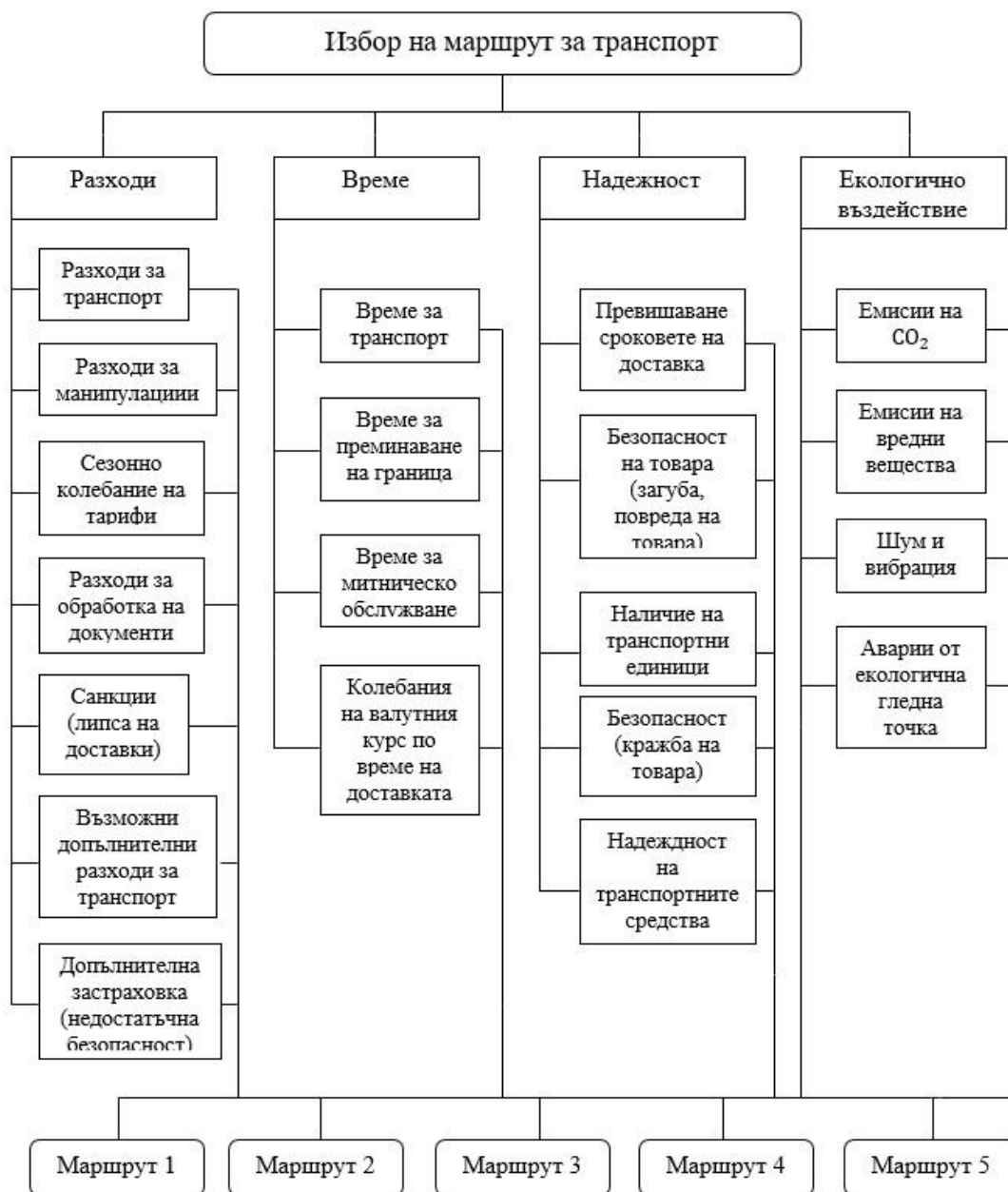
Резултати от изчисления на два основни индекса на ефективност на избраните маршрути на превоз на товари (транспортни разходи и време за доставка) са представени в таблица 6. Както е видно от таблицата, ЛВР не може да получи ясен отговор на въпроса какъв път да избере. От едната страна, 1-ви маршрут има най-ниската цена за превоз на товари, но срокът му за доставка е с 15 дни по-голям от този най-малко време. От друга страна, вторият маршрут, който има най-малко време за доставка, е по-скъп (цената е с 19% по-голяма). За избора на маршрут трябва да се избере приоритет между цена и време за доставка или да се приложи метод за вземане на решение с много критерии.

