

Методи и средства за изграждане на интелигентна пътна транспортна система

Автореферат

за

присъждане на образователна и научна степен "доктор"

на

инж. Теодора Атанасова Мечева

Професионално направление: 5.3 Комуникационна и
компютърна техника

Научна специалност: Компютърни системи, комплекси и
мрежи

Научен ръководител: доц. д-р инж. Николай Каканаков

Пловдив, 2023

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Компютърни системи и технологии“ към факултет "Електроника и Автоматика" на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 22.03.2023г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 07.07.2023 от 13.00 часа в зала 4425 на IV корпус на Технически университет – София, филиал Пловдив на открито заседание на научното жури, определено със заповед №: ОЖ-5.3-34 от 05.04.2023 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

Вътрешни:

- проф. д-р инж. Гриша Валентинов Спасов - ТУ-София, Филиал Пловдив, ПН 5.3,
- доц. д-р инж. Митко Петров Шопов - ТУ-София, Филиал Пловдив, ПН 5.3,

Резерва:

проф. д-р. инж. Петя Емилова Павлова - ТУ-София, Филиал Пловдив, ПН 5.3,

Външни:

- проф. д-р. Венета Панайотова Алексиева - ТУ Варна, ПН 5.3
- доц. д-р. Христо Георгиев Вълчанов - ТУ Варна, ПН 5.3,
- проф. д-р. Тодор Атанасов Стоилов - пенсионер, ПН 5.2

Резерва:

проф. д-р Кольо Златанов Онков - пенсионер, ПН 4.6

Рецензенти:

- проф. д-р инж. Гриша Валентинов Спасов
- проф. д-р. Тодор Атанасов Стоилов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на факултет ФЕА на ТУ – София, филиал Пловдив блок N:4, кабинет 4242. Дисертацията е редовна форма на обучение към катедра КСТ на факултет ФЕА. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Теодора Мечева

Заглавие: МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ИНТЕЛИГЕНТНА ПЪТНА ТРАНСПОРТНА СИСТЕМА

1 **Обща характеристика на дисертационният труд**

Актуалност на проблема

Предложеният дисертационен труд изследва архитектурата на интелигентни пътни транспортни системи и нейното развитие, предлага метод за намиране на параметри, описващи навиците на шофьорите на база реални данни за трафика, както и метод за математически анализ на пътния трафик, неговата верификация и комплексна оценка. Решените конкретни задачи в дисертационния труд имат пряко практическо приложение при разработването на методи за оптимизация на пропускателната способност на пътната мрежа и изследване на тяхната ефективност.

Използван е агентно-базиран симулатор за симулиране на пътен трафик SUMO и език за програмиране Python за предварителна обработка и анализ на данните.

Цели и задачи на дисертационният труд

На базата на направените проучвания и посочените изводи може да бъде формулирана следната цел на научните изследвания в дисертационния труд: да се изследват методите и средствата за реализиране на интелигентни пътни транспортни системи, възможностите за трансфер на похвати за анализ и проектиране и приложимостта на технологии за оптимизиране на трафика. За постигане на тези цели в настоящия труд са поставени следните задачи:

1. Да се оценят възможностите за приложение на архитектурата на Интернет на нещата в интелигентна пътна транспортна система: да се проектира абстрактен модел, базиран на стандартната IoT архитектура, включващ VANET и предлагащ интегрирани потребителски услуги на базата на Edge-Fog-Cloud.
2. Да се изследват възможностите за изграждане на симулационен модел на пътна мрежа, включващ параметри, описващи маниера на шофиране: да се предложи и реализира методология за извеждане на параметри, описващи шофьорските навици в симулационен модел на трафика.
3. Да се предложи аналитичен модел за изследване на пропускателната способност на пътни мрежи: да се изследва приложимостта на предложения аналитичен модел над пътни мрежи с различна гранулярност.
4. Да се предложат методи за оптимизация на пропускателната способност на пътни мрежи и да се изследва тяхната ефективност: да се изследва ефективността на предложените методи с помощта на математически и симулационен анализ.

Научна новост

- Предложена е архитектура за интелигентна пътна транспортна система.
- Предложен е аналитичен модел за анализ на транспортни мрежи с различна гранулярност.
- Предложена е методология за намиране на параметри, описващи шофьорските навици на база на реални данни за трафика.

Практическа приложимост

Предложената методология за моделиране маниера на шофиране може да допринесат за изграждане на реалистични модели на пътния трафик, а намерените параметри, описващи шофьорските навици в Пловдив могат да бъдат приложени директно при моделиране на трафика в града.

Оценката на влиянието на автономно шофиране и адаптирани светофарни цикли може да намери приложение в оптимизиране на пътния трафик в град Пловдив.

Предложените реализации на методологията за моделиране на маниера на шофиране и оценката на влиянието на автономното шофиране и адаптираните светофарни цикли могат да бъдат приложени върху пътни мрежи с различна гранулярност.

Публикации

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в пет научни публикации, от които една е самостоятелна, а останалите - в съавторство.

Структура и обем

Дисертационният труд е в обем от 122 страници, като включва увод, четири глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература и приложения. Цитирани са общо 183 литературни източници, от които 4 са на български език, а останалите - на английски. Работата включва общо 47 фигури и 15 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

2 Съдържание на дисертационния труд

2.1 Литературен обзор

Архитектурите на съвременните интелигентни пътни транспортни системи (ИПТС) съчетават познати технологични средства като безжични комуникации, математически и симулационни модели за анализ и проектиране и анализ на Големи данни. От потребителска гледна точка ИПТС може да се разглеждат като подобласт на Интернет на нещата, характеризираща се с високи изисквания към киберсигурността и работа в реално време. Ключова технология, характерна за транспорта, която е част от почти всички съвременни разработки на транспортни системи е VANET (Vehicular ad hoc networks).

2.1.1 Работа в реално време

Изпълнение на дадена задача в реално време, означава гарантирано получаване на резултат в определена времева рамка. Когато този срок е задължителен, говорим за твърди изисквания за работа в реално време, а когато е само пожелателен - за меки.

Работа в реално време е концепция, която засяга ИПТС на много нива. От една страна важна роля играят комуникациите в реално време - жичните комуникации между инфраструктурните устройства и във вътрешната за автомобила мрежа и безжичните VANET комуникации. От друга страна операционните системи за работа в реално време са важен компонент на бордовите устройства в съвременните превозни средства. В случаите на отдалечено изпълнение на дадена услуга се поставя краен срок за изпълнение на цялата задача, който включва локалното и отдалечено извършване на задачите, както и времето за осъществяване на комуникацията.

2.1.2 Интернет на нещата

Интернет на нещата (IoT) е мрежа от физически обекти, които съдържат вградени технологии като сензори и комуникационни интерфейси и изчисления в разпределена среда за предоставяне на услуги във всеки аспект от живота. IoT е синоним на продукти, свързани с концепцията за интелигентен дом, интелигентно здравеопазване, интелигентен град, интелигентен транспорт и т.н. Заемането на технологии между подобласти на IoT е обичайно, но трябва да се обмисли добре и да се проучи на практика. Наложилата се архитектура за IoT включва сензорен слой, мрежов слой, поддържащ слой и приложен слой. Сигурността и управлението на данните имат отношение към всеки от четирите слоя.

2.1.3 Автомобилни ad-hoc мрежи (Vehicular ad-hoc networks, VANET)

Автомобилните ad-hoc мрежи (Vehicular ad-hoc networks, VANET) са вид мобилни безжични мрежи, в които възлите са превозни средства. Автомобилите обменят кратки съобщения, наречени маяци (beacons), през определени периоди. Маяците съдържат важна информация за превозните средства и околната среда (посока, ускорение, скорост, пътни

2 Съдържание на дисертационния труд

условия, метеорологични условия и т.н.). Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя.

Отличителни черти на VANET са:

- *Хетерогенност на мрежата* - свързана е с различната плътност на мрежата или с различното оборудване на превозните средства и наличието на необорудвани превозни средства.
- *Киберсигурност и необходимост от комуникация в реално време* - те са пряко свързани с физическата безопасност на пътниците.
- *Мобилност* - Честото присъединяване и напускане на възли налага времева рамка за комуникация и необходимост от често и навременно автентифициране.
- *Големи данни* - данните във VANET отговарят на характеристиките на Big data – обем, скорост, разнообразие.
- *Изискване за анонимност* - анонимността на потребителите и устройствата е свързана с политиките за сигурност и защита на личните данни, но също има отношение към бърздействието, мобилността и хетерогенността.

При дизайна на VANET архитектури се разграничават три нива: ниво на достъп (Access layer) - съответстващо на физическия и канален слой в OSI модела, мрежов и транспортен слой и приложен слой. Сигурността и управлението имат отношение към всички изброени слоеве.

