



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ**

**ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И  
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ**



**инж. Йорданка Любомирова Бонева**

**ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАФИК В ГРАДСКА СРЕДА**

## **ДИСЕРТАЦИЯ**

за придобиване на образователната и научна степен „**доктор**“  
по докторска програма „Приложение на принципите и методите на  
кибернетиката в различни области на науката“,  
професионално направление: **5.2. „Електротехника, електроника,  
автоматика“**

Научен ръководител: **проф. д.т.н. Тодор Стоилов**

София, 2020 г.

## **Благодарности**

Бих искала да изкажа специални благодарности на научния си ръководител проф. д.т.н. Тодор Стоилов, за отделеното време, полезните съвети и отправените градивни критики. Благодаря и за дадените напътствия в областта на оптимизиране на трафик в градска среда, които определиха и насоката на проведените научно-приложни изследвания в настоящия дисертационен труд.

Благодаря на колегите: проф. д.т.н. Красимира Стоилова, доц. д-р Боряна Вачова, гл. ас. д-р Станислав Димитров, гл. ас. д-р Владимир Иванов, гл. ас. д-р Кристина Павлова, гл. ас. д-р Елена Паунова-Хубенова и гл. ас. д-р Елисавета Тричткова-Кашъмова за оказаната методологична помощ, съвети и препоръки.

Също така благодаря и на всички, които пряко или косвено са допринесли за реализирането на този дисертационен труд.

## СЪДЪРЖАНИЕ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Списък на фигурите .....                                                                 | 6  |
| Списък на таблиците.....                                                                 | 8  |
| Списък на съкращения и термини .....                                                     | 9  |
| УВОД.....                                                                                | 10 |
| ГЛАВА 1. МОДЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК.....                                 | 16 |
| 1.1. Принципи на проектиране на светлинно сигнално регулиране.....                       | 16 |
| 1.1.1. Общ преглед.....                                                                  | 16 |
| 1.1.2. Определения и обозначения.....                                                    | 16 |
| 1.1.3. Моделиране на фазите .....                                                        | 17 |
| 1.1.4. Времетраене на цикъла .....                                                       | 18 |
| 1.1.5. Ефективна продължителност на зеления сигнал .....                                 | 20 |
| 1.1.6. Капацитет на лента.....                                                           | 21 |
| 1.1.7. Определяне на дължината на цикъла .....                                           | 21 |
| 1.2. Модели за интензивност на трафика за основна транспортна мрежа .....                | 25 |
| 1.2.1. Модел на кинематичната вълна .....                                                | 25 |
| 1.2.2. Модел Store-and-forward .....                                                     | 27 |
| 1.2.3. Модел Dispersion-and-store .....                                                  | 29 |
| 1.3. Управление на трафик в градска мрежа .....                                          | 32 |
| 1.4. Стратегии за управление на трафика в реално време .....                             | 34 |
| 1.5. Изводи от Глава 1 .....                                                             | 35 |
| ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НА ЙЕРАРХИЧНИ ОПТИМИЗАЦИОННИ ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ..                           | 37 |
| 2.1. Двуйерархична оптимизация в транспортна мрежа.....                                  | 37 |
| 2.2. Изводи от Глава 2 .....                                                             | 45 |
| ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЙЕРАРХИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА<br>ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК..... | 47 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Използвани програмни пакети за моделиране и оптимизиране на трафик .....                                        | 47 |
| 3.2. Обект на симулацията.....                                                                                       | 49 |
| 3.3. Проведени експерименти .....                                                                                    | 51 |
| 3.4. Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun..... | 53 |
| 3.4.1. Резюме на експеримента.....                                                                                   | 53 |
| 3.4.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                               | 53 |
| 3.4.3. Резултати от експеримента.....                                                                                | 54 |
| 3.4.4. Изводи от експеримента .....                                                                                  | 60 |
| 3.5. Подобрене на трафика в градска среда чрез оптимизация на светофарната сигнализация.....                         | 61 |
| 3.5.1. Резюме на експеримента.....                                                                                   | 61 |
| 3.5.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                               | 61 |
| 3.5.3. Резултати от експеримента.....                                                                                | 64 |
| 3.5.4. Изводи от експеримента .....                                                                                  | 67 |
| 3.6. Оптимизация на зеления сигнал и опашките в транспортната мрежа чрез двуйерархична оптимизация .....             | 68 |
| 3.6.1. Резюме на експеримента.....                                                                                   | 68 |
| 3.6.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                               | 69 |
| 3.6.3. Резултати от експеримента.....                                                                                | 77 |
| 3.6.4. Изводи от експеримента .....                                                                                  | 78 |
| 3.7. Оптимизация на продължителността на цикъла чрез двуйерархична оптимизация ..                                    | 78 |
| 3.7.1. Резюме на експеримента.....                                                                                   | 78 |
| 3.7.2.Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                                | 79 |
| 3.7.3.Резултати от експеримента.....                                                                                 | 85 |
| 3.7.4.Изводи от експеримента .....                                                                                   | 87 |
| 3.8. Усложняване на модела. Въвеждане на трамвайни спирки и паркиране на улицата. ....                               | 87 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.8.1. Резюме на експеримента.....                                                                                      | 87  |
| 3.8.2.Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                                   | 87  |
| 3.8.3.Резултати от експеримента.....                                                                                    | 89  |
| 3.8.4.Изводи от експеримента .....                                                                                      | 92  |
| 3.9. Гъвкаво управление и изследване на трафични индикатори, консумация на гориво и замърсяване на околната среда. .... | 92  |
| 3.9.1. Резюме на експеримента.....                                                                                      | 92  |
| 3.9.2.Описание на експеримента и подхода за намиране на решение .....                                                   | 93  |
| 3.9.3.Резултати от експеримента.....                                                                                    | 93  |
| 3.9.4.Изводи от експеримента .....                                                                                      | 96  |
| 3.10. Изводи от Глава 3 .....                                                                                           | 97  |
| ГЛАВА 4. СИМУЛАЦИОННИ И ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ, И РЕЗУЛТАТИ .....                                                         | 99  |
| 4.1. Сравнение на резултати от симулационни експерименти .....                                                          | 99  |
| 4.2. Изводи от Глава 4 .....                                                                                            | 108 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ - РЕЗЮМЕ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ .....                                                                       | 109 |
| ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД .....                                                                                    | 111 |
| БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ .....                                                                                                   | 113 |
| ПУБЛИКАЦИИ .....                                                                                                        | 114 |
| ЦИТИРАНЕ .....                                                                                                          | 115 |
| УЧАСТИЕ В ПРОЕКТИ .....                                                                                                 | 116 |
| ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ .....                                                                         | 117 |
| БИБЛИОГРАФИЯ.....                                                                                                       | 118 |

## Списък на фигурите

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Фиг. 1.1.</b> Група превозни средства, чакащи зелен сигнал на сигнализирано кръстовище..                                                                                                               | 18 |
| <b>Фиг. 1.2.</b> Промеждутък от време между две превозни средства.....                                                                                                                                    | 19 |
| <b>Фиг. 1.3.</b> Продължителност на цикъла .....                                                                                                                                                          | 23 |
| <b>Фиг. 1.4.</b> Пример за модела Store-and-Forward .....                                                                                                                                                 | 28 |
| <b>Фиг. 2.1.</b> Графично представяне на store-and-forward модела.....                                                                                                                                    | 38 |
| <b>Фиг. 2.2.</b> Двуйерархична оптимизация.....                                                                                                                                                           | 43 |
| <b>Фиг. 2.3.</b> Двуйерархична оптимизация в контекста на управление на трафика.....                                                                                                                      | 45 |
| <b>Фиг. 3.1.</b> Процедура по оптимизация в TRANSYT 15 .....                                                                                                                                              | 48 |
| <b>Фиг. 3.2.</b> Изображение на четирите свързани кръстовища от Google Maps .....                                                                                                                         | 50 |
| <b>Фиг. 3.3.</b> Четири свързани светлинно регулирани кръстовища в Aimsun .....                                                                                                                           | 50 |
| <b>Фиг. 3.4.</b> Преглед на направените експерименти .....                                                                                                                                                | 52 |
| <b>Фиг. 3.5.</b> Наблюдавано струпване на коли по бул. Шипченски проход .....                                                                                                                             | 55 |
| <b>Фиг. 3.6.</b> Изглед от програмата – настройка на светофарните уредби за Т-образно кръстовище .....                                                                                                    | 56 |
| <b>Фиг.3.7.</b> Настройка на светофарните уредби за различните случаи.....                                                                                                                                | 57 |
| <b>Фиг. 3.8.</b> Случай 1 и случай 2 – сравнени .....                                                                                                                                                     | 58 |
| <b>Фиг. 3.9.</b> Случай 1 и случай 3 сравнение - 20% промяна на зеления сигнал в полза на светофарите на булевард Шипченски проход.....                                                                   | 58 |
| <b>Фиг. 3.10.</b> Случай 1 и случай 4 сравнение - 20% промяна на зеления сигнал в полза на светофарите на булеварда, 10% за Т-образното кръстовище .....                                                  | 59 |
| <b>Фиг. 3.11.</b> Случай 2 и случай 4 сравнение - Сравнение между 10% промяна на зеления сигнал за всички кръстовища и случая с 20% промяна за всички кръстовища и само 10% за Т-образно кръстовище ..... | 60 |
| <b>Фиг. 3.12.</b> Работен процес при изследването .....                                                                                                                                                   | 62 |
| <b>Фиг 3.13</b> Блокова схема за автоматично управление на система, представляваща градска пътна мрежа .....                                                                                              | 64 |
| <b>Фиг. 3.14.</b> Светлинна сигнализация преди оптимизация – Aimsun .....                                                                                                                                 | 66 |
| <b>Фиг. 3.15.</b> Светлинна сигнализация след оптимизация – TRANSYT.....                                                                                                                                  | 66 |
| <b>Фиг. 3.16.</b> Светлинна сигнализация след оптимизация - Aimsun .....                                                                                                                                  | 67 |
| <b>Фиг. 3.17.</b> Графичен модел на разглежданата градска мрежа.....                                                                                                                                      | 70 |
| <b>Фиг. 3.18.</b> Опадка от автомобили пред трамвайна спирка .....                                                                                                                                        | 88 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Фиг. 3.19.</b> Периодичните инциденти в участъка представляват трамвайни спирки по бул. Шипченски проход..... | 89  |
| <b>Фиг. 3.20.</b> Относителни промени при показателите в зависимост от типа управление .....                     | 96  |
| <b>Фиг. 4.1.</b> Сравнение на интензивността при четири симулации.....                                           | 101 |
| <b>Фиг. 4.2.</b> Сравнение на времезакъснението при четири симулации.....                                        | 102 |
| <b>Фиг. 4.3.</b> Сравнение на плътността при четири симулации .....                                              | 102 |
| <b>Фиг. 4.4.</b> Сравнение на опашки при четири симулации .....                                                  | 103 |
| <b>Фиг. 4.5.</b> Сравнение на скоростта при четири симулации.....                                                | 104 |
| <b>Фиг. 4.6.</b> Сравнение на общ брой спирания при четири симулации .....                                       | 104 |
| <b>Фиг. 4.7.</b> Сравнение на време за пътуване през участъка при четири симулации.....                          | 105 |
| <b>Фиг. 4.8.</b> Сравнение на консумация на гориво при четири симулации .....                                    | 106 |
| <b>Фиг. 4.9.</b> Сравнение на CO <sub>2</sub> при четири симулации .....                                         | 106 |
| <b>Фиг. 4.10.</b> Сравнение на прахови частици при четири симулации.....                                         | 107 |

## Списък на таблиците

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Таблица 3.1.</b> Трафични индикатори „преди“ и „след“ оптимизация в TRANSYT.....                                                   | 65  |
| <b>Таблица 3.2.</b> Сравнение на резултатите от симулацията .....                                                                     | 77  |
| <b>Таблица 3.3.</b> Сравнение на показателите за трафик за три случая.....                                                            | 86  |
| <b>Таблица 3.4.</b> Резултати - влияние на трамвайните спирки върху движението .....                                                  | 90  |
| <b>Таблица 3.5.</b> Сравнение между случая без паркиране на улицата и случая с паркиране на улицата. ....                             | 91  |
| <b>Таблица 3.6.</b> Трафични показатели за три различни начина на управление на светофарите .....                                     | 94  |
| <b>Таблица 3.7.</b> Трафични показатели за три различни начина на управление на светофарите (относителни разлики).....                | 94  |
| <b>Таблица 3.8.</b> Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика. ....                                     | 94  |
| <b>Таблица 3.9.</b> Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика (относителни разлики). ....               | 95  |
| <b>Таблица 4.1.</b> Сравнение на трафични показатели, консумация на гориво и замърсяване на околната среда при четири симулации ..... | 100 |
| <b>Таблица Закл.1.</b> Връзка между резултати, структура на дисертационния труд и направени публикации. ....                          | 112 |

## Списък на съкращения и термини

**CTM** – Cell Transmission Model

**SFM** – Store-and-Forward Model

**DSM** – Dispersion-and-store Model

**KWM** – Kinematic Wave Model

**PM** – Particulate matter – прахови частици

**P.I.** – Performance Index - индекс на ефективност

**Green split** – продължителност на зеления сигнал като част от цикъла

**Offset** – разстояние между два съседни светофара измерено във време

**Saturation flow** - поток на насищане

**Bi-level optimization** - Двуйерархична оптимизация

**Spillback** – блокирането на кръстовище с превозни средства, поради болкиране на предходен светофар с превозни средства, които изпълват отсечката между двете кръстовища.

**Starvation** – При зелен сигнал на светофара на кръстовището, превозните средства от предходното кръстовище още не са достигнали до него.

**Headway** – Промеждутък от време между две превозни средства

**ЛОС** – (англ. VOCs – Volatile Organic Compounds) - Летливи органични съединения

**ССР** - Светлинно сигнално регулиране

**МПС** – Моторно превозно средство

## УВОД

Актуалност на проблема за оптимизиране на трафик в градска среда в глобален мащаб е свързан с развитието на градовете – от централна част, която може да се обходи пеша, до разширяване на града и нужда от конски впряг, до автомобилите и обществения транспорт.

Актуалност на проблема по отношение на България е свързана с разрастването на столицата София, където се струпва все повече население, от там и автомобили и нужда от по-ефективно и ефикасно управление на трафика. Управлението на трафика в градска среда се осъществява основно посредством светофарните уредби, които разделят потока на автомобили, както и на пешеходци във времето.

В настоящия дисертационен труд се разглеждат кръстовища с разделяне по време или светлинно сигнално регулиране (ССР) на кръстовища.

Първият светофар е бил монтиран пред парламента в Лондон на 10 декември 1868 г. Работил е на газ и е сменял зелена и червена светлина. На 2 януари, три седмици след пускането му, избухва. След 44 години, през 1912 г. в Солт Лейк Сити, щата Юта е пуснат първият електрически светофар, също само със зелена и червена светлина. През 1920 г. в Детройт бил монтиран първият трицветен светофар. Към 2016 светофарите в САЩ надхвърлят 272 000 броя. В София са приблизително 300 броя, а в България около 1500 броя. (Георгиев и Симеонов, 2016).

Неефективното функциониране на ССР кръстовищата води до недоволство от страна на обществото. Функционирането на светофарите трябва да е и безопасно за хората и транспортните средства. Постигането на ефективност и безопасност на светлинно регулираните кръстовища изисква и периодична актуализация и синхронизация на светлинната сигнализация.

Синхронизацията и оптимизацията на светлинно регулираните кръстовища са ефективни и при предотвратяване на задръствания, особено в случаите, когато не е възможно да се извършат инфраструктурни промени поради големи финансови разходи или липса на пространство. В тази връзка трябва да се разработи и приложи оптимална настройка на светлинната сигнализация, която да подобри ефективността на кръстовище или мрежа от кръстовища. Оптимизацията може да се постигне чрез максимално използване на зеления сигнал и намаляване формирането на опашки пред светофарите.

За съжаление, въпреки напредналите изследвания и приложения в областта на транспорта и управлението на светлинната сигнализация в световен мащаб град София все още разчита на твърдо управление на светофарните уредби т.е. продължителността на цикъла на светофара и продължителността на сигналите му се определят по исторически данни за интензитета на движение, а не по моментно събирани данни за интензитета, което се случва при гъвкавото управление на трафика. При гъвкаво управление светлинната сигнализация се определя от потока на автомобили, засичан от сензори. Поради неналичието на такава информация от официални източници, за целите на този дисертационен труд е извършено проучване на терен на автомобилите в рамките на избрана пътна мрежа в град София. Акцента на изследването в дисертационния труд не е върху събиране и обработване на данни от пътен трафик, а по-скоро събраните данни са предпоставка за прилагане, изследване и прилагане и получаване на достоверни резултати и заключения на методи за управление и оптимизация на трафик в градска среда.

Разглеждат се модели за математическо моделиране на интензитет на трафик, като е избран моделът *store-and-forward*. *Store-and-forward* моделът е опростен модел за представяне на интензивността на трафика, но в същото време е и подходящ за условия на задръстване в големи транспортни мрежи от градски тип. Този модел отваря път към използването на различни методи за управление и оптимизация на трафика, поради което дава възможност за разнообразни научни експерименти. *Store-and-forward* моделът е предназначен за оптимизация на продължителността на зеления сигнал като част от общата продължителност на цикъла. Продължителността на цикъла обаче, както и *offset* (разстоянието между съседни кръстовища, измерено във време) трябва да бъдат изчислени посредством други методи (Иванчев и Неглер, (1993), Маджарски и др., (2009)).

В този дисертационен труд моделът *store-and-forward* е използван в съчетание с дефинирането и решаването на двуйерархична оптимизационна задача. Използвана е средата MATLAB и функцията *solvebilevel()* от допълнително разширени YALMIP.

Двуйерархичната оптимизация дава възможност за разширяване на управляващото пространство с възможността да решава две оптимизационни целеви функции, които се намират в йерархична зависимост – разделят се на горна и долна целеви функции, като долната целева функция е подчинена на горната целева функция. Променливата, спрямо която се решава долната целева функция се приема в последствие като константа за горната

целева и съответно променливата, за която се търси решени в горната целева функция, се предава като константа за долната целева функция (Stoilov et al., 2015).

От гледна точка на решаването на двуйерархична оптимизационна задача за оптимизиране на трафик в градска среда целта е, да се увеличи пропускателната възможност на дадена градска мрежа, като се управляват основните параметри – продължителност на цикъл, процент на зелен сигнал спрямо продължителност на цикъла и offset. Целта е минимизиране на дължината на опашките пред светофарите, намаляване на общото пропътувано време, както и на времезакъснението в мрежата при увеличен капацитет на преминаващи през избраната градска мрежа превозни средства.

В настоящата дисертационна работа под превозни средства се разбира автомобили, тъй като преброяването е било извършено за този вид МПС, като цяло за избраната градска мрежа, която е обект на изследването е характерно, че трафика е предимно автомобилен. Разбира се е възможно да се направят изчисления и за случаи с тежкотоварни автомобили и мотоциклети, ако се знае процентното им отношение спрямо общия брой превозни средства. В такъв случай, тежкотоварните автомобили и мотоциклети се умножават по определен коефициент. Важно е, тази информация да се отбележи за пълнота на изследваните обстоятелства, като тя не засяга качеството и изводите от направените експерименти.

Съществена част от задачата е и изпробването на получените резултати от решаването на оптимизационната задача в симулационните среди Aimsun и TRANSYT. Тези среди са специализирани среди за моделиране и симулиране на пътен трафик. Резултатите от тях се изразяват в статистически данни за различни показатели на трафика, на замърсяването на околната среда и на консумацията на гориво при различните настройки на светофарните уредби и съответно промяната в показателите на трафика (времезакъснение, дължина на опашки, скорост и др.) при еднакви данни за неговата интензивност.

Особености на решаването на проблема в България:

- Липса на данни за интензивност на трафика в градска среда.
- Липса на достъп до данни за интензивност на трафика в градска среда, за местата където тези данни са налични, предполага се основно възлови кръстовища в центъра на град София. Като цяло проблем е липса на данни за интензитета на движения във големите градове в страната.

### **Цели на дисертационната работа**

**Цел** на дисертационната работа е да се разработи математически модел за решаване на изследователска задача за оптимизиране на пътен трафик в градски тип транспортна мрежа.

Обект на изследването е мрежа от четири свързани, светлинно регулирани кръстовища, разположени по булевард „Шипченски проход“ в град София, България.

Поставени са за решаване следните **задачи** във връзка с конкретизиране на целта на дисертационната работа:

- Разработване на математически модел на транспортна мрежа от градски тип.
- Разработване на йерархичен модел за управление на мрежа от кръстовища;
- Дефиниране и решаване на йерархични оптимизационни задачи;
- Изграждане на компютърен модел и симулации в програмния пакет Aimsun;
- Изпробване на резултати без и с данни от решената оптимизационна задача в симулационна среда Aimsun;
- Оценка на получените решения посредством сравнение с TRANSYT – програмен продукт, който се използва в световен мащаб за оценка на управляващи стратегии в областта на автомобилния трафик.

Прилага се двуйерархичен модел за оптимизация на избран участък от градска транспортна мрежа. Разработен е модел на мрежата от четири свързани кръстовища с прилагане на подхода за моделиране store-and-forward. Задачата от горно оптимизационно ниво е за намиране на оптимална продължителност на светофарния цикъл, а задачата от долно ниво е за намиране на максимална пропускателна способност на мрежата.

Формалният модел дава основа за дефиниране и прилагане на оптимизационни задачи с използване на принципа- store-and-forward модел.

Мрежата от четири свързани кръстовища е моделирана и симулирана със съответни входни данни в програмния пакет Aimsun.

## **Структура на дисертацията**

Дисертационният труд се състои от увод, четири глави и заключение. Дисертацията съдържа 132 страници, 37 фигури и 11 таблици, 122 цитирани литературни източника, списъци на фигурите, таблиците и списък на използваните съкращения и термини. По дисертационния труд са публикувани 5 публикации, като 3 от тях са доклади от международни конференции, а 2 са публикувани в научни списания у нас с международен обхват. Изследванията са част от получените резултати на 2 научноизследователски проекта

В **Глава 1** се разглеждат основни понятия при управление на трафика, както и различни модели за управление на трафик в градска мрежа. Дефинирани са основни за дисертационната работа понятия като продължителност на цикъла, продължителност на зеления сигнал като част от цикъла, offset и други. Важна част от главата са моделите за интензивност на трафика, един от които използва принципа store-and-forward, прилаган за дефиниране и решаване на задачите в дисертационната работа.

**Глава 2** представя йерархична оптимизационна задача за управление и оптимизиране на трафик в градска среда. Представено е досегашно изследване в областта на двуйерархична оптимизация за целите на оптимизация на трафика. Описана е и същността на двуйерархичната задача.

В **Глава 3** са описани проведени експерименти за моделиране, симулиране, оптимизиране на градски трафик върху избран обект от градска транспортна мрежа. Всеки експеримент е описан накратко в резюме, представени са резултати от съответното изследване и са направени изводи. Направени са над 6 експеримента за оптимизиране на трафика с различни акценти: прилагане на оптимизация с програмен продукт TRANSYT, прилагане на резултати от две двуйерархични задачи в програмния продукт Aimsun, оценка на трафични показатели при извършените симулации, оценка на консумацията на гориво и замърсителите на въздуха, усложняване на компютърния модел посредством добавяне на ефекта от трамвайни спирки и паркиране и улицата и др.

**Глава 4** представя сравнение между извършените изследвания и експерименти в Глава 3. Глава 4 демонстрира оптимизацията на трафика по определени показатели. В тази глава са сравнени резултатите от двуйерархични оптимизационни задачи с резултати от

симулацията с реални данни и с резултатите от TRANSYT. В резултат на сравненията са направени и съответните изводи.

В заключението са обобщени основни аспекти на дисертационната работа. Направен е и преглед на основните изводи.

Дефинирани са приносите на дисертационния труд, бъдещите насоки на работа, представени са научните публикации по дисертацията, както и научно-изследователските проекти, по които е работено във връзка с изследванията по дисертационната работа и цитирания.

## ГЛАВА 1. МОДЕЛИ НА УПРАВЛЕНИЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК

### 1.1. Принципи на проектиране на светлинно сигнално регулиране

#### 1.1.1. Общ преглед

Светлинната регулация е един от най-ефективните и гъвкави начини за управление на трафика. Възникващите конфликти от движението на трафика в различни посоки е решено чрез принципа разделяне на потоците по време. Предимствата на светлинната регулация включват движение на трафика в определена последователност, повишен капацитет на кръстовищата и изисква прост геометричен дизайн.

По-нататък ще бъдат разгледани различни принципи на моделирането на светлинна сигнализация като моделиране на фазите, моделиране на дължината на цикъла, както и на зелената светлина. Също така ще се представят концепциите за поток на насищане, капацитет, и загубено време (lost times). Първоначално са дадени някои дефиниции и обозначения, последвани от различни стъпки при моделирането, започвайки от определяне продължителността на фазите. (Teodorovic и Janic, 2017)

#### 1.1.2. Определения и обозначения

Няколко дефиниции и обозначения трябва да бъдат разбрани при моделирането на светлинна регулация. Те са както следва:

- **Цикъл:** „Цикъл” е времето за пълна еднократна смяна на светлинните сигнали на светофарната уредба. (Наредба номер 17, 2001 г.)
- **Дължина на цикъла:** времето в секунди, което е нужно на светофара да завърши един пълен цикъл от индикации. Дължината на цикъла представлява времеви интервал между началото на зеления сигнал на два последователни цикъла (англ. Approach, подстъп. Обозначението за дължина на цикъла е  $C$ ).
- **Интервал:** той представлява прехода от една фаза (англ. stage) към друга. Има два вида интервали – интервал на промяна (англ. change interval) и интервал на разчистване (англ. clearance interval). Интервал на промяна също се нарича времетраене на жълт сигнал, той представлява интервал между зелен и червен

сигнал за даден подстъп. Интервалът на разчистване е интервал, по време на който всички индикации са в червено и го има след всеки жълт сигнал. Целта е освобождаване на кръстовището от превозните средства, които са навлезнали в него.

- **Зелен интервал:** това е зелената индикация за определено движение или група от движения и се обозначава с  $G_i$ . Това е фактическата продължителност на зелената светлина.
- **Червен интервал:** това е червената индикация за определено движение или група от движения и се обозначава  $R_i$ . Това е фактическата продължителност на червената светлина.
- **Фаза:** Фазата представлява зеленият интервал, както и интервалите на промяна и разчистване, които го следват. По този начин, по време на зеления интервал, няма конфликтни движения във фазата. Тя позволява група от движения да протичат безопасно, преди да е започнала фазата на друга група от движения.
- **Загубено време (англ. lost time):** това е времето, през което кръстовището не се използва ефективно за което и да било движение. Например, когато сигналът за даден подстъп се сменя от червено на зелено, шофьорът, който е първи на опашката пред светофара ще има нужда от време, за да възприеме сигнала на светофара (това обикновено се нарича време за реакция) и известно време ще бъде загубено, докато колата се придвижи и набере скорост.

### 1.1.3. Моделиране на фазите

Процедурата по моделирането на светлината сигнализация включва шест основни стъпки (Mathew, (2014), Тодорова, (2016), Тодорова, (2017)):

- 1) Моделиране на фаза;
- 2) определяне на продължителността на жълт сигнал и време за изчистване на кръстовището;
- 3) определяне на продължителността на цикъла;
- 4) разпределяне на продължителността на зеления сигнал;
- 5) изисквания за пресичането на пешеходците;
- 6) оценка на ефективността на дизайна от предишните стъпки.

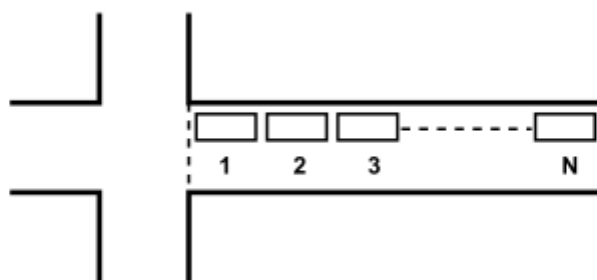
Целта на моделирането на фазата е да отдели конфликтните движения на кръстовището в отделни фази, така че движението в една фаза не трябва да има конфликти. Ако всички движения трябва да бъдат отделени без конфликти, тогава се изисква по-голям брой фази.

При такава ситуация, целта е да се моделират фази с минимални конфликти или с конфликти, които не са сериозни.

Няма точна методология за моделиране на фазите. Моделирането често се ръководи от геометрията на кръстовището, принципът на движение, особено на завиващите, относителната големина и важност на интензивността на трафика. Затова често се възприема процедурата на проба и грешка. Въпреки това, моделирането на фазите е много важно, защото то въздейства върху по-нататъшните стъпки в проектирането.

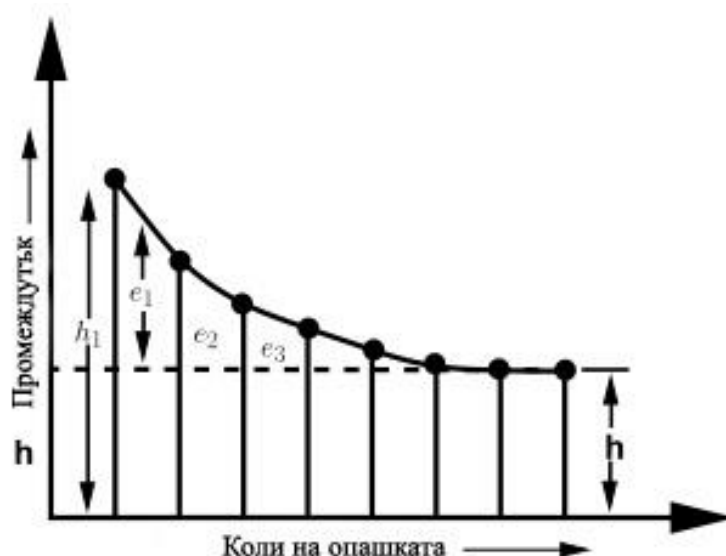
#### 1.1.4. Времетраене на цикъла

На фиг. 1.1 са показани група превозни средства, чакащи зелен сигнал на сигнализирано кръстовище (Mathew, 2014)



**Фиг. 1.1.** Група превозни средства, чакащи зелен сигнал на сигнализирано кръстовище

На фиг 1.2. е илюстриран промеждутъка от време между две превозни средства (Headway), (Mathew, 2014). По оста  $y$  е представен промеждутъкът от време между превозните средства. По оста  $x$  са представени превозните средства, които чакат на опашка.



**Фиг. 1.2.** Промеждутък от време между две превозни средства

Времетраенето на цикъла е времето, нужно за светлинната сигнализация да завърши един пълен цикъл от итерации т.е. един пълен цикъл през всички сигнални индикации. Отбелязва се с  $C$ . Фигура 1.1. показва група от  $N$  превозни средства на сигнализирано кръстовище, чакащи за зелен сигнал. Времевият интервал между две превозни средства, пресичащи стоп линията (англ. curb line), се означава като headway - фигура 1.2. Първият headway ще е относително по-дълъг, тъй като включва времето за реакция на шофьора и времето за ускорение. Втория headway ще е сравнително по-малък, защото вторият водач препокрива времето си за реакция с това на първия водач. След няколко превозни средства headway ще стане константа. Този константен headway, който характеризира всички headways, започващи с четвъртото или петото превозно средство се определя като headway на насищането (англ. saturation headway) и се обозначава с  $h$  (Mathew, 2014). Ако всяко превозно средство изисква  $h$  секунди зелен сигнал, и ако сигналът е винаги зелен, тогава  $s$  превозни средства на час ще пресекат кръстовището (Mathew, 2014).

$$S = \frac{3600}{h} \quad (1.1)$$

където  $s$  – скорост на интензитета на насищане (англ. saturation flow rate) измерено в превозни средства на час на лента при зелен сигнал,  $h$  е headway на насищането (англ.

saturation headway) в секунди. Както бе споменато, headway ще е повече от  $h$ , особено за първите няколко превозни средства. Разликата за първите няколко превозни средства може да бъде добавена към началното загубено време (start up lost time),  $l_1$ . Разликата между действителния headway и  $h$  за  $i^{th}$  превозни средство се обозначава като  $e_i$  - фигура 1.2.

$$l_1 = \sum_{i=1}^n e_i \quad (1.2)$$

Зеления интервал за преминаване на  $N$  превозни средства, може да бъде изчислен по следната формула (Mathew, 2014):

$$T = l_1 + h \cdot N \quad (1.3)$$

Където  $T$  е времеви период за преминаване на  $N$  превозни средства по време на зеления сигнал,  $l_1$  е началното загубено време (англ. start-up lost time), а  $h$  е headway на насищането (англ. saturation headway) в секунди.

#### 1.1.5. Ефективна продължителност на зеления сигнал

Ефективната продължителност на зеления сигнал е действителното време, което е на разположение на превозните средства, за да премина кръстовището. То е сума от действителната продължителност на зеления сигнал  $G_i$  плюс жълтия сигнал минус загубеното време. Това загубено време е сумата от началното загубено време (start-up lost time)  $l_1$  и загубеното време за изчистване на кръстовището от превозни средства  $l_2$ , обозначава се с  $t_L$ . Ефективното зелено време може да се пресметне като (Mathew, 2014):

$$g_i = G_i + Y_i - t_L \quad (1.4)$$

#### 1.1.6. Капацитет на лента

Съотношението на ефективно зелено време към дължината на цикъла ( $\frac{g_i}{C}$ ) се дефинира като зелено съотношение. Ние знаем че скоростта на потока на насищане е броят на превозните средства, които могат да преминат в една лента за един час приемайки, че сигналът винаги е зелен. Тогава капацитетът на платно се изчислява като,

$$c_i = s_i \frac{g_i}{C} \quad (1.5)$$

където  $c_i$  е капацитетът на лентата на превозното средство на час,  $s_i$  е дебитът на насищане (saturation flow rate) в превозното средство на час на платно,  $C$  е времето на цикъла в секунди.

#### 1.1.7. Определяне на дължината на цикъла

Фиксирането на дължината на цикъла е една от основните стъпки, свързани с проектирането на светлинната сигнализация.

Ако  $t_{Li}$  е стартовото загубено време (англ. start-up lost time) за фаза  $i$ , тогава общото загубено време за един цикъл е:

$$L = \sum_{i=1}^N t_{Li} \quad (1.6)$$

където  $N$  е броят на фазите. Ако стартовото загубено време е едно и също за всички фази, тогава общото стартово загубено време е  $L = N t_L$ .

