

Sistemi za adaptibilno upravljanje saobraćajem na gradskoj mreži

DANILO N. RADIVOJEVIĆ, Florida Atlantic University,
College of Engineering & Computer Science,
Boca Raton, Sjedinjene Američke Države

Pregledni rad

UDC: 656.13.07:711

DOI: 10.5937/tehnika1701098R

STAMENKA R. STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd

NIKOLA . . . ELAR, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd

SMILJAN M. VUKANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd

Adaptibilni sistemi za upravljanje saobraćajem (ASUS) predstavljaju kompleksan, ali i moćan alat za poboljšanje uslova u saobraćajnim tokovima na koridorima ili u zonama u kojima se koriste. Mnoge gradske institucije odgovorne za pitanja saobraćaja, posebno one koje u svojoj nedležnosti imaju veliki broj semaforisanih raskrsnica na kojima je primetna velika promenljivost po pitanju saobraćajnih zahteva, donose odluke da instaliraju neki od ASUS. Međutim, te sisteme proizvodi i prodaje veliki broj različitih kompanija koje se meću usono nadmeću na tržištu, i osim informacija koje se mogu dobiti od samih proizvođača ili podataka iz različitih studija sprovedenih širom sveta, vrlo ograničena količina informacija je dostupna o detaljima na inače rade ASUS zbog zaštite njihove intelektualne svojine od plagiranja. Primarni cilj ovog rada jeste kratka analiza najpoznatijih, ali i manje poznatih ASUS, kako bi se stručnoj javnosti i ostalim interesentima približili njihovi načini funkcionisanja, karakteristike, moguće prednosti i nedostaci.

Ključne reči: adaptibilni sistemi, upravljanje saobraćajem

1. UVOD

U današnje vreme veliki broj gradova se suočava sa problemima porasta, ali i promenljivosti transportnih zahteva. U skladu sa tim, gradske vlasti se sve više koncentrišu na najefikasnije moguće korišćenje raspoložive infrastrukture kroz napredno upravljanje saobraćajem. Rešavanje ovog problema bila je osnova za razvoj upravljanja saobraćajem u gradovima upotrebom računara i IT tehnologija, pa su kao posledica nastali različiti sistemi koji su izuzetno sofisticirani. Osnovni zadaci koji se postavljaju pred ove sisteme su povećanje efikasnosti, reagovanje na incidentne situacije na mreži, smanjenje troškova ažuriranja fiksnih signalnih planova i održavanje visokog stepena bezbednosti.

Adaptibilni sistemi za upravljanje saobraćajem (ASUS) predstavljaju veoma važan inženjerski alat modernih

ITS platformi. Razvojem računara i novih tehnologija, omogućio je kreiranje ovih kompleksnih sistema namenjenih upravljanju radom svetlosnih signala duž koordinisanih koridora ili koordinisanih zona. Veliki broj sistema je svoj život započeo u vidu istraživanja projekata, međutim danas ih veliki broj kompanija nudi kao komercijalne proizvode. Postoji veliki broj aktivnih ASUS širom sveta koji su instalirani na različitim lokacijama, funkcionišu sa različitim opremom, rade u različitim uslovima i postižu različite rezultate. Ono što je zajedničko za većinu sistema jeste nedostatak informacija o suštinskim detaljima na inače rade, korišćenjem algoritmima, modelima i ostalim elementima upravljačke logike.

Proizvođači štite svoju intelektualnu svojinu tako što obelodanjuju samo određenu količinu i tip informacija koje se tiču ASUS i tako što kupcima ograničavaju pristup osnovnom kodu samog ASUS u određenoj meri. Iz navedenih razloga, stručna javnost i gradski organi koji se bave pitanjima saobraćaja se suočavaju sa poteškoćama kada je u pitanju detaljno upoznavanje sa karakteristikama sistema ili donošenje odluka o kupovini istog. Zbog toga je cilj ovog rada da

Adresa autora: Danilo Radivojević, Florida Atlantic University, College of Engineering & Computer Science, Boca Raton, Glades Rd 777, Sjedinjene Američke Države, danilo.radivojevic@gmail.com

Rad primljen: 01.02.2017.

Rad prihvaćen: 03.02.2017.

se kratkom analizom aktivnih ASUS širom sveta predstavljaju njihove karakteristike, mogući prednosti i nedostaci.

2. RAZVOJ SISTEMA ZA UPRAVLJANJE SAOBRAĆAJEM

Princip adaptibilnog upravljanja saobraćajem je prvi koristio Miller 1963. godine kada je predložio strategiju koja je u sebi sadržala model koji je računao vremenske uštede i gubitke [1]. On je kombinovao ovaj kriterijum u različitim stanjima sa ciljem optimizacije indeksa performanse sistema. Na osnovu tih istraživanja, razvijen je niz metoda za adaptibilno upravljanje saobraćajem.

Po Venglaru i Urbaniku postoje tri generacije sistema za upravljanje saobraćajem [2]:

1. Prva generacija su *fixed time* ili sistemi za adaptibilno upravljanje koji se sastoje iz programa koji su nastali analizom istorijskih podataka sa uvoznih u memoriju računara. Prva i druga generacija je vrsta hibrida i njima pripadaju sistemi koji funkcionišu po principu plan selection, plan generation i lokalnih adaptacija. Najznačajniji primer je australijski SCATS.

2. Sistemi druge generacije uključuju kreiranje i primenu planova stanja u realnom vremenu preko tehnika koje se baziraju na podacima koji se dobijaju sa detektora. Promene se primenjuju periodično, približno na svakih 5 do 10 min. SCOOT pripada ovoj generaciji.

3. Sistemi treće generacije su potpuno prilagodljivi uslovima u saobraćaju. Parametri vremena trajanja signala se moraju kontinualno menjati da bi se rad svetlosnih signala prilagodio trenutnim vrednostima promenljivih u saobraćajnom toku. Sistemi treće generacije su već razvijeni sa decentralizovanom ili distribuisanom arhitekturom.