2.1.4 Методи за анализ и проектиране на ИПТС

Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи при проектиране и анализ на Интелигентна пътна транспортна система. Насочени експерименти се прилагат по-рядко, обикновено в етапа на тест и валидация. Степента на съответствие между модела и реалния обект определят валидността на модела.

Математическото моделиране играе двойствена роля - от една страна пресъздава реалните процеси и явления, а от друга предоставя инструмент за решаване на поставени задачи. В ИПТС често се заимстват методи от други области, или се намират нови приложения на използвани вече техники. За представяне на пътната мрежа най-често се използват графи или опашки.

Симулиране на пътния трафик

Изграждането на симулационен модел на пътния трафик включва много компоненти – пътна мрежа, данни за трафик потоците, избор на инструмент за симулация (трафик симулатор), модел на взаимодействие между агентите, настройки и параметри, модел на поведението на шофьорите. Изборът на симулатор е определящ, тъй като всеки продукт има набор от възможности за представяне на времето, гранулярност, car-following модел, формат на представяне на входните данни и т.н. Друга важна характеристика е начинът на дистрибуция – комерсиална или със свободен достъп.

На база на сравнителен анализ на някои от най-често използваните симулатори на трафик е избран симулатора за пътен трафик SUMO за извършване на симулационните

експерименти в дисертацията. Наборът от много допълнителни инструменти и добре организирана документация, отворената и гъвкава концепция са сред основните предимства на SUMO. Основна причина за избора на SUMO в настоящата работа са разнообразните опции за представяне на входните и изходни данни и разнообразието от car-following модели.

Моделирането на шофьорските навици е компонент от симулационния модел, който изисква внимание, поради спецификите на маниера на шофиране в различните култури и влиянието му над пропускателната способност над пътната мрежа.

Маниерът на шофиране е компонент от моделът на пътния трафик, който най-често се отразява от алгоритъма за маршрутизиране и car-following модела.

Алгоритмите за маршрутизиране определят траекторията на превозните средства, а car-following моделите - времепространствените координати. Те отразяват характеристики на като ускорение, забавяне, шофьорски навици и т.н.

Извличането на данни за поведението на шофьорите може да е свързано с насочено изследване или анализ на вече налични данни, извлечени с друга цел.

ИПТС приложения за ефективност

Проблемът със задръстванията нараства всяка година, поради икономическия растеж и засилената урбанизация. Една от важните цели на ИПТС е ефективно управление на съществуващите инфраструктури. Мерките за оптимизиране на пътния трафик включват както конвенционални средства, като насърчаване на използването на обществен транспорт и оптимизиране на светофарните цикли, така и високотехнологични решения като автоматизирано шофиране, усъвършенствани навигационни системи, системи за контрол на трафика, системи за контрол на паркиранията.

При управление на трафика се обособяват две подзадачи - рутиране на пътните потоци и управление във времето. Ефективното рутиране на потоците може да се постигне чрез кооперативно управление или VMS (Variable Message Signs), а управлението във времето - чрез автоматизирано кооперативно управление на пътните потоци или светофари.

Повече от век **светофарите** са едно от най-разпространените средства за управление на пътните потоци. Според начина на определяне на червените, жълти и зелени времена в светофарната циклограма се разграничават два метода за управление на светофари - статични и динамични. Статичните методи използват предварително програмирани дневни графици, при динамичните времената се регулират, така че да съответстват на промените в трафик натоварването в реално време.

Автоматизираните превозни средства предоставят различни форми на съдействие на водача, като адаптивен круиз контрол (Adaptive Cruise Control - ACC), антиблокираща спирачна система (Anti-lock Braking System - ABS), система за контрол на сцеплението (Traction Control System - TCS) и др. Пълната автоматизация изключва намесата на шофьора.

Очаква се навлизането на напълно автоматизираните превозни средства да намали инцидентите на пътя и да повиши ефективността на трафика. Тази тенденция обаче би могла да доведе до някои нежелани последици като все по-голямо потребление. Трудно е да се предвиди какви биха били ефектите на тази технология в преходния период,

2 Съдържание на дисертационния труд

когато част от превозните средства ще са напълно автоматизирани, а останалите ще са ръчноуправляеми.

2.1.6 Изводи

Предпоставките за развитие на ИПТС от една страна са бързо развиващите се технологии, а от друга - все по-нарастващата нужда на потребителите от мобилност и концентрацията на голяма част от населението в градовете.

Технологичните предпоставки за развитие на ИПТС са развитието на системите за работа в реално време, Интернет на нещата и автомобилните ad-hoc мрежи.

Наложилата се широко четирислойна архитектура за Интернет на нещата е една от предпоставките за възникване на ИПТС. Възприемащия слой събира данни от околната среда. Оригиналните данни за трафика се предават на поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация. В поддържащия слой, с помощта на подходяща инфраструктура върху данните се извършва обработка и анализ на данните. Резултатите достигат до потребителя чрез приложния слой под формата на индикация за информация, задействане на пътна инфраструктура или дори задвижване на управляващи системи. Киберсигурността и управлението имат отношение към всеки от четирите слоя. ИПТС са една от подобластите на Интернет на нещата, в която се поставя акцент върху киберсигурността, тъй като тя е пряко свързана с физическата безопасност на потребителите.

Важен компонент, който предопределя свързаността и динамиката в ИПТС са автомобилните ad-hoc мрежи - VANET. Те са безжични мрежи, в които превозните средства комуникират на принципа равен-равен. Мрежовата архитектура е трислойна, състояща се от възприемащ, мрежов и приложен слой. Управлението и киберсигурността имат отношение към всяко от трите нива.

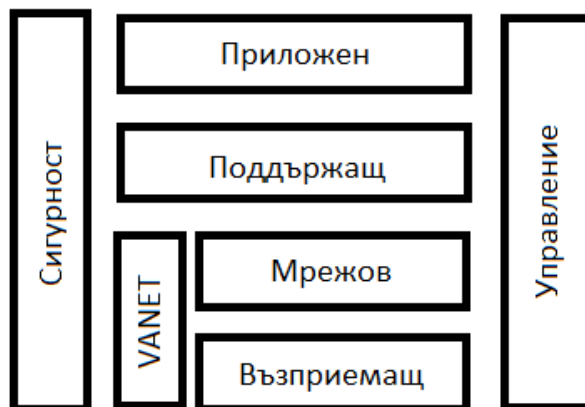
Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи в анализа и проектирането на Интелигентни пътни транспортни системи. Важна стъпка при изграждане на симулационен модел е изборът на симулатор и настройки на модела. Моделирането на шофьорските навици е компонент от симулационния модел, който изисква особено внимание, поради спецификите на маниера на шофиране в различните култури и необходимостта от въвеждането на реални данни за трафика.

След направения анализ на някои от често използваните симулатори на пътен трафик за по-нататъшните експерименти в дисертацията е избран симулатора със свободен достъп SUMO, поради неговата достъпност, модулност и богатият набор от възможности за въвеждане на входни и извеждането на изходни данни и възможността да бъдат моделирани навиците на шофьорите.

Навлизането на технологични решения променя конвенционални средства за управление на трафика като светофари и пътни знаци и налага нови технологии като свързани автоматизирани превозни средства и интелигентни светофари.

2.2 Архитектура на ИПТС

Предложена е четирислойна ИПТС архитектура, базирана на стандартната архитектура на Интернет на нещата (Фигура 7).



Фигура 7: ИПТС архитектура

Поради ключовата роля и многостранността на **VANET**, настоящата ИПТС архитектура разграничава отделен **VANET** слой, на нивото на мрежовия и възприемащия.

Слоят на възприемане на ИПТС събира данни от околния свят, взаимодействайки с потребителски устройства, сензори в превозни средства и инфраструктурни устройства. Детекторите, вградени в пътната настилка, като магнитометри, пневматични тръби, пиезоелектрични или индуктивни рамки, са надеждни и удобни. Недостатъкът при тях е усложнения монтаж, което ги прави и по-скъпи в сравнение със събирането на видео данни, инфрачервени, микровълнови, ултразвукови, акустични и лазерни детектори. Сензорното оборудване, инсталирано в автомобила, се използва основно за събиране на данни като скорост на превозното средство, ускорение, местоположение, посока на движение.

Мрежовият слой е сложна сплав от кабелни и безжични технологии. Той включва инфраструктурна мрежа и комуникационната мрежа в превозните средства. Мрежовият слой събира информация от възприемащия слой и предава данни към поддържащия.

Поддържащият слой в ИПТС извлича данни от мрежовия, обработва ги чрез средствата от областта на наука за данните и предоставя услуги на приложния слой. Обработката се извършва локално (в самото превозно средство, в крайпътни единици – Road Side Unit - RSU), във Fog или Cloud, в зависимост от техните времеви и пространствени специфики и съображения за сигурност.