Ако  $C$  е дължината на цикъла в секунди, тогава броя на циклите в рамките на един час е равна на  $= \frac{3600}{C}$ . Общото загубено време на час е броя на циклите за един час умножено по загубеното време за един цикъл е равно на  $= \frac{3600}{C} L$ . Замествайки  $L = N t_L$ , общото загубено

време за час може да бъде записано като  $= \frac{3600 N t_1}{c}$ . Общото ефективно зелено време  $T_g$  на разположение за придвижване в рамките на един час ще е един час минус общото загубено време за един час т.е.:

$$T_g = 3600 - \frac{3600 N t_L}{c} = 3600 \left[ 1 - \frac{N t_L}{c} \right] \quad (1.7)$$

Нека общия брой от критичена големина на лентите за движение за един час е даден като  $V_c$ , тогава  $V_c = \frac{T_g}{h}$ . Заменяйки  $T_g$  от предходното уравнение и  $s_i$ , в израза за максимална сума от критичена големина на лентите за час и чрез пренаписване на израза за  $C$ , се стига до следното уравнение:

$$V_c = \frac{T_g}{h} = \frac{3600}{h} \left[ 1 - \frac{N t_L}{c} \right], \quad (1.8)$$

$$= s_i \left[ 1 - \frac{N t_L}{c} \right],$$

$$C = \frac{N t_L}{1 - \frac{V_c}{s}} \quad (1.9)$$

Горното уравнение е базирано на предположението, че ще има равномерен поток в рамките на един час. За да се отчете вариацията на критичена големина за един час, фактор, наречен фактор на часа пик (англ. peak hour factor – PHF) е въведен, която е отношение между критичена големина за час към максималния поток (англ. maximum flow rate). Друго отношение, наречено v/c отношение, показващо качеството на услугата, също е включено в уравнението. Включвайки тези два фактора в уравнението за дължина на цикъла, крайният израз е следният:

$$C = \frac{N t_L}{1 - \frac{V_c}{s_i \times PHF \times \frac{v}{c}}} \quad (1.10)$$

Ръководство за капацитет на главни пътища (Highway Capacity Manual - HCM) дава уравнение за определяне на дължината на цикъла, което е леко модифицирано. Времетраенето на цикъла се изчислява по следния начин (Mathew, 2014):

$$C = \frac{N L X_C}{X_C - \sum \left( \frac{V_{c_i}}{s_i} \right)} \quad (1.11)$$

където  $N$  е броят на фазите,  $L$  е загубеното време за една фаза,  $\left( \frac{V_{c_i}}{s_i} \right)$  е съотношението на критичния обем към насищане на потока (англ. critical volume to saturation flow) за фаза  $i$ ,  $X_C$  е качествен фактор наречен критично  $\frac{v}{c}$  отношение, където  $v$  е обемът, а  $c$  е капацитетът.

На фигура 1.3.е показана продължителността на цикъла на светофара (Mathew, 2014).



**Фиг. 1.3.** Продължителност на цикъла

#### 1.1.2. Част на зеления сигнал от цикъла (англ. Green splitting)

Част на зеления сигнал от цикъла е разпределение на ефективното зелено време във всяка от фазите. Част на зеления сигнал от цикъла се пресмята по следната формула (Mathew, 2014):

$$g_i = \left[ \frac{V_{c_i}}{\sum_{i=1}^N V_{c_i}} \right] \times t_g \quad (1.12)$$

където:  $V_{c_i}$  е критичния обем на лентата за движение и  $t_g$  е общото ефективно зелено време в рамките на цикъла. То е равно на времетраенето на цикъла минус загубеното време за всички фази. Така

$$t_g = C - N t_L \quad (1.13)$$

където  $C$  е времетраене на цикъла в секунди,  $N$  е броят на фазите,  $t_L$  е загубеното време в секунди за една фаза. Ако загубеното време е различно за различните фази, ефективното зелено време може да бъде сметнато по следната формула:

$$t_g = C - \sum_{i=1}^N t_{L_i} \quad (1.14)$$

където  $t_{L_i}$  е загубено време през фаза  $i$ ,  $N$  е броят на фазите и  $C$  е времетраенето на цикъла в секунди. Действителното времетраене на зеления сигнал може да бъде пресметнато по следната формула:

$$G_i = g_i - y_i + t_{L_i} \quad (1.15)$$

където  $G_i$  е действителното времетраене на зеления сигнал,  $g_i$  е ефективно зелено време,  $y_i$  е времетраене на жълтия сигнал и  $t_{L_i}$  е загубено време през фаза  $i$ .

## 1.2. Модели за интензивност на трафика за основна транспортна мрежа

### 1.2.1. Модел на кинематичната вълна

Този модел е базиран на теорията за хидродинамика. Неговата обща форма се състои от уравнение за съхранение (уравнение 1.16), формулата която посочва, че интензивността е равна на произведението от плътността и скоростта (уравнение 1.17.), и предположението, че скоростта е функция от плътността на трафика. (Gartner и др, 2001). В дискретната форма се приема, че връзката, още наречена звеното или отсечка (англ. link) е разделен на брой сегменти. Daganzo предлага Cell Transmission Model (CTM), който е сходно цифрово приближение (англ. numerical approximation) на непрекъснатия хидродинамичен модел (Daganzo, (1994), Daganzo, (1995), Liu, (2015)).

За хомогенен път, Daganzo предлага използването на взаимовръзката интензивност-плътност. (уравнение 1.18.).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1.16)$$

$$q = ku \quad (1.17)$$

където  $k$ ,  $q$  and  $u$  обозначават плътност на трафика, интензивност и скорост, които може да варират спрямо локация  $x$  и време  $t$ .

$$q = \min\{Vk, Q, W(k_{jam} - k)\} \quad (1.18)$$

където:  $k_{jam}$  е плътността при задръстване,  $Q$  е капацитета на притока,  $V$  е скоростта на свободния поток и  $W$  скоростта на обратната ударна вълна (англ. backward shockwave speed).

Чрез разделянето на цялата мрежа на хомогенни клетки (дължината на клетката е равна на продължителността на времевата стъпка умножена по скоростта на свободния поток), резултатите от KWM могат да бъдат приближени чрез набор от рекурсивни уравнения. Уравнение 1.19. гарантира запазването на интензивността, а уравнение 1.20. определя отлива за всяка клетка по време на всяка времева стъпка.

$$n_i(t + 1) = n_i(t) + y_{i-1}(t) - y_i(t) \quad (1.19)$$

$$y_i(t) = \min \{n_i(t), Q_i(t), w[N_{i+1,max} - n_{i+1}(t)]\} \quad (1.20)$$

където:  $n_i(t)$  – е броят превозни средства в клетка  $i$  във времева стъпка  $t$

$y_i(t)$  - е броят превозни средства, които напускат клетка  $i$  във времева стъпка  $t$

$N_{i, \max}$  - максималния брой превозни средства, които може да се поберат в клетката

$\omega = W/V$

$Q_i(t)$  - минималната интензивност от клетка  $i$  към клетка  $i + 1$

В публикацията (Lo и др., 2001), показват, че СТМ може да бъде приложен към сигнализирани кръстовища. Първата клетка от дадено звено е моделирана да функционира като трафичен сигнал и  $Q_i(t)$  е формулирана като двоична променлива (уравнение 1.21.) която варира между 0 и скоростта на интензивността на насищане (англ. saturation flow rate) (Lo, (1999), Lo, (2001), Lo и др., (2001), Lo и Chow, (2004)).

В модела на Lin и Wang (Wei-Hua и Chenghong, 2004) клетките в мрежата са категоризирани в четири групи: обикновени, кръстовищни, произход и местоназначение.

Двата модела обаче са приложими само за еднопосочен трафик.

$$Q_i(t) = \begin{cases} Q_{max} & \text{If } t \in \text{green phase} \\ 0 & \text{If } t \in \text{red phase} \end{cases} \quad (1.21)$$

В (Zhang и др., 2010) разширяват двата споменати по-горе модела към двупосочен трафик и всички клетки в мрежата се категоризират в пет групи: : обикновени, произход, местоназначение, несигнализирано отклонение, сигнализирано отклонение и сигнализирано обединяване на клетки (Zhang и др., 2010).

Клетките за произход са тези с приток фиксиран като съответстващия входни данни на търсенето, а клетките за местоназначение са тези с неограничено изтичане (outflow). Li предлага подобрена СТМ формулировка, така че да се вземат под внимание блокирания поради опашки в различните групи от платна и подстъпи към кръстовища (Li, 2011). Всеки линк е концептуално разделен на четири зони: зона на сливане, зона на разпространяване, зона на разклоняване и зона на отпътуване. Превозни средства, които влизат в такова звено се придвижват през тези четири зони и тогава продължават към техните съответстващи направления. Тъй като в зоната за разклоняване превозните средства предназначени за различни дестинации може да се присъединят към различни опашки, подобренията СТМ може да взема под внимание блокажи сред различни движения.

### 1.2.2. Модел Store-and-forward

Моделът store-and-forward първоначално е предложен от Gazis за представяне на състоянието на трафика при претоварени кръстовища и от тогава се използва в различни трудове свързани с управление на трафика. (Gazis, (1964), Papageorgiou, (1995)) Концепцията е възприето от теорията на комуникационните мрежи. При този подход на моделиране, първоначално се предполага, че превозните средства, влизащи в звеното се движат с фиксирано време за пътуване. След това превозните средства или се съхраняват в края на това звено в случай на червен сигнал или продължават към по-нататъшното звено с дебит на интензитета на насищане (англ. saturation flow rate) по време на зеления сигнал. (Pavlis and Recker, (2004), Liu, (2015)).

Представено е звено  $z$ , което свързва две кръстовища  $i - 1$  и  $i$  (фигурата 1.4.), динамиката на трафика на звено  $z$  е дадена посредством уравнението за запазване (уравнение 1.22.), (Aboudolas и др., 2009). Опашките са представени посредством уравнение 2-8. По време на периоди на висока натовареност това ограничение може автоматично да доведе до подходящо натрупване на коли в дадено звено, за да се предпазят следващите след него области от претоварване. Потокът на коли към звено  $z$  е представен посредством уравнение 1.23.

$$xz(k+1) = xz(k) + T[qz(k) - sz(k) + dz(k) - uz(k)] \quad (1.22)$$

$$0 \leq xz(k) \leq xz, \max$$

$$q_z(k) = t_{i,z_{ui}}(k) \quad (1.23)$$

където:  $T$  е дискретната времева стъпка

$k = 0, 1, \dots$ , дискретен времеви индекс

$x_z(k)$  = броят превозни средства в звено  $z$  по време на  $kT$

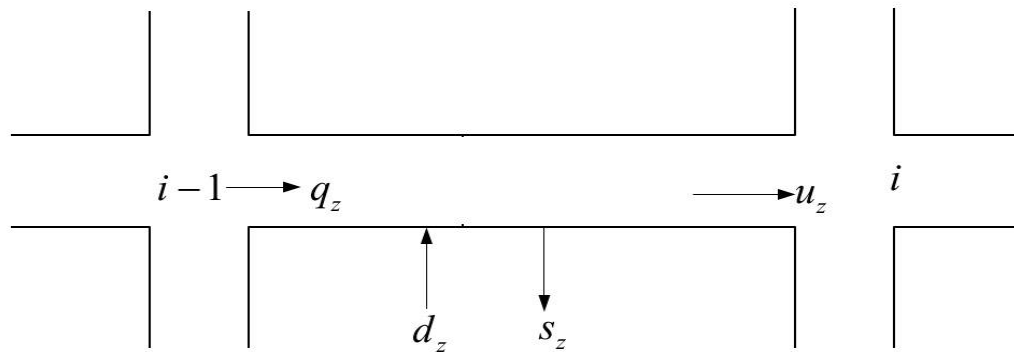
$q_z(k), u_z(k)$  = притокът и отливът от звено  $z$  в периода  $[kT, (k+1)T]$

$d_z(k), s_z(k)$  = интензивността на пристигащите, съответно интензивността на излизащите автомобили от звено  $z$

$x_z, \max$  = максимално допустимата дължина на опашката, в брой превозни средства

$t_{i,z}$  = съотношение на завиващите към звено  $z$ , които навлизат в кръстовище  $i$

На фигура 1.4. е показан пример за модела Store-and-Forward (Liu, 2015).



Фиг. 1.4. Пример за модела Store-and-Forward

Най-важната характеристика на модела store-and-forward е че дискретната времева стъпка  $T$  е равна на дължината на цикъла, което позволява математическото описание на развитието на интензивността на трафика. Пристигащият поток  $u_z(k)$  тогава има средна стойност за всеки период (уравнение 1.24.). Това е от голямо значение, защото позволява приложението на голям брой високо ефективни оптимизационни и управляващи методи с

полиномиална сложност, което позволява координирано управление на мрежи с голям мащаб в реално време. (Aboudolas и др., (2009), Aboudolas, K., и др., (2010)).

$$u_z(k) = G_z(k) S_z / C \quad (1.24)$$

където:  $G_z(k)$  е продължителността на зеления сигнал за звено  $z$ ,  $S_z$  е скорост на интензитет на насищане (англ. saturation flow rate) за звено  $z$ , и  $C$  е дължината на цикъла.

Моделът store-and-forward е прост модел и е приложим само в условия на задръстване, когато колите от автомобили в резултат от червената фаза не могат да се стопят напълно до края на последващата зелена фаза. По-късно моделът е бил разширен да представлява всички възможни условия на трафика (условия на задръстване и на ненатоварване) (Barisone, A., и др., (2002), Aboudolas и др., (2007)). При тези подходи е дефиниране нелинейна функция на изходящия поток (уравнение 1.25). Обаче, продължителен изходящ поток за звена (а не нула при червен сигнал и свободен поток по време на зелен), все още се запазва.

$$u_z(k) = \min\{G_z(k)S_z/C, x_z(k)/T\} \quad (1.25)$$

### 1.2.3. Модел Dispersion-and-store

Dispersion-and-store моделът се основава на емпирични наблюдения, за да симулира дисперсията на платото, т.е. платото от влизащи в линк превозни средства се разпръсква, докато те са равномерно разпределени по дължината на линка (англ. platoon – най-близък смисъл на български в контекста на тази дисертационна работа е „група“, но се употребява и думата „плато“). Разпръснатото плато в последствие или се съхранява в края на звеното, когато сигналът се сменя на червен или по-нататък се разпръсква в последващия линк, ако сигналът остане зелен. (Glomb, 1989). Редица изследвания са развили различни модели, за да опишат поведението на платото между светлинно сигнализирани кръстовища. Като цяло има два математически модела, описващи дисперсията на платото: модел на нормално разпределение (Normal Distribution Model), предложен от Pacey и модел на геометрично

разпределение (Geometric Distribution Model), предложен от Robertson, (Yu, (1997), Rakha и Farzaneh, (2005), Farzaneh и Rakha, (2006), Liu, (2015)).

Вече е проведено изследване на приложимостта на модела за дисперсия на платото, което го определя като надежден модел на интензитета в градски условия. Повечето изследвания са доказали, че моделът на Robertson за дисперсия на платото е надежден, точен и стабилен (Farzaneh и Rakha, (2006), Hunt, и др., (1982)), Maher, (2011)).

Той се е превърнал в универсален стандарт за дисперсия на платото и е приложен в някои софтуери за симулация на трафика. Базовия модел на дисперсия на платото на Robertson приема следната математическа форма (Manar и Baass, 1996).

$$q_t^d = F_n * q_{t-T} + (1 - F_n) * q_{t-n}^d \quad (1.26)$$

където:  $q_t^d$  = arrival flow rate (интензивност на пристигане) от предходното кръстовище в момент  $t$

$T_a$  = средно време за пропътуване на линка

$T$  = минималното време за пропътуване на линка (измерено в мерна стъпка  $T = \beta T_a$ )

$q_{t-T}$  = departure flow rate (интензивност на отпътуване) в последващо кръстовище в момент  $t-T$

$n$  = продължителността на стъпката на моделираното време

$F_n$  = smoothing factor (изглаждащ фактор) даден като

$$F_n = \frac{1}{1 + \alpha_n \beta_n T_a} \quad (1.27)$$

където:  $\alpha_n$  е коефициент на дисперсия на платото, а  $\beta_n$  е коефициент на времето за пътуване.

Уравнение 1.26. показва, че интензитета на трафика  $q_t^d$  е тегловна комбинация от модела на пристигане в предхождащия край на линка по време на предишната времева стъпка  $q_{t-n}^d$  и моделът на опътуване от последващия светофар  $T$  секунди преди това  $q_{t-T}$ .

Тъй като е емпиричен модел, точното калибриране и критично при разработка на ефективен план за светлинна сигнализация на кръстовището. Yu е разработил аналитична рамка за калибриране на параметри за модела на дисперсия на платото, използвайки статистически анализ на разпределението на времето за пътуване по линк (Yu, 2000). Rakha и Farzaneh подобряват процедурата на Yu и развиват три обобщени модела на дисперсия на платото, които допринасят за ефекта на продължителността на времевата стъпка върху дисперсията на платото (Rakha и Farzaneh, 2006). Wong и др. модифицират автентичния dispersion and store модел, за да се адресира проблема за вариращото във времето натоварване на трафика (Wong и др., 2000).

### **Сравнение на моделите за интензивност на трафика за основни трафични мрежи**

Моделът Cell transmission е способен да опише интензивността на трафика спрямо всякакви условия на трафика. При него линковете на мрежата се разделят на къси клетки и съответно по-къси времеви стъпки. Поради това Cell transmission моделът описва еволюцията на състоянията на вътрешния трафик за връзка по точно. Например моделът може да улавя шокови вълни (англ. shockwaves) и феномена на динамиката на опашки. За съжаление обаче моделът има следните недостатъци 1) приложението на практика на този оптимизационно управление базирано на този модел среща някои трудности, защото създаването на голям вектор на състоянията има високи изчислителни изисквания; 2) приложението в реални условия изисква специални измервания за всяка клетка, които обикновено не са на разположение или са неточни по различни причини. Изглежда, че Cell transmission моделът има ограничено значение при прекъснатия (управляван от светофари) интензитет на трафика, за разлика от непрекъснатия свободен поток на трафика, заради много непредвидени и трудно измерими смущения (инциденти, нелегален паркинг, пресичане на пешеходци, блокиране на кръстовища и други) може да влияят на интензитета на трафика в градска среда. (Aboudolas и др., 2009).

Моделът Store-and-forward е прост модел и може да осигури само приблизителна представа за динамиката на трафика при условия на задръствания. Например моделът не е чувствителен към краткотрайни колебания в опашките поради смяна на зелен с червен сигнал в рамките на цикъла. Обаче същият модел представя добре динамиката на спиране

и тръгване при интензивността на трафика при сигнализираните основни пътища в условията на задръстване, защото незадръстената част от линка се счита за пренебрежима в сравнение с общата дължина на линка и платото не може да се разпръсне. Средната интензивност на излизащи от възела автомобили при един или повече цикли, която се определя като процент (отношение продължителност на зелен сигнал към цикъл) от скоростта на интензивността на насищане (англ. saturation flow rate), означава че е приложим само за оптимизация на зеления сигнал (англ. split optimization). Очевидно е, че дължината на цикъла и offset нямат въздействие в рамките на store and forward модела и трябва да бъдат константни или да се актуализират в реално време независимо от зеления сигнал (англ. split optimization). Линеината характеристика за състояние-време на модела дава възможност за приложението на редица високо ефективни оптимизационни и управляващи методи.

Въпреки че dispersion store моделът е емпиричен модел, се счита, че той представя по-добре прекъснатия интензитет на трафика в светлинно сигнализираните мрежи при умерена натовареност на трафика. Този модел е емпирично валидиран в няколко градски зони по света. Известно е, че при сериозни задръствания този модел предвижда сложни развития на опашките, където опашки може да се формират и разпръскват в различни местоположения по линка. Точното калибриране на модела в реално време обаче е трудно.

Като цяло store-and-forward и dispersion and forward моделите считат кръстовището като единен сегмент, а cell transmission моделът използва дискретизация на време и пространство. (Liu, 2015)

### 1.3. Управление на трафик в градска мрежа

Градската мрежа включва няколко улици, които се пресичат в кръстовища, които могат или не могат да бъдат управлявани от светлинна сигнализация. Градското кръстовище се състои от набор от подходи и обща зона на пресичане - кръстовище. Подходът е част от улица, състояща се от една или повече ленти. Подстъп (англ. approach) е водещи до общата зона на пресичане на кръстовището, така че трафикът върху него има предимство (англ. r.o.w.) едновременно и превозно средство, в съответната опашка може да очаква да премине по време на сигнала приблизително по същото време, каквато и лента да избере. Трафикът на кръстовище се разделя на потоци. Поток е най-малката част от разглеждания трафик и се образува от всички превозни средства, които пресичат кръстовището от един и същи

подстъп. Два потока се наричат съвместими когато могат спокойно да преминат кръстовището едновременно; в противен случай те се наричат несъвместими или конфликтни. Цикълът на сигнала е едно повторение на основната серия от комбинации от сигнали на кръстовище. Продължителността му се нарича времетраене на цикъла или просто цикъл. Етап (или фаза) е част от цикъла, по време на който един набор от потоци има предимство. Константни загубени времена (англ. constant lost times) от няколко секунди са разположени между етапите, за да се избегнат конфликт между несъвместими потоци на последователни етапи (Diakaki и др., 2002).

Има четири възможни начина за повлияването на състоянията на трафика чрез светофари (Diakaki, 1999):

- *Спецификация на етапа*: За сложни кръстовища, включващи голям брой потоци, спецификацията на оптимален брой и съставяне на етапите е не-тривиална задача, която може да окаже голямо влияние върху капацитета на кръстовището и ефективността. Тази задача обикновено се решава офлайн.
- *Продължителност на зелената светлина (англ. split)*: Това е относителната продължителност на зеления сигнал на всеки етап (като част от времето на цикъла), която трябва да бъде оптимизирана според търсенето на участващите потоци.
- *Времетраене за цикъл*: По-дългото времетраене на цикъл обикновено увеличава капацитета на кръстовището, тъй като съотношението на постоянните загубени времена стават съответно по-малки; от друга страна, продължителността на цикъла може да увеличи закъснения на превозните средства в ненаситени кръстовища поради по-дълги времена на чакане по време на червената фаза.
- *Offset*: Това е времевата разлика между циклите на последователни кръстовища, които могат да доведат до зелена вълна ”по пътя; спецификацията на offset в идеалния случай трябва да отчита възможното съществуване на опашки от превозни средства.

Начини за управление на светофарите може да се класифицират според следните характеристики (Diakaki, 1999):

- *Изолираните стратегии* са приложими за единични кръстовища, докато *координираните стратегии* разглеждат градска зона или дори цяла мрежа, състояща се от много кръстовища.
- Стратегиите с *фиксирано време* използват исторически данни, за да посочат , офлайн, оптимални планове, зависещи от деня за настройка на светофарите;

гъвкавите стратегии за управление на трафика използват измервания в реално време, за да се установят в реално време подходящи настройки на светофара.

- Някои стратегии са приложими само за *ненатоварени условия*, при които опашките от превозни средства се образуват по време на червените фази и преминават по време на зелените фази; други стратегии са подходящи също за *пренатоварени условия* с частично увеличаване на опашките, които в някои случаи могат да достигнат до съседно кръстовище.

#### 1.4. Стратегии за управление на трафика в реално време

Опростен модел за управление, използван от различни разработки в миналото, се основава на парадигмата за моделиране store-and-forward (SFM); особено предимство на тези подходи е, че те са приложими за широкомащабни претоварени мрежи; основният им недостатък е, че поради използваното конкретно опростяване на модела, те са приложими само за оптимизация на продължителността на зеления сигнал, докато времетраенето на цикъла и offsets трябва да се осигурят чрез други алгоритми.

През последните няколко десетилетия са разработени разнообразни стратегии за управление на трафика в реално време за градските мрежи. Без да се прави опит за проучване на тази обширна изследователска област, ще бъдат разгледани няколко избрани стратегии (за допълнителна информация (Papageorgiou и др., 2003), някои от които са приложени в реални условия, докато други все още са в етап на изследване и развитие. Можем да разграничим два основни класа стратегии за управление на сигнала. В първия клас стратегиите са приложими само за (или ефективни за) мрежи с ненаситени условия на трафик, при което всички опашки на сигнализираните кръстовища се обслужват през следващата зелена фаза. Във втория клас имаме стратегии, приложими към мрежи с пренаситени условия на трафик, при което опашките могат да нарастват в някои връзки с непосредствен риск от преливане (англ. spillback) и в крайна сметка дори от блокиране на мрежата в мрежовите цикли.

SCOOT (Hunt и др., (1982), Bretherton и др., (2004)) и SCATS (Lowrie, 1982) са две добре познати и широко използвани координирани стратегии за реагиране на трафика, които функционират ефективно, когато условията на движение в мрежата са под насищане, но

тяхната ефективност може да се влоши, когато силните задръствания продължават през пиковия период. Други разработени модели, базирани на модели, зависещи от трафика (англ. traffic-responsive strategies) като PROLYN (Henry и др., 1983) и RHODES (Mirchandani и Head, (1998), Mirchandani и Wang, (2005)) използват динамично програмиране. Поради експоненциалната сложност на тези алгоритми за решение, основното ядро за оптимизация не е възможно в реално време за повече от едно кръстовище.

Store-and-forward моделирането на пътни мрежи за първи път е предложено от (Gazis и Potts, 1963) и оттогава се използва в различни работи, по-специално за управление на движението по пътищата. Този моделен подход, който описва процеса на мрежовия трафик по опростен начин, за да се заобиколи включването на дискретни променливи, предлага основно предимство: позволява високоефективни методи за оптимизация и управление с полиномиална сложност да се използват за координирано управление на мащабни претоварени градски мрежи. От друга страна, въведеното опростяване на моделирането позволява само оптимизация на зеления сигнал, докато времетраенето на цикъла и offsets трябва да се предоставят от други алгоритми за управление. Наскоро разработена стратегия за управление на сигнала от този тип е TUC (Diakaki и др., 2002).

## **1.5. Изводи от Глава 1**

В глава първа бе направен обзор на по-значими понятия и теоретични постановки в областта на трафика в градска среда, което да постави основата за по-нататъшното разглеждане на темата. В тази връзка са изяснени понятия, свързани със светлинно сигнално регулиране. Описана е математическата основа на светлинното сигнално регулиране, която е важна за дефинирането на оптимизационните задачи в дисертационната работа.

Разгледан са и три модела на трафика, от които един - store-and-forward модела, е в основата на формулирането на модел на трафика и решаването на оптимизационна задача за избрана мрежа от кръстовища.

Включени са и стратегии за управление на трафика, които са разработени и се прилагат в световен мащаб.

Дисертационната работа разглежда нови задачи за йерархична оптимизация, с което показва полезността на този тип формализъм при прилагането му за оптимизиране на градски трафик. Резултатът е увеличаване на пропускателната способност на пътната мрежа, намалени опашки пред светофарите, по-малко задръствания и по-слабо замърсяване на въздуха.

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ НА ЙЕРАРХИЧНИ ОПТИМИЗАЦИОННИ ЗАДАЧИ И МОДЕЛИ

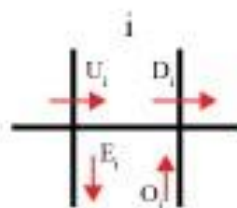
### 2.1. Двуйерархична оптимизация в транспортна мрежа

В тази глава ще бъде описана двуйерархична оптимизация за управление на градска транспортна мрежа. Добре известният store-and-forward модел при управлението на трафика се използва, за да се увеличи дефиниционната област на управляващите въздействия. Основно store-and-forward моделите прилагат продължителността на зеления сигнал като управляващо въздействие, приемайки цикъла на светофара като постоянен параметър. С помощта на двуйерархично представената задача с управляващото пространство може да бъде определен в рамките на увеличено пространство за управление, включващо както продължителността на зеления сигнал, така и цикъла. И двете са намерени като оптимални решения на двуйерархична задача за оптимизация.

Целта на управлението върху транспортните мрежи е поддържането на капацитета на мрежата на минималното му ниво. Капацитетът на транспортната мрежата може да се влоши значително, когато задръстванията се появяват в мрежовите връзки. По този начин целта на управлението на движението е да ограничи събитията поради претоварени трафик условия като пренасищане и разливане на чакащите превозни средства по връзките. Най-актуалните подходи за управление на трафика обикновено се фокусират върху градския или магистралния трафик. За градските райони светофарите са основните използвани механизми за управление на трафика.

Тази точка се занимава с политиките за управление, прилагани за градските райони. Градската мрежа включва улици, свързани по между си с кръстовища. Основният принцип на управление на потока на трафика в градските райони е минимизиране на загубените времена (англ. lost times) и броя на спиранията по време на шофиране. Всички тези критерии са функции на дължини на опашката, възникващи на връзките. Управлението на градския трафик се фокусира върху оценка на закъсненията и дължините на опашката, които са резултат от управлението на трафика на кръстовищата. Така забавянията в трафика и опашките участват в управляващите критерии на оптимизационната задача. Тъй като store-and-forward моделът е от първостепенно значение за управлението на трафика в градски условия, следва кратко негово описание.

Изследванията и разработването на градското светлинно сигнализирано управление се отнасят по-специално за наситени (saturated) условия на движение. Store-and-forward моделът позволява разработване на ефективни решения за оптимизация. store-and-forward моделирането на трафика е предложено първоначално от (Gazis и Potts, 1963). Този модел формализира по прост начин процеса на движение в градска мрежа. Поради вътрешната си простота, той се прилага за случаите на претоварване в мрежи с големи мащаби. Някои автори са разработили стратегии за управление на движението в градските зони, прилагащи store-and-forward модела (Berg и др., (2007), Diakaki и др., (2002), Kashani, (1983), Yin и др., (2002)). Най-важните променливи са дължината на опашката  $x_i$  (или просто превозни средства), изразена с броя на превозните средства във връзка  $i$ . Графичното представяне на store-and-forward модела е даден на фиг. 2.1 (Stoilov и др., 2015). Търсенето (англ. traffic demands) и излизащите потоци (англ. exit flows) се категоризират в 4 типа въз основа на тяхното генериране и дестинация.



**Фиг. 2.1.** Графично представяне на store-and-forward модела

Използване на обозначение  $N_i(t)$  за броя на превозните средства по връзката  $i$  в момент  $t$ , това числото се формализира като:

$$N_i(t) = A_i(t) - L_i(t) \quad (2.1)$$

където:  $A_i(t)$  означава пристигащите превозни средства във връзка  $i$  във време  $t$ ;  $L_i(t)$  - превозни средства, напускащи връзка  $i$  във време  $t$ .

Използвайки нотацията от фиг. 2.1., следва:

$$A_i(t) = U_i(t) + O_i(t), \quad (2.2)$$

$$L_i(t) = D_i(t) + E_i(t), \quad (2.3)$$

Където:  $O_i(t)$  означава превозните средства, които произхождат от връзка  $i$ ;  $E_i(t)$  - превозни средства, които са пристигнали във връзка  $i$ ;  $U_i(t)$  - превозни средства, които влизат във връзка  $i$  през кръстовището;  $D_i(t)$  - превозни средства, които излизат от връзка  $i$  към следващото кръстовище.

Връзка  $N_i(t) = A_i(t) - L_i(t)$  може да се изрази в дискретна времева форма,

$$x_i(k+1) = x_i(k) + T[q_i(k) - e_i(k) + d_i(k) - o_i(k)], \quad (2.4)$$

където:  $x_i(k+1)$ ,  $x_i(k)$  са превозни средства във връзка  $i$  за периода  $[kT, (k+1)T]$ ,  $T$  е управляващ интервал;

$q_i(k)$  - входящия поток (input flow) (коли/час),  $q_i = \frac{U_i}{T}$ ;

$o_i(k)$  - изходящия поток (outflow) (коли/час),  $o_i = \frac{D_i}{T}$ ;

$e_i(k)$  - изходен поток (exit flow) (коли/час),  $e_i = \frac{E_i}{T}$ ;

$d_i(k)$  - искания поток (demand flow) (коли/час),  $d_i = \frac{O_i}{T}$ .

Настоящата практика прилага стойностите на  $d_i$  и  $s_i$  като известни параметри за управляващата задача. Те се изчисляват като процент от входния поток (input flow)  $q_i(k)$ . Управляващото въздействие се въвежда за изходящия поток (outflow) като:

$$u_i(k) = \frac{s_i G_i}{c} = s_i g_i \frac{veh}{h}, \quad (2.5)$$

където:  $s_i$  е потокът на насищане на връзката  $i$  (veh/h),  $c$  е цикълът (s) на светофара,  $G_i$  е продължителността на зелената светлина (s),  $g_i$  е относителната продължителност на зелената светлина.

Особено предимство на моделирането на store-and-forward модела е, че е приложим за широкомащабни претоварени мрежи. Основният недостатък е, че поради конкретните опростявания на моделирането, то е приложимо само за оптимизация на зеления сигнал (англ. green split), докато времетраенето на цикъла (cycle time) и отместването (offsets) трябва да се предоставят чрез други алгоритми (Aboudolas и др., 2009).

### Критерии за оптимизация за управление на градския трафик

Най-подходящата цел за управление при състояние на претоварен трафик е да се сведат до минимум събитията от пренасищане и spillback на опашките на дадена връзка. По този начин подходящ критерий за оптимизация е минимизирането на относителната заетост (англ. occupancy) на връзката  $i$  или  $x_i / x_{imax}$ , където  $x_{imax}$  е максималният брой превозни средства, определен от капацитета на връзката. Този критерий е разумен от гледна точка на управлението и той се формализира като минимизиране на общите дължини на опашката в градската мрежа (Parageorgiou и др., 2003):

$$\sum_{i \in \text{network}} x_i \quad (2.6)$$

Алтернативен критерий, който се прилага широко сега, е свеждането до минимум на общото прекарано време (TTS) от превозните средства в мрежата. Този критерий води също до минимизиране на сумата на  $x_i$ , тъй като неговата формализация е дадена като (Parageorgiou и др., 2000):

$$\text{TTS} = T \sum_{k=1}^K N(k), \quad (2.7)$$

където:  $K$  обозначава времевия хоризонт;  $N(k)$  – общия брой превозни средства в мрежата във време  $k$ ;  $T$  – времеви интервал.

Броят на превозните средства в градската мрежа за всяка стъпка на управление се променя рекурсивно:

$$N(k+1) = N(k) + T[A(k) - L(k)] = N(0) + T \sum_{\kappa=0}^k [A(\kappa) - L(\kappa)], \quad (2.8)$$

Където  $N(0)$  е първоначалният брой на превозни средства в мрежата,  $A(k)$  са пристигащите превозни средства във всяка връзка (превозни средства/час),  $L(k)$  са напускащите всяка връзка коли (превозни средства/час).

$$TTS = TKN(0) + T^2 \sum_{k=1}^K \sum_{\kappa=0}^{k-1} A(\kappa) - T^2 \sum_{k=1}^K \sum_{\kappa=0}^{k-1} L(\kappa). \quad (2.9)$$

Ако се приеме, че пристигащите превозни средства в мрежата не зависят от стратегията на управление, това се счита за шум за системата за управление. По този начин, минимизирането на TTS е еквивалентно на максимизиране на претеглена сума от напускащите автомобили от мрежата, т.е. максимизиране на потоците за ранен изход (англ. early exit flows).

Ако се приеме, че пристигащите превозни средства в мрежата не зависят от стратегията на управление, това се счита за шум за системата за управление. По този начин, минимизирането на TTS е еквивалентно на максимизиране на претеглена сума от напускащите автомобили от мрежата, т.е. максимизиране на потоците за ранен изход.

По-късно, в двуйерархичната оптимизационна задача, ще се представят едновременно тези два критерия за управление: да се сведе до минимум сумата от дължините на опашката  $x$  и да се увеличи максимално напускащите превозни средства  $L$  от мрежата.

## Подходи за управление и оптимизация

Store-and-forward модела на мрежите за градски транспорт е реализиран от няколко подхода за управление (Aboudolas и др., 2009). Продължителността на зеления сигнал се намира като линеен многопроменлив регулатор със обратна връзка (англ. linear multivariable feedback regulator), даден като:

$$q(k) = q^N - Lx(k), \quad (2.10)$$

където:  $q^N$  е фиксиран план за управление, изчислен на базата на историческа информация за трафика,  $L$  е решението на съответното уравнение на Riccati, произтичащо от задачата за оптимизация на LQ,  $x(k)$  са измерените превозни средства на връзките.

Поради формулата за управление на LQ, тази стратегия не позволява включването на ограничения за неравенство за ограничаване на дължините на опашката и продължителност на зеления сигнал. Пространството за управление на тази задача се отнася само за продължителността на зеления сигнал на светофарите. Цикълът и offset не се разглеждат в тази задача.

