

Приложение на Клъстърен анализ за изследване на метросистемите

Светла Стоилова, Веселин Стоев

In the study has been done a research on technical and operational parameters of metro system. The study includes subways in European capitals. They are analyzed by statistical method and the graph theory. The SPSS software is used to make a research. The metro systems are classified in clusters.

Key words: metro systems, urban transport, transportation, cluster analysis, graph theory

ВЪВЕДЕНИЕ

Метросистемите са основен вид обществен пътнически транспорт в много градове по света. 76 европейски града имат метромрежи, които са големи или малки, и са напълно изградени или са с планирано бъдещо разширение. В Северна и Южна Америка функционират 51 метросистеми, в Азия – 65, в Африка – 3,, в Австралия – 1.

В световен мащаб метрополитенът е в три основни разновидности – класическо метро (около 70%), леки градски железници (леко метро) и автоматично метро. Класическото метро, наречено още „Underground“, „Subway“ или „U-Bahn“ е подземната железница в различните страни и градове на света. Наименованието „метрополитен“ (метро) е прието в много страни. То произлиза от името на компанията, която е построила първото метро в света, намиращо се в Лондон. При лекото метро трасетата се разминават на различни нива с останалите участници в движението. Електрическото захранване на влаковете, за разлика от класическото метро, при което се използва долна контактна релса, се извършва с контактна мрежа, както при трамваите. В Европа метрата в Ротердам, Франкфурт и Копенхаген са от този тип. Автоматичното метро е нова съвременна форма на градската железница, която все още няма голямо разпространение. В Европа линии от този тип функционират в Англия и Франция.

Обект на изследването са метросистемите в 23 града, които са разположени в столиците на държави в Европа. Целта на изследването е:

- Да се характеризират метросистемите в съответствие с показателите на транспортен потенциал, икономически показатели и показатели, които определят състоянието и структурата на метромрежата;
- Да се приложи Теория на графите за изследване на метромрежи;
- Да се приложи Клъстерен анализ за изследване и групиране на метросистеми.

ИЗЛОЖЕНИЕ

1. Фактори за анализ

Факторите за провеждане на изследването са показатели, определящи транспортния потенциал, себестойността на превоза и показатели, които определят състоянието и структурата на метромрежата. Факторите на транспортния потенциал характеризират вида, инфраструктурата, състоянието и структурата на метромрежата. Показателите, които определят състоянието и структурата на метромрежата зависят от схемата на метромрежата, броя на линиите, контактните пунктове за връзка между метролиниите. Факторите на транспортното съпротивление характеризират времепътуването, скоростта на движение, интервалите между метровлаковете и те няма да бъдат обект на изследване.

1.1. Основни фактори

Тези фактори характеризират вида и инфраструктурата на метромрежата; потенциала за пътувания на населеното място и себестойността на превозите с метрополитен.

А) Вид на метромрежата

Факторите, характеризиращи вида на метромрежата показват до каква степен тя е интегрирана в градската среда.

Основните показатели на метромрежата са:

- L е общата дължина на мрежата, km
- n_S е общият брой на станциите. Този показател отразява степента на локално покритие с метропревози. Метро мрежи с малка средна дължина на линиите и много станции имат висока степен на покритие.
- n_L е броят на метро линиите.
- l_n е средната дължина на една метролиния. Обикновено метромрежите с по-дълги линии обхващат и по-големи площи от територията на града.

$$l_n = \frac{L}{n_L}, \text{ km} \quad (1)$$

- l_s е средното разстояние между станциите, km

$$l_s = \frac{L}{n_S}, \text{ km} \quad (2)$$

- s_L е средният брой станции на една метролиния.
- A е площта на града, km².

Б) Инфраструктура

Тези показатели характеризират конструктивните особености на железният път и електрозахранването, и служат за оценка на начина на изграждане на метромрежата. Факторите, които характеризират инфраструктурата, са:

- G е междурелсовото разстояние, mm. Изследваните метросистеми са с различно междурелсово разстояние, като 1219 mm, 1524 mm, 1520 mm, 1435 mm. Линиите на Софийското метро са с междурелсово разстояние 1435 mm.
- T е типа на разположение на метролиниите, което може да бъде с ляво, дясно или смесено за различни линии.
- V е напрежението на електрозахранването, V. За изследваните метросистеми се различават следните видове: 600 V; 750 V; 825 V; 900 V; от 500 V до 600 V; от 600V до 750 V; от 650 V до 750 V; 1500 V. За Софийския метрополитен напрежението на електрозахранването е 900 V.
- P_w е типа на електрозахранването. Различават се следните видове: с долна контактна релса, с горна контактна мрежа или комбинация от двата вида по различни метролинии. Софийският метрополитен се захранва с долна контактна релса.