Основната разлика между Fog и Cloud е, че Cloud включва външен доставчик на услуги, докато Fog е персонализирана разработка и напълно отговаря на изискванията за киберсигурност и работа в реално време. Edge отговаря за локалната обработка в случаи на необходимост от незабавна реакция. Повечето операции изискващи реакция в кратки срокове и твърда работа в реално време са свързани със безопасността на потребителите и се извършват локално, в превозното средство. В такива случаи операционната система за работа в реално време е важен фактор за успешно завършване на задачата в срок.

Приложен слой - повечето ИПТС приложения са свързани с повече от една услуга

на поддържащия слой. Пример за това са информационната система за състоянието на пътната инфраструктура, системата за предсказване на натовареността на трафика в реално време, системата за измерване на тегло в движение, интелигентни светофари, кооперативно автоматизирано шофиране, които засягат безопасността и ефективността. Глобалната навигационна система се отнася до ефективността и информираността.

Локалното автономно управление на автомобила е типична услуга от групата на безопасността, изискваща незабавна реакция с твърди изисквания за работа в реално време, която задължително се извършва локално в превозното средство.

Игри библиотеки, новинарски платформи, конференции, музика и филми са услуги от групата на информираността и забавлението, чието търсене все повече нараства с нарастване на нивото на автоматизация.

Киберсигурността има отношение към всеки един от четирите слоя на ИПТС.

Във *VANET* основното предизвикателство е осигуряване на анонимна автентификация. Една от най-бързо развиващите се технологии за анонимно удостоверяване, с която широко се експериментира е блокчейн. Друг отговор на въпроса за намаляване на ресурсите при анонимно удостоверяване са изчисленията във Fog. Запазването на уязвимата информация за идентичността на устройства и потребители близо до слоя на извличане би ограничило риска от атаки. Най-вероятно отговорът на въпроса с анонимната автентификация в мрежовия слой на ИПТС е в използването на няколко допълващи се технологии, например блум филтър като основен метод и черен списък и заявка към легитимната страна като спомагателни методи.

Във *възприемащия слой* са възможни проблеми при конфигуриране и инициализиране на устройства, поради използването на мобилни потребителски устройства и техника с общо предназначение.

Концепцията за Security-by-contract е обещаваща технология в този слой, тъй като предоставя възможност за конфигурируема стратегия за сигурност.

Най-сериозното предизвикателство пред киберсигурността в *мрежовия слой* на ИПТС е осигуряването на вътрешната за автомобила мрежа, тъй като голяма част от стандартите не са предназначени да функционират по свързан начин. Атаката на това ниво би могла да доведе до некоректно функциониране на превозното средство и да застраши физическата безопасност на пътниците. Налагането на стандарт за киберсигурност ще отнеме време. В преходния период конвенционалните методи за сигурност ще изиграят важна роля.

В *поддържащия слой* Fog структурите представляват най-големи предизвикателства за сигурността, тъй като са по-трудни за защита от централизирания облак. Съществуващите практики за сигурност и поверителност в облак не могат да бъдат приложени директно към изчисленията с Fog поради неговите характеристики, като мобилност, хетерогенност и географските мащаби.

В поддържащия слой на ИПТС приложение намират конвенционалните методи за сигурност като криптография и мрежово сегментиране, които обаче трябва да бъдат адаптирани към нуждите на системата.

Приложното ниво отразява крайното взаимодействие с потребителя, което може да се изрази в информация, предупреждение и дори активиране на определена система в

автомобила (в случай на автоматизирано управление). Данните в ИПТС отговарят на всички характеристики на Големи данни.

Поради комплексността на ИПТС приложния слой, тук е необходима интелигентна стратегия за сигурност. Изкуствен интелект, машинно обучение, онтологии и теория на игрите са инструменти, които са намерили приложение в решенията за киберсигурност в Интернет на нещата. Тяхното приложение и адаптиране към ИПТС трябва да бъдат подробно проучени.

Управлението на ИПТС е свързано с безпроблемното опериране на системата, налагането на международни и локални законодателство и стандарти и проследяването на тяхното изпълнение. В случаите на възникване на извънредна ситуация е необходимо осигуряване на динамично поддържане и безпроблемна работа. Този аспект на ИПТС обединява усилията на бизнеса, администрацията и местните власти, а също засяга информираност, образование и координация на процесите на глобално ниво.

2.2.8 Изводи

Предложена е четирислойна ИПТС архитектура, базирана на стандартната архитектура на Интернет на нещата. Тъй като автомобилните ad-hoc мрежи заемат централно място в концепцията за ИПТС е добавен VANET слой.

VANET са вид peer-to-peer мрежи, в които възлите (превозните средства) обменят кратки съобщения, които съдържат важна информация за превозните средства и околната среда. Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя и е основна предпоставка за възникване на технологични решения и нови стратегии за безопасност и ефективност на пътния трафик.

Възприемащия слой в ИТС, събира данни за хора, превозни средства, пътища и околната среда. Събраните данни се предават на поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация, където се обработват съобразно изискванията за киберсигурност и работа в реално време. Резултатите достигат до приложния слой под формата на индикация в автомобила или пътната инфраструктура, чрез мобилно устройство или дори задвижване на система в автомобила.

Дадени са примери за услуги на ИПТС поддържащ и приложен слой и връзките между тях. Основна характеристика на услугите на ИПТС поддържащия слой е мястото на извършване на изчисленията - Fog, Cloud или Edge. Услугите на приложния слой използват услуги от поддържащия слой, в зависимост от целите на приложенията (безопасност, ефективност, информираност и забавление).

Киберсигурността в ИПТС има пряко отношение към безопасността на участниците в движението и е ключов фактор за надеждното и безпроблемно функциониране на системата. Основните заплахи пред ИПТС киберсигурността е осигуряване на системи, които не са били предназначени да функционират по свързан и споделен начин, като вътрешната за автомобила мрежа и сензорни устройства, както и нови технологии, като Fog и VANET, които не са достатъчно зрели. За целите на ИПТС киберсигурността се експериментира с комбиниране на класически и иновативни подходи и често се заимстват техники, приложими в други IoT домейни.

2 Съдържание на дисертационния труд

Управлението на ИПТС е свързано с изработване на законодателство и стандарти и проследяване на тяхното изпълнение, както и осигуряване на безпроблемна работа на системата в извънредни ситуации по прозрачен за потребителя начин.

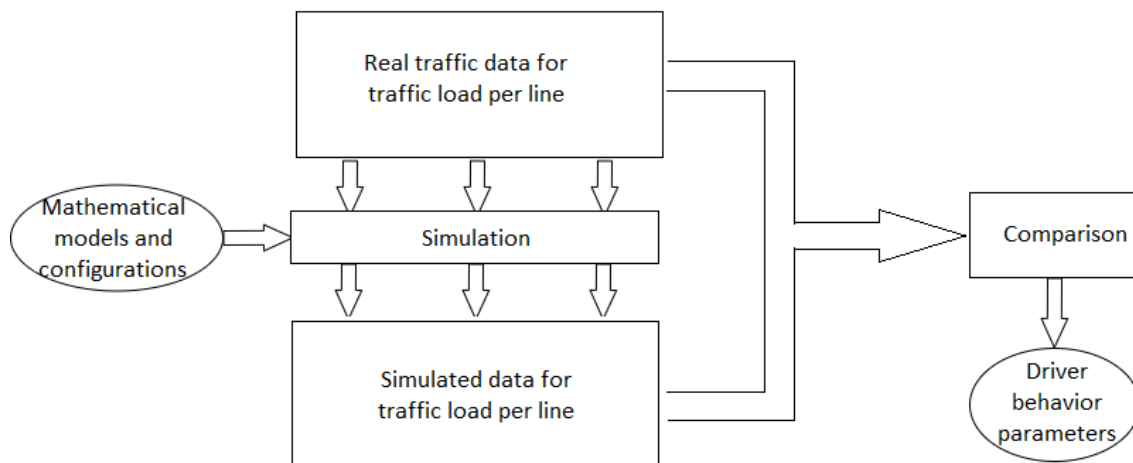
2.3 Моделиране на шофьорските навици в симулация на пътния трафик

Маниерът на шофиране може значително да повлияе на пропускателната способност на пътната мрежа, а в следствие и на мерките за оптимизиране на трафика. При изграждане на симулационни модели е важно да се вземе предвид начинът на шофиране в даден район. Шофьорските навици се представят от математически модели, които е необходимо да бъдат настроени чрез конфигурируеми параметри.

Предложена е методология, която избира математически модели и техните конфигурационни параметри, които най-добре отразяват навиците на шофиране на базата на входни данни за броя преминали превозни средства през дадена пътна лента.

