

# Abstracts of Dissertations

Institute of Information and  
Communication Technologies

BULGARIAN ACADEMY OF  
SCIENCES



2 / 2017



**SYNTHESIS OF  
ALGORITHMS FOR  
OPTIMAL CONTROL OF  
A TRANSPORT SYSTEM**

*Kristina Pavlova*

**СИНТЕЗ НА АЛГОРИТМИ ЗА  
ОПТИМАЛНО УПРАВЛЕНИЕ  
НА ТРАНСПОРТНА  
СИСТЕМА**

*Кристина Павлова*

# Автореферати на дисертации

Институт по информационни и  
комуникационни технологии

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ISSN: 1314-6351

Поредицата „Авториферати на дисертации на Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките“ представя в електронен формат авториферати на дисертации за получаване на научната степен „Доктор на науките“ или на образователната и научната степен „Доктор“, защитени в Института по информационни и комуникационни технологии при Българската академия на науките. Представените трудове отразяват нови научни и научно-приложни приноси в редица области на информационните и комуникационните технологии като Компютърни мрежи и архитектури, Паралелни алгоритми, Научни пресмятания, Лингвистично моделиране, Математически методи за обработка на сензорна информация, Информационни технологии в сигурността, Технологии за управление и обработка на знания, Грид-технологии и приложения, Оптимизация и вземане на решения, Обработка на сигнали и разпознаване на образи, Интелигентни системи, Информационни процеси и системи, Вградени интелигентни технологии, Йерархични системи, Комуникационни системи и услуги и др.

#### Редактори

*Генадий Агре*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [agre@iinf.bas.bg](mailto:agre@iinf.bas.bg)

*Райна Георгиева*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [rayna@parallel.bas.bg](mailto:rayna@parallel.bas.bg)

*Даниела Борисова*

Институт по информационни и комуникационни технологии, Българска академия на науките  
E-mail: [dborissova@iit.bas.bg](mailto:dborissova@iit.bas.bg)

*Настоящото издание е обект на авторско право. Всички права са запазени при превод, разпечатване, използване на илюстрации, цитирания, разпространение, възпроизвеждане на микрофилми или по други начини, както и съхранение в бази от данни на всички или част от материалите в настоящето издание. Копирането на изданието или на част от съдържанието му е разрешено само със съгласието на авторите и/или редакторите*

*The series **Abstracts of Dissertations of the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences** presents in an electronic format the abstracts of Doctor of Sciences and PhD dissertations defended in the Institute of Information and Communication Technologies at the Bulgarian Academy of Sciences. The studies provide new original results in such areas of Information and Communication Technologies as Computer Networks and Architectures, Parallel Algorithms, Scientific Computations, Linguistic Modelling, Mathematical Methods for Sensor Data Processing, Information Technologies for Security, Technologies for Knowledge management and processing, Grid Technologies and Applications, Optimization and Decision Making, Signal Processing and Pattern Recognition, Information Processing and Systems, Intelligent Systems, Embedded Intelligent Technologies, Hierarchical Systems, Communication Systems and Services, etc.*

#### Editors

*Gennady Agre*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [agre@iinf.bas.bg](mailto:agre@iinf.bas.bg)

*Rayna Georgieva*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [rayna@parallel.bas.bg](mailto:rayna@parallel.bas.bg)

*Daniela Borissova*

Institute of Information and Communication Technologies, Bulgarian Academy of Sciences  
E-mail: [dborissova@iit.bas.bg](mailto:dborissova@iit.bas.bg)

*This work is subjected to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the materials is concerned, specifically the rights of translation, reprinting, re-use of illustrations, recitation, broadcasting, reproduction on microfilms or in other ways, and storage in data banks. Duplication of this work or part thereof is only permitted under the provisions of the authors and/or editor.*



BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

## Abstract of PhD Thesis

### SYNTHESIS OF ALGORITHMS FOR OPTIMAL CONTROL OF A TRANSPORT SYSTEM

*Kristina Pavlova*

**Supervisor:** Prof. Todor Stoilov

**Approved by Supervising Committee:**

Acad. Vassil Sgurev

Acad. Ivan Popchev

Prof. Todor Stoilov

Prof. Soyant Stoyanov

Assoc. Prof. Daniela Borissova



INSTITUTE OF INFORMATION AND  
COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Department of Hierarchical Systems

**Key words:** *bi-level optimization, rail transportation, max flow problem, network design*

## **1. Introduction**

The public rail transportation is an important player for the development of Intelligent Transportation Systems. The rail transportation is giving advantages due to its benefits, concerning efficiency in exploitation, improving logistics services, reducing the pollution. This dissertation tries to give priority to rail transport in comparison with the bus transport in relation with the project with the Ministry of Transport in Bulgaria and project on a Program for career development of young scientists, funded by Bulgarian Academy of Sciences. The problems, which are defined and solved, are using data coming from the current practice in Bulgaria, related with the passenger transportation both by rail and buses. Due to the lack of full set of data about the intensity of the passenger transport, this research applies only available information from the schedules of buses and rail transport. To give priority to the rail transport is an important National policy for managing and implementation of intelligent transportation systems.

A trivial approach for increase of rail transport is to consider and to provide bus transportation only on places where rail transportation is missing. But capacity restrictions of the rail system, cross connections between bus and rail transportation routes, common stops for bus and rail in towns provide competitions between the rail and bus transportation services. In such competition environment a special management policy is needed to give preferences and to increase the exploitation of the rail transport.

## **2. Objectives and tasks of the dissertation**

The aim of the dissertation is to develop a formal model and algorithms for its application in solving a research task for intensifying the railway passenger transport by an example of a section of the Republican Transport Scheme;

The subject of the survey is an integrated transport system including passenger transport by rail and bus transport.

A two-hierarchy model for the optimization of rail passenger transport is used. A management algorithm is created that uses prediction coordination, the task from the top level is to find a maximum flow, and the task at the bottom level is to find the lowest cost flow distribution.

To develop a bi-level model, to define a two-hierarchical optimization task, to formalize to a task for management of railway passenger transport for their intensification in the dissertation the following tasks are solved:

- developing a hierarchical model for managing an integrated transport system. The model should give priority to rail passenger transport compared to bus transport;
- the hierarchical model should take advantage of the hierarchical approach by applying a research approach to compose the hierarchical model through interrelated optimization tasks;
- developing an algorithm for quantification of parameters of the hierarchical task of management under conditions of limited baseline data for passenger traffic;

- defining and solving the hierarchical optimization task and evaluating the decisions taken;
- application of the hierarchical management model to a practical engineering task.

### **3. Methodology of the study**

The development of the mathematical model and algorithm for management and intensification of passenger rail transport for the Republican Transport Scheme is carried out in the following order:

- Establishment of a graphical structure for passenger transport on the Sofia-Varna section (GO);
- Definition and determination of quantitative parameters determining the capacity and potential for passenger transport under the Republican Transport Scheme.
- Develop a quantitative method for assessing the potential of passenger transport
- Implementation of a classical optimization task for finding the maximum flow for the transport system from Sofia to Varna.
- Modification of the classical optimization task to determine the maximum flow through expert changes in the optimization task
- Apply a two-hierarchical method for determining the maximum flow and priority flow distribution for the railway.

This dissertation tries to formalize the problem for increasing the priority of the rail transport. The formal description of this problem is to provide an optimal allocation of the rail transportation services over predefined transportation network, taking advantage from the bus transport. An optimization problem is defined, which generates a solution increasing the rail transport. The optimization problem is defined in a bi-level form. The upper optimization problem evaluates the maximal flow which can pass between two predefined points of the transportation network. In the network the maximal flow is implemented both by bus and rail transport according to the available capacities of the transportation links.

On the lower level the optimization problem gives preferences to the rail transport in comparison with the bus one. This priority is defined, applying low cost flow distribution on rail links. Thus, by minimization of the total costs of flow distribution the optimal solution will provide intensive utilization of rail links for the flow distribution which will increase the rail utilization. This low level solution giving flow per link will give new values for the link capacities for the upper level problem. Thus, the two optimization problems are interconnected in bi-level optimization one. The later will give optimal solutions both by maximization of the transport flow between two predefined important nodes of the transportation network and redistribution of the maximal flow to links, supported by rail. Thus, predominant part of the passenger transport will be implemented by rail transport.

The dissertation makes an illustration of definition and solution of a transportation problem by bi-level optimization. The hierarchical order is applied for two optimization problems. The dissertation does not contain development of new algorithms for solution of bi-level problems, but it contributes for the increase of the application area of this more complex and advanced optimization formalism.

### **4. Graph presentation of the transport network between Sofia and Varna in Bulgaria**

The transport network was estimated for the real case between two important towns in Bulgaria: Sofia and Varna. The input data for the rail transportation from Sofia to Varna was taken from the real operating schedule, presented on-line in [www.bdz.bg](http://www.bdz.bg).

Following the rail schedule it has been identified 17 stops, which define the network structure with 17 nodes. The actual lines for bus transportation were taken from the Ministry of Transport, which issues the licenses for bus transportation, publicly available in <http://rta.government.bg/index.php?page=scategories&scategory=otrts>.

All bus lines, which cross the rail lines of the direction Sofia – Varna are included in the transportation network. The upper lines of the network correspond to the links of rail transportation. The others are undertaken by the bus transport, fig.2.3.

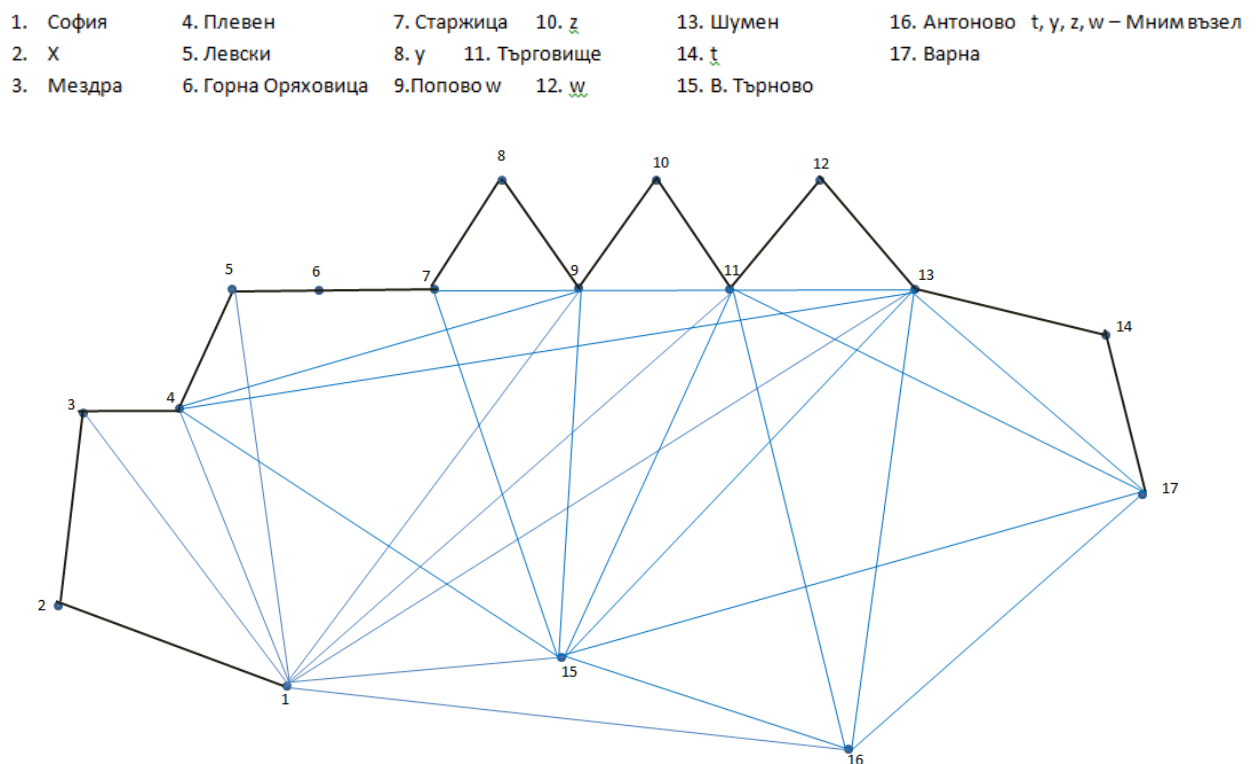


Fig.2.3. Topology of the transportation network between Sofia and Varna

The transport capacities of each link must be estimated. Because data for the passenger flows are not available, an alternative way for evaluation of the flow capacities of the links is suggested for this research. It has been taking into consideration the duration of the transportation per different links of the network. The customers prefer their travel to be faster. Thus, the smaller time for traveling between couple of nodes gives more preferences for traveling on this direction by the customers. Additionally, the long travel time is a metric for low capacity for transportation per corresponding link. Thus, the transport capacities per link in the network are strongly related with the travel time per this link. For the current case, it has been chosen simple relation between the travel time  $t_{ij}$  per link and the flow capacity  $v_{ij}$ :



$$(2.1) \quad v_{ij} = 1/t_{ij} \quad i, j \in N$$

Relation (2.1) can be complicated with additional considerations, for example costs of travel. To simplify the numerical evaluations, this research applies relation (2.1). The numerical evaluations use the schedule of the trains, fig.2.5.

| Train information    |            |           |
|----------------------|------------|-----------|
| Train                | Date       | Comment   |
| 2601                 | 03/05/2017 |           |
| Station/Stop         | Arrival    | Departure |
| SOFIA                | --         | 07:00     |
| MEZDRA               | 08:26      | 08:27     |
| CHERVEN BRJAG        | 09:04      | 09:05     |
| PLEVEN               | 09:43      | 09:44     |
| LEVSKI               | 10:15      | 10:16     |
| PAVLIKENI            | 10:30      | 10:31     |
| GORNA ORJAHOVICA     | 10:57      | 11:05     |
| POPOVO               | 11:52      | 11:53     |
| TARGOVISHTE          | 12:22      | 12:23     |
| SHUMEN               | 12:54      | 12:55     |
| SINDEL-RAZPREDELITEL | 13:53      | 13:54     |
| POVELJANOVO          | 14:02      | 14:03     |
| VARNA                | 14:25      | --        |
| Coaches              |            |           |
|                      |            |           |

Copyright ©2005-2015 IST "BDZ Passenger services" EOOD. All rights reserved.

Fig.2.5. Schedule of trains Sofia – Varna

The travel duration for the first two nodes in fig. 2.5 - the link Sofia- Mezdra, is 1 hour and 26 minutes (86 minutes, from 7:00 till 8:26). Using (2.1) the link capacity for transportation between these two nodes of the network is:  $1/86 = 0.011$  relative capacity units. Five trains support this destination, the capacity for transportation on daily basis is:  $5 \text{ trains} \times 0.011 = 0.055$  relative capacity units. This evaluation considers that the total capacity value is a sum of the individual capacities, performed by the different trains, according to their schedule.

The evaluation of the link capacities supported by bus transportation uses data given by their time schedules. These data are public available and they are presented as EXCEL files.

These average values were obtained considering 55 bus lines and schedules between nodes, corresponding to common stops both with rail and bus transportations. The final estimation of the transport network and the capacities per link are presented graphically on fig.2.11.[5,6]

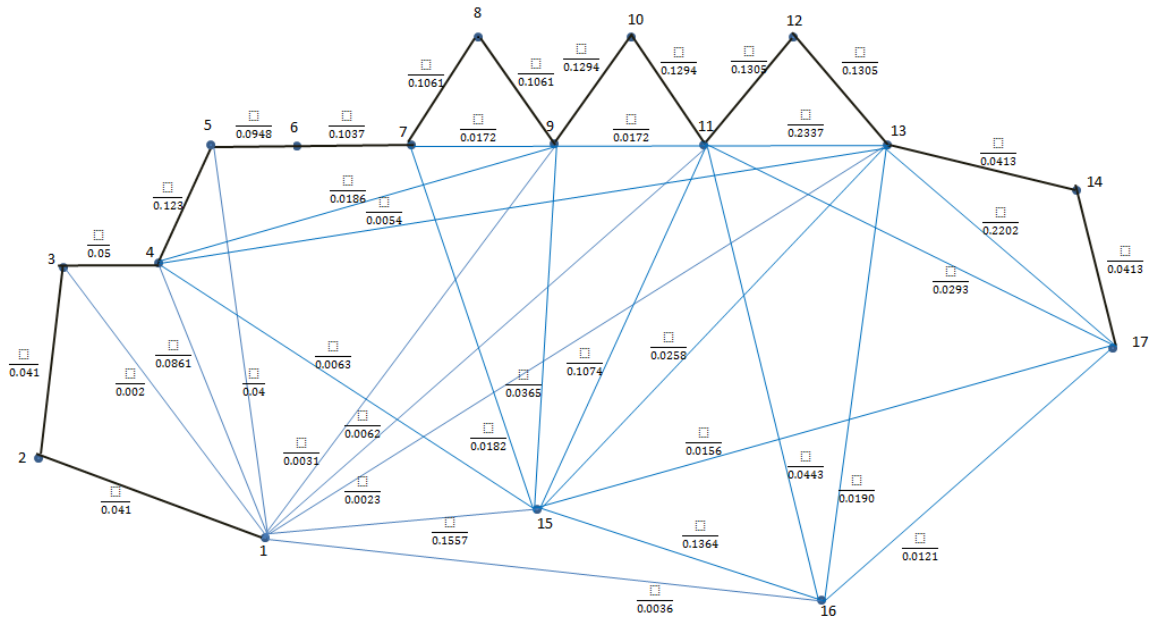


Fig.2.11 Estimated link capacities

## 5. Algorithm for data preparation and definition of hierarchical optimization model

The idea for the bi-level definition of the problem about increase the rail utilization can be regarded as controversial problem or problem of synthesis, in comparison with the problem of analysis for evaluation of the maximal flow in a network.