В) Потенциал и плътност на населеното място

Тези показатели характеризират степента на развитие на метромрежата и възможностите за пътувания на населеното място. Потенциалът на пътуванията с метро се измерва с числеността на населението на града и с превозените пътници. Плътността на населеното място показва каква част от общия брой превозени пътници и от показателите, определящи вида на метромрежата, се разпределят на един квадратен километър площ на града. Изследваните показатели са:

- P е броят на пътуванията с метрополитен за ден, хил.пътн./ден
- H е числеността на населението на града, бр. млн. жители
- P_H е въздействието на броя на пътуванията с метрополитен върху числеността на града (подвижност на пътуванията с метрополитен) и показва колко пътуванията за ден в метросистемата се падат на един жител на града.

$$P_H = P/H \quad (3)$$

- L_P е въздействието на дължината на метромрежата върху числеността на населението на града. Изразява се като съотношение на дължината на метромрежата и числеността на населението.

$$L_P = 1000 \cdot L/H, \text{ km}/1000 \text{ жители} \quad (4)$$

- P_L е броят на пътниците на километър дължина от метросистемата, млн. пътн./км.

$$P_L = P/L, \text{ млн.пътн./ km} \quad (5)$$

- N_D е плътността на метромрежата, km/km²

$$N_D = L/A, \text{ km}/\text{km}^2 \quad (6)$$

- P_A е плътността на пътуванията с метрополитен. Това е броят на пътниците на km² площ на града, млн. пътн./ km².

$$P_A = P/A, \text{ млн. пътн. / km}^2 \quad (7)$$

- n_A е плътността на метростанциите. Това е броят на метростанциите на km² площ на града.

$$n_A = n_s/A, \text{ станции}/\text{km}^2 \quad (8)$$

- l_A е плътността на метро линиите на km². Това е броят на метро линиите на km² площ на града.

$$l_A = n_L/A, \text{ линии}/\text{km}^2 \quad (9)$$

Г) Себестойност

Себестойността на превозите с метрополитен (F , евро/ден) е основен икономически показател и показва експлоатационните разходи, отнесени за един пътник за дневен период. Експлоатационните разходи включват разходите за амортизационни отчисления, за техническа експлоатация, за електроенергия, за заплати на машинисти и контролори, за здравно и социално осигуряване, за застраховки и данъци, и др.

1.2. Допълнителни фактори

За дефиниране на допълнителни фактори за изследване е приложена теорията на графите. Тези фактори определят състоянието и структурата на метромрежата.

1.2.1. Основни положения на теория на графите за изследване на метромрежи.

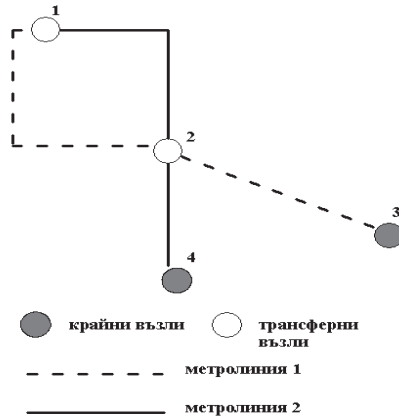
Теорията на графите позволява математическо представяне на транспортни мрежи. Графът е абстрактна структура и представлява мрежа от върхове (възли) (v), свързани по между си с дъги (ребра) (e). Чрез теорията на графите транспортната мрежа на метрополитена може да се представи във вид на граф, при което дъгите са връзките между две станции, а върховете са крайните или пресечните точки на графа.

Връзката (дъгата) е абстракция на транспортна инфраструктура, поддържаща движение между възлите. Дефинират се два вида възли на метромрежата: трансферни и крайни. Трансферните върхове са станции, където е възможно да се премине от една метролиния на друга без излизане от системата, независимо дали това се извършва на един перон или е необходимо преминаване през свързващи тунели и се изисква по-дълго пешеходно придвижване. Крайните върхове са места където завършва метролинията и не е възможно пресичане с друга метролиния. Ако

в краен връх завършват две или повече метролинии, този връх се приема за трансферен. Основен фактор за определяне на един връх като трансферен е наличието на възможност за смяна на метролинията.