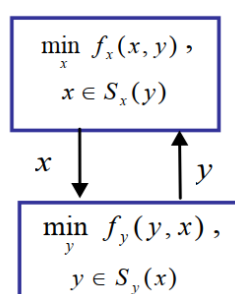
Разширение на задачата за управление с обратна връзка е дефинирането на задача от квадратичното програмиране. Той съдържа ограниченията, но решението му води до система за управление с отворен контур (англ. open loop control system). Съответно, такава стратегия за управление се нуждае от повече изчислителни мощности онлайн, за да реши задачата с оптимизацията.

Промените в нелинейната формализация на управлението са дадени в (Aboudolas и др. (2009), Diakaki и др. (2002)); с йерархично разлагане на задачата за управление (Homolova, 2005); модел за прогнозиране на модела (Berg и др. 2007); прилагане на формализма за времезакъснението (Tamura, 1975). Всички тези стратегии за управление адресират продължителността на зеления сигнал като управляваща променлива. Опитите за разширяване на управляващото пространство се извършват от (Diakaki и др., 2003). Управлението на цикъла и продължителността на зеления сигнал се реализират като независими алгоритми за управление (Diakaki и др., 2003). Подобна формализация не позволява справяне с вътрешните взаимовръзки между управляващите влияния, адресиране

на продължителността на продължителността на зеления сигнал и времевия цикъл в обща оптимизационна задача.

### Двуйерархичен подход за разширяване на управляващото пространство

Идеята за двуйерархична стратегия за управление се отнася до решаването на две задачи за оптимизация, които са взаимосвързани (Фиг. 2.2), (Stoilova и Stoilov. 2020).



Фиг. 2.2. Двуйерархична оптимизация

Задачата на горното ниво приема стойностите на  $y = y^*$  като известни параметри и намира оптимално решение  $x^*(y)$  чрез решаване на задачата

$$\begin{aligned}
 &f_x(x, y^*), \\
 &x \in S_x(y^*).
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Решението  $x^*(y)$  е функция на параметъра  $y$ . Съответно, задачата с по-ниското ниво приема  $x = x^*$  като известни параметри и намира решение  $y^*(x)$  като функция на  $x$ .

Тези две взаимосвързани задачи за оптимизация дават решение на глобалната задача.

$$\begin{aligned}
 &f_x(x, y), \\
 &x \in S_x(y),
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

$$y \in \arg\{f_y(y, x) \in S_y(x)\}$$

което означава, че  $x^{\text{opt}}$  е решението на задачата за оптимизация, където  $y$  променя основната функция  $f_x(x, y)$  и допустимата област  $S_x(y)$ . Също така,  $y$  е решение на задачата от ниско ниво, повлияно от своя страна от  $x$ .

Ще направим сравнение на задача за двуйерархична оптимизация с класическа задача за оптимизация

$$f_x(x), \tag{2.13}$$

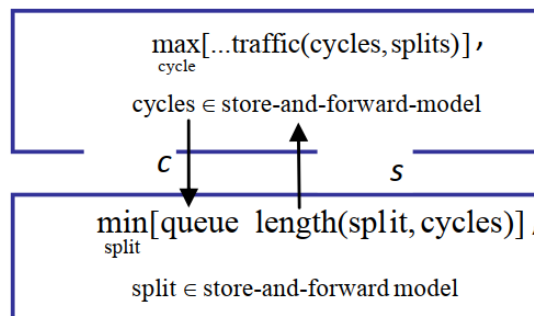
$$x \in S_x$$

Двуйерархичната оптимизация разширява пространството на аргументите от  $x^{\text{opt}}$  до  $(x^{\text{opt}}, y^{\text{opt}})$ . Двунивовата оптимизация оптимизира не само целевата функция  $f_x(x, y)$ , която се решава на горно ниво, но и тази от долното йерархично ниво  $f_y(x, y)$ , което означава, че оптимизационните цели се увеличават, въпреки че функцията  $f_y(x, y)$  е подчинена на горната целева функция  $f_x(x, y)$ . За класическия случай целевата функция е само една -  $f_x(x)$ . Третата особеност е, че областта на ограниченията при двуйерархичната оптимизация е значително по-широка в сравнение с класическия случай, което дава предимства на двуйерархична оптимизация за справяне с повече ограничения в сравнение със случая при класическата оптимизация. Изхождайки от тази концептуална рамка, стратегията за управление на автомобилен транспорт в рамките на град може да бъде усложнена до двуйерархична задача, която оптимизира едновременно продължителността на зелената светлина и цикъла като аргументи на управлението.

Досегашно изследване разглежда задачата на двуйерархичното управление за случая с градски трафик, интегрирайки два оптимизационни задачи (Фиг. 2.3), (Stoilov и др., 2015). Задачата от ниско ниво оптимизира дължината на опашките като променя продължителността на зелената светлина. Тази задача предполага, че циклите са известни параметри. Горната оптимизационна задача оптимизира циклите, като продължителността на зелената светлина се приема като известна величина. Целевата функция на тази задача

се определя като максимизиране на напускащия трафик от градската мрежа. Такава стратегия за управление ще дефинира по оптимален начин и двата аргумента на трафика: продължителност на зеления сигнал и времеви цикли. Оптимизацията ще се справи с минимизиране на дължините на опашката и максимизиране на напускащите автомобили.

На фиг. 2.3. е показана двуйерархична оптимизация в контекста на управление на трафика (Stoilova и др. (2019), Stoilova и Stoilov (2020), Stoilova и Stoilov, (2020, in print)).



**Фиг. 2.3.** Двуйерархична оптимизация в контекста на управление на трафика

Класическата линейно квадратична формализация прилага циклите като постоянни стойности и по този начин дефиниционната област на управляващи въздействия съдържа само продължителността на зеления сигнал. Разполагайки с по-широко пространство за управление, е възможно да се постигнат повече и допълнителни цели в процеса на управление и да се включат повече ограничения. Настоящата дисертация прилага оптимизация за намаляване на общите опашки и максимизиране на превозните средства, които преминават през градската зона.

## 2.2. Изводи от Глава 2

Във втора глава са разгледани постиженията в областта на дефинирането и решаването на двуйерархични оптимизационни задачи в областта на оптимизацията на градски трафик в мрежа от кръстовища.

Представена е формалната постановка на една двуйерархична оптимизационна задача. Същата формална постановка, бе представена в контекста на автомобилния трафик в градска среда т.е. управлението на светлинно сигнално регулирани кръстовища. Това е важно, от гледна точка на поставяне основата на дефинираните и решени двуйерархични задачи в същата област на приложение в настоящата дисертационна работа.

Формалната постановка на двуйерархичната задача и контекста на приложение са същите за дисертационната работа. Разликата от разгледаната в тази точка задача е в дефинирането на целевите функции и логиката на избор на параметри за горната и долната целеви функции. Подробно описание ще бъде разгледано в последващите глави.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТВАНЕ НА ЙЕРАРХИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАНСПОРТЕН ТРАФИК

### 3.1. Използвани програмни пакети за моделиране и оптимизиране на трафик

В дисертацията са използвани три софтуерни пакета – Aimsun, TRANSYT 15 и MATLAB. Aimsun и TRANSYT 15 са специализирани пакети за симулиране и съответно оптимизиране на автомобилен трафик (Aimsun, (2013), Binning, (2015)). MATLAB е използван за математическо симулиране на разглеждана група от кръстовища, като са описани опашки на база на store-and-forward модел и е приложена двуйерархична оптимизация. Резултатите, получени от MATLAB за продължителност на цикъла и за зелена светлина са въведени в Aimsun за валидация на тяхната валидност и превъзходство спрямо измерванията преди оптимизация.

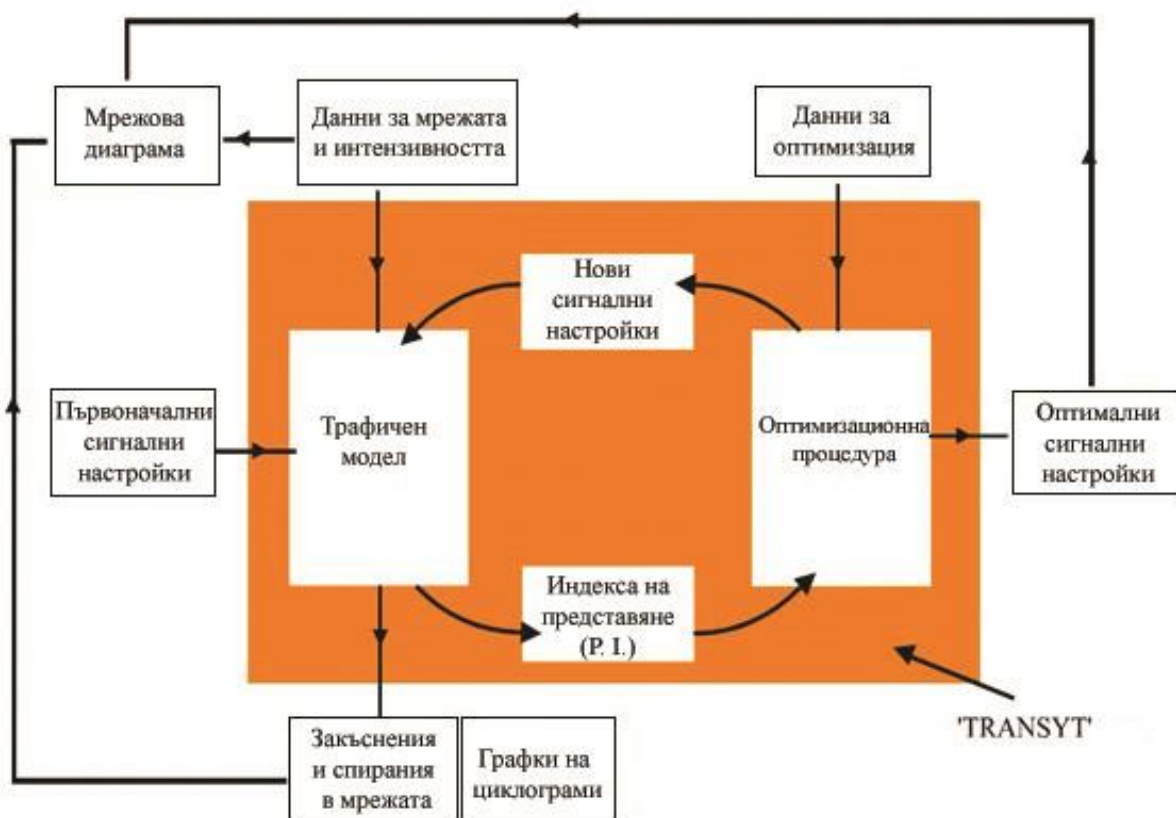
Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks- Усъвършенстван интерактивен микроскопски симулатор за градски и не-градски мрежи), (Aimsun, 2013). Той е в състояние да възпроизведе реалните особености на трафика на всеки мрежов транспорт. Използван е за проектирането и тестването на системите за управление на движението, правилата за управление на трафика, управление за достъп, местоположението на устройствата за таксуване на изминат участък, мрежите за обществен транспорт, пътните платна, възможностите за работа заедно със системите за управление на превозните средства и други приложения в реално време.

Микросимулационните модели (микромоделите) симулират движението на индивидуалните превозни средства, базирайки се на модели за движението им – динамика на следване на превозните средства и смяна на лентите. Превозните средства влизат в мрежата според дадено статистическо разпределение и се придвижват по нея до зададено местоназначение. Може да се моделират различни класове превозни средства, типове водачи (най-вече според ниво на агресивност), степен на познаване на инфраструктурата от водачите и пр. С микросимулационни модели може да се моделират не само отделни кръстовища или групи от кръстовища, но и сравнително големи територии. (Ангов, 2017).

Именно микросимулационният модел е в основата на експериментите в тази дисертация, поради това че обектът на изследване е с относително малък размер – градска мрежа от четири свързани, светлинно регулирани кръстовища.

Софтуерната среда за оптимизация на светлинната регулация - TRANSYT 15 също е приложена в изследванията по задачата за оптимизиране на трафик в градска среда.

Моделът на работа на TRANSYT 15 е представен на фигура 3.1. (Binning, 2015). Софтуерът пресмята и оптимизира целева, функция наречена Performance Index, част от която е времезакъснението и броя спирания на автомобилите, целта е тези два показателя да са минимални за мрежата, така че да се образува “зелена вълна”. При зелена вълна групата от автомобили от предходен светофар достига светофара на следващото кръстовище на зелен сигнал и това може да се случи за няколко последователни кръстовища.



Фиг. 3.1. Процедура по оптимизация в TRANSYT 15

Процесите, описани в по-тъмния участък от фигура 3.1 протичат в средата TRANSYT. Процесите, отбелязани в светли правоъгълници са в друг софтуерен пакет. В случая за направените изследвания, това е софтуерният пакет Aimsun.

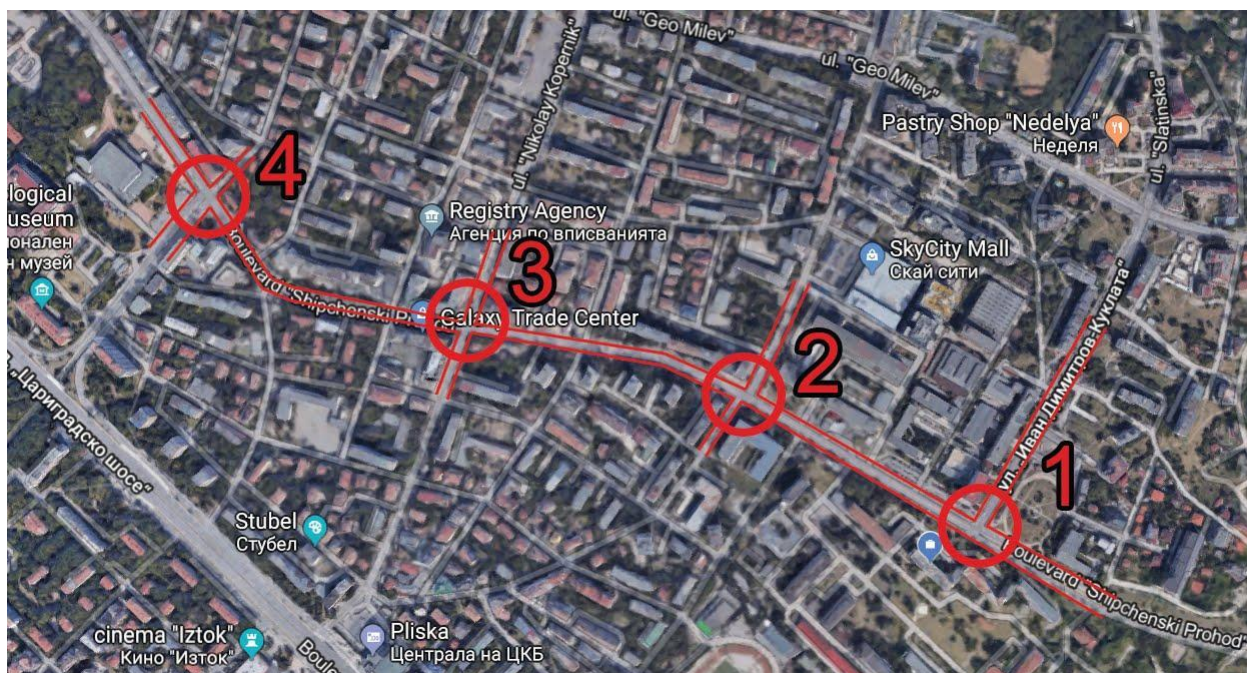
Първоначално се създава модел на транспортна мрежа в пакет Aimsun, където са въведени и първоначални настройки на светлинната сигнализация. Създадената транспортна мрежа се експортира в TRANSYT 15. Изчислява се първоначалния Performance Index и се провежда първа итерация на оптимизационна процедура за намаляване на този Performance Index. Тази оптимизационна процедура води до нови настройки на светофара, които се вкарват в началния модел и по този начин кръга се затваря и се почва с нова итерация по пресмятане на Performance Index, оптимизация, нови настройки на светофарите и тяхното въвеждане в модела на трафика. Софтуерът предлага метода на „най-стръмното спускане“ като оптимизационен метод.

Трябва да се напише специален програмен скрипт за използване при двуйерархичен проблем. Проблемът с двуйерархичната оптимизация е решен в MATLAB среда. В MATLAB е включена специален допълнителен инструмент за решаване на двуйерархични задачи. Допълнителният инструмент се нарича YALMIP. YALMIP е безплатен инструмент, който прави дефинирането и решаването на оптимизационни задачи лесно (<https://yalmip.github.io/>). Подробно описание на този инструмент е дадено в (Lofberg, 2004).

Други подходи за решаване на оптимизационни задачи, свързани с автомобилния трафик са разгледани в (Stoilov и др. (2017), Balabanov и др. (2016), Casas и др., (2010), Ghadiri и др. (2019)).

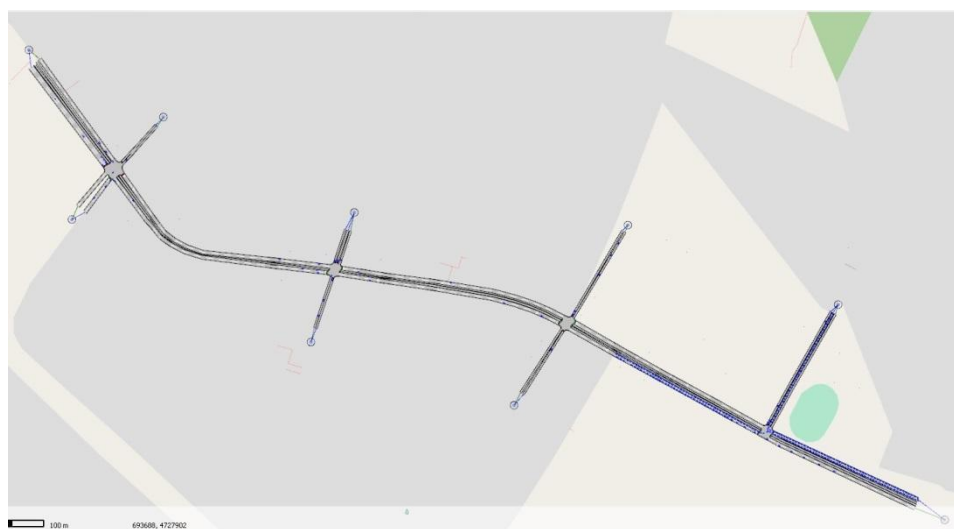
### **3.2. Обект на симулацията**

На фигура 3.2. е показан изглед на градската мрежа от четири кръстовища взет от Google Maps. На нея се виждат наименованията на някои улици, на търговски и други обекти и се получава цялостно впечатление за гъста населеност от гледна точка на сгради.



Фиг. 3.2. Изображение на четирите свързани кръстовища от Google Maps

На фигура 3.3. са показани четири свързани светлинно регулирани кръстовища, моделирани в софтуерната среда Aimsun. Кръстовищата се намират по протежението на бул. Шипченски проход в град София. Кръстовищата се намират на относително малко разстояние едно от друго, което е добра предпоставка за достигането на зелена вълна. Общата дължина на разглеждания участък е 1.5 км.



Фиг. 3.3. Четири свързани светлинно регулирани кръстовища в Aimsun

В разглеждания участък има много точки на интерес (Points of Interest) като офиси, търговски центрове, училища, детски градини, поликлиника и други. Тези точки на интерес са места, които по определени причини привличат хора. На тези места се генерира трафик, както от местното население, така и от хора от други райони на града.

При извършеното на място проучване на изследвания участък в някои части от него са установени условия на пренатоварване - опашки, които не могат да преминат изцяло по време на зеления сигнал от светофарния цикъл и съответно формират остатъчна опашка, която заема част от зеленото време на следващия цикъл, за да премине през кръстовището.

Капацитетът на кръстовището може да бъде надвишен, както по отношение на времеви аспект, така и по отношение на пространство. По отношение на времеви аспект, пренатоварването се наблюдава, когато продължителността на зеления сигнал не е достатъчна, за да преминат всички коли, пристигнали пред светофара по време на червения сигнал т.е. формира се остатъчна опашка. По отношение на пространствения аспект се говори за пренатоварване, ако опашката от коли достига предходното кръстовище и по този начин част от зеления сигнал остава отново неизползвана, поради невъзможността колите от предходното кръстовище да преминат през него. Докато времевото пренатоварване може да засяга изолирано кръстовище, пространственото пренатоварване е признак за деградация в мрежата от кръстовища. Подробно описание на методологията за определяне на пренатоварено кръстовище посредством събиране на информация от сензори, може да бъде намерено в (Wu и Liu, 2010), която методология има за цел и да определи значимостта на пренатоварването.

В участъци от изследваната мрежа са наблюдавани и двата вида пренатоварвания. Оценката е извършена с помощта на наблюдение, поради отсъствието на специализирано оборудване за събиране на данни (детектори) в изследвания участък. Именно това е и една от причините да се приложи store-and-forward модела наред с неговата опростеност спрямо други модели за описване на трафика и широкото му приложение от други изследователи в областта на управление и оптимизация на градски трафик.

### **3.3. Проведени експерименти**

Фигура 3.4. представя проведени експерименти във връзка с дисертационния труд. Всеки един от тези експерименти ще бъде подробно описан в по-нататъшното изложение.



Фиг. 3.4. Преглед на направените експерименти

Първоначалните експерименти наблягат повече на ползването на програмните продукти, тяхното разучаване и прилагане – тези експерименти са обозначени в червено на графиката (първи и втори правоъгълник). Следват същинските експерименти за дисертационния труд, които носят по-значителната част от приложния и научно-приложния принос. Тези така наречени същински експерименти използват двуйерархична оптимизация

и функцията `solvebilevel()` в MATLAB и тестват получените резултати за светлинната регулация в специализираните програмни среди за симулация и оптимизация на трафик – на фигурата са обозначени в жълто (трети и четвърти правоъгълник). След тях следват извършени експерименти за усложняване на използвания модел и доближаването му до реални условия с въвеждане на трамвайни спирки и паркиране на улицата.(пети правоъгълник). Накрая са поставени експерименти за гъвкаво управление на трафика, които са направени изцяло в Aimusn. Освен добрите трафични показатели, до които водят тези изследвания, се разглеждат и аспектите консумация на гориво и замърсяване на околната среда. (шести правоъгълник). Посоките за бъдещо развитие (седми правоъгълник) са представени в частта „Бъдещо развитие“, намиращ се към края на дисертационната работа.

### **3.4. Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun**

#### **3.4.1. Резюме на експеримента**

В представения експеримент се изследва възможността за подобрене на трафика по протежението на бул. Шипченски проход. Извършва се динамична микросимулация. Променят се настройките на зеления сигнал за светофарите на булеварда и малките улици пресичащи булеварда. Хипотезата е, че съществуват настройки на светофарите, които са по-добри от действителните, които ще подобрят показателите на трафика по булеварда и могат да бъдат установени посредством симулация. Това изследване се провежда само и единствено посредством използване на симулационен софтуер Aimsun. Сравнени са 10 показателя на трафика за мрежа от 4 кръстовища по бул. Шипченски проход, за различни настройки на зеления сигнал за светофарите на булеварда и за светофарите на малките улички. Резултатите доказват хипотезата, че съществуват по-добри настройки на светофарните уредби с оглед на подобряване на 10-те избрани показателя на трафика за мрежата от кръстовища, които настройки са открити експериментално чрез симулация.

#### **3.4.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение**

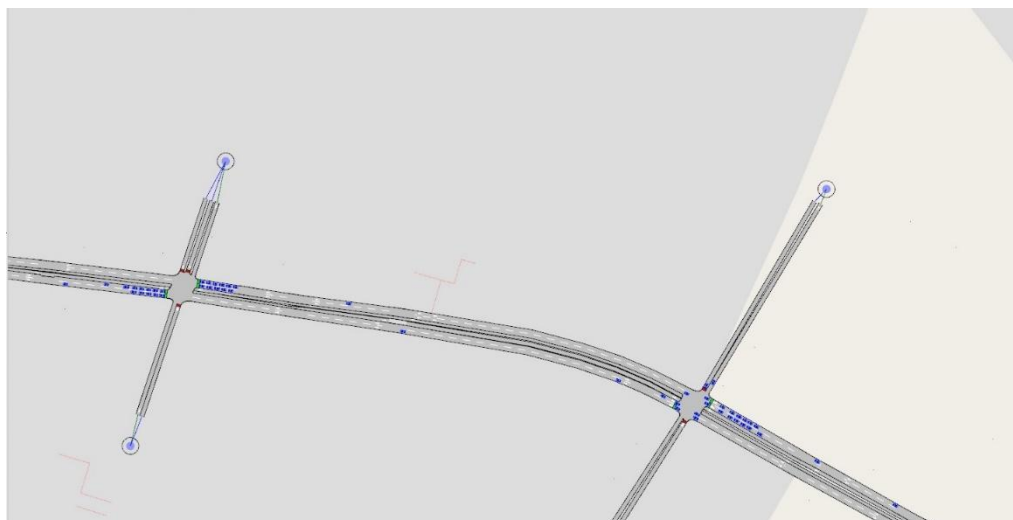
Затрудненото придвижване е често разглеждан проблем, свързан с разрастването на градовете и увеличаването на броя превозни средства (Трендафилов, (2018), Иванов, (2017), Ivanova, (2017)). Като общ показател измерващ нивото на задръстванията е въведен индекс на трафика (индекс на движението). Това е съставен индекс, отчитащ: изразходвано в

трафика време, оценка на неудовлетвореността по време на пътуването, количеството отделян CO<sub>2</sub> в трафика, както и цялостната неефективност в системата за движение. Град София попада сред градовете със значителни задръствания и е поставена на 83-о място в индекса на трафика сред 100 градове с най-големи задръствания в света (Трендафилов, 2018). Това налага търсенето на решения за справяне с проблема със задръстванията и затруднения трафик в големите градове и в частност в София.

Определяне на продължителността на светлинните сигнали все по-често се извършва чрез симулационни модели. Използването на симулационен софтуер има предимството, че не се налагат реални промени в движението при изпробването на различни варианти на настройки на светофарите. Настройките се извършват в симулационна среда – така настройките на светофарните уредби, както и други параметри на инфраструктура и трафик могат да претърпят множество промени. От тук идва и работната хипотеза за експеримента, че могат да бъдат намерени по-добри настройки на светофарните уредби за 4 свързани кръстовища (предмет на изследването) посредством компютърна симулация. Под по-добри се разбира: следене на 10 параметъра на трафика в мрежата от кръстовища и тяхното изменение спрямо изменението на настройките на продължителността на зеления сигнал за светофарите в изследваната транспортна мрежата. Разгледани са 4 случая, като първият случай е с реалните настройки на светофарите, такива, каквито са били измерени по време на полеви проучвания.

### **3.4.3. Резултати от експеримента**

Чрез наблюдение на симулацията е установено, че се получава струпване на коли по булеварда, а в същото време няма големи опашки по малките улички (фигура 3.5.). От тук се стига до хипотезата, че увеличаването на зеления сигнал за светофарите на булеварда и съответно намаляването на същия за малките улици може да доведе до цялостно подобрене в показателите за мрежата от 4-те кръстовища.



**Фиг. 3.5.** Наблюдавано струпване на коли по бул. Шипченски проход

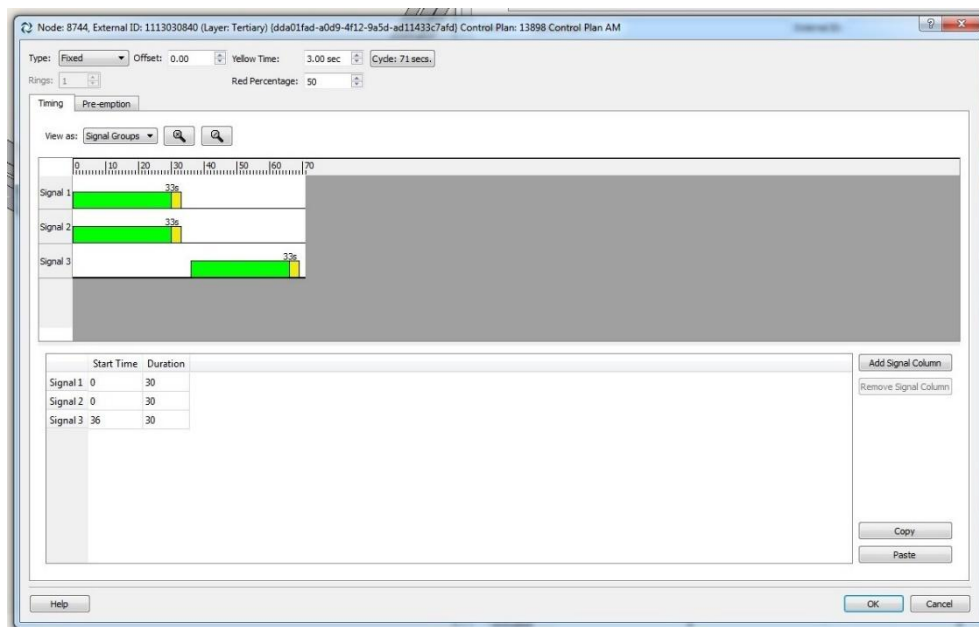
Избрани са 10 показателя, по които да се отчете, дали настъпва подобрене или влошаване на придвижването в симулираната мрежа. Това са следните показатели по реда, в който ще бъдат разгледани по-нататък.

1. Време за забавяне
2. Плътност
3. Хармонична скорост
4. Средна опашка
5. Брой спирания
6. Скорост
7. Време в спряло състояние
8. Общ брой спирания
9. Общо време за пътуване
10. Време за пътуване

Трети случай, в който зеленият сигнал е увеличен с 20% за всички светофари в полза на булеварда доведе до задръстване на Т-образното кръстовище. Това доведе до решение за разглеждане на 4-ти случай, в който само за това кръстовище увеличението на зеления сигнал остана 10% спрямо случай 1 (референтен модел с реални стойности).

За онагледяване на настройките на светофара е даден изглед от програмата за настройките на светофара при единственото Т-образно кръстовище в модела (фигура 3.6).

Настройките са за случай 1 т.е. така както са били реално замерени светлинните сигнали на това кръстовище.



**Фиг. 3.6.** Изглед от програмата – настройка на светофарните уредби за Т-образно кръстовище

На фигура 3.7. оцветените в жълто сигнали са тези на малките улички, които са намалени за сметка на увеличение на зеления сигнал за светофарите по бул. Шипченски проход.

| Референтен Модел |          |            |          | 10% промяна в зелен сигнал |          |            |          | 20% промяна на зелен сигнал |          |            |          | 20% промяна и 10% за Т-образно |          |            |          |
|------------------|----------|------------|----------|----------------------------|----------|------------|----------|-----------------------------|----------|------------|----------|--------------------------------|----------|------------|----------|
| 8744             |          |            |          | 8744                       |          |            |          | 8744                        |          |            |          | 8744                           |          |            |          |
|                  | Signal 1 | Start Time | Duration |                            | Signal 1 | Start Time | Duration |                             | Signal 1 | Start Time | Duration |                                | Signal 1 | Start Time | Duration |
| Сигнал 1         | Signal 1 | 0          | 30       | Сигнал 1                   | Signal 1 | 0          | 33       | Сигнал 1                    | Signal 1 | 0          | 36       | Сигнал 1                       | Signal 1 | 0          | 33       |
| Сигнал 2         | Signal 2 | 0          | 30       | Сигнал 2                   | Signal 2 | 0          | 33       | Сигнал 2                    | Signal 2 | 0          | 36       | Сигнал 2                       | Signal 2 | 0          | 33       |
| Сигнал 3         | Signal 3 | 36         | 30       | Сигнал 3                   | Signal 3 | 39         | 27       | Сигнал 3                    | Signal 3 | 42         | 24       | Сигнал 3                       | Signal 3 | 39         | 27       |
| 8778             |          |            |          | 8778                       |          |            |          | 8778                        |          |            |          | 8778                           |          |            |          |
|                  | Signal 1 | Start Time | Duration |                            | Signal 1 | Start Time | Duration |                             | Signal 1 | Start Time | Duration |                                | Signal 1 | Start Time | Duration |
| Сигнал 1         | Signal 1 | 0          | 20       | Сигнал 1                   | Signal 1 | 0          | 23       | Сигнал 1                    | Signal 1 | 0          | 26       | Сигнал 1                       | Signal 1 | 0          | 26       |
| Сигнал 2         | Signal 2 | 26         | 25       | Сигнал 2                   | Signal 2 | 29         | 22       | Сигнал 2                    | Signal 2 | 32         | 19       | Сигнал 2                       | Signal 2 | 32         | 19       |
| Сигнал 3         | Signal 3 | 0          | 22       | Сигнал 3                   | Signal 3 | 0          | 25       | Сигнал 3                    | Signal 3 | 0          | 28       | Сигнал 3                       | Signal 3 | 0          | 28       |
| Сигнал 4         | Signal 4 | 26         | 24       | Сигнал 4                   | Signal 4 | 29         | 22       | Сигнал 4                    | Signal 4 | 32         | 19       | Сигнал 4                       | Signal 4 | 32         | 19       |
| 8845             |          |            |          | 8845                       |          |            |          | 8845                        |          |            |          | 8845                           |          |            |          |
|                  | Signal 1 | Start Time | Duration |                            | Signal 1 | Start Time | Duration |                             | Signal 1 | Start Time | Duration |                                | Signal 1 | Start Time | Duration |
| Сигнал 1         | Signal 1 | 0          | 24       | Сигнал 1                   | Signal 1 | 0          | 26       | Сигнал 1                    | Signal 1 | 0          | 29       | Сигнал 1                       | Signal 1 | 0          | 29       |
| Сигнал 2         | Signal 2 | 0          | 25       | Сигнал 2                   | Signal 2 | 0          | 27       | Сигнал 2                    | Signal 2 | 0          | 30       | Сигнал 2                       | Signal 2 | 0          | 30       |
| Сигнал 3         | Signal 3 | 29         | 23       | Сигнал 3                   | Signal 3 | 31         | 21       | Сигнал 3                    | Signal 3 | 34         | 18       | Сигнал 3                       | Signal 3 | 34         | 18       |
| Сигнал 4         | Signal 4 | 29         | 23       | Сигнал 4                   | Signal 4 | 31         | 21       | Сигнал 4                    | Signal 4 | 34         | 18       | Сигнал 4                       | Signal 4 | 34         | 18       |
| 14175            |          |            |          | 14175                      |          |            |          | 14175                       |          |            |          | 14175                          |          |            |          |
|                  | Signal 1 | Start Time | Duration |                            | Signal 1 | Start Time | Duration |                             | Signal 1 | Start Time | Duration |                                | Signal 1 | Start Time | Duration |
| Сигнал 1         | Signal 1 | 0          | 25       | Сигнал 1                   | Signal 1 | 0          | 28       | Сигнал 1                    | Signal 1 | 0          | 31       | Сигнал 1                       | Signal 1 | 0          | 31       |
| Сигнал 2         | Signal 2 | 0          | 17       | Сигнал 2                   | Signal 2 | 0          | 20       | Сигнал 2                    | Signal 2 | 0          | 23       | Сигнал 2                       | Signal 2 | 0          | 23       |
| Сигнал 3         | Signal 3 | 29         | 28       | Сигнал 3                   | Signal 3 | 32         | 25       | Сигнал 3                    | Signal 3 | 35         | 22       | Сигнал 3                       | Signal 3 | 35         | 22       |
| Сигнал 4         | Signal 4 | 29         | 16       | Сигнал 4                   | Signal 4 | 32         | 14       | Сигнал 4                    | Signal 4 | 35         | 11       | Сигнал 4                       | Signal 4 | 35         | 11       |

Фиг.3.7. Настройка на светофарните уредби за различните случаи.