В случаите, когато данните са зададени за много местоположения, математическите модели могат да изпитат затруднения и в резултат симулираните стойности да се отклонят от зададените. Предложената методология избира математически модели и техните параметри, като взема предвид средното отклонение между симулираните и зададени стойности.

Фигура 8 изобразява схема на методологията. Входните данни за симулатора са реални данни за броя преминали автомобили през дадена пътна лента. Задават се различни математически модели и техни конфигурационни параметри. Разминаването между симулираното и реалното натоварване се изчислява в проценти.



Фигура 8: Методология за намиране на параметри, моделиращи шофьорските навици

2.3.1 Реализация на методологията

Предложената реализация избира алгоритъм за маршрутизиране, car-following модел, и техните параметри, които най-точно отговарят на навиците на водача, като избира комбинацията с най-малкото отклонение между входните и симулираните стойности.

Входните данни за симулатора са: пътна карта, циклограми на светофарите и натоварванията на пътните линии в брой автомобили. Експериментира се с 4 car-following модела, 3 маршрутизиращи алгоритъма и техните параметри. Всеки вектор на декартовото произведение на възможните car-following модел, алгоритъм за маршрутизиране и техните параметри са вход за симулационен експеримент.

Например конфигурацията (Krauss, minGap=1m, tau=2m, Dijkstra, стъпка=10s) е входен вектор за симулация. Това означава, че симулацията използва car-following модел Krauss с минимално разстояние при спряно състояние - 1m и минимално разстояние при движение - 2m; Алгоритъм за маршрутизиране Dijkstra със стъпка на преизчисляване на маршрута - 10s. След изпълнение на симулацията, информацията за броя автомобили, преминали през всяка лента, се сравнява с входните данни. Несъответствието между тези две стойности в проценти се изчислява за всяка пътна лента. Средната стойност на несъответствията за определена симулация е метрика за валидността на конфигурацията. Счита се, че конфигурация с най-малко несъответствие отговаря най-добре на навиците на шофиране.

Частта от пътната мрежа в гр. Пловдив - между булевард „Руски“ (на изток), булевард „Освобождение“ (на запад), ул. „Гладстон“ и булевард „Княгиня Мария Луиза“ (на север) и „Булевард „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“ (на юг) е интегрирана в SUMO - фигура 9.



Фигура 9: Пътната мрежа между бул. „Руски“ - бул. „Освобождение“ - бул. „Кн. Мария Луиза“ - бул. „Христо Ботев“ и булевард „Санкт Петербург“

Данните за натоварването на трафика в експеримента се получават чрез виртуални детектори, изградени на базата на пътни камери, предоставени от Община Пловдив под формата на справки в Excel формат. Всеки отчет съдържа информация за броя превозни средства, навлезли в линията на дадено кръстовище на час.

Налични са отчети за 8 кръстовища за периода от 15 януари до 27 януари 2021 г. Формиран е разширен набор данни, като към основните отчети са добавени отчети за периода 19 февруари - 19 март 2021 г. за 3 от кръстовищата. С разширения набор данни

2 Съдържание на дисертационния труд

са извършени допълнителни експерименти.

Тъй като се наблюдава повтарящ се модел на трафика са обособени два набора от данни, съответстващи на работни и на почивни дни. Всеки набор от данни е групиран по часове. Средната стойност на всяка група е вход за пътна лента от симулацията.

Подготовката на входните данни и стартирането на симулациите са автоматизирани чрез няколко Python скрипта (налични на <https://github.com/tmecheva/SumoTD>)

2.3.2 Резултати

Изпълнени са общо 2766 симулации със стъпка на симулация по подразбиране - 1.

Изпълнени са всички 450 възможни симулации с различните конфигурации за *interval* *minGap* и *tau* за моделите Krauss и Wagner за почивни и работни дни в основния и разширен набор данни. Както се вижда от таблица 9 всички минимални стойности на разминаването се наблюдават при една и съща конфигурация - *interval=10 minGap=1.5 tau=0.25*, както в набора за работни, така и в набора за почивни дни в разширения и основен набор данни.

За да се намали броя на изпълнените симулации, за моделите Wiedemann и модифициран Krauss са фиксирани стойностите на *interval=10, minGap=1.5 u tau=0.25* и са изчерпани останалите съответно 108 и 375 конфигурации, както за работни, така и за почивни дни в основния и разширен набор данни.

Таблица 9 показва минималните разминавания между симулирани и зададени стойности при **основен набор данни**.

Table 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутиращ алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
Krauss	Работни дни	Dijkstra	150	150	<i>interval=10 minGap=1.5 tau=0.25</i>	4.113
		A-star	150	150	<i>interval=10 minGap=1.5 tau=0.25</i>	4.113
		Contraction hierarchies	150	150	<i>interval=10 minGap=1.5 tau=0.25</i>	4.113
Wagner	Работни дни	Dijkstra	150	150	<i>interval=10 minGap=1.5 tau=0.25</i>	4.231

Table 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.231
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.231
Wiedemann	Работни дни	Dijkstra	5400	36	security=1 es- tim=1	3.851
		A-star	5400	36	security=1 es- tim=1	3.851
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 es- tim=1	3.851
Модифициран Krauss	Работни дни	Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385
		A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	4.385
Krauss	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.525
Wagner	Почивни дни	Dijkstra	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770

2 Съдържание на дисертационния труд

Table 9: Резултати - основен набор данни

Car-following модел	Набор данни	Рутирац алгоритъм	Общ брой симулации	Брой изпълнени симулации	Конфигурация	Минимално разминаване, %
		A-star	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770
		Contraction hierarchies	150	150	interval=10 minGap=1.5 tau=0.25	4.770
Wiedemann	Почивни дни	Dijkstra	5400	36	security=1 es-tim=1	4.550
		A-star	5400	36	security=1 es-tim=1	4.550
		Contraction hierarchies	5400	36	security=1 es-tim=1	4.550
Модифициран Krauss	Почивни дни	Dijkstra	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070
		A-star	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070
		Contraction hierarchies	18750	125	accel=2.5 decc=4.3 sigma=0	5.070

Както се вижда от таблицата при основния набор минималното разминаване за всеки от car-following моделите не зависи от рутирация алгоритъм и се наблюдава при една и съща конфигурация както за работни, така и за почивни дни.

В работни дни най-добри резултати показва Wiedemann car-following модела, а в почивни дни - Krauss. Wiedemann car-following модела показва много добри резултати и в набора данни за почивни дни, близки до тези на Krauss.

При **разширения набор данни** се наблюдава повишаване на разминаването между симулираните и зададените стойности. Въпреки това конфигурациите, при които се наблюдават най-малките разминавания са същите като при основния набор данни. Изключение прави само модифицирания Krauss car-following модел, където в работни дни при Dijkstra и A-star рутирац алгоритъм, минималното разминаване се наблюдава при decc=4, вместо при 4.3.

За разлика от основния набор данни, при разширения, между минималните

разминавания при различните рутиращи алгоритми се наблюдават малки отклонения. В работни дни при Krauss, Wiedemann и модифициран Krauss най-добри резултати дава Contraction hierarchies, а при Wagner - Dijkstra. В почивни дни при Krauss и модифициран Krauss - A-star, при Wagner - Dijkstra, а при Wiedemann - Contraction hierarchies.

Най-добри резултати при разширения набор данни показва Wiedemann car-following модела, както за работни, така и за почивни дни.

2.3.3 Изводи

Предложена е методология за моделиране на шофьорските навици чрез настройване на симулатор за пътен трафик на базата на реални данни за броя преминали автомобили през дадена пътна лента. Реализацията на методологията изследва различни стойности на car-following модела, алгоритъма за маршрутизиране и техните параметри и изчислява разликата между броя зададени и броя симулирани автомобили и прави оценка за приложимостта на конфигурацията.

Изпълнените симулации показват, че рутиращият алгоритъм слабо влияе или не влияе на несъответствието между симулирани и задени стойности, докато стъпката на рутиране, car-following модела и допълнителните конфигурационни параметри отразяват поведението на шофьорите. В основния набор данни най-добри резултати за работни дни показва Wiedemann car-following модела, а за почивни дни - Krauss. В разширения набор данни най-добри резултати както за работни, така и за почивни дни показва Wiedemann car-following модела. Минималните разминавания при всички car-following модели се наблюдават при едни и същи конфигурации на допълнителните параметри на car-following модела и една и съща стъпка на рутиране.

На база на резултатите от изпълнените в тази глава симулации може да се заключи, че конфигурацията Wiedemann car-following модел с параметри $\text{minGap}=1.5$ $\text{tau}=0.25$ $\text{security}=1$ $\text{estimation}=1$, маршрутизиращ алгоритъм = Dijkstra, $\text{interval}=10$ отразява маниера на шофиране в град Пловдив.