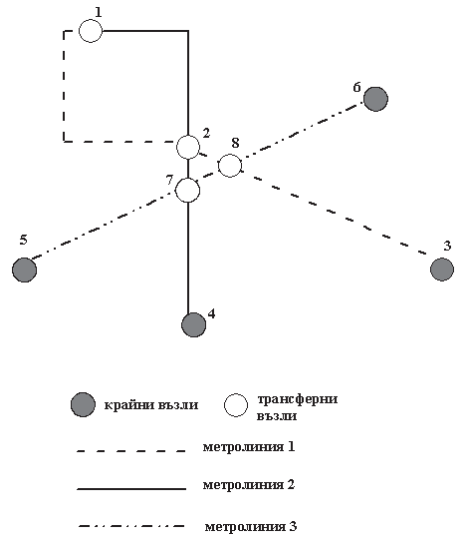
Фиг. 1. Карта на Софийското метро, 2013



Фиг. 2. Представяне на метромрежата на София във вид на граф



Фиг. 3. Карта на Софийското метро с планирано разширение



Фиг. 4. Представяне на метромрежата на София с планирано разширение (метролиния 3) във вид на граф

Дъгите на графа на метромрежата представляват ненасочени връзки между станциите. Дъгите на графа могат да се дефинират като два вида – единични e_s и множествени e_M . Единичните дъги показват, че върховете са свързани. Множествените дъги показват броя на връзките между два върха на графа.

Общият брой на дъгите e е сума от единичните и множествените дъги:

$$e = (e_S + e_M) / 2 \quad (10)$$

На фиг.1 е показана карта на Софийското метро, а на фиг.2 е направено представяне на Софийското метро във вид на граф. На фиг.3 са показани съответните планирани разширения на Софийския метрополитен, а на фиг.4 са отразени измененията в графовата структура.

1.2.2. Фактори, определени по теорията на графите

А) Състояние на метрорежата

Този показател показва текущото развитие на метрорежата. Схемите на линиите в различните метрополитени зависят от размера на града, разположението на отделните райони, гъстотата на застрояването и др. За градове с население до 1,5 млн. жители са характерни линейни (Варшава), кръгови (Глазгоу), диаметрални (София, Прага) и X-образни (Рим) схеми. Видът на метрорежите в по-големите градове с население над 1,5-2 млн. жители е разнообразен и може да се определи като диаметрално-кръгов (Москва), правоъгълен (Мадрид), линейно-правоъгълна (Осло), смесени (Париж, Виена), произволни (Копенхаген). Основните показатели на състоянието на мрежата са комплексност β и степен на свързаност γ , [1, 2, 3]. Двата показателя показват структурните различия между различни мрежи.

- Комплексност

Комплексността β се изразява чрез съотношението между броя на връзките (e) броя на възлите (v). Определя се по следната формула, [1]:

$$\beta = \frac{e}{v}, \quad (11)$$

където: v е сумата от трансферните v_T и крайните върхове на графа v_E , e е сумата от дъгите на графа.

$$v = v_T + v_E \quad (12)$$

За свързани мрежи с един цикъл $\beta = 1$. При по-сложните мрежи $\beta > 1$.

- Степента на свързаност

Степента на свързаност γ показва съотношението между действителния брой на дъгите и потенциалният им брой, в случай че мрежата е 100% свързана. Стойността на степента на свързаност γ е между 0 и 1. При напълно свързана мрежа $\gamma = 1$. Този индикатор е мярка за оценка на метрорежата във времето. За планарни графи (графи, при които не всички върхове са свързани) степента на свързаност се изчислява по формулата, [1]:

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}, \text{ при } v \geq 3 \quad (13)$$

При непланарни графи, каквито са например метрорежите на Варшава (линейна) и Глазгоу (кръгова), степента на свързаност се изчислява по формулата, [1]:

$$\gamma = \frac{2e}{v(v-1)} \quad (14)$$

Б) Структура на метрорежата

Структурата на метрорежата се определя от броя на метролиниите; маршрутите, които те реализират; контактните пунктове за осъществяване на връзка между метролиниите. Колкото повече контактни пунктове има една метромрежа, толкова повече възможности за пътуване на пътниците могат да се реализират, т.е. толкова повече тя е свързана. Фактор, характеризиращ структурата на мрежата е свързаността ρ и показва каква е възможността пътниците да пътуват

свободно в рамките мрежата. Този показател изразява броя и значението на възможните връзки (трансфери) в метромрежата, [3]:

$$\rho = \frac{(v_C - e_M)}{v_T}, \quad (15)$$

където v_C е броят на връзките между метролиниите в контактните пунктове.

Показателят ρ дава информация за структурата на метромрежата. Числителят определя броя на възможните връзки, а знаменателят броя на контактните пунктове. Предимството на този показател е, че той дава информация за станции, където може да се извършат повече трансфери от една линия на друга, т.е. пресичат се повече от две метролинии.

В таблица 1 са показани стойностите на дъгите на графовата структура за Софийския метрополитен. В таблица 2 са показани стойностите на показателите за мрежата на Софийския метрополитен. В таблица 3 и в таблица 4 са показани същите характеристики при промяна в схемата на Софийския метрополитен при планираните разширения.