The “maximal flow” problem can be assumed as a problem for analysis of a network system. The optimization problem can be defined in the form: a topology of a network with capacity values on the links of the network is given. How much is the maximal amount of the flow between two nodes, which can be passed through the network.

The analytical definition of the maximal flow problem is presented in the form

$$(3.1a) \quad \max_{f_{ij}} [f_{st}]$$

$$(3.1b) \quad \sum_{j \in A(i)} f_{ij} - \sum_{j \in B(i)} f_{ji} = \begin{cases} 0, & i \neq s, t \\ f_{st}^*, & i = s \\ -f_{st}^*, & i = t \end{cases}$$

$$(3.1c) \quad f_{ij} \leq v_{ij}, \quad (\forall i, j) \in N$$

where  $i, j$  denotes the number of nodes in a network with  $N$  nodes;

$A(i) = \{j \in N\}$  a set of nodes  $i$ , which origine incomming links to node  $j$ ;

$B(i) = \{j \in N\}$  a set of nodes  $i$ , which are connected with the outgoing links from node  $j$ ;

$s$  and  $t$  denote the source node and sink node;

$v_{ij}$  are the capacities of the links between node  $i$  and  $j$ ,  $(i, j) \in N$ ;



$f_{ij}$  are the unknown volumes of flows which have to be evaluated as components of the maximal flow in the network.

Relation (3.1b) describes the continuity nature of the flows which enter and outgo to/from a node. Relation (3.1c) insists the flows on a link to respect the link capacity, which is predefined and constrained. The goal function (3.1a) describes the requirement for maximization of the flow  $f_{st}$  which starts from the initial node  $s$  and enter to the final one  $t$ .

The solution of problem (3.1) gives a value  $f_{st}$  of the maximal flow, which can be transmitted between  $s$  and  $t$  trough the network. Additionally, the values of  $f_{ij}$  define the paths which the components of the maximal flow uses through the network.

Hence, for given capacity on the network links, the maximal flow problem (3.1) gives the amount of flow, which can pass through the predefined network topology.

Another corresponding optimization problem, defined as a problem for synthesis, provides minimization of the costs for flow distribution in the network for transportation of predefined value of traffic. Having optimal flow distribution, the corresponding values of the flow components  $f_{ij}$ ,  $i, j=1, \dots, N$  can be used for evaluation of the minimal capacity  $v_{ij}$  of each link  $i, j$  or  $v_{ij} = f_{ij}$   $i, j=1, \dots, N$ . The analytical form of the minimal cost distribution problem in linear form can be written as:

(3.2a)

$$\min_{x_{ij}} \sum_{ij \in A} c_{ij} f_{ij}$$

(3.2b)

$$\sum_{j \in A(j)} f_{ij} - \sum_{j \in B(j)} f_{ji} = \begin{cases} 0, & i \neq s, t \\ f_{st}^*, & i = s \\ -f_{st}^*, & i = t \end{cases}$$

(3.2c)

$$a_{ij} \leq f_{ij} \leq b_{ij}, \quad \forall i, j \in N$$

where  $f_{ij}$  are the values of the flows of the links between nodes  $i$  and  $j$ ;

$c_{ij}$  are the cost for transportation a unit flow between nodes  $i$  and  $j$ ;

$a_{ij}$  and  $b_{ij}$  are the lower and upper boundaries of the flow between nodes  $i$  and  $j$ ;

$f_{st}$  is the flow, which has to be transmitted from node  $s$  to  $t$  by minimizing the transportation costs (3.2a).

Relations (3.2b) correspond to the equations for flow conservation. The solution of (3.2) gives optimal flow distribution  $f_{ij}$ . The values of  $f_{ij}$  define the minimal capacities  $v_{ij}$  of the

links by means to provide the cheapest flow distribution. A verification of problem (3.2) related to the design of network topology is introduced by [2].

This dissertation makes an integration of the both optimization problems (3.1) and (3.2). Problem (3.1) defines the maximal flow and the links used for its transportation, respecting the given set of links' capacities  $v_{ij}$ . Problem (3.2) will give an optimal flow distribution  $f_{ij}$ , giving priority to the rail transportation. This flow distribution defines the minimal link capacities  $v_{ij} = f_{ij}$  of the network. The integration of (3.1) and (3.2) makes a synthesis for a network topology, where the value of flow between two nodes  $s,t$  is maximal and the components of the maximal flow predominantly passes through links, supported by rail. The integration of these two problems is performed by applying bi-level optimization model.

The graphical presentation of the integration of (3.1) and (3.2) by bi-level optimization problem is presented in fig. 3.2. The bi-level problem simultaneously makes maximization of flows between two predefined nodes of the network and performs priority flow distribution through links, supported by rail transport. The priority to rail transport is implemented by making minimal cost flow distribution where the costs for rail transport are lower in comparison with the costs for bus transportation. The low cost flow distribution is used for estimation the link capacities in the transportation network.

The solution of the upper level problem will evaluate the maximal flow  $f_{st}$  between nodes  $s$  and  $t$ . The value  $f_{st}$  will be used as a parameter in the constraints in problem (3.2). On its turn the lower level problem (3.2) will evaluate the flow distribution  $f_{ij} = v_{ij}$ , which on its turn will change the constraints of problem (3.1). As a result, the bi-level problem will give optimal solution both for the maximal flow  $f_{st}$  and the flow distribution  $f_{ij}$  with priority to rail transportation in the network. The bi-level formalization will provide maximization of the flow  $f_{st}$  and will minimize the cost for link flows.

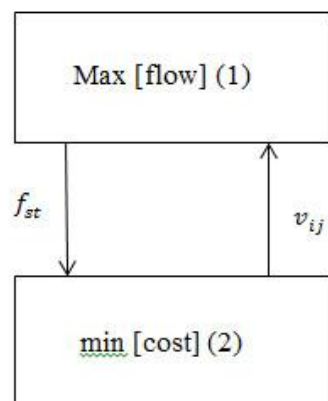


Fig.3.2 Integration of optimization problems in bi-level optimization one

To identify peculiarities of the bi-level optimization model the next paragraph makes short overview of the current applications of the bi-level and multilevel hierarchical optimization.

### 6. Definition of the upper level optimization problem

The analytical form of the maximal flow problem is (3.1). Following the network topology and the estimated parameters from fig.2.11, the analytical form of the “max-flow problem” is defined as a linear optimization problem. For each *node*  $i=2,\dots,16$  of the network on fig. 2.11 equilibrium relations for the flow continuity are defined. For nodes 1 (*s*) and 17(*t*) the equilibrium equations contain the values of maximal flow  $f_{st}$ , which is unknown value.

*Example for equilibrium relation for node 5:*

$$f_{4,5}+f_{1,5} - f_{5,6} = 0, f_{ij}$$
 is the flow between nodes *i* and *j*.

*Equilibrium relation for the source node s=1:*

$$f_{1,2}+ f_{1,3}+f_{1,4}+f_{1,5} + f_{1,9}+ f_{1,11}+f_{1,13} + f_{1,15}+f_{1,16} -f_{st}= 0.$$

*Equilibrium relation for the destination node t= 17*

$$f_{14,17}+ f_{13,17}+f_{11,17} + f_{15,17}+ f_{16,17} -f_{st}= 0.$$

The flows have to respect constraints for the capacities of the links:

$$f_{i,j} \leq v_{i,j}, i,j=1,\dots,N.$$

The goal function of the max-flow problem is maximization of the value  $f_{st}$ ,

3.4

$$\max_{f_{st}, f_{ij}, j=1,N} (f_{st})$$

The optimization problem has 44 variables and 61 constraints which contain 17 constraints for flow equilibrium for each of the 17 nodes and 44 upper bounds constraints. The problem has been solved, applying a MATLAB function *graphmaxflow()*. The solution of the optimization problem is presented graphically on fig. 3.2.

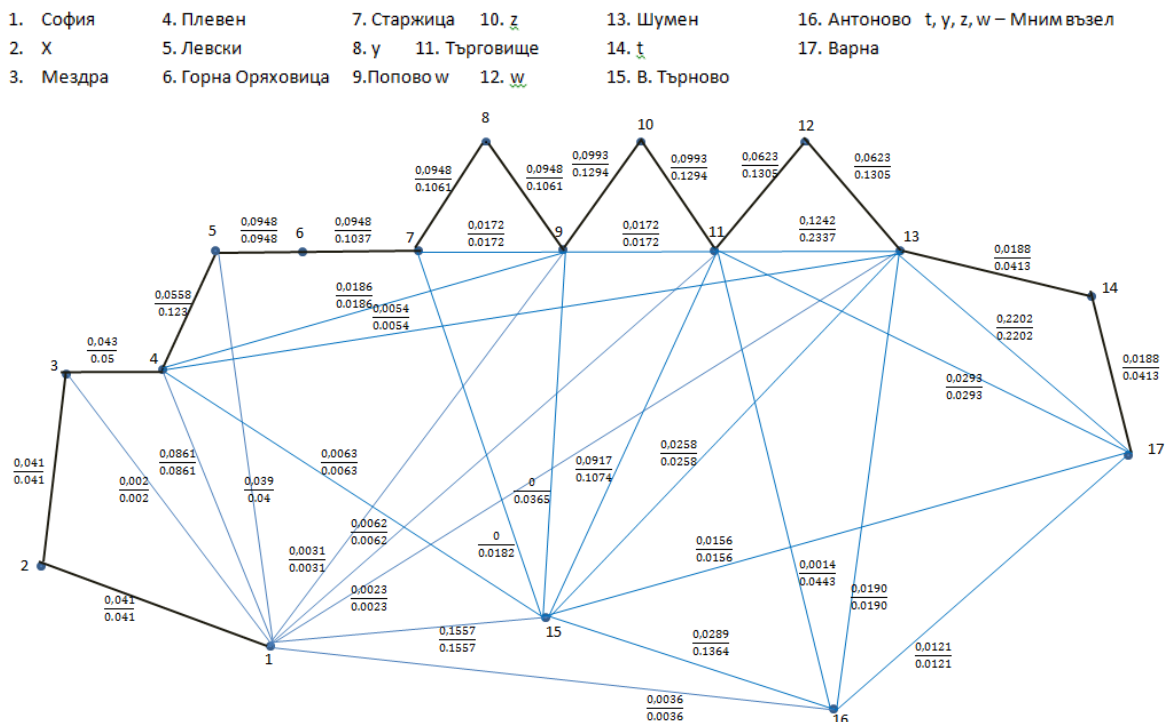


Fig.3.5 Graphical presentation of “max-flow” problem solution

To each link of the transport network a fraction numbers is given. The numerator presents the value of flow, which is a part of the max-flow, passing through this link. The denominator is the capacity of the link:

$$\frac{\text{numerator}}{\text{denominator}} = \frac{\text{component of max flow}}{\text{capacity of link}}$$

The solution of problem (3.1) gives value of the maximal flow which can be transmitted from node 1 to node 17 (from Sofia to Varna). The value of this flow is 0, 2485 relative flow units. Making comparisons for each link it can be identified, that the capacities of links between nodes 1-2, 2-3, supported by the rail are totally used by the components of the max flow. Hence, additional traffic between nodes 1 and 17 is not possible to be allocated. Respectively, this result proves decisions for the rail authorities to increase the capacities of rail transportation per these directions. This can be done by increasing the frequency of schedules for trains for these directions.

From Fig.3.5 it is evident that a set of links supported by rail transportation are not used on their full capacities. This gives potential to redistribute the traffic flows by means to increase the rail utilization and to decrease the bus transport. Such policy can be implemented by definition and solution of additional optimization problem. The last will evaluate the cheapest flow distribution, taking into account the cost for rails lower than the cost for bus transportation. The flow distribution has to preserve capacity restrictions, defined in fig.2.11.

The optimization problem, which has to be solved, has the form (3.2). The particular case is that this problem has to respect the value of the maximal flow, which is estimated by the solution of problem (3.1). The requirement for low cost distribution on rail links will give priority to the rails transportation. The integration of these two problems is performed by bi-level optimization model.

## **7. Application of the hierarchical model for optimization in the management of an integrated transport system.**

A subjective modification of the solutions of the classical optimization task for the intensification of passenger transport on the railway sections was made. The graphically presented solution in Figure 3.5 of this case shows that there is an unused capacity for rail connections. From the solution obtained in Fig. 3.8, it can be subjectively chosen to limit or remove lines in a column maintained by bus lines. This limits the performance of the bus arcs.

This mode of prioritizing rail transport can be applied by taking into account additional data or constraints that are currently not taken into account through bus and train running schedules. The resulting solution in Figure 3.5 was used to evaluate the new optimization model for hierarchical optimization (Figure 3.8). [3, 4]

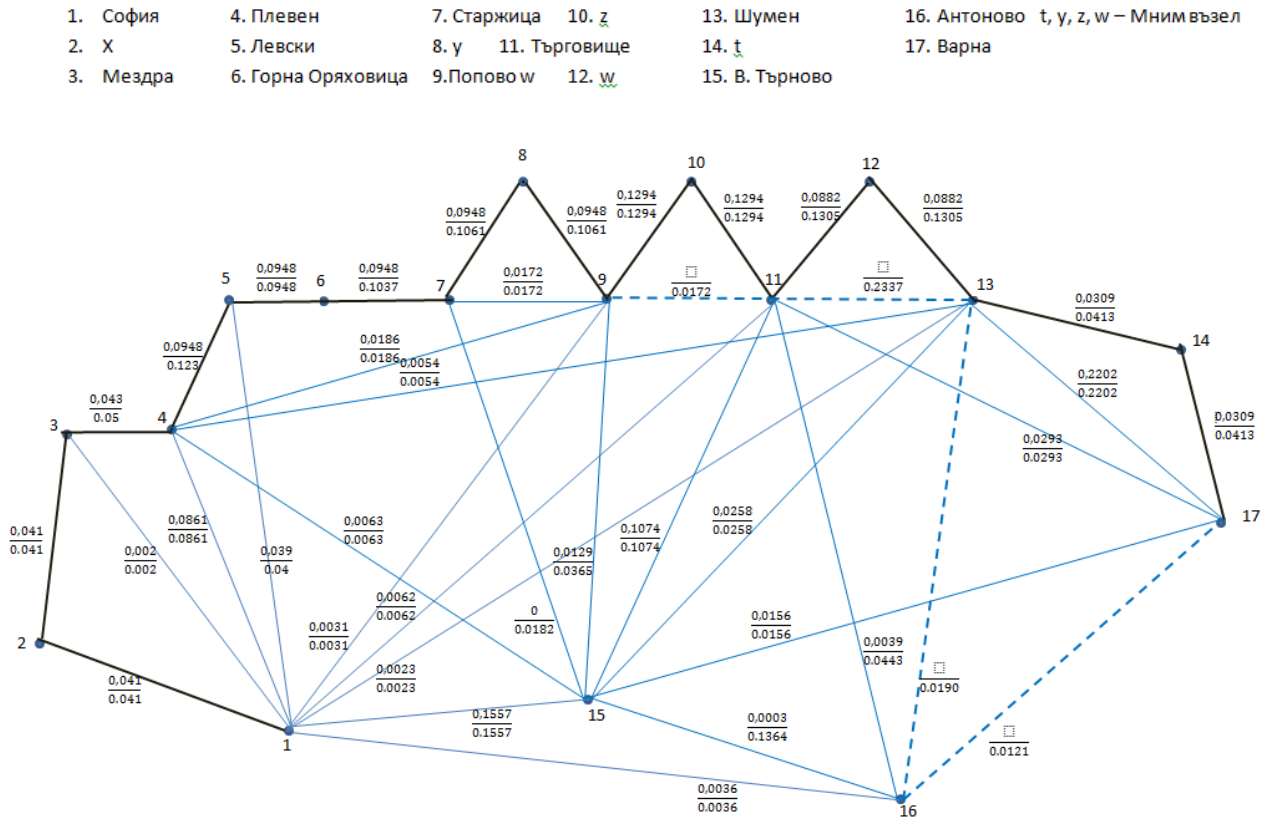


Fig.3.8. Subjective determination of priority for rail passenger transport for 2017.

The upper level problem evaluates the maximal flow, which can be transported between nodes 1 and 17. The components of max-flow respect the capacity constraints of the links, estimated according to fig.3.5. As a result, the value of the maximal flow is passed as a parameter to the lower optimization problem (3.2), defined as minimal cost flow distribution. The costs are defined in a way to give priority to the rail transport.

The minimal cost flow distribution problem evaluates the flows, which give preferences to the rail transport. These new values of flow distribution are passed to the upper optimization problem as new capacity restrictions for the max flow problem.