Първата колона на фиг. 3.7. е случай № 1 – референтен модел с реално замерените стойности.

Втората колона е случай № 2 с 10% промяна на зеления сигнал в полза на булеварда.

Третата колона е случай № 3 с 20% промяна на зеления сигнал в полза на булеварда.

Четвъртата колона е случай № 4 с 20% промяна на зеления сигнал в полза на булеварда за 3 кръстовища и 10% промяна само за Т-образното кръстовище.

При разглеждане на фигурите (фиг. 3.8. до фиг. 3.10.) със сравнение на случаите специално внимание трябва да се обърне на колона „Разлика“. Колоната показва, дали има подобрение, влошаване или няма изменение в сравняваните случаи. Цветовата легенда за колона „Разлика“ при всички разгледани случаи: при червения цвят, измененията са довели до влошаване на показателите; зеления цвят – измененията са довели до подобряване на показателите; жълт цвят – измененията на зеления сигнал не са довели до изменение в показателите.

## Оптимизиране на трафик в градска среда

|    | Референтен модел                |                                    |         |                    | 10% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда |                                    |         |                    | Разлика  | Разлика в % |         |
|----|---------------------------------|------------------------------------|---------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------|--------------------|----------|-------------|---------|
| 1  |                                 |                                    |         |                    |                                                                 |                                    |         |                    |          |             |         |
| 2  |                                 |                                    |         |                    |                                                                 |                                    |         |                    |          |             |         |
| 3  |                                 |                                    | Value   | Standard Deviation | Units                                                           |                                    |         | Standard Deviation |          |             |         |
| 4  | Време за забавяне - кола        | Delay Time - Car                   | 51.16   | 40.3               | sec/km                                                          | Delay Time - Car                   | 42.8    | 34.6               | sec/km   | 8.36        | 16.34   |
| 5  | Плътност - кола                 | Density - Car                      | 7.69    | N/A                | veh/km                                                          | Density - Car                      | 7.14    | N/A                | veh/km   | 0.55        | 7.15    |
| 6  |                                 | Flow - Car                         | 4095    | N/A                | veh/h                                                           | Flow - Car                         | 4102    | N/A                | veh/h    | -7          | -0.17   |
| 7  | Хармонична скорост - кола       | Harmonic Speed - Car               | 30.57   | 10.61              | km/h                                                            | Harmonic Speed - Car               | 32.91   | 10.24              | km/h     | -2.34       | -7.65   |
| 8  |                                 | Input Count - Car                  | 4204    | N/A                | veh                                                             | Input Count - Car                  | 4204    | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 9  |                                 | Input Flow - Car                   | 4204    | N/A                | veh/h                                                           | Input Flow - Car                   | 4204    | N/A                | veh/h    | 0           | 0.00    |
| 10 |                                 | Max. Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh                                                             | Max. Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 11 | Средна опашка - кола            | Mean Queue - Car                   | 29.85   | N/A                | veh                                                             | Mean Queue - Car                   | 24.29   | N/A                | veh      | 5.56        | 18.63   |
| 12 |                                 | Mean Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh                                                             | Mean Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 13 |                                 | Missed Turns - Car                 | 5       | N/A                |                                                                 | Missed Turns - Car                 | 1       | N/A                |          | 4           | 80.00   |
| 14 |                                 | Number of Lane Changes - Car       | 416.55  | N/A                | #/km                                                            | Number of Lane Changes - Car       | 418.06  | N/A                | #/km     | -1.51       | -0.36   |
| 15 | Брой спирки - кола              | Number of Stops - Car              | 0.16    | N/A                | #/veh/km                                                        | Number of Stops - Car              | 0.14    | N/A                | #/veh/km | 0.02        | 12.50   |
| 16 | Скорост - кола                  | Speed - Car                        | 34.25   | 11.56              | km/h                                                            | Speed - Car                        | 36.09   | 10.79              | km/h     | -1.84       | -5.37   |
| 17 | Време в спряло състояние - кола | Stop Time - Car                    | 38.42   | 35.17              | sec/km                                                          | Stop Time - Car                    | 31.42   | 31.25              | sec/km   | 7           | 18.22   |
| 18 |                                 | Total Number of Lane Changes - Car | 5243    | N/A                |                                                                 | Total Number of Lane Changes - Car | 5262    | N/A                |          | -19         | -0.36   |
| 19 | Общ брой спириания - кола       | Total Number of Stops - Car        | 8322.87 | N/A                |                                                                 | Total Number of Stops - Car        | 7392.09 | N/A                |          | 930.78      | 11.18   |
| 20 | Общо време за пътуване - кола   | Total Travel Time - Car            | 94.76   | N/A                | h                                                               | Total Travel Time - Car            | 88.12   | N/A                | h        | 6.64        | 7.01    |
| 21 |                                 | Total Travelled Distance - Car     | 2925.17 | N/A                | km                                                              | Total Travelled Distance - Car     | 2932.95 | N/A                | km       | -7.78       | -0.27   |
| 22 | Време за пътуване - кола        | Travel Time - Car                  | 117.76  | 40.53              | sec/km                                                          | Travel Time - Car                  | 109.4   | 34.87              | sec/km   | 8.36        | 7.10    |
| 23 |                                 | Vehicles Inside - Car              | 109     | N/A                | veh                                                             | Vehicles Inside - Car              | 102     | N/A                | veh      | 7           | 6.42    |
| 24 |                                 | Vehicles Lost Inside - Car         | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Lost Inside - Car         | 0       | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 25 |                                 | Vehicles Lost Outside - Car        | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Lost Outside - Car        | 0       | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 26 |                                 | Vehicles Outside - Car             | 4095    | N/A                | veh                                                             | Vehicles Outside - Car             | 4102    | N/A                | veh      | -7          | -0.17   |
| 27 |                                 | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 0       | N/A                | veh      | 0           | 0.00    |
| 28 |                                 | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.01    | 0.08               | sec                                                             | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.02    | 0.08               | sec      | -0.01       | -100.00 |

**Фиг. 3.8.** Случай 1 и случай 2 – сравнени

При втори случай има подобрение по абсолютно всички показатели спрямо референтния модел. Като значително – повече от 10% изменение в положителна посока се наблюдава при следните 5 показателя: време за забавяне, средна опашка, брой спириания, време в спряло състояние и общ брой спириания.

|    | Референтен модел                |                                    |         |                    | 20% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда |                                    |         |                    | Разлика  | Разлика в % |
|----|---------------------------------|------------------------------------|---------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------|--------------------|----------|-------------|
| 1  |                                 |                                    |         |                    |                                                                 |                                    |         |                    |          |             |
| 2  |                                 |                                    |         |                    |                                                                 |                                    |         |                    |          |             |
| 3  |                                 | Time Series                        | Value   | Standard Deviation | Units                                                           | Time Series                        | Value   | Standard Deviation | Units    |             |
| 4  | Време за забавяне - кола        | Delay Time - Car                   | 51.16   | 40.3               | sec/km                                                          | Delay Time - Car                   | 53.62   | 55.11              | sec/km   | -2.46       |
| 5  | Плътност - кола                 | Density - Car                      | 7.69    | N/A                | veh/km                                                          | Density - Car                      | 17.11   | N/A                | veh/km   | -9.42       |
| 6  |                                 | Flow - Car                         | 4095    | N/A                | veh/h                                                           | Flow - Car                         | 2371    | N/A                | veh/h    | 1724        |
| 7  | Хармонична скорост - кола       | Harmonic Speed - Car               | 30.57   | 10.61              | km/h                                                            | Harmonic Speed - Car               | 29.94   | 11.59              | km/h     | 0.63        |
| 8  |                                 | Input Count - Car                  | 4204    | N/A                | veh                                                             | Input Count - Car                  | 2677    | N/A                | veh      | 1527        |
| 9  |                                 | Input Flow - Car                   | 4204    | N/A                | veh/h                                                           | Input Flow - Car                   | 2677    | N/A                | veh/h    | 1527        |
| 10 |                                 | Max. Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh                                                             | Max. Virtual Queue - Car           | 1527    | N/A                | veh      | -1527       |
| 11 | Средна опашка - кола            | Mean Queue - Car                   | 29.85   | N/A                | veh                                                             | Mean Queue - Car                   | 162.47  | N/A                | veh      | -132.62     |
| 12 |                                 | Mean Virtual Queue - Car           | 0       | N/A                | veh                                                             | Mean Virtual Queue - Car           | 605.51  | N/A                | veh      | -605.51     |
| 13 |                                 | Missed Turns - Car                 | 5       | N/A                |                                                                 | Missed Turns - Car                 | 36      | N/A                |          | -31         |
| 14 |                                 | Number of Lane Changes - Car       | 416.55  | N/A                | #/km                                                            | Number of Lane Changes - Car       | 212.53  | N/A                | #/km     | 204.02      |
| 15 | Брой спирки - кола              | Number of Stops - Car              | 0.16    | N/A                | #/veh/km                                                        | Number of Stops - Car              | 0.16    | N/A                | #/veh/km | 0           |
| 16 | Скорост - кола                  | Speed - Car                        | 34.25   | 11.56              | km/h                                                            | Speed - Car                        | 34.43   | 11.5               | km/h     | -0.18       |
| 17 | Време в спряло състояние - кола | Stop Time - Car                    | 38.42   | 35.17              | sec/km                                                          | Stop Time - Car                    | 43.03   | 53.16              | sec/km   | -4.61       |
| 18 |                                 | Total Number of Lane Changes - Car | 5243    | N/A                |                                                                 | Total Number of Lane Changes - Car | 2675    | N/A                |          | 2568        |
| 19 | Общ брой спириания - кола       | Total Number of Stops - Car        | 8322.87 | N/A                |                                                                 | Total Number of Stops - Car        | 4846.11 | N/A                |          | 3476.76     |
| 20 | Общо време за пътуване - кола   | Total Travel Time - Car            | 94.76   | N/A                | h                                                               | Total Travel Time - Car            | 55.21   | N/A                | h        | 39.55       |
| 21 |                                 | Total Travelled Distance - Car     | 2925.17 | N/A                | km                                                              | Total Travelled Distance - Car     | 1654.04 | N/A                | km       | 1271.13     |
| 22 | Време за пътуване - кола        | Travel Time - Car                  | 117.76  | 40.53              | sec/km                                                          | Travel Time - Car                  | 120.24  | 55.23              | sec/km   | -2.48       |
| 23 |                                 | Vehicles Inside - Car              | 109     | N/A                | veh                                                             | Vehicles Inside - Car              | 306     | N/A                | veh      | -197        |
| 24 |                                 | Vehicles Lost Inside - Car         | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Lost Inside - Car         | 0       | N/A                | veh      | 0           |
| 25 |                                 | Vehicles Lost Outside - Car        | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Lost Outside - Car        | 0       | N/A                | veh      | 0           |
| 26 |                                 | Vehicles Outside - Car             | 4095    | N/A                | veh                                                             | Vehicles Outside - Car             | 2371    | N/A                | veh      | 1724        |
| 27 |                                 | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 0       | N/A                | veh                                                             | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 1527    | N/A                | veh      | -1527       |
| 28 |                                 | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.01    | 0.08               | sec                                                             | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.03    | 0.11               | sec      | -0.02       |

**Фиг. 3.9.** Случай 1 и случай 3 сравнение - 20% промяна на зеления сигнал в полза на светофарите на булевард Шипченски проход

Случай 3 дава по-лоши резултати от случай 1. Включително общ брой спирания и общо пропътувано време, които привидно бележат подобрение с цели 40%, всъщност дължат това на колите, които са попаднали в „тапа“ и не се движат.

Поради образуващата се „тапа“ на Т-образното кръстовище, се налага то да бъде разгледано отделно, като само за него се връщат настройките от случай 2 с 10% промяна в зеления сигнал. И така се стига до случай № 4, който е представен на фиг. 3.10.

|    | Референтен модел                |                                    |                    |       | 20% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда, 10% промяна за Т-образно кръстовище |         |                    |          | Разлика | Разлика в % |
|----|---------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------|----------|---------|-------------|
|    | Time Series                     | Value                              | Standard Deviation | Units | Time Series                                                                                          | Value   | Standard Deviation | Units    |         |             |
| 4  | Време за забавяне - кола        | Delay Time - Car                   | 51.16              | 40.3  | sec/km                                                                                               | 41.96   | 35.65              | sec/km   | 9.2     | 17.98       |
| 5  | Плътност - кола                 | Density - Car                      | 7.69               | N/A   | veh/km                                                                                               | 7       | N/A                | veh/km   | 0.69    | 8.97        |
| 6  |                                 | Flow - Car                         | 4095               | N/A   | veh/h                                                                                                | 4105    | N/A                | veh/h    | -10     | -0.24       |
| 7  | Хармонична скорост - кола       | Harmonic Speed - Car               | 30.57              | 10.61 | km/h                                                                                                 | 33.16   | 10.38              | km/h     | -2.59   | -8.47       |
| 8  |                                 | Input Count - Car                  | 4204               | N/A   | veh                                                                                                  | 4204    | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 9  |                                 | Input Flow - Car                   | 4204               | N/A   | veh/h                                                                                                | 4204    | N/A                | veh/h    | 0       | 0.00        |
| 10 |                                 | Max. Virtual Queue - Car           | 0                  | N/A   | veh                                                                                                  | 0       | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 11 | Средна опашка - кола            | Mean Queue - Car                   | 29.85              | N/A   | veh                                                                                                  | 23.1    | N/A                | veh      | 6.75    | 22.61       |
| 12 |                                 | Mean Virtual Queue - Car           | 0                  | N/A   | veh                                                                                                  | 0       | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 13 |                                 | Missed Turns - Car                 | 5                  | N/A   |                                                                                                      | 4       | N/A                |          | 1       | 20.00       |
| 14 |                                 | Number of Lane Changes - Car       | 416.55             | N/A   | #/km                                                                                                 | 425.37  | N/A                | #/km     | -8.82   | -2.12       |
| 15 | Брой спирки - кола              | Number of Stops - Car              | 0.16               | N/A   | #/veh/km                                                                                             | 0.14    | N/A                | #/veh/km | 0.02    | 12.50       |
| 16 | Скорост - кола                  | Speed - Car                        | 34.25              | 11.56 | km/h                                                                                                 | 36.41   | 10.72              | km/h     | -2.16   | -6.31       |
| 17 | Време в спряло състояние - кола | Stop Time - Car                    | 38.42              | 35.17 | sec/km                                                                                               | 30.81   | 32.3               | sec/km   | 7.61    | 19.81       |
| 18 |                                 | Total Number of Lane Changes - Car | 5243               | N/A   |                                                                                                      | 5354    | N/A                |          | -111    | -2.12       |
| 19 | Общ брой спирания - кола        | Total Number of Stops - Car        | 8322.87            | N/A   |                                                                                                      | 7249.91 | N/A                |          | 1072.96 | 12.89       |
| 20 | Общо време за пътуване - кола   | Total Travel Time - Car            | 94.76              | N/A   | h                                                                                                    | 86.51   | N/A                | h        | 8.25    | 8.71        |
| 21 |                                 | Total Travelled Distance - Car     | 2925.17            | N/A   | km                                                                                                   | 2936.42 | N/A                | km       | -11.25  | -0.38       |
| 22 | Време за пътуване - кола        | Travel Time - Car                  | 117.76             | 40.53 | sec/km                                                                                               | 108.57  | 35.9               | sec/km   | 9.19    | 7.80        |
| 23 |                                 | Vehicles Inside - Car              | 109                | N/A   | veh                                                                                                  | 99      | N/A                | veh      | 10      | 9.17        |
| 24 |                                 | Vehicles Lost Inside - Car         | 0                  | N/A   | veh                                                                                                  | 0       | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 25 |                                 | Vehicles Lost Outside - Car        | 0                  | N/A   | veh                                                                                                  | 0       | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 26 |                                 | Vehicles Outside - Car             | 4095               | N/A   | veh                                                                                                  | 4105    | N/A                | veh      | -10     | -0.24       |
| 27 |                                 | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 0                  | N/A   | veh                                                                                                  | 0       | N/A                | veh      | 0       | 0.00        |
| 28 |                                 | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.01               | 0.08  | sec                                                                                                  | 0.02    | 0.09               | sec      | -0.01   | -100.00     |

**Фиг. 3.10.** Случай 1 и случай 4 сравнение - 20% промяна на зеления сигнал в полза на светофарите на булеварда, 10% за Т-образното кръстовище

Случай № 4 е по-добър по всички показатели от случай № 1, както е видно от колона „Разлика“. Всички показатели в тази колона са в зелено т.е. при всички тях има подобрение, но съществена промяна се наблюдава при 5 показателя на трафика. Фигура 3.10 сравнява случай № 1 със случай № 4 като има подобрения в следните 5 показателя – време за забавяне намалява със 17,98%, средна опашка намалява с 22,61%, брой на спиранията намалява с 12,5%, време в спряло състояние е по-малко с 19,81% и общ брой спирания са по-малко с 12,89%.

| 10% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда |                                    |                    |       |          | 20% промяна на зелен сигнал в полза на светофарите на булеварда, 10% промяна за Т-образно кръстовище |         |                    |          |    | Разлика | Разлика в % |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------|----------|----|---------|-------------|
| 1                                                               | 2                                  | 3                  | 4     | 5        | 6                                                                                                    | 7       | 8                  | 9        | 10 | 11      | 12          |
| Time Series                                                     | Value                              | Standard Deviation | Units |          | Time Series                                                                                          | Value   | Standard Deviation | Units    |    |         |             |
| Време за забавяне - кола                                        | Delay Time - Car                   | 42.8               | 34.6  | sec/km   | Delay Time - Car                                                                                     | 41.96   | 35.65              | sec/km   |    | 0.84    | 1.96        |
| Плътност - кола                                                 | Density - Car                      | 7.14               | N/A   | veh/km   | Density - Car                                                                                        | 7       | N/A                | veh/km   |    | 0.14    | 1.96        |
| Flow - Car                                                      | Flow - Car                         | 4102               | N/A   | veh/h    | Flow - Car                                                                                           | 4105    | N/A                | veh/h    |    | -3      | -0.07       |
| Хармонична скорост - кола                                       | Harmonic Speed - Car               | 32.91              | 10.24 | km/h     | Harmonic Speed - Car                                                                                 | 33.16   | 10.38              | km/h     |    | -0.25   | -0.76       |
| Input Count - Car                                               | Input Count - Car                  | 4204               | N/A   | veh      | Input Count - Car                                                                                    | 4204    | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Input Flow - Car                                                | Input Flow - Car                   | 4204               | N/A   | veh/h    | Input Flow - Car                                                                                     | 4204    | N/A                | veh/h    |    | 0       | 0.00        |
| Max. Virtual Queue - Car                                        | Max. Virtual Queue - Car           | 0                  | N/A   | veh      | Max. Virtual Queue - Car                                                                             | 0       | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Средна опашка - кола                                            | Mean Queue - Car                   | 24.29              | N/A   | veh      | Mean Queue - Car                                                                                     | 23.1    | N/A                | veh      |    | 1.19    | 4.90        |
| Mean Virtual Queue - Car                                        | Mean Virtual Queue - Car           | 0                  | N/A   | veh      | Mean Virtual Queue - Car                                                                             | 0       | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Missed Turns - Car                                              | Missed Turns - Car                 | 1                  | N/A   |          | Missed Turns - Car                                                                                   | 4       | N/A                |          |    | -3      | -300.00     |
| Number of Lane Changes - Car                                    | Number of Lane Changes - Car       | 418.06             | N/A   | #/km     | Number of Lane Changes - Car                                                                         | 425.37  | N/A                | #/km     |    | -7.31   | -1.75       |
| Брой спирки - кола                                              | Number of Stops - Car              | 0.14               | N/A   | #/veh/km | Number of Stops - Car                                                                                | 0.14    | N/A                | #/veh/km |    | 0       | 0.00        |
| Скорост - кола                                                  | Speed - Car                        | 36.09              | 10.79 | km/h     | Speed - Car                                                                                          | 36.41   | 10.72              | km/h     |    | -0.32   | -0.89       |
| Време в спрало състояние - кола                                 | Stop Time - Car                    | 31.42              | 31.25 | sec/km   | Stop Time - Car                                                                                      | 30.81   | 32.3               | sec/km   |    | 0.61    | 1.94        |
| Total Number of Lane Changes - Car                              | Total Number of Lane Changes - Car | 5262               | N/A   |          | Total Number of Lane Changes - Car                                                                   | 5354    | N/A                |          |    | -92     | -1.75       |
| Общ брой спирания - кола                                        | Total Number of Stops - Car        | 7392.09            | N/A   |          | Total Number of Stops - Car                                                                          | 7249.91 | N/A                |          |    | 142.18  | 1.92        |
| Общо време за пътуване - кола                                   | Total Travel Time - Car            | 88.12              | N/A   | h        | Total Travel Time - Car                                                                              | 86.51   | N/A                | h        |    | 1.61    | 1.83        |
| Total Travelled Distance - Car                                  | Total Travelled Distance - Car     | 2932.95            | N/A   | km       | Total Travelled Distance - Car                                                                       | 2936.42 | N/A                | km       |    | -3.47   | -0.12       |
| Време за пътуване - кола                                        | Travel Time - Car                  | 109.4              | 34.87 | sec/km   | Travel Time - Car                                                                                    | 108.57  | 35.9               | sec/km   |    | 0.83    | 0.76        |
| Vehicles Inside - Car                                           | Vehicles Inside - Car              | 102                | N/A   | veh      | Vehicles Inside - Car                                                                                | 99      | N/A                | veh      |    | 3       | 2.94        |
| Vehicles Lost Inside - Car                                      | Vehicles Lost Inside - Car         | 0                  | N/A   | veh      | Vehicles Lost Inside - Car                                                                           | 0       | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Vehicles Lost Outside - Car                                     | Vehicles Lost Outside - Car        | 0                  | N/A   | veh      | Vehicles Lost Outside - Car                                                                          | 0       | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Vehicles Outside - Car                                          | Vehicles Outside - Car             | 4102               | N/A   | veh      | Vehicles Outside - Car                                                                               | 4105    | N/A                | veh      |    | -3      | -0.07       |
| Vehicles Waiting to Enter - Car                                 | Vehicles Waiting to Enter - Car    | 0                  | N/A   | veh      | Vehicles Waiting to Enter - Car                                                                      | 0       | N/A                | veh      |    | 0       | 0.00        |
| Waiting Time Virtual Queue - Car                                | Waiting Time Virtual Queue - Car   | 0.02               | 0.08  | sec      | Waiting Time Virtual Queue - Car                                                                     | 0.02    | 0.09               | sec      |    | 0       | 0.00        |

**Фиг. 3.11.** Случай 2 и случай 4 сравнение - Сравнение между 10% промяна на зеления сигнал за всички кръстовища и случая с 20% промяна за всички кръстовища и само 10% за Т-образно кръстовище

Но случай 2 също даде по-добри резултати от случай 1, затова се налага сравнение между случай № 2 и случай № 4. Както е видно от фиг. 3.11, от колона „Разлика” – случай № 4 дава по-добри стойности на показателите на трафика от случай № 2. Разбира се трябва да се отбележи, че това са съвсем малко промени (с около 2%) в стойностите на показателите на трафика, но все пак настройките от случай № 4 са най-оптималните от общо 4-те разгледани случая.

### 3.4.4. Изводи от експеримента

Симулационното променяне на параметрите на светофарните уредби пести време и средства и прави възможни симулации, които в реални условия биха могли да доведат до затруднения в движението, задръствания, замърсяване и неудовлетвореност във водачите. Докато за компютърната симулация може да е достатъчно и еднократно отчитане на потока от коли в определен час, най-често час-пик, след което по емпиричен начин да се променят настройките в компютърната симулация и да се достигне до намиране на по-добри настройки на светофарните уредби т.е. да се постигнат по добри стойности за определени показатели.

От изследването става ясно, че понякога се налага и отделно разглеждане на кръстовището в рамките на общия модел.

С този резултат беше доказана хипотезата, че по емпиричен начин и чрез компютърна симулация могат да бъдат намерени по-добри настройки на светофарната уредба от реално действащите.

За в бъдеще работата по изследването продължава с нови симулационни модели и търсене за други начини за оптимизация на светофарите, един от които е свързан с използване на програмния продукт TRANSYT.

### **3.5. Подобрене на трафика в градска среда чрез оптимизация на светофарната сигнализация**

#### **3.5.1. Резюме на експеримента**

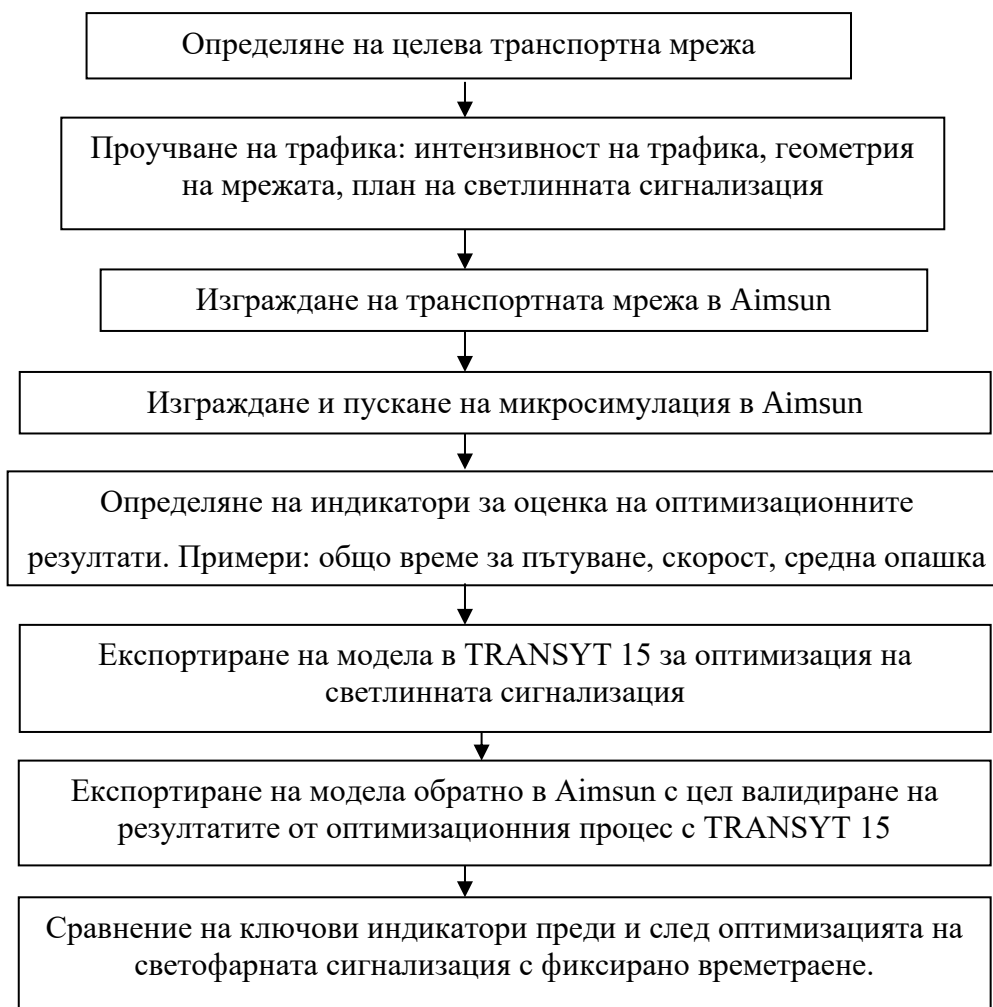
Този експеримент представя проучване на избраната мрежа в град София, България, която е моделирана в софтуерната среда Aimsun, след това оптимизиран в софтуерната среда TRANSYT и експортиран обратно към Aimsun за валидиране на резултатите. Експериментът се състои в оптимизация на зеления сигнал и offset на светлинно регулирани кръстовища, които водят до подобряване на единадесет избрани трафични индикатора.

#### **3.5.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение**

Първо беше избрана целевата мрежа. Второ, след като беше избрано местоположение за изследването, се премина към следващата стъпка - проучване на трафика, която се състои в събиране на данни за трафик и светофарната сигнализация, както и събиране на данни за мрежовата геометрия, за да се гарантира валиден модел на пътните платна и завоите в по-късен етап. Мрежовата геометрия е взета от Интернет и въз основа на нея е направена микросимулация в Aimsun.

Избрани са индикатори за трафик, които по-късно служат за измерване на подобренията. Тези показатели включват: време за пътуване, скорост, средни опашки и т.н. Моделът е експортиран в TRANSYT за оптимизация на времевия сигнал, където средната опашка е избраният индикатор за оптимизация, също както и индекса на ефективността (PI), чиято целева функция използва закъснения и спирания на автомобилите. След като процесът на оптимизация завърши модела с оптимизираните сигнали е експортиран обратно в Aimsun за валидиране на резултатите.

Резултатът от изследването се състои в сравнение на избрани показатели преди и след оптимизация в TRANSYT. На фигура 3.12. е показана блокова схема, илюстрираща работния процес при изследването.



**Фиг. 3.12.** Работен процес при изследването

Значително ограничение на полевото проучване е, че то не може да идентифицира дали сигналите на синхронизацията вече са синхронизирани и всяко кръстовище с неговите характеристики се изучава отделно. Но по-късно, когато експериментът е извършен, синхронизацията-връзка между кръстовищата е осъществена чрез TRANSYT и благодарение на тази синхронизация трафикът е значително подобрен. Важен въпрос е, че има законово предписание за продължителността на цикъла на светлинната сигнализация,

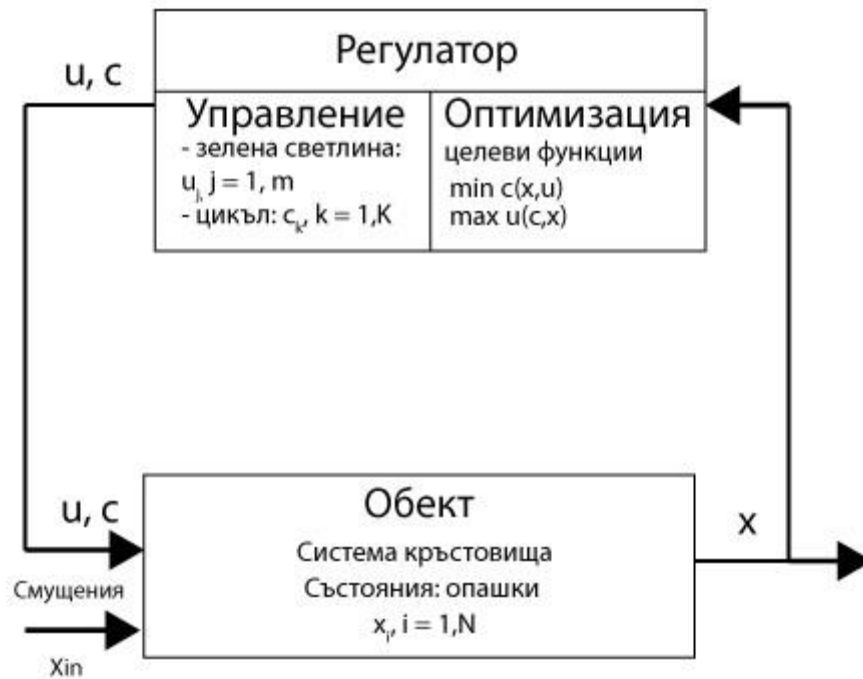
което предписание бе съблюдавано в представения експеримент. Значимостта в настоящия експеримент е използването на TRANSYT, което води до много по-добра работа на мрежата и също така оптимизира offset. TRANSYT средата работи, като оптимизира закъсненията и спиранията в своята целева функция. Въз основа на тези показатели тя изчислява така нареченият индекс на ефективност (PI), (Binning, 2015).

Трафик моделът на мрежата изчислява индекс на ефективност (P.I.), което в най-простата си форма е претеглена сума от всички закъснения и спирания на превозното средство. Редица налични оптимизиращи процедури систематично променят изместването и / или времетраенето на зеления сигнал за търсене на времена, които намаляват P.I. до минимална стойност.

Оптимизаторът на TRANSYT се опитват да сведе до минимум P.I. Ако беше възможно да се намали закъснението и броя на спиранията до нула, тогава това би означавало, че всяко превозно средство, което се приближи до светофара, ще преминава на зелено и по този начин ще продължи към дестинацията си без забавяне или спиране т.е. с минимално време за пътуване.

Следователно оптимизаторът на TRANSYT се стреми да постига зелени вълни. Ясно е, че обикновено не е възможно да се премахнат всички закъснения или спирки в рамките на сигналната мрежа, но минималната обща стойност ще се търси автоматично от програмата TRANSYT (Binning, 2015).

Оптимизацията и управлението на системата кръстовища е представена като система за автоматично управление на блокова схема фиг 3.13.



**Фиг 3.13** Блокова схема за автоматично управление на система, представляваща градска пътна мрежа

### 3.5.3. Резултати от експеримента

Наблюдават се подобрения на всички изследвани показатели след оптимизацията с TRANSYT (Таблица 3.1). Времетраенето на сигналите на кръстовищата е променено чрез оптимизация с TRANSYT и моделът е експортиран обратно в Aimsun. По-специално е направена промяна продължителността на зелените сигнали и в отместването на сигналите, което доведе до подобряване на ефективността на избраната мрежа.

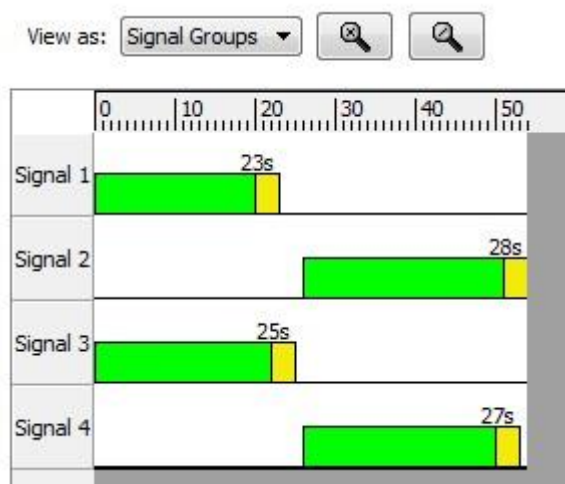
**Таблица 3.1.** Трафични индикатори „преди“ и „след“ оптимизация в TRANSYT

| Трафични индикатори            | Преди оптимизация в TRANSYT |          |                       | След оптимизация в TRANSYT |                       |          |             |
|--------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------|-------------|
|                                | Мерни единици               | Стойност | Стандартно отклонение | Стойност                   | Стандартно отклонение | Разлика  | Разлика в % |
| Време закъснение               | sec/km                      | 51.16    | 40.3                  | 36.33                      | 35.88                 | -14.83   | -28.99%     |
| Плътност                       | veh/km                      | 7.69     | N/A                   | 6.53                       | N/A                   | -1.16    | -15.08%     |
| Интензивност                   | veh/h                       | 4095     | N/A                   | 4126                       | N/A                   | 31       | 0.76%       |
| Хармонична скорост             | km/h                        | 30.57    | 10.61                 | 34.97                      | 10.66                 | 4.4      | 14.39%      |
| Опашка                         | veh                         | 29.85    | N/A                   | 19.08                      | N/A                   | -10.77   | -36.08%     |
| Брой спирания                  | #/veh/km                    | 0.16     | N/A                   | 0.12                       | N/A                   | -0.04    | -25.00%     |
| Скорост                        | km/h                        | 34.25    | 11.56                 | 38.21                      | 10.37                 | 3.96     | 11.56%      |
| Време в спряло състояние       | sec/km                      | 38.42    | 35.17                 | 26.34                      | 32.84                 | -12.08   | -31.44%     |
| Общ брой спирания              |                             | 8322.87  | N/A                   | 6367.76                    | N/A                   | -1955.11 | -23.49%     |
| Общо пропътувано време         | h                           | 94.76    | N/A                   | 81.2                       | N/A                   | -13.56   | -14.31%     |
| Пропътувано време от една кола | sec/km                      | 117.76   | 40.53                 | 102.96                     | 35.96                 | -14.8    | -12.57%     |

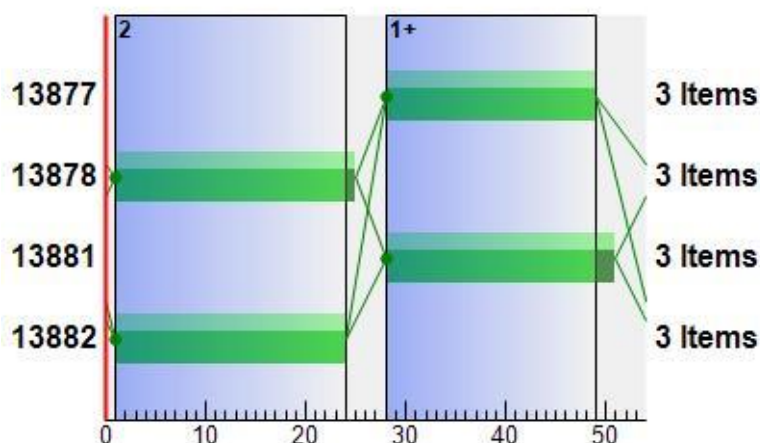
Таблица 3.1. представя показателите, техните мерни единици, стойностите и отклоненията на индикаторите преди и след оптимизацията, както и разлика в стойността и процента преди и след оптимизацията с TRANSYT. След последното проучване бяха направени някои промени в сигнализацията на всички четири кръстовища. Все още може да има малки промени в светлините на трафик, които могат да повлияят на работата на мрежа по положителен начин. Тези възможни промени не се вземат предвид при това проучване, което може да представлява ограничение на изследването.