Таблица 1. Матрица на дъгите на графа за Софийския метрополитен

| Връх | 1 | 2 | 3 | 4 | e_S | e_M | e |
|-------------|---|---|---|---|-------|-------|-----|
| 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Общо | 2 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 8 |
| Еднопосочно | | | | | 2 | 2 | 4 |

Таблица 2. Мрежови характеристики за Софийския метрополитен

| Показател | | Стойност |
|-------------------------------------|----------|----------|
| Брой линии | n_L | 2 |
| Брой трансферни върхове | v_T | 2 |
| Брой крайни върхове | v_E | 2 |
| Брой върхове | v | 4 |
| Брой на връзките между метролиниите | v_C | 4 |
| Комплексност | β | 1 |
| Степен на свързаност | γ | 0,66 |
| Свързаност | ρ | 1 |

Таблица 3. Матрица на дъгите на графа за Софийския метрополитен с планирано разширение

| Връх | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | e_S | e_M | e |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|-------|-------|-----|
| 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 | 4 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0 | 4 |
| Общо | 2 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 14 | 4 | 18 |
| Еднопосочно | | | | | | | | | 7 | 2 | 9 |

Комплексността β зависи сложността на метромрежата и пресичанията на метролиниите. За Софийския метрополитен стойността на показателя нараства от 1 (таблица 2) на 1,125 (таблица 4) при проектното разширение с нова метролиния. Същият характер на изменение се наблюдава за показателят свързаност ρ . От стойност 1 (таблица 2) показателят се увеличава на 2,5 (таблица 4) проектното разширение с нова метролиния и нови два контактни пункта. За показателя степен на

свързаност γ се установява намаление от 0,66 на 0,5 при проектните изменения. Това се дължи на факта, че няма контакт на всички метролинии в даден контактен пункт. В трансферните възли контактуват по две метролинии.

Таблица 4. Мрежови характеристики за Софийския метрополитен с планирано разширение

| Показател | | Стойност |
|-------------------------------------|----------|----------|
| Брой линии | n_L | 3 |
| Брой трансферни върхове | v_T | 4 |
| Брой крайни върхове | v_E | 4 |
| Брой върхове | v | 8 |
| Брой на връзките между метролиниите | v_C | 12 |
| Комплексност | β | 1,125 |
| Степен на свързаност | γ | 0,5 |
| Свързаност | ρ | 2,5 |

2. Групиране на метрорежите по един показател

Систематизиране на изследваните метрорежи може да се извърши по всеки един от изложените по-горе фактори. За целта метрорежите се систематизират в групи по условно определени интервали на изменение на изследвания показател.

В таблица 5 и таблица 6 е направена сравнителна характеристика и са показани стойностите на допълнителните и на основните показатели за изследваните метрорежи. За различните показатели се получава различно разпределение на метрорежите.

Таблица 5. Допълнителни фактори

| | Амстердам | Атина | Берлин | Брюксел | Букурещ | Будапеща | Копенхаген | Глазгоу | Хелзинки | Киев | Лисабон | Лондон | Мадрид | Минск | Москва | Осло | Париж | Прага | Рим | София | Стокхолм | Виена | Варшава |
|----------|-----------|-------|--------|---------|---------|----------|------------|---------|----------|------|---------|--------|--------|-------|--------|------|-------|-------|-----|-------|----------|-------|---------|
| β | 1 | 1,1 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 0,5 | 0,8 | 0,5 | 1 | 1 | 1 | 1,9 | 1,8 | 0,8 | 1,6 | 1 | 1,8 | 0,9 | 0,8 | 1 | 1,1 | 1,3 | 0,5 |
| γ | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,2 | 0,5 | 0 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,3 |
| ρ | 1 | 1 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 1 | 0,5 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,3 | 1 | 1,2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Свързаността ρ зависи от схемата на метрорежата. При линейни и кръгови мрежи, каквито са например метрорежите на Варшава и Глазгоу свързаността е 0. С увеличаване на броя на метролиниите и сложността на схемата, стойността на свързаността се увеличава (например за Москва е 1,3).

