

АПСТРАКТ

Повторливите, а исто така и неповторливите задушувања на автопатиштата стануваат општа карактеристика која води до доцнења, намалена безбедност во сообраќајот, зголемена потрошувачка на гориво и сериозно аеро загадување. Таквите задушувања ја ограничуваат пропусната моќ на автопатот во времето од денот кога автопатот најмногу се користи, т.е. за време на врвниот час. Ова задушување станува уште покритично во случаите на неповторливи задушувања. Градењето на повеќе автопатишта повторно би водело кон тоа патната инфраструктура да остане неискористена. Но, врз сообраќајниот ток на автопатот може позитивно да се влијае со помош на бројни интелегентни транспортни техники. Во таа смисла, оваа докторска дисертација придонесува во насока на пополнување на една битна празнина во нашиот сообраќаен систем, а тоа е вклучувањето на информатичките технологии во сообраќајниот систем, поточно, со помош на методологии од информатичките технологии, односно вештачката интелигенција се изведе научно темелно истражување за **развој на стратегија за контрола на пристап кон автопат** и управување со сообраќајни коридори.

Примери на системи за контрола на пристап на автопат има голем број. АЛИНЕА е првата контролна стратегија на локално ниво која се базира врз директна примена на класичната теорија на управување со повратна врска. Останатите напори вклучуваат генетички фази пристап, вештачки невронски мрежи и двенивовски пристап за контрола на автопат.

Сите досега постоечки алгоритми за контрола на пристап на автопат, иако одговараат на сообраќајните потреби, не се рално адаптивни на промената на условите на одвивање на сообраќајот.

Најголемиот број од применетите системи за контрола на пристап на автопат се од типот на локални регулатори и ни еден од нив не е вистински адаптивен. „Адаптивен“, во овој контекст и спротивно на општото недоразбирање во литературата, значи повеќе од тоа да дава одговор на сообраќајот во реално време. Тоа значи дека контролната политика самата се менува како одговор на промените во инхерентните системски карактеристики. Со други зборови, со цел да биде адаптивен, системот мора да биде способен самиот постојано да учи.

Во оваа дисертација се отиде чекор натаму и се користи адаптивна контролна стратегија каде што не постои претходно дефинирано ниво на густина

на сообраќај што треба да се одржува, туку самата контролна стратегија учи како да го минимизира вкупното време поминато во системот. Уште повеќе, самите агенти постојано учат и се адаптираат на промените во околината според потребите.

ПРЕДМЕТОТ НА ИСТРАЖУВАЊЕ на оваа докторска дисертација е **истражување и проектирање на стратегија за оптимална адаптивна светлосна сигнална контрола на пристап на автопат.**

ТЕОРЕТСКА ЦЕЛ е врз основа на проектирана оптимална адаптивна стратегија за контрола на пристап на автопат да се постигне **намалување на вкупното време на патување на коридорот.**

ГЛАВНАТА ХИПОТЕЗА е: **контролата за пристап на автопат, користејќи техника на вештачка интелигенција, може да биде целосно адаптивна оптимална контролна стратегија со затворена јамка којашто го минимизира вкупното време на патување на коридорот.**

Со цел да се докаже главната хипотеза, користена е теоријата на автоматско управување. **Методологијата** за примена на оптимална контрола е техниката на вештачка интелигенција, позната како принудно учење со повеќе агенти. Се користи Q - учење алгоритмот. Спроведено е научно истражување со помош на VISSIM микросимулаторот, при што се користеше директно програмирање на функции во симулаторот, со цел да се примени техниката на принудно учење со повеќе агенти.

Во зависност од параметрите на одвивање на сообраќајот, поставените неколку сценарија за тестирање на контролната стратегија се поделени во две фази:

- прва фаза – координирана контрола каде мерењата на параметрите се на излезот од автопатот, со позната побарувачка на сообраќај
- втора фаза – координирана контрола каде мерењата се низводно од секој пристап на автопатот, со непозната побарувачка на сообраќај.

Со цел да се оцени изводливоста на предложената стратегија за оптимална адаптивна координирана контрола на пристап на автопат, резултатите од агентите кои учат се споредени со резултатите од случајот *без контрола* и со *АЛИНЕА контролата*, која претставува нашироко применувана контролна стратегија која се користи како регулатор.

Резултатите добиени од симулациите без користење на контрола на пристап се избрани како основен случај и останатите резултати се проценуваат во однос на него. Тестирањето се изведува после доволен број на итерации со различни вредности на состојбите и после конвергирањето на Q-вредностите.

Стратегијата за оптимална адаптивна координирана контрола на пристап кон автопат користи т.н. пристап на табела на прегледување.