The solution of the bi-level problem is performed in MATLAB environment. The special function *solvebilevel()*, developed under the framework of project YALMIP [10] is applied. The bi-level solution is given on fig.3.10.

|           |                    |               |               |                |  |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|----------------|--|
| 1. София  | 4. Плевен          | 7. Старжица   | 10. $\zeta$   | 13. Шумен      | 16. Антоново $t, y, z, w$ – Мним възел |
| 2. Х      | 5. Левски          | 8. $\gamma$   | 11. Търговище | 14. $t$        | 17. Варна                              |
| 3. Мездра | 6. Горна Оряховица | 9. Попово $w$ | 12. $w$       | 15. В. Търново |  |

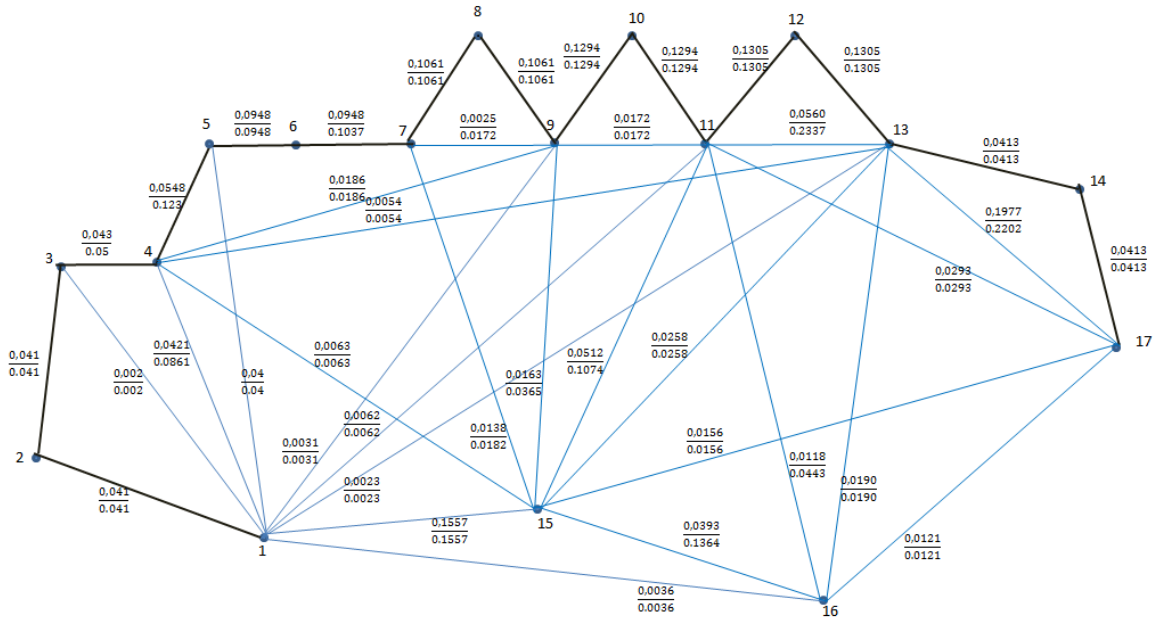


Fig.3.10. Graphical solution of the bi-level problem

The comparisons between the solutions of single optimization case on fig.3.5 and the bi-level one from fig.3.10 demonstrate that the bi-level problem increases the usage of the rail transportation. For example:

- Links (7-9) increase from 0.0948 to 1.061, which is the value of the available capacity of this link. Similar increases are met additionally for a set of rail supported links.
- Links (9-11) increase from 0.0993 to 0.1294, which is the value of the available capacity of this link.
- Links (11-13) increase from 0.0623 to 0.1305, which is its maximal capacity.

The increase of the rail network utilization is accompanied by decreasing the transportation flows of bus links. This decrease is performed on optimal way by the bi-level optimization model:

- Link (1-4) decreases from 0.0861 to 0.0421.
- Link (13-17) decreases from 0.2202 to 0.197.
- Link (11-15) decreases from 0.0917 to 0.0512.

But the bi-level solution contains not only components with decreasing flows through links, operated by buses. For example, the flow distribution through link (11-16) increases from 0.0014 to 0.0118; link (15-16) also increase its flow from 0.0289 to 0.0393. That is why the single and bi-level optimization models have to be assessed and compared under common evaluation criterion. This criterion has been defined taking into consideration that the common goal of the optimization models is to increase the utilization of the rail transportation between two points into a transportation network. That is why this research estimates both the maximal value of the traffic (the value of max flow) which can be transported through the network and the flow distribution of the max flow through the links of the network. The percentage of the max flow, which passes through links, operated by rail transport will be a criterion for assessment the benefit from the different optimization models. Hence, the model



which provides bigger part of the max flow for rail, is preferable for the management of the rail transport.[5,6]

The comparisons and assessments between the single and bi-level optimization are evaluated quantitatively in a following way. The total capacity of the rail transportation is defined as a sum of all capacities of links, implemented by rail transport or

$$TOTAL_{rail} = v_{1,2} + v_{2,3} + v_{3,4} + v_{4,5} + v_{5,6} + v_{6,7} + v_{7,8,9} + v_{9,10,11} + v_{11,12,13} + v_{13,14} + v_{14,17} = 0.8198 \quad [\text{relative capacity}]$$

The part of the max flow, which passes through the links, operated by rails are evaluated as

$$Part\_MAX\_FLOW_{rail} = f_{1,2} + f_{2,3} + f_{3,4} + f_{4,5} + f_{5,6} + f_{6,7} + f_{7,8,9} + f_{9,10,11} + f_{11,12,13} + f_{13,14} + f_{14,17} \quad [\text{relative capacity}].$$

The flow solution  $f_{i,j}$ ,  $i,j=1,\dots,N$  for the classical and bi-level optimization models are evaluated as

$$Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{single optimization}) = 0.6046$$

$$Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{subjective optimization}) = 0,8365.$$

$$Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{bi-level optimization}) = 0.7357.$$

The relative transportation of the components of the max flow for the models is:

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{single optimization})}{TOTAL_{rail}} = 73.62\%$$

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{manual single optimization})}{TOTAL_{rail}} = 83.74\%$$

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(\text{bi-level optimization})}{TOTAL_{rail}} = 89.74\%$$

This comparison gives advantages for the application of the bi-level optimization models. The total value of the max flow is the same for both models, but the bi-level gives considerable priority for the utilization of the rail transport, fig.3.12.



Fig. 3.12. Comparisons and advantages of the hierarchical optimization model

These results prove that the bi-level optimization model gives additional benefits for the rail transport by maximization of the flow between two nodes of the network and simultaneously providing priority to the rail transport by redirecting the flows to rail transport which support low cost flow transport. [6]

## 8. Conclusions

This research presents a new application of the bi-level formalism, modeling and optimization. It has been defined a real optimization problem, which gives solutions increasing the exploitation and movement by rail transport. It gives formal basis for providing policies of transportation authorities to issue licenses for bus transportation. The formal model for increasing the rail transport founds on the integration of optimization problems for maximization of the transport flow between two points of the transport network. Additionally, advantages are given to the rail transport by applying the problem of flow distribution with minimal costs.

Thus, the bi-level problem gives solution both for rail and bus transportation and takes into consideration requirements for improving and giving priority to rail in a common transportation network. The derived solutions additionally identify a set of weak points, where the rail infrastructure has to be improved, suggest intensification of rail schedule per link. The parameters of the bi-level problems have been estimated according to the real transportation policy in Bulgaria.

A perspective approach for improving the models and solutions by giving priority to rails could be the implementation of fuzzy models and soft computing [1, 8] and/or multi criteria optimization [7,9] in a multilevel hierarchical problem. By increase the levels of optimization and the formal content of the problems on different levels, one can expect additional benefits for the rail management. But currently the modelling using multilevel computation meets

practical difficulties because of the increase of the computational time, which constrains the application of the multi-level formalism in practical cases.

### Contributions of the PhD thesis

- An algorithm for managing a complex transport system was developed with the application of a new two-hierarchical optimization model.
- A bi-level optimization task is defined and it is possible to define as optimal solutions more parameters of the transport system than the classical optimization task. The hierarchical management task gives priority to rail passenger services.
- The management task is formalized and defined using available real data, and a dedicated algorithm is developed to determine the conditional pass ability parameters. This allows the hierarchical optimization task to have specific quantitative parameters;
- The hierarchical management task has been implemented as well as decisions that give priority to rail passenger transport.

### References

1. Angelova, V. Investigations in the area of Soft computing. Targeted state of the art report, J.Cybernet. Inf. Techn., vol. 9, No 1, 2009, pp. 18-24, ISSN 1311-9702, [http://www.cit.iit.bas.bg/CIT\\_09/v9-1/18-24.pdf](http://www.cit.iit.bas.bg/CIT_09/v9-1/18-24.pdf)
2. Gomory, R. E., T. C. H u. Multi-Terminal Network Flows. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 9, No. 4 (Dec.,1961), pp. 551-570
3. Kalashnikov, V., S. Dempe, G. A. Pérez – Valdés, N. Kalashnykova, J. F. Camacho – Vallejo. Bilevel Programming and Applications. Review Article. -J. Mathematical Problems in Engineering, Vol.2015, 2015, Article ID 310301, 16 pages,
4. Kheirkhah, A., N. Hamid Reza , M.B. Masume . A bi-level network interdiction model for solving the hazmat routing problem. Special Issue: Transportation in Supply Chain Management . Volume 54, Issue 2, 2016. pp. 459-471. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1084061>
5. Kristina Pavlova, Todor Stoilov- „Mathematical model for increasing the efficiency of passenger railway transport in Bulgaria“, X international conference for young researchers, Technical science & Industrial management, 12 – 15.12.2016 Borovets, Bulgaria, International scientific journal, National society ”Industrial & National Security”, ISSN PRINT 2367-8380, ISSN WEB 2534-8485, p. 10-13
6. Kristina Pavlova, Todor Stoilov, Krasimira Stoilova – „Bi-level model for public rail transportation under incomplete data“ . Journal “Cybernetics and Information

Technologies". ISSN Print: 1311-9702 , ISSN Online: 1314-408, SJR 0,2 (Приета за публикуване).

7. Peneva V., I. Popchev. Multicriteria decision making based on fuzzy relations. Cybernetics and Information Technologies, vol.8, N4, 2008, p.3-12.
8. Peneva V., I. Popchev. Multicriteria decision making by fuzzy relations and weighting functions for the criteria. – Cybernetics and Information Technologies, vol.9, N4, 2009, p.58-41.
9. Radeva I. Multicriteria models for clusters design. J.Cybernet. Inf. Techn, Vol. 13, No 1, 2013, pp. 18-33, ISSN
10. <https://yalmip.github.io/command/solvebilevel/>



## АВТОРЕФЕРАТ НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователна и научна степен “доктор” по научна специалност „Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката“

### СИНТЕЗ НА АЛГОРИТМИ ЗА ОПТИМАЛНО УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА

*Кристина Тодорова Павлова*

Ръководител: проф. Тодор Стоилов

Научно жури:

Акад. Васил Сгурев

Акад. Иван Попчев

Проф. Тодор Стоилов

Професор Стоян Стоянов

Доц. Даниела Борисова



Институт по информационни и  
комуникационни технологии

Секция „Йерархични системи“

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Йерархични системи“ на ИИКТ-БАН.

Дисертационният труд обхваща 133 страници, в него са включени 40 фигури, 6 таблици и са посочени 166 литературни източника.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на ..... от ..... часа в зала .....на блок 2 на Института по информационни и комуникационни технологии на БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. акад. Иван Попчев
2. акад. Васил Сгурев
3. проф. дтн Тодор Стоилов - ИИКТ-БАН
4. проф. д.н. Стоян Стоянов
5. доц. д.н. Даниела Борисова - ИИКТ-БАН

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая 215 на ИИКТ – БАН , ул. „ Акад. Г. Бончев “ , бл. 25А

Автор: Инж. Кристина Тодорова Павлова

Заглавие: “Синтез на алгоритми за оптимално управление на транспортна система“



## **Обща характеристика на дисертацията**

### **Актуалност на темата и обзор на основните резултати в областта**

Оптимизирането на железопътните превози ще позволи, вследствие на създаване на математически модел, числено да се определят потенциалните участъци, където може да се интензифицират железопътните пътнически превози. Като резултат, решаването на такава задача ще позволи да се увеличи пътничекото, превозен с железопътни пътнически превози, което е тенденция за увеличение на използването на железопътния транспорт в Европа.

### **Структура на дисертацията**

Дисертационният труд е разделен на увод, три глави и заключение. Дисертацията съдържа 133 страници, 40 фигури, 6 таблици и са посочени 165 литературни източника. По дисертационни труд са публикувани 6 публикации. Изследванията са част от получените резултати на два научноизследователски проекта.

В Глава 1 е направен обзор на йерархичните оптимизационни задачи. Разгледани са особеностите на йерархичните модели за оптимизация. Показани са приложенията на задачите за йерархична оптимизация. Описани са предимствата и недостатъците на този тип задачи.

В Глава 2 е разработен йерархичен оптимизационен модел, който цели дефинирането на формална задача за интензифициране на железопътните пътнически превози. Избран и е приложен е подход на композиране на йерархична оптимизационна задача. Този подход е различен с основните подходи в теорията на йерархичните системи за декомпозиция и координация. Дисертационната работа прилага композиране на йерархична оптимизационна задача като взаимосвързани оптимизационни задачи. Последните поотделно не дават в пълнота решение на инженерната задача за интензифициране на железопътните пътнически превози. В йерархична организация новата задача дава прагматично и полезно решение за управление на интегрираната транспортна система. В тази глава е и разработен алгоритъм за числено определяне на параметри на йерархичната задача за управление. Разработен е алгоритъм за количествена оценка на условни пропускателните способности на пътничеките железопътни и автобусни превози. Този алгоритъм е разработен поради ограничение на изходни данни за интензивността на автобусни и железопътни пътнически превози.

Като резултат от този алгоритъм за подготовка на данни е дефинирана йерархична оптимизационна задача за управление на пътническите превози. С тези изходни данни са дефинирани и две класически оптимизационни задачи, композиращи йерархичната такава: задача за намиране на максимален поток в мрежа и задача за оптимално потокоразпределение.

В Глава 3 е приложен йерархичния модел за оптимизация и управление на пътническите превози в интегрирана транспортна система като е дефинирана и решавана йерархична задача за оптимизация. Решенията на йерархичната задача са сравнявани с известни оптимизационни задачи за максимален поток и за оптимално потокоразпределение. Показано е преимущество на решенията на йерархичната задача, която запазва стойността на максималния поток и реализира потокоразпределение, което дава предимство на железопътния транспорт. Направени са и допълнителни анализи, оценки и сравнения на получените решения на йерархичната оптимизационна задача.

### **Цели и задачи на дисертацията**

**Целта на дисертационната работа** е да се разработи формален модел и алгоритми за неговото прилагане при решаване на изследователска задача за интензифициране на железопътните пътнически превози на пример на участък от Републиканската транспортна схема;

**Обект на изследването** е клас интегрирана транспортна система изпълняваща пътнически превози с автобусен и железопътен транспорт на участък на Републиканската Транспортна Схема.

При разработване на дисертационната изследване са поставени и решавани следните задачи, които конкретизират целите на дисертационната работа:

- разработване на йерархичен модел за управление на интегрирана транспортна система. Моделът трябва да дава приоритет на железопътните пътнически превози в сравнение на автобусния транспорт;
- йерархичният модел да използва предимства на йерархичния подход като се приложи изследователски подход за композиране на йерархичния модел чрез взаимно свързани оптимизационни задачи;
- разработване на алгоритъм за количествено определяне на параметрите на йерархичната задача за управление в условия на ограничени изходни данни за

пътническите превози;

- дефиниране и решаване на йерархичната оптимизационна задача и оценка на получените решения;
- приложение на йерархичния модел за управление в практическа инженерна задача.

В следствие дефинирането и решаването на този клас йерархична задача за управление се очаква да се разшири областта на приложение на йерархичната оптимизация в областта на управление на клас интегрирани транспортни системи.

В дисертационната работа не са разработвани числени алгоритми за решаване на йерархични оптимизационни задачи, а се разработва йерархичен модел за управление и алгоритми за неговото приложение. В частност са разработвани два алгоритъма: за прилагане на оптимално управление чрез формален йерархичен модел; за подготовка на данните за йерархичната оптимизационна задача в условията на ограничени изходни данни за оптимизационната задача.

Приносният елемент на дисертационното изследване е в дефиниране на нов модел йерархична оптимизация и прилагането му при управление на превози в клас интегрирана транспортна система.

### **Методология на изследването**

Разработването на математическия модел и алгоритъм за управление и интензифициране на пътническите железопътни превози за Републиканската Транспортна Схема е изпълнявано в следната последователност:

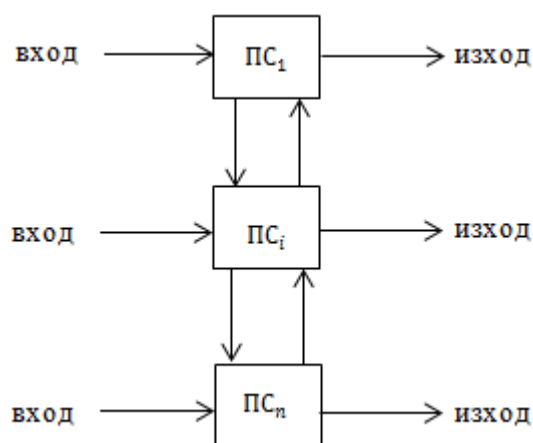
1. Създаване на графова структура за пътнически превози по транспортната система София-Варна(ГО);
2. Дефиниране и определяне на количествени параметри, определящи капацитета на линиите в транспортната система.
3. Разработване на количествен метод за оценка за потенциала на пътнически превози
4. Прилагане на класическа оптимизационна задача за намиране на максималния поток, за транспортната система от София до Варна.
5. Модифициране на класическата оптимизационна задача за определяне на максималния поток, чрез експертни промени в оптимизационната задача
6. Прилагане на двуйерархичен метод за определяне на максималния поток и приоритетно потокоразпределение за ж.п.

## Глава 1. Особенности на йерархичните модели за оптимизация.

В първа глава е направен обзор на йерархичните оптимизационни задачи.

### 1.1. Теоритичните модели в теорията на йерархичните системи.

**1.1.1. Вертикална съподчиненост.** Всяка йерархия се състои от вертикално съподчинени подсистеми, т.е. цялата система представлява съвкупност от взаимодействащи си ПС (фиг. 1.1). Под система или подсистема се разбира реализирането на процеса на преобразуване на входните данни в изходни.



Фиг. 1.1. Йерархична съподчиненост

**1.1.2. Право на вмешателство.** Въздействията на горните йерархични нива имат задължителен характер спрямо долните нива. И в това се изразяват приоритетът на действията и цели на горните нива.

**1.1.3. Взаимосвързаност на действието.** Ефективността на действията на йерархичната система в цялост и на елементите на всяко ниво зависят от поведението на всички взаимосвързани елементи в системата. Работата на горното ниво зависи не само от осъществените от него действия, но и от съществуващите реакции на долните нива. За това може да се счита, че качеството на работа на цялата система се осигурява от обратната връзка, т.е. от реакцията на вмешателството.