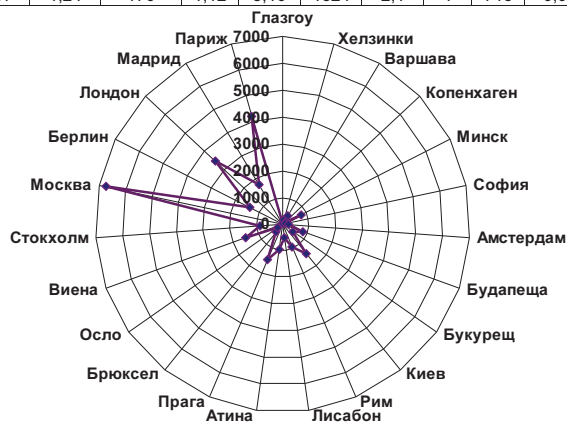
Комплексността β зависи от броя на метролиниите, трансферните и крайните възли. С увеличаване на сложността на метрорежата и пресичанията на метролиниите, стойността им се увеличава. Например за метрото в Лондон комплексността е 1,9; за метрото в Париж е 1,8; за Московския метрополитен е 1,6. При метрополитени с линейна структура този показател има ниски стойности, като например Варшава – 0,5.

Показателят степен на свързаност γ показва до каква степен метролиниите имат контакт. Най-висока степен на свързаност имат метрорежите на Москва (1,3) и Париж (1,2). Стойността на този показател се увеличава с увеличаването на броя на метролиниите, които правят контакт е трансферен възел. За линейни метрорежи степента на свързаност е 0. Такива са метрорежите на Варшава и Глазгоу.

На фиг.5, фиг.6 и фиг.7 е показано примерно групиране по един показател.

Таблица 6. Основни фактори

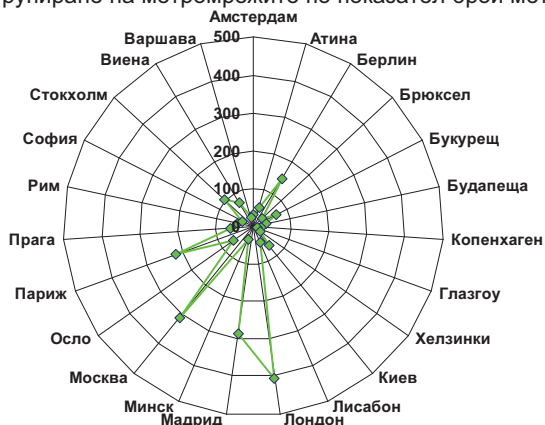
| Град | Дължина на мрежата, km | Брой станции | Средно разстояние между станциите, km | Брой на пътуванията за ден, хил.пътн./ден | Население млн. жители | Брой пътувания на километър, хил.пътн./кп | Междурелсово разстояние, mm | Себестойност на превоза, Евро/ден | Брой метролинии | Площ на гра да, km ² | Плътност, км/км ² | Брой пътници/км ² | Брой метростанции/км ² | Брой метролинии/км ² |
|------------|------------------------|--------------|---------------------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Амстердам | 32,7 | 33 | 0,99 | 233 | 1,03 | 7,13 | 1435 | 2,09 | 4 | 219 | 0,15 | 1,06 | 0,15 | 0,018 |
| Атина | 53,2 | 56 | 0,95 | 937 | 3,24 | 17,61 | 1435 | 1 | 3 | 412 | 0,13 | 2,27 | 0,14 | 0,007 |
| Берлин | 147,4 | 195 | 0,76 | 1380 | 3,41 | 9,36 | 1435 | 2,1 | 10 | 892 | 0,17 | 1,55 | 0,22 | 0,011 |
| Брюксел | 32,2 | 61 | 0,53 | 364 | 1,74 | 11,30 | 1435 | 1,53 | 3 | 161 | 0,20 | 2,26 | 0,38 | 0,019 |
| Букурещ | 69,3 | 50 | 1,39 | 468 | 1,94 | 6,75 | 1435 | 0,4 | 4 | 285 | 0,24 | 1,64 | 0,18 | 0,014 |
| Будапеща | 33 | 42 | 0,79 | 827 | 1,68 | 25,06 | 1435 | 0,95 | 3 | 525 | 0,06 | 1,58 | 0,08 | 0,006 |
| Варшава | 22,6 | 21 | 1,08 | 384 | 1,71 | 16,99 | 1435 | 0,47 | 1 | 517 | 0,04 | 0,74 | 0,04 | 0,002 |
| Виена | 74,6 | 102 | 0,73 | 1460 | 2,32 | 19,57 | 1435 | 1,7 | 5 | 414 | 0,18 | 3,53 | 0,25 | 0,012 |
| Глазгоу | 10,4 | 15 | 0,69 | 35,6 | 1,16 | 3,42 | 1219 | 1,66 | 1 | 175 | 0,06 | 0,20 | 0,09 | 0,006 |
| Киев | 66,2 | 51 | 1,30 | 1420 | 2,71 | 21,45 | 1520 | 0,27 | 3 | 839 | 0,08 | 1,69 | 0,06 | 0,004 |
| Копенхаген | 21 | 22 | 0,95 | 148 | 1,08 | 7,05 | 1435 | 2,81 | 2 | 455 | 0,05 | 0,33 | 0,05 | 0,004 |
| Лисабон | 44,3 | 55 | 0,81 | 501 | 2,81 | 11,31 | 1435 | 0,8 | 4 | 958 | 0,05 | 0,52 | 0,06 | 0,004 |
| Лондон | 402 | 270 | 1,49 | 3443,85 | 8,57 | 8,57 | 1435 | 2,75 | 11 | 1572 | 0,26 | 2,19 | 0,17 | 0,007 |
| Мадрид | 286,3 | 282 | 1,02 | 1740 | 5,57 | 6,08 | 1435 | 1 | 13 | 607 | 0,47 | 2,87 | 0,46 | 0,021 |
| Минск | 35,4 | 28 | 1,26 | 770 | 1,8 | 21,75 | 1520 | 0,17 | 2 | 409 | 0,09 | 1,88 | 0,07 | 0,005 |
| Москва | 309,4 | 186 | 1,66 | 6750,68 | 10,5 | 21,82 | 1520 | 0,5 | 12 | 2510 | 0,12 | 2,69 | 0,07 | 0,005 |
| Осло | 62 | 77 | 0,81 | 208 | 0,84 | 3,35 | 1435 | 2,67 | 5 | 454 | 0,14 | 0,46 | 0,17 | 0,011 |
| Париж | 218 | 382 | 0,57 | 4180 | 9,9 | 19,17 | 1435 | 1,57 | 16 | 2844 | 0,08 | 1,47 | 0,13 | 0,006 |
| Прага | 59,1 | 57 | 1,04 | 1450 | 1,16 | 24,53 | 1435 | 0,65 | 3 | 496 | 0,12 | 2,92 | 0,11 | 0,006 |
| Рим | 41,6 | 52 | 0,80 | 907 | 3,34 | 21,80 | 1435 | 1 | 2 | 1285 | 0,03 | 0,71 | 0,04 | 0,002 |
| София | 31,2 | 28 | 1,11 | 79,5 | 1,18 | 2,55 | 1435 | 0,51 | 2 | 492 | 0,06 | 0,16 | 0,06 | 0,004 |
| Стокхолм | 105,7 | 104 | 1,02 | 847 | 1,26 | 8,01 | 1435 | 3,73 | 3 | 382 | 0,28 | 2,22 | 0,27 | 0,008 |
| Хелзинки | 21 | 17 | 1,24 | 170 | 1,12 | 8,10 | 1524 | 2,1 | 1 | 715 | 0,03 | 0,24 | 0,02 | 0,001 |