2.4 Математическо моделиране на пътни мрежи

За изследване на пропускателната способност на пътни мрежа се предлага мрежово смятане (Network Calculus - NC). NC е математически инструмент, прилаган често в компютърните мрежи, при анализа на качество на услугата, чрез изследване на най-лошият възможен сценарий. Възможно е NC да се приложи в промишлеността, в управлението на проекти, както и в транспортните мрежи. То се основава на теория на системите, като събирането се заменя с изчисляване на минимума, а умножението - със събиране.

Една от най-често използваните операции в двете теории е конволюция. В мрежовото смятане, аналогично се дефинира min-plus конволюция. Други основни понятия в Network Calculus са виртуално закъснение, запас, крива на пристигане - R (описва входящия поток), крива на напускане - R^* (описва изходящия поток) и крива на обслужване β (описва механизъм за управление на трафика). Кривите на пристигане, обслужване и напускане са кумулативни, т.е. ненамаляващи във времето функции.

2.4.2 Експеримент

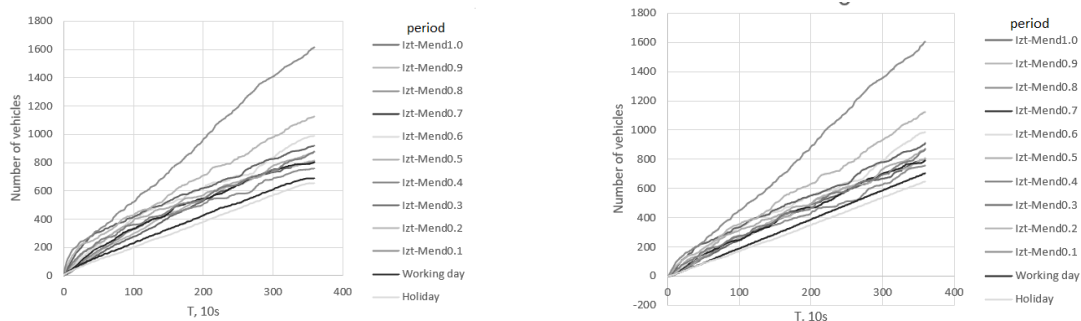
За да се докаже приложимостта на Network Calculus за анализа на пътния трафик са изследвани симулационно пътни мрежи с различна гранулярност. Изследвани са два участъка от пътната мрежа в град Пловдив - първият участък е изследваната в глава 2 пътна мрежа - фигура 9 (съдържа 8 големи кръстовища) и е разделен на 2 и на 4 части. Вторият участък (съдържа 4 кръстовища) разделен е на 2, на 3, и на 6 части, като най-малките съставни части са единично кръстовище и прав участък от булевард.

Съпоставени са Network Calculus метрики при синтетични и реални натоварвания. Изследвани са минимални криви на обслужване на база на зададени входни и изходни криви, максималното виртуално закъснение и максималния запас и криви на обслужване на съставни участъци на база на конкатенация на пътни мрежи.

Експериментът е реализиран чрез симулатора за градска мобилност SUMO и Python скриптове (<https://github.com/tmecheva/MinPlus>).

2.4.3 Резултати

За съпоставка на реалните и синтетични натоварвания са сравнени входните и изходните криви при различни синтетични натоварвания и максималните входни и изходни криви в работни и почивни дни, получени при реални натоварвания за кръстовището /бул. "Източен" - бул. "Менделеев" (фигура 21)



(a) Криви на пристигане

(b) Криви на напускане

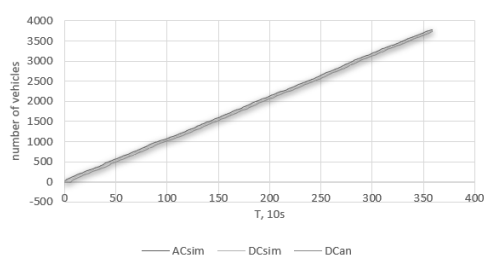
Фигура 21: Съпоставка на реални и синтетични данни - Изт.-Менд

Както се вижда от фигурите, максималните реални натоварвания за работни и почивни дни са под синтетичните.

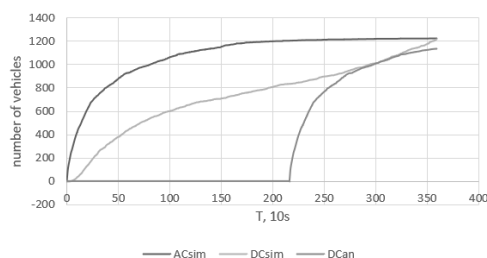
Намерени са криви на обслужване при различни натоварвания на база на входните и изходните криви от симулацията. За целта се намират полуаналитични изходни криви чрез Min-Plus конволюция на входните криви с криви на обслужване от типа RSPEC при максимално допустима скорост 13.8 m/s (50 km/h) и закъснения между 50 и 2500s. Избира се кривата на обслужване при дадено натоварване на пътната мрежа, която отговаря на най-близката до реалната полуаналитична крива на напускане и е по-малка от нея.

За оценка на приложимостта на метода е изчислено хоризонталното разстояние (виртуалното закъснение) между полуаналитичните и симулационни криви на напускане.

Фигура 22а представя графично кривите на пристигане и полуаналитичните и симулационни криви на напускане при натоварване с период 0.1 на единично кръстовище, а фигура 22b - на сложен участък от пътната мрежа.



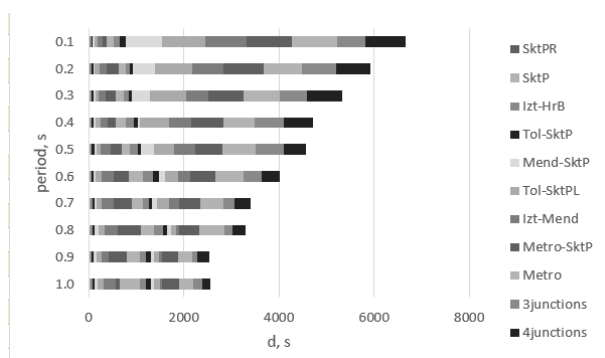
(a) Изт.-Хр.Б. - период 0.1



(b) Р.- Осв.,Кн.М.Л.-Хр.Б. - период 0.1

Фигура 22: Полуаналитични и симулационни криви на напускане и криви на пристигане

Фигура 23 представя графично осреднените виртуални закъснения между полуаналитичните и симулационни криви на напускане. При нарастване на сложността на мрежата виртуалното закъснение, тоест неточността, между аналитичните и симулационни криви нараства. Това проличава най-вече при големи натоварвания.



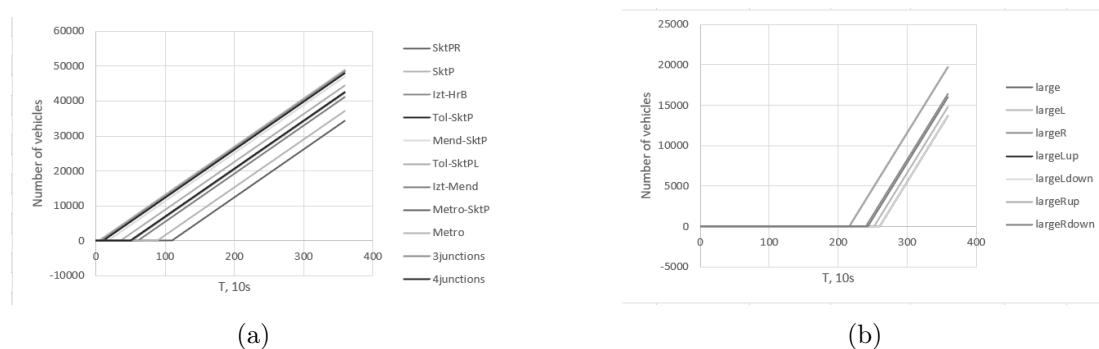
Фигура 23: Средни виртуални закъснения между полуаналитичните и симулационни криви на напускане

Кривите на обслужване на пътните мрежи са намерени като минимум от кривите на обслужване на даден участък при различни натоварвания. Фигура 27а изобразява намерените криви на обслужване на пътната мрежа от Фигура 9 и съставлящите я участъци, а фигура 27b - намерените минимални криви на обслужване на пътната мрежа съставена от 4 кръстовища и съставлящите я участъци при синтетични натоварвания.