Со тестирањето во **првата фаза** (координирана контрола на пристап, мерења на излезот од коридорот, позната побарувачка на сообраќај), забележани се заштеди во времето на патување (до 14.5%), намалување на доцнењето (26 %), намалување на средното време на мирување по возило (37 %), намалување на средниот број на застанувања по возило (35 %) и зголемување на бројот на возила кои излегуваат од мрежата (14 %).

Меѓутоа, се утврди дека ваквиот начин на примена на контролната стратегија бара подолготрајна фаза на учење на агентите, што ја прави стратегијата недоволно ефикасна.

Заради тоа, се премина на примена на *локализирана контрола на пристап кон автопатот*, каде параметрите на одвивање на сообраќајот се мерени на главниот ток на автопатот низводно од секој пристап (**втора фаза на тестирање**).

Во текот на оваа фаза извршени се два вида тестирање: 1. тестирање со податоци каде нема сообраќајно задушување, 2. тестирање со податоци каде постои сообраќајно задушување на коридорот. Тестирањето во оваа фаза е извршено врз непозната побарувачка на сообраќај.

1. При тестирањето со податоци каде нема сообраќајно задушување, се забележува дека:
 - Значителни подобрувања има кај доцнењето (намалување за 30%), на средното време на мирување по возило (78%) и на средниот број на застанувања по возило (80%) што покажува дека сообраќајот се одвива поглатко без многу застои.
 - после подолготрајно патување, намалувањето на времето на патување и доцнењето е евидентно, и тоа, значителна разлика има после еден час патување;
 - но, времето на патување (намалено за 3.29%), бројот на возила коишто излегуваат од коридорот (зголемен за 3%) и брзината на патување (зголемена за 0.33%) имаат мало подобрување.

- Се забележува дека стратегијата ги следи промените во параметрите на сообраќајот во реално време, особено при преминување од состојба на задушување кон нормално одвивање на сообраќајот.

Со помош на АЛИНЕА се добиваат резултати коишто за истите мерки на ефикасност се слични и нешто подобри од резултатите добиени со помош на контролата со предлог стратегијата. Тоа се објаснува со фактот што на коридорот не постои повторливо задушување, што ја прави предлог стратегијата инфериорна пред АЛИНЕА.

Но, резултатите добиени со АЛИНЕА не се многу ветувачки во поглед на заштедите во времето на патување, брзината на патување и бројот на возила кои излегуваат од коридорот (важно заради фактот што за АЛИНЕА стратегијата се извршени нагодувања на параметрите за конкретниот автопат и соодветната сообраќајна побарувачка, додека за предложената стратегија за координирана контрола, тестирањето е извршено врз непозната сообраќајна побарувачка). Тоа значи дека и за случај каде не постои сообраќајно задушување, предложената стратегија може да се примени, со тоа што претходно прво би се извршило учење со слична побарувачка на сообраќај.

2. Во текот на втората фаза (со податоци каде постои сообраќајно задушување на коридорот), **стратегијата која користи Q-учење покажа исклучително добри резултати после релативно мал број итерации (околу 1500) врз непозната побарувачка на сообраќај:**

- Намалување на времето на патување (15%), на доцнењето (26%), на средното време на мирување по возило (38%), на средниот број на застанувања по возило (35%), зголемување на бројот на возила кои излегуваат од мрежата (10%), на брзината на патување (9.85%) .
Подобрувањата се речиси двојно поголеми споредени со истите мерки на ефикасност со примена на АЛИНЕА (8.41%, 13%, 20%, 19%, 6.22%, 3.55%, соодветно).

Стратегијата добро се прилагодува на условите на одвивање на сообраќајот, односно е адаптивна и во реално време одговара на потребите на сообраќајот, со што се потврдува и главната хипотеза на истражувањето на оваа докторска дисертација.

Најголемо подобрување има кај случајот на примена на контрола кај сообраќајна побарувачка која не предизвикува сообраќајно задушување (за средното време на мирување/возило и за средниот број на застанувања/возило)

Во поглед на сите мерки на ефикасност на стратегијата, најдобри резултати постигнува контролната стратегија кога се применува кај непозната побарувачка на сообраќај која предизвикува сообраќајно задушување. Со тоа се докажува дека предложената стратегија е изводлива за координирана контрола на пристапите кон автопатот, која е оптимална, адаптивна и одговара на побарувачката во реално време.

При тестирањето со податоци каде постои сообраќајно задушување на коридорот, стратегијата која користи Q-учење покажа исклучително добри резултати, после релативно мал број на итерации и тоа врз непозната побарувачка на сообраќај, што ја докажува нејзината изводливост и ефикасност.