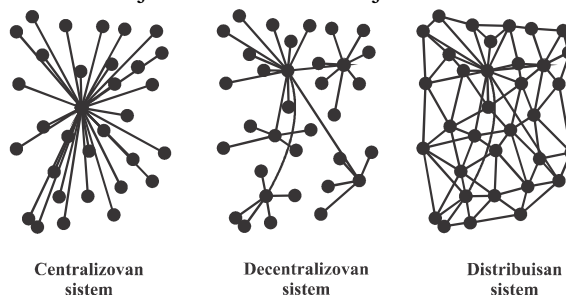
Druga i treća generacija pripadaju ASUS, dok se pojedini pripadnici prve i druge generacije smatraju adaptibilnim iako ne koriste saobraćajne modele već samo skup logičkih algoritama na osnovu kojih se određuju upravljačke akcije.

3. PODELA ASUS PREMA ARHITEKTURI

Centralizovani adaptibilni sistem se najčešće bazira na centralnom računaru i komunikacijama sa individualnim kontrolerima na raskrscima. Ovakav sistem ima tu prednost da su sve relevantne informacije iz detektora i drugih izvora dostupne na jednom mestu.

Karakteristike decentralizovanih adaptibilnih sistema su slične kao i one kod centralizovanih. Najveća razlika je u tome koji se komunikacioni sistem koristi i kako je definisan protok informacija u sistemu. Centralizovani sistem ima kontinualnu komunikaciju između u svakom kontrolera i centralnog računara.

Decentralizovani sistemi ne moraju da imaju samo jedan centar, već se sistem organizuje u više regionalnih grupa koje imaju svoje lokalne centre koji međusobno komuniciraju. U decentralizovane sisteme spada i distribuisani sistem kod koga je najslabije definisana hijerarhija. On koristi ruter modul a svaki kontroler je povezan sa susednim kontrolerima. Poruke se mogu razmenjivati između bilo koja dva kontrolera, jer se poruka, ukoliko je potrebno, prenosi preko kontrolera koji se nalaze između njih.



Slika 1 – Podela arhitektura sistema

4. KRATAK PREGLED ASUS U SVETU

U ovom poglavlju će biti predstavljeni najpoznatiji ASUS koji su implementirani u realnim uslovima, ali i oni koji su se zadržali na nivou naučnog istraživanja i laboratorijskih testiranja iz razloga što uvidom u njihovu strukturu i logiku rada može da se posmatra razvoj ideja za rešavanje problema adaptibilnog upravljanja saobraćajem, različiti pristupi i dostignuće.

4.1 SCATS

SCATS (*The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) je jedan od najstarijih i globalno najzastupljenijih sistema za upravljanje saobraćajem [3]. Osnovnu jedinicu ovakvog sistema predstavljaju regioni (podsistemi) koji predstavljaju grupe raskrsnica sa koordinisanim radom signala. Svaki region ima jednu kritičnu raskrnicu na osnovu koje se određuje ciklus za sve raskrsnice unutar istog regiona. Imaju u vidu da regionalni računari imaju kapacitet da kontrolišu do 250 raskrsnica, da SCATS dozvoljava najviše 64 regiona, iako se dolazi do podatka o maksimalnom broju raskrsnica kojima je moguće upravljati njegovom upotrebom (16 000 raskrsnica).

SCATS sistem je uslovno rečeno adaptibilni sistem jer je on zapravo heuristički. Ne koristi saobraćajne modele i decentralizovan je. Za prilagođavanje trajanja signalnih pojmova se koriste dva osnovna parametra: stepen zasićenosti (DS – Degree of saturation) i protok saobraćaja (LQ – Link queue) [3]. Oba parametra se mere tokom svakog ciklusa. Uz pomoć njih se proračunavaju dužine ciklusa, trajanje signalnih faza i fazni pomaci.

Navedeni parametri se izražavaju uz pomoć taktičkih detektora koje se pozicioniraju uz zaustavnu

liniju i strateških koji se pozicioniraju ispred raskrsnice.

Sistem ima osam različitih inačica [4]. Pored Masterlink na inačica kojim se vrši prilagodljivo upravljanje saobraćajem u realnom vremenu, postoje i opcije koordinacije uz pomoć asovnika, automatsko upravljanje u kome se svaka raskrsnica posmatra kao izolovana, davanje prioriteta interventnim vozilima i drugi. SCATS sistem ima dva nivoa funkcionisanja: strateški (u kome se određuje dužina ciklusa, raspodele trajanja signalnih faza i fazni pomaci) i taktički (u kome se donose odluke o ranijim završecima signalnih faza i preraspodelama zelenog vremena). Ovaj sistem ne poseduje mogućnost davanja prioriteta vozilima javnog prevoza (JP), ali poseduje komponente kojima je zadatak identifikacija neobijavljenih zagušenja i upravljanje saobraćajem u slučaju incidenata [5]. Moguće je povezivanje sa mikrosimulacionim softverima Paramics, Aimsun i VISSIM uz pomoć softvera za emulaciju Wintraff. Kreatori SCATS sistema su razvili i SCATSIM, softversku komponentu koja može da funkcioniše nakon instalacije na računaru, bez upotrebe hardverskih komponenti za upravljanje saobraćajem [6]. Stoga je SCATSIM veoma pogodan za obuku operatera za SCATS sistem, testiranje ili naučno istraživanje.

SCATS sistem je relativno jednostavan, bez saobraćajnih modela i komplikovanih teoretskih postavki koje operaterima mogu da predstavljaju teško savladiv problem, pa je jednostavan za učenje i rad. S obzirom da SCATS meri stepen zasićenosti na osnovu zauzetosti detektora umesto na osnovu stvarnog broja vozila koja napuštaju raskrsnicu, detektor ne može da zabeleži razliku između visokog protoka (visoka zauzetost detektora i veliki broj vozila koja prolaze kroz raskrsnicu) i situacija kada je raskrsnica blokirana (visoka zauzetost detektora, ali mali broj vozila koja prolaze kroz raskrsnicu). Stoga, SCATS ne može da odgovori na zagušenja kada red vozila od prethodne raskrsnice blokira prethodnu raskrsnicu. Sistemi koji primenjuju male inkrementalne promene u parametrima rada kao što to radi SCATS su posebno pogodni za stabilne uslove i situacije kada se uslovi menjaju postepeno. Međutim, u slučaju promena kada se javljaju brze promene u uslovima u saobraćaju, oni nisu u mogućnosti da se prilagode tim promenama dovoljno brzo. Šta više, SCATS je reaktivan sistem, zbog toga što su detektori postavljeni blizu zaustavnih linija, te stoga može da prilagodi svoj rad na osnovu saobraćaja koji je već došao do raskrsnice, umesto da predviđa promene u saobraćajnim zahtevima. SCATS ne optimizira globalne performanse mreže (vremenske gubitke i broj zaustavljanja) već koristi stepen zasićenosti kao funkciju cilja optimizacije [7]. Dodatni nedostatak je taj što je potrebno prethodno znanje o