Йерархията е съотносително понятие и има конкретни области на приложение. Тези области дефинират вида на йерархията. В [9] понятието йерархия се отнася за:

- съставяне на нива на описание (страти);
- разпределение на правата и задълженията между изпълнителните елементи (ешелонна йерархия);

- разпределение на функциите и задачите по нивата в йерархична система (слоева йерархия).

## **1.2. Формалните модели в областта на йерархичната оптимизация**

**1.2.1. Игрова задача на Стакелберг.** Най-общият модел от класа на двунивовото йерархично програмиране (от класа на двунивовите йерархични задачи) е играта на Стакелберг [2]. Задачата на Стакелберг може да се интерпретира като игра между двама играчи, където и двамата играчи взимат решения. Решението на водещия играч отговаря на следните въпроси: каква е най-добрата стратегия, когато си знае целевата функция и ограниченията и трябва да избере своята стратегия първи? Щом като лидерът фиксира управляващите променливи, другият играч си избира стратегия да минимизира собствената си целева функция. Вторият играч решава стандартна задача от класическото програмиране. Но решенията на втория играч модифицират задачата на лидера и така двете задачи на водещия и воден играч са взаимосвързани.

Задачата на Стакелберг се формулира като двунивова йерархична оптимизационна задача, където играчи 1 и 2 съответстват на вземащите решения на горно и долно ниво. Първият играч определя оптималните стойности на своите променливи (параметрите на долното ниво), така че да минимизира целевата си функция, докато вторият играч минимизира целевата си функция, по отношение на променливите си при зададени от първия параметри. В този модел целевата функция и ограниченията на горното ниво са функции от двата типа променливи: и от горното, и от долното ниво. [10]

**1.2.2. Целева координация в йерархични задачи.** В йерархична система за управление координаторът може да изменя целевите функции на задачите на долни йерархични нива. Тази координация е известна с термина „Целева координация”. Формален модел за такава координация може да се приложи правата и обратна задача на Лагранж. При прилагане на формализма на Лагранж, решенията на задачата на координатора изменят целевата функция на долната йерархична задача. Целевата координация се състои в промяна, извършвана от координатора, в целевите функции на локалните задачи на подсистемите [7, 13, 15, 16]. Математически този модел се основава на изискванията за съществуване на седлова точка при решаване на съответните права и обратна задача на Лагранж.

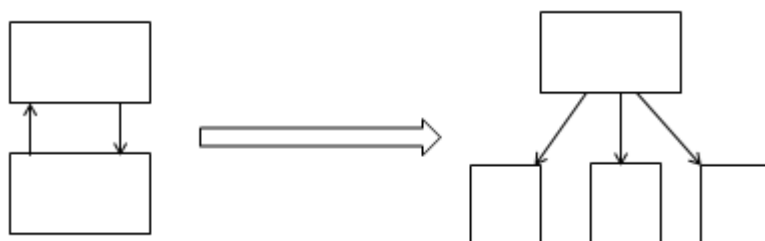
**1.2.3. Координация с предсказване в йерархични задачи.** При тази стратегия на решаване на йерархични задачи, решенията на координатора изменят ограниченията на долно йерархично ниво. Този тип координация е наречен „координация с предсказване”. Икономическата интерпретация на координацията с предсказване е плановата икономика [8, 12].

В трета секция са разгледани приложенията на задачите с йерархична оптимизация.

**1.4. Агрегиране и декомпозиция.** Декомпозиция като метод за формализиране на работата на Йерархичните системи за управление.

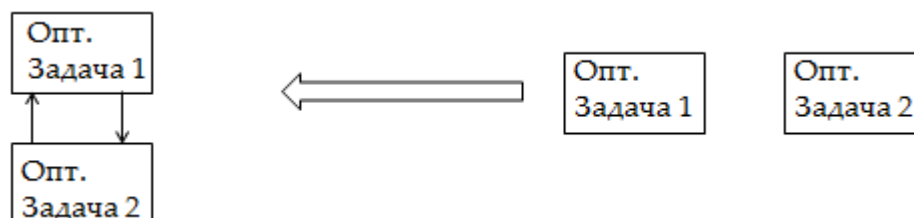
С формалния апарат на декомпозицията се извеждат не само модели, но се дават и конкретни решения за начина на функциониране на ЙСУ. Чрез известните декомпозиращи подходи – намаляване на размерността на аргумента и/или ограниченията, са изведени точните зависимости и връзки, определящи структурата на ЙСУ, работата на отделните й компоненти и взаимодействието между тях.

Теорията на йерархичните системи използва декомпозиция, разделя долната задача на няколко подзадачи. Фиг. 1.9.



Фиг. 1.9. Декомпозиция на оптимизационни задачи

Изследователският подход в дисертационната работа е композиция на оптимизационни задачи. Фиг. 1.10.



Фиг. 1.10. Композиция на оптимизационни задачи.



## 1.6. Предимства и недостатъци на йерархичните задачи за оптимизация.

**1.6.1. Предимства на йерархичната задача спрямо класическа задача за оптимизация.** От формална гледна точка, оптимално решение  $x^{opt}$  на оптимизационна задача

$$\min_x f(x, a)$$

1.45

$$g(x, a) \leq 0 ; y \in S_x(x, y)$$

е дефинирано като стойността на вектора  $x^{opt}$ , който покрива условията за минимизация на целевата функция  $f(\cdot)$  запазвайки изпълнението на ограниченията  $g(\cdot)$

$$\begin{aligned} f(x^{opt}, a) \leq f(x, a) \quad \forall x \in g(x, a) \leq 0 \\ g(x^{opt}, a) \leq 0 \end{aligned} \quad 1.46$$

където  $x$  е вектор на  $n$  компоненти,  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $f$  е целевата функция която трябва да бъде минимизирана; и  $g$  е група от  $m$  неравенства,  $g^T = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ .

В задача (1.45), вектора  $a$  дефинира параметри за ограниченията  $g$ . Тези параметри са предварително дефинирани и известни по стойност оптимизационната задача.

Стойностите на параметри  $a$  не са част от оптималното решение  $x^{opt}$ . Оптималните решения  $x^{opt}$  са оптимални само за конкретната оптимизационна задача (1.45). Множеството параметри  $a$  не се получават като решения на изходната оптимизационна задача (1.45), а са предварително определени на база други разглеждания.

В класически случай на оптимизационна задача само част от системните характеристики на изследван обект  $x$  се получават като оптимално решение. [13]

Решението на йерархичната оптимизационна задача, притежава повече характеристики на изследван обект.

Аргументите на йерархичната задача включват аргументите на координиращата и долната задача Б, така решението на горната оптимизационна задача играе роля на параметър за долната йерархична задача и обратно.

## 1.6.2. Недостатъци на йерархичните оптимизационни задачи.

Всяко описание на големи системи за управление се натъква на общо поне на следните три трудности:

*Първа трудност.* Описанието на всяка система трябва да бъде представено от гледна точка на йерархичността като количествено изразяване на нейните цели и задачи. Оттук трудността е в нееднозначната трансформация на описанието на целите и задачите от качествени ниво на естествения език, на количествено ниво на формалния език, на търсенето на количествена мярка за достигане на целта на системата, респ. на подсистемите, за координация между тях и т. н.

*Втора трудност.* Информационните процеси във всяка система нееднозначно се представят на формален език поради потребността от обработването на информация от различни йерархични нива, често на различни езици поради необходимостта от конструиране на съответна прогноза за състоянието на долното ниво и за „намеренията“ на горното ниво, поради непълнотата и недостоверността на получената информация и т. н.

*Трета трудност.* Във всяка система е необходим избор и (или) конструиране на критерии за управление, за оценка на взетите решения, които да измерват и различни класове неопределеност, субективни и неформализуеми фактори и т. н. [18]

- Трудно се решават тези задачи, защото трябва да се търсят глобални оптимуми.
- Прилагат се итеративни изчисления, които забавят получаването на решението на задачата. Това ограничава областта на приложение на йерархичната оптимизация до практически случаи на off-line оптимизация-проектиране, синтез, off-line вземане на решения, но не и за real-time управление.

В секция седем са показани алгоритмите и задачите от потоци в мрежи, използвани в оптимизационните задачи.

## **Глава 2. Разработване на йерархичен модел за управление и подготовка на данни за оптимизационната задача**

В първа секция на втора глава е определена клас интегрирана транспортна схема от автобуси и железопътни пътнически превози.

**2.1. Създаване на математически модел за оптимизиране и управление на железопътни пътнически превози за избран участък от Републиканската Транспортна Схема.** В тази глава е представен математическият модел, чийто алгоритъм за управление интензифицира използването на железопътни пътнически превози. Той използва постановки, използвани и прилагани при йерархична оптимизация.

Разработването на математическия модел и алгоритъм за управление и интензифициране на пътническите железопътни превози за Републиканската Транспортна Схема е изпълнявано в следната последователност:

1. Създаване на графова структура за пътнически превози по транспортната система София-Варна(ГО);
2. Дефиниране и определяне на количествени параметри, определящи капацитета на линиите в транспортната система.
3. Разработване на количествен метод за оценка за потенциала на пътнически превози
4. Прилагане на класическа оптимизационна задача за намиране на максималния поток, за транспортната система от София до Варна.
5. Модифициране на класическата оптимизационна задача за определяне на максималния поток, чрез експертни промени в оптимизационната задача
6. Прилагане на двуйерархичен метод за определяне на максималния поток и приоритетно потокоразпределение за ж.п.

**2.2. Алгоритъм за определяне на параметри за оптимизационна задача.** В този параграф се проектира граф по републиканското направление София-Варна (през Горна Оряховица). Графът отчита съвместните пътнически превози по това направление с автобуси и влакове.

**2.2.1. Елементи на графа, съответстващи на железопътни превози от София до Варна (ГО).** Данните за създавания граф за пътническите превози, реализирани от железопътния транспорт са взети от сайта на БДЖ-ПП за влакови разписания [www.bdz.bg](http://www.bdz.bg) .

Върховете от графа, през които минава железницата, съответстват на градовете, където има спирки на влака. След обработване на данните за влаковите разписания, в графа на маршрута София-Варна (ГО) са включени градовете, показани на таблица 2.1.:

| № | Град            | №  | Град           |
|---|-----------------|----|----------------|
| 1 | София           | 10 | Мним възел     |
| 2 | Мним възел      | 11 | Търговище      |
| 3 | Мездра          | 12 | Мним възел     |
| 4 | Плевен          | 13 | Шумен          |
| 5 | Левски          | 14 | Мним възел     |
| 6 | Горна Оряховица | 15 | Велико Търново |
| 7 | Стражица        | 16 | Антоново       |
| 8 | Мним възел      | 17 | Варна          |
| 9 | Попово          |    |                |

Таблица 2.1. Обозначение на върховете на графа

Мнимите точки са въведени, за да се дефинира самостоятелна дъга, обслужвана само от железопътен или само от автобусен превоз.

Избраната номерация на върховете има точно географско положение със спирките на влака в изброените градове. В тази номерация са включени и т.н. „мними точки”. Те са поставени, за да се отдели железопътния от автобусния транспорт. Например т.3 е поставена за железопътния транспорт, тъй като съществуват автобусни линии, които паралелно с железопътния транспорт обслужват превози между София и Мездра.

Аналогично е отделянето на железопътния транспорт в точки:

- т.8 за Стражица – Попово;
- т.10 за Търговище – Шумен;
- т.14 за Шумен- Варна.

В тези участъци паралелно на железопътния транспорт се осъществяват и автобусни превози. В дисертацията графът на транспортните превози е наименован „транспортен граф“.

### **2.2.2. Елементи на графа, съответстващи на автобусни превози пресичащи отделните участъци на железопътния транспорт от София до Варна (ГО)**

Автобусните превози изпълняват пътнически превози както за цялата дестинация от София до Варна (ГО), така и за отделни участъци по тази железопътна

линия. Необходимо е да се идентифицират всички автобусни линии, които преминават и спират през възловите точки на графа, дефиниран от железопътната линия между София и Варна (ГО). Това означава, че трябва да се определят всички автобусни линии, независимо от своята начална и крайна дестинация дали преминават през градовете, дефинирани от железопътната линия София-Варна (ГО). Така всички автобуси, които преминават поне през два от върховете на железопътния граф София, Мездра, Плевен, Левски, Г.Оряховица, Стражица, Попово, Търговище, Шумен, Варна изпълняват паралелни превози с железопътния транспорт и тези автобусни участъци трябва да се включат в общата графова структура на пътническите превози.

За определяне на автобусните линии, които изпълняват паралелни превози по всички участъци от железопътния граф на линията София-Варна (ГО) са използвани данните за издадени лицензи за автобусни пътнически превози от Изпълнителна агенция „Автомобилна администрация”,

<http://rta.government.bg/index.php?page=scategories&scategory=otrts>

### **2.3. Количествена оценка на пропускателните способности за пътнически превози в условия на изходни данни.**

**2.3.1. Постановка.** Капацитетните възможности (условни пропускателни способности) на отделните дъги в графа трябва да бъдат оценени и определени. Реалистичен подход е за пропускателни способности на дъгите в мрежата да се използват данни за пътнически потоци, определени от брой на продаден билети по направления. За съжаление, такива данни не са достъпни поради отсъствие на информационна система за продадени билети за железопътен транспорт в цялата страна. Ограничение е и липсата на данни за пътнически поток, който изпълняват частните автобусни превозвачи. При наличие и на други данни, свързани с капацитета на транспортния участък и/или на превозните средства, дефинираната задача за оптимизация може да бъде по сложна и отчитаща повече ограничения. Ограниченият обем от данни за текущите пътнически превози по направление София-Варна, изпълнявани от автобусен и железопътен транспорт влияят и определят вида на дефинираните модели и решавани оптимизационни задачи.

Поради ограничен вид и обем на изходни данни за режимите на работа на интегрираната транспортна система в това изследване се приема, че ще се оценят пропускателните способности на всяка дъга в транспортния граф. Тези пропускателни

способности дефинират потенциала, капацитета на всяка дъга в графа, което определя максималния пътничкопоток, който може да бъде транспортиран по съответната дъга.

Количествената мярка за оценка на пътуването се въвежда с практическото правило: по- дълго пътуване е еквивалентно на по- малка пропускателна способност на транспорта по това направление.

Формално записано, използва се зависимостта:

Мярка за оценка: по-дълго пътуване  $\Rightarrow$  по-малка пропускателна способност на транспорта по това направление.

Количествената, аналитична оценка на тази мярка се въвежда с равенството:

Пропускателна способност (условна)  $= 1/\text{време за пътуване}$ .

**2.3.2. Оценка на пропускателните способности на дъгите на транспортния граф, принадлежащи на железопътния транспорт.** Оценката на пропускателната способност на влака е направена с пример от дъгата в транспортния граф по направление София-Мездра. Използват се данните от разписанието на влака София-Варна (ГО).

В настоящата дисертационна работа е разработен алтернативен начин за оценка на капацитета на транспортните връзки за пропускане на пътничкопоток. Използват се реални данни за продължителността на пътуването по дадена транспортна дъга. Мотивите за ползването на данни за времетраене на пътуването по дадена дъга в графа произтича от желанието на пътниците да пътуват по-бързо по дадено направление. По този начин по-малкото време за пътуване между два възела дава повече предпочитания за пътуване в тази посока от пътниците. Освен това, продължителното време за пътуване е мерника за нисък капацитет за транспортиране на съответната връзка. По този начин транспортните пропускателни способности на отделните дъги в транспортния граф са силно свързани с времето за пътуване по тази връзка. За текущия случай е избрана проста връзка между времето на пътуване  $t_{ij}$  по дадена дъга на графа и капацитета/пропускателната способност на тази дъга  $v_{ij}$ :

$$v_{ij} = 1 / t_{ij} \quad i, j \in N . \quad (2.1)$$

От разписанията на движение на влаковете и автобусите данните за времето за пътуване  $t_{ij}$  е известно. Следователно чрез зависимост (2.1) лесно се изчислява

пропускателната способност на всяка отсечка в графа.

Оценката на пропускателните способности на дъгите, по които се осъществяват железопътни пътнически превози е направено по разписанията на влака София - Варна, взети от сайта на компанията БДЖ-ПП, [www.bdz.bg](http://www.bdz.bg), фиг.2.5.

**Информация за влак**

| Влак | За дата    | Коментар |
|------|------------|----------|
| 2601 | 02/11/2016 |          |

| Гара/Спирка         | Пристига | Заминава |
|---------------------|----------|----------|
| СОФИЯ               | --       | 06:40    |
| МЕЗДРА              | 08:13    | 08:15    |
| ЧЕРВЕН БРЯГ         | 08:51    | 08:52    |
| ПЛЕВЕН              | 09:33    | 09:34    |
| ЛЕВСКИ              | 10:03    | 10:04    |
| ПАВЛИКЕНИ           | 10:19    | 10:20    |
| ГОРНА ОРЯХОВИЦА     | 10:45    | 10:50    |
| ПОПОВО              | 11:36    | 11:37    |
| ТЪРГОВИЩЕ           | 12:06    | 12:07    |
| ШУМЕН               | 12:38    | 12:39    |
| СИНДЕЛ РАЗПРЕДЕЛИТ. | 13:39    | 13:40    |
| ВАРНА               | 14:09    | --       |

**Състав**



Copyright ©2005-2015 ИСТ "БДЖ Пътнически превози" ЕООД. Всички права запазени.