Фиг.5. Групиране на метромрежите по показател брой превозени хил. пътници/ден



Фиг.6. Групиране на метромрежите по показател брой метролинии



Фиг.7. Групиране на метромрежите по показател дължина на метромрежата

На фиг.5 е показано групиране на метромрежите по показател брой хил. превозени пътници/ден. Условно те могат да се разпределят в 7 групи, при интервал на групиране 1000 хил.пътн./ден. В самостоятелни групи са метросистемите на Москва, Лондон и Париж; Мадрид, Виена, Берлин, Прага и Киев са в една група; останалите метросистеми на разглежданите европейски столици образуват друга самостоятелна група.

На фиг.6 е направено групиране по показателя брой метролинии. Условно избраният интервал на групиране е 5 броя метролинии. При това положение броят на групите е 4. В първа група е метрото в Париж с брой метролинии в интервала 15-20; Берлин, Лондон, Москва и Париж са в група определена от интервала 10-15; Глазгоу, Хелзинки, Варшава, Копенхаген, Минск, Рим, София, Атина, Брюксел, Будапеща, Киев, Прага, Стокхолм, Амстердам, Букурещ, Лисабон, Осло и Виена образуват група в интервала до 5бр. метролинии.

На фиг.7 е показано примерно групиране на метромрежите по показателя дължина на метромрежата с избран интервал на групиране 100 km. Тук самостоятелни групи образуват метромрежите на Лондон и Москва; Париж и Мадрид

образуват друга група; Берлин и Стокхолм са в самостоятелна група; останалите метромрежи са в група с дължина на метромрежата до 100 km.

Систематизирането на метромрежите само по един показател не дава цялостна характеристика за метросистемата. По всеки от изследваните показатели може да се състави различно групиране на метромрежите.