На фиг. 3.14, фиг. 3.15 и фиг. 3.16 са представени изгледи от сигнализацията на кръстовища от AISMUN и TRANSYT. Фигурите представят данни само за едно от кръстовищата, но подобни данни са на разположение за всяко кръстовище. Както е видно от фиг. 3.14, фиг. 3.15 и фиг. 3.16. има малко изменение след оптимизацията в продължителността на зеления сигнал - от няколко секунди и значителна разлика в изместванията благодарение на процеса на оптимизация. След оптимизацията сигнал 1 и сигнал 3 от фиг. 3.15 бяха преместени в края на цикъла, докато Сигнал 2 и Сигнал 4 бяха преместени в началото в сравнение с фиг. 3.14. Причината е по-добра синхронизация с останалите кръстовища.

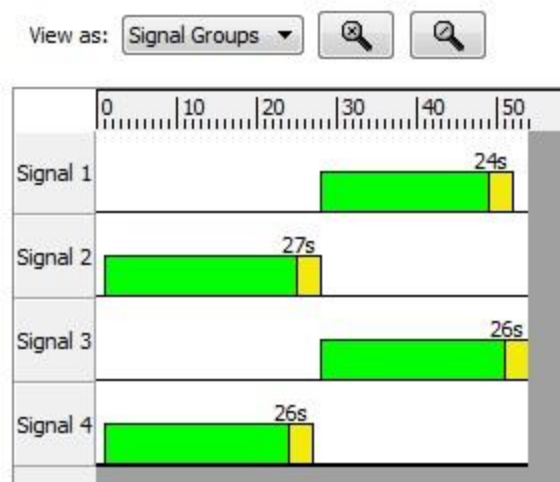
Освен избраните индикатори, интересно проучване за бъдещата работа би било как разхода на гориво и емисиите на вредни газове се променят благодарение на оптимизирането на светлинната сигнализация. Това са два ключови показателя, свързани с градската среда, които ще бъдат разгледани в бъдещи изследвания на представената мрежа. Има и други изследвания, подобни на представените тук, но те използват други софтуерни продукти. Независимо от това, заслужава да се спомене и това, че други изследователите в България също извършват експерименти, свързани с подобряване на трафик в страната. По същия начин обектът на проучванията е транспортна мрежа в София. Друго проучване, което изследва сложния характер на моделирането на транспортните системи е свързано със задълбоченото усвояване на сложни взаимовръзки.



Фиг. 3.14. Светлинна сигнализация преди оптимизация – Aimsun



Фиг. 3.15. Светлинна сигнализация след оптимизация – TRANSYT



Фиг. 3.16. Светлинна сигнализация след оптимизация - Aimsun

#### 3.5.4. Изводи от експеримента

Проведено е проучване и експеримент посредством софтуерни продукти за симулация, свързана с оптимизацията на трафика в градска среда чрез оптимизиране на светлинна сигнализация на светофарни уредби. В експеримента са използвани софтуерните продукти Aimsun и TRANSYT съответно за моделиране и за оптимизиране на сигналите. Подобрението се измерва с единадесет показателя на трафика като опашки, скорост, време на пътуване и др. Два случая са сравнени - преди оптимизация и след оптимизиране на светлинните сигнали с TRANSYT. Резултатите показват, че след оптимизацията трафик индикаторите са се подобрили значително, като някои от показателите, достигат подобрене от над 30 процента в сравнение със случая преди оптимизация. Цел на това изследване бе подобряването на показателите на трафика.

Проведено проучване и експеримент посредством софтуерни продукти за симулация, свързана с оптимизацията на трафика в градска среда чрез оптимизиране на светлинна сигнализация на светофарни уредби. В експеримента с използвани програмни продукти Aimsun и TRANSYT съответно за моделиране и за оптимизиране на сигналите.

Подобрението се измерва с единадесет показателя на трафика като опашки, скорост, време на пътуване и др. Два случая са сравнени - преди оптимизация и след оптимизиране на светлинните сигнали с TRANSYT. Резултатите показват, че след оптимизацията трафик индикаторите са се подобрили значително, като някои от показателите, достигат

подобрение от над 30 процента в сравнение със случая преди оптимизация. Цел на това изследване бе подобряването на показателите на трафика.

### **3.6. Оптимизация на зеления сигнал и опашките в транспортната мрежа чрез двуйерархична оптимизация**

#### **3.6.1. Резюме на експеримента**

Настоящата точка описва използването на двуйерархична оптимизация, както и добре познатия модел store-and-forward за оптимизиране на транспортната мрежа. Прилагат се следните софтуерни продукти: MATLAB с допълнителния инструмент за моделиране и оптимизация, наречена YALMIP и Aimsun за моделиране на микросимулация. Резултатите показват, че използването на специално разработен скрипт, базиран на YALMIP в MATLAB, подобрява работата на транспортната мрежа. Резултатите се измерват като показатели за трафика в специализирания софтуер за трафик Aimsun.

Нуждата от светофар и необходимостта да се управлява по оптимален начин са довели до множество изследвания и изобретяването на различни подходи. Подходът, предложен тук, се основава на популярния модел store-and-forward. Добавената стойност на това изследване е, че моделът store-and-forward е формализиран в проблема за оптимизация на двуйерархична задача. По този начин допълнителните параметри на транспортната система се оценяват с оптимални стойности. Това изследване чрез прилагането на двуйерархична оптимизация намира оптималната продължителност на зелените светлини като стойност от цикъла на светофара. Освен това опашките на превозните средства са сведени до минимум, но интензивността на трафика през градската мрежа е увеличен. Поради потенциалните си предимства, двуйерархичната оптимизация се използва в практически области като оптимизация на портфолио, оптимизация на железопътни планове и др., (Павлова, (2017), Stoilov и др. (2016), Stoilov и Stoilova, (2012)). Това изследване прави формално разработване на двуйерархичен транспортен модел. Демонстрирано е как този проблем може да бъде решен с подходящи софтуерни инструменти.

Това изследване прави композиция от модела store-and-forward с допълнителен проблем с оптимизацията, който е насочен към максимизиране на потока на трафика,

пресичащ транспортната мрежа. Композицията на тези два проблема е интегрирана в двуйерархичен математически оптимизационен модел.

### 3.6.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение

Продължителността на зелените светлини на кръстопътните участъци цели намаляване на транспортните опашки на кръстовищата.

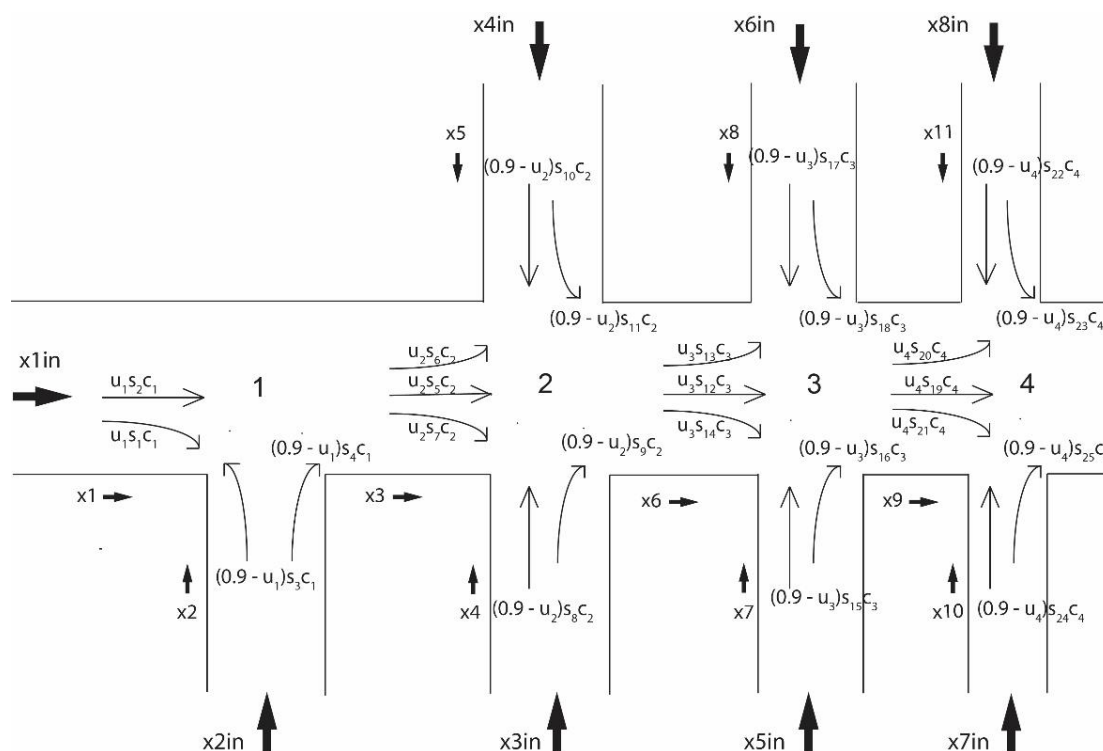
Изследването е разделено на две стъпки. В началото е дефиниран и решен проблем с двуйерархична оптимизация. След това решенията са дадени в симулационна среда за оценка и сравнение. Симулационната среда е софтуерният пакет Aimsun. Сравненията са направени между решенията за двуйерархична оптимизация и текущите фиксирани планове за управление на светофара и управлението на цикъла. Зелените времена са изчислени, като се вземат предвид ограниченията по оперативни и психологически причини. Тези ограничения отговарят на изискванията, дадени в (Gazis, 1974), като горна и долна граница

$$u_{min} \leq u_i \leq u_{max} \quad (3.1)$$

Стойностите, избрани за това изследване, бяха избрани като части от времевия цикъл:

$$u_{min} = 0.2cycle \text{ and } u_{max} = 0.7cycle.$$

Жълтата светлина се приема и като 0,1 част от продължителността на цикъла, ако цикълът се приема като 1. Зеленото време е  $u_i$ , за жълтото време се разпределя 0,1 част от цикъла. Така зелено и червено време се разглеждат в линейна връзка. Ако зелената светлина има продължителност  $u_i$ , съответната червена светлина ще има продължителност  $0,9 - u_i$ . Червеното време за определена посока всъщност е зелено време за потока на противоположния транспортен поток. По този начин трафичните потоци влияят по противоположен начин на интензивността на движението, което преминава към основния поток на основния път. На Фиг. 3.16. е представен графичен модел на разглежданата градска мрежа.



Фиг. 3.17. Графичен модел на разглежданата градска мрежа

Показаният модел на фигура 3.17. е използван като ограничение за долната целева функция, целяща минимизиране на опашките пред светофарите. Обозначенията на фигурата са както следва:

$c_i$  – е продължителността на цикъла

$u_i$  – обозначава каква част от цикъла представлява зеленият сигнал

$s_i$  – е saturation flow (поток на насищане), който представлява коли на час, които преминават по даденото направление.

$x1in - x8in$  – са коли влизащи на час за дадения подход (улица)

$x1 - x11$  – са опашки пред светофарите, измерени в коли за един цикъл на светофара

Целта е да се минимизират опашките пред светофарите т.е. сборът от всички опашки от  $x1 + x2 + \dots + x11$  да е минимален, което се представя с целевата функция.

Формулата, по която се изчислява опашка пред светофар е следната за  $x1$  и тя е аналогична за всички опашки от фигура 3.17.

$$x1 \leq x10 + x1in - u1*s2*c1 - u1*s1*c1$$

Опашката е равна на намиращите се от предишен времеви период коли на светофара  $x10$ , плюс колите които пристигат на светофара за даден период от време  $x1in$ , минус колите, които преминават през кръстовището по време на зеления сигнал в права посока ( $u1*s2*c1$ ) и завиващи коли ( $u1*s1*c1$ ). Изчисляването на опашки по този начин се основава на използвания модел – store-and-forward модел.

Нуждата от минимизиране на цикъла произтича от изследване, според което по-късият цикъл на светофара в градска среда води до по-добри резултати (<https://nacto.org/>).

Продължителността на цикъла е дефинирана от закона (Наредба № 17, 2001) в определени рамки – за минимална и максимална продължителност.

Проблемът с двуйерархичната оптимизация е решен в MATLAB среда. В MATLAB е включена специален допълнителен инструмент за решаване на проблема за двуйерархична. Допълнителният инструмент YALMIP, насочен към решения на двуйерархични задачи. Трябва да се напише специален програмен скрипт за използване при двуйерархичен проблем. Оптималните решения на двуйерархичния транспортен проблем бяха оценени чрез симулация. Използван е софтуерният пакет Aimsun и са изчислени подходящи показатели за трафик за два случая: с двуйерархични решения и с установените понастоящем фиксирани планове за продължителността на светофарите. Индикаторите за трафик се показват след времето на симулация, използвани са двата типа стратегии за управление.

Софтуерът за симулиране на трафика Aimsun може да извършва микро-, мезо- и макросимулации. В това проучване се използва микросимулационната способност на софтуера, тъй като мрежата е малка и всяко движение може да бъде изчислено от софтуера без необходимост от огромна изчислителна мощност. В края на всяка симулация е представен списък с показатели за трафика за цялата мрежа. Индикаторите за трафика са: закъснения, плътност на движението, средна скорост, брой спирки, общо време за пътуване. Наред с показателите на трафика се измерват и замърсителите на въздуха в околната среда. Двете стратегии за управление са симулирани и сравнени: първо е симулацията с входните данни с фиксираните времеви планове (текущата ситуация на управление на трафика) и

второ с решенията на двуйерархична задача, даден с изчислението на MATLAB за продължителността на зелените светлини и продължителността на циклите на светофарите.

Двуйерархичният оптимизационен взема предвид трафичната мрежа на фиг.1. Основният поток и четири кръстовища са взети под внимание за store-and-forward модела. Този модел е включен в проблема за оптимизация от ниско ниво. Задачата от горното ниво беше определена за максимизиране на потока от трафик на основния поток. Проблемът на двустепенно ниво се решава с инструмента YALMIP в MATLAB. Решенията на тази двуйерархична задача дават продължителността на зелените светлини на кръстовищата, като и продължителността на циклите на светофарите. Решенията на йерархичната задача са оценени чрез симулация с програмния пакет Aimsun. В този експеримент параметрите продължителност на зеления сигнал и цикъл се оценяват оптимално, в съответствие с дефинираната задача на двуйерархично ниво. Официалното представяне на проблема като двуйерархичен се програмира в съответствие с изискванията на инструмента YALMIP. По-долу следва точните програмни правила за двуйерархичния проблем.

Обозначението OO се отнася до проблема с оптимизацията на горното ниво. YALMIP свежда до минимум целевата функция. Но проблемът с горното ниво цели максимизиране на трафичния поток по посока на основния поток. Обозначението CO се използва за определяне на ограниченията на горното ниво. За този случай продължителността на зелените сигнали трябва да е между минимална (0,2) и максимална (0,7) стойност.

$$OO = -(u1 + u2 + u3 + u4);$$

$$CO = [[u1 \ u2 \ u3 \ u4] \geq u_{\min} , [u1 \ u2 \ u3 \ u4] \leq u_{\max}];$$

Обозначението OI се използва за ~~проблема~~ с оптимизацията на ниско ниво. Целта на проблема с оптимизацията на ниско ниво е да се сведат до минимум опашки пред светофарите. Обозначението CI засяга неравенствата в оптимизацията на ниско ниво, основани на store-and-forward модела. Двуйерархичната задача дава оптимални продължителности на зелените сигнали за четирите кръстовища. Решенията на двуйерархичната задача са оценени чрез симулация в среда Aimsun. Сравненията с използваните фиксирани планове и тези, оценени по двустепенен модел, дават предимства на двуйерархичната формализация. Целевата функция на ~~проблема~~ от ниско ниво се определя като отношение

$$OI = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11};$$

Наборът от ограничения за ~~проблема~~ от ниско ниво е:

$$CI = [$$

$$x_1 \leq x_{10} + x_{1in} - u_1 * s_2 * c_1 - u_1 * s_1 * c_1,$$

$$x_2 \leq x_{20} + x_{2in} - (0.9 - u_1) * s_3 * c_1 - (0.9 - u_1) * s_4 * c_1,$$

$$x_3 \leq x_{30} + u_1 * s_2 * c_1 + (0.9 - u_1) * s_4 * c_1 - u_2 * s_5 * c_2 - u_2 * s_7 * c_2 - u_2 * s_6 * c_2,$$

$$x_4 \leq x_{40} + x_{3in} - (0.9 - u_2) * s_8 * c_2 - (0.9 - u_2) * s_7 * c_2,$$

$$x_5 \leq x_{50} + x_{4in} - (0.9 - u_2) * s_{10} * c_2 - (0.9 - u_2) * s_{11} * c_2,$$

$$x_6 \leq x_{60} + (0.9 - u_2) * s_7 * c_2 + (0.9 - u_2) * s_{11} * c_2 + u_2 * s_5 * c_2 - u_3 * s_{12} * c_3 - u_3 * s_{14} * c_3 - u_3 * s_{13} * c_3,$$

$$x_7 \leq x_{70} + x_{5in} - (0.9 - u_3) * s_{15} * c_3 - (0.9 - u_3) * s_{16} * c_3,$$

$$x_8 \leq x_{80} + x_{6in} - (0.9 - u_3) * s_{17} * c_3 - (0.9 - u_3) * s_{18} * c_3,$$

$$x_9 \leq x_{90} + u_3 * s_{12} * c_3 + (0.9 - u_3) * s_{16} * c_3 + (0.9 - u_3) * s_{18} * c_3 - u_4 * s_{19} * c_4 - u_4 * s_{21} * c_4 - u_4 * s_{20} * c_4,$$

$$x_{10} \leq x_{100} + x_{7in} - (0.9 - u_4) * s_{24} * c_4 - (0.9 - u_4) * s_{25} * c_4,$$

$$x_{11} \leq x_{110} + x_{8in} - (0.9 - u_4) * s_{22} * c_4 - (0.9 - u_4) * s_{23} * c_4,$$

$$x_1 \geq 0,$$

$$x_2 \geq 0,$$

$$x_3 \geq 0,$$

$$x_4 \geq 0,$$

$$x_5 \geq 0,$$

$$x_6 \geq 0,$$

$$x_7 \geq 0,$$

$$x_8 \geq 0,$$

$$x_9 \geq 0,$$

$$x_{10} \geq 0,$$

$$x_{11} \geq 0,$$

$$x_{12} \geq 0];$$

Проблемът се решава чрез извикване на специалната функция `solvebilevel()` от YALMIP. Като аргументи трябва да се даде набор от входни параметри.

`solvebilevel (CO,OO,CI,OI,[u1 u2 u3 u4]);`

Входните данни за ~~двустепенния~~ ~~проблем~~ са:  $c_1 = 70$  s,  $c_2 = 55$  s,  $c_3 = 55$  s,  $c_4 = 60$  s. Минималната продължителност на зеления сигнал  $u_{\min}$  е 0,2, а максималната -  $u_{\max}$  е 0,7.

Интензивността на потоците от трафик се нормализира във времевата скала за секунди.

$$x_{1in} = 1368/3600;$$

$$x_{2in} = 870/3600;$$

$$x_{3in} = 246/3600;$$

$$x_{4in} = 84/3600;$$

$$x_{5in} = 150/3600;$$

$$x_{6in} = 90/3600;$$

$$x_{7in} = 54/3600;$$

$$x_{8in} = 606/3600;$$

Първоначалното състояние всички опашки пред светофарите са зададени на нула.

$$x_{10} = 0;$$

$$x_{20} = 0;$$

$$x_{30} = 0;$$

$$x_{40} = 0;$$

$$x_{50} = 0;$$

$$x_{60} = 0;$$

$$x_{70} = 0;$$

$$x_{80} = 0;$$

$$x_{90} = 0;$$

$$x_{100} = 0;$$

$$x_{110} = 0;$$

Нормализираните за секунди потоци на насищане са

$$s_1 = 624/3600;$$

$$s_2 = 744/3600;$$

$$s_3 = 558/3600;$$

$$s_4 = 312/3600;$$

$$s_5 = 620/3600;$$

$$s_6 = 30/3600;$$

$$s_7 = 160/3600;$$

$$s_8 = 12/3600;$$

$$s_9 = 72/3600;$$

$$s_{10} = 30/3600;$$

$$s_{11} = 30/3600;$$

$$s_{12} = 360/3600;$$

$$s_{13} = 90/3600;$$

$$s_{14} = 80/3600;$$

$$s_{15} = 40/3600;$$

$$s_{16} = 50/3600;$$

$$s_{17} = 20/3600;$$

$$s_{18} = 40/3600;$$

$$s_{19} = 499/3600;$$

$$s_{20} = 418/3600;$$

$$s_{21} = 32/3600;$$

$$s_{22} = 53/3600;$$

$$s_{23} = 237/3600;$$

$$s_{24} = 28/3600;$$

$$s_{25} = 16/3600;$$

Решенията на двуйерархичния проблем дават стойности на продължителността на зелената светлина в транспортната мрежа, както следва:  $u_1 = 49$  s,  $u_2 = 39$  s,  $u_3 = 39$  s,  $u_4 = 16$  s.

Тези стойности са използвани в симулационен софтуер за сравнение на фиксираната стратегия за управление на светофарите (текущия случай) и стратегията за двуйерархична оптимизация.

### 3.6.3. Резултати от експеримента

В средата на Aimsun са реализирани две симулации. Първата симулация е с входни данни и времеви сигнали, така като в момента те са били установени с фиксирани планове. Втората симулация е извършена с използване на оптимални решения на получената задача за оптимизация на двуйерархично ниво. Сравнението между резултатите по отношение на показателите за трафик е дадено на Таблица 3.2. В този експеримент е симулиран само тип превозно средство „кола“.

**Таблица 3.2.** Сравнение на резултатите от симулацията

|                               | <b>Фиксиран<br/>времеви<br/>план</b> | <b>Резултати от<br/>двуйерархична<br/>оптимизация</b> |                      |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|
| <i>Трафични параметри</i>     | <i>Стойност</i>                      | <i>Стойност</i>                                       | <i>Мерни единици</i> |
| <b>Времеzakъснение</b>        | 51.16                                | 37.23                                                 | sec/km               |
| <b>Плътност</b>               | 7.69                                 | 6.67                                                  | veh/km               |
| <b>Интензивност</b>           | 4095                                 | 4126                                                  | veh/h                |
| <b>Консумация на гориво</b>   | 355.53                               | 300.6                                                 | l                    |
| <b>CO2</b>                    | 874077.52                            | 775912.65                                             | g                    |
| <b>NOx</b>                    | 1835.5                               | 1658.83                                               | g                    |
| <b>PM – прахови частици</b>   | 340.52                               | 274.26                                                | g                    |
| <b>VOC – летливи вещества</b> | 1131.69                              | 980.42                                                | g                    |
| <b>Средна опашка</b>          | 29.85                                | 21.17                                                 | veh                  |
| <b>Брой спирания</b>          | 0.16                                 | 0.12                                                  | #/veh/km             |
| <b>Скорост</b>                | 34.25                                | 38.98                                                 | km/h                 |

|                                      |         |         |        |
|--------------------------------------|---------|---------|--------|
| <b>Време в спряло състояние</b>      | 38.42   | 27.73   | sec/km |
| <b>Общ брой спирания</b>             | 8322.87 | 6069.72 |        |
| <b>Общо пропътувано време</b>        | 94.76   | 82.9    | h      |
| <b>Пропътувано време за участъка</b> | 117.76  | 103.86  | sec/km |

#### 3.6.4. Изводи от експеримента

Това изследване разработва нов математически модел за управление на трафични потоци в градска среда. Определен и решен е проблем на двуйерархична оптимизация. Дефиницията на двуйерархичен позволява да се постигнат две целеви функции, да се разшири дефиниционна област на управляващи въздействия на транспортната задача и да се включи по-голям набор от ограничения.

Резултатите от тази оптимизация са оценени и сравнени в симулационна среда с установения понастоящем фиксиран план за синхронизиране в градската мрежа. Мрежата е избрана като важно артериално направление в град София. Резултатите от йерархичната оптимизация са сравнени с набор от параметри за трафика. Очевидно, двуйерархичният формализъм в транспортните системи има голям потенциал. Всички групи транспортни параметри дават предимства на двуйерархичния транспортен модел.

### 3.7. Оптимизация на продължителността на цикъла чрез двуйерархична оптимизация

#### 3.7.1. Резюме на експеримента

В настоящия експеримент се описва формализацията на store-and-forward подхода в двуйерархичен оптимизационен проблем. Проучването открива оптималната продължителност на дължината на цикъла по зададени продължителности на зеления сигнал. Опашките пред светофарите са сведени до минимум. По този начин мрежата позволява по-голяма пропускателна способност и по-малко задръствания в резултат на това по-малко замърсяване и по-добри показатели на трафика като забавяне, плътност, скорост и др. Резултатите за индикатори за движение и замърсяване се получават от пакета Aimsun

- специализиран софтуерен продукт за моделиране на трафика, Оптимизацията се извършва чрез MATLAB скрипт, базиран на допълнителен набор от инструменти, наречен YALMIP, както и със съвременен софтуерен продукт TRANSYT, който е съвместим със софтуерния пакет Aimsun. Резултатите показват, че е разумно да се използва скриптът за оптимизиране на трафика, тъй като TRANSYT оптимизира само продължителността на зеления сигнал, но работи със стойността на цикъла от Aimsun.

### 3.7.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение

Има няколко параметъра, свързани с потока на трафика. Първо се определя цикълът на светофара. Цикълът е сбор от зелена, жълта и червена светлина. Второ, важен параметър е зелената светлина. Жълтата светлина може да варира между 2-3 секунди в зависимост от разрешената скорост в участъка от пътя. Обикновено за градски настройки жълтата светлина се задава на 3 секунди

Оптимизирането на тези параметри както за едно кръстовище, така и за мрежа от кръстовища е предпоставка за оптимална пропускане на превозни средства през кръстовището. Разглеждат се различни подходи за оптимизация за оптимизиране на дължината на цикъла.

Използва се модел на опашки пред светофари, наречен модел „store-and-forward“ и продължителността на зеления сигнал.

Въз основа на оптимизацията и модела store-and-forward беше формулиран и решен. Проблемът е в оптимизирането на продължителността на цикъла чрез зададени продължителност и на зеления сигнал. Решението беше постигнато чрез софтуерните продукти MATLAB, Aimsun и TRANSYT. MATLAB използва инструмента YALMIP и функцията solvebilevel(), за да намери дължината на цикъла. Освен това, резултатите се тестват в симулации в пакета на Aimsun. Прави се сравнение между резултатите, постигнати чрез MATLAB, и резултата, постигнат чрез най-съвременния софтуер TRANSYT. Резултатите показват, че има малка разлика в показателите за трафик между случая, решен с MATLAB, и този, решен в TRANSYT в полза на TRANSYT. И все пак, тъй като разликата е малка и защото дължината на цикъла не може да бъде променяна в TRANSYT, както може да бъде в MATLAB, може да се заключи, че двустепенната оптимизация е обещаващ подход. TRANSYT използва метода за оптимизация Hill-Climb за

оптимизиране на продължителността на зеления сигнал и `offset` и приема дължината на цикъла като дадена константа. MATLAB използва `solvebilevel()` за справяне с дължината на цикъла и приема продължителността на зелените сигнали в мрежата като константи.

Експериментът има за цел да разкрие потенциала на двуйерархичната оптимизация за оптимизиране на дължината на цикъла в мрежа от кръстовища. За тази цел е използвана функцията `solvebilevel()` в MATLAB, както и инструмента YALMIP. В MATLAB е написан скрипт, който минимизира дължината на цикъла на четирите свързани кръстовища и в същото време минимизира опашките пред светофарите. Продължителността на зеления сигнал се приема като константен параметър. Продължителността на зеления сигнал се изчислява като част от дължината на цикъла, тъй като цикълът се състои от сумата от зелена, жълта и червена светлина. Ако цикълът се приеме като 1, жълтото се приема като  $0.1 \cdot \text{дължина на цикъла}$ , зеленото се отбелязва с `ui`, червеното е равно на  $0.9 \cdot \text{cycle} - u_i$ . Тези обозначения са важни за разбирането на скрипта в MATLAB и дадения модел. Прилага се добре познатият модел `store-and-forward`. Моделът `store-and-forward` е концепция, взета от компютърни мрежи и прилагана към транспортните мрежи. Въз основа на модела `store-and-forward` бяха дефинирани ограниченията за проблема от долно ниво на двуйерархичната оптимизация. Двуйерархичната оптимизация се състои от горна и долна ~~външна и вътрешна~~ целева функция. В случая на това проучване горната целева функция е дължината на цикъла, която трябва да бъде сведена до минимум. Долната целева функция е сумата от опашките в мрежата, която да се сведе до минимум.

Обозначенията, използвани от скрипта, са следните:

ОО –горна целева функция

СО –горни ограничения

ЮО –долна целева функция

СИ –долни ограничения

Променливите са дефинирани. Променливите `x1... 11` са броя на автомобилите пред светофарите. Променливите с индекс `1... 4` са продължителностите на циклите.

`sdpvar x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11`

`sdpvar c1 c2 c3 c4`

Определят се границите за дължината на цикъла..

$$c_{\min} = 40/3600;$$

$$c_{\max} = 120/3600;$$

Определен на продължителността на зеления сигнал като част от дължината на цикъла.

$$u_1 = 0.422535;$$

$$u_2 = 0.37037;$$

$$u_3 = 0.446429;$$

$$u_4 = 0.416667;$$

Потокът на автомобилите е даден, както е бил измерен.

$$x_{1in} = 1368;$$

$$x_{2in} = 870;$$

$$x_{3in} = 246;$$

$$x_{4in} = 84;$$

$$x_{5in} = 150;$$

$$x_{6in} = 90;$$

$$x_{7in} = 54;$$

$$x_{8in} = 60;$$

Дадена е дължината на опашката при предишна стъпка от време. В този случай мрежата се приема като празна.

$$x_{10} = 0;$$

$$x_{20} = 0;$$

$$x_{30} = 0;$$

$$x_{40} = 0;$$

$$x_{50} = 0;$$

$$x_{60} = 0;$$

$$x_{70} = 0;$$

$$x_{80} = 0;$$

$$x_{90} = 0;$$

$$x_{100} = 0;$$

$$x_{110} = 0;$$

Потокът на насищане е даден по следния начин:

$$s_1 = 624;$$

$$s_2 = 744;$$

$$s_3 = 558;$$

$$s_4 = 312;$$

$$s_5 = 620;$$

$$s_6 = 30;$$

$$s_7 = 160;$$

$$s_8 = 12;$$

$$s_9 = 72;$$

$$s_{10} = 30;$$

$$s_{11} = 30;$$

$$s_{12} = 360;$$

$$s_{13} = 90;$$

$$s_{14} = 80;$$

$$s_{15} = 40;$$

$$s_{16} = 50;$$

$$s_{17} = 20;$$

$$s_{18} = 40;$$

$$s_{19} = 499;$$

$$s_{20} = 418;$$

$$s_{21} = 32;$$

$$s_{22} = 53;$$

$$s_{23} = 237;$$

$$s_{24} = 28;$$

$$s_{25} = 16;$$

Дадени са целева функция на горното ниво и ограниченията на горното ниво.

$$OO = c_1 + c_2 + c_3 + c_4;$$

$$CO = [c_1 \geq c_{\min}, c_1 \leq c_{\max},$$

$$c_2 \geq c_{\min}, c_2 \leq c_{\max},$$

$$c_3 \geq c_{\min}, c_3 \leq c_{\max},$$

$$c_4 \geq c_{\min}, c_4 \leq c_{\max}$$

];

Посочени са целеви функции на по-ниско ниво и ограничения на по-ниско ниво въз основа на модела store-and-forward:

$$OI = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6 + x7 + x8 + x9 + x10 + x11;$$

$$CI = [ x1 \leq x10 + x1in - u1*s2*c1 - u1*s1*c1,$$

$$x2 \leq x20 + x2in - (0.9 - u1)*s3*c1 - (0.9 - u1)*s4*c1,$$

$$x3 \leq x30 + u1*s2*c1 + (0.9 - u1)*s4*c1 - u2*s5*c2 - u2*s7*c2 - u2*s6*c2,$$

$$x4 \leq x40 + x3in - (0.9 - u2)*s8*c2 - (0.9 - u2)*s7*c2,$$

$$x5 \leq x50 + x4in - (0.9 - u2)*s10*c2 - (0.9 - u2)*s11*c2,$$

$$x6 \leq x60 + (0.9 - u2)*s7*c2 + (0.9 - u2)*s11*c2 + u2*s5*c2 - u3*s12*c3 - u3*s14*c3 - u3*s13*c3,$$

$$x7 \leq x70 + x5in - (0.9 - u3)*s15*c3 - (0.9 - u3)*s16*c3,$$

$$x8 \leq x80 + x6in - (0.9 - u3)*s17*c3 - (0.9 - u3)*s18*c3,$$

$$x9 \leq x90 + u3*s12*c3 + (0.9 - u3)*s16*c3 + (0.9 - u3)*s18*c3 - u4*s19*c4 - u4*s21*c4 - u4*s20*c4,$$

$$x10 \leq x100 + x7in - (0.9 - u4)*s24*c4 - (0.9 - u4)*s25*c4,$$

$$x11 \leq x110 + x8in - (0.9 - u4)*s22*c4 - (0.9 - u4)*s23*c4$$

$$x1 \geq 0,$$

$$x2 \geq 0,$$

$$x3 \geq 0,$$

$$x4 \geq 0,$$

$$x5 \geq 0,$$

$$x6 \geq 0,$$

$$x7 \geq 0,$$

$x_8 \geq 0,$

$x_9 \geq 0,$

$x_{10} \geq 0,$

$x_{11} \geq 0 ]$

`solvebilevel(CO,OO,CI,OI,[c1 c2 c3 c4]);`

Дължината на цикъла се изчислява обратно в секунди.