фиг.2.5. Разписания на влака София - Варна

Продължителността на пътуването по дъгата между първите два възела от фиг. 2.5, София-Мездра е 1 час и 33 минути (93 минути, от 6:40 до 8:13 часа). Съгласно зависимост (2.1) капацитетът на дъгата между тези два възела на мрежата е:  $1/93 = 0.011$  единици относителна пропускателна способност. Като се има предвид от дневното разписание на влаковете от София за Варна от сайта [www.bdz.bg](http://www.bdz.bg), че 5 влака преминават по тази дъга/дестинация, капацитетът за транспортиране ежедневно на тази дъга в транспортния граф е:  $5 \text{ влака} \times 0.011 = 0.055$  единици относителна пропускателна способност. Тази оценка отчита, че общата пропускателна способност на тази дъга в графа е сума от индивидуалните пропускателни способности на всеки преминал влак. Следователно, при нужда повишаването на пропускателна способност на дадена линия на графа може да се реализира чрез увеличаване на разписанията/брой преминали влакове по тази дъга на транспортния граф. [4, 19, 20, 21]

**2.3.3. Оценка на пропускателните способности на дъгите на транспортния граф, принадлежащи на автобусния транспорт.** Оценката на капацитета на линиите, където се осъществява автобусен транспорт използва изходни данни, представени в графициите на автобусните превози и публикувани от Изпълнителна Агенция Автомобилна Администрация. Тези данни са записани в EXCEL файлове и на фиг.2.9 е дадена илюстрация на вида на тези данни за продължителността на пътуването по дадена дъга на транспортния граф.

| МАРШРУТНО РАЗПИСАНИЕ № 22201        |             |      |        |                             |                            |      |           |
|-------------------------------------|-------------|------|--------|-----------------------------|----------------------------|------|-----------|
| на автобусна линия СОФИЯ - СИЛИСТРА |             |      |        |                             |                            |      |           |
| Изпълнява се целогодишно.           |             |      |        |                             |                            |      |           |
| Изпълнява се с двама водачи.        |             |      |        |                             |                            |      |           |
| Изпълнява се с два автобуса.        |             |      |        |                             |                            |      |           |
| Разстояние (км.)                    | Час, минути |      |        | МАРШРУТ                     | Час, минути                |      |           |
|                                     | Прстига     | Стои | Тръгва |                             | Прстига                    | Стои | Тръгва    |
|                                     |             |      | 13.30  | София - Централна АГ        | 14.12                      |      |           |
| 226.9                               | 16.48       | 15   | 17.03  | Велико Търново - х-л "Етър" | 10.39                      | 15   | 10.54     |
| 74.6                                | 18.43       | 5    | 18.48  | Попово                      | 8.54                       | 5    | 8.59      |
| 88.5                                | 21.03       | 5    | 21.08  | Исперих                     | 6.34                       | 5    | 6.39      |
| 31.7                                | 21.55       | 5    | 22.00  | Дулово                      | 5.42                       | 5    | 5.47      |
| 40.9                                | 22.42       |      |        | Силистра                    |                            |      | 5.00      |
| Обща дължина                        |             |      | 462.6  | км.                         | Средна техническа скорост  |      | 53.2 км/ч |
| Общо време за движение              |             |      | 8.42   | ч.мин.                      | Средна съобщителна скорост |      | 50.3 км/ч |
| Общо време за пътуване              |             |      | 9.12   | ч.мин.                      |                            |      |           |

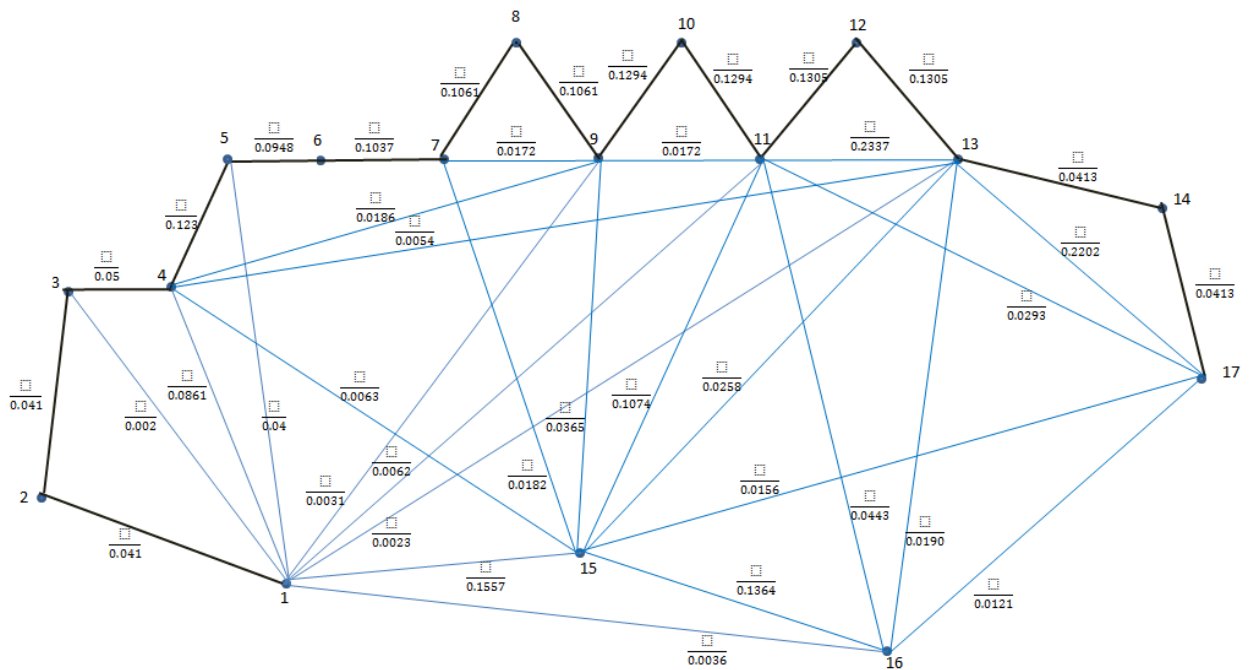
Фиг.2.9. Пример за график на автобусите

За определяне на пропускателната способност на дъгите в транспортния граф, където се изпълняват автобусни превози се използват данните за пътуване от фиг. 2.9 по следния начин. За примера на фиг. 2.9 автобусният превоз започва от София и дестинацията му е различна от гр. Варна. Но тази автобусна линия от София до Попово изпълнява транспорт на пътници, което се изпълнява и от железопътен транспорт по същото направление от София до Попово. Затова автобусните превози се отчитат само в частта им, до която те пресичат в някой възел железопътната линия на София – Варна. Следователно, пропускателните способности на дъгите в транспортния граф, поддържан от автобусни превози, се отчитат само до частите на мрежата, където автобусните връзки пресичат влаковите връзки. За случая от фиг. 2.9 тази пресечна



точка е град Попово (ред 3 на фиг. 2.9). Това означава, че от София до Попово съществуват два начина на транспорт: с влак и с автобус. За това в топологията на транспортната мрежа се добавя връзка от София към Попово, която се поддържа от автобусен транспорт.

Тези средни стойности са получени като се анализирани 55 автобусни линии и техните разписания, определени са възлите, в които се пресичат автобусен и железопътен транспорт, оценени са времената на пътуване на всичките 55 линии по всички дъги на транспортния граф. Резултатите от изчисленията за определяне на пропускателните способности на дъгите на транспортния граф са представени на фиг. 2.11. Изчисленията са направени по данни за 2017 г. на разписанията на влакове и автобуси, влияещи на транспортните потоци между София и Варна.[22]



фиг.2.11. Обща графова структура на железопътния и автобусен превоз за 2017г.

**2.4. Избор на оптимизационна задача за интензифициране на железопътни пътнически превози. Задача за намиране на максимален поток в транспортна система.** Изследването в тази дисертация цели да се намери каква е максималната стойност на потока от София до Варна (ГО), който може да се транспортира съвместно с железопътни и автобусни средства. Максималният поток се състои от съвкупност от отделни „поточета”, които тръгват от София, преминават през различни маршрути в

транспортния граф и се събират в крайната точка гр. Варна. Изследването цели да определи относителната стойност на този поток и дъгите в транспортния граф, през който се минава.

Последващото изследване съдържа оценка на възможността по-голяма част от максималния поток да преминава през дъги на транспортния граф, които се поддържат от железопътен транспорт. Така, железопътните пътнически превози ще се стимулират и интензифицират до стойности, които са ограничени от пропускателните способности на дъгите на железопътния транспорт.

Решението на задачата за максимален поток (2.6) определя и доколко отделните линии на железопътните и автобусни превози в транспортния граф се натоварват от компонентите на максималния поток. От решението за намиране на максимален поток ще може да се разбере дали има неизползван капацитет на железопътни връзки. Този капацитет ще може да се запълни като субективно се избере ограничаване или премахване на някои линии в графа, поддържани от автобусни линии. Така се ограничават съответната пропускателна способност на дъгите от транспортния граф, поддържани с автобуси. Капацитетът на автобусите линии, които са премахнати се преразпределя между останалите линии в транспортния граф. Премахването на автобусните линии се определя така, че след повторно решаване на задача (2.6), капацитетът на железопътните линии да бъде запълнен.

$$\begin{aligned}
 \max_{f_{st}} f_{st} &= \arg(\max_{f_{st}} f_{st}) \\
 \sum_i f_i^k - \sum_j f_j^k &= 0 \\
 \sum_i f_i^t &= f_{st} \\
 \sum_j f_j^s &= -f_{st} \\
 \sum_i f_i^k &\leq V_i^k
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Тя има много голям брой ограничения и нейното решаване не е тривиална задача. Нейното решение ще даде стойността на максималния поток  $X$ , който може да премине през транспортния граф между София и Варна. Освен това ще се определят отделните потоци на този максимален поток през кои дъги на графа преминават.

**2.5. Избор на оптимизационна задача за интензифициране на железопътни пътнически превози. Задаване на приоритет на железопътните превози чрез задача за оптимално потокоразпределение.** В настоящата дисертационна работа е разработена двуйерархична задача за оптимизация, съставена от две оптимизационни задачи: едната е за анализ и определяне на максималния поток. Втората задача е за най-ниска цена на поток, цената е параметър, който дава приоритет на превозите по железопътен транспорт чрез преразпределение на компонентите на максималния поток.

Задачата е от вида:

$$\min_{f_{st}} \text{cost\_distribution} \equiv f_{ji}^* = \arg\{\min_{f_{st}} [(c_{ij}, f_{ij}) + (c_{kl}, f_{kl})]\}$$

$$i, j \in \text{rail transport}, k, l \in \text{bus transport}$$

$$\sum_{j \in A(j)} f_{ij} - \sum_{j \in B(j)} f_{ji} = \begin{cases} 0, & i \neq s, t \\ f_{st}^*, & i = s \\ -f_{st}^*, & i = t \end{cases} \quad (2.7)$$

$$f_{ij} \leq v_{ij}, c_{ij} < c_{kl}$$

Приоритетното преразпределение към железопътен транспорт се прави чрез търсене на потокоразпределение с най-малка стойност, където стойността за прокарване на единица поток по железопътните дъги на транспортния граф е по-малка в сравнение със стойността за преминаване на автобусен поток по връзките на транспортния граф. Така вследствие от задавана по-малка стойност на потокоразпределението по железопътни линии ще се дава приоритет на използването на железопътния транспорт.

### **Глава 3. Приложение на йерархичния модел за оптимизация в управлението на интегрирана транспортна система**

В Глава 3 е приложен и оценен йерархичния модел за оптимизация като:

- Решена е дефинираната двуйерархична оптимизационна задача за управление.
- Определена е като решение големината на максималния поток между София и Варна.
- Определено е потокоразпределение даващо приоритет на влаковите превози
- Решението на йерархичната задача е сравнено с:

1. класическа оптимизационна задача за намиране на максимален поток
2. с модифицираната класическа оптимизационна задача с експертна оценка за потокоразпределение.

**3.1. Формални взаимодействия в йерархична задача за оптимизация.** Задачата за анализ на транспортна мрежа може да бъде дефиниран като при дадена топология на мрежа със стойности на капацитета на връзките на мрежата трябва да се определи колко е максималното количество поток между два възела, което може да бъде предавано през мрежата.[10, 11]

Аналитичната формулировка на задачата за максималния поток е представена във формата (3.1)

$$\max_{f_{ij}} [f_{st}] \quad 3.1 \text{ a)}$$

$$\sum_{j \in A(j)} f_{ij} - \sum_{j \in B(j)} f_{ji} = \begin{cases} 0, & i \neq s, t \\ f_{st}^*, & i = s \\ -f_{st}^*, & i = t \end{cases} \quad 3.1 \text{ b)}$$

$$a_{ij} \leq f_{ij} \leq v_{ij}, \quad (\forall i, j) \in N \quad 3.1 \text{ c)}$$

където  $i, j$  означава номер на възлите в мрежа с  $N$  възли;

- $A(i) \{j \in N\}$  набор от възли  $i$ , които инициират входящите връзки към възела в  $j$ , Фиг. 1a ;
- $B(i) = \{j \in N\}$  набор от възли  $i$ , които са свързани с изходящата връзка от възел  $j$ , Фиг. 1b ;
- $s$  и  $t$  означават начален и краен възел, между които се търси максималния поток, който може да се предаде през мрежата;
- $v_{ij}$  пропускателната способност на дъгите между възлите  $i$  и  $j$ ,  $(i, j) \in N$ ;
- $f_{ij}$  неизвестните потоци, които трябва да бъдат оценени като компонентите от максималния поток в мрежата.

Зависимостта (3.1b) описва закона за непрекъснатостта на потоците. Количеството на влизащия поток е равно на количеството на излизащия поток от един и същи възел. Зависимостта (3.1b) за началния и краен възли отразява, че в началния възел  $s$  излиза количество поток  $f_{st}$ , а в крайният възел  $t$  влиза същото количество поток  $f_{st}$ , което се отразява със знак минус [1]. Зависимост (3.1c) отчита физическо ограничение, че

потокът по дадена дъга не може да бъде по-голям от пропускателната способност на тази дъга. Целевата функция на оптимизационната задача (3.1a) формализира изискването за максимизиране на потока  $f_{st}$ , който започва от началния възел  $s$  и влиза в крайната точка  $t$ .

Решенията на задача (3.1) определят стойността  $f_{st}$  на максималния поток, който може да се предава между мрежата от  $s$  до  $t$ . Освен това, компонентите  $f_{ij}$  на максималния поток определят и пътищата, през които минават отделните компоненти на максималния поток в цялата мрежа. Следователно, при зададен капацитет на мрежовите дъги, задачата за максималния поток (3.1) дава количеството на потока, който може да премине през предварително дефинираната мрежова топология и пътищата на отделните компоненти, които съставят максималния поток.

Използването на тези две оптимизационни задачи, за анализ и синтез ще позволи в общ математически модел да се намери като решение такова разпределение на пътническите превози, при което железопътният транспорт ще има първостепенно значение и ще се интензифицира неговата експлоатация.

Свързването на двете задачи за анализ и синтез ще се изпълни в следната последователност. Задачата за анализ ще определи стойността на максималния поток, който може да се предаде в транспортната мрежа по направлението София – Варна. Като ограничения се отчита пропускателната способност на дъгите, определени от разписанията на автобуси и железопътен превоз по оценката за време за пътуване по дадена отсечка.

Задачата за синтез ще използва стойността на определения максимален поток като ограничение за обем необходим предаван трафик. В резултат ще се намери решение за потокоразпределение, което е с най-ниска цена и ще използва с предимство железопътния транспорт. Полученото потокоразпределение от задачата за синтез ще дефинира нови пропускателни способности на задачата за анализ.

Втората задача за синтез, която се използва в йерархичната задача за оптимизация, е дефинирана като "задача за намиране на потокоразпределение с най-ниска/минимална стойност". Тази задача определя разпределението на потоците в транспортната мрежа. При намиране на потокоразпределението с минимална стойност  $f_{ij}$   $i, j=1, \dots, N$  всеки поток  $f_{ij}$  по дъга  $ij$  определя минималната пропускателна способност  $v_{ij}$ , която трябва да има тази дъга. Затова решението  $f_{ij}$  на задачата за потокоразпределение се използва като параметър в задачата за анализ чрез равенството  $v_{ij} = f_{ij}$ .

Аналитичната форма на "задачата за потокоразпределение с най-ниска/минимална стойност" се дефинира като: [11]

$$\min_{x_{ij}} \sum_{ij \in A} c_{ij} f_{ij} \quad 3.2a)$$

$$\sum_{j \in A(j)} f_{ij} - \sum_{j \in B(j)} f_{ji} = \begin{cases} 0, i \neq s, t \\ f_{st}^*, i = s \\ -f_{st}^*, i = t \end{cases} \quad 3.2b)$$

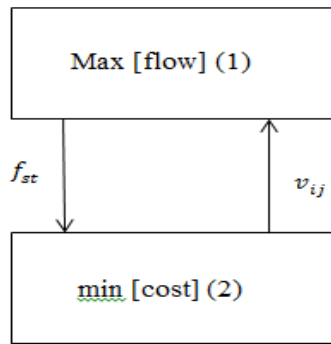
$$a_{ij} \leq f_{ij} \leq b_{ij}, \quad \forall i, j \in N \quad , \quad 3.2c)$$

където

- $f_{ij}$  са търсените стойности на потоците на дъгите между възлите  $i$  и  $j$  като решения на задачата за синтез;
- $c_{ij}$  са разходите за предаване на единичен поток между възли  $i$  и  $j$ ;
- $a_{ij}$  и  $b_{ij}$  са долните и горните граници на потока между възлите  $i$  и  $j$ ;
- $f_{st}$  е обемът транспортен поток, който трябва да се предава от възлите до  $t$  чрез минимизиране на транспортните разходи (3.2a).

Решението на (3.2) дава оптимално разпределение на потока  $f_{ij}$  при което през транспортната мрежа се прекарва  $f_{st}$  обем трафик. Стойностите на  $f_{ij}$  определят минималните пропускателни способности на дъгите чрез осигуряване на потокоразпределение с най ниска цена. Математическата обосновка на задача (3.2) е дадена в [3] В настоящата глава тази задача се прилага за да се определи топологията на потокоразпределението в транспортната мрежа като се дава предимство на железопътните превози в сравнение с автобусните. Този приоритет се задава като се използват по-ниски стойностни коефициенти за предаване на трафик по железопътни превози в сравнение с автобусните превози.