o ekvivalentnim saobraćajnim opterećenjima i značajnoj količini inačica manuelnog podešavanja osnovnih planova stanja i pomaka. Međutim, rešenje o sistemu koji je dugi niz godina u upotrebi, izuzetno je stabilan, prihvaćen i široko rasprostranjen na nekoliko kontinenata.

4.2 SCOOT

SCOOT (Split Cycle Offset Optimisation Technique) je ASUS uveden u upotrebu 1979. god. [8] i od tada je instaliran u velikom broju gradova na nekoliko kontinenata (preko 200 gradova u 14 država). To je sistem koji se zasniva na modelu sličnom modelu softvera TRANSYT. Sistem ima centralizovanu arhitekturu i namenjen je za guste saobraćajne mreže. Detektori se pozicioniraju daleko od raskrsnice (100-300 m), a mora se ogleđati u tome što se kasno registruju zasićenosti uslovi u saobraćaju, tek kada redovi dostignu do detektora. To znači da SCOOT ne može odmah da primeni mere za zadržavanje saobraćaja na granicama podsistema sa zagušenjem.

Umesto toga, on prelazi na specijalni režim rada tek kada registruje uslove zasićenosti toka (što čini sa zakašnjenjem zbog pozicije detektora) i tada menja primarni cilj – to postaje pražnjenje redova. Kada vozila prelaze preko detektora, podaci se konvertuju u *link profile units* (LPU – jedinica koja se zasniva na protoku vozila i zauzetosti detektora). Za svaki link se konstruišu profili protoka po ciklusima (CFP-*Cyclic flow profiles*) od LPU-ova u toku vremena. Na osnovu generisanog CFP, SCOOT vrši projekciju kretanja i disperzije plotuna prema ostalim raskrsnicama. Uz pomoć ove veličine se vrši modeliranje formiranja i pražnjenja redova.

Optimizacije u okviru SCOOT sistema se vrše *Hill climbing* metodom, a cilj optimizacije je minimizacija indeksa performansi (PI). Postoje tri optimizacione procedure [9]: 1) optimizacija dužina ciklusa – vrši se na 2,5 do 5 min prema kriterijumu minimizacije vremenskih gubitaka u inkrementima od 4, 8 ili 16 s; 2) optimizacija pomaka – vrši se svakog ciklusa za svaki korak sa njegovim susednim raskrsnicama prema kriterijumu minimiziranja vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja. Promene se vrše u inkrementima -4, 0 i +4 s; 3) Optimizacija trajanja zelenih vremena – vrši se za svako stanje sa kriterijumom jednakosti zasićenosti saobraćajnih tokova. Moguće promene su -4, 0 i +4 s.

Davanje prioriteta vozilima JP-a je moguće na dva nivoa: centralizovano kada odluke donosi SCOOT procesor i lokalno kada te odluke donosi kontroler na raskrsnici. Omogućeno je selektivno davanje prioriteta prethodno navedenim vozilima (npr. samo vozilima koja kasne u odnosu na red vožnje). Od ostalih karakteristika sistema treba naglasiti tehniku Gating, kao i module ASTRID i INGRID. Tehnika Gating

(poznata i pod terminom Traffic metering) je tehnika koja omogućava da se redovi pomere sa jednog ili više zagušenih linkova na neke druge. Najčešće se koristi da zadrži saobraćaj izvan gradskih centara da bi se održalo slobodno kretanje vozila u opterećenoj zoni. SCOOT sadrži i module koji se nazivaju INGRID (Integrated Incident Detection – Integrirana detekcija incidenata) i ASTRID (Automatic SCOOT Traffic Information Database – Automatska SCOOT baza podataka) koji detektuju incidentne situacije i arhiviraju podatke kojima barata sistem, respektivno [10]. Moguće je povezivanje sa CORSIM i VISSIM softverima.

Prednosti SCOOT sistema su što je baziran na jasnom modelu, vrstnim teoretskim postavkama, ima veliki broj instalacija i izuzetno je dobar u opsluživanju tokova bliskih zaslona, složenim kombinacijama intenziteta tokova i nepredviđenih varijacija u tokovima. Obezbeđuje obilne količine podataka, što je karakteristika koja u prošlosti nije bila predviđena, ali je naknadno integrirana u sistem. Mane koje SCOOT sistem sadrži su što je sistem veoma zavisian od detektora, međutim svi adaptibilni sistemi imaju tu karakteristiku. Može da pravilno funkcioniše sa najviše 15% detektora u otkazu, a performanse rada se pogoršavaju do nivoa upravljanja sa fiksnim planovima ukoliko se kvarovi ne odstrane. Primetne su spore reakcije na pojavu redova na mreži kao posledica pozicija detektora. Sistem je veoma sofisticiran, pa iako nije potrebno detaljno poznavanje mreže na koju se instalira, potrebno je izuzetno poznavanje opcija sistema da bi se koristio na optimalan način.

4.3 UTOPIA

UTOPIA (Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation) je ASUS koji je prvi put primenjen na širem području Torina 1984. god. Sistem ima modularnu i distribuisanu strukturu koja je organizovana na 2 nivoa: zonsko i lokalno upravljanje. Oba nivoa imaju po dva modula, posmatra i upravlja [9]. Posmatra i modul zonskog upravljanja koristi makroskopski model, vrši predikciju zahteva i ruta kretanja u intervalima od 3 min, dok upravlja i modul vrši optimizaciju mrežne funkcije - ukupno vreme putovanja na osnovu brzine vozila i zaslona tokova u intervalima od 30 min. Nivo lokalnog upravljanja je SPOT (System for priority and optimization of traffic) jedinice u kontrolerima. Svaka jedinica na tom nivou takođe poseduje posmatra i modul, koji na osnovu podataka koje dobija od detektora i podataka o stanjima svetlosnih signala vrši estimaciju redova, prognoze nailazaka vozila JP-a, određuje procenat vozila u sretanju, zaslona tokove, detektuje incidente i zagušenja. Upravlja i modul na lokalnom nivou vrši minimizaciju funkcije troškova uz pomoć tehnike Rolling horizon

koja na svake 3 s prognozira period od 120 s [11]. Postoji više mogućih kriterijuma na osnovu kojih se vrši lokalna optimizacija: minimizacija vremenskih gubitaka, broja zaustavljanja, vremena putovanja, tačnosti JP-a ili zaštita zone podložne zagušenjima od prezasenja. UTOPIA sistem koristi tri dinamička modela saobraćaja: makroskopski i mikroskopski model za putničke automobile i model za JP. Detekcija se vrši pomoću induktivnih petlji ili video detektora. Prema poziciji, razlikuju se dva tipa detektora, ulazni detektori (75–105 m ispred zaustavne linije) koji imaju ulogu u merenjima dolaznih plotuna i modeliranju redova i detektori na izlaznim krakima raskrsnice koji vrše estimaciju procenata vozila u skretanju i zaslona tokova.

Posebne karakteristike koje poseduje ovaj sistem jesu mogućnost davanja prioriteta vozilima JP-a unutar procesa optimizacije i mogućnost rada u različitim režimima kao što su *Plan selection*, rad sa fiksnim planovima koji se smenjuju u toku dana, manuelni režim itd. Moguće je povezivanje sa brojnim softverima za mikrosimulaciju (VISSIM, Aimsun, Paramics, HUTSIM, NEMIS, NETSIM i CUBE Dynasim 4). Koordinacija koju se postiže je implicitna jer se ne koristi zajednička dužina ciklusa. Svaki kontroler komunicira sa susednim i na osnovu razmene podataka se obavlja proces optimizacije rada svetlosnih signala. Zbog toga inače, sistem je izuzetno zavistan od komunikacione infrastrukture, te svaki otkaz ili devijacija u radu stvara značajna odstupanja od efikasnog funkcionisanja, pa performanse sistema rapidno opadaju, čak ispod nivoa koji bi postojao ako bi u upotrebi bila strategija upravljanja sa fiksnim vremenima.

4.4 OPAC

OPAC (Optimized Policies for Adaptive Control) je distribuisana strategija za upravljanje koju karakteriše algoritam za dinamičku optimizaciju koji proračunava trajanja signalnih pojmova sa ciljem minimizacije funkcije performansi - ukupnih vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja na raskrscima. Algoritam koristi izmerene i modelirane saobraćajne zahteve da odredi trajanja stanja koja su ograničena sa minimalnim i maksimalnim zelenim vremenom, a ukoliko funkcioniše u modu za koordinaciju, virtuelnom dužinom ciklusa i faznim pomacima koji se ažuriraju na osnovu podataka u realnom vremenu. Sistem ima distribuisanu arhitekturu i razlikuju se tri nivoa upravljanja [12, 13]. Na najnižem nivou za lokalno upravljanje, OPAC koristi prediktivni tip optimizacije sa tehnikom rolling horizon pri čemu se na svakih 3-5 s vrši predikcija perioda od 30-120 s. Proračunavaju se optimalne prelazne sekvence, a cilj je minimizacija indeksa performansi na prilazima, određivanjem

trenutaka za promenu signalnih stanja [14]. Drugi nivo je koordinacioni nivo gde se vrši optimizacija faznih pomaka jednom u toku ciklusa. Dozvoljene su inkrementalne promene od najviše 2 s. Treći nivo predstavlja sinhronizacioni nivo na kome se proračunava virtuelni ciklus za celu mrežu na svakih nekoliko minuta. Funkcija performanse PI je izmenjiva, pa je moguće izvršiti ponderisanje vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja u procesu optimizacije. Optimizacije na drugom i trećem nivou upravljanja mogu da ne budu aktivne i tada jedina ograničenja jesu definisana minimalna i maksimalna zelena vremena. Kao i u američkim sistemima za adaptibilno upravljanje saobraćajem, ni OPAC nema mogućnost davanja prioriteta vozilima JP-a. Mikrosimulacioni softver sa kojim je moguće povezivanje je NETSIM [15].

Iako OPAC predstavlja značajan korak u razvoju severnoameričkih ASUS, nije primenjen na velikom broju lokacija. Testiran je intenzivno u laboratoriji, a vešća instalacija na terenu je obavljena takođe u sklopu različitih testiranja. Drugim rečima, iako je bio u ponudi više firmi koje su ga integrisale u svoja rešenja i imale u svojoj ponudi, on nikada nije postigao komercijalni uspeh i značajnije se pozicionirao čak ni na američkom tržištu. To se može tumačiti i kao nemogućnost da se jedan naučno-istraživački projekat pretvori u zaokružen proizvod pre svega zbog kompleksnosti koju je imao u trenutku pojavljivanja. Takođe, OPAC sistem ima i nedostatak u logici rada jer je u trajanju jedne etape (približna dužina trajanja ciklusa) obavezno izvršenje bar jedne promene signalnog stanja, čak i ako bi rezultati bili bolji u slučaju da se ta promena ne izvrši.

4.5 RHODES

RHODES (Real-time Hierarchical Optimized Distributed Effective System) je sistem kreiran za rad na gradskim arterijama. To je distribuisan, hijerarhijski organizovan sistem sa tri nivoa: model za dinamičko opterećenje mreže, za upravljanje na nivou mreže i upravljanje na nivou raskrsnice [16]. Oba nivoa za upravljanje imaju komponentu za predikciju i komponentu za upravljanje [17]. Na nivou mreže Apres-Net modul za predikciju prošle i buduće podatke modulu za upravljanje Realband u okviru koga se koristi tehnika rolling horizon za horizont 200-300 s.

Na lokalnom nivou modul za predikciju Predict prošle i buduće informacije upravljačkom algoritmu (COP algoritam) unutar koga se pomoću tehnike rolling horizon za period 45-60 s obavlja proces optimizacije koji ne određuje parametre kao što su dužine ciklusa, raspodele stanja ili fazni pomaci, već samo optimalne trenutke za promene signalnih stanja iz okvirnog signalnog plana koji je izlazni rezultat optimizacije na mrežnom nivou [18]. Posедуje mogućnost davanja

prioriteta vozilima JP-a kroz podešavanje zelenog talasa [19], i postoji mogućnost povezivanja sa CORSIM softverom [18]. RHODES sistem ima slične nedostatke kao i OPAC, i predstavlja istraživački projekat koji pored nekoliko probnih implementacija nije doživeo već i komercijalni uspeh.

4.6 PROLYN

PROLYN (Programmation Dynamique) je algoritam za upravljanje saobraćajem u realnom vremenu koji je razvio CERT (Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse) u Francuskoj [20] i sličan je sistemima OPAC ili UTOPIA. Kreirane su tri verzije: Prolyn H sa hijerarhijskim upravljanjem na dva nivoa, Prolyn D1 sa decentralizovanim upravljanjem bez komunikacije između kontrolera i Prolyn D2 sa decentralizovanim upravljanjem pri čemu kontroleri imaju mogućnost međusobne komunikacije između sebe vrši razmenu predikcija kretanja plotuna. Optimizacija se vrši uz pomoć tehnike rolling horizon pri čemu se na svakih 5 s prognoziraju nailasci vozila, vrši estimacija redova, predikcija blokiranja susednih raskrsnica za ceo period od 75 s, međutim primenjuje se samo prvih 5 s od izabrane upravljačke akcije [21]. Razlog takvog načina rada je što se istekom tih 5 s obavila sledeća iteracija procesa optimizacije tehnikom rolling horizon i ukoliko se evidentiraju značajne promene u odnosu na prethodnu odluku, ista može biti korigovana, između se postiže prilagodljivost sistema. Za reagovanje na problem zagušenja je uveden viši nivo upravljanja jer je uočeno da model koji koristi PROLYN važi samo za nezasićene uslove. Viši nivo upravljanja određuje minimalna i maksimalna trajanja signalnih stanja. Za detekciju vozila se koriste isključivo induktivne petlje i potrebne su dve po svakoj saobraćajnoj traci, na početku linka i na 50 m od zaustavne linije [22].

Sistem ima mogućnost davanja prioriteta vozilima JP-a kroz kriterijum kašnjenja u odnosu na red vožnje [21]. Simulacije su vršene uz pomoć softvera SITRA B+ [20]. Unapređenja sistema su moguća uvođenjem novih tehnologija detekcije i prilagođenjem novim mogućnostima kada su komunikacione tehnologije u pitanju.

4.7 CRONOS

CRONOS je strategija razvijena u INRETS-u (Laboratoire National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité) 1990. god. za adaptibilno upravljanje saobraćajem u zone od nekoliko raskrsnica. Ima sličnosti sa sistemima OPAC i PROLYN, ali se razlikuje po mogućnosti izbora između distribuisane i centralizovane arhitekture [21, 23]. Sistem funkcioniše aciklično i ne koristi unapred definisane signalne planove kao polaznu tačku za optimizaciju. U ovom sistemu raskrsnica predstavlja skup bezbednosnih ograničenja i sva rešenja koja zadovoljavaju ta ograničenja su

možu a. Sistem se sastoji iz tri modula, modula za prognozu koji vrši predikciju nailazaka vozila za ceo horizont na osnovu podataka dobijenih od detektora, modula za simulacije koji pretpostavlja raspodelu vozila unutar zone i modula za optimizaciju koji vrši pretragu za optimalnim trenutkom promene signalnog stanja [23, 24]. Kriterijum optimizacije je minimizacija vremenskih gubitaka unutar jednog horizonta [21]. Detekcija vozila se obavlja automatskom obradom video snimaka [24]. Davanje prioriteta vozilima JP-a je integrisano u proces optimizacije i podržano je maksimalno za jedno vozilo po raskrsnici po optimizaciji [23].

Zbog upotrebe video detekcije, moguće je integracija sa sistemima za automatsko određivanje negativnih efekata koje izazivaju saobraćajne nezgode na mrži [23]. Zabeleženo je da su razlike u brzinama vozila bile ozbiljnije dok je bio aktivan sistem CRONOS. To se može objasniti podešavanjima sistema koji je za cilj imao povećanje protoka, bez posebnih parametara koji se odnose na bezbednost, pa CRONOS teži da se vozila što manje zadržavaju u posmatranoj zoni i dozvoljava veće brzine [25].

4.8 MOTION

MOTION (Method for Optimization of Traffic signals In Online-controlled Networks) predstavlja centralizovan sistem razvijen da podrži upotrebu postojeće infrastrukture u Nemačkoj. Ima mogućnost korišćenja OCIT interfejsa (Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems) i otvorene arhitekture [9]. U Nemačkoj pristupu, upravljanje saobraćajem može da se podeli na tri nivoa: strateški, taktički i operativni. MOTION je deo taktičkog nivoa i na tom nivou on ima zadatak da kreira ili bira okvirne signalne planove na svakih 5-15 min, dok se odluke za lokalno upravljanje donose u kontrolerima pomoću logičkih algoritama [26]. Interni saobraćajni model proračunava okvirne signalne planove i vrši odabir. Koordinacija se optimizira naknadno upotrebom modela za proračun vremenskih gubitaka i broja zaustavljanja. Moguće je upotreba bilo koje tehnologije detekcije ukoliko su detektori postavljeni na udaljenosti 10-50 m od zaustavne linije. Razvijen je algoritam za zamenu podataka sa detektora u otkazu kojim se izbegava korišćenje istorijskih podataka sa tog detektora, već se na osnovu podataka sa susednih detektora izvode podaci za detektor u otkazu [9].

Davanje prioriteta vozilima JP-a se definiše prilikom slanja telegrama sa parametrima okvirnih signalnih stanja od taktičkog ka lokalnom nivou. Konkretno mere se sprovode na lokalnom nivou što je posledica prilagođavanja nemačkih uslovima gde je razvijena praksa da se u kontrolere za ASUS upisuju algoritmi koji za cilj imaju prioritet JP-a, tako da

primenom MOTION sistema oni ne moraju da budu poništeni [9]. Brojne instalacije u Evropi i Aziji su potvrdile dobre rezultate, a MOTION je i jedini ASUS koji je trenutno aktivan u Srbiji, u Beogradu na 15 raskrsnica u zoni Bulevara kralja Aleksandra. MOTION ima iznuenu logiku rada zbog prilagođavanja postojećoj nemačkoj infrastrukturi, međutim to ne predstavlja nužno nedostatak. Takođe, sistem ima dug interval proračunava okvirnih planova, ali istovremeno eliminiše potrebu za skupom komunikacionom infrastrukturom i smanjuje osetljivost na kvarove. On koristi prednosti razdvajanja adaptibilnog upravljanja na nivou saobraćajne mreže od lokalnog upravljanja jer je pošten operativnog rada, te ima više vremena i veće mogućnosti da pronađe optimalno rešenje.

4.9 BALANCE

BALANCE je nemački ASUS koji ima otvorenu arhitekturu i koristi OCIT interfejs. Izuzetno je prilagodljiv kada je detekcija vozila u pitanju jer može da koristi bilo koji tip detekcije na različitim pozicijama. Osnovna arhitektura sistema se sastoji iz dva nivoa: taktičkog i lokalnog. Taktički je predstavljen MacroBalance modulom koji proračunava okvirne signalne planove [27, 28]. U početku je korišćen heuristički pristup, a kasnije genetski algoritmi. U periodu između 5 i 15 min određuje prosečne dužine redova po signalnim grupama, prosečne vremenske gubitke po signalnim grupama, po raskrsnicama ili na mreži, stepen zasićenja tokova po signalnim grupama i podatke o izvorima i ciljevima kretanja. Upravljanje na lokalnom nivou se obavlja putem MicroBalance modula ili logičkih algoritama. MicroBalance na svakoj raskrsnici koristi tehniku rolling horizon i mikroskopski model sa koracima od 1s. Svake sekunde se generišu podaci o maksimalnim i prosečnim dužinama redova, vremenski gubici po signalnim grupama i vremenski gubici vozila JP-a. Zbog uspostavljanja koordinacije koristi se ista dužina ciklusa određena na bazi opterećenja kritične raskrsnice. Za davanje prioriteta JP-u se ne koristi model već skup logičkih uslova na lokalnom nivou (kao kod MOTION). Za offline simulacije se koriste softveri Aimsun2, NONSTOP i VISSIM [9, 26, 27].

4.10 ACS LITE

ACS Lite (Adaptive Control Software Lite) je proizvod američkog projekta Federalne agencije za autoputeve koji je za cilj imao dizajniranje uprošćenog i jeftinog ASUS za gradske arterije. Sistem je centralizovan, koristi NTCIP (The National Transportation Communications for ITS Protocol), podržava rad na 8 do 16 raskrsnica i koristi jedan procesor za upravljanje po saobraćajnici. ACS Lite koristi induktivne petlje ili video detekciju, a detektori se pozicioniraju uz zaustavnu liniju za svaku signalnu fazu i na udaljenosti 75-

150 m na prioritetnom pravcu. Sistem vrši promene u raspodelama trajanja faza (signalna stanja nisu dozvoljena) i u faznim pomacima na svakih 5-10 min. Dužine ciklusa se ne proračunavaju, već se koriste predefinisane vrednosti u zavisnosti od doba dana. Raspodela trajanja signalnih faza se određuje na osnovu iskorišćenosti tih faza metodom izjednačavanja zatečenosti na osnovu protoka i zauzetosti detektora, dok se prilagođavanje pomaka vrši prilikom najave na daljnjim detektorima kako se želi maksimizirati broj vozila koja nailaze na raskrscnicu dok traje zeleni signalni pojam [9, 29]. Od 2007. god. su izvršena unapređenja modula: TOD Tuner vrši izmene u osnovnim signalnim planovima (signalni plan može da po ne ranije ili traje duže od planiranog); Run Time Refiner vrši inkrementalne promene u aktivnom signalnom planu izmenama u trajanju faza i pomaka, pritom proverava da li je dostignuto maksimalno trajanje određene faze ili je interval sledećeg vozila prevazišao zadanu vrednost; Transition manager sa 4 strategije kontroliše prelazak između planova: skraćeni i produženi prelazak, zadržavanje i najbolji na in [30].

Sistem nema mogućnost davanja prioriteta JP-u kao ni ostali sistemi nastali na američkom kontinentu. Moguće je povezivanje sa softverima CORSIM [29] i VISSIM [31]. Jedna od glavnih karakteristika sistema je da ne koristi saobraćajne modele. U uslovima preuzetosti napušta svoju logiku rada i vraća se u predefinisani fiksni signalni plan jer njegova logika rada nije efikasna za takve situacije [32].

4.11. ACDSS

ACDSS (Adaptive Control Decision Support System) je sistem koji radi kao plugin za centralni sistem za nadzor i upravljanje. Sistem je hijerarhijski ustrojen sa dva nivoa upravljanja. Na prvom nivou se vrši odabir osnovnog signalnog plana iz skupa predefinisanih. Razlikuje se od Plan selection strategije jer su signalni planovi koji se ovde biraju samo referentni planovi. Odabir se vrši na osnovu sistemskih mera zagušenja, a ne pragova vrednosti protoka i zauzetosti detektora. Na svaka 3 min se procenjuje da li je odluka za promenu strategije upravljanja opravdana, a kada se ona promeni, sledeća promena može da se dogodi tek nakon 30 min. Na drugom nivou se obavlja upravljanje na kritičnim raskrscnicama tako da bi se raspodelama zelenih vremena sprečilo blokiranje susednih raskrscnica. Ovaj nivo koristi lokalnu meru zagušenja pod nazivom SI (Severity Index), koja se zasniva na procenjenim odnosima dužina redova i skladišnih kapaciteta dela saobraćajnice [33]. Mikrosimulacije su obavezni deo sistema za upravljanje, a mogu da se koriste VISSIM i Aimsun [34]. Vršiti se uporedna simulacija postojećeg stanja i stanja koje bi bilo aktuelno ukoliko bi se primenile akcije koje predlaže algoritam pod

nazivom IMPOST+ uz 2D i 3D prikaze, što operateru olakšava donošenje odluka. Sistem može da funkcioniše autonomno ili da odluke donosi operater [35]. ACDSS nema mogućnost davanja prioriteta JP-u. Zbog specifičnosti lokacije na kojoj je prvi put instaliran (Njujork) invazivni detektori nisu dolazili u obzir, pa sistem stoga koristi mikrotalasne detektore i optičke tagove za elektronsku naplatu putarine. Ovakvi nestandardni tipovi detekcije su omogućili korišćenje dužina redova vozila kao lokalne mere zagušenja i vremena putovanja kao mere zagušenja [33]. Pored jedinstvenog ITS okruženja i tehničkih izazova koji su rešeni, ovaj projekat predstavlja možda i jednu od prvih platformi za adaptibilno upravljanje saobraćajem koja koristi višerežimsko upravljanje saobraćajem na osnovu vremena putovanja u realnom vremenu. Dizajn, razvoj i upotreba ove metodologije su podstaknuti dostupnošću u obimnih podataka o vremenima putovanja u realnom vremenu, unapređenom ITS infrastrukturu i potrebom za pouzdanim i robusnim ASUS za upravljanje zagušenjima u kompleksnom okruženju kao što je Njujork.

5. OSTALI ASUS

Od ostalih ASUS bitno je pomenuti sisteme ITACA, NWS Voyage, ImFlow, QuicTrac, MAC, InSync, LA ACTS, SynchroGreen, Centrac, SURTRAC i KADENCE. Njihova detaljnija analiza bi mogla da bude predmet posebnog dokumenta u budućnosti.

ITACA je sistem razvijen u Španiji, relativno sličan SCOOT i najviše je zastupljen u Južnoj Americi i Kini. Poslednjih godina se na severnoameričkom kontinentu pojavilo nekoliko ASUS. KADENCE i Centrac su derivati sistema ACS Lite sa određenim modifikacijama. LA ACTS je adaptibilni sistem razvijen konkretno za područje grada Los Angelesa i pod svojom kontrolom u adaptibilnom radu ima preko 3000 raskrscnica [9]. Ostali američki sistemi za adaptibilno upravljanje saobraćajem kao što su NWS Voyage, QuicTrac, SURTRAC i SynchroGreen imaju određeni broj instalacija na terenu, ali svakako najzastupljeniji adaptibilni sistem iz grupe novijih sistema je InSync [36]. Sa druge strane MAC je kanadski ASUS i on je jedan od prvih višestruko adaptibilnih, tj. pored prilagodljivosti rada signala u odnosu na preovlađujuće uslove je moguća i automatski prilagođavajući kriterijum po kome se vrši optimizacija, što daje drastičnije rezultate nego kod ranijih sistema koji su optimizacije mogli da vrše samo po jednom kriterijumu [37].

6. ZAKLJUČAK

Kada se govori o rezultatima rada ASUS, treba biti veoma oprezan jer veliki broj studija koje se bave ovim

pitanjem prijavljuje značajna unapređenja u performansama. To je posledica pojave da se rezultati rada ASUS esto ne porede sa ažuriranom verzijom prethodnog na ina upravljanja. Iz tog razloga, rezultate prikazane u tim studijama treba posmatrati sa određenom dozom rezerve. Jedan od problema sa kojima može da se susretne italac pregledaju i studije o implementacijama ASUS jeste taj što u određenom broju studija, objavljeni rezultati istraživanja i vrednovanja ne obuhvataju sve uticaje sistema kao celine, kako pozitivne tako i negativne. Ponekad se koriste samo određene mere performansi sistema, posmatraju se samo određene zone mreže ili samo neke grupe korisnika. Na primer, istraživanje vremena putovanja samo duž glavnog koordinisanog pravca izostavlja sva vozila u skretanju i vozila na saobraćajnicama koje se ukrštaju sa koridorom. Unutar samih ASUS se postavljaju ograničenja kako bi se limitirali negativni efekti na pešake tokove, na vozila sa sporednih saobraćajnica i na vozila koja skre u sa glavnog pravca, ali se retko kvantifikuju uticaji novog sistema na te grupe korisnika. Kvalitetan ASUS bi trebao da ima mogućnost upotrebe različitih strategija upravljanja u različitim situacijama i uslovima u saobraćajnom toku kao što su vršni periodi, nezgode na mreži, sprečavanje blokiranja susednih raskrsnica i sl. Na kraju, potrebno je reći da ne postoji najbolji adaptibilni sistem za upravljanje saobraćajem već onaj koji najviše odgovara predmetnoj lokaciji, organizaciji koja njime upravlja, postojećoj infrastrukturi i pravcu razvoja. Iz tog razloga, veoma je važno da se svi zainteresirani dobro upoznaju sa ponudom i mogućnostima adaptibilnih sistema na tržištu i da napišu veoma detaljan i temeljan projektni zadatak koji će definisati kako funkcionalne, tako i tehničke zahteve.

LITERATURA

- [1] Miller AJ. A computer control system for traffic network, In Proc. *2nd Int. Symp. on Theory of Road Traffic Flow*, London, pp. 201-220, 1963.
- [2] Venglar S, Urbanik II T. Evolving to real-time adaptive traffic signal control, In Proc. *2nd World Congress on Intelligent Transport Systems*, Vol. 1. Yokohama, Japan, 1995.
- [3] Martin P, Stevanovic A. SCATS Evaluation in Park City-UT (Adaptive Signal Control V), Utah Department of Transportation, UTL-1107-92, 2007.
- [4] Roads and Traffic Authority of NSW. The New Generation SCATS 6 Functional Description, New South Wales, Australia, 2009.
- [5] McMillan S, Nicholson A, Koorey G. Techniques for Using SCATS as an Incident Management Tool, *Research paper*, IPENZ Transportation Group Conference, 2010.
- [6] Wilson C, Millar G, Tudge R. Microsimulation Evaluation of the Benefits of SCATS Co-ordinated Traffic Control Signals, In Proc. *Transportation Research Board Meeting*, Washington, D.C, 2006.
- [7] Chiu S, Chand S, Self-Organizing Traffic Control via Fuzzy Logic, *32nd IEEE Conf. on Decision & Control*, San Antonio, Texas, 1993.
- [8] Martin P. *SCOOT, an Overview*. University of Utah Traffic Laboratory, 2001.
- [9] Stevanović A. *Adaptive traffic control systems: domestic and foreign state of practice*. NCHRP Project 20-5: Synthesis Topic 40-03, Transportation Research Board of the National Academy of Sciences, 2010.
- [10] Martin P. et al. *Adaptive Signal Control II*, University of Utah Traffic Lab, 2003.
- [11] Sheperd SP. A review of traffic signal control, *Working Paper 349*, Institute of Transport Studies, University of Leeds, Leeds, UK, 1992.
- [12] Gartner NH. Optimized Policies for Adaptive Control (OPAC) Session 1: Principles of Operation, Workshop on Adaptive Traffic Signal Control Systems, *80th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2001.
- [13] Pooran F, Farradyne PB. Optimized Policies for Adaptive Control (OPAC), Workshop on Adaptive Traffic Signal Control Systems, *79th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2000.
- [14] Gartner NH. *Demand-responsive Decentralized Urban Traffic Control: Single-intersection Policies*. United States Dept. of Transportation, Research and Special Programs Administration, 1982.
- [15] Liao LC. *A review of the optimized policies for adaptive control strategy (OPAC)*. California PATH Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, CA, 1998.
- [16] Head KL, Mirchandani PB, Shelby S. The RHODES prototype: a description and some results, *77th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 1998.
- [17] Mirchandani P, Head L. RHODES Traffic Adaptive Control System. Workshop on Adaptive Traffic Signal Control System, *80th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2001.
- [18] Mirchandani P, Head L. A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms and analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9(6), pp. 415-432, 2001.
- [19] Head L, Mirchandani P. RHODES: Fundamental principles, Workshop on Adaptive Traffic Signal

- Control Systems, *79th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2000.
- [20]www.onera.fr
- [21]Laurens BT. The State of the Art in French Urban Traffic Control. In Proc. *5th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Seoul, Korea, 12-16 October 1998.
- [22]Hermitte L, Demmou H. Une méthode de contrôle de trafic urbain par algorithmes génétiques. *3e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation MOSIM'01*, Troyes, France, 25-27 avril 2001.
- [23]Kachroudi S. "Commande et optimisation pour la régulation du trafic urbain multimodale sur de grands réseaux urbains". L'institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, (Thèse de doctorat) France, 2010.
- [24]Heinrich A, Perrin G. "Gestion du trafic basée sur la communication inter-vehicules", Ecole des ingénieurs de la ville de Paris, France 2008.
- [25]Saunier N. "Incidence de la régulation d'un carrefour à feux sur le risque des usagers; Apprentissage d'indicateurs par sélection de données dans un flux". (Thèse de doctorat, Télécom ParisTech), France 2005.
- [26]www.traffictoday.com
- [27]Friedrich B, Shahin M. Adaptive traffic control in metropolitan areas. In Proc. *4th International Conference on the Role of Engineering Towards a Better Environment*, Alexandria, Egypt, 21-23 Dec. 2002.
- [28]Clark M, et al. "TABASCO (Telematics Applications in Bavaria, Scotland and Others) – UTC with PT Priority: User needs, Functional Specification and Demonstrators" 1998.
- [29]Shelby SG, et al. An Overview and Performance Evaluation of ACS Lite–A Low Cost Adaptive Signal Control System. *87th TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2008.
- [30]Gettman D, Shelby S, Ghaman R, "Adaptive Control Software – Lite (ACS-Lite) Implementation Template", FHWA Resource center – Operations Technical Support Team, USA, 2006.
- [31]Chatila H, Li Z. US-95 ACS-Lite System Evaluation. Idaho Transportation Dep. 2007.
- [32]Wang J. et al. Evaluation of ACS Lite Adaptive Control using Sensys Arterial Travel Time Data. In Proc. *ITS America 20th Annual Meeting & Exposition*, 2010.
- [33]Xin W. et al. "Midtown in Motion": A New Active Traffic Management Methodology and Its Implementation in New York City. *92nd TRB Annual Meeting*, Washington, D.C. 2013.
- [34]Xin W. et al. Integrated adaptive traffic signal control with real-time decision support. *89th TRB Annual Meeting* Washington, D.C. 2010.
- [35]Xin W. et al. Development of ACDSS and Its Implementation in New York City Arterials. *Traffic Engineering & Control*, Vol. 50 (8), pp. 367-372, 2009.
- [36]Selinger M, Schmidt L. Adaptive traffic control systems in the United States. HDR Engineering, Inc. 2009.
- [37]Lam J, Petrovic S, Craig P. Adaptive Traffic Signal Control Pilot Project for the City of Surrey. In Proc. *2013 Transportation Association of Canada Conference and Exhibition*, Winnipeg, Manitoba, 22-25 September 2013.

SUMMARY

ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL SYSTEMS FOR URBAN NETWORKS

Adaptive traffic control systems represent complex, but powerful tool for improvement of traffic flow conditions in locations or zones where applied. Many traffic agencies, especially those that have a large number of signalized intersections with high variability of the traffic demand, choose to apply some of the adaptive traffic control systems. However, those systems are manufactured and offered by multiple vendors (companies) that are competing for the market share. Due to that fact, besides the information available from the vendors themselves, or the information from different studies conducted on different continents, very limited amount of information is available about the details how those systems are operating. The reason for that is the protecting of the intellectual property from plagiarism. The primary goal of this paper is to make a brief analysis of the functionalities, characteristics, abilities and results of the most recognized, but also less known adaptive traffic control systems to the professional public and other persons with interest in this subject.

Key words: *Adaptive traffic control systems, Traffic signal control*