$c_1 = c_1 * 3600;$

$c_2 = c_2 * 3600;$

$c_3 = c_3 * 3600;$

$c_4 = c_4 * 3600;$

Решението на скрипта с приближение за  $c_1$  е 40 секунди,  $c_2$  е 55 секунди,  $c_3$  е 80 секунди  $c_4$  е 40 секунди.

### 3.7.3.Резултати от експеримента

В предишната точка беше дадено решение с MATLAB. В този момент ще бъде представено решението с TRANSYT, както и сравнение между базовия експеримент, експеримента в MATLAB и експеримента в TRANSYT. Основният експеримент е симулация в софтуерния пакет Aimsun въз основа на данни, които са измерени на място. Резултатите показват, че оптимизацията, направена с TRANSYT, дава най-добри резултати, но тук трябва да се отбележи, че TRANSYT оптимизира продължителността на зеления сигнал и офсета, докато MATLAB оптимизира дължината на цикъла. Въпреки че оптимизирането на различни параметри, MATLAB скриптът и TRANSYT дават по-добри резултати от симулацията на базовия експеримент. И сравнявайки индикаторите за трафик

след симулация с MATLAB и TRANSYT, очевидно е, че тези индикатори са в полза на TRANSYT, но с много малка разлика. Резултатите са изобразени на Таблица 3.3..

**Таблица 3.3.** Сравнение на показателите за трафик за три случая

| <b>Индикатори на трафика</b>      | <b>Основен експеримент</b> | <b>MATLAB скрипт</b> | <b>TRANSYT оптимизация</b> | <b>Мерни единици</b> |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| <b>Времезакъснение</b>            | 51.16                      | 36.4                 | 35.51                      | sec/km               |
| <b>Плътност</b>                   | 7.69                       | 6.91                 | 6.27                       | veh/km               |
| <b>Интензивност</b>               | 4095                       | 4107                 | 4124                       | veh/h                |
| <b>Консумация на гориво</b>       | 355.53                     | 338.06               | 293.98                     | l                    |
| <b>CO2</b>                        | 875112.07                  | 843316.7             | 768464.08                  | g                    |
| <b>NOx</b>                        | 1311.3                     | 1250.91              | 1130.48                    | g                    |
| <b>PM (прахови частици)</b>       | 223.74                     | 210.73               | 174.77                     | g                    |
| <b>VOC (летливи вещества)</b>     | 1107.33                    | 997.88               | 917.66                     | g                    |
| <b>Средна опашка</b>              | 29.85                      | 20.88                | 16.28                      | veh                  |
| <b>Брой спирания</b>              | 0.16                       | 0.14                 | 0.12                       | #/veh/km             |
| <b>Скорост</b>                    | 34.25                      | 37.59                | 38.8                       | km/h                 |
| <b>Време в спряно състояние</b>   | 38.42                      | 25.48                | 25.76                      | sec/km               |
| <b>Общ брой спирания</b>          | 8322.87                    | 7404.37              | 6401.28                    |                      |
| <b>Общо пропътувано време</b>     | 94.76                      | 85.44                | 77.96                      | h                    |
| <b>Обща пропътувана дистанция</b> | 2925.17                    | 2939.58              | 2932.89                    | km                   |
| <b>Време за пътуване</b>          | 117.76                     | 102.99               | 102.13                     | sec/km               |

#### 3.7.4.Изводи от експеримента

В експеримента беше представена скрипт в MATLAB за оптимизиране на дължината на цикъла на мрежа от светофари по бул. Шипченски проход в София. Скриптът решава проблем на две нива, използвайки метода store-and-forward като ограничение за долната целева функция. Прави се сравнение с резултатите на най-съвременния софтуер за оптимизация TRANSYT. Три експеримента са симулирани в софтуерния пакет Aimsun - софтуерен продукт за моделиране и симулация на трафик на превозни средства. Като заключение въз основа на резултата може да се посочи, че двуйерархичната оптимизацията си заслужава да бъде проучена като подход за целите на оптимизацията на трафика.

### **3.8. Усложняване на модела. Въвеждане на трамвайни спирки и паркиране на улицата.**

#### 3.8.1. Резюме на експеримента

Експериментът ще представи използването на софтуера Aimsun за моделиране на градския трафик на оживени кръстовища в София. Ще бъдат представени и резултати от проучване относно влиянието на трамвайните спирки върху движението. Хипотезата е, че трамвайните спирки ще повлияят отрицателно на движението. По-важно е обаче да се установи степента на това влияние, тъй като това може да служи за целите на управлението на града за вземане на информирани решения относно разписанията на трамваите. Също така в отделен експеримент компютърният модел е усложен допълнително като е включена и симулация на паркирането на улицата – съответно се прави сравнение на случаите без и с паркиране на улицата. Възможностите на софтуерния пакет Aimsun за измерване на различни индикатори на трафика, както и индикатори за разхода на гориво и замърсяването на въздуха. Двете проучвания са обединени в тази обща точка, като проучвания, които усложняват изследвания компютърен модел и го доближават повече до реалните условия в пътната мрежа от посочените кръстовища.

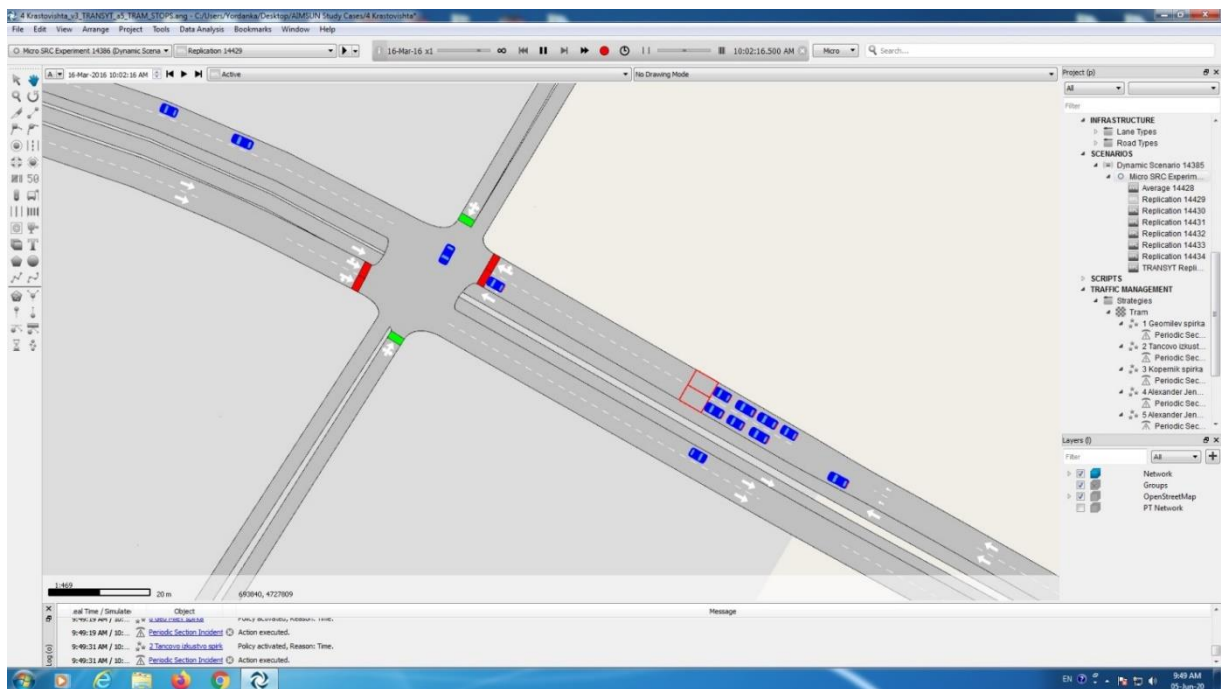
#### 3.8.2.Описание на експеримента и подхода за намиране на решение

Осем трамвайни спирки по бул. Шипченски проход бяха симулирани. За всяка спирка се симулира периодичен инцидент с продължителност 30 секунди и интервал от 6 минути

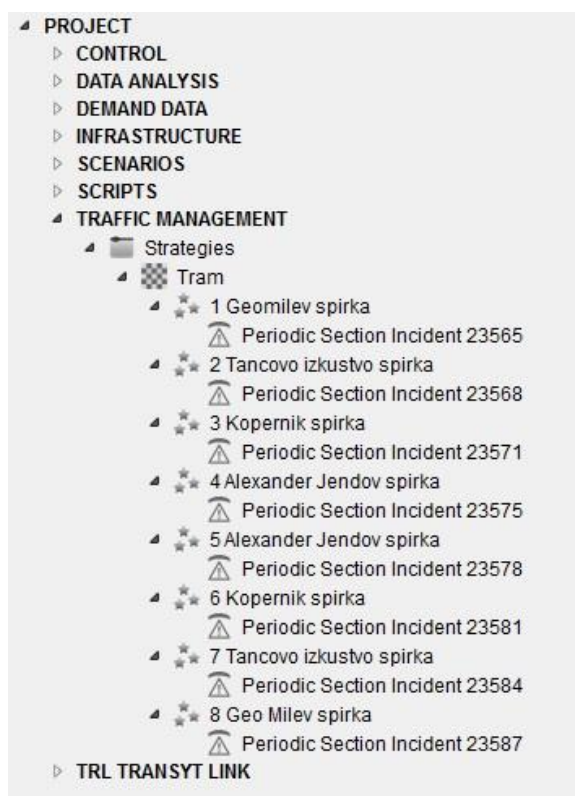
между всеки "инцидент". (фигура 3.17 и фигура 3.18) Периодичните инциденти са средството за симулиране на спиране на трамвай на трамвайна спирка в пакета Aimsun. Всички платна остават блокирани за времето на периодичния инцидент. По този начин се увеличава закъснението и броят на спирките на автомобили, както и няколко други индикатора на трафика.

Чакащите коли пред трамвайна спирка са представени на фигура 3.18.

Фигура 3.19 показва екранна снимка на прозореца на проекта, по-точно е представена стратегията за управление на трафика. В стратегията за управление на трафика са дефинирани осем съществуващи трамвайни спирки - от номер 1 до номер 8 със съответното име на всяка трамвайна спирка. На всяка трамвайна спирка се назначава периодичен инцидент в участъка.



Фиг. 3.18. Опашка от автомобили пред трамвайна спирка



**Фиг. 3.19.** Периодичните инциденти в участъка представляват трамвайни спирки по бул. Шипченски проход

По подобен начин на създаването на „инциденти“ за симулиране на автобусни спирки се създават и „инциденти“ за симулиране на паркиране на улицата. Разглежда се проблемът с паркирането на улицата и количественото определяне на неговите ефекти за мрежа от четири сигнализирани кръстовища, обект на изследване за цялата дисертация. Мрежата има ключово място по отношение на достъпа до центъра на града и обратно до периферните квартали.

В експеримента за паркиране са разгледани два случая - първият случай не включва паркиране на улицата, при него пълният капацитет на лентите се използва в цялата мрежа. Вторият случай е случаят с паркиране на улицата, при който превозните средства паркират на улицата в дясната лента. Събитията за паркиране се реализират чрез "периодичен инцидент" в Aimsun. Паркирането се случва в дясната лента.

### 3.8.3. Резултати от експеримента

Резултатите от симулацията и експеримента са представени в таблица 3.4. Основната част на този експеримент е сравнение на индикаторите за движение преди и след

въвеждането на трамвайни спирки в модела. Следва преглед на промените в основните показатели.

Както е видно от таблица 3.4., закъснението се увеличава със 7,90% в сравнение със случая без трамваи. Най-голямата промяна е в опашките, промяната е с 10.02 процента. Време за спиране - промяна с 8,39 процента и общ брой спирания - промяна с 6,22 процента може да се възприеме като една от най-значимите промени в сравнение с промените в други показатели.

Тези показатели се променят според очакванията поради влиянието на времето за спиране на трамваите, което е необходимо на пътниците да се качват и излизат от трамвая. Показателите за замърсяване на въздуха се влияят и от трамвайните спирки. Въпреки че промяната в показателите за замърсяване на въздуха може да се възприеме като не много значима с 1,43% за CO<sub>2</sub>, 1,41% за NO<sub>x</sub>, 2,30% за PM и 3,27 за VOC. Разходът на гориво също се увеличава с 2,57 процента.

Скоростта намалява за представената мрежа с 2.04 и в резултат на това времето за пътуване на автомобил, както и общото време за пътуване се увеличават съответно с 2.95 и 3.63 процента.

Цялостното впечатление от представените цифри е, че трамвайните спирки не влияят значително на индикаторите за движение.

Повече индикатори за трафика могат да се видят в таблица 3.4..

**Таблица 3.4.** Резултати - влияние на трамвайните спирки върху движението

| <i>Индикатори</i>        | Без трамвайни спирки |                              | С трамвайни спирки |                              | <i>Мерни единици</i> | <i>Разлика в процент</i> |
|--------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|
|                          | <i>Стойност</i>      | <i>Стандартно отклонение</i> | <i>Стойност</i>    | <i>Стандартно отклонение</i> |                      |                          |
| Време закъснение         | 39,75                | 37,93                        | 42,89              | 39,9                         | sec/km               | 7,90                     |
| Плътност                 | 6,85                 | N/A                          | 7,1                | N/A                          | veh/km               | 3,65                     |
| Консумация на гориво     | 322,22               | N/A                          | 330,49             | N/A                          | l                    | 2,57                     |
| Емисия - CO <sub>2</sub> | 821317,22            | N/A                          | 833030,8           | N/A                          | g                    | 1,43                     |
| Емисия - NO <sub>x</sub> | 1786,13              | N/A                          | 1811,27            | N/A                          | g                    | 1,41                     |
| Емисия - PM              | 317,49               | N/A                          | 324,8              | N/A                          | g                    | 2,30                     |
| Емисия - ЛОС             | 960,65               | N/A                          | 992,02             | N/A                          | g                    | 3,27                     |
| Опашка                   | 21,36                | N/A                          | 23,5               | N/A                          | veh                  | 10,02                    |
| Брой смени на платно     | 440,71               | N/A                          | 445,24             | N/A                          | #/km                 | 1,03                     |

|                          |         |       |         |       |        |       |
|--------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|
| Скорост                  | 37,22   | 10,75 | 36,46   | 11,09 | km/h   | -2,04 |
| Време в спряло състояние | 29,31   | 34,46 | 31,77   | 35,88 | sec/km | 8,39  |
| Общ брой смени на платно | 5547    | N/A   | 5604    | N/A   |        | 1,03  |
| Общ брой спирания        | 6990,34 | N/A   | 7425,36 | N/A   |        | 6,22  |
| Общо пропътувано време   | 85,11   | N/A   | 88,2    | N/A   | h      | 3,63  |
| Пропътувано време        | 106,6   | 38,09 | 109,74  | 40,06 | sec/km | 2,95  |

От представените резултати става ясно, че паркирането на улицата влияе върху показателите на трафика, както и върху разхода на гориво и емисиите на CO<sub>2</sub>.

Резултатите от симулациите на двата случая – с и без паркиране на улицата, са представени в таблица 3.5. Има голяма разлика в някои показатели като: закъснение, плътност, средна опашка, време за спиране. Но също така е забележимо, че има разлика в стандартното отклонение. Видно е също от представените цифри, че в даден момент от време показателите се увеличават. Вероятно в тези точки има голям брой автомобили, които паркират по улиците.

**Таблица 3.5.** Сравнение между случая без паркиране на улицата и случая с паркиране на улицата.

|                              | Без паркиране на улицата |                              | С паркиране на улицата |                              | Разлика в процент |                      |
|------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|
| <i>Показатели на трафика</i> | <i>Стойност</i>          | <i>Стандартно отклонение</i> | <i>Стойност</i>        | <i>Стандартно отклонение</i> |                   | <i>Мерни единици</i> |
| Време закъснение             | 42.99                    | 1.05                         | 93.05                  | 15.17                        | 116.45            | sec/km               |
| Плътност                     | 7.01                     | 0.08                         | 16.33                  | 1.29                         | 132.95            | veh/km               |
| Интензитет                   | 4111.71                  | 2.75                         | 3704                   | 31.19                        | -9.92             | veh/h                |
| Разход на гориво             | 325.17                   | 3.23                         | 370.68                 | 9.44                         | 14.00             | l                    |
| Емисия - CO <sub>2</sub>     | 824381.63                | N/A                          | 1045629.82             | N/A                          | 26.84             | g                    |
| Средна опашка                | 23.39                    | 0.51                         | 122.47                 | 14.33                        | 423.60            | veh                  |
| Скорост                      | 36.48                    | 0.24                         | 32.81                  | 0.37                         | -10.06            | km/h                 |
| Време в спряло състояние     | 31.76                    | 0.86                         | 80.15                  | 15.28                        | 152.36            | sec/km               |

|                        |         |        |         |        |       |        |
|------------------------|---------|--------|---------|--------|-------|--------|
| Общ брой спирания      | 7371.17 | 167.72 | 8248.46 | 226.84 | 11.90 |        |
| Общо пропътувано време | 86.85   | 0.97   | 122.71  | 9.3    | 41.29 | h      |
| Пропътувано време      | 109.7   | 1.07   | 159.84  | 15.17  | 45.71 | sec/km |

#### 3.8.4.Изводи от експеримента

От направените експерименти, които усложняват и доближават до реалните условия симулационния модел, става ясно, че трамвайните спирки не влияят значително на трафичните показатели и замърсяването на околната среда, докато паркирането на улицата води до по-осезаеми промени в трафичните показатели и влияе отрицателно на околната среда.

Може да се направи заключение, че всички изследвани трафични индикатори се влошават в случай на улично паркиране в сравнение със случая, в който няма паркиране на улицата. Друг не особено очевиден резултат е увеличаването на разхода на гориво и емисиите на CO<sub>2</sub>, което при внимателен анализ е логично поради намаления капацитет на мрежата и задръстванията, които се образуват чрез паркиране на улицата.

Наличието на обособени паркоместа в град София може да увеличи пропускателната способност на транспортната мрежа. Въпрос на правилно градоустройство е да се намали паркирането на улицата, тъй като намаляването може да бъде от полза за обществото не само по отношение на по-добра мобилност, но и по отношение на по-малко задръствания и замърсяване.

### 3.9. Гъвкаво управление и изследване на трафични индикатори, консумация на гориво и замърсяване на околната среда.

#### 3.9.1. Резюме на експеримента

Съществуват различни подходи, свързани с намаляване на замърсяването от автомобилен трафик. Това изследване се фокусира върху политиките за управление светлинната сигнализация и тяхното въздействие върху замърсяването на въздуха.

Проведена е софтуерна симулация със симулаторите на софтуер за трафик Aimsun и TRANSYT. Aimsun използва екологичния модел на (Panis и др. (2006), (Panis и др., (2011))). Използван е микроскопичен модел за симулация на трафика за оценка на въздействието върху околната среда от прилагането на различни политики за синхронизиране на сигнала. Мрежа от четири свързани кръстовища по бул. Шипченски проход в София беше симулирана. Експериментите водят до заключението, че замърсяването на трафика може да бъде повлияно от промени в политиките за управление на светлинната сигнализация.

### 3.9.2. Описание на експеримента и подхода за намиране на решение

Трафикът може да се управлява въз основа на исторически данни, а резултатът е светлинна сигнализация с твърдо управление или на база данни в реално време за трафика, и това води до гъвкаво управление на светлинната сигнализация. Всеки подход има своята особеност. Плановите, основани на твърдо управление са по-добри по отношение на настройка и поддръжка. Докато гъвкавото управление е по-скъп, но е по-адекватен на нуждите на трафика метод и в това проучване беше показано, че той подобрява показателите за замърсяване на въздуха. Това може да се счита за пряк резултат от подобряването на показателите за трафик като плътност, опашки, време за спиране, скорост и т.н.

Научна публикация на (Panis и др., 2006) предлага интегрирането на модела за вредни емисии с микроскопичен симулационен модел.

Моделът за трафик улавя всяка стъпка във времето и ускорение на отделни превозни средства в пътната мрежа, а моделът на емисиите, базиран на емпирични измервания, е в състояние да свърже емисиите от превозното средство с типа, моментната скорост и ускорението на превозното средство.

Обща функция за всички емисионни замърсители е намерена и включена в основната структура на модела, като по този начин е разработен интегриран модел на трафик и емисии

### 3.9.3. Резултати от експеримента

Резултатите от проведените експериментите са представени в четири таблици. Първите две таблици са свързани с трафични показатели, вторите две таблици представят консумацията на гориво и замърсителите на въздуха.

**Таблица 3.6.** Трафични показатели за три различни начина на управление на светофарите

|                                     | <b>Настоящо<br/>твърдо<br/>управление</b> | <b>Твърдо<br/>управление,<br/>оптимизирано<br/>за зелена вълна</b> | <b>Гъвкаво<br/>управление<br/>на<br/>светофарите</b> |                          |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|
|                                     | <i>Стойност</i>                           | <i>Стойност</i>                                                    | <i>Стойност</i>                                      | <i>Мерни<br/>единици</i> |
| <b>Плътност</b>                     | 7.69                                      | 6.53                                                               | 5.93                                                 | veh/km                   |
| <b>Опашка</b>                       | 29.85                                     | 19.08                                                              | 12.25                                                | veh                      |
| <b>Скорост</b>                      | 34.25                                     | 38.21                                                              | 40.77                                                | km/h                     |
| <b>Общ брой спирания</b>            | 8322.87                                   | 6367.76                                                            | 5861.51                                              |                          |
| <b>Общо пропътувано<br/>време</b>   | 94.76                                     | 81.2                                                               | 73.86                                                | h                        |
| <b>Време в спряло<br/>състояние</b> | 38.42                                     | 26.34                                                              | 19.36                                                | sec/km                   |

Таблица 3.7. представя относителните разлики на твърдото управление с оптимизация за зелена вълна и гъвкавото управление на светофарите в сравнение с графа “Настоящо твърдо управление” по отношение на трафични показатели.

**Таблица 3.7.** Трафични показатели за три различни начина на управление на светофарите  
(относителни разлики)

|                                     | <b>Настоящо<br/>твърдо<br/>управление</b> | <b>Твърдо<br/>управление,<br/>оптимизирано<br/>за зелена<br/>вълна</b> | <b>Гъвкаво<br/>управление<br/>на<br/>светофарите</b>         |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                     | <i>Стойност</i>                           | <i>Разлика в %<br/>от настояще<br/>твърдо<br/>управление</i>           | <i>Разлика в %<br/>от настояще<br/>твърдо<br/>управление</i> |
| <b>Плътност</b>                     | 7.69                                      | -15.08                                                                 | -22.89                                                       |
| <b>Опашка</b>                       | 29.85                                     | -36.08                                                                 | -58.96                                                       |
| <b>Скорост</b>                      | 34.25                                     | 11.56                                                                  | 19.04                                                        |
| <b>Общ брой спирания</b>            | 8322.87                                   | -23.49                                                                 | -29.57                                                       |
| <b>Общо пропътувано<br/>време</b>   | 94.76                                     | -14.31                                                                 | -22.06                                                       |
| <b>Време в спряло<br/>състояние</b> | 38.42                                     | -31.44                                                                 | -49.61                                                       |

**Таблица 3.8.** Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика.

|                                            | <b>Настоящо<br/>твърдо<br/>управление</b> | <b>Твърдо<br/>управление,<br/>оптимизирано<br/>за зелена<br/>вълна</b> | <b>Гъвкаво<br/>управление<br/>на<br/>светофарите</b> | <b>Мерни<br/>единици</b> |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------|
| <b>Консумация на гориво</b>                | 355.53                                    | 307.52                                                                 | 289.86                                               | l                        |
| <b>CO<sub>2</sub> (въглероден диоксид)</b> | 874077.52                                 | 788275.5                                                               | 762346.78                                            | g                        |
| <b>NO<sub>x</sub> (азотни оксиди)</b>      | 1835.5                                    | 1680.73                                                                | 1614.73                                              | g                        |
| <b>PM (прахови частици)</b>                | 340.52                                    | 288.71                                                                 | 271.36                                               | g                        |
| <b>VOC (ЛОС)</b>                           | 1131.69                                   | 963.57                                                                 | 876.51                                               | g                        |

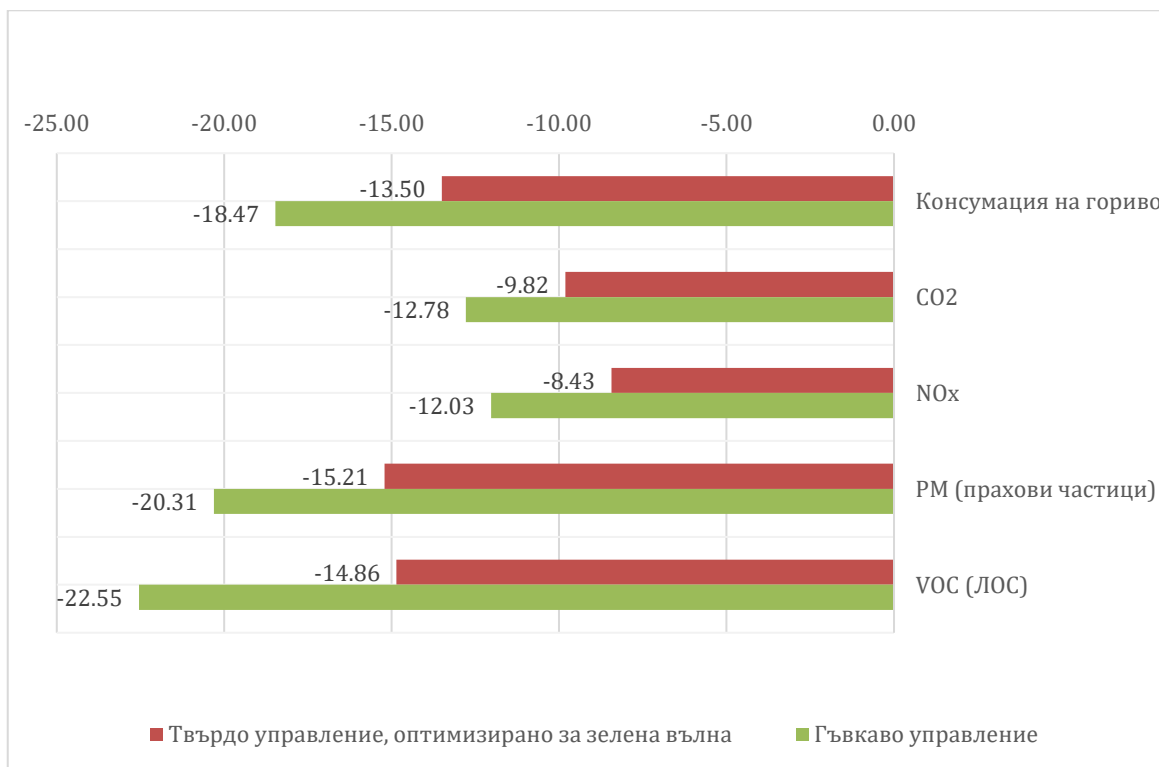
Таблица 3.9. представя относителните разлики на твърдото управление с оптимизация за зелена вълна и гъвкавото управление на светофарите в сравнение с графа “Настоящо твърдо управление” по отношение на консумацията на гориво и вредни емисии.

**Таблица 3.9.** Консумация на гориво и вредни емисии при различно управление на трафика (относителни разлики).

|                                            | <b>Настоящо<br/>твърдо<br/>управление</b> | <b>Твърдо<br/>управление,<br/>оптимизиран<br/>о за зелена<br/>вълна</b> | <b>Гъвкаво<br/>управление<br/>на<br/>светофарит<br/>е</b> |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Консумация на гориво</b>                | 355.53                                    | -13.50                                                                  | -18.47                                                    |
| <b>CO<sub>2</sub> (въглероден диоксид)</b> | 874077.52                                 | -9.82                                                                   | -12.78                                                    |
| <b>NO<sub>x</sub> (азотни оксиди)</b>      | 1835.5                                    | -8.43                                                                   | -12.03                                                    |
| <b>PM (прахови частици)</b>                | 340.52                                    | -15.21                                                                  | -20.31                                                    |
| <b>VOC (ЛОС)</b>                           | 1131.69                                   | -14.86                                                                  | -22.55                                                    |

На фигура 3.20 са илюстрирани относителните промени на изследваните показатели за консумация на гориво и замърсяване на въздуха в зависимост от типа управление. За базово се приема настоящето твърдо управление (Табл. 3.8 и Табл. 3.9). В сравнение с него, с червен стълб е показано твърдо управление, оптимизирано за зелена вълна, а със зелен стълб – гъвкаво управление. На фигура 3.20 се вижда, че гъвкавото управление довежда до

намаляване на консумацията на гориво и на замърсителите на въздуха в по-голяма степен, отколкото е наблюдаваното намаление при твърдото управление, оптимизирано за зелена вълна.



**Фиг. 3.20.** Относителни промени при показателите в зависимост от типа управление

#### 3.9.4.Изводи от експеримента

Оценени са различни настройки за синхронизация на сигнала, влияещи върху трафичните показатели и емисиите на замърсяване на въздуха. Направени са микросимулации с Aimsun. TRANSYT също се използва за оптимизиране на твърдото управление на светофарната уредба за зелена вълна. Резултатите от изследването ясно показват, че в случая когато се взема предвид реалния трафик към даден момент, намаляват както замърсяването на въздуха, така и разходът на гориво.

Резултатът от изследването разкрива също връзката между трафичните показатели и показателите за замърсяване на въздуха, както и как и двете са пряко засегнати от използването на различни схеми за синхронизация на светлинната сигнализация.

### **3.10. Изводи от Глава 3**

В трета глава са представени извършените експерименти по дисертационната работа. Представен бе обектът на оптимизация – мрежа от четири светлинно регулирани кръстовища. Обектът е моделиран в симулационната среда Aimsun. Описание и основна информация за използваните програмни продукти – Aimsun, TRANSYT и MATLAB също е представена в тази глава от дисертационната работа.

Подробно са описани проведените симулации и експерименти. Те са обвързани, както със събиране на данни за геометрия на пътната мрежа и интензивността на трафика в този участък, така и с последващото изграждане на компютърни симулации и математически модел. Въз основа на съставените модели – математически и симулационни, и приложените оптимизационни методи, се прави оценка на резултатите.

В главата са представени програмните кодове на две двуйерархични оптимизационни задачи, използващи функцията `solvebilevel()`. Решенията от изпълнението на тези кодове са приложени в симулационна среда Aimsun и са изведени резултати под формата на трафични параметри, които да се сравнят със симулация в TRANSYT. Постигнатите резултати са свързани с увеличаване на пропускателната способност на мрежата, намаляване на опашките пред светофарите и намаляване на задръстванията. Двуйерархичната оптимизация дава възможност за повече целеви функции, управляващи параметри и повече ограничения в управляваното пространство. Подробно сравнение на резултатите от приложението на оптимизационните методи е дадено в глава четири.

Обектът на изследване бе усложнен с допълнения като трамвайни спирки и паркиране на улицата, които явления са налични в реалните условия. По този начин симулационният модел бе доближен до реалните условия в пътната мрежа и ще е обект на по-подробни бъдещи изследвания.

Обърнато бе внимание и на влиянието на оптимизацията на трафика на обекта върху консумацията на гориво и показателите за замърсяване на въздуха. Тази взаимовръзка се изразява в това, че с намаляването на опашките и задръстванията се намаляват и вредните емисии, и консумацията на гориво. Това намаление носи ползи за обществото от гледна точка на здравен аспект. Затова оптимизацията на трафика в градски условия е важна не само за по-бързо придвижване от една до друга точка на града, но и за оптимизиране на нежеланите аспекти на трафика като замърсяване на въздуха.

Представените в глава 3 експерименти са докладвани в следните научни публикации от раздела “Публикации”: 1, 2, 3, 4, 5.

## ГЛАВА 4. СИМУЛАЦИОННИ И ЧИСЛЕНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ, И РЕЗУЛТАТИ

### 4.1. Сравнение на резултати от симулационни експерименти

В настоящата глава са представени, в табличен и графичен вид, резултатите от симулационни и числени експерименти. Това са резултати от експериментите, които са описани самостоятелно в предходната глава 3. Направено е сравнение между отделните експерименти, като се прави сравнение на оптимизираните резултати с резултатите от експеримента с реални данни и отчита подобрението на няколко трафични показатели. Освен сравнение между трафичните показатели, при различните експерименти, е направено и сравнение на консумацията на гориво и два замърсителя на околната среда – въглероден диоксид и прахови частици. С това сравнение се цели да се покаже, че оптималното управление на трафика благоприятства и показатели за замърсяване на околната среда.

Първата колона на таблица 4.1. представя основни трафични показатели, консумацията на гориво и замърсители на околната среда. Втората колона от таблицата представя резултати от симулацията на експеримента с реални данни. Трета колона представя резултати от симулация след въвеждане на оптимизирани посредством двуйерархична оптимизация данни, чрез функцията `solvebilevel()` в MATLAB за продължителност на зелените светлини на светофарите от изследваната пътна мрежа. Четвъртата колона представя резултати от симулация, в която са въведени оптимизирани данни за цикъла след двуйерархична оптимизация посредством функцията `solvebilevel()` в MATLAB. Петата колона представлява оптимизация посредством софтуерния пакет TRANSYT, който се използва като стандарт за оценка на редица стратегии за управление на трафика в световен мащаб. Последната шеста колона представя мерните единици. В нея внимание трябва да се обърне на съкращението `veh` (англ. `vehicles`) – превозни средства или в този дисертационен труд - коли. Изразходваното гориво се измерва за всички превозни средства, за целия период на симулацията и мерната единица е литри. Двата споменати замърсители на въздуха се измерват в грамове.

**Таблица 4.1.** Сравнение на трафични показатели, консумация на гориво и замърсяване на околната среда при четири симулации

|                                    | Текущи<br>настройки<br>(условно<br>наречен<br>експеримент<br>с реални<br>данни) | Двуйерархична<br>оптимизационна<br>задача с горна<br>целева функция,<br>максимизираща<br>зеления сигнал | Двуйерархична<br>оптимизационна<br>задача с горна<br>целева функция,<br>минимизираща<br>цикъла | Оптимизация<br>на текущите<br>настройки<br>посредством<br>TRANSYT | Мерни<br>единици |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------|
| Време закъснение                   | 51.16                                                                           | 37.23                                                                                                   | 36.4                                                                                           | 35.51                                                             | sec/km           |
| Плътност                           | 7.69                                                                            | 6.67                                                                                                    | 6.91                                                                                           | 6.27                                                              | veh/km           |
| Интензивност                       | 4095                                                                            | 4126                                                                                                    | 4107                                                                                           | 4124                                                              | veh/h            |
| Опашка                             | 29.85                                                                           | 21.17                                                                                                   | 20.88                                                                                          | 16.28                                                             | veh              |
| Скорост                            | 34.25                                                                           | 38.98                                                                                                   | 37.59                                                                                          | 38.8                                                              | km/h             |
| Общ брой спирания                  | 8322.87                                                                         | 6069.72                                                                                                 | 7404.37                                                                                        | 6401.28                                                           | брой             |
| Време за пътуване<br>през участъка | 117.76                                                                          | 103.86                                                                                                  | 102.99                                                                                         | 102.13                                                            | sec/km           |
| Консумация на<br>гориво            | 355.53                                                                          | 300.6                                                                                                   | 338.06                                                                                         | 293.98                                                            | liter            |
| CO2                                | 874077.52                                                                       | 775912.65                                                                                               | 843316.7                                                                                       | 768464.08                                                         | gram             |
| Прахови частици                    | 340.52                                                                          | 274.26                                                                                                  | 210.73                                                                                         | 174.77                                                            | gram             |

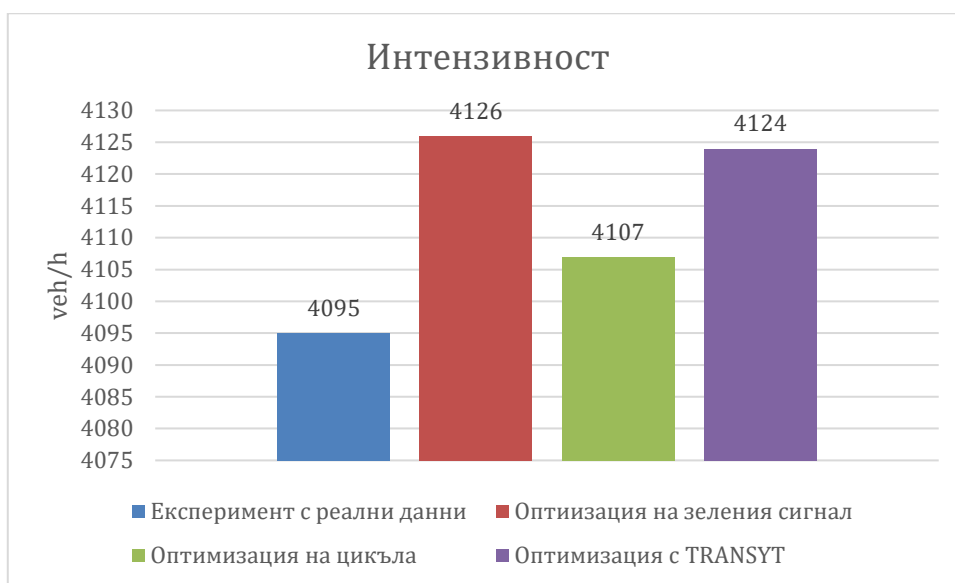
Общ извод от представените данни в таблицата е, че най-добри решения се достигат при използване на софтуерния продукт TRANSYT. Тук обаче важно за направеното изследване е наблюдението, че разликите в числените резултати от другите два експеримента, използващи двуйерархична оптимизация се доближават изключително много до постигнатите резултати с TRANSYT.