Работният йерархичен математически модел е представен графично на фиг. 3.2 . Дефинираната йерархичната оптимизационна задача решава едновременно, а не последователно, две задачи за оптимизация: чрез максимизиране на потока между два предварително дефинирани възела в мрежата (София и Варна) и извършва потокоразпределение, което дава приоритет на превозите с железопътен транспорт.



Фиг.3.2 Интегриране на оптимизационните задачи при двуйерархична оптимизация.

Инженерното съдържание на задачи (3.1) и (3.2) е, че първата задача осигурява предаването на максимален поток/обем трафик между два възела (София и Варна). Втората задача извършва оптимално разпределение на потока с минимални разходи, като дава приоритет на превозите с железопътен транспорт. При класическа оптимизационна задача, (3.1) ще определи като оптимално решение само стойността на максималния поток и преминаването на неговите компоненти по дъгите на транспортния граф, но няма да даде предимство за използване на железорътните участъци в транспортната мрежа. При класическа оптимизационна задача (3.2) ще се определи потокоразпределение с най-ниска цена и ще се даде предимство на железопътни превози, но стойността на необходимия за предаване поток  $f_{st}$  е предварително зададена стойност, а не получавано оптимално решение.

Интегрирането на тези две известни оптимизационни задачи в разработения йерархичен оптимизационен модел ще определи като оптимално решение едновременно и стойността на максималния поток и неговото разпределение в транспортната мрежа, като се даде предимство на използването на железопътните превози. Интегрирането на тези две задачи е направено съгласно приетия йерархичен модел от гл.2. Дефинира се и се решава двунивова йерархична задача за оптимизация (bi-level optimization), което е актуално направление в областта на оптимизацията в технически системи.

### 3.2. Решение на класическа оптимизационна задача за максимален поток.

Аналитичният вид на задачата за намиране на максималния поток между два възела в транспортния граф е от вида (3.1). Дефинираната оптимизационна задача в аналитична форма като "задача с максимален поток" е от вида на линейно програмиране. Като ограничения на оптимизационната задача са дефинирани изискванията за запазване на

потока, преминаващ през даден възел, (3.1b). За началния възел София, който е отбелязан с номер 1 ( $s$ ) и крайния възел - гр. Варна, който е отбелязан с номер 17 ( $t$ ) уравненията за запазване на потока съдържат променливата с неизвестна стойност за максималния поток  $f_{st}$ .

Уравнението за запазване на потока за началния възел София,  $s = 1$  е:

$$f_{1,2} + f_{1,3} + f_{1,4} + f_{1,5} + f_{1,9} + f_{1,11} + f_{1,15} + f_{1,13} - f_{st} = 0.$$

където  $f_{i,j}$  е потокът между възли  $i$  и  $j$ .

▪ уравнение за запазване на потока за възел 2 е:

$$f_{1,2} - f_{2,3} - f_{st} = 0.$$

▪ уравнение за запазване на потока за възел 3 е:

$$f_{2,3} - f_{3,4} + f_{1,3} - f_{st} = 0.$$

Показани са уравненията на три от общо 17 възела.

Целевата функция на задачата за максимален поток е да се максимизира стойността  $f_{st}$ ,

$$\max_{f_{st}, f_{ij}, j=1, N} (f_{st}) \quad 3.4$$

Така дефинирана задача за максимален поток е числено определена. Тя съдържа 44 променливи и общо 61 ограничения. От тези ограничения 17 отчитат непрекъснатостта на потока в 17-те възли на графа и 44 ограничения са за спазване на пропускателните способности на дъгите в графа.

Решаването на задачата за „максимален поток“ е направено, чрез използване на програмния продукт MATLAB. В стандартната си конфигурация този програмен продукт не съдържа средства за решаване на задачата за „максимален поток“. За това авторският колектив адаптира допълнителен програмен модул, който е добавка интегрирана в средата на MATLAB, чрез която може да се реши нужната задача. Добавката се състои в нова функция, която е наименована `graphmaxflow` [23]. Тази функция приема необходими входни параметри и изчислява стойността на максималния поток и дъгите, по които минават компонентите на максималния поток.

Функцията изчислява максималния поток и минималното сечение с помощта на алгоритъмът на Бойков-Колмогоров.[23]

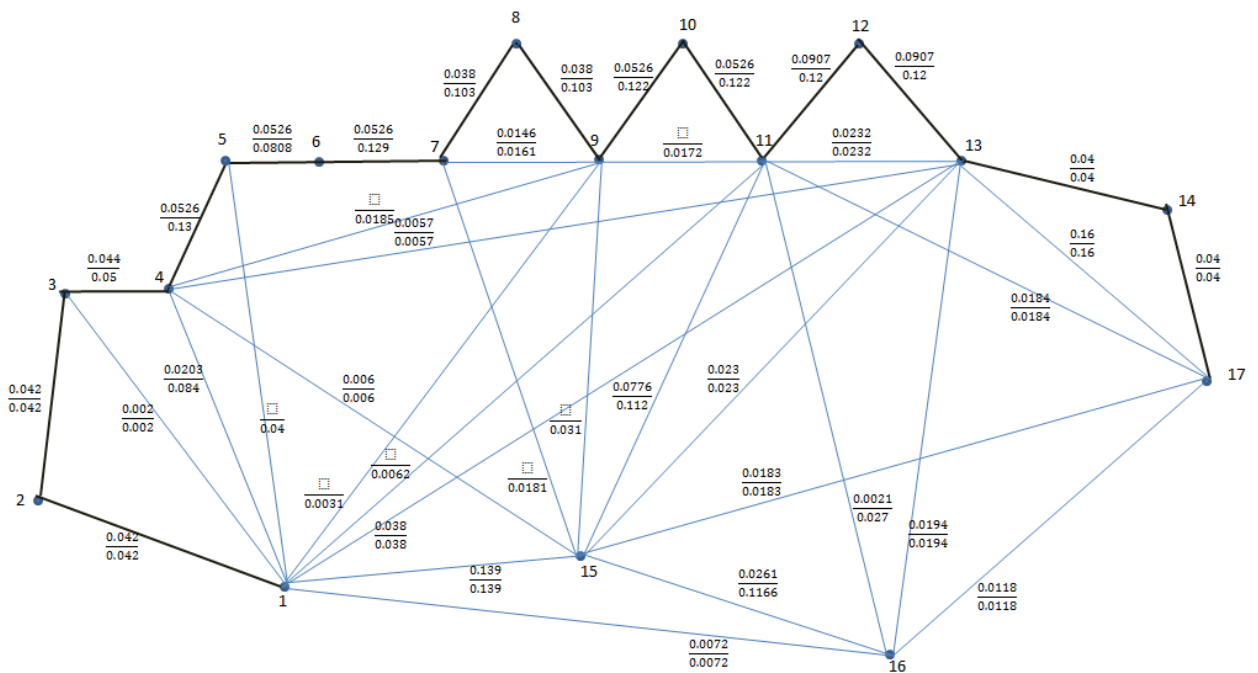
Решаването на задачата за максимален поток чрез специализираната функция на Matlab, `graphmaxflow` се получава стойността на максимален поток 0.2960. Използваните данни за натоварването на транспортната система са с данни за 2016 и 2017г.



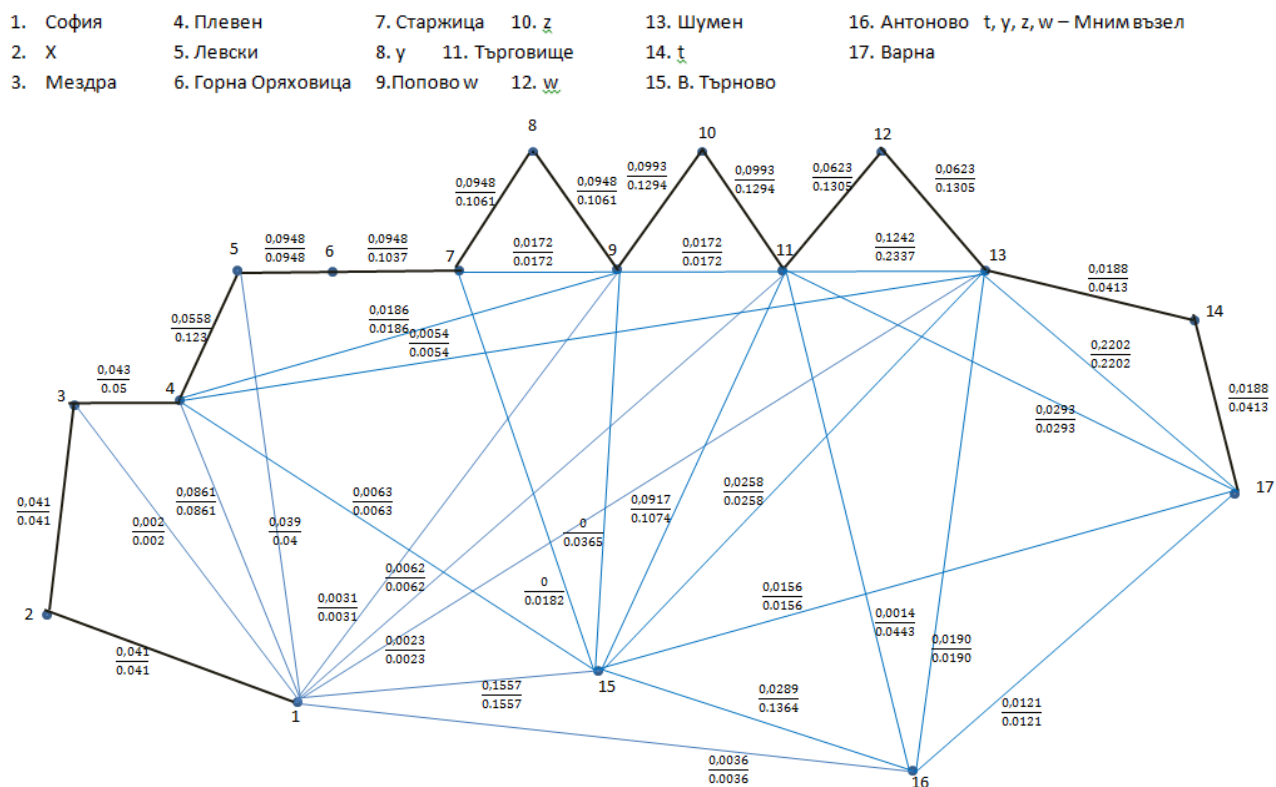
Параметърът *flowmatrix* показва стойността на капацитета на всяка дъга на на автобусните и железопътни превози. Получените решения са представени в графичен вид. По дъгите на възлите са нанесени като дроб две числа. Знаменателят на дробта е изчислената пропускателно способност на тази дъга съгласно разработения алгоритъм от гл.2 на дисертационния труд. Числителят на дробта е решението на задачата за максимален поток. Това число показва каква част от тази дъга се използва от компонентите на максималния поток при тяхното преминаване от началната до крайната точка.

В графичен вид решението на задачата за „максимален поток е представено на фиг.3.5 и фиг.3.6. Напревени са изчисления за 2016г. (фиг.3.5) и за 2017г. (фиг.3.6). Тъй като разписанията на влаковете и автобусите за различни за всяка година. От където максималният поток и пропускателните способности са различни.

- |           |                    |             |               |                |                                      |
|-----------|--------------------|-------------|---------------|----------------|--------------------------------------|
| 1. София  | 4. Плевен          | 7. Старжица | 10. z         | 13. Шумен      | 16. Антоново t, y, z, w – Мним възел |
| 2. X      | 5. Левски          | 8. y        | 11. Търговище | 14. t          | 17. Варна                            |
| 3. Мездра | 6. Горна Оряховица | 9. Попово w | 12. w         | 15. В. Търново |                                      |



Фиг.3.5. Графично представяне на решението на задачата за максимален поток за 2016 г.



Фиг.3.6. Графично представяне на решението на задачата за максимален поток за 2017 г.

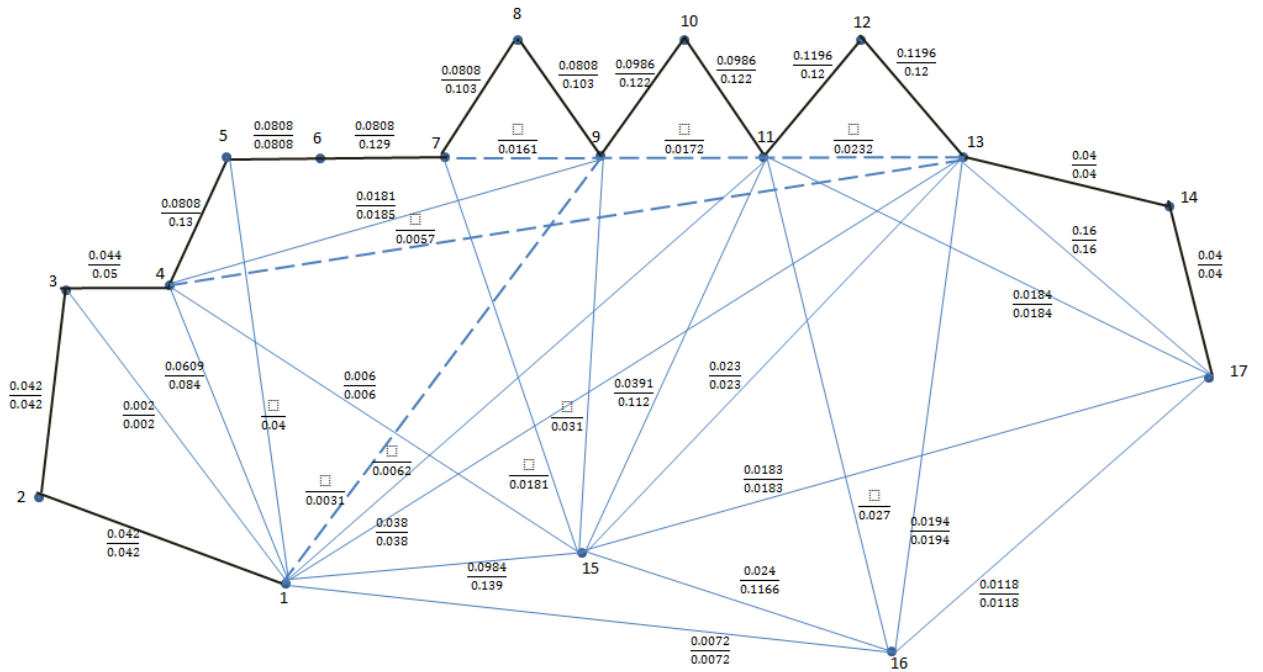
Сравняването на резултатите от фиг. 3.5 и фиг. 3.6 показва, че измененията в разписанията на влаковете и автобусите влияе на решаването на задачата за максимален поток и преразпределението на този поток по железопътните и автобусни линии в транспортната мрежа.[5, 6]

### 3.3. Експертно изменение на решенията на класическата оптимизационна задача за интензифициране на пътническите превози по железопътните участъци.

Графично представеното решение от фиг.3.6 на този случай показва, че съществува неизползван капацитет на железопътни връзки. От полученото решение на фиг.3.6 чрез експертно мнение може да се избере ограничаване или премахване на линии в графа, поддържани от автобусни линии. Така се ограничава съответната пропускателна способност на дъгите от транспортния граф, поддържани с автобуси.

Едно примерно решение е показано на фиг.3.7.

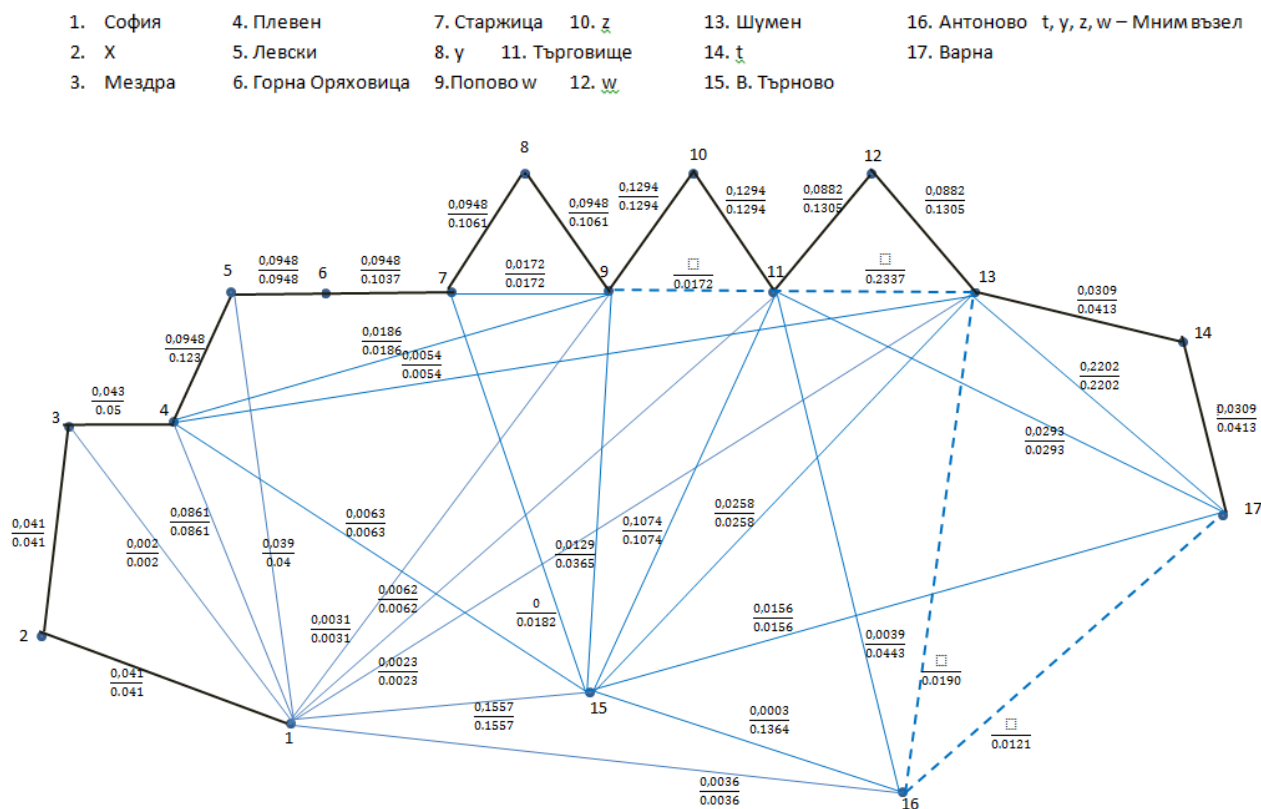
- |           |                    |               |               |                |  |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|----------------|--|
| 1. София  | 4. Плевен          | 7. Старжица   | 10. $z$       | 13. Шумен      | 16. Антоново $t, y, z, w$ – Мним възел |
| 2. Х      | 5. Левски          | 8. $y$        | 11. Търговище | 14. $t$        | 17. Варна                              |
| 3. Мездра | 6. Горна Оряховица | 9. Попово $w$ | 12. $w$       | 15. В. Търново |  |



Фиг.3.7. Даване приоритет на железопътните пътнически превози, чрез експертно мнение за премахване на автобусни линии за 2016 г.