Таблица 6

Индекси на ефективност на логистичните системи

Маршрут LS_j	Транспортна цена, USD	Време за доставка, дни
1	6300	40
2	7500	25
3	6600	40
4	6800	42
5	9000	40

Методът АНР е избран за оценка на ефективността на алтернативите за превоз на товари от Шанхай до Москва, като се вземат предвид петте възможни маршрута. Създадената йерархична структура на критериите е показана на фигура 6.



Фиг.6. Йерархия на критериите за оценка на маршрутите

За да се извършат изчисленията на критериите, са използвани стандартни алгоритми на АНР метода с често използваната скала за двойно сравнение 1–9. Тази скала, предложена от Saaty има следните стойности:

- 1 - ако две алтернативи A1 и A2 са еднакви по значение;
- 3 - ако A1 е малко по-важно от A2;
- 5 - ако A1 е по-важно от A2;
- 7 - ако A1 е силно важно от A2;
- 9 - ако A1 е абсолютно по-важно от A2;

2, 4, 6 и 8 са междинни стойности между двете съседни решения.

Обобщените данни на двойните сравнения на критериите от първото ниво на йерархията за всяка група са представени в таблица 7.

Таблица 7

Матрица на сдвоени сравнения за критерии (първо ниво на йерархия)

Критерии	цена	време	надеждност	Екологично въздействие	Приоритетен вектор
Цена	1	4	5	6	0,581288
Време	1/4	1	2	5	0,220842
Надеждност	1/5	1/2	1	5	0,147686
Екологично въздействие	1/6	1/5	1/5	1	0,050185

Значението на критериите е очевидно от оценката на вектора на приоритетите на критериите. Лесно е да се забележи, че критериите „цена“ със стойност 0,5813 от приоритетен вектор са по-важни за многомодалния превоз на товари.

Изчислени са матриците за оценките на приоритетния вектор на предложените маршрути въз основа на оценката на критерия на приоритетния вектор на две нива на йерархията.

Таблица 8 дава пример за резултатите от двойни сравнения и нормализирана оценка на критерия „Разходи за транспорт“, а Таблица 9 представя пример за изчисляване на приоритетите на критериите от второ ниво „Разходи“.

Подобни изчисления са направени за критериите за второ ниво - време, надеждност и екологично въздействие.

Таблица 8

Матрица на сдвоените сравнения и резултати от нормализирана оценка на критерия „Разходи за транспорт“

	Маршрут 1	Маршрут 2	Маршрут 3	Маршрут 4	Маршрут 5	Приоритетен вектор
Маршрут 1	1	4	2	2	6	0,388889
Маршрут 2	1/4	1	1/3	1/3	4	0,100583
Маршрут 3	1/2	3	1	1	5	0,233552
Маршрут 4	1/2	3	1	1	5	0,233552
Маршрут 5	1/6	1/4	1/5	1/5	1	0,043424
общо	2,4167	11,2500	4,5333	4,5333	21,0000	1,000000

Таблица 9

Матрица на оценките на вектора на приоритетите на критериите на групата „Разходи“

Алтернативи	критерии							Приоритети в групата "Разходи"
	Разходи за транспорт	Разходи за обработка	Разходи за обработка на документи	Сезонно колебание на тарифите	Възможни допълнителни разходи по време на транспорт	Допълнителна застраховка (недостатъчна безопасност)	Санкции (липсващи условия за доставка)	