Това наблюдение води до два съществени извода:

- Първо, формалният модел за двуйерархичната задача, дава правдоподобни резултати, които са сравними със софтуерен пакет, който е от години на пазара, и който, както беше споменато, се използва при оценка на различни стратегии за управление на трафика.
- Второ, тъй като резултатите може да се влияят от изменението във входните данни, е възможно при определени входни данни двуйерархичната оптимизация да се окаже, че постига по-добри стойности на трафичните показатели, отколкото се постигат със софтуерния пакет TRANSYT. Този извод, обаче, по-скоро има характер на хипотеза за бъдещи изследвания в областта на използването на двуйерархичната оптимизация за целите на подобряване на трафика в градска среда.

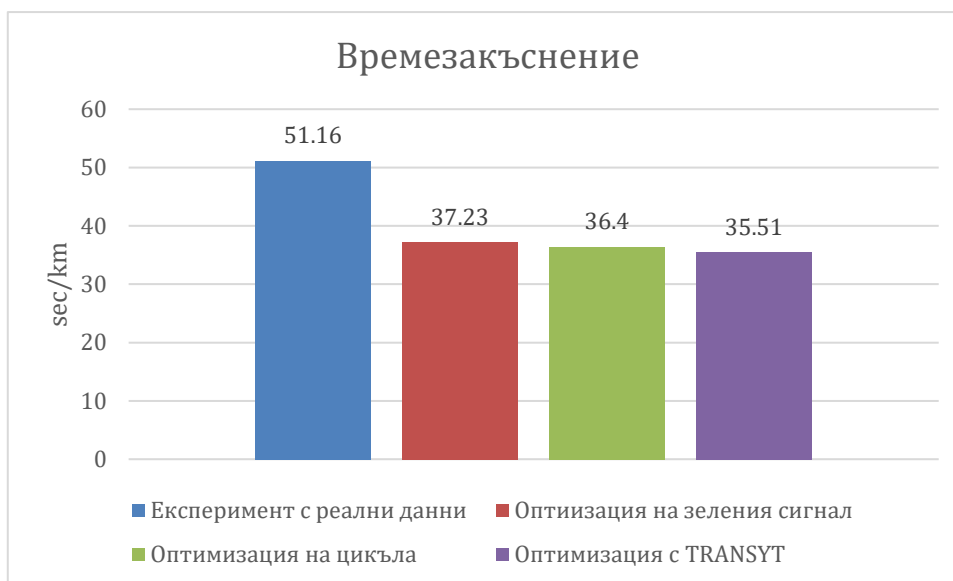
Трябва да се спомене също и бързината на достигане до решение при използване на МАТАВ и TRANSYT. При използване на MATLAB решението на задачата се постига няколко пъти по-бързо, отколкото е нужно на TRANSYT, да направи оптимизацията на пътната мрежа.

На фигура 4.1 са представени данните за интензивността на трафика при четирите симулации. Както се забелязва, най-ниска интензивност има при експеримента с реални данни – 4095 коли/час. Изненадващо при този показател интензивността при експеримента с оптимизация на зеления сигнал е най-висока – 4126 коли/час, макар и с незначителна преднина спрямо оптимизацията с TRANSYT.



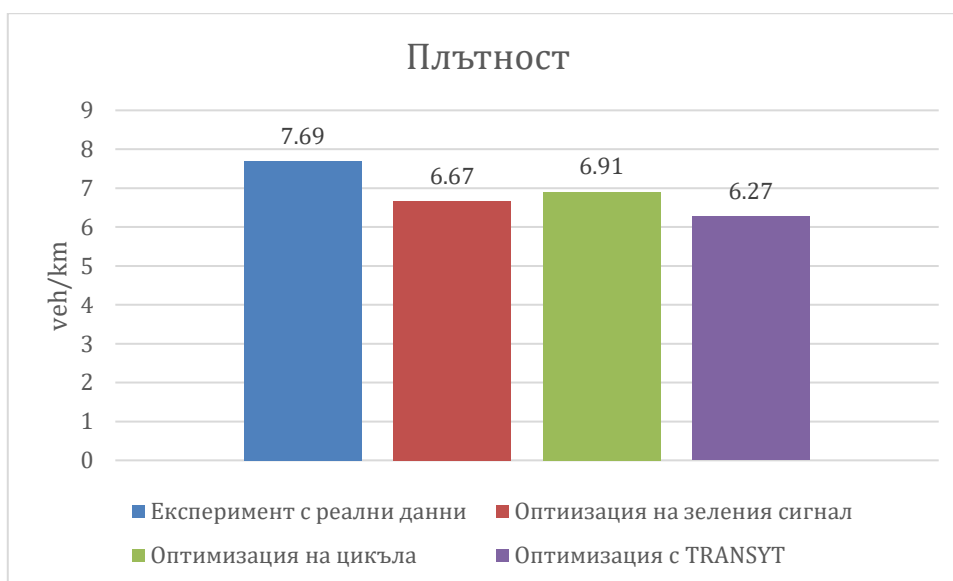
**Фиг. 4.1.** Сравнение на интензивността при четири симулации

Фигура 4.2. представя показателя времезакъснение. По този показател отново най-лош резултат е за експеримента с реални данни (51.16 sec/km). Най-добър е за TRANSYT (35.51 sec/km), но експериментите с двуйерархична оптимизация показва близки до TRANSYT стойности, както може да се види на фигурата.



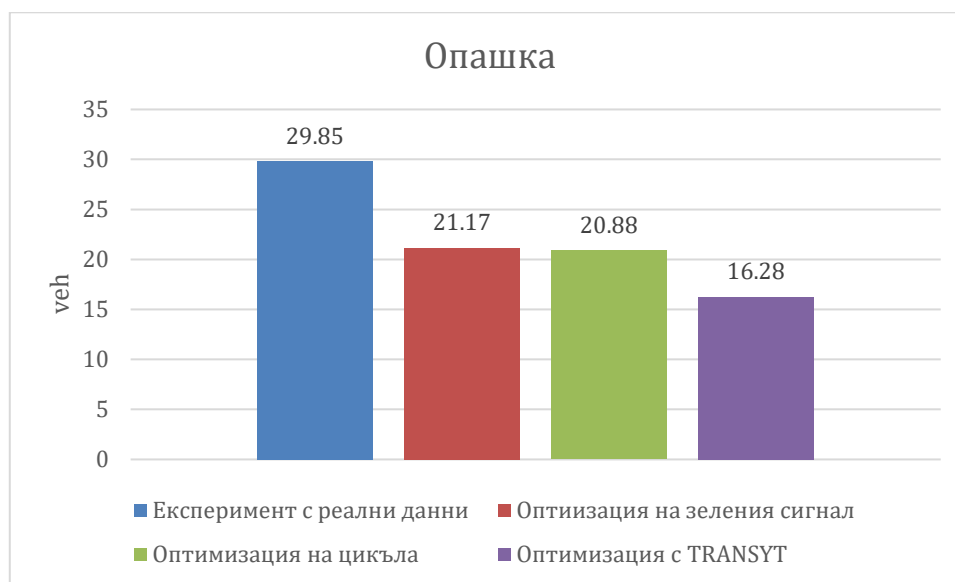
Фиг. 4.2. Сравнение на времезакъснението при четири симулации

Показателя плътност е представен на фигура 4.3. Плътността е с най-лоша стойност за първи стълб – експеримент с реални данни и най-добра за TRANSYT, последен стълб. При двуйерархичните оптимизации на зеления сигнал и на цикъла на светофара, предимството е за оптимизацията на зеления сигнал.



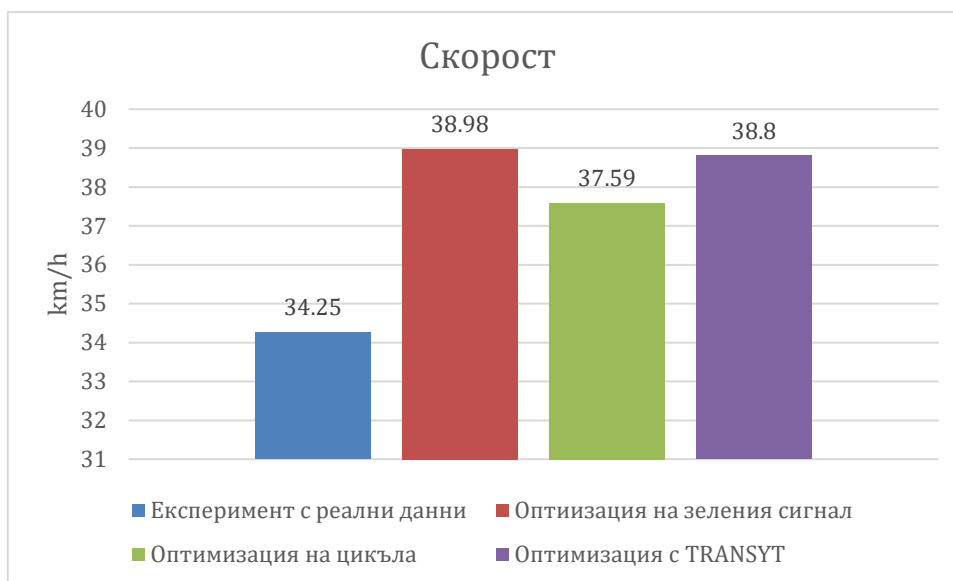
Фиг. 4.3. Сравнение на плътността при четири симулации

Опашката, представена на фигура 4.4, измерена в коли е най-дълга при експеримента с реални данни и най-къса при експеримента с TRANSYT. Двуйерархичната оптимизация дава сравнително задоволителни резултати, клонящи повече към резултата на TRANSYT.



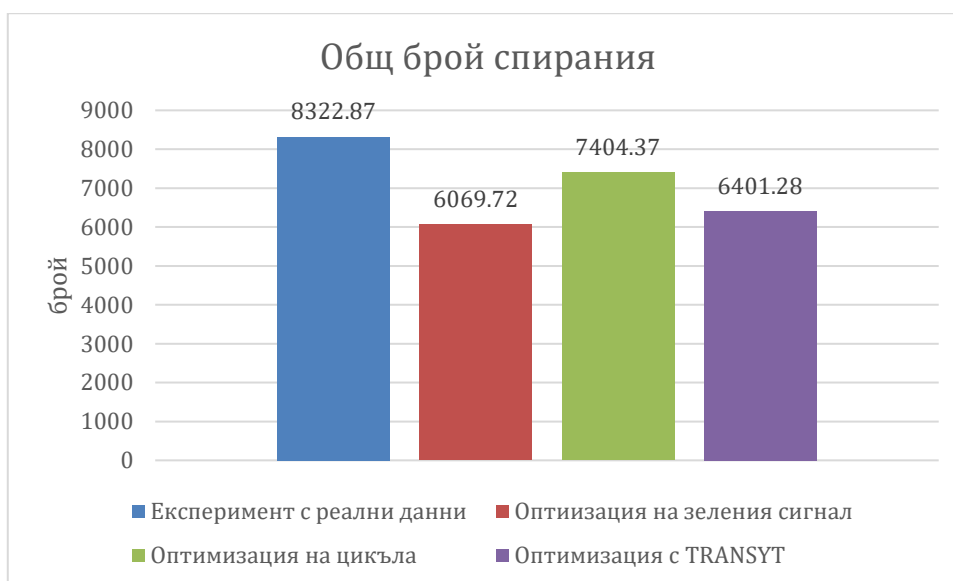
**Фиг. 4.4.** Сравнение на опашки при четири симулации

Скоростта, представена на фигура 4.5., е най-ниска за експеримента с реални данни и за втори път двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал (38.98 km/h) изпреварва с малко TRANSYT (38.8 km/h). Точни стойности за всеки експеримент са видни на фигура 4.5.



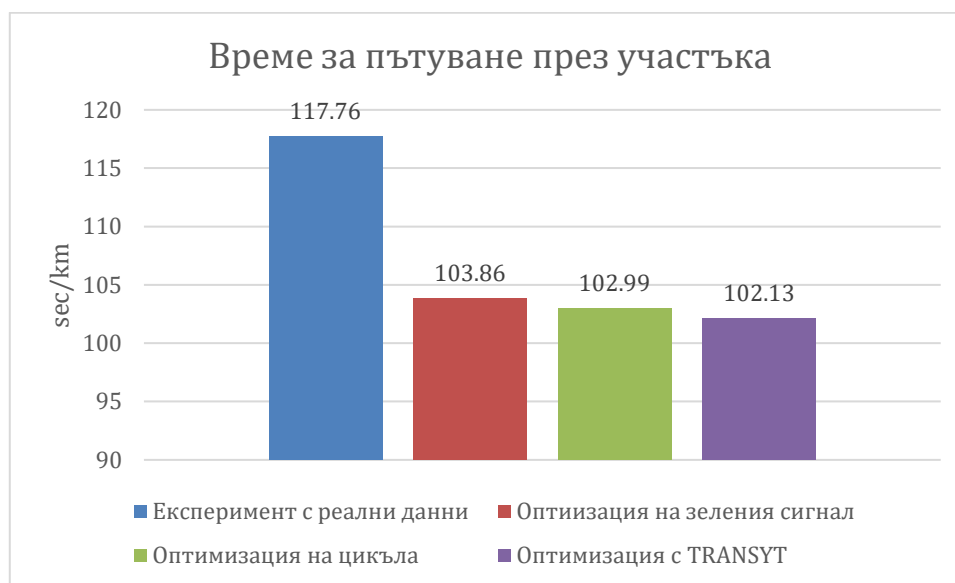
Фиг. 4.5. Сравнение на скоростта при четири симулации

Общия брой спирания е представен на фигура 4.6. Най-висок е той отново за първи стълб от фигурата. Трети трафичен показател показва най-добри резултати при двуйерархична оптимизация на зеления сигнал (6069.72 брой спирания) спрямо TRANSYT (6401.28 брой спирания).



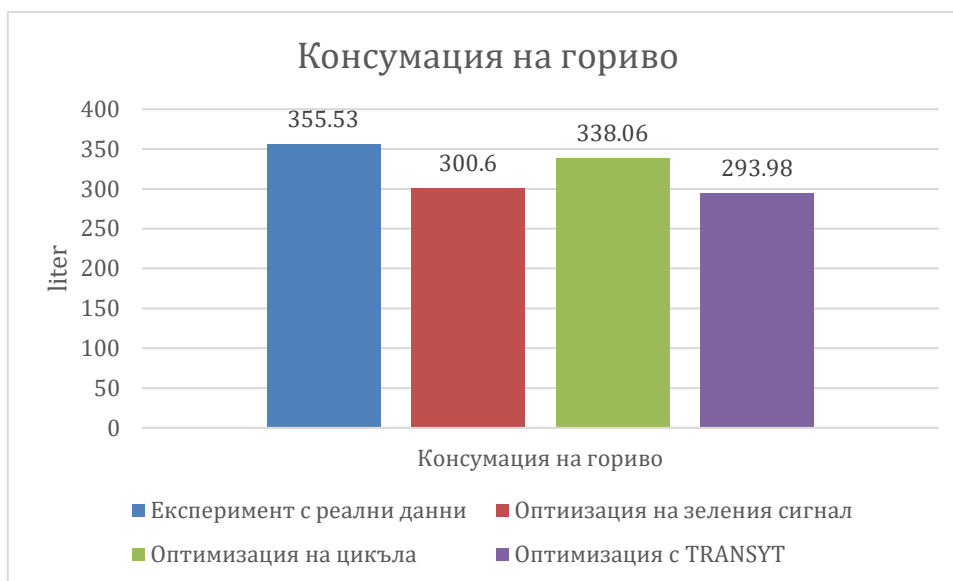
Фиг. 4.6. Сравнение на общ брой спирания при четири симулации

Времето за пътуване през участъка е представено на фигура 4.7. Най-продължително е пътуването при експеримента с реални данни, а най-кратко при TRANSYT, като стойностите за двете двуйерархични оптимизации са много близко до стойността на този показател за TRANSYT (102.13 sec/km). Тук двуйерархичната оптимизация на цикъла на светофара дава по-добри резултати от двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал.



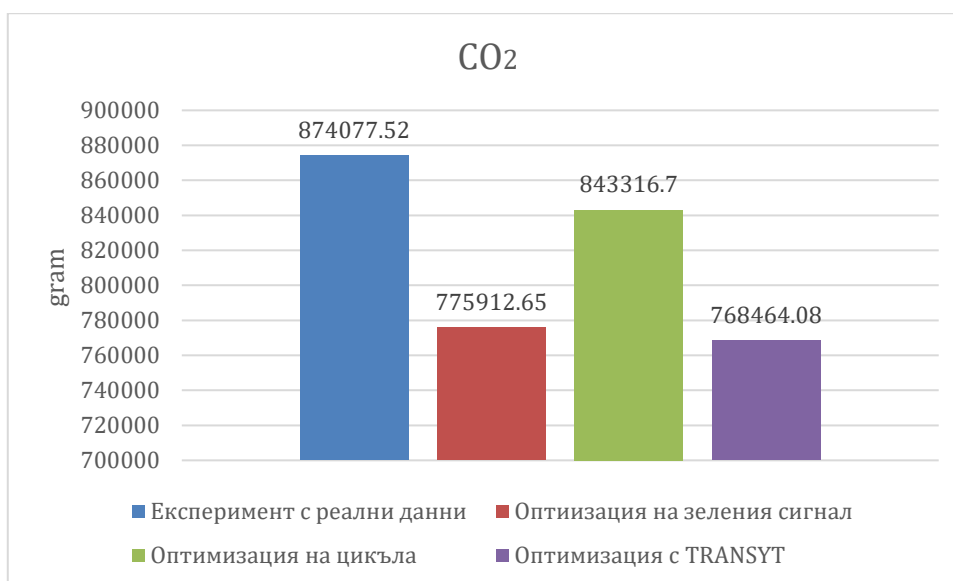
**Фиг. 4.7.** Сравнение на време за пътуване през участъка при четири симулации

Консумацията на гориво за четирите експеримента е представена на фигура 4.8. Най-висока е консумацията на гориво за първи стълб, а най-ниска за симулацията с TRANSYT (293.98 liters). Двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал, във втори стълб, също дава приемливо нисък резултат (300.6 liters), приближаващ се до резултата в стълба на TRANSYT.



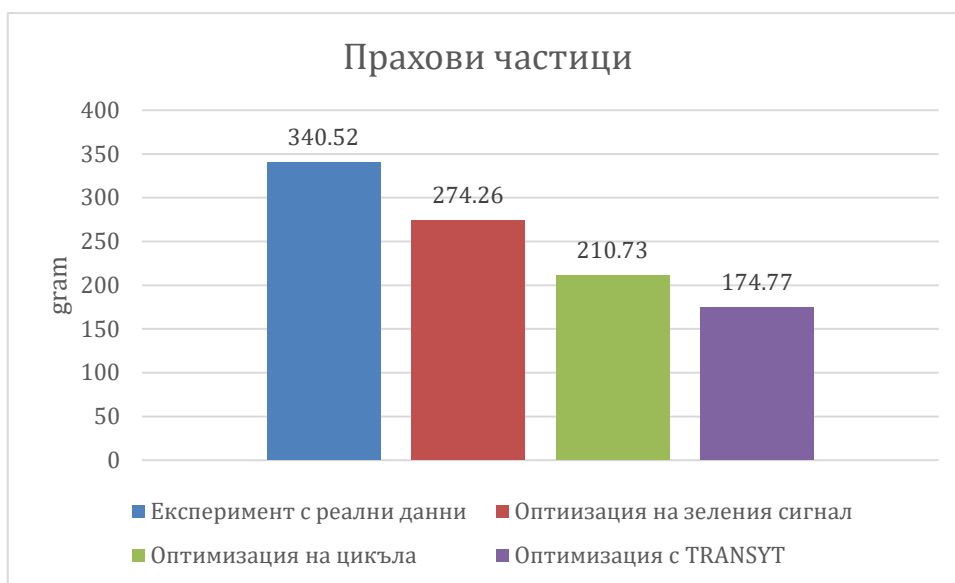
**Фиг. 4.8.** Сравнение на консумация на гориво при четири симулации

Замърсителят на въздуха, въглероден диоксид, е представен на фигура 4.9. Както е видно от фигурата, замърсяването е най-високо при първи стълб и най-ниско при четвърти – експеримента с TRANSYT. Като отново трябва да се отбележи близостта на резултатите на TRANSYT с тези на двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал.



**Фиг. 4.9.** Сравнение на CO<sub>2</sub> при четири симулации

Замърсеността на въздуха с прахови частици в следствие трафика е показана на фигура 4.10. Най-висока замърсеност има в експеримента с реални данни, а най-ниска при TRANSYT (174.77 grams). По-този показател трети стълб, който е експеримента с двуйерархична оптимизация на цикъла на светофара (210.73 grams), дава по-близки до TRANSYT резултати, отколкото двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал (274.26 grams).



**Фиг. 4.10.** Сравнение на прахови частици при четири симулации

От представените графики се стига до извода, че експеримента с реални данни дава най-незадоволителни резултати при абсолютно всички показатели. Този експеримент отразява симулация с реални данни за разглежданата транспортна мрежа, събрани в даден момент от времето. Очевидно е също, че в повечето случаи TRANSYT дава най-добрите резултати, но при три от показателите двуйерархичната оптимизация на зеления сигнал има предимство.

Това са следните показатели: интензивност, скорост и брой спирания. Като очевидна тенденция от графиките е и близостта на резултатите от двете двуйерархични оптимизации с резултатите от оптимизацията с TRANSYT.

Предвид резултатите, изследванията на метода с двуйерархична оптимизация има смисъл да продължава и за в бъдеще.

## **4.2. Изводи от Глава 4**

В четвърта глава е направено сравнение на резултатите от проведените симулации по различни трафични показатели. Тази глава е съществена от гледна точка да онагледяване на ползите от двуйерархичната оптимизация за целите на градския трафик.

Двуйерархичната оптимизация е поставена в контекст на сравнение с един от най-старите и най-разпространени програмни продукти, конкретно разработен за оптимизиране на мрежа от светлинно регулирани кръстовища – TRANSYT, каквато е световната практика при разработване на нови стратегии за управление на трафика.

Дефинираните и решени в тази дисертационна работа двуйерархични задачи, дадоха близки резултати с резултатите на TRANSYT, като една от двуйерархичните задачи показва леко предимство пред TRANSYT по три показателя - интензивност, скорост и брой спирания. Това дава основание за по-нататъшна изследователска дейност в областта на използването на двуйерархичния оптимизационен метод за целите на оптимизация на автомобилен градски трафик.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ - РЕЗЮМЕ НА ПОЛУЧЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ

Затрудненото придвижване е често разглеждан проблем, свързан с разрастването на градовете и увеличаването на броят превозни средства. Това налага търсенето на решения за справяне с проблема със задръстванията и затруднения трафик в големите градове и в частност в София.

Направен е обзор на по-значими понятия и теоретични постановки в областта на трафика в градска среда. В тази връзка са изяснени понятия, свързани със светлинно сигнално регулиране. Разгледан са и три модела на трафика, от които един - store-and-forward модела, е в основата на формулирането на модел на трафика в избраната мрежа от кръстовища. Споменати са и стратегии за управление на трафика, които са разработени и се прилагат в световен мащаб.

Разгледани са постиженията в областта на дефинирането и решаването на двуйерархични оптимизационни задачи в областта на оптимизацията на градски трафик в мрежа от кръстовища. Представена е двуйерархична оптимизационна задача. Същата формална постановка в контекста на автомобилния трафик в градска среда т.е. управлението на светлинно сигнално регулирани кръстовища. Разликата от подобни изследвания в дефинирането на целевите функции и логиката на избор на параметри за горната и долната целеви функции.

Обектът на оптимизация – мрежа от четири светлинно регулирани кръстовища. Обектът е моделиран в симулационната среда Aimsun. За целите на експериментите е било поведено полево проучване като са събрани данни за геометрия на пътната мрежа и интензивността на трафика в проучвания участък.

Обърнато бе внимание и на влиянието на оптимизацията на трафика на обекта върху консумацията на гориво и показателите за замърсяване на въздуха. Тази взаимовръзка се изразява в това, че с намаляването на опашките и задръстванията се намаляват и вредните емисии, и консумацията на гориво. Това намаление носи ползи за обществото от гледна точка на здравен аспект. Затова оптимизацията на трафика в градски условия е важна не само за по-бързо придвижване от една до друга точка на града, но и за оптимизиране на нежеланите аспекти на трафика като замърсяване на въздуха.

Определяне на продължителността на светлинните сигнали може да се извърши чрез симулационни модели. Използването на симулационен софтуер има предимството, че не се налагат реални промени в движението при изпробването на различни варианти на настройки на светофарите. Настройките се извършват в симулационна среда, при тази дисертационна работа използваният програмен продукт е Aimsun. Моделът и настройките на светофарните уредби, както и други параметри на инфраструктура и трафик могат да претърпят множество промени в рамките на компютърната симулация.

Друг симулационен програмен продукт е MATLAB, който е използван за математически модел на обекта на симулиране и оптимизация – пътна мрежа от четири кръстовища по протежението на главен булевард в София.

Резултатите от решението на двуйерархичната задача са сравнени с резултатите на програмния продукт TRANSYT, използван в световен мащаб за оценка на стратегии за управление на трафика. Резултатите показват, че една от двуйерархичните задачи дава предимство пред TRANSYT по три трафични показателя. Като обобщение от направените сравнения се стига до извода, че решенията на двуйерархичните задачи се приближават до решението на TRANSYT повече, отколкото до резултатите от симулация с реални данни. По този начин, с двуйерархична оптимизация, се постигат по-добри трафични показатели от симулацията с реални данни. Предимство на MATLAB пред TRANSYT е по-бързото изчисление, което се постига с използването на MATLAB и функцията `solvebilevel()`.

Двуйерархичната оптимизация дава възможност за повече целеви функции, управляващи параметри и повече ограничения в управляваното пространство. В частност двуйерархичната оптимизация постига по-голяма пропускателна способност на транспортната мрежа от кръстовища, намалява опашките пред светофарите и чрез това се намаляват и задръстванията пред светофарите. Ефектите от по-добрите трафични показатели се усещат и при разхода на гориво и вредните емисии, които намаляват с подобряването на трафичните показатели.

## ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Приносите на дисертационния труд са както следва:

1. Съставен е математически модел на обект – градска пътна мрежа, регулирана със светлинна сигнализация, с цел оптимизация на обекта. Моделът позволява да се правят аналитични и числени симулации за определяне на оптимални стойности на система от светофари.

2. Дефиниран е нов математически модел чрез две йерархично свързани задачи за оптимизиране на градски трафик, което позволяват да се определят оптималните стойности на по-голям брой управляващи променливи: цикъл и продължителност на зелена светлина на система от кръстовища.

3. Оптимизирана е светлинната сигнализация на светофарни уредби и продължителността на цикъла чрез прилагане на разработения йерархичен модел за оптимизация от т. 2. Резултатите от числените експерименти показват, че получаваните решения може да се определят в реално време, което позволява да се адаптира управлението на система светофари съгласно динамиката на транспортния трафик.

4. Разработен е симулационен компютърен модел на мрежа от кръстовища. Моделът позволява да се отчитат допълнителни условия при управлението на трафика, които не може да се формализират аналитично като отчитане наличието на трамвайна линия, разрешение за паркиране в система от транспортни кръстовища.

5. Направено е сравнение на резултатите, получени от аналитичната оптимизация чрез двуйерархичния разработен модел и симулационните резултати на компютърния модел. Показано е, че двуйерархичният модел позволява прилагане на управление в реално време в следствие по-бързото изчисляване на оптималните управляващи взаимодействия в сравнение със симулационните резултати, които изискват значително време за провеждане.

Научно-приложните и приложните резултати от дисертационния труд са приложени при разработването на договори: КП-06-Н37/6 от 6.12.2019 – “Моделиране и оптимизация на градски трафик в мрежа от кръстовища” и КП-06-М27/9 от 2018г. – “Съвременни цифрови методи и средства за изследване и моделиране на транспортни потоци”. Подробно описание на договорите е представено в раздел “Участие в проекти”.

**Таблица Закл.1.** Връзка между резултати, структура на дисертационния труд и направени публикации.

| Задача                                                                                                                                                                                                                                                                            | Тип принос      | Публикация | Глава |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|-------|
| Съставен е математически модел на обект – градска пътна мрежа, регулирана със светлинна сигнализация, с цел оптимизация на обекта. Моделът позволява да се правят аналитични и числени симулации за определяне на оптимални стойности на система от светофари.                    | Научно-приложен | 1, 2       | 3     |
| Дефиниран е нов математически модел чрез две йерархично свързани задачи за оптимизиране на градски трафик, което позволяват да се определят оптималните стойности на по-голям брой управляващи променливи: цикъл и продължителност на зелена светлина на система от кръстовища.   | Научно-приложен | 1, 2       | 3     |
| Оптимизирана е светлинната сигнализация на светофарни уредби и продължителността на цикъла чрез прилагане на разработения йерархичен модел за оптимизация от т. 2.                                                                                                                | Научно-приложен | 1, 2       | 3     |
| Разработен е симулационен компютърен модел на мрежа от кръстовища.                                                                                                                                                                                                                | Приложен        | 4, 5       | 3     |
| Усложняване на компютърния модел на обекта. Моделът позволява да се отчитат допълнителни условия при управлението на трафика, които не може да се формализират аналитично като отчитане наличието на трамвайна линия, разрешение за паркиране в система от транспортни кръстовища | Приложен        | 3          | 3     |
| Направено е сравнение на резултатите, получени от аналитичната оптимизация чрез двуйерархичния разработен модел и симулационните резултати на компютърния модел.                                                                                                                  | Научно-приложен | 2          | 4     |

## БЪДЕЩО РАЗВИТИЕ

Въз основа на получените резултати от приложения подход за оптимизиране на трафик в градска среда, изследванията ще се развиват в няколко насоки:

- Усложняване на формалния двуйерархичен модел. Изследване на горни целеви функции на двуйерархичните оптимизационни задачи, които в настоящата дисертация засягат продължителността на зеления сигнал и продължителността на цикъла на светофарите.
- Извършване на експерименти и симулации с новите горни целеви функции в програмни продукти Aimsun, TRANSYT, MATLAB и др.
- Прилагане на двуйерархична оптимизация и сравняването ѝ с оптимизация в TRANSYT върху друг участък от транспортната мрежа в град София. Целта е, да се отчете влиянието на геометрията и интензивността на движението в различен от изследвания транспортен участък върху получените резултати от оптимизационните експерименти.

## ПУБЛИКАЦИИ

1. Boneva Y., Split and Queue Optimization in Transport Network through Bi-level Optimization, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 175-179, SJR(SCOPUS) 2019: 0,2, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407995> (Отличен и награден с кристална статуетка доклад в съответната сесия)
2. Boneva Y., Cycle Length Optimization through Bi-level Optimization, 9<sup>TH</sup> International Scientific Conference “TechSys 2020” – Engineering, Technologies and Systems, Technical University of Sofia, Plovdiv Branch, 14-16 May 2020, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN:1757-8981E-ISSN:1757-899X, Volume 878, Published online: 21 July 2020, Published under licence by IOP Publishing Ltd, ID: 012024, pp. 1-6, Paper OPEN ACCESS, SJR (SCOPUS) 2019: 0.2, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/878/1/012024>, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/878/1/012024/pdf>
3. Boneva Y., T. Stoilov, Simulation of Tram Stops and their Influence on Traffic – Case Study in Sofia, Bulgaria, Journal "Information Technologies and Control", Online Print ISSN 1312-2622, ISSN: 2367-5357, Issue 3, SAI, 2019, pp. 19-25, DOI: 10.7546/itc-2019-0013, [http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol\\_3\\_03\\_2019.pdf](http://www.aksyst.com:8081/Sai/Journal/Docum/Vol_3_03_2019.pdf)
4. Boneva Y., Fixed-Time Signal Timing Versus Actuated Control of Traffic Lights – Case Study of Shipchenski Prohod Blvd. in Sofia, Bulgaria, Proceedings for International Conference AUTOMATICS AND INFORMATICS'2019, 03-05 October 2019, ISSN 1313-1850, CD: ISSN 1313-1869, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, Sofia, Bulgaria, 2019, pp. 53 – 56. (Представен като най-добър доклад в съответната сесия)
5. Бонева Йорданка, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2, 2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9. <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

## ЦИТИРАНЕ

**Статия:** Бонева Йорданка, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2, 2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9.

<https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

*Цитирана от:*

1. Ilchev Svetozar, Rumen Andreev, Zlatoliliya Ilcheva, Ekaterina Otsetova-Dudin, Three-channel laser diode driver for multimedia laser projectors, International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, ISSN: 1998-4464, Vol. 14, 2020, pp. 451-459, DOI: 10.46300/9106.2020.14.60, (SJR (SCOPUS) 2019: - 0.16, Q4)
2. Ilchev S, Andreev R, Ilcheva Z., Display of Computer-Generated Vector Data by a Laser Projector, CompSysTech '20: ACM International Conference Proceeding Series, Ruse, June 2020 г., ISBN: 978-1-4503-7768-3, Association for Computing Machinery (ACM), New York, USA, pp. 11-18, <https://doi.org/10.1145/3407982.3407990>, SJR (SCOPUS,) 2019: 0,2

## **УЧАСТИЕ В ПРОЕКТИ**

1. Проект с ФНИ, КП-06-Н37/6 от 6.12.2019, Моделиране и оптимизация на градски трафик в мрежа от кръстовища (Modelling and optimization of urban traffic in network of crossroads), Финансираща институция: ФНИ, Ръководител: проф. д.т.н. Красимира Петрова Стоилова
2. Договор КП-06-М27/9 от 2018г. Съвременни цифрови методи и средства за изследване и моделиране на транспортни потоци, "Конкурс за финансиране на научни изследвания на млади учени и докторанти - 2018 г.- 2020 г., Финансираща институция: ФНИ, Ръководител: гл. асистент д-р В. Иванов.