В този случай субективно са премахнати връзките, поддържани от автобуси и дублиращи железопътните линии по направления: 7-9 (Старжица - Попово), 9-11 (Попово - Търговище), 11-13 (Търговище - Шумен). Субективен е и избора за премахване на връзките 1-9 (София - Попово) и 4-13 (Плевен - Шумен), поддържани от автобусни линии. При тази нова топология решението на задача (3.1) дава ново разпределение на максималния поток, съгласно фиг.3.7.

Този начин на даване на приоритет на железопътните превози може да се прилага при отчитане на допълнителни данни или ограничения, които не се отчитат понастоящем чрез разписанията на движение на автобуси и влакове. Полученото решение на фиг.3.6 е използвано за оценка на новия оптимизационен модел за отчитане на йерархична оптимизация.(фиг. 3.8). [19, 20]



Фиг.3.8. Даване приоритет на железопътните пътнически превози, чрез експертно мнение за премахване на автобусни линии за 2017 г.

**3.4. Решение на двуйерархична оптимизационна задача.** Редица практически задачи за оптимизация имат двунивова йерархична структура. Общото в тях е, че от горното йерархично ниво в резултат на решаване на оптимизационна задача се определят оптимални стойности, които стават параметри за долното йерархично ниво, където на свой ред се решават други оптимизационни задачи, в които се използват параметрите, определени от горното ниво.

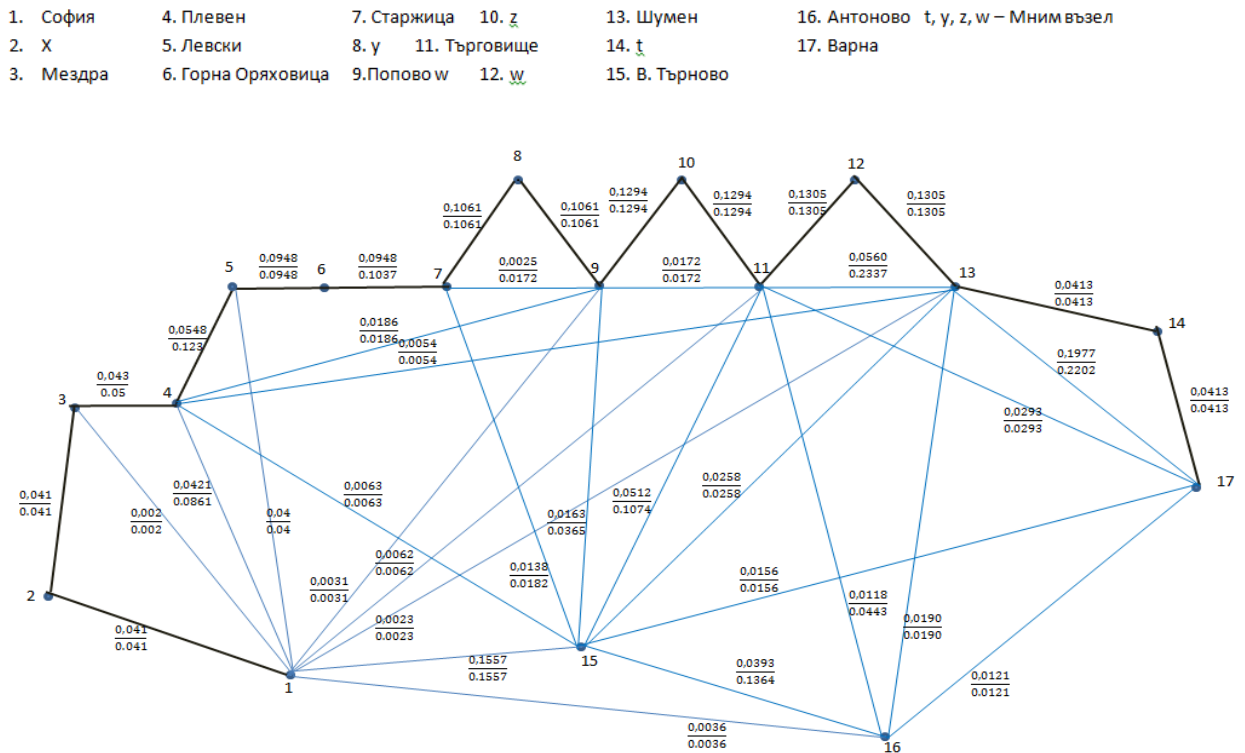
Задачата на горно йерархично ниво изчислява размера на максималния поток, който може да се транспортира между възли 1 (София) и 17 (Варна) при зададени пропускателни способности на дъгите в транспортния граф, задача (3.1). Компонентите на максималния поток трябва да спазват първоначалните ограничения на капацитета на връзките, оценени както е показано на фиг.2.11. В резултат стойността на максималния поток се предава като параметър на долната оптимизационна задача. Тя е дефинирана като задача за синтез, която определя оптимално потокоразпределение в транспортния граф. Обемът трафик, който трябва да се предаде, е стойността на максималния поток, определен от горна оптимизационна задача. Потокоразпределението се прави като се

зададе приоритет на железопътните превози. Приоритетът се дава чрез определяне на по-малки стойности за цената за предаване на единица поток по железопътните дъги на графа в сравнение с автобусните дъги на графа. Аналитичният вид на тази задача за най-ниска стойност на потокоразпределението е от вида (3.2).

Решенията на долната йерархична задача (3.2) влияят върху пропускателните способности на дъгите в задача (3.1). Така, двете оптимизационни задачи са взаимосвързани като решенията на едната оптимизационна задача влияят върху ограниченията на другата оптимизационна задача и съответно решенията на втората оптимизационна задача влияят на ограниченията на първата оптимизационна задача

Численото решаване на оптимизационната задача е направено в програмната среда MATLAB. Системата от изчисления прилага специализирана функция за решаване на двунивови йерархични задачи, *solvebilevel()*. Тази функция не влиза в конфигурацията на програмната система MATLAB . [24, 25]

След числено решаване на двунивовата йерархична оптимизационна задача е получено решение за оптималната стойност на максималния поток между София и Варна и е определено оптималното потокоразпределение, което дава приоритет на превозите с железопътен транспорт. Решението на двунивовата йерархична задача е представено на фиг.3.10.



Фиг.3.10. Графично представяне на решението на дуйерархичната задачата за 2017 г.

Анализът на решенията от модела без йерархична оптимизация от фиг. 3.6. и случая на модел с йерархична оптимизация от фиг. 3.10 показва, че решението от фиг. 3.10. преразпределя елементите на максималния поток по железопътните дъги на транспортния граф.

- Потокът между възли София-Плевен, поддържан от автобусен транспорт намалява от 0.0861 до 0.0421.
- Потокът между възли В. Търново-Търговище, поддържан от автобусен транспорт намалява от 0.0917 до 0.0512.
- Потокът между възли Шумен-Варна, поддържан от автобусен транспорт намалява от 0.2202 до 0.1977. [4, 5, 6, 18]

Но решенията на йерархичната оптимизация съдържат не само намаление на поток по автобусни линии, но и по места има увеличение. Например:

- Потокът по линия между възли В. Търново-Стражица, поддържан от автобусен транспорт нараства от стойност 0 на 0.0138.
- Потокът по линия между възли В. Търново- Попово, поддържан от автобусен транспорт нараства от стойност 0 на 0.0163.
- Потокът по линия между възли Антоново-Търговище, поддържан от автобусен транспорт нараства от стойност 0.0014 на 0.0118.

**3.5. Анализи и сравнения на получените резултати.** Анализирани са особеностите, предимства и недостатъци на разработени нейерархичен и йерархичен модел на оптимизация за интензифициране на пътническите превози, изпълнявани с железопътен транспорт.

Първи критерий за оценка. Сравнението и оценката на двата модела, нейерархичен и йерархичен се оценяват количествено по следния начин. Общата стойност на капацитетите на линиите в мрежата, изпълнявани от железопътен транспорт от София до Варно е изчислен като:

$$TOTAL_{rail} = v_{1,2} + v_{2,3} + v_{3,4} + v_{4,5} + v_{5,6} + v_{6,7} + v_{7,8,9} + v_{9,10,11} + v_{11,12,13} + v_{13,14} + v_{14,17} = 0,8198 [\text{относителни единици за пропускателни-способности}]$$

Частта от максималния поток, която преминава по линии, изпълнявани от железопътния транспорт се изчислява като:

$$Part\_MAX\_FLOW_{rail}=f_{1,2}+f_{2,3}+f_{3,4}+f_{4,5}+f_{5,6}+f_{6,7}+f_{7,8,9}+f_{9,10,11}+f_{11,12,13}+f_{13,14}+f_{14,17}$$

[относителни единици за поток].

Решенията за потокоразпределение  $f_{ij}, i,j=1,\dots,N$ , което се получава от решаването на нейерархичната задача и йерархичната задача дефинират стойности на частта на максималния поток, изпълняван от железопътен транспорт както следва:

- За нейерархичния модел:  $Part\_MAX\_FLOW_{rail}(single\ optimization)=0.6036$  отн. ед.
- За модела със субективно определяне на приоритети за железопътните линии:  $Part\_MAX\_FLOW_{rail}(subjective\ optimization) = 0,8365$ . отн. ед.
- За йерархичния модел:  $Part\_MAX\_FLOW_{rail}(bi-level\ optimization)=0,7357$ . отн. ед.

Относителният дял на максималния поток, предаван по железопътните връзки в транспортната мрежа за двата оптимизационни модела се изчислява като се раздели частта от максималният поток, която преминава по железопътните линии за двата модела, на общата част от максималният поток за железниците в транспортния граф. Резултатите от изчисленията са дадени в таблица 3.1.

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(single\ optimization)}{TOTALrail}$$

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(manual\ single\ optimization)}{TOTALrail}$$

$$\frac{Part\_MAX\_FLOW_{rail}(bi - level\ optimization)}{TOTALrail}$$

Резултатите от изчисленията са представени в таблица 3.1.

| Метод                    | Класическа оптимизация | Модифицирана класическа оптимизационна задача | Bi-level оптимизация |
|--------------------------|------------------------|---|----------------------|
| % на използване на Ж. П. | 73.64%                 | 83.74%  | 89.74%               |

Това сравнение показва предимствата от прилагане на йерархичния модел на оптимизация. Стойността на максималния поток, който може да се предаде от София до Варна е еднакъв и за трите модела, но йерархичният модел дава значителен приоритет

на потокоразпределение, което използва с предимство железопътен транспорт, фиг.3.12



Фиг.3.12. Сравнения и предимства на йерархичния модел за оптимизация

Графичното представяне на резултатите, за различните методи, показващи колко процента от максималният поток на общия транспортен граф се поема от железопътните линии. Фиг. 3.12. Вижда се, че поемането на максималният поток се увеличава от 73,62% до 89,74%, при йерархичната оптимизация поемането на максималният поток от железопътните превози се увеличава с 13,10%.

Втори критерий за оценка. Едно допълнително сравнение и оценка на разработените оптимизационни модели е направено на фиг.3.13. Избрани са три дъги от транспортната мрежа, които се обслужват от железопътен транспорт:

- Попово(възел 9) –Търговище(възел 10),
- Търговище(възел10)- Шумен(възел 11),
- Шумен(възел 11) –Варна(възел 17).

За всяка от тези дъги е направена оценка и сравнение от прилагането на три управляващи стратегии:

1. *Стратегия 1: прилагане на класическа оптимизация с резултати от фиг.3.6.*  
Числителят в първото дробно число е големината на частта на максималния поток, който преминава през съответната линия в графа. Знаменателят е текущата пропускателна способност на тази линия
2. *Стратегия 2: прилагане на модифицирана класическа оптимизация фиг.3.8.*



Числителят на второто дробно число отново показва големината на частта на максималния поток, който преминава през тази линия на графа.

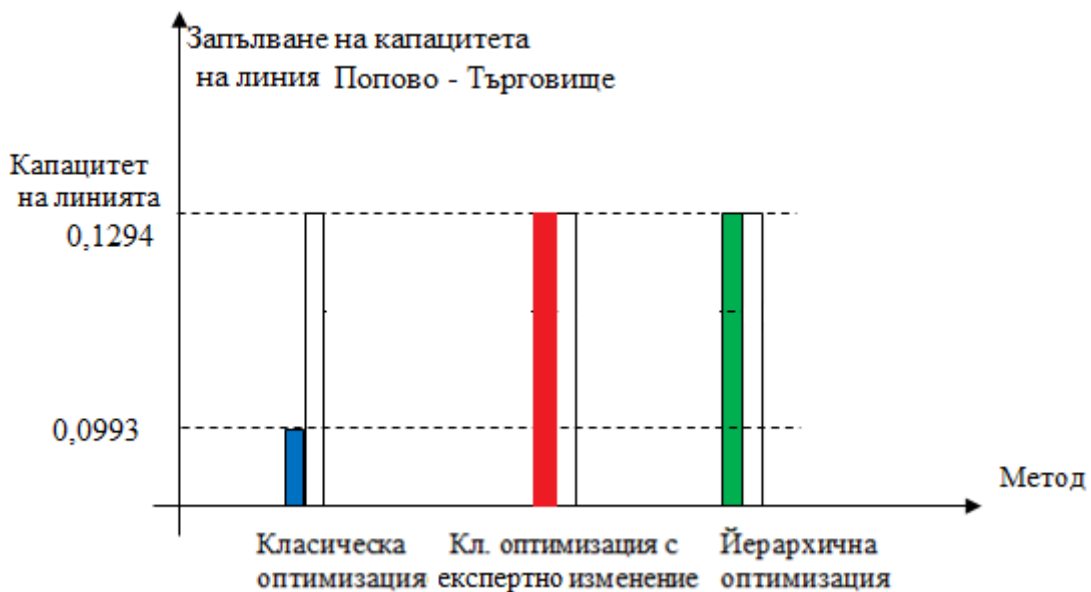
3. Стратегия 3: прилагане на йерархична оптимизация, която дава приоритет на всички железопътни връзки в графа с резултати от фиг.3.10.

Числителят на третото дробно число показва и за този случай големината на частта на масималния поток през тази линия на графа.



Фиг. 3.13. Сравнение на стойностите на частта на максималния поток между дефинирани дъги на транспортната мрежа от три модела.

Графично представяне на направеното сравнение от прилагането на три управляващи стратегии за участъка Попово - Търговище. Фиг. 3.14.

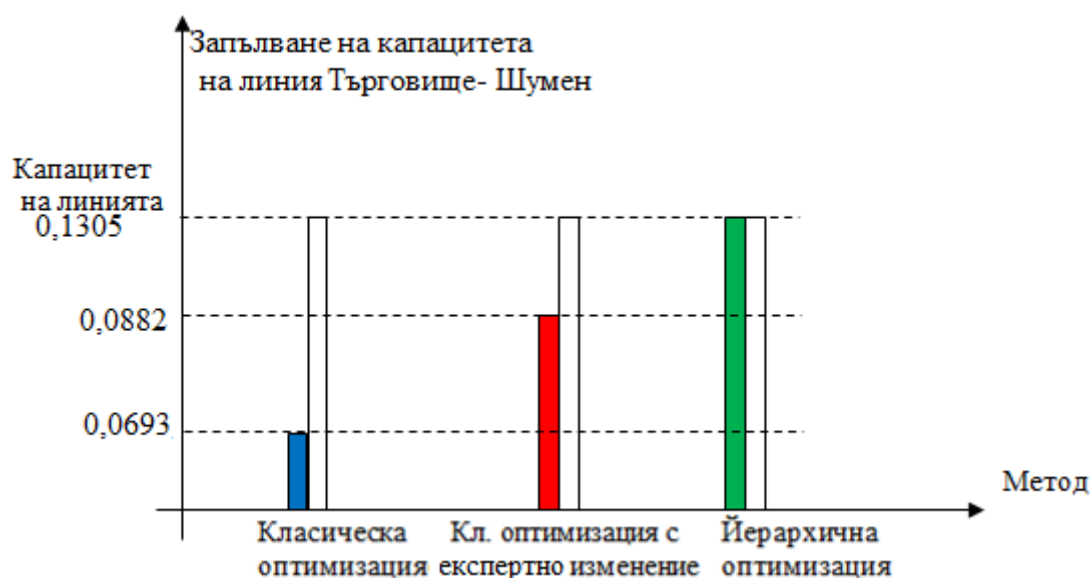


Фиг.3.14. Сравнения и предимства на йерархичния модел за оптимизация за линия

Попово- Търговище.

С йерархичната оптимизация капацитета на линия Попово- Търговище се запълва 100%, както и с класическата оптимизация със субективно даване на приоритети, докато с класическата оптимизация капацитетът се запълва 76,73%.