Координираната контрола со помош на предлог стратегијата е подобра од АЛИНЕА во поглед на средното време на мирување по возило и средниот број на застанувања по возило во текот на набљудуваниот период, што е показател на поглаткото одвивање на сообраќајот, без многу прекини во смисла на „тргни-застани“. Тоа исто така доведува до помала потрошувачка на гориво кај секое возило, како и помало загадување на воздухот и воопшто на животната средина.

Имајќи ги предвид резултатите од тестирањата на моделот на предлог-стратегијата, може да се заклучи дека оптималната адаптивна координирана контрола на пристап кон автопат е погодна за спроведување на координирана контрола на пристап.

Со оваа дисертација се отвораат широки можности за примена на техниката на принудно учење во сообраќајната контрола.

Некои од следните чекори во научните истражувања од оваа област би биле координирана контрола при неповторливи задушувања, контрола за светлосната сигнализација на крстосниците, испитување на ефикасноста на моделот после примената на терен.

Докторската дисертација прикажа примена на контролна стратегија во реално време чија единственост се потврдува со неколку факти: за креирањето на моделот на стратегијата не е потребен модел на околината, стратегијата е

вистински адаптивна, не е потребно надгледување, не е потребно предвидување на состојбата на сообраќајот, а едноставноста на овој пристап е во тоа што тој е во можност да избере најдобра оптимална контрола само врз основа на тековната состојба на сообраќајот и тековните услови за контрола, стратегијата може да биде применета во реално време, бидејќи моделот не бара извршување на симулациски чекори, или извршување на пресметки за време на примената.

ABSTRACT

Recurrent as well as non-recurrent motorway congestions are becoming common characteristic that leads to delays, lowered traffic safety, increased fuel consumption and serious air pollution. Such congestions limit motorway throughput at the times when we need it the most, during the rush hour. This congestion becomes much more critical in the case with non-recurrent congestions. Building new motorways will leave motorway infrastructure unused. But, traffic flow can be positively influenced by numerous intelligent transportation systems (ITS) – techniques. Taking this into account, this doctoral dissertation contributes in direction of fulfilling an important gap in our traffic system, i.e. including informatics in the traffic system, or exactly, with information technology methodologies, i.e. artificial intelligence to perform scientific research for **developing a strategy for motorway access control** and corridor traffic management.

Examples of motorway access control systems are numerous. ALINEA is the first control strategy on a local level that is based on direct implementation of classical control theory with feedback. Other efforts include genetic fuzzy approach, artificial neural networks and two level motorway ramp metering approach.

All existing algorithms for motorway ramp metering, although traffic responsive, are not truly adaptive to traffic parameter changes. Most of the implemented systems for motorway ramp metering are of local regulator type and none of them is truly adaptive. Adaptive in this context is opposite of the common misunderstanding in the literature. It means more than giving an answer to the traffic in real time. The meaning is that the control policy changes itself as an answer to the inherent systems characteristics. In other words, in order to be adaptive, the system should be capable of continuous learning.

This dissertation is an attempt to go a step further and to use an adaptive control strategy where there is not predefined level of traffic density that needs to be maintained and the strategy itself learns how to minimize total travel time spend in the system. Further, the agents continuously learn by themselves and adapt to the environment changes according to the needs.

Strategy

The research issue of this doctoral dissertation is to research, and to design a strategy for optimal adaptive traffic signal control of the motorway access. Based on the designed optimal adaptive strategy for motorway access the theoretical goal is to minimize the total travel time on the corridor.

Assumption

Main hypothesis that was set is that motorway access control can be completely adaptive optimal closed loop control strategy, which minimizes total travel time on the corridor.

How to prove

In order to prove the main hypothesis, theory of automatic control is used. Methodology for implementing the optimal control is artificial intelligence technique, known as reinforcement learning with multi agents. Q-learning algorithm is used. Scientific research is conducted with VISSIM microsimulator, with direct programming of the functions in the simulator in order to implement the technique of reinforcement learning with multi agents.

Corridor

According to the traffic parameters, few scenarios in order to test the control strategy are divided into two phases:

- first phase – coordinated control where parameters' measurements are taken at the motorway exit, with known traffic demand on the main line,
- Second phase – coordinated control where measurements are taken downstream from the each motorway ramp, with unknown traffic demand on the main line.

In order to estimate the feasibility of the suggested strategy for optimal adaptive coordinated control of the motorway entry ramp, the results from the agents that learn are compared to the results from the case without control and with the case with ALINEA control, which is widely implemented control strategy used as regulator.

The results gained from the simulations without using control are taken as the base case and the rest results compared to it are estimated. Testing is conducted after sufficient number of iterations with different numbers of states and after Q-values convergence.