	Числова стойност на приоритетния вектор							
	0,435534	0,104360	0,024950	0,085610	0,077539	0,064833	0,207172	
Маршрут 1	0,388889	0,346426	0,339458	0,285322	0,219304	0,083582	0,152554	0,292452
Маршрут 2	0,100583	0,062969	0,068448	0,081937	0,052682	0,399699	0,488307	0,190261
Маршрут 3	0,233552	0,206030	0,206514	0,285322	0,456028	0,083582	0,161589	0,227056
Маршрут 4	0,233552	0,346426	0,339458	0,285322	0,219304	0,083582	0,152554	0,224798
Маршрут 5	0,043425	0,038150	0,046121	0,062097	0,052682	0,349586	0,044995	0,065433

Оценките на вектора на глобалните приоритети за алтернативи са показани в таблица 10. Резултатите от оценките показват, че маршрут 2 има най-високата стойност на приоритет 0,291997 и ще бъде избран за превоз на товари от Шанхай до Москва.

Таблица 10

Оценен резултат за превоз на товари от Шанхай до Москва

Алтернативи	критерии				Глобални приоритети
	разходи	време	надеждност	екологично въздействие	
	Числова стойност на приоритетния вектор				
	0,581288	0,220842	0,147686	0,050185	
Маршрут 1	0,290658	0,079618	0,125299	0,063250	0,208218
Маршрут 2	0,194134	0,487666	0,371898	0,329346	0,291997
Маршрут 3	0,226390	0,121666	0,108371	0,074537	0,178212
Маршрут 4	0,223518	0,068267	0,135682	0,067550	0,168433
Маршрут 5	0,065299	0,242783	0,258749	0,465317	0,153140

Конструираният модел на мултимодална транспортна система позволява изчисляване на общите разходи за превоз на товари и общото време за доставка над разглежданите маршрути. Получените резултати позволяват да се избере най-благоприятен маршрут, за който критерият за ефективност на системата има оптимална стойност.

АНР е най-подходящия метод за сравнителна оценка на различни алтернативи от превоза на товари. Той е най-ефективният за избор на оптимална логистична система. Методът позволява да се подредят алтернативите на транспортирането в реда на тяхната ефективност и показващи разликата им в дадения набор от критерии.

References:

1. Plamen Dyankov, Teoretichen model na organizatsiyata i upravlenieto na transportni logistichni sistemi, Universitetsko izdatelstvo "Episkop Konstantin Preslavski", 2017 g., ISBN 978-619-201-166-6, s.7-9
2. Bogdanov A., The Shortest Path Problem in Logistics, Scientific and Applied Research International Journal vol. 11, 2017, ISSN 1314-6289 pp 68-72

3. K. Davidov, T. Panayotova, P. Dyankov "Sistemniyat podhod pri proektiraneto na logistichni sistemi", UI „Ep. K. Preslavski“, ISBN 978-619-201-160-4, 2017
4. Plamen Dyankov, Anton Antonov. Multimodalni prevozi i nasoki za razvitiето im v Bulgaria. "International scientific conference 2015", Fakultet po „A, PVO i KIS” – gr. Shumen, 2015 ISSN 2367-7902, str. 160 – 164
5. Plamen Dyankov, Anton Antonov. Metod za otsenka na efektivnostta na „ro-la „, prevozi. MATTEX 2012, Volume 2, ISSN: 1314-3921, str. 332 – 334
6. Anton Antonov, Logistichni metodi i transportna shema v prerabotkata na bio-razgradimi odpadatsi, Third international scientific conference science, education, innovation, Shumen, Bulgaria 21 - 23 MAY 2014. Vol. 2, 2014, ISBN 978-954-577-969-5, стр. 254 - 284
7. Lukinsky, V. (2008). Models and methods of the theory of logistic: the Manual. St. Petersburg: Piter.(In Russian)
8. Lukinsky, V. (2008). *Models and methods of the theory of logistic: the Manual*. St. Petersburg: Piter.
9. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.
10. Mu, E. and Pereyra-Rojas, M. (2017), "Practical Decision-Making using Super Decisions v3: An Introduction to the Analytic Hierarchy Process" Springer