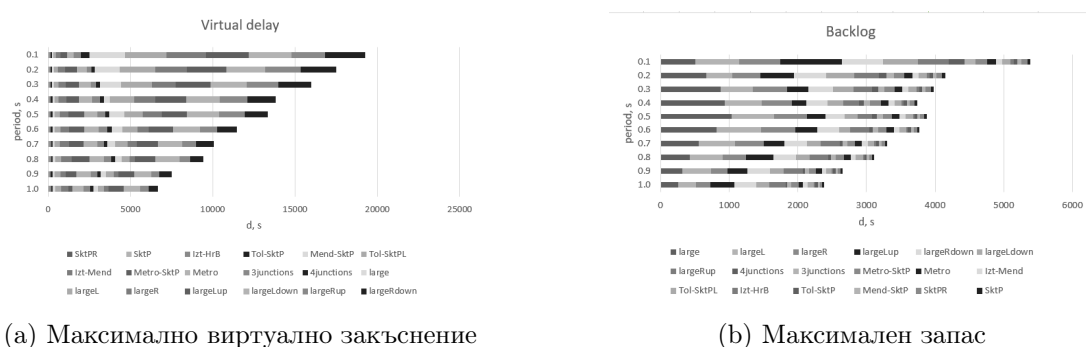
Както се вижда от графиката началните отмествания при по-сложните пътни мрежи са по-големи.

Виртуалното закъснение и запаса на всяка от пътните мрежи са изчислени на база на кривите на пристигане и напускане. Фигура 31 представя максималното виртуално закъснение и максималния запас при синтетични натоварвания.

2 Съдържание на дисертационния труд



Фигура 27: Минимални криви на обслужване - синтетични данни



(a) Максимално виртуално закъснение

(b) Максимален запас

Фигура 31: Максимално виртуално закъснение и максимален запас - синтетични натоварвания

Максималното виртуално закъснение нараства с нарастване на натоварването и с нарастване на сложността на мрежата.

При конкатенация на възли се намират криви на обслужване на съставни части от мрежата чрез *min-plus* конволюция на кривите на обслужване на съставлящите ги части. Използват се вече установените криви на обслужване от предходната точка.

За да се оцени валидността на получените резултати се сравняват полуаналитичната и симулационна крива на напускане на съставния участък. Полуаналитичната крива на напускане се получава чрез *min-plus* конволюция на криви на пристигане и интегрални криви на обслужване.

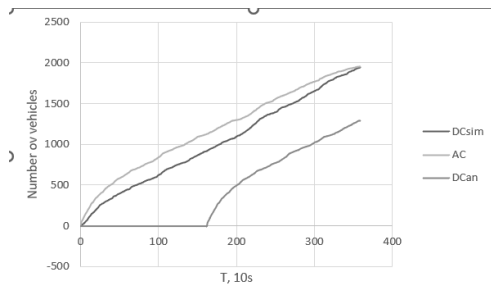
За оценка на приложимостта на метода са анализирани графични резултати са изчислени виртуалното закъснение и грешката между двете криви.

За грешка се считат случаите, в които полуаналитичната крива за даден момент от време е по-голяма от симулационната. Изчислена е процентната грешка - като разликата между двете величини, отнесена към стойността от симулацията.

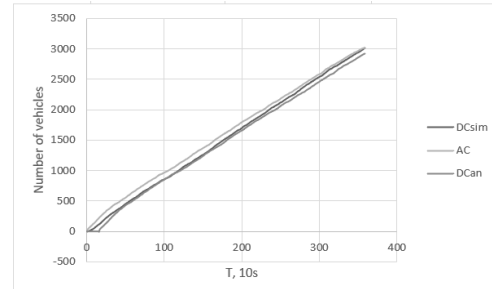
Фигура 33 представя криви на обслужване на съставна пътна мрежа, и криви на обслужване на съставлящите я кръстовища.

Фигура 34 и представя грешката и виртуалното закъснение между полуаналитичните и симулационни криви на напускане при конкатенация на възли.

Както се вижда от графичните и таблични резултати методът е приложим за малки

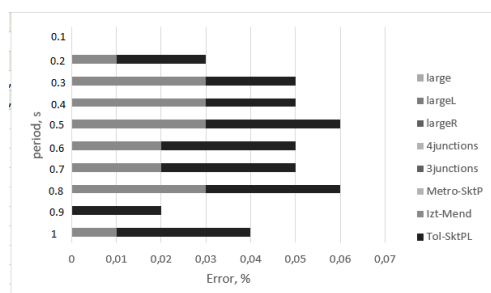


(a) Зкръстовица \otimes Метро+ = 4кръстовица

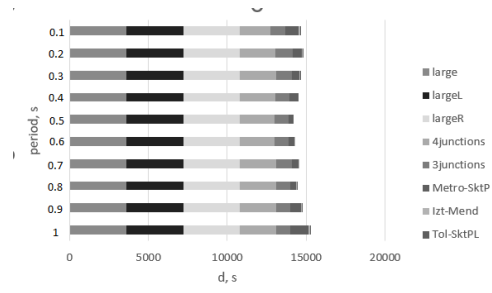


(b) С.Пет.-ляво \otimes Тол.-С.Пет.=Тол.-С.Пет.+

Фигура 33: Полуаналитични и симулационни криви на напускане при конкатенация на възли



(a) Грешка



(b) Виртуално закъснение

Фигура 34: Грешка и виртуално закъснение между полуаналитична и симулационна крива на напускане при конкатенация на пътни мрежи

2 Съдържание на дисертационния труд

участъци от пътната мрежа - наблюдава се средно виртуално закъснение между 12 и 99 секунди и грешка не по-голяма от 0.03%.

При нарастване на сложността на мрежата се увеличава виртуалното закъснение между полуаналитичните и симулационните криви на напускане, като за мрежите от фигура 9 методът се оказва неприложим.

2.4.4 Изводи

Изследвана е приложимостта на мрежовото смятане за анализа на пътни мрежи, като са разгледани основни метрики на мрежовото смятане, получени от симулации на пътния трафик на база на реални и синтетични входни данни.

Сравнението между реалните и синтетични данни показва, че изследваните реалните натоварвания са по-малки от синтетичните т.е. NS метриците биха дали достоверен резултат, тъй като Network Calculus цели да изследва най-лошия възможен сценарий.

Анализирани са криви на обслужване от типа RSPEC при максимално допустима скорост 13.8 m/s и закъснения между 50 и 2500s при различни натоварвания на база на входни и изходни криви от симулацията. За оценка на приложимостта на метода са анализирани графичните резултати за полуаналитичните и симулационни изходни криви на напускане, както и хоризонталното разстояние (виртуалното закъснение) между тях. За крива на обслужване на дадена участък се избира минимумът от всички криви на обслужване.

Анализът на графичните и таблични резултати показва, че при прости участъци от пътната мрежа (единични кръстовища, единични отсечки от булевард) се наблюдава средно виртуално закъснение до 60s, като изключение прави само кръговото кръстовище, при което виртуалното закъснение е по-голямо. При нарастване на сложността на мрежата виртуалното закъснение нараства, като за пътните мрежи от фигура 9 достига стойности до 960 s.

Резултатите показват, че при нарастване на натоварването и сложността на мрежата максималните стойности на виртуалното закъснение и запаса нарастват. Те са изчислени от кривите на пристигане и напускане без да се използват апроксимации, това ги прави приложими за пътни мрежи с различна гранулярност.

Намерени са криви на обслужване на съставни участъци от пътната мрежа чрез min-plus конволюция на кривите на обслужване на съставлящите ги части. За оценка на приложимостта на метода са анализирани графични резултати и са изчислени виртуалното закъснение и грешката между двете криви.

Анализът на графичните и таблични резултати показва, че при конкатениране на прости участъци от пътната мрежа (единични кръстовища, единични отсечки от булевард) се наблюдава грешка до 0.03% и средно виртуално закъснение под 100s, при нарастване на сложността на мрежата виртуалното закъснение нараства, като за пътните мрежи от фигура 9 достига стойности до 3600 s.

2.5 Методи за оптимизиране на пътния трафик

Както беше посочено в точка 1, една от важните цели на ИПТС, която има отражение върху безопасността и доброто потребителско изживяване е ефективното управление на пътните потоци.

За оценка са използвани максималното виртуално закъснение и максималният запас, тъй като, както беше установено в глава 2.4, те са приложими за пътни мрежи с различна гранулярност.

Глава 2.5 изследва ефективността на два метода за управление на пътните потоци - оптимизиране на светофарни цикли и автоматизирано шофиране.

2.5.1 Експеримент

Проведени са симулационни експерименти с пътната мрежа от фигура 9 и съставлящите я части.

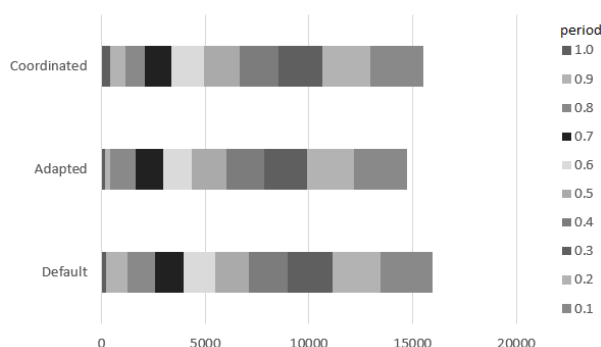
За изследване влиянието на оптимизираните светофарни цикли според натоварването е съпоставена пропускателната способност на пътните мрежи със светофарни цикли по подразбиране, с адаптирани и координирани светофарни цикли при различни натоварвания.