3. Клъстърен Анализ

3.1. Основни положения

Подходящ метод за класификация на изследваните метро системи в групи, с използването на различни по вид и дименсия фактори, е клъстърния анализ. Това е многомерен статистически метод за класифициране на единици в групи, които не са известни предварително, на основата на множеството характеристики, отнасящи се за тези единици. При клъстърния анализ броя на изследваните фактори е по-голям от 2. Като редуцираща техника клъстърния анализ има общи елементи с дискриминативния и факторния анализ. Целта е да се класифицират изследваните единици в малко на брой взаимно изключващи се групи, наречени клъстери. В общия случай клъстърния анализ протича през три етапа. Първо матрицата, която се определя от броя на изследваните елементи и фактори се трансформира в матрица на близостта. Нейните елементи представляват измерители на подобие или различие, между отделните единици. Идеята за близостта на единиците в многомерното пространство е в основата на клъстърния анализ. При вторият етап се формират клъстерите, като се използва определен метод в съответствие с целите на анализа. В статистическата теория са разработени значителен брой клъстеризиращи процедури. Най-общо може да се каже, че при всички методи за формиране на клъстерите стремежът е насочен към максимизиране на междугруповата вариация, за сметка на вътрешно груповата вариация, т.е. към постигане на максимална относителна еднородност на единиците по отношение на възможните измерения на многомерното пространство. В третия етап клъстерите се констатира и профилират в съответствие с обекта и целите на изследването.

За приблизителна оценка на резултатите от клъстеризацията и ролята на отделните променливи при формирането на клъстерите може да се използва дисперсионния анализ. Всяка променлива величина се разглежда като зависима, а отделните групи като категории на независима променлива величина. Определяне на статистическата значимост на различни фактори се извършва по F критерия (критерий на Фишер):

$$F \geq F_T \quad (16)$$

където: F е емпиричната стойност на критерия получена от дисперсионния анализ, F_T е теоретичната стойност на критерия, получена при риск на грешката $\alpha = 0,05$ и броя на степените на свобода, $k_1 = m - n$; $k_2 = n - 1$; m е броят на наблюденията (в случая броят на изследваните метросистеми), n е броят на изследваните фактори. Различията между F – отношенията позволяват да се формулират най-общи заключения за ролята на отделните променливи величини при формиране на клъстерите.

3.2. Приложение на Клъстърен анализ за изследване на метро системите

В таблица 7 са показани стойностите на критерия на Фишер и значението на нивото на грешка. При направеното изследване теоретичната стойност на критерия е $F_T=2,8$. На фиг.8 са показани факторите, за които критерия на Фишер има стойност по-голяма от теоретичната. Оценката по критерия на Фишер определя кои фактори са значими за изследването, но не отстранява останалите фактори, които се използват за клъстеризацията.



Фиг. 8. Степен на значение на факторите по критерия на Фишер

Таблица 7. Критерий на Фишер

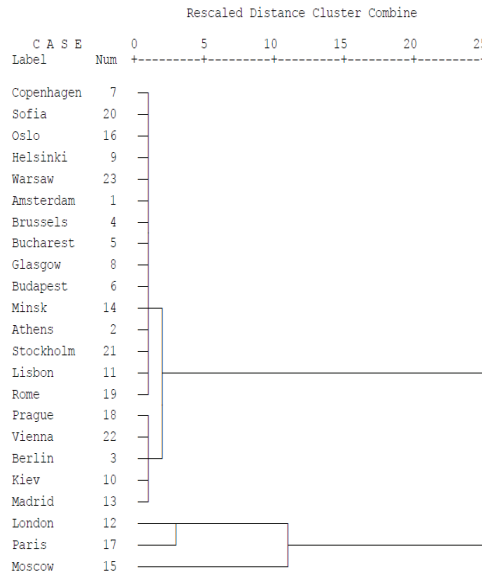
| Фактор | F | α | Фактор | F | α |
|--------------------------------------|-------------|----------|--|----------------|----------|
| Дължина на мрежата, km | L 37,53 | 0,01 | Разположение на метро линиите | T 2,86 | 0,10 |
| Брой станции | n_S 24,61 | 0,00 | Себестойност на превоза, евро/ден | F 0,14 | 0,71 |
| Средно разстояние между станциите | l_s 2,24 | 0,15 | Бр.пътн./бр.жители | P_H 0,71 | 0,41 |
| Брой пътувания за ден, хил.пътн./ден | P 78,79 | 0,00 | Брой метро линии | n_L 26,30 | 0,00 |
| km/1000 жители | L_p 0,001 | 0,98 | Площ, km ² | A 72,25 | 0,00 |
| Численост на населението, млн.жители | H 112,84 | 0,00 | Плътност на мрежата, km/km ² | N_D 0,11 | 0,74 |
| Брой пътици на километър, пътн./km | P_L 0,54 | 0,47 | Плътност на пътуванията, бр.пътн./ km ² | P_A 1,22 | 0,29 |
| Среден брой станции на метро | s_L 1,06 | 0,32 | Плътност на метростанциите, бр./ km ² | n_A 0,09 | 0,76 |
| Тип на електро захранването | P_W 0,20 | 0,66 | Плътност на метро линиите, бр./ km ² | l_A 0,49 | 0,49 |
| Електро напрежение, V | V 0,37 | 0,55 | Средна дължина на метро линия, km | l_n 3,90 | 0,06 |
| Между релсово разстояние, mm | G 0,001 | 0,97 | Свързаност | ρ 6,60 | 0,02 |
| | | | Комплексност | β 29,66 | 0,00 |
| | | | Степен на свързаност | γ 25,71 | 0,00 |