## ДЕКЛАРАЦИЯ ЗА ОРИГИНАЛНОСТ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания {с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител}. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

София, 08.12.2020 г.

Подпис: .....

/Й. Бонева/

## **БИБЛИОГРАФИЯ**

- [1]. Aboudolas K. , М. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos, Store-and-forward based methods for the signal control problem in large-scale congested urban road networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, ISSN: 0968-090X, Volume 17, Issue 2, Elsevier, 2009, pp. 163–174, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.10.002>,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X0800082X>
- [2] Aboudolas, K., и др., A rolling-horizon quadratic-programming approach to the signal control problem in large-scale congested urban road networks. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010. 18 (5): p. 680-694, <https://core.ac.uk/download/pdf/207942582.pdf>
- [3] Aboudolas, K., М. Papageorgiou, and E. Kosmatopoulos, Control and Optimization Methods for Traffic Signal Control in Large-scale Congested Urban Road Networks, in American Control Conference- ACC '07, 2007, 9-13 July 2007, New York, NY, USA, <http://eprints.gla.ac.uk/81380/1/81380.pdf>
- [4]. Aimsun Microscopic & Macroscopic Modelling Manual, October 2013, Copyright 2005-2013 TSS Transport Simulation Systems
- [5] Aavani P., Mithun K Sawant, Sneha Sawant, Rohit S Deshmukh, A Review on Adaptive Traffic Controls Systems, International Journal of Latest Engineering and Management Research (IJLEMR), ISSN: 2455-4847, Volume 02, Issue 01, January 2017, pp. 52-57
- [6]. Alexandrov A., Monov, V. Method for Adaptive Node clustering in AD HOC Wireless Sensor Networks”. Communications in Computer and Information Science, 1, Springer, 2018, ISBN:978-3-319-99446-8, ISSN:1865-0929, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99447-5_22), pp. 257-263
- [7]. Balabanov A., Stoilov T., Boneva Y.. Linear-Quadratic-Gaussian Optimization of Urban Transportation Network with application to Sofia Traffic Optimization. Journal Cybernetics and Information Technologies, 16, 3, IICT-BAS, 2016, ISSN:1311-9702, DOI:10.1515/cait-2015-0013, 165-184. SJR:0.17
- [8] Barisone, A., Davide Giglio, R. Minciardi, R. Poggi, A macroscopic traffic model for real-time optimization of signalized urban areas. in Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. Vol. 1, DOI: 10.1109/CDC.2002.1184622, IEEE Xplore, pp. 900 – 903, 2002

- [9] Berg, M., A. Hegyi, B. de Schutter, H. Hellendoorn, Integrated Traffic Control for Mixed Urban and Free Way Networks: A Model Predictive Control Approach, European Journal of Transport and Infrastructure Research- EJTIR, Vol. 7, No 3, 2007, pp. 223-250, DOI: 10.18757/ejtir.2007.7.3.3390
- [10]. Binning James C , TRANSYT 15 User Guide - AG70, Issue F, TRL Limited 2013, 2014, 2015, <https://www.scribd.com/document/361136853/Transyt-15-User-Guide>
- [11] Bretherton, D., Bodger, M., Baber, N., SCOOT – the future, In: Proc. of the 12th IEEE International Conference on Road Transport Information and Control, ISBN: 0 86341 386 2, London, UK, IEEE Xplore, 2004. DOI: 10.1049/cp:20040045, pp. 301–306.
- [12]. Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., Perarnau, J., & Torday, A. (2010). “Traffic simulation with Aimsun”. In Fundamentals of traffic simulation (pp. 173-232). Springer New York.
- [13] Csikós Alfréd, Tamás Tettamanti, István Varga, Nonlinear gating control for urban road traffic network using the network fundamental diagram, Journal of Advanced Transportation, Volume 49, Issue 5, August 2015, John Wiley & Sons, Ltd., pp. 597-682, <https://doi.org/10.1002/atr.1291>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/atr.1291>
- [14] Daganzo, C.F., The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. Transportation Research Part B: Methodological, 1994. Volume 28, Issue 4, August 1994, pp. 269-287, [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7)
- [15] Daganzo, C.F., The cell transmission model, part II: Network traffic. Transportation Research Part B: Methodological, 1995. Volume 29, Issue 2, April 1995, Pages 79-93, [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)00022-R](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)00022-R)
- [16] Diakaki, C, Integrated control of traffic flow in corridor networks, Ph.D. thesis, Department of Production Engineering and Management, Technical University of Crete, Chania, Greece, 1999, pp. 1-204.  
[https://www.researchgate.net/publication/270751666\\_Integrated\\_Control\\_of\\_Traffic\\_Flow\\_in\\_Corridor\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/270751666_Integrated_Control_of_Traffic_Flow_in_Corridor_Networks)
- [17] Diakaki Christina, Markos Papageorgiou, Kostas Aboudolas, A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control, Control Engineering Practice, Volume 10, Issue 2, Elsevier, February 2002, Pages 183-195, [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00121-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00121-6), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967066101001216>

- [18] Diakaki, C., V. Dinopoulou, K. Aboudolas, M. Papageorgiou, E. Shabat, E. Seider, A. Leibov. Extension and New Applications of the Traffic Signal Control Strategy TUC, In: Transportation Research Record, No 1856, 2003, pp. 202-211
- [19] Farzaneh, M. and H. Rakha, Procedures for calibrating TRANSYT platoon dispersion model, Journal of Transportation Engineering-Asce, 2006. Vol. 132, Issue (7), pp. 548-554, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:7(548).
- [20].Feng Huifang, Fengshan Bai, Youji Xu, Identification of critical roads in urban transportation network based on GPS trajectory data, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 535, 1 December 2019, 122337, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122337>,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437119313470>
- [21]. Forehead H, N. Huynh, Review of modelling air pollution from traffic at street-level - The state of the science, j. Environmental Pollution, Vol. 241 (2018), ISSN: 0269-7491, Elsevier, pp. 775- 786. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.019>
- [22] Gartner, N. H., OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control, Transportation Research Record (906), 1983, pp. 75–84,  
[https://www.researchgate.net/publication/243768686\\_OPAC\\_A\\_Demand-responsive\\_Strategy\\_for\\_Traffic\\_Signal\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/243768686_OPAC_A_Demand-responsive_Strategy_for_Traffic_Signal_Control)
- [23]. Gartner, N.H., C.J. Messer, A.K. Rathi, Traffic flow theory: A state-of the-art report, Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (AHB45), 2001,  
[https://www.researchgate.net/publication/248146380\\_Traffic\\_Flow\\_Theory\\_A\\_State-of-the-Art\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/248146380_Traffic_Flow_Theory_A_State-of-the-Art_Report).
- [24] Gazis D. C., Modeling and Optimal Control of Congested Transportation Systems, An International Journal Networks, John Wiley & Sons, Inc , Volume 4, Issue 2, 1974, pp. 113-124  
<https://doi.org/10.1002/net.3230040203>
- [25] Gazis, D.C., Optimal Control of a system of Oversaturated Intersections, Operations Research, Vol. 12, No. 6, Special Transportation Science Issue, INFORMS, 1964, pp. 815-831, <https://www.jstor.org/stable/168170?seq=1>
- [26] Gazis, D. C., Potts, R. B., The oversaturated intersection, In: Proc. of the 2nd International Symposium on Traffic Theory, London, UK, 1963, pp. 221–237.

- [27]. Gegov E., Postorino M., Gegov A. , Vatchova B.. Space independent community detection in airport networks. *Complex Systems. Relationships between Control, Communications and Computing. Studies in Systems, Decision and Control*. Editor Dimirovski G.M.. 55, Springer, 2016, ISBN:“978-3-319-28860-4”, DOI:10.1007/978-3-319-28860-4, 211-248
- [28] Ghadiri Mehdi, Amir Abbas Rassafi, BabakMirbaha, The effects of traffic zoning with regular geometric shapes on the precision of trip production models, *Journal of Transport Geography*, Elsevier Ltd, Volume 78, June 2019, pp. 150-159, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.018>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966692317308566>
- [29].Giannakos Lazaros, Evangelos Mintsis, Socrates Basbas, George Mintsis, Christos Taxiltaris, Simulating traffic and environmental effects of pedestrianizationand traffic management. A comparison between static and dynamic traffic assignment, 3rd CSUM 2016, Volos, Greece, j. Transportation Research Procedia, Vol. 24, Elsevier, 2017, pp. 313–320, doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.105
- [30] Glomb, A.J., Dispersion of traffic platoons, The University of Arizona: United States – Arizona, 1989, p. 139, [https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/277138/azu\\_td\\_1338835\\_sip1\\_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/277138/azu_td_1338835_sip1_m.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [31]. Gündoğan Fatih, Zekai Karagoz, Nihat Kocyigit, Abdullah Karadag, Halim Ceylan, and Yetiş Şazi Murat, An Evaluation of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey, *Journal of Traffic and Logistics Engineering* Vol. 2, No. 3, September 2014, Engineering and Technology Publishing, pp. 198 – 201, doi: 10.12720/jtle.2.3.198-201
- [32] Henry J.J., J.L.Farges, J.Tuffal, The PRODYN Real Time Traffic Algorithm, Control in Transportation Systems, Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS Conference, Baden-Baden, Federal Republic of Germany, 20–22 April 1983, pp. 305-310, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-029365-3.50048-1>
- [33] Homolova, J. Traffic Flow Control, pp. 1-6, <http://library.utia.cas.cz/prace/20050107.pdf>
- [34] Hunt, P., Robertson, D I, Bretherton, R D, Royle M C, The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique, *Traffic Engineering & Control*, ISSN: 0041-0683, Volume 23, Issue Number: 4, 1982.
- [35]. Ilchev S., R. Andreev, Z. Ilcheva, HybridNET Management and Sensor Data Acquisition System, in IoT 2017: 7th International Conference on the Internet of Things, Linz, Austria,

October 22-25, 2017, pp. 32:1 - 32:2, ACM Digital Library, ISBN: 978-1-4503-5318-2, DOI: 10.1145/3131542.3140268.

[36]. Ivanov V., K. Stoilova, "Traffic Lights Control Using Measured Characteristics of Urban Traffic in Real Time", Scientific Proceedings of XIV International Congress MACHINES. TECHNOLOGIES. MATERIALS. 2017 - Summer Session, Print ISSN 2535-0021, Year I, Vol. VI, pp. 435-438 (in Bulgarian)

[37]. Ivanova Yoana, Simulation modelling and assessing the impact of cyberattacks on urban automobile transport systems, International Journal on Information Technologies & Security, ISSN 1313-8251, № 3, 2017, pp. 117-142, <http://ijits-bg.com/contents/IJITS-No3-2017/2017-N3-09.pdf>

[38] Ivanova Veronika, Ani Boneva, Yordan Doshev, Stoyan Ivanov, Plamen Vasilev, Multifunctional Operating Station Based on Tcl/Tk and its Applications, Proceedings of the 6th IEEE International Conference "Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering" (BdKCSE'2019), Sofia, Bulgaria, IEEE, 27 February 2020, Electronic ISBN: 978-1-7281-6481-6, Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-7281-6482-3, pp. 1-7, DOI: 10.1109/BdKCSE48644.2019.9010662, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9010662>

[39]. Ole Witt-Hansen, On queue accumulation in highways and near traffic lights: A theoretical analysis, 2008, pp. 1-12,

[http://olewitt-hansen.dk/Mathematics/On\\_queues\\_on\\_highways\\_and\\_before\\_traffic\\_lights.pdf](http://olewitt-hansen.dk/Mathematics/On_queues_on_highways_and_before_traffic_lights.pdf)

[40] Kashani, H. R., G. N. Saridis. Intelligent Control for Urban Traffic Systems, Automatica, Vol. 19, No 2, Elsevier, 1983, pp. 191-197, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(83\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(83)90091-2)

[41]. Kariotia Eleni, Socrates Basbas, Evangelos Mintsis, George Mintsis, Christos Taxiltaris, Traffic and environmental impacts of traffic incidents on Thessaloniki's inner ring road, 3rd Conference on Sustainable Urban Mobility, 3rd CSUM 2016, 26 – 27 May 2016, Volos, Greece, j Transportation Research Procedia , Vol. 24 (2017), Elsevier, pp. 288–295 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.120>

[42] Kesur Khewal Bhupendra, Optimization of mixed cycle length traffic signals, Journal of Advanced Transportation, Volume48, Issue5, August 2014, pp. 431-442, <https://doi.org/10.1002/atr.1190>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/atr.1190>

- [43] Lowrie, P R, The Sydney coordinated adaptive traffic system - principles, methodology, algorithms, International Conference on Road Traffic Signalling, London, United Kingdom, ISBN: 0852962592, 1982, pp. 67-70, <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1188851>
- [44] Lofberg J., 2004. YALMIP : A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design (CACSD). 2-4 Sept. 2004, Taipei, Taiwan, September 24, 2004, IEEE Xplore, Print ISBN:0-7803-8636-1, 2005, pp. 284 - 289 , DOI: 10.1109/CACSD.2004.1393890, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1393890>.
- [45] Lee Jaeyoung, Mohamed Abdel-Aty, Ximiao Jiang, Development of zone system for macro-level traffic safety analysis, Journal of Transport Geography, Volume 38, Elsevier Ltd, June 2014, pp. 13-21, <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.018>,
- [46].Likaj Ramë, Ahmet Shala; Merita Mehmetaj; Pajazit Hyseni, Xhevahir Bajrami, Application of graph theory to find optimal paths for the transportation problem, IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 8, 2013, pp. 235-240, <https://doi.org/10.3182/20130606-3-XK-4037.00031>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701634246X>
- [47] Li, Z., Modeling Arterial Signal Optimization with Enhanced Cell Transmission Formulations. Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, Issue 7, 2011, pp. 445-454. <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000232>
- [48] Liu Gang, Development and Evaluation of Model-Based Adaptive Signal Control for Congested Arterial Traffic, Doctor of Philosophy Thesis in Transportation Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering University of Alberta, 2015, pp. 1-139, DOI:<https://doi.org/10.7939/R3736M938>, <https://era.library.ualberta.ca/items/d09d7407-9803-41c3-981c-dab99c5fedfe/download/ca83acb5-4c5e-490f-8960-58f350a5e0ae>
- [49] Lo, H.K., A novel traffic signal control formulation, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 33, Issue 6, 1999, pp. 433-448, [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00049-4)
- [50] Lo, H.K., A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans, Transportation Science, Vol. 35, No. 2, 2001, <https://doi.org/10.1287/trsc.35.2.148.10136>
- [51] Lo, H.K., E. Chang, Y.C. Chan, Dynamic network traffic control, Transportation Research Part A-Policy and Practice, ISSN: 0965-8564, Vol. 35A, No. 8, Elsevier, 2001, pp. 721-744.

- [52] Lo, H. A. Chow, Control Strategies for Oversaturated Traffic, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, Issue 4, 2004, pp. 466-478.
- [53] Lowrie, P. R., SCATS: The Sydney co-ordinated adaptive traffic system—Principles, methodology, algorithms, In: *Proc. of the IEEE International Conference on Road Traffic Signalling*. London, England, 1982, pp. 67–70
- [54] Maher, M., A comparison of the use of the cell transmission and platoon dispersion models in TRANSYT 13, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 34, ISSUE 1, 2011, pp. 71-85, <https://doi.org/10.1080/03081060.2011.530830>
- [55] Manar, A. K. Baass, Traffic Platoon Dispersion Modeling on Arterial Streets, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1566, 1996. pp. 49-53, <https://doi.org/10.1177/0361198196156600106>
- [56] Mathew Tom V., *Transportation systems engineering*, Chapter 34: Design Principles of Traffic Signa, IIT Bombay, February 19, 2014, pp. 34.1- 34.13, [https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105101008/downloads/cete\\_34.pdf](https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105101008/downloads/cete_34.pdf)
- [57] Michalopoulos, P.G, V. Pisharody, Platoon Dynamics on Signal Controlled Arterials, *Transportation Science*, Volume 14, Issue 4, 1980, pp. 365-396, <https://www.jstor.org/stable/25767992?seq=1>
- [58]. Mintsis E, Belibassakis M, Mintsis G,Basbas S, Pitsiava-Latinopoulou M. The use of a transport simulation model (Aimsun) to determine the environmental effects of pedestrianization and traffic management in the center of Thessaloniki. *European Journal of Environmental Sciences*, Vol. 6, No. 1: 25-29
- [59] Mirchandani, P., Head, L., RHODES—A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. In: *TRISTAN III (Triennial Symposium on Transportation Analysis)*, Vol. 2. 1998, pp. 1-15
- [60] Mirchandani, P., Wang, F. Y., RHODES to intelligent transportation systems, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 20, Issue 1, 2005, pp. 10–15, DOI: 10.1109/MIS.2005.15
- [61] Mohan Ranju, Gitakrishnan Ramadurai, State-of-the art of macroscopic traffic flow modelling, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, ISSN: 0975-0770 (Print) 0975-5616 (Online), Volume 5, Issue 2–3, Springer, September 2013, pp 158–176, DOI <https://doi.org/10.1007/s12572-013-0087-1>

- [62]. NEMA Standards Publication TS 2-2003 Traffic Controller Assemblies with NTCIP Requirements, National Electrical Manufacturers Association, Verginia, 2003, pp. 1 -246, <http://www.peaktraffic.com/portal/sites/default/files/NEMA%20TS2-2003.pdf>,
- [63] Ngoduy D., Multiclass first order modeling of traffic networks using discontinuous flow-density relationships, Journal Transportmetrica, Volume 6, Issue 2, 2010, Pages 111-125, <https://doi.org/10.1080/18128600903251334>
- [64]. Panis L, Broekx S, Liu R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. Science of the Total Environment 2006; 371: 270 – 285
- [65]. Panis L. Int, C. Beckx, S. Broekx, I. De Vlieger, L. Schrooten, B. Degraeuwe, L. Pelkmans, PM, NOx and CO2 emission reductions from speed management policies in Europe, j. Transport Policy, Vol. 18, Elsevier, 2011, pp. 32–37, doi:10.1016/j.tranpol.2010.05.005
- [66] Papageorgiou, M., An Integrated Control Approach for Traffic Corridors, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 3, Issue 1, 1995, pp. 19-30, [https://doi.org/10.1016/0968-090X\(94\)00012-T](https://doi.org/10.1016/0968-090X(94)00012-T)
- [67] Papageorgiou, M., A. Kotsialos. Freeway Ramp Metering: An Overview., In: IEEE Intelligent Transportation Systems. Conference Proceedings, 2000, pp. 228-239
- [68] Papageorgiou Markos, Overview of Road Traffic Control Strategies, IFAC Proceedings Volumes, Volume 37, Issue 19, October 2004, Springer, Pages 29-40, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)30657-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)30657-2)
- [69] Papageorgiou M., C. Diakaki; V. Dinopoulou; A. Kotsialos; Yibing Wang, Review of road traffic control strategies, Proceedings of the IEEE , Print ISSN: 0018-9219, Electronic ISSN: 1558-2256 Volume: 91, Issue: 12 , Dec. 2003, IEEE pp. 2043– 2067, DOI: 10.1109/JPROC.2003.819610, <https://ieeexplore.ieee.org/document/1246386>
- [70] Pavlis, Y., W.W. Recker, Inconsistencies in the problem of optimal signal control for surface street networks, in Itsc 2004: 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, IEEE: New York, 2004, pp. 361-366, DOI: 10.1109/ITSC.2004.1398925
- [71]. Pavlova K., B. Vatchova, E. Paunova, Quantitative evaluation of throughput capabilities in transportation graph under limited output data conditions, journal Bulgarian science, issue 107, ISSN:1314-1031, March 2018, pp. 45- 52. (in Bulgarian)

- [72]. Psaltoglou Artemis, Eusebi Calle, Enhanced connectivity index – A new measure for identifying critical points in urban public transportation networks, International Journal of Critical Infrastructure Protection, Volume 21, June 2018, pp. 22-32, <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2018.02.003>,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874548218300180>
- [73] Rakha, H., M. Farzaneh, Macroscopic modeling of traffic dispersion: Issues and proposed solutions. in Transportation Research Board Annual Meeting, 2005, pp. 1-28,  
[https://www.researchgate.net/publication/229043604\\_Macroscopic\\_Modeling\\_of\\_Traffic\\_Dispersion\\_Issues\\_and\\_Proposed\\_Solutions](https://www.researchgate.net/publication/229043604_Macroscopic_Modeling_of_Traffic_Dispersion_Issues_and_Proposed_Solutions)
- [74] Rakha, H., M. Farzaneh, Issues and solutions to macroscopic traffic dispersion modeling, Journal of Transportation Engineering, ISSN (online): 1943-5436 , Vol. 132, ISSUE 7, 2006, pp. 555-564, <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282006%29132%3A7%28555%29>
- [75]. Saidallah Mustapha, Abdeslam El Fergougui and Abdelbaki Elbelrhiti Elalaoui, A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators, MATEC Web of Conferences 81, 05002, ICTTE, 2016, pp. 2- 6, DOI: 10.1051/matecconf/20168105002
- [76] Singh M. G., H. Tamura, Modelling and hierarchical optimization for oversaturated urban road traffic networks, International Journal of Control, Print ISSN: 0020-7179, Online ISSN: 1366-5820, Vol. 20, No. 6, 1974, pp. 913-934, DOI: 10.1080/00207177408932791,  
<http://dx.doi.org/10.1080/00207177408932791>
- [77] Sinha Ankur, Pekka Malo, Kalyanmoy Deb, A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Volume: 22 , Issue: 2 , April 2018, INSPEC Accession Number: 17682856, IEEE, pp. 276 – 295, DOI: 10.1109/TEVC.2017.2712906, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7942105>
- [78]. Stoilov T., K. Stoilova, K. Nikolov Bi-level Modelling of Arterial Traffic Control. Preprints of IFAC Symposium “Control in Transportation Systems, Sofia, Bulgaria, 2012, p.126-131; IFAC Papers on-line - DOI 10.3182/20120912-3-BG-2031.00046, Vol.13 part 1, ISBN 978-3-902823-13-7, pp.231-236
- [79]. Stoilov T., Stoilova K., Stoilova V. Bi-level Formalization of Urban Area Traffic Lights Control. Studies in Computational Intelligence. Book: Innovative Approaches and Solutions in

Advanced Intelligent Systems. Margenov S. и др. Editors, Vol. 648, Springer, 2016, ISBN:978-3-319-32206-3, ISSN:1860-949X, DOI:10.1007/978-3-319-32207-0\_20, 303-318. SJR:0.19

[80]. Stoilov Todor, Krasimira Stoilova, Markos Papageorgiou, Ioannis Papamichail, Bi-Level Optimization in a Transport Network, Cybernetics and Information Technologies • Volume 15, No 5, Special Issue on Control in Transportation Systems, Print ISSN: 1311-9702; Online ISSN: 1314-4081, Marin Drinov BAS, Sofia, 2015, pp. 37 – 49, SJR:212, DOI:10.1515/cait-2015-0023

[81] Stoilov T., K. Stoilova, Portfolio Risk Management Modelling by Bi-level Optimization , chapter 5 in Handbook in decision making, vol 2 Risk management in decision making, ed. J.Lu, L.Jain, G.Zhang, Intelligent systems reference library vol.33. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, ISSN1868-4394, ISBN 978-3-642-25755-1, 2012, p.91-110.

[82] Stoilova K., T. Stoilov. Integrated management of transportation by bi-level optimization. International Conference Automatics and Informatics- ICAI, 1-3 October 2020, Technically supported by: Technical University of Varna, IEEE by Bulgarian section and Federation of the Scientific Engineering Unions, Varna, Bulgaria – ICAI2020 (in print)].

[83] Stoilova K., T. Stoilov. Bi-level optimizatio application for urban traffic management. Annals of Computer science and Information Systems, Vol.21, ISSN 2300-5963. Proceeding of the 2020 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Sept. 6-9, 2020, Sofia, Bulgaria, pp.327-336

[84] Stoilova K., T. Stoilov, K. Pavlova. Traffic Management of Urban Network by Bi-level Optimization. Journal "Information Technologies and Control", Online ISSN: 2367-5357, Issue 4, 2019, pp.12-21

[85]. Stoilova K., T. Stoilov, Vl. Ivanov. Bi-Level Optimization as a Tool for Implementation of Intelligent Transportation Systems. CIT, vol.17, No2, 2017, pp 97-105. Print ISSN: 1311-9702; Online ISSN: 1314-4081 DOI: 10.1515/cait-2017-0019.

[86] Tamura, H., Decentralized Optimization for Distributed Lag Models of Discrete Systems, Automatica, Volume 11, Issue 6, Elsevier, November 1975, pp. 593-602, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(75\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(75)90073-4)

[87].Teodorovic Dusan, Milan Janic, Transportation Engineering: Theory, Practice, and Modeling, ISBN: 978-0-12-803818-5, Elsevier Inc, 2017, pp. 1-882

- [88].Tsay Huel-Sheng, Hy-Fu Kang and Chien-Hua Hsiao, Algorithm for Estimating Queue Lengths and Stop Delays at Signalized Intersections, Transportation Research Record 1324, pp. 123 – 129, <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1991/1324/1324-014.pdf>
- [89]. Tettamanti Tamás, Advanced Methods for Measurement and Control in Urban Road Traffic Networks, Department of Control for Transportation and Vehicle Systems Budapest University of Technology and Economics, Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, March 11, 2013, pp. 1-114  
[https://www.researchgate.net/publication/258513013\\_Advanced\\_Methods\\_for\\_Measurement\\_and\\_Control\\_in\\_Urban\\_Road\\_Traffic\\_Networks\\_Thesis\\_by](https://www.researchgate.net/publication/258513013_Advanced_Methods_for_Measurement_and_Control_in_Urban_Road_Traffic_Networks_Thesis_by)
- [90]. Transyt -Aimsun Link (Version 2), User Guide, Issue B by James C Binning, Copyright Copyright TRL Limited 2010, 2013.
- [91]. Tu Ran, Islam Kamel, An Wang, Baher Abdulhai, Marianne Hatzopoulou, Development of a hybrid modelling approach for the generation of an urban on-road transportation emission inventory, j. Transportation Research Part D, Vol. 62 (2018) , ISSN: 1361-9209, Elsevier, pp. 604–618 , DOI: 10.1016/j.trd.2018.04.011
- [92]. Venkateswaran Shekar, Lance Fiondella, Graph Extraction and Demand Profiling Applications for Transportation Network Research, Procedia Engineering, Volume 159, 2016, pp. 148-157, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.146>,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816322949>
- [93] Wang Xuesong, QingyaZhou, JunguangYang, ShikaiYou, YangSong, MeigenXue, Macro-level traffic safety analysis in Shanghai, China, Accident Analysis & Prevention, Volume 125, Elsevier, April 2019, Pages 249-256, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.02.014>,  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001457519302441>
- [94] Wei-Hua, L., W. Chenghong, An enhanced 0-1 mixed-integer LP formulation for traffic signal control, Intelligent Transportation Systems, IEEE, Vol. 5, Issue 4, 2004, pp. 238-245, DOI: 10.1109/TITS.2004.838217
- [95] Wesley Ceulemans, Magd A. Wahab, Kurt De Proft and Geert Wets, Modelling Traffic Flow with Constant Speed using the Galerkin Finite Element Method, Proceedings of the World Congress on Engineering 2009, ISBN:978-988-18210-1-0, Vol II, WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K., pp. 1-7,  
<https://pdfs.semanticscholar.org/345a/e4f760c37031be58854ff3e844865c9d81e8.pdf>

- [96] Wong S.C., W.T.W., Jianmin Xu, C.O. Tong, A Time-dependent TRANSYT Traffic Model for Area Traffic Control. Conference: Second International Conference on Transportation and Traffic Studies (ICTTS ), Traffic and Transportation Studies, 2000, DOI: 10.1061/40503(277)90  
[https://www.researchgate.net/publication/268594368\\_A\\_Time-Dependent\\_TRANSYT\\_Traffic\\_Model\\_for\\_Area\\_Traffic\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/268594368_A_Time-Dependent_TRANSYT_Traffic_Model_for_Area_Traffic_Control)
- [97] Wu Xinkai , Henry X. Liu , Douglas Gettman, Identification of oversaturated intersections using high-resolution traffic signal data, Transportation Research Part C: Emerging Technologies Vol. 18, Issue 4, Elsevier, August 2010, pp. 626-638, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.003>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X10000136>
- [98] Yin, H., S. C. Won , J. Xu, C. K. Won . Urban Traffic Flow Prediction Using a Fuzzy Neural Approach, Transportation Research, Part C, Volume 10, Issue 2, 2002, pp. 85-98, [https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(01\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(01)00004-3)
- [99] Yu, L. Platoon dispersion and calibration under advanced traffic control strategies. in Proceedings of the 1997 Conference on Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century, June 8, 1997 - June 11, 1997, Chicago, IL, USA: ASCE, pp. 507-5013
- [100] Yu, L., Calibration of Platoon Dispersion Parameters on the Basis of Link Travel Time Statistics. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, ISSN: 0361-1981, Issue Number: 1727, 2000. pp. 89-94, <https://trid.trb.org/view/671637>
- [101] Zhang, L., Y. Yin, and Y. Lou, Robust Signal Timing for Arterials Under Day-to-Day Demand Variations, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2192, Issue 1, 2010: pp. 156-166, <https://doi.org/10.3141/2192-15>
- [102] Анто́в А., Транспортно моделиране 101: Практическо ръководство, ISBN: 978-619-90849-0-8 (печатна), ISBN: 978-619-188-109-3 (PDF формат), София, 2017, стр. 1-199  
[http://infrarch.com/doc/Antov%20\(2017\)%20-%20Transport%20Modelling%20101.pdf](http://infrarch.com/doc/Antov%20(2017)%20-%20Transport%20Modelling%20101.pdf)
- [103]. Бонева Й., Симулиране на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища, Сборник доклади на международна конференция по Автоматика и Информатика'2018, София, 4-6 Октомври 2018, САИ Джон Атанасов, 2018, ISSN:1313-1850, CD: ISSN 1313-1869, стр. 143-146
- [104]. Бонева Йорданка, Оптимизация на автомобилен трафик на светлинно регулирани кръстовища посредством симулационна среда Aimsun, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, ISSN 1312-3823 (print), ISSN 2367-6620 (online), том 16, брой 2,

2018 г, статия № 1663, ВТУ „Тодор Каблешков“, стр. I-1 – I-9. <https://mtc-aj.com/library/1663.pdf>

[105]. Георгиев Георги, Доброслав Симеонов, Определяне и оптимизиране на пропускателната способност на светлинно сигнално регулирани кръстовища, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 14, брой 3/3, статия № 1356, 2016, ВТУ, София, стр. VIII-21 – VIII-32, <https://mtc-aj.com/library/1356.pdf>

[106]. 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, pp.112-115

[107]. Иванчев Димитър, Гюнтер Неглер, Мрежово оптимизиране, ISBN 954-438-028 -0, Технически университет – София, Издателство на ТУ, София, 1993, стр. 1-206

[108] Маджарски Е. М., Салиев Д. Н., Младенов Г. Д., Станев Г. Р., Оптимизиране на движението на светлинно регулирано кръстовище с голямо транспортно натоварване, Proceedings of Trans&MOTAUTO'09, 2009, стр. 77-80

[https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3503\\_17\\_96.madjarski.tm09.pdf](https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3503_17_96.madjarski.tm09.pdf)

[109] НАРЕДБА № 17 от 23 .07.2001 г. за регулиране на движението по пътищата със светлинни сигнали Обн. - ДВ, бр. 72 от 17.08.2001 г.; доп., бр. 18 от 05.03.2004 г.; изм. и доп., бр. 35 от 15.05.2015 г., в сила от 18.05.2015 г.

[http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba\\_17\\_23-07-2001\\_v\\_sila\\_2015.pdf](http://www.api.bg/files/8114/5923/5059/Naredba_17_23-07-2001_v_sila_2015.pdf)

[110] Николова Христина Интелигентни транспортни системи: Политика и практика за внедряване, ISBN 978-954-644-978-0, Изд. комплекс – УНСС, София, 2007, стр. 1-248.

[111] Николова Христина, Марта Клисурова, Интелигентни транспортни системи в градска среда, ISBN 978–954-644-813-2, Изд. комплекс- УНСС, София, 2015, стр. 1-127.

[112] Павлова К., Дисертация за придобиване на образователната и научна степен „доктор“ по докторска програма „Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката“, професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника, автоматика“, Синтез на алгоритми за оптимално управление на транспортна система, ИИКТ-БАН, секция „Йерархични системи, София, 2017, стр. 1 - 133

[113]. Панайотова Галина, Математическо моделиране, ISBN 978-619-185-037-2, София (Уни Бит), Изд. „За буквите-О-писменехъ“, 2014, стр. 1-225.

[114] Салиев Дурхан, Алгоритъм за оптимизация на фазите и цикъла на светлинно регулирани кръстовища при промяна на параметрите, определящи тяхната продължителност, Научна конференция с международно участие по авиационна, автомобилна и железопътна техника и технологии Бул Транс-2010, 24-26 September 2010, България, Созопол, ISSN 1313-955X, стр. 313-316,

[https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3510\\_D\\_Saliev\\_Sozopol\\_END.pdf](https://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/3510_D_Saliev_Sozopol_END.pdf)

[115]. Стоилов Т., Вачова Б., Бонева Й., Паунова Е. Оптимизация и интелигентно управление на автомобилен трафик - Моделиране на трафик. Научен отчет по проект: „ACoMin: Advanced Computing for Innovation“, Институт по информационни и комуникационни технологии. БАН, 2015. стр. 144-153

[http://www.iict.bas.bg/acomin/docs/deliverables/D01-192/13\\_Boryana-Yordanka-Elena-pp144-153.pdf](http://www.iict.bas.bg/acomin/docs/deliverables/D01-192/13_Boryana-Yordanka-Elena-pp144-153.pdf)

[116]. Тодорова Мирена, Борис Гюров, Моделиране на сигнализирането на четириклонно кръстовище чрез разработване на EXCEL ADD-INS, списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 16, брой 3/1, статия № 1600, 2018, ВТУ, София, стр. I-8 – I-15, <https://mtc-aj.com/library/1600.pdf>

[117]. Тодорова Мирена, Усъвършенстване на нормативна база с цел подобряване на управление на движението в градовете, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 14, брой 3/1, статия № 1308, 2016, ВТУ, София, стр. I-16 – I-22, <https://mtc-aj.com/library/1308.pdf>

[118] Тодорова Мирена, Определянето на броя и вида на фазите по „Метод на сумата на фазовите коефициенти, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 15, брой 3, статия № 1444, 2017, ВТУ, София, стр. I-8 – I-14, <https://mtc-aj.com/library/1444.pdf>

[119]. Трендафилов Златин, Анализ на методите за определяне на фазите на светофарните уредби, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 15, брой 3, статия № 1446, 2017, ВТУ, София, стр. I-21 – I-27, <http://www.mtc-aj.com/library/1446.pdf>

[120]. Трендафилов Златин, Симулационен модел за анализ на адаптивното управление на светофарни уредби, Научно списание „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 2367-6620 (online) ISSN 1312-3823 (print), том 16, брой 3/1, статия № 1601, 2018, ВТУ, София, стр. I-17 – I-22, <https://mtc-aj.com/library/1601>.стр. I-17 – I-22,

<https://mtc-aj.com/library/1601.pdf>

[121] National Association of City Transportation Officials, <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/intersections/signals-operations/short-signal-cycles/> - (посетен на 14.11.2020)

[122] <https://yalmip.github.io/command/solvebilevel> - (посетен на 14.11.20202)