За изследване влиянието на безпилотното шофиране е съпоставена пропускателната способност на пътната мрежа при различни съотношения между автоматизирани и конвенционални превозни средства за различни натоварвания на пътната мрежа.

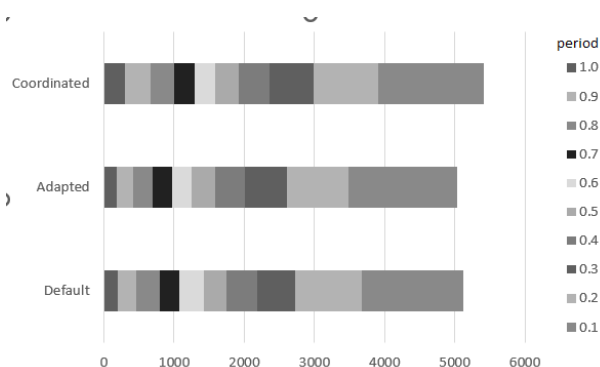
Експериментът е реализиран чрез симулатора за градска мобилност SUMO и Python скриптове (<https://github.com/tmecheva/MinPlus>).

2.5.2 Резултати

Фигури 35 и 36 показват максимално виртуално закъснение и максималният запас с **оптимизирани светофарни цикли** при различни натоварвания на трафика за една от изследваните сложни пътни мрежи.



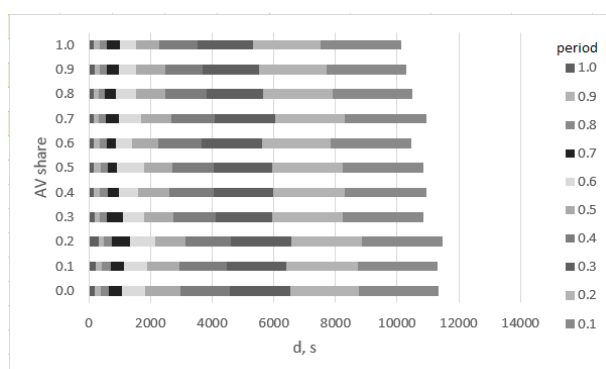
Фигура 35: Максимално виртуално закъснение - оптимизирани светофарни цикли



Фигура 36: Максимален запас - оптимизирани светофарни цикли

Най-ниските стойности на максималното виртуално закъснение и на максималния запас се наблюдават при адаптирани светофарни цикли.

Фигури 37 и 38 показват максимално виртуално закъснение и максималният запас при различни съотношения на автономни и конвенционални автомобили при различни натоварвания за една от изследваните съставни пътни мрежи.

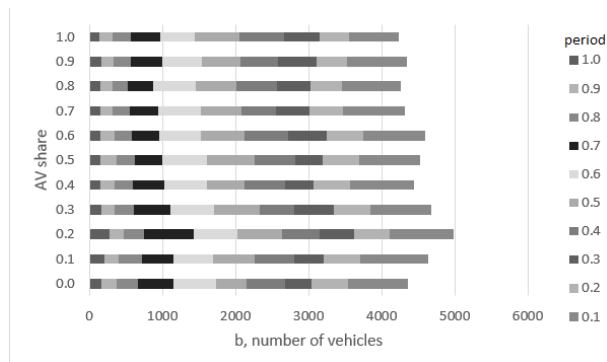


Фигура 37: Максимално виртуално закъснение - безпилотни автомобили

При някои съотношения между автономни и конвенционални автомобили максималното виртуалното закъснение и максималния запас нарастват, като най-високите стойности се наблюдават при различни съотношения в различните мрежи. Въпреки това се наблюдава тенденция за намаляване на максималното виртуалното закъснение и максималния запас при нарастване на дела на автономните автомобили.

2.5.3 Изводи

Изследвани са методи за подобряване на пропускателната способност на пътната мрежа чрез симулационен и математически анализ.



Фигура 38: Максимален запас - безпилотни автомобили

Съпоставено е влиянието на безпилотни превозни средства и оптимизирани светофари над пропускателната способност на пътни мрежи в централната част на град Пловдив с различна гранулярност чрез симулатора за градска мобилност SUMO. За оценка на пропускателната способност е използван математическият апарат Network Calculus - съпоставени са максималното виртуално закъснение и максималният запас.

От проведените експерименти може да се заключи, че адаптираните светофари и автономните превозни средства биха повишили пропускателната способност на пътната мрежа.

2.6 Изводи

Нарастващата нужда от мобилност, урбанизацията, развитието на системите за работа в реално време, наложилата се широко четирислойна архитектура на Интернет на нещата и автомобилните ad-hoc мрежи (VANET) очертават характера на интелигентните пътни транспортни системи.

Предложена е четирислойна ИПТС архитектура, базирана на стандартната архитектура на Интернет на нещата, в която е добавен VANET слой.

Свързаността и динамиката в ИПТС се дължат в голяма степен на VANET - вид ree-to-ree мрежи, в които възлите обменят кратки съобщения, които съдържат информация за превозните средства и околната среда. Сливането на тази информация в реално време създава нова перспектива за ситуацията на пътя и е основна предпоставка за възникване на технологични решения и нови стратегии за безопасност и ефективност на пътния трафик.

Възприемащия слой в ИПТС, събира данни за хора, превозни средства, пътища и околната среда. Събраните данни достигат до поддържащия слой, чрез жична или безжична комуникация. Данните се обработват във Fog, Cloud или Edge според изискванията за сигурност, бързодействие и работа в реално време. Приложния слой изпраща индикация на потребителите чрез бордовото устройство в автомобила, пътната инфраструктура, мобилно устройство или задвижване на система в автомобила. Основната характеристика на услугите на ИПТС поддържащия слой са свързани и целите на приложенията (безопасност, ефективност, информираност и забавление).

Киберсигурността в ИПТС има пряко отношение към безопасността на участниците

в движението и е ключов фактор за надеждното и безпроблемно функциониране на системата. Основните заплахи пред ИПТС киберсигурността са осигуряване на системи, които не са били предназначени да функционират по свързан и споделен начин като вътрешната за автомобилна мрежа и сензорни устройства, както и нови технологии, като Fog и VANET, които не са достатъчно зрели. За целите на ИПТС киберсигурността се експериментира с комбиниране на класически и иновативни подходи и често се заимстват техники, приложими в други IoT домейни.

Управлението на ИПТС е свързано с изработване на законодателство и стандарти и проследяване на тяхното изпълнение, както и осигуряване на безпроблемна работа на системата в извънредни ситуации по прозрачен за потребителя начин.

По отношение на цялостната архитектура е необходимо в бъдеще да се наложат устойчиви политики и стандарти за киберсигурност. Масовото прилагане на някои решения като автоматизираното шофиране зависи от изработването на законова рамка. Друг фактор, който би отложил прилагането на някои иновации, е нуждата от период, в който да се изгради доверие у потребителите.

Математическо и симулационно моделиране са най-често използваните методи при анализ и проектиране на ИПТС.

Важна стъпка при изграждане на симулационен модел е изборът на симулатор и параметри на математическите модели. На база на сравнителен анализ на популярни средства за симулиране на пътен трафик е избран симулатора за градска мобилност SUMO (Simulation of Urban MObility) за целите на експериментите в дисертацията.

Моделирането на шофьорските навици е компонент от симулационния модел, който изисква особено внимание, поради спецификите на маниера на шофиране в различните култури и необходимостта от въвеждането на реални данни за трафика.

Предложена е методология за моделиране на шофьорските навици чрез настройване на симулатор за пътен трафик на базата на реални данни за броя преминали автомобили през пътните ленти. Реализацията на методологията на SUMO и Python изследва различни стойности на car-following модела, алгоритъма за маршрутизиране и техните параметри и избира конфигурацията, която моделира маниера на шофиране в град Пловдив.

Възможна насока за бъдеща работа е по-задълбочено изследване на маниера на шофиране в град Пловдив : реализацията на методологията може да се детайлизира с добавяне на модел за смяна на пътната лента (line-change model); да се изследват други car-following модели; или да се приложат техники за машинно обучение за постигане на по-прецизен резултат.

Настоящата реализация на методологията би могла да се използва за практическа съпоставка на работата на SUMO и друг симулатор за пътен трафик, например MovSim.

Изследвана е приложимостта на *математическия апарат Network Calculus* в анализа на пътни мрежи с различна гранулярност. Анализирани са основни метрики на мрежовото смятане, получени от симулационни резултати на база на реални и синтетични входни данни.