Corridor

Strategy for optimal adaptive coordinated motorway ramp metering uses so-called look up table.

With the first phase testing (coordinated motorway ramp metering, measurements at the exit of the corridor, traffic demand known) improvements are as follows: savings in travel time (up to 14.50%), decreased delay (26%), decreased average stop time per vehicle (37%), decreased average number of stops per vehicle (35%) and increased number of vehicles exiting the network (14%).

However, it was evident that this type of control strategy implementation needs longer phase of learning for the agents, which makes the strategy not enough efficient.

Therefore, localized motorway entry access was implemented, where traffic parameters are measured on the mainline downstream of the each ramp (**second phase of the testing**). During this phase two types of testing are performed: 1. Testing when no traffic congestion, 2. Testing when traffic congestion on the corridor. Traffic demand is unknown.

1. After the testing with data when no traffic congestion, it was noticeable that:
 - There are significant improvements regarding delay (lowered for 30%), average stop time per vehicle (lowered for 78%) and average number of stops per vehicle (lowered for 80%), which shows that traffic flow is smooth.
 - After longer traveling, travel time and delay decrease is evident, and there is a significant difference after one hour of travel.
 - But, travel time (lowered for 3.29%), number of vehicles exiting the corridor (increased for 3%) and speed (increased for 0.33%) have very little improvement.
 - It is noticeable that the strategy follows traffic parameters changes in real time, especially during the transition from the state of congestion to the normal state.

The results from implementation of ALINEA for the same effectiveness measures are similar to the corresponding results gained with the suggested control strategy. That could be explained with the fact that there is no recurrent congestion on the corridor, which makes the strategy inferior compared to ALINEA.

After

Regarding travel time saving, increasing the speed and number of vehicles exiting the corridor the results gained with ALINEA are not very promising (important because for the ALINEA strategy there are some parameters calibrations that need to be made for the particular motorway and the corresponding traffic demand, while for the suggested strategy for coordinated control, testing is performed on unknown traffic demand). Therefore, in the case where there is no traffic congestion, suggested strategy could be implemented with learning performed with similar traffic demand prior to the implementation.

reduced

2. During the second test phase (no traffic congestion on the corridor), the Taki strategy that uses Q-learning shows extraordinary good results after adapt relatively small number of iterations (about 1500) with unknown traffic coordin demand:

- Savings in travel time (15%), delay (26%), average stop time per vehicle This (38%), average number of stops per vehicle (35%), increase in number of techn vehicles exiting the network (10%), speed (9.85%). Improvements are almost resou doubled compared to the results with ALINEA implementation with the same cool measures of effectiveness (8.41%, 13%, 20%, 19%, 6.22%, 3.55%, impl respectively).

The strategy adjusts itself with the traffic conditions, i.e. it is adaptive and responds to the traffic demand in real time, which proves the main research hypothesis of this doctoral dissertation.

1. No need

The best improvement is in the case of implementation of the control with non-congested data (for the average stop time per vehicle and average number of stops per vehicle).

3. The fact

Regarding all the measures of effectiveness, the best results with control strategy implementation on unknown traffic demand, which causes congestion, are gained. That shows that suggested strategy is feasible for coordinated motorway ramp metering that is optimal, adaptive and traffic responsive.

After the testing with data where there is traffic congestion on the corridor, the strategy that uses Q-learning shows extraordinary good results after relatively small number of iterations with unknown traffic demand. Thus, its feasibility and efficacy is being shown.

Suggested strategy for coordinated control is better than ALINEA related to the average stop time per vehicle and average number of stops per vehicle during the rush hour, which shows the smoothness of the traffic flow with no interruptions in terms of "stop-and-go". This leads to reduced fuel consumption per vehicle, reduced air pollution, and reduced surroundings pollution as well.

Taking the results of the model testing in mind, it can be concluded that optimal adaptive coordinated motorway ramp metering control is feasible for performing coordinated motorway ramp metering control.

This doctoral dissertation opens broad possibilities for reinforcement learning technique implementation in traffic control. Some of the next steps in scientific research would be coordinated control for non-congested traffic, traffic signal control on isolated intersections, and inspection of the model efficacy after implementation.

This doctoral dissertation shows the implementation of real time traffic control strategy. Several facts confirm the uniqueness such as:

1. No need to modeling the environment for creating the strategy
2. The strategy is truly adaptive.
3. The supervision is not necessary
4. No need for traffic parameters' prediction
5. The fact that the best optimal control strategy based on the current traffic state only and current control conditions makes the approach simple
6. The strategy could be implemented in real time since the model does not either need simulation steps to be performed, or any calculations during the implementation phase.