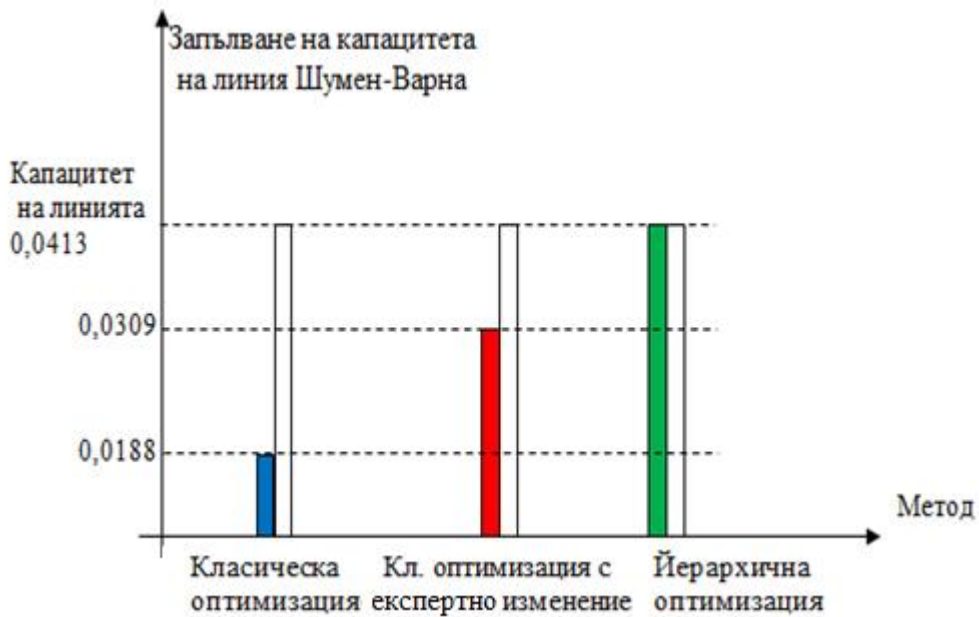
Графично представяне на направеното сравнение от прилагането на три управляващи стратегии за участъка Търговище - Шумен. Фиг. 3.15.



Фиг.3.15. Сравнения и предимства на йерархичния модел за оптимизация за линия Търговище-Шумен.

С йерархичната оптимизация капацитета на линия Търговище-Шумен се запълва 100%, докато с класическата оптимизация капацитетът се запълва 53.10% Класическата оптимизация със субективно определяне запълва капацитета 67,43%

Графично представяне на направеното сравнение от прилагането на три управляващи стратегии за участъка Шумен – Варна. Фиг. 3.16.



Фиг.3.16. Сравнения и предимства на йерархичния модел за оптимизация за линия Шумен-Варна

С йерархичната оптимизация капацитета на линия Шумен – Варна се запълва 100%, докато с класическата оптимизация капацитетът се запълва 45.52%. Класическата оптимизация със субективно определяне запълва капацитета 74.82%

Видно от представените данни от фиг.3.13 и за трите избрани линии на транспортния граф йерархичният модел на оптимизация дава приоритет и предимство на железопътните превози.

Така например, стойността на частта на максималния поток за линия 13-17 се увеличава от 0.0188 (нейерархичен модел), през 0.0309 (субективно даване на приоритети за ж.п.линии) до 0.0413 (йерархичен модел). Видно е, че йерархичният модел достига до пълно използване на капацитета на линия 13-17, изчислена на стойност 0.0413 (знаменателят на дробите).

Аналогични резултати се получават и за останалите две дъги на транспортния граф.

Направените сравнения и оценки доказват, че йерархичният модел за оптимизация дава приоритет на превозите на железопътния транспорт. Приоритетът се постига чрез изпълнение на потокоразпределение, използващо с предимство дъги в транспортния граф, реализирани от ж.п. транспорт.

### **Заклучение.**

Общественият железопътен транспорт е важен фактор за развитието на интелигентните транспортни системи. Железопътният транспорт дава предимства свързани с ефективността при експлоатацията, подобряването на логистичните услуги, намаляването на замърсяването. Обект на изследването е клас транспортна система, която интегрира пътнически превози изпълнявани от железопътен и автобусен транспорт. Целта на този дисертационен труд е да се разработи такъв алгоритъм за управление на пътническите превози, при който да се даде приоритет на железопътния транспорт в сравнение с автобусния транспорт. Задачите, които са дефинирани и решени, използват данни, идващи от настоящата практика в България, свързани с пътническия транспорт както с железопътен транспорт, така и с автобуси. Поради липсата на пълен набор от данни за интензивността на пътническия транспорт това изследване използва само наличната информация от графици на автобусите и железопътния транспорт.

Тази дисертационна работа формализира задача за управление на железопътните превози чрез увеличаване на приоритета на железопътния транспорт. Описанието на тази задача е да осигури оптимално разпределение на железопътните транспортни услуги по предварително определена транспортна мрежа, по която се изпълнява и автобусен транспорт. Разработен е йерархичен модел за управление, който е формализиран до двуйерархична оптимизационна задача, която генерира решение за интензифициране на железопътния транспорт.

В йерархичната задача за управление горната задача максимизира потока, като спазва ограничения на пропускателните способности на дъгите в транспортната система. Стойността на максималния поток се използва като параметър в ограниченията на долната оптимизационна задача. Последната определя пропускателните способности на дъгите в транспортната система, които се прилагат като ограничения на горната оптимизационна задача. Така йерархичния модел за оптимизация се съставя като две взаимосвързани задачи, като всяка от тях изменя ограниченията на другата.

Йерархичто дефинираните оптимизационни задачи са взаимно свързани, като решението на горната задача дефинира параметри в долната задача и обратно. Като резултат йерархичната оптимизация, дава решение както за железопътния, така и за автобусния транспорт и взема предвид изискванията за подобряване и отдаване на приоритет на железопътния транспорт в обща транспортна мрежа. Получените решения на йерархичната оптимизационна задача допълнително установяват в кои участъци на

транспортната система трябва да се подобри железопътната инфраструктура, или интензифициране на железопътния трафик.

Дисертационният труд разработва алгоритъм за управление на сложна транспортна система и алгоритъм за подготовка на данни. Изследването не съдържа резултати за разработване на числени алгоритми за решаване на двуйерархични оптимизационни задачи или на задачите, използвани в йерархичния модел. Резултатите на дисертационния труд допринасят за увеличаване на приложната област на йерархичната оптимизация, която се характеризира със сложен-формализъм.

Чрез увеличаване на нивата на оптимизация и формалното съдържание на задачите на различни нива, може да се очаква допълнителни ползи за управлението на железопътния транспорт. Понастоящем йерархични модели с повече нива няма практически реализации, поради увеличаването на изчислителното време, необходимо за решаване на йерархични задачи с повишена размерност.

Изследователските резултати от дисертационните изследвания включват разработване на нов модел на управление, формализиран до йерархична система за управление. Практическото използване на дисертационните резултати е предназначено за управление на железопътни пътнически превози чрез изменение на графици и за управление на процеса на издаване на лицензи за пътнически автобусни превози.

### **Приноси на дисертационния труд**

1. Разработен е йерархичен модел за управление на интегрирана транспортна система (автобусни и железопътни пътнически превози) . Моделът трябва да дава приоритет на железопътните пътнически превози в сравнение на автобусния транспорт;
2. Йерархичният модел използва предимства на йерархичния подход като е приложен изследователски подход за композиране на йерархичния модел чрез взаимно свързани оптимизационни задачи;
3. Разработване на алгоритъм за количествено определяне на параметрите на йерархичната задача за управление в условия на ограничени изходни данни за пътническите превози чрез въвеждане на условни пропускателни способности;
4. Дефинирана и е решена двуйерархична (bi-level) оптимизационна задача. Оценката на решенията показва че повече параметри на транспортната система се определят като оптимални в сравнение с класически оптимизационни задачи;

Разработеният йерархичен модел е внедрен за проектирането на алгоритъм за управление на клас интегрирана транспортна система, изпълняваща пътнически превози с железопътен и автобусен транспорт. Научни и научно – приложни резултати на дисертационния труд са приложени при разработването на договор договор № 134/20.06.2016г. “Български Държавни Железници – Пътнически Превози” ЕООД

Таблица 3.1. показва връзката между резултатите, структурата на дисертационни труд и направените публикации.

| Задача   | Тип принос      | Публикация | Глава |
|--|-----------------|------------|-------|
| Разработване на йерархичен модел за управление                               | Научен          | 1,3,4      | 2     |
| Композиране на йерархичния модел чрез взаимно свързани оптимизационни задачи | Научен          | 1,2,5,6    | 2     |
| Разработване на алгоритъм за количествено определяне на параметрите          | Научно-приложен | 1,3,4,5    | 2     |
| Дефиниране и решаване на опт. задача и оценка на получените решения          | Научно-приложен | 5, 6       | 3     |
| Приложение на йерархичния модел  | Приложен        | 2,5,6      | 3,2   |

#### **Бъдещо развитие:**

- Увеличаване размерността на интегрирана транспортна система с повече части от Републиканската Транспортна Схема.
- Дефиниране на нови алгоритми за управление при отчитане на допълнителни данни за налични ресурси на подвижен железопътен състав и технологични изисквания за експлоатацията на железопътния транспорт.

- В следствие на повишените размерности на йерархичните задачи, да се разработят нови числени алгоритми за тяхното решаване.

#### **Публикации:**

1. Kristina Pavlova, Todor Stoilov, Krasimira Stoilova – „Bi-level model for public rail transportation under incomplete data“ . Journal “Cybernetics and Information Technologies”. ISSN Print: 1311-9702 , ISSN Online: 1314-408, SJR 0,2 (Приета за публикуване).
2. Kristina Pavlova, Todor Stoilov- „Mathematical model for increasing the efficiency of passenger railway transport in Bulgaria“, X international conference for young researchers, Technical science & Industrial management, 12 – 15.12.2016 Borovets, Bulgaria, International scientific journal, National society ”Industrial & National Security”, ISSN PRINT 2367-8380, ISSN WEB 2534-8485, стр. 10-13
3. К. Павлова – „Разработване на математически модел за интензифициране на пътническите железопътни превози за републиканската транспортна схема“, сп. „Българска Наука“, ISSN: 1314-1031 стр 50-55
4. К. Павлова, Т. Стоилов – “Приложение на задачата за максимален поток при проектиране на железопътна транспортна схема”, International Conference: Automatics and Informatics’2016, гр. София, 4-5 октомври 2016г PROCEEDINGS: ISSN 1313-1850 CD: ISSN 1313-1869 стр. 103-106
5. К. Павлова Т. Стоилов - „Моделиране на пътнически превози от кобинирана железопътна и автобусна транспортна схема”, Четиринадесета национална младежка Научно-практическа конференция, гр. София, 19 – 20 април 2016 г. ISSN: 1314-8931, стр. 41-46.
6. Kristina Pavlova, Todor Stoilov – “Application of bi-level optimization for increase of rail public transportations. International Conference: Automatics and Informatics’2017, PROCEEDINGS: ISSN 1313-1850 CD: ISSN 1313-1869 (приета, служебна бележка)

#### Изнесени доклади на конференции:

1. К. Павлова, Т. Стоилов- “Анализ на капацитета на железопътните пътническите превози за направление София-Варна”, Научно- техническа конференция „Младежки форум – 2016“ , на тема: „ Младите хора в транспорта - обучение, предизвикателства, перспективи“, 10 - 11.05. 2016 г.

Извадка от вътрешния правилник на ИИКШ-БАН за защита на образователно-научната степен „доктор”.

чл. 3., т. 1.1. ИИКТ: Дисертацията на кандидата трябва да е базирана на поне три научни публикации, поне една от които да е в списание с импакт фактор или в специализирано международно издание.

#### **Цитиране:**

- К. Павлова, Т. Стоилов. ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЗАДАЧАТА ЗА МАКСИМАЛЕН ПОТОК ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА ЖЕЛЕЗОПЪТНА ТРАНСПОРТНА СХЕМА. Сборник трудове на международната конференция "АВТОМАТИКА И ИНФОРМАТИКА", 4-5 октомври 2016, N ISSN 1313-1850, 103-106.
- 1. Иванов В. Измерване на характеристики на транспортен трафик. Proceedings of Trans&MOTAUTO'2017, 26.6-1.07.2017, Burgas, Bulgaria, ISSN 1313-5031 (Print), ISSN 2535-0307(online), yer1, issue 2(2), Sofia, Bulgaria, p.12-115.

#### **Участие в проекти:**

1. Договор ДФНП № 98 от 04.05.2016 год. Българска Академия на Науките. „Създаване на математически модел за интензифициране и оптимизиране на пътническите железопътни превози в участък на Републиканската Транспортна Схема“.
2. Договор № 134/20.06.2016г. “Български Държавни Железници – ПЪТНИЧЕСКИ ПРЕВОЗИ” ЕООД. „Разработване на математически модел за интензифициране на пътническите железопътни превози за участък на Републиканската Транспортна Схема“,

#### **Използвана литература**

1. Camacho-Vallejo, J. F., Á. E. Cordero-Franco, R. G. González-Ramírez. Solving the bilevel facility location problem under preferences by a Stackelberg-evolutionary algorithm, - Mathematical Problems in Engineering, vol. 2014, 2014, Article ID 430243, 14 pages.
2. Fudenberg, D., J. Tirole. Game theory. MIT Press, 1993.



3. Gomory, R. E. , T. C. Hu. Multi-Terminal Network Flows. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 9, No. 4 (Dec.,1961), pp. 551-570
4. Kristina Pavlova, Todor Stoilov- „Mathematical model for increasing the efficiency of passenger railway transport in Bulgaria“, X international conference for young researchers, Technical science & Industrial management, 12 – 15.12.2016 Borovets, Bulgaria, International scientific journal, National society ”Industrial & National Security”, ISSN PRINT 2367-8380, ISSN WEB 2534-8485, стр. 10-13
5. Kristina Pavlova, Todor Stoilov, Krasimira Stoilova – „Bi-level model for public rail transportation under incomplete data“ . Journal “Cybernetics and Information Technologies”. ISSN Print: 1311-9702 , ISSN Online: 1314-408, SJR 0,2 (Приета за публикуване).
6. Kristina Pavlova, Todor Stoilov – “Application of bi-level optimization for increase of rail public transportations. International Conference: Automatics and Informatics’2017, PROCEEDINGS: ISSN 1313-1850 CD: ISSN 1313-1869 (приета, служебна бележка).
7. Künzi, H. P., W. Krelle. Nichtlineare Programmierung. Berlin: Springer – Verlag, 1962, 303p
8. Lasdon, L. Optimization Theory For Large Scale System. Mcc. Milan, N.Y., 1970
9. Meserovic, M., D. Macko, Y. Takahara. Theory of hierarchal multilevel sysrem, N.Y., Academic Press, 1970
10. Papavassilopoulos, G. (1982). Algorithms for static Stackelberg games with linear costs and polyhedral con- straints. In *Proceedings of the 21st IEEE Conference on Decisions and Control* (pp. 647–652).
11. R. E. Gomory and T. C. Hu . Multi-Terminal Network Flows. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, Vol. 9, No. 4 (Dec.,1961), pp. 551-570
12. Singh, M., A. Titli. Systems: Decompozitions, Optimization And Control. Pergamon Press 1978
13. Terlikowski, T. Concept Of Two Layer Control- Attempt To A General Formal Description. – In: IFAC/IFORS Symposium On Large Skale System ,1, Zurich, Switxerland, 1986
14. Thomas Leo Mccluskey, Apostolos Kotsialos, Jorg P. Müller, F. Klügl, O. Rana, R. Schumann. Autonomic Road Transport Support Systems. Birkhüuser, 2012, 304p
15. Williams, Th. Herirachical Control For Large Skale Systems- A Survey. – In: Proceedind Of 7th World IFAC Cogres, Helsinki, Finland, Perg. Press, 3, 1979, 1393-1406

16. Wu, T., Y. Lu. A Feasible Interaction Prediction Approach To Large Scale Systems Optimal Control. – Large Scale Systems, 12, 1987, 35-46
17. Договор №134/2016 г. Между „БДЖ – Пътнически превози” ЕООД и Институт по информационни и комуникационни технологии” – БАН за консултантски услуги относно Разработване на математически модел за интензифициране на пътническите железопътни превози за участък на републиканската транспортна схема.
18. Иван Попчев, Йордан Запрянов, Стоян Марков. Йерархични Децентрализирани Системи за Управление. Държавно Издателство „Техника“. Сифия 1985, стр. 135
19. К. Павлова Т. Стоилов - „Моделиране на пътнически превози от кобинирана железопътна и автобусна транспортна схема”, Четиринадесета национална младежка Научно-практическа конференция, гр. София, 19 – 20 април 2016 г. ISSN: 1314-8931, стр. 41-46
20. К. Павлова, Т. Стоилов – “Приложение на задачата за максимален поток при проектиране на железопътна транспортна схема”, International Conference: Automatics and Informatics’2016, гр. София, 4-5 октомври 2016г PROCEEDINGS: ISSN 1313-1850 CD: ISSN 1313-1869 стр. 103-106
21. К. Павлова – „Разработване на математически модел за интензифициране на пътническите железопътни превози за републиканската транспортна схема“, сп. „Българска Наука“, ISSN: 1314-1031 стр 50-55
22. Първи отчет по договор Договор №134/2016 г. Между „БДЖ – Пътнически превози” ЕООД и Институт по информационни и комуникационни технологии” – БАН за консултантски услуги относно Разработване на математически модел за интензифициране на пътническите железопътни превози за участък на Републиканската Транспортна Схема. 2016 г.
23. [https://www.mathworks.com/help/bioinfo/ref/graphmaxflow.html?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/help/bioinfo/ref/graphmaxflow.html?s_tid=srchtitle)
24. <https://yalmip.github.io/command/solvebilevel>
25. <https://yalmip.github.io/tutorial/bilevelprogramming>

# Abstracts of Dissertations

Number 2, 2017

---

INSTITUTE OF INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES  
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

---

Брой 2, 2017

# Автореферати на дисертации