Резултатите от анализа показват, че максималното виртуално закъснение и максималния запас са приложими, както за малки, така и за големи участъци от пътната

мрежа, докато кривите на обслужване от типа RSPEC, намерени на база входни и изходни криви или конкатенация на възли, са приложими само за малки участъци от пътната мрежа.

В бъдеще експериментът може да бъде разширен с изследване на друг тип обслужващи криви, приложими за сложни участъци от пътната мрежа. Друга възможност за разширяване на това изследване е да се приложи концепцията за диференцирани услуги (differentiated services).

Навлизането на технологични решения променя конвенционални средства за управление на трафика като светофари и пътни знаци и налага нови технологии като свързани автоматизирани превозни средства и интелигентни светофари.

Изследвано е *влиянieto на безпилотни превозни средства и оптимизирани светофари* над пропускателната способност на пътни мрежи чрез симулация на SUMO и Network Calculus анализ. Съпоставени са максималното виртуално закъснение и максималният запас. Проведените експерименти показват, че адаптираните светофарни цикли и автономните автомобили повишават пропускателната способност на пътната мрежа.

Един от важните показатели за влиянието на пътния трафик над качеството на въздуха са вредните емисии. Интересна насока за бъдещо развитие е съпоставянето на реални данни за качеството на въздуха в града с данни от симулацията. Реализацията на експеримента може да се използва също и за изследване влиянието на електрически автомобили над качеството на въздуха.

3 Приноси

Изследванията в настоящия дисертационен труд могат да се обобщят в следните научни и научно-приложни резултати:

Научни:

- Предложена е архитектура за интелигентна пътна транспортна система.
- Предложен е аналитичен модел за анализ на транспортни мрежи с различна гранулярност.
- Предложена е методология за намиране на параметри, описващи шофьорските навици на база на реални данни за трафика.

Приложни:

- Реализиран е метод за намиране на параметри, описващи шофьорските навици на базата на реални данни за част от пътната мрежа в централна част на град Пловдив.
- Намерени са параметри, описващи маниера на шофиране в град Пловдив.
- Направена е оценка на ефективността на два метода за оптимизация на пътния трафик, чрез математически и симулационен анализ.

4 Списък на публикации по дисертационния труд

- P1 Mecheva, T., & Kakanakov, N. (2020). Cybersecurity in intelligent transportation systems. *Computers*, 9(4), 83.
- P2 Mecheva, T., & Kakanakov, N. (2021, September). Cloud based Intelligent Transportation System architecture. In *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)* (pp. 385-388). IEEE.
- P3 Mecheva, T. A., & Kakanakov, N. R. (2021, September). Traffic flow model based on real data. In *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)* (pp. 1-5). IEEE.
- P4 Mecheva, T. (2022, September). Outlier detection in traffic data set. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2449, No. 1, p. 040014). AIP Publishing LLC.
- P5 Mecheva, T., Furnadzhiev, R., & Kakanakov, N. (2022). Modelling driver behaviour in road traffic simulation. *Sensors*, 22(24), 9801.

5 Списък с цитирания по дисертационния труд

P1

- [1] El-hacen Diallo, Omar Dib, and Khaldoun Al Agha. “A scalable blockchain-based scheme for traffic-related data sharing in VANETs”. In: *Blockchain: Research and Applications 3.3* (2022), p. 100087.
- [2] El-hacen Diallo, Omar Dib, and Khaldoun Al Agha. “Blockchain: Research and Applications”. In: ().
- [3] Lina Elmoiz Alatabani et al. “Deep and Reinforcement Learning Technologies on Internet of Vehicle (IoV) Applications: Current Issues and Future Trends”. In: *Journal of Advanced Transportation 2022* (2022).
- [4] Asif M Huq, Moti Zwilling, and Kenneth Carling. “Cyber Security Challenges and Opportunities in a Multi-Agent Environment: The case of Swedish Transport Administration”. In: (2022).
- [5] Shah Khalid Khan, Nirajan Shiwakoti, and Peter Stasinopoulos. “A conceptual system dynamics model for cybersecurity assessment of connected and autonomous vehicles”. In: *Accident Analysis & Prevention* 165 (2022), p. 106515.
- [6] Shah Khalid Khan et al. “Security assessment in Vehicle-to-Everything communications with the integration of 5G and 6G networks”. In: *2021 International Symposium on Computer Science and Intelligent Controls (ISCSIC)*. IEEE. 2021, pp. 154–158.
- [8] Tong Liu et al. “Artificial intelligence-enabled DDoS detection for blockchain-based smart transport systems”. In: *Sensors* 22.1 (2022), p. 32.
- [9] Abdul Cader Mohamed Nafrees, Ameer Mohamed Aslam Sujah, and Cmm Mansoor. “Smart Cities: Emerging technologies and Potential solutions to the Cyber security threads”. In: *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*. IEEE. 2021, pp. 220–228.
- [10] Mohinder Pandey et al. “A review of factors impacting Cybersecurity in Connected and Autonomous Vehicles (CAVs)”. In: *2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. Vol. 1. IEEE. 2022, pp. 1218–1224.
- [11] Konstantinos Sadrazamis. “MITRE ATT&CK-based analysis of cyber-attacks in intelligent transportation”. In: (2022).
- [12] Cybersécurité des Systèmes de Transports. “Master 2020”. In: ().
- [13] Wayes Tushar et al. “A Survey of Cyber-Physical Systems From a Game-Theoretic Perspective”. In: *IEEE Access* 11 (2023), pp. 9799–9834.
- [14] Yibing Xie, Alessandro Gardi, and Roberto Sabatini. “Cybersecurity Trends in Low-Altitude Air Traffic Management”. In: *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE. 2022, pp. 1–9.

- [15] Shalini Yadav and Rahul Rishi. “An Optimal Security Framework Based on Driver Authentication for Intelligent Transportation Systems”. In: *LOGI–Scientific Journal on Transport and Logistics* 14.1 (2023), pp. 24–34.
- [16] Haiyue Yuan and Shujun Li. “Cyber Security Risks of Net Zero Technologies”. In: *2022 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)*. IEEE. 2022, pp. 1–11.
- [17] Дмитрий Вадимович Завьялов. “РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ”. In: *ТРАНСФОРМАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ: УРОКИ ПАНДЕМИИ*. 2021, pp. 310–317.

P2

- [7] Stefan N Lishev et al. “Mobile Low-cost Air Pollution Data Logger”. In: *2022 XXXI International Scientific Conference Electronics (ET)*. IEEE. 2022, pp. 1–4.

Methods and means for Intelligent Road Transport System implementation

Engineer Teodora Mecheva

Demographic, social and cultural changes and the technological progress predetermine the emergence of Intelligent Road Transport System (IRTS). IRTS can be considered as an Internet of Things sub-domain. The technological foundations of IRTS are IoT, real-time control systems and vehicle ad-hoc networks (VANET). In the analysis and design processes mathematical and simulation methods are applied.

The objectives of the present work are the study of the methods and means of implementing an Intelligent Road Transport System, the opportunities for transferring concepts for analysis and design, and the applicability of technologies for achieving efficient traffic.

In the **literature review** (chapter 1) the main technological prerequisites that represent the foundation of IRTS, methods of analysis and design, simulation capabilities with focus on driving habits, opportunities for mathematical modelling, and main trends in road traffic flow management are examined. The road traffic simulator - SUMO - is selected for the purpose of the experiments by comparative analysis.

In **chapter 2** a four layer IRTS architecture based on the standard Internet of Things design in which VANET and cybersecurity play central role is proposed. Real time data fusion in floating vehicles creates a new perspective which emerge technological solutions and new strategies for safety and efficiency. Most of the IRTS applications have very high cybersecurity requirements combined with hard real time constrains. The imposition of standards for a comprehensive architecture, as well as specific security standards, is one of the key steps in the IRTS architecture evolution.

In **chapter 3** methodology for modelling driving habits in road traffic simulation, based on real data for the traffic load is proposed. The methodology is implemented on SUMO and Python. After analysing the simulation results, a car-following model, routing algorithm and their parameters that model the manner of driving in the city of Plovdiv are chosen.

In **chapter 4** the applicability of the mathematical apparatus Network Calculus in the analysis of road networks is examined. Based on the conducted experiments, it is concluded that the maximum virtual delay and the maximum backlog are applicable in the analysis of road networks with different granularity, while RSPEC service curves are applicable only when small sections of the road network are analysed.

In **chapter 5** the effectiveness of two methods for improving road throughput - autonomous vehicles and optimised traffic light cycles - by comparing maximum virtual delay and maximum backlog is investigated. Based on the conducted experiments is concluded that adapted traffic light cycles and autonomous vehicles would increase road throughput.