На фиг.9. е показана дендрограма на формираните клъстери и съответните им елементи. За провеждане на изследването с клъстерен анализ е използван SPSS софтуер (Statistical Package for Social Science), [8]. Получените резултати показват, че метросистемите на разглежданите европейски столици могат да се класифицират в четири групи. На фиг.10 е показана класификацията на изследваните метросистеми по изследваните основни и допълнителни фактори. Първата група има 15 елемента. В тази група е и Софийския метрополитен. Планираното бъдещо развитие на Софийското метро не променя отнасянето му към първата група.

Групата се състои от следните метромрежи: Амстердам, Атина, Брюксел, Букурещ, Будапеща, Варшава, Глазгоу, Копенхаген, Минск, Лисабон, Рим, София, Стокхолм, Осло и Хелзинки. Втората група има пет елемента и включва: Берлин, Виена, Киев, Мадрид и Прага. Тези две групи са със сравнително хомогенна структура и с равно разстояние между елементите. Метросистемите на Лондон и Париж формират третия клъстер. Московският метрополитен е в отделен клъстер.

***** HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS **

Dendrogram using Average Linkage (Between Groups)



Фиг.9. Дендрограма на клъстерите



Фиг.10. Класификация на метросистемите

Систематизирането на метромрежите само по един показател не дава цялостна характеристика за метросистемата. Полезността на метода на Клъстърния анализ е

във възможността различни по характер и дименсия фактори да бъдат едновременно използвани за анализ и систематизиране на изследваните обекти.

ИЗВОДИ

Направеното изследване съдържа следните нови положения:

- Дефинирани са фактори за извършване на класификацията на метросистемите – фактори на транспортния потенциал, себестойността на превоза и показатели, които определят състоянието и структурата на метромержата. Тези фактори позволяват да се направи оценка за нивото на развитие на изследваните системи;
- За характеризирани на метромержите е приложена теорията на графите и са определени показатели на състоянието и структурата на метромержата.
- Използван е клъстерен анализ за класификация на изследваните метросистеми. Клъстеризацията е направена с използването на 24 разнородни по своята същност фактора.
- Чрез дисперсионен анализ за определени значимите фактори за извършване на класификацията.
- Метросистемите в европейските столици са разпределени в четири класификационни модула.
- Прилагането на клъстерен анализ позволява получаването на цялостна оценка на развитието на метрото системи.
- Важни за групирането на метросистемите са факторите, определящи състоянието и структурата на мрежата. Методологията на проведеното изследване може да се приложи за анализ на различни метрополитени, както и за изследвания свързани с транспортните системи.

Насоки за следващи изследвания:

- Разширяване на обхвата на факторите, определящи структурата на метромержата, дефинирани чрез теорията на графите.
- Дефиниране и изследване на фактори, отчитащи взаимодействието на метросистемите в контактните пунктове с другите видове градски пътнически транспорт.

ЛИТЕРАТУРА

[1] J.P. Rodrige. The geography of transport systems, Thrd edition, 2013, New York, Routelage.

[2]J. Kansky. Structure of transportation networks. Uneversity of Chicago Press, 1963.

[3] S. Derrible, Kennedy, C.A.: A network analysis of subway systems in the world using updated graph theory. Transp. Res. Rec. 2112, 17–25, 2009.

[4]<http://www.cityrailtransit.com>

[5]<http://www.eurostat.ec.europa.eu>

[6]<http://www.nycsubway.org>

[7] <http://www.metrobits.org>

[8]<http://spss.en.softonic.com>

За контакти

Доц. д-р инж. Светла Стоилова – Технически Университет – София, Факултет по транспорт, Катедра „Железопътна техника”, e-mail: stoilova@tu-sofia.bg

Маг. инж. Веселин Стоев – докторант, Технически Университет – София, Факултет по транспорт, Катедра „Железопътна техника”, e-mail: stoev@tu-sofia.bg

Докладът е рецензиран.