

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
САОБРАЋАЈНИ ФАКУЛТЕТ

Душан М. Јеремић

**СИМУЛАЦИОНО МОДЕЛИРАЊЕ
УКРСНИЦА**

Докторска дисертација

Београд, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC ENGINEERING

Dušan M. Jeremić

**SIMULATION MODELLING OF PASSING
SIDINGS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

МЕНТОР:

др Сањин Милинковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

др Славко Весковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет
др Сањин Милинковић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Саобраћајни факултет
др Борна Абрамовић, изванредни професор
Свеучилиште у Загребу Факултет прометних знаности

Датум одбране: ____ . ____ . 2022. године

САЖЕТАК

Укрснице су значајна службена места на једноколосечним пругама од чијег положаја, броја и колосечне ситуације умногоме зависи одвијање саобраћаја и стварна пропусна моћ једноколосечне пруге. Иако је примарна улога укрсница регулисање саобраћаја супротних и узастопних возова у њима се може вршити и ограничени улазак и излазак путника као и утовар и истовар ствари. Њихов број и положај зависи од потребне пропусне моћи једноколосечне пруге при чему је пракса да се граде на најдужим односно најнеповољнијим међустаничним растојањима.

За разлику од положаја и броја укрсница на прузи односно железничкој мрежи које су у великој мери истражене теме, посебно у САД, колосечна ситуација укрсница односно њихова варијантна решења нису довољно истражена тема. Различита варијантна решења односно могућности за једновремени улазак возова или укрштавања без заустављања могу значајно повећати пропусну моћ деонице пруге са укрсницама као и значајно смањити трошкове вуче возова смањењем броја заустављања и покретања.

За анализу различитих варијантних решења укрсница погодно је користити симулационо моделирање. У ту сврху постоји читав низ метода и софтверских решења од којих су нека општег карактера а нека специфично креирана за железнички саобраћај. Петри мреже спадају у симулациони метод опште намене који се може успешно користити и за симулације железничког саобраћаја. Пошто је у питању општи метод одликује га знатно већа флексибилност у односу на комерцијалне софтвере за симулацију железничког саобраћаја па се може успешно применити и за симулације варијантних решења укрсница. Како би се одредило оптимално варијантно решење укрснице поред резултата симулационих модела потребно је узети у обзир и друге критеријуме као што су трошкови инвестиција, одржавања и безбедност што се постиже методом вишекритеријумског одлучивања.

Предмет ове дисертације је проналажење оптималног решења укрснице користећи симулационо моделирање за анализу варијантних решења укрсница. Извршено је моделирање деонице Хрпеље-Козина – Копер у Словенији применом софтверког пакета *ExSpect* за симулирање Петри мрежа а верификација модела помоћу комерцијалног софтвера *OpenTrack* за синхрону симулацију железничког саобраћаја. За анализу варијантних решења укрсница извршено је моделирање деонице Врбас – Жедник на прузи (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia), такође уз помоћ софтверког пакета *ExSpect*, при чему је за испитивање варијантних решења одабрана укрсница Мали Иђош Поље. Сви подаци о кретању возова у моделу Пери мрежа се извозе у екстерну базу података током извршења симулације тако да се касније могу анализирати. Резултати симулационих модела су улазни подаци за модел вишекритеријумског одлучивања који као резултат даје рангирање различитих варијантних решења.

Кључне речи: укрснице, симулационо моделирање, Петри мреже, једноколосечна пруга

Научна област: Саобраћај

Ужа научна област: Железнички саобраћај и транспорт

УДК број:

ABSTRACT

Passing sidings are important infrastructure objects on single-track lines whose position, number and track layout largely determine flow of traffic and the operating capacity of the single-track line. Although the primary role of passing sidings is to manage the traffic of opposite and consecutive trains, they can be used for limited entry and exit of passengers, as well as loading and unloading of goods. Their number and position depends on the required capacity of a single-track railway, where it is custom to build them on the longest or most unfavorable sections.

Unlike the position and number of passing sidings on the railway or railway network, which are largely researched topics, especially in the United States, the track layout of passing sidings and their variants are not a sufficiently researched topic. Different variants, i.e. possibilities for simultaneous entry of opposite trains or intersections without stops, can significantly increase the throughput of the section of the line with passing sidings as well as significantly reduce the costs of traction by reducing the number of stops and starts.

It is convenient to use simulation modeling for the analysis of different variant solutions of passing sidings. For this purpose, there are a number of methods and software packages, some of which are of a general application and some specifically created for railway traffic. Petri nets belong to the general purpose simulation method that can be successfully used for simulations of railway traffic. Since this is a general method, it is characterized by significantly greater flexibility compared to commercial software for simulation of railway traffic, so it can be successfully applied for simulations of passing siding variants. In order to determine the optimal variant solution of the passing sidings, in addition to the results of simulation models, it is necessary to take into account other criteria such as investment costs, maintenance costs and safety, which is achieved by the method of multi-criteria decision making.

The subject of this dissertation is to find the optimal passing siding solution using simulation modeling for the analysis of passing siding solutions. Modeling of the section Hrpelje-Kozina - Koper in Slovenia was performed using the software package ExSpect for simulation of Petri nets and verification of the model using commercial software OpenTrack for synchronous simulation of railway traffic. For the analysis of variant solutions of passing sidings, the section Vrbas - Žednik on the railway (Belgrade Center) - Stara Pazova - Novi Sad - Subotica - state border - (Kelebia) was modeled, also with the help of the software package ExSpect, and the passing siding Mali Idoš Polje was chosen to test the variant solutions. All train movement data in the Petri net model is exported to an external database during the simulation so that it can be analyzed later. The results of the simulation models are the input data for the multicriteria decision-making model, which gives as result the ranking of different variant solutions.

KEYWORDS: passing siding, simulation modelling, Petri nets, single track line

Scientific field: Traffic

Field of Academic Expertise: Railway traffic and transport

UDK number:

Садржај

1. Уводна разматрања.....	1
1.1 Предмет истраживања.....	1
1.2. Циљ истраживања.....	2
1.3. Преглед досадашњих истраживања.....	2
1.4. Полазне хипотезе.....	3
1.5. Структура дисертације.....	4
2. Укрснице.....	5
2.2. Број и положај укрсница на мрежи.....	6
2.3. Главна постројења укрсница.....	8
2.4. Типови укрсница.....	9
2.4.1. Класичне укрснице.....	11
2.4.2. Модификоване класичне укрснице.....	12
2.4.3. Подужне укрснице.....	14
2.4.4. Продужене укрснице.....	16
2.5. Предности и мане различитих решења укрсница.....	17
2.5.1. Класичне укрснице.....	17
2.5.2. Модификоване класичне укрснице.....	18
2.5.3. Продужене укрснице.....	20
2.5.3.1. Продужене укрснице са попречним везама.....	20
2.5.3.2. Продужене укрснице без попречних веза.....	22
2.6. Резиме.....	23
3. Симулације у железничком саобраћају.....	24
3.1. Симулационо моделирање.....	24
3.2. Симулационо моделирање и анализа.....	25
3.3. Предности симулације.....	26
3.4. Недостаци симулације.....	26
3.5. Валидација и верификација.....	27
3.5.1. Верификација симулационих модела.....	27
3.5.2. Валидација симулационих модела.....	27
3.6. Примена симулације у железничком саобраћају.....	28
3.7. Резиме.....	30
4. Теоријске основе Петри мрежа.....	31
4.1. Увод.....	31
4.2. Дефиниција Петри мрежа.....	31
4.3. Принцип рада Петри мрежа.....	32
4.4. Особине Петри мрежа.....	33
4.5. Могућности за моделирање.....	34
4.6. Петри мреже високог нивоа.....	35

4.7. Резиме	38
5. Моделирање железничког саобраћаја помоћу Петри мрежа	39
5.1. Увод	39
5.2. Израда модела Петри мрежа.....	39
5.3. Основни елементи програма ExSpect	40
5.4. Дефиниције у програму ExSpect	42
5.5. Модули у симулационом моделу	47
5.5.1. Модул колосека	47
5.5.2. Модул скретнице	50
5.6. Диспечерски подсистем	52
5.6.1. Структура диспечерског подсистема.....	52
5.6.2. Формирање улазног пута вожње.....	53
5.6.3. Формирање излазног пута вожње	57
5.6.4. Формирање улазних путева вожњи у случају конфликта	59
5.6.5. Ослобађање путева вожње.....	61
5.6.6. Улазак на моделирану деоницу.....	62
5.7. Хијерархијска структура модела.....	63
5.8. Верификација симулационог модела.....	69
5.8.1. Карактеристике деонице Хрпеље-Козина - Копер.....	69
5.8.2. Модели деонице Хрпеље-Козина – Копер.....	70
5.8.3. Приказ рада модела петри мрежа	71
5.8.4. Упоредивање резултата модела	73
5.9. Резиме	77
6. Симулационо моделирање варијантних решења укрсница.....	78
6.1. Увод	78
6.2. Варијантна решења укрснице мали иђош поље	78
6.2.1. Постојеће стање	78
6.2.2. Варијанта укрснице са граничним колосечним сигнаlima.....	79
6.2.3. Варијанта укрснице са штитним колосецима	81
6.2.4. Варијанта продужене укрснице	84
6.2.5. Варијанта смакнуте укрснице	86
6.3. Симулациони модели варијантних решења	88
6.3.1. Симулациони модел постојећег стања	88
6.3.1.1. Формирање улазног пута вожње.....	88
6.3.1.2. Формирање излазног пута вожње	90
6.3.1.3. Промена улазних путева вожњи	91
6.3.1.4. Ослобађање путева вожње и улаз на моделирану деоницу.....	93
6.3.2. Модели варијанти са граничним колосечним сигнаlima и штитним колосецима.....	94
6.3.3. Модел варијанте продужене укрснице.....	95
6.3.4. Модел варијанте смакнуте укрснице.....	96

6.4. Резултати симулације.....	97
6.4.1. Улазни подаци симулационих модела.....	97
6.4.2. Варијанта са 50 возова дневно	97
6.4.3. Варијанта са 100 возова дневно	100
6.4.4. Варијанта са 150 возова дневно	103
6.5. Резиме	108
7. Вишекритеријумски избор варијантног решења.....	110
7.1. Методе за одређивање тежинских коефицијената	110
7.1.1. FUCOM метода	110
7.1.2. CRITIC метода	111
7.1.3. Entrophy метода	112
7.2. Методе за рангирање алтернатива	113
7.2.1. TOPSIS метода	113
7.2.2. MABAC метода.....	114
7.3. Израда модела вишекритеријумског одлучивања	115
7.3.1. Дефинисање критеријума	115
7.3.2. Дефинисање алтернатива.....	116
7.3.3. Прорачун тежинских коефицијената критеријума.....	117
7.3.4. Вредновање варијантних решења	120
7.3.5. Анализа резултата вишекритеријумског одлучивања и анализа осетљивости	122
7.4 Резиме	125
8. Закључна разматрања и правци будућег истраживања	126
Литература.....	127
Прилози	131
Прилог 1 – Софтвер за симулацију Петри мрежа.....	131
Прилог 2 – Карактеристике деонице Врбас – Жедник	133
Биографија аутора	136

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1 Шема укрснице Кос (извор: Жељезничка инфраструктура Црне Горе).....	8
Слика 2.2 Решење укрснице са слепим колосеком	8
Слика 2.3 Укрсница са обострано везаним колосеком	9
Слика 2.4 Укрсница са два обострано везана колосека	9
Слика 2.5 Укрснице са подужним (а), полуподужним (б) и попречним (в) распоредом колосека (извор М. М. Филипов et al., 1991).....	10
Слика 2.6 Укрсница са оба колосека са једне стране главног пролазног колосека	11
Слика 2.7 Укрсница са по једним колосеком са обе стране главног пролазног колосека	11
Слика 2.8 Укрсница са краћим главним пролазним и колосеком са једне стране.....	12
Слика 2.9 Шема некадашње укрснице Крњача (извор: Инфраструктура железнице Србије).....	13
Слика 2.10 Укрсница са граничним колосечним сигнаlima.....	13
Слика 2.11 Укрснице на прузи Eskilstuna – Flen	14
Слика 2.12 Излазни и гранични колосечни сигнали у станици Bålgviken.....	14
Слика 2.13 Колосеци за укрштавање са једне стране	15
Слика 2.14 Колосеци за укрштавање са супротне стране.....	15
Слика 2.15 Решење подужне укрснице са граничним колосечним сигнаlima	15
Слика 2.16 Једновремени улазак возова у продужену укрсницу.....	16
Слика 2.17 Решење продужене укрснице без средишњих колосечних веза.....	17
Слика 2.18 Положај укрсног и супотног воза при укрштавању без заустављања	17
Слика 2.19 Општи изглед укрснице са два колосека	17
Слика 2.20 Укрсница са два штитна колосека на истом колосеку	18
Слика 2.21 Укрсница са два штитна колосека	18
Слика 2.22 Укрсница са четири штитна колосека.....	19
Слика 2.23 Укрсница са граничним колосечним сигнаlima.....	19
Слика 2.24 Продужена укрсница са попречним везама.....	20
Слика 2.25 Шема просте скретничке везе (извор: Ивић, 2005).....	21
Слика 2.26 Једновремени улазак два воза у продужену укрсницу без штитних колосека	22
Слика 2.27 Решење продужене укрснице са и без штитних колосека	22
Слика 3.1 Жељезничка инфраструктура у програму OpenTrack	29
Слика 3.2 Принцип рада синхроних модела (извор: http://www.opentrack.ch/).....	29
Слика 4.1 Графички приказ једноставне Петри мреже.....	32
Слика 4.2 Узастопна извршења и конфликт	34
Слика 4.3 Конкурентност и синхронизација.....	35
Слика 4.4 Међусобна искључивост и приоритети	35
Слика 5.1 Основни елементи програма ExSpect.....	40
Слика 5.2 Дефиниције у програму ExSpect.....	43
Слика 5.3 Дефиниција типа voz	44
Слика 5.4 Дефиниција типа info.....	45
Слика 5.5 Дефиниција типа Komanda.....	46

Слика 5.6 Дефиниција типа komanda_id	46
Слика 5.7 Дефиниција типа stanje_st	47
Слика 5.8 Шематски приказ модула блок одсека	48
Слика 5.9 Модул блок одсека у програму ExSpect	48
Слика 5.10 Модул станичног колосека у програму ExSpect	49
Слика 5.11 Модул кратког одсека у програму ExSpect	50
Слика 5.12 Скретнички модул „уз језичак“	51
Слика 5.13 Скретнички модул „низ језичак“ у програму ExSpect	51
Слика 5.14. Структура диспечерског подсистема	52
Слика 5.15 Дефиниција процесора kom_ulaz_zacht	54
Слика 5.16. Алгоритам процесора kom_ulaz_zacht	55
Слика 5.17 Алгоритам процесора kom_ulaz_zacht_od	56
Слика 5.18 Алгоритам процесора kom_ulaz_zacht_pl	57
Слика 5.19 Алгоритам процесора kom_ulaz_ok	58
Слика 5.20 Дефиниција процесора Kom_izlaz_zachtev_st	59
Слика 5.21 Дефиниција процесора Kom_ulaz_zauz	60
Слика 5.22 Дефиниција процесора Kom_izlaz_zauz	60
Слика 5.23 Дефиниција процесора Kom_ulaz_free	61
Слика 5.24 Дефиниција процесора Kom_izlaz_free	62
Слика 5.25 Дефиниција процесора Kom_izlaz_gs	63
Слика 5.26 Хијерархијска структура модела	64
Слика 5.27 Дефиниција процесора станичног сигнално – сигурносног уећаја	65
Слика 5.28. Алгоритам процесора станичног сигнално – сигурносног уећаја	66
Слика 5.29 Дефиниција процесора пружног сигнално – сигурносног уећаја	67
Слика 5.30 Детекција и отклањање загушења	68
Слика 5.31 Шематски приказ деонице Хрпеље-Козина - Копер	70
Слика 5.32 Модел деонице Хрпеље-Козина – Копер у програму OpenTrack	70
Слика 5.33 Модел деонице Хрпеље-Козина – Копер у програму ExSpect	71
Слика 5.34 Анимација модела деонице Хрпеље-Козина – Копер	72
Слика 5.35 Део графика од 00:00 до 03:30	73
Слика 5.36 Део графика од 10:00 до 13:00	73
Слика 5.37 Број возова скренутих и заустављених у станицама по дану	76
Слика 5.38 Просечна кашњења у свим станицама	76
Слика 6.1 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, постојеће стање	78
Слика 6.2 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, решење са два гранична колосечна сигнала	80
Слика 6.3 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, решење са четири гранична колосечна сигнала	81
Слика 6.4 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, решење са два штитна колосека	82
Слика 6.5 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, решење са четири штитна колосека	83
Слика 6.6 Шематски приказ укрнице Мали Иђош Поље, решење продужене укрнице без попречних веза	85

Слика 6.7 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење продужене укрснице са попречним везама	86
Слика 6.8 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење смакнуте укрснице.....	87
Слика 6.9 Алгоритам процесора Kom_ulaz_ziht у новом моделу	89
Слика 6.10 Дефиниција процесора Kom_ulaz_form	90
Слика 6.11 Дефиниција процесора Kom_izlaz_ziht у новом моделу	91
Слика 6.12 Дефиниција процесора Kom_ulaz_zauz у новом моделу.....	92
Слика 6.13 Дефиниција процесора Kom_ulaz_zauz_pr у новом моделу	92
Слика 6.14 Дефиниција процесора Kom_izlaz_gs у новом моделу	94
Слика 6.15 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 50.....	98
Слика 6.16 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 50	98
Слика 6.17 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 50	99
Слика 6.18 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 50	100
Слика 6.19 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 100.....	101
Слика 6.20 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 100	101
Слика 6.21 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100	102
Слика 6.22 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100	103
Слика 6.23 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 150.....	104
Слика 6.24 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 150	104
Слика 6.25 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150	105
Слика 6.26 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150	106
Слика 6.27 Просечни дневни број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100.....	107
Слика 6.28 Просечни дневни број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150.....	107
Слика 7.1 Рангови алтернатива за различите методе.....	124
Слика 8.1. Шематски приказ деонице Врбас - Жедник	135

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Број путника по службеним местима на деоници Ресник – Гостун (извор: Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989)	5
Табела 2.2 Процентуални удео укрсница у укупном броју службених места (извор: Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989)	7
Табела 5.1 Трајање задржавања по моделу	74
Табела 5.2 Број диспечерских акција у периоду од 30 дана.....	75
Табела 6.1. Просечна чекања по варијантама	109
Табела 7.1 Почетна матрица одлучивања	117
Табела 7.2 Значајност критеријума.....	117
Табела 7.3 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом FUCOM методе.....	118
Табела 7.4 Нормализована матрица одлучивања применом CRITIC методе	118
Табела 7.5 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом CRITIC методе.....	119
Табела 7.6 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом ENTROPY методе	119
Табела 7.7 Вредности тежинских коефицијената критеријума по методама	120
Табела 7.8 Нормализована матрица одлучивања R.....	120
Табела 7.9 Отежана нормализована матрица одлучивања V	120
Табела 7.10 Удаљеност алтернатива од идеалног и антиидеалног решења, релативна блискост идеалном решењу и коначан ранг алтернатива	121
Табела 7.11 Нормализована матрица одлучивања R.....	121
Табела 7.12 Отежана матрица одлучивања V	121
Табела 7.13 Матрица удаљености алтернатива од граничне апроксимативне области Q	122
Табела 7.14 Рангирање алтернатива	122
Табела 7.15 Сценарији за различите вредности тежинских коефицијената критеријума	123
Табела 7.16 Рангирање алтернатива применом TOPSIS методе за различите сценарије	123
Табела 7.17 Рангирање алтернатива применом MABAC методе за различите сценарије	124
Табела 7.18 Упоредна анализа резултата применом различитих метода	124
Табела 8.1. Софтвер за симулацију Петри мрежа	131
Табела 8.2. Намена и корисна дужина колосека у станици Врбас	133
Табела 8.3. Намена и корисна дужина колосека у станици Ловћенац	133
Табела 8.4. Намена и корисна дужина колосека у Укрсници Мали Иђош Поље.....	134
Табела 8.5. Намена и корисна дужина колосека у станици Бачка Топола.....	134
Табела 8.6. Намена и корисна дужина колосека у станици Жедник	134

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

1.1 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Предмет истраживања у овој докторској дисертацији је симулационо моделирање укрсница, поређење њихових варијантних решења, као и проналажење оптималног решења укрснице и његов утицај на одвијање саобраћаја при различитим експлоатационим условима. Анализа укрсница је област која није у великој мери заступљена у домаћој и страниј литератури, при чему укрснице чине значајан елемент једноколосечних пруга као и значајан проценат службених места на једноколосечним пругама. Од њиховог капацитета умногоме зависе експлоатационе карактеристике самих пруга, при чему највећи утицај на експлоатационе карактеристике једноколосечних пруга имају различита варијанта решења.

Укрснице су службена места чија је првенствена улога регулисање саобраћаја супротних и узастопних возова на једноколосечним пругама. У којој мери ће укрсница регулисати саобраћај узастопних или супротних возова зависи углавном од опремљености међустаничних растојања сигнално – сигурносним уређајима, максималне брзине возова односно разлике у брзинама возова различитих категорија и токова брута на прузи. Осим регулисања саобраћаја, у њима се може вршити и ограничен улаз и излаз путника и утовар и истовар ствари. Иако рад укрсница на пријему и отпреми путника није занемарљив, њихов највећи значај се огледа у повећању пропусне моћи односно бољем искоришћењу капацитета једноколосечних пруга. Пошто се по правилу укрснице изграђују на најдужем, односно најнеповољнијем међустаничном растојању, то се повећање пропусне моћи огледа у скраћивању тог ограничавајућег међустаничног одстојања односно одговарајућег периода графика за то одстојање. Значај укрсница се огледа у утицају на пропусну и превозну моћ пруге, на комерцијалну брзину, времена путовања и на трошкове експлоатације.

Осим локације на прузи, за улогу и рад укрсница значајна је и њихова колосечна ситуација односно могућност вршења паралелних операција у њима. С обзиром на њихову величину и улогу на мрежи, најзначајније паралелне операције у укрсницама су једновремени улазак и једновремени улазак и излазак возова. Могућност вршења паралелних операција директно утиче на задржавања и успоравања возова на улазним сигнаlima, као и у самим укрсницама што се затим преноси и на потрошњу енергије и време путовања на међустаничним растојањима. Могућност вршења једновременог уласка односно уласка и изласка возова се може постићи на више начина: продужењем колосека у укрсници, уградњом нових колосечних веза, уградњом слепих колосека, уградњом и распоређивањем сигнала или комбинацијом ових мера. При томе је основни циљ омогућити реализацију више путева вожње који се не секу, не додирују и не поклапају. У зависности од примењених решења за паралелност операција и добијамо одговарајуће варијантно решење укрснице.

Проналазак оптималног варијантног решења у зависности од улазних параметара као што су обим саобраћаја, ред вожње возова, брзине и карактер саобраћаја се не може свеобухватно извршити аналитичким и графичким методама, па је стога предмет истраживања овог рада развијање и анализа симулационог модела укрсница применом Петри мрежа. Симулациони модели Петри мрежа могу добро да опишу функционисање и сложене зависности које се дешавају како у самим укрсницама, тако и на припадајућим једноколосечним деоницама. Њихова највећа предност је флексибилност у моделирању и могућности моделирања специфичних комплексних система и ситуација што код комерцијалних софтвера за симулацију није увек случај. Истовремено се симулациони модели различитих варијантних решења укрсница могу међусобно упоредити као и њихов утицај на експлоатационе показатеље рада укрсница. Верификација и валидација ових модела као и

результата добијених њиховом применом се може извршити комерцијалним софтверима за симулацију као што су *RailSys* и *OpenTrack*.

1.2. ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Циљ овог истраживања је анализа самих укрсница и њихове улоге у одвијању саобраћаја на једноколосечним пругама и поређење могућих варијантних решења. У циљу анализе и поређења варијантних решења развиће се модели укрсница применом Петри мрежа при чему ће модели бити креирани за сва одабрана варијантна решења. Резултати ових модела ће се анализирати и поредити применом вишекритеријумске анализе при чему је циљ проналажење оптималног решења укрснице.

Научни допринос рада се огледа у детаљној анализи једног аспекта једноколосечних пруга који је у досадашњим истраживањима често занемарен или апроксимиран. Симулација применом Петри мрежа омогућава да се изврши детаљна анализа различитих варијантних решења укрсница при чему се може експериментисати са различитим улазним подацима као што су број и редови вожње возова, услови експлоатације и други. Као излазни податак се добија оптимално инфраструктурно решење укрснице у зависности од експлоатационих параметара што представља главни научни допринос ове дисертације.

1.3. ПРЕГЛЕД ДОСАДАШЊИХ ИСТРАЖИВАЊА

Укрснице представљају значајна службена места на једноколосечним пругама од чијег распореда и броја умногоме зависи пропусна моћ пруге. Њихова улога огледа се у регулисању саобраћаја супротних и узастопних возова и од колосечне ситуације и осталих постројења зависи колико ће ту улогу укрснице успешно обављати. То је довело до појаве различитих решења укрсница у експлоатацији.

Код истраживања везаних за једноколосечне пруге најчешће се ради о прорачуну капацитета пруге односно деонице (*Lindfelt, 2010, Pachl, 2009, Harrod, 2009, Hansen et al., 2008, Harrod, 2007, Epor, 2003, Ковачевић, 1976*) или њихове пропусне моћи са посебним нагласком на станичне интервале односно интервале слеђења. За прорачун пропусне моћи се често користи UIC 406 метода (*Weik et al., 2020, Landex, 2009*) која се углавном користи за постојеће пруге и редове вожње али се уз извесне модификације може применити и на новим пругама без претходног реда вожње. Код ове методе је значајан фактор одређивање станичних интервала односно минималних станичних интервала и интервала слеђења (*Jamili, 2018*). Капацитет једноколосечне пруге се такође може мерити односом броја возова по смеровима и дозвољеног кашњења (*Li et al., 2017*). Са друге стране капацитет односно искоришћење капацитета пруга се може посматрати и у функцији кашњења односно дозвољеног кашњења возова (*Qi et al., 2016, Li et al., 2014, Mattsson, L. G., 2007, Yuan et al., 2007*).

Као решење за повећање капацитета често се предлаже дуплирање колосека, било као парцијално само на критичним деоницама или комплетно. Главни проблем лежи у избору деонице на којој ће бити извршено дуплирање колосека односно избор критеријума за одређивање критичних деоница (*Burdet, 2016*). Парцијално дуплирање односно изградња другог колосека само на појединим колосецима се предлаже као јефтиније и исплативије решење за пруге где је изградња скупа (*Castillo et al., 2015*).

Када су у питању инфраструктурна истраживања везана за укрснице, она се генерално могу поделити на она везана за пруге у Северној Америци и она везана за пруге у Европи. Различити приступи и методологије прорачуна капацитета приказани су у (*Pouryousef et al., 2015*). Главна разлика је у могућности вршења паралелних операција односно једновременог уласка возова у укрснице. На пругама у Северној Америци не постоји пут претрчавања па

самим тим у већини случајева постоји могућност једновременог уласка два воза у укрсницу, што у Европи није случај. Из тог разлога инфраструктурна истраживања пруга у Северној Америци се не баве у великој мери варијантним решењима укрсница и паралелношћу операција у њима већ њиховим распоређивањем на прузи и потребним дужинама колосека (*Shih et al., 2014, Higgins et al., 1996*).

Истраживања везана за укрснице на пругама у Северној Америци су бројнија него истраживања у Европи због чињенице да проценат једноколосечних пруга у САД чини око 63% укупне дужине пруга (*Sogin et al., 2013*). На пругама у Северној Америци фокус истраживања је на оптималним дужинама укрсница како би се укрштавања изводила без заустављања. То је и разумљиво због чињенице да су возови на тим пругама и до десет пута тежи него возови у Европи па је самим тим утрошак енергије за њихово покретање и заустављање знатно већи. Потребна дужина укрсница зависи од низа фактора где су најчешће узимани у разматрање карактер саобраћаја, брзине возова кроз укрсницу у правац и скретање као и жељена робусност реда вожње (*Atanassov et al., 2015a, Atanassov et al., 2015b, Fransoo et al., 1995, Petersen et al., 1987*). Варијантна решења укрсница се ретко анализирају и најчешће се у обзир узимају варијанте укрсница са само једним колосеком поред главног пролазног мада постоје и изузеци. Једно од првих и чешће цитираних је (*Frank, 1966*) у коме се предвиђају две варијанте укрсница, Т1 са само једним колосеком поред главног пролазног и Т2 са два колосека поред главног пролазног. При томе је показано да варијанта Т2 омогућава већи капацитет пруге при одговарајућим диспечерским одлукама.

У Европи се за омогућавање једновременог уласка возова у укрснице морају вршити одређене модификације. Те модификације представљају измене колосечне ситуације или сигнално – сигурносних уређаја односно распоређивање сигнала, а често и обоје. Овај проблем разрађен је у (*Landex, 2009, Landex, 2008, Landex et al., 2007*) где се упоређују варијанте укрснице са и без могућности једновременог уласка возова. Овде се наводи да како би се омогућио једновремени улазак возова у укрсницу мора да постоји одређено сигурносно растојање иза излазног сигнала. Ово растојање се може креирати изградњом слепог колосека иза излазног сигнала на који би водио пут претрчавања или померањем излазног сигнала од скретнице на којој се дешава конфликт при једновременом уласку два воза. Добитак у времену настао овим модификацијама зависи од положаја сигнала, врсте скретница и брзина возова.

У домаћој литератури укрсницама је највише пажње посвећено у књизи (*Janjić, 1983*) где је детаљно обрађен значај укрсница, положај на мрежи, врсте и постројења. Овде је осим класичних укрсница у примени на нашим пругама обрађена и тема укрсница за укрштавање без заустављања.

1.4. ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

Полазне хипотезе овог рада су да се сложене зависности које постоје при одвијању саобраћаја у укрсницама не могу свеобухватно описати аналитичким и графичким методама. Симулациони модели Петри мрежа могу добро да опишу функционисање и сложене зависности које се дешавају како у самим укрсницама, тако и на припадајућим једноколосечним деоницама. Истовремено се симулациони модели различитих варијантних решења укрсница могу међусобно упоредити као и њихов утицај на експлоатационе показатеље рада укрсница. Резултати добијени овим симулационим моделима се затим могу упоредити са онима добијеним путем комерцијалних софтвера за симулацију.

1.5. СТРУКТУРА ДИСЕРТАЦИЈЕ

У складу са темом, представљеним предметом и научним циљем истраживања, поред општих делова (резиме на српском и енглеском језику, кључне речи, списак слика и табела, литература и прилози), дефинисана је следећа оквирна структура докторске дисертације:

- 1) **Уводна разматрања** – у овом делу биће образложен мотив за избор теме, али и представљени предмет и циљ истраживања, ко и досадашња истраживања на ову тему;
- 2) **Укрснице** – у овом делу биће детаљно представљене укрснице као и њихова варијантна решења;
- 3) **Симулационо моделирање** – у овом делу биће представљене теоријске поставке симулационог моделирања као и њихова примена у железничком саобраћају. Посебан акценат је стављен на симулацију железничког саобраћаја применом Петри мрежа;
- 4) **Симулационо моделирање укрсница** – у овом делу биће представљено симулационо моделирање одабране деонице једноколосечне пруге са укрсницама као и представљени и анализирани добијени резултати;
- 5) **Избор најповољније варијанте укрснице методом вишекритеријумског одлучивања** – у овом делу ће одабраном методом вишекритеријумског одлучивања бити одабрано најповољније варијантно решење укрснице;
- 6) **Закључак и предлог даљег истраживања** – у овом делу ће бити дата закључна разматрања као и предлог даљег истраживања.

2. УКРСНИЦЕ

Укрснице су службена места чија је првенствена улога регулисање саобраћаја супротних и узастопних возова на једноколосечним пругама. У којој мери ће укрсница регулисати саобраћај узастопних или супротних возова зависи углавном од опремљености међустаничних растојања сигнално – сигурносним уређајима, максималне брзине возова односно разлике у брзинама возова различитих категорија и токова брута на прузи. Осим регулисања саобраћаја, према Правилнику 2, у њима се може вршити и ограничен улаз и излаз путника и утовар и истовар ствари

И док је утовар или истовар ствари у укрсницама ретка појава, улаз и излаз путника је у појединим укрсницама присутан у знатној мери па чак и већи него у станицама на истој прузи. Као пример се може узети пруга (Београд) – Ресник – Бар на подручју ЖТП Београд за период 1984 – 1989. године дат у табели 2 (*Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989*). Ова пруга је узета као пример због значајно већег броја укрсница у односу на укупан број службених места него остале пруге на подручју ЖТП Београд.

Табела 2.1 Број путника по службеним местима на деоници Ресник – Гостун (извор: Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989)

Година Служ. место	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Бела Река	21864	28375	26906	25727	23608	192160
Барајево укр.	7074	6962	6034	4579	3596	29386
Велики Борак укр.	8556	8147	6459	6488	6696	63163
Степојевац	4416	4130	3680	2424	3026	7220
Вреоци	5181	6003	5713	4883	4461	13562
Лазаревац	19188	20395	24205	22300	20929	26008
Лајковац	46885	58272	68026	62830	62023	61533
Словац	3896	5034	6278	6622	5949	6741
Дивци	6987	8767	9877	10576	10532	14156
Ваљево	128570	160729	179792	180564	162511	211510
Ваљевски Градац укр.	0	0	0	0	0	0
Ластра	5880	5963	4807	3681	3569	3122
Самари стај.	12500	12960	12240	9959	9696	9084
Ражана	8368	8180	8779	8220	9187	9368
Косјерић	81956	85126	84624	77505	71221	72732
Каленић	4504	5631	6330	5169	5319	6858
Пожега	248791	246902	247804	178570	201299	209277
Севојно	14030	15938	16651	15844	16883	17299
Титово Ужице теретна	0	8524	14305	12331	10078	9572
Титово Ужице	389563	429324	444623	372833	403556	388020
Стапари укр.	20867	20530	19388	16528	14864	12434
Сушица укр.	6722	6925	6990	6509	5777	5919
Златибор	19602	18158	18241	16551	13439	10744
Јабланица укр.	3030	2845	3051	2773	2201	1999
Штрпци укр.	6721	6644	6466	4773	4548	4045
Прибој	263282	274587	276478	258837	236937	237974

(наставак)

Бистрица на Лиму	4925	5048	3261	3257	2836	2187
Пријепоље	181589	188429	198805	184300	176527	179634
Пријепоље теретна	0	11573	23144	16959	19403	19783
Лучице укр.	5586	5343	5547	4069	4381	3894
Бродарево укр.	17508	17772	21965	18810	19066	16820
Гостун	4946	5773	6123	6109	6079	4561

Из табеле се може видети да се број путника није драстично мењао по годинама па се за поређење може узети било која година из наведеног периода. Оно што је заједничко је да је број путника у појединим укрсницама знатно већи него у појединим, најчешће суседним станицама. На пример, у 1984. години број путника у укрсници Стапари је износио 20867 док је у истој години број путника у станицама Степојевац, Вреоци, Словац, Дивци, Ластра, Каленић, Бистрица на Лиму и Гостун био четири пута мањи. Слични подаци се добијају и када се за поређење узме укрсница Бродарево где је у 1984. години било 17508 путника. Чак и када се за поређење узму укрснице Барајево, Велики Борак, Сушица, Штрпци и Лучице, број путника у њима је већи или приближан броју путника у станицама Степојевац, Вреоци, Словац, Дивци, Ластра, Каленић, Бистрица на Лиму и Гостун. Приближни подаци се добијају када се за поређење узму остале године из овог периода.

2.2. БРОЈ И ПОЛОЖАЈ УКРСНИЦА НА МРЕЖИ

Број укрсница зависи првенствено од карактеристика пруге односно мреже пруга као и од распореда насељених места на подручју кроз које пруга пролази. Други критеријум је карактер саме мреже и организација саобраћаја

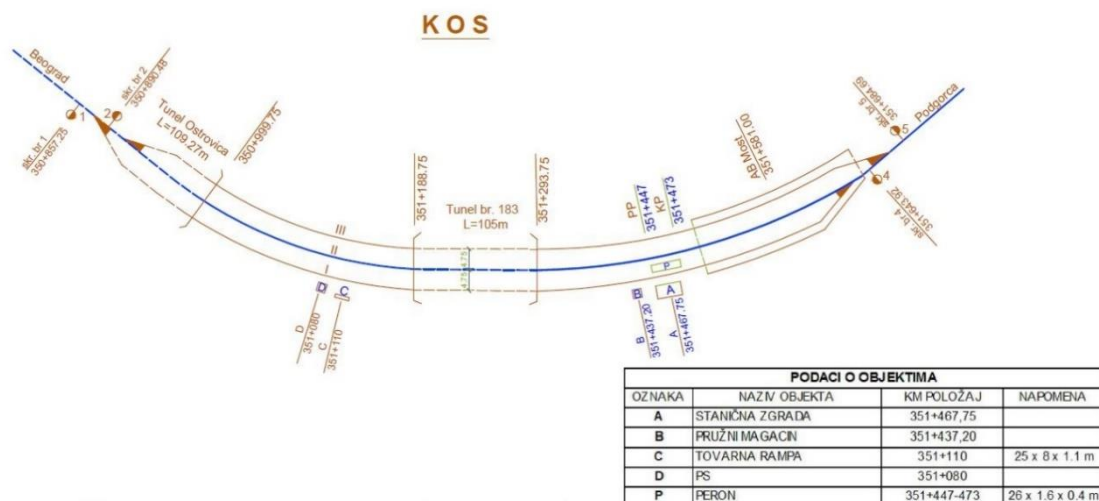
Појава укрсница у гушће насељеним равничарским подручјима је релативно ретка појава док на пругама које пролазе кроз брдско – планинска подручја укрснице чине значајнији проценат службених места. На примеру мреже Југословенских железница за период 1984 – 1989 датом у табели 2.1 (*Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989*) се може уочити тај тренд. Овај период је узет јер је до тог периода већ изграђена већина пруга на подручју бивше Југославије па ови проценти у великој мери осликавају стање које имамо и данас. Када се у обзир узму ЖТП/ЖТО/ЖГ чије пруге су претежно у равничарским подручјима као што је ЖТО Нови Сад или ЖТО Приштина број укрсница је испод 5% од укупног броја службених места док у ЖТП/ЖТО/ЖГ чије се пруге налазе у планинским крајевима као што је ЖТО Сарајево или ЖТП Титиград тај проценат расте и до 23,53%. Други фактор који утиче на број и распоред укрсница је и старост пруга на одређеном подручју при чему је код пруга изграђених крајем XIX и почетком XX века принцип трасирања био да се повеже што више насељених места чак и на неповољнијим теренима при чему су техничке и експлоатационе карактеристике пруга биле неповољније, док код пруга грађених у другој половини XX века више вођено рачуна о техничким и експлоатационим карактеристикама пруга, па су самим тим пруге грађене и на подручјима са малим бројем насељених места односно прилично удаљене од насељених места како би се смањила дужина пруге односно постигле боље карактеристике у погледу нагиба и полупречника кривина. То се може видети на примеру ЖГ Љубљана на чијем подручју су пруге углавном брдско – планинског карактера али је проценат укрсница међу најмањим од свих ЖТП/ЖТО/ЖГ.

Табела 2.2 Процентуални удео укрсница у укупном броју службених места (извор: Статистика Заједнице ЈЖ, 1984-1989)

ЖТП/ЖТО/ЖГ	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Београд	6.14%	6.08%	5.91%	6.32%	6.32%	6.32%
Нови Сад	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%	1.33%
Приштина	3.08%	0.00%	0.00%	4.62%	4.62%	4.35%
Љубљана	2.49%	2.47%	2.47%	3.50%	3.46%	3.13%
Сарајево	10.39%	10.08%	9.96%	9.96%	9.96%	6.70%
Скопље	5.83%	5.08%	5.08%	6.78%	5.79%	5.79%
Титоград	23.53%	21.62%	21.62%	20.00%	19.51%	17.39%
Загреб	5.82%	4.67%	4.44%	4.43%	5.20%	6.14%
Укупно	5.10%	5.15%	5.05%	5.53%	5.50%	5.37%

Када се посматра једна пруга број и положај укрсница на железничкој мрежи углавном зависи од потребне пропусне моћи пруге. Изградња нових укрсница захтева одсеке пруге који ће бити у хоризонтални ондосно блажем нагибу, како би и плато укрснице био у хоризонтални или блажем нагибу. Код старијих пруга се о томе није водило рачуна па је долазило до тешкоћа при накнадној изградњи укрсница. За разлику од њих, на прузи Београд – Бар, која је новијег датума, се и о томе водило рачуна те су за укрснице Ваљевски Градац, Самари, Узићи и Бранешци, које су изграђене тек по пуштању пруге у саобраћај, неке чак и двадесет пет година по пуштању пруге у саобраћај, при изградњи пруге били изграђени станични платои. Станични платои, односно комплетан доњи строј је изграђен и за укрснице Рибница, Прибојска Бања, Златица и Црмница, али оне још нису комплетно изграђене јер за њима због тренутног малог обима саобраћаја на прузи, не постоји потреба. Пруга Београд – Бар је добар пример за пројектовање укрсница, како због свог планинског карактера тако и због великог процента укрсница у односу на станице.

Распоред укрсница треба да је такав да заједно са станицама деле пругу на међустанична растојања иста по дужини или возним временима. Најчешћи фактори су нагиб пруге и брзина на прузи па на деловима пруге са блажим нагибом и већим брзинама растојања укрсница треба да су већа него на деловима пруге са већим нагибом и мањим брзинама. Овим се постиже да се на свим одсечима односно међустаничним растојањима омогућава приближно иста пропусна моћ. На брдским и планинским пругама чест је случај да се укрснице морају лоцирати на неповољним местима као што су мостови, вијадукти и тунели, често и у кривинама. Такав је рецимо случај са укрсницама Сушица и Штрпци у Србији или Кос и Лутово у Црној Гори. Најбољи пример неповољног лоцирања укрснице узрокованог тешким теренским приликама представља управо укрсница Кос, чији почетак и средина су у тунелу, крај на мосту, а истовремено је целом дужином у кривини (слика 2.1).

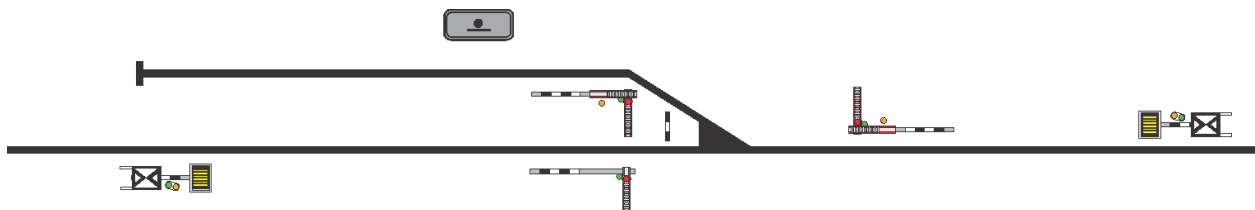


Слика 2.1 Шема укрснице Кос (извор: Жељезничка инфраструктура Црне Горе)

2.3. ГЛАВНА ПОСТРОЈЕЊА УКРСНИЦА

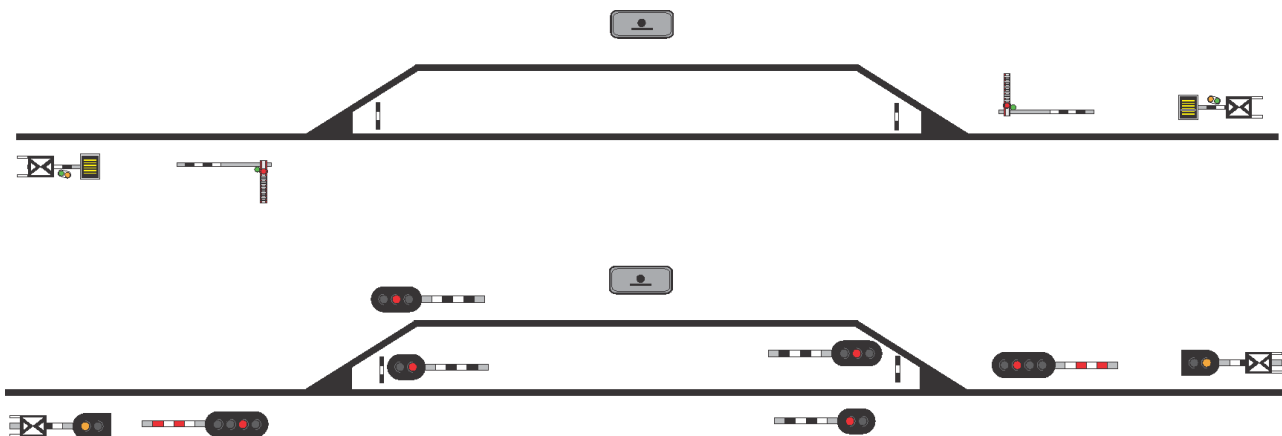
Главна постројења укрсница представљају колосеци, колосечне везе и одређена сигнално – сигурносна и телекомуникациона постројења, уређаји и опрема. Осим тога укрснице на ИЖС (ЈЖ) поседују и службену просторију и насуте, или чешће монтажне пероне а у зависности од опремљености сигнално – сигурносним уређајима и одвојену техничку (релејну) просторију.

За обављање укрштавања односно претицања неопходан је бар један колосек који ће бити везан бар са једне стране на главну пругу (слика 2.2). Укрштавања се врше тако што један воз маневарском возњом улази на слепи колосек и пропушта воз који пролази главном пругом. Ово решење самим тим представља решење из нужде (Janjić, 1983).



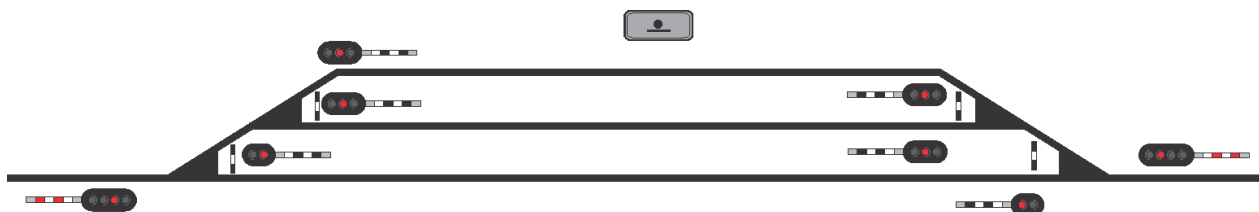
Слика 2.2 Решење укрснице са слепим колосеком

Данас се за укрсницу захтева као минимум бар један колосек који може да прими најдужу композицију на прузи, који је обострано везан за једноколосечну пругу при чему је укрсница са обе стране снабдевена улазним сигналимa и предсигналимa. На пругама са савременим сигнално – сигурносним уређајима уређајима као што су Београд Центар – Ниш – Прешево – (држ. гран.), Београд Центар – Врбница – (држ. гран.) и Стара Пазова – Суботица – (држ. гран.) ове укрснице су опремљене и излазним сигналимa који су у зависности са скретницама као и двозначним улазним сигналимa (слика 2.3).



Слика 2.3 Укрсница са обострано везаним колосеком

У пракси је чешћи случај је да се укрснице граде са два колосека обострано везана за главну пругу, како би се у њима истовремено могла вршити два укрштавања односно претицања. Избор зависи од жељене пропусне моћи пруге, односно потребе за кретањем возова на прузи у сноповима као и потребе за укрштавањем снопова возова. Већина укрсница на прузи Београд – Бар је изграђена односно пројектована са два колосека поред главног пролазног (слика 2.4).



Слика 2.4 Укрсница са два обострано везана колосека

Према (Janjić, 1983) за саобраћај до 12 пари возова на дан довољан је један обострано везан колосек у укрсници поред главног пролазног а за саобраћај преко 24 пара возова на дан обавезна су два колосека поред главног пролазног. Ове вредности треба узети са одређеном резервом јер колико ће колосека бити неопходно да поседује нека укрсница умногоме зависи од планираног обима и организације саобраћаја на датој прузи, где се у првом реду појављују потреба и могућности организовања саобраћаја возова у сноповима.

2.4. ТИПОВИ УКРСНИЦА

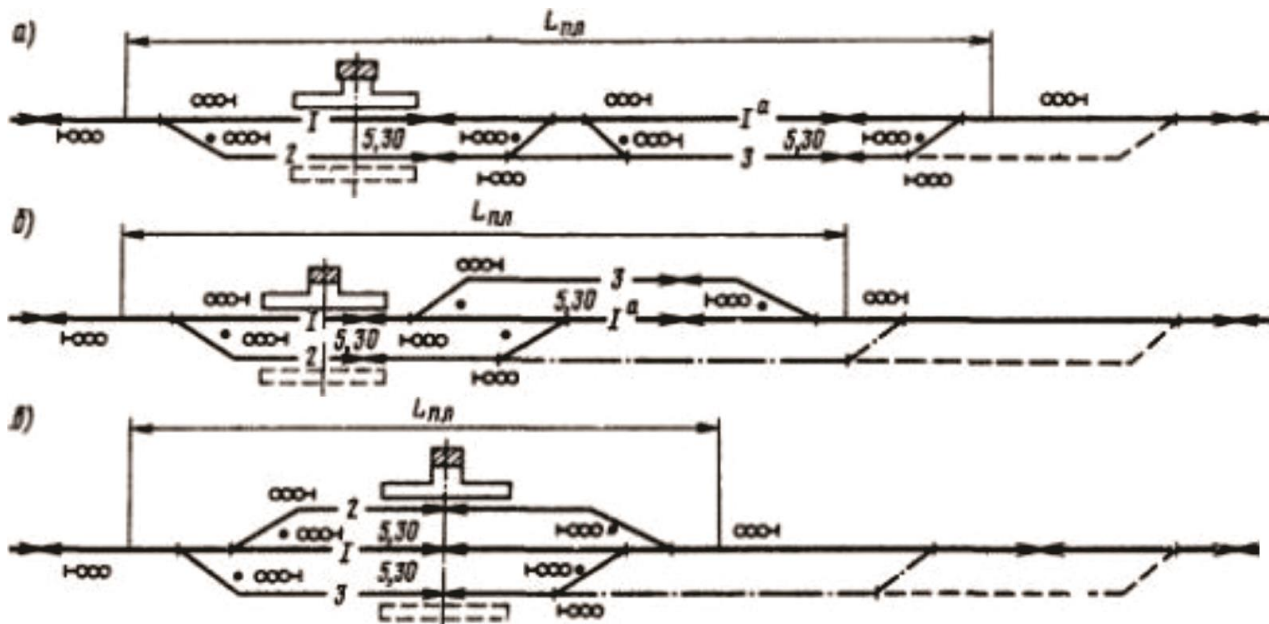
У зависности од главних постројења у литератури се може пронаћи више типова укрсница. Према (В. К. Соколов et al., 2002) укрснице према распореду колосека можемо поделити на три типа: попречне, подужне и полуподужне.

Према овом извору попречне укрснице су најчешће примењен тип укрсница на пругама Руске Федерације. Њихове предности су мала дужина станичног платоа, компактност приликом управљања односно постављања путева вожње и универзалност у смислу да се сви колосеци могу користити за све возове из оба правца. Највећи недостатак је немогућност истовременог пријема возова. Овај недостатак се може у неким случајевима откконити уградњом штитних колосека (штулц) односно граничних колосечних сигнала.

Укрснице са подужним и полуподужним распоредом колосека захтевају најмање дуплу дужину станичног платоа што је на брдско – планинским пругама најчешће тешко изводљиво. Отежавајућа околност је и централизовано управљање станицом што је посебно изражено код ручног постављања скретница или код механичке станичне централизације. Са друге стране

ово решење омогућава једновремени улазак возова из супротних смерова а често и укрштавања без заустављања.

Према (М. М. Филипов *et al.*, 1991) укрснице према распореду колосека такође можемо поделити на три типа: попречне, подужне и полуподужне (слика 2.5).



Слика 2.5 Укрснице са подужним (а), полуподужним (б) и попречним (в) распоредом колосека (извор М. М. Филипов *et al.*, 1991)

Попречне укрснице су стандардни тип и препоручљиво је да се граде на пругама III и IV категорије Руске Федерације а на пругама I и II категорије само код отежаних топографских услова.

Варијанта са продуженим или полупродуженим распоредом колосека у одређеној мери смањује дужину суседног међустаничног растојања и отвара могућност укрштавања дужих возова што повећава капацитет пруге. Ова варијанта је такође погодна за пруге где се у блиској будућности планира изградња другог колосека односно где се планира саобраћај дужих возова. На пругама са већинским теретним саобраћајем опремљеним аутоматским пружним блоком, уметање ових продужених укрсница је постала уобичајена пракса у РФ. Оне треба да омогуће не само укрштавања без заустављања возова који приспеју у исто време већ и да њихова дужина буде таква да омогући укрштавања без заустављања и оних возова чија времена доласка се разликују. Најчешће се колосеци у таквим укрсницама деле по смеровима. Полупродужени распоред се користи када желимо да обезбедимо додатну дужину колосека за убрзавање возова или када се поред колосека налази товарна рампа.

Према (Калинин В. К. *et al.*, 1986) такође наводе три типа укрсница, подужне, полуподужне и попречне. Најчешћа је ситуација да постоје два колосека осим главног пролазног да би се омогућила истовремена укрштавања и претицања. Дужина колосека код укрсница попречног типа треба да је 1200 – 1600 метара а подужног типа 2000 – 2800 метара.

Укрснице можемо класификовати и по другим критеријумима као што су положај укрснице у плану и профилу, број колосека, распоред колосека у односу на главни пролазни колосек, распоред колосека у односу на осу станице, могућност једновременог уласка возова, могућност укрштавања без заустављања, опремљеност сигнално сигурносним, телекомуникационим и другим постројењима. Са становишта експлоатационих карактеристика као што је пропусна моћ најважнији критеријуми за класификацију укрсница су распоред колосека и карактер рада. Распоред колосека се посматра како у односу на осу

станице тако и у односу на главни пролазни колосек. Карактер рада представља могућност једновременог уласка супротних возова и могућност укрштавања без заустављања.

Код укрсница могу се разликовати два типа према карактеру рада, односно:

- Укрснице за укрштавање са заустављањем возова
- Укрснице за укрштавање без заустављања возова

Такође према положају колосека у односу на главни пролазни колосек укрснице могу бити:

- Укрснице са попречним ширењем односно паралелним распоредом колосека
- Укрснице са подужним ширењем односно укрснице са смакнутим колосецима

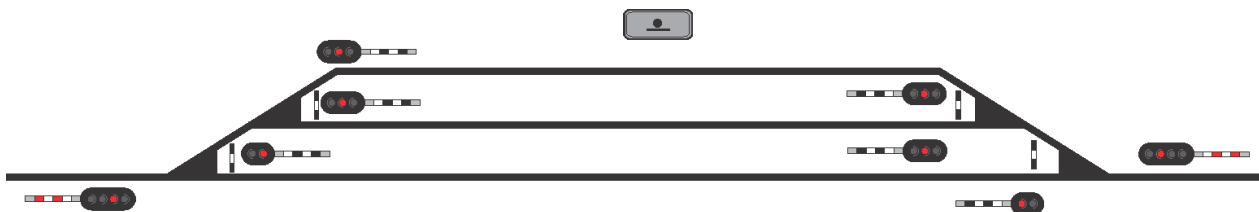
Комбинацијом ових критеријума добијамо четири карактеристична решења укрсница у примени и то:

- 1) Класичне укрснице
- 2) Модификоване класичне укрснице
- 3) Подужне укрснице
- 4) Продужене укрснице

2.4.1. КЛАСИЧНЕ УКРСНИЦЕ

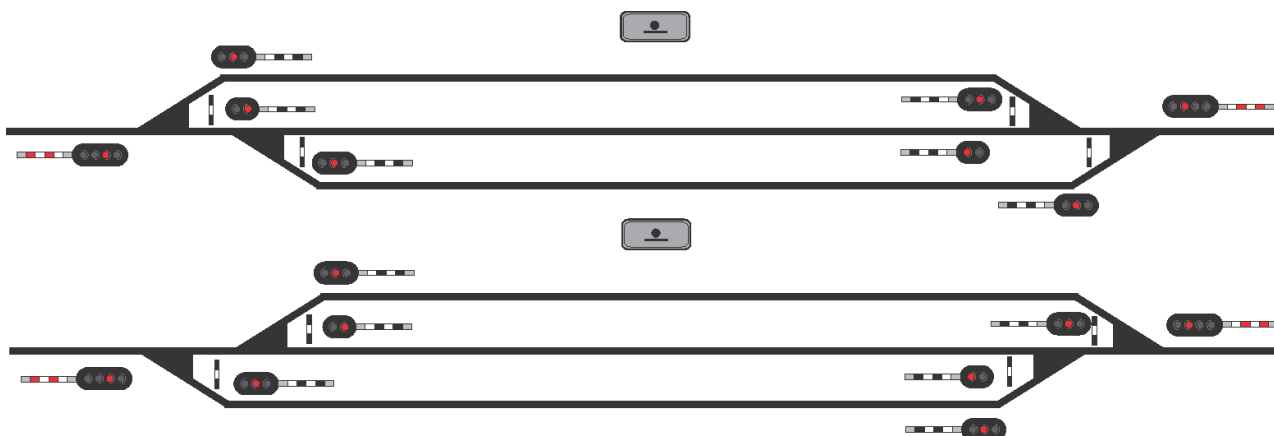
На мрежи ИЖС преовладавају укрснице класичног типа са три колосека који могу бити распоређени у односу на главни пролазни колосек на следеће начине:

- 1) Укрсница са оба колосека са једне стране главног пролазног колосека (слика 2.6)



Слика 2.6 Укрсница са оба колосека са једне стране главног пролазног колосека

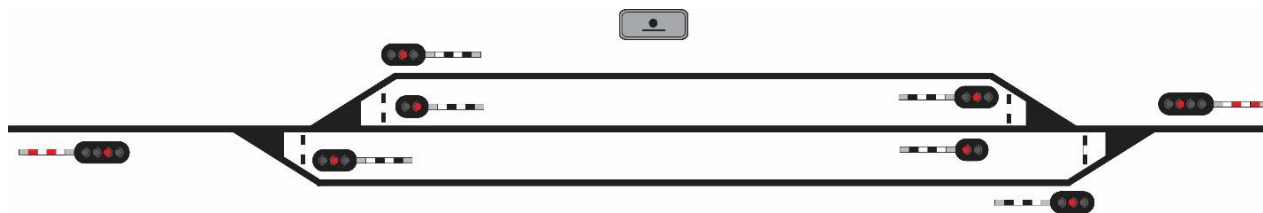
- 2) Укрсница са по једним колосеком са сваке стране главног пролазног колосека (слика 2.7)



Слика 2.7 Укрсница са по једним колосеком са обе стране главног пролазног колосека

Решења где је средњи колосек главни пролазни се чешће користе него решења где је крајњи колосек главни пролазни. У решењу са средњим главним пролазним колосеком имамо два дужа колосека и пролазни колосек који је најкраћи док код станице са крајњим главним пролазним колосеком преостала два колосека су знатно краћа него главни пролазни. На ИЖС се у оваквим укрсницама најчешће користе скретнице полупречника 200 m и преломног угла

6⁰ чиме је брзина у скретање ограничена на 40 km/h. Постоји и треће решење са средишњим пролазним колосеком где се распоредом колосечних веза добија да су главни пролазни колосек и колосек са једне стране главног пролазног колосека исте дужине док је колосек са друге стране главног пролазног колосека дужи. Оваква укрсница се у пракси најређе користи и приказана је на слици 2.8.

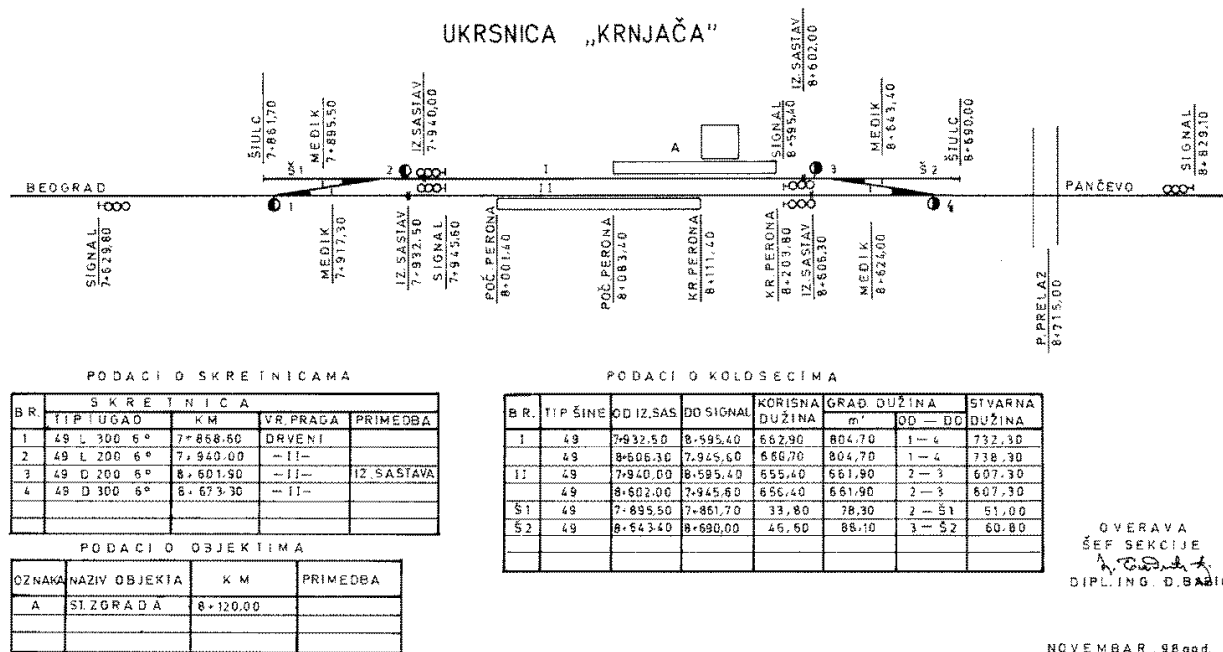


Слика 2.8 Укрсница са краћим главним пролазним и колосеком са једне стране

2.4.2. МОДИФИКОВАНЕ КЛАСИЧНЕ УКРСНИЦЕ

Недостатак класичних укрсница који се огледа у немогућности истовременог пријема два воза може се решити на више начина. Најефикаснији начин је претварање класичне укрснице у продужену укрсницу односно укрсницу за укрштавање без заустављања. Са друге стране тај метод захтева знатна улагања упоредива са изградњом нове укрснице. Други начин је изградња кратких штитних колосека на које би водио пут претрчавања („штулц“) или уградња граничних колосечних сигнала на одређеном растојању испред излазних сигнала. За оба решења постоји низ комбинација а такође је могуће комбиновати ова два решења међусобно.

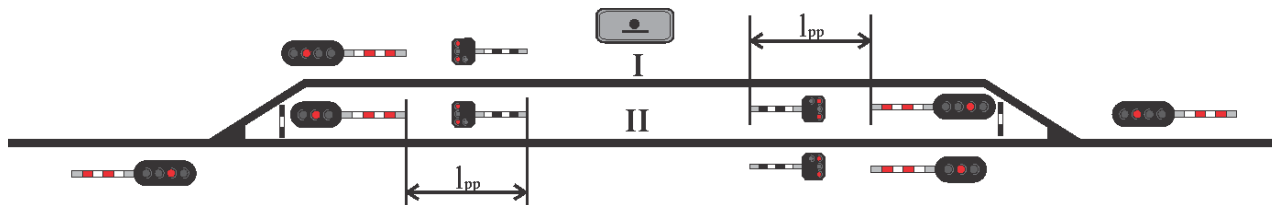
Кратки слепи колосеци, штитни колосеци или штулц треба да испуне неколико услова да би могли да се користе као бочна заштита. Сматра се да штитни колосек треба да буде дуг најмање 100 m рачунајући од излазног сигнала. Штитни колосек се гради по могућству у успону а преко шина се засипа песак. Изолација улазне скретнице се у том случају продужује све до почетка штитне скретнице а не као обично до иза међика за 3, односно 6 метара. На железничкој мрежи у Немачкој дужина штитних колосека односно растојање грудобрана од излазног сигнала је у функцији од максималне дозвољене брзине на колосеку чији је продужетак штулц. Штитни колосеци се на нашој мрежи користе углавном на распутницама и у одвојним станицама. Када су у питању укрснице примена штитних колосека је такође ретка појава. Кратки слепи колосеци постоје у низу укрсница и мањих станица као што су Зуце, Липе, Чортановци и Бранешци али се они користе за смештај пружних возила и на њих не води пут претрчавања па се самим тим не користе за бочну заштиту. Једина укрсница на мрежи ЖС на којој су коришћени штитни колосеци је била Крњача на прузи Београд Центар – Панчево Главна станица – Вршац (слика 2.9). Ова укрсница је по завршетку радова на изградњи другог колосека на деоници Распутница Панчевачки мост – Панчево Главна станица постала мимоилазница, иако се у материјалу реда вожње и даље води као укрсница.



Слика 2.9 Шема некадашње укрснице Крњача (извор: Инфраструктура железнице Србије)

Код ове укрснице је био испуњен услов да је штитним колосеком обезбеђен пут претрчавања од најмање 100 m односно да је удаљеност од излазног сигнала до краја штитног колосека око 100 метара. При уласку возова на први колосек из оба смера пут претрчавања води на следеће колосеке, чиме је обезбеђена и бочна заштита возњи у истом смеру са другог колосека.

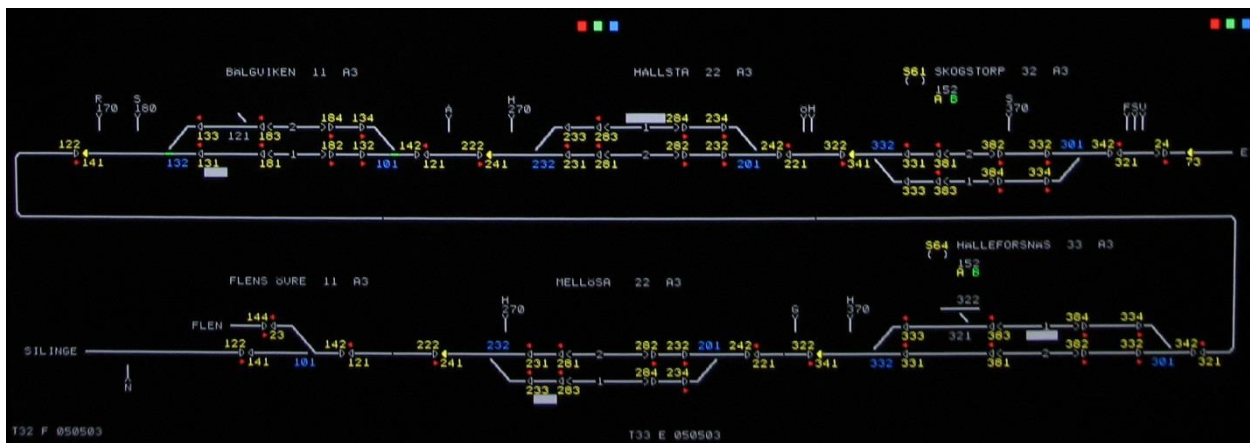
Као алтернатива опремања укрснице штитним колосецима јавља се решење са опремањем укрснице граничним колосечним сигналимa који би се уграђивали на дужини пута претрчавања (l_{pp}) испред излазних сигнала (слика 2.10). Пут претрчавања мора бити минимално 50 m, а препоручљиво је да буде 100 – 300 m.



Слика 2.10 Укрсница са граничним колосечним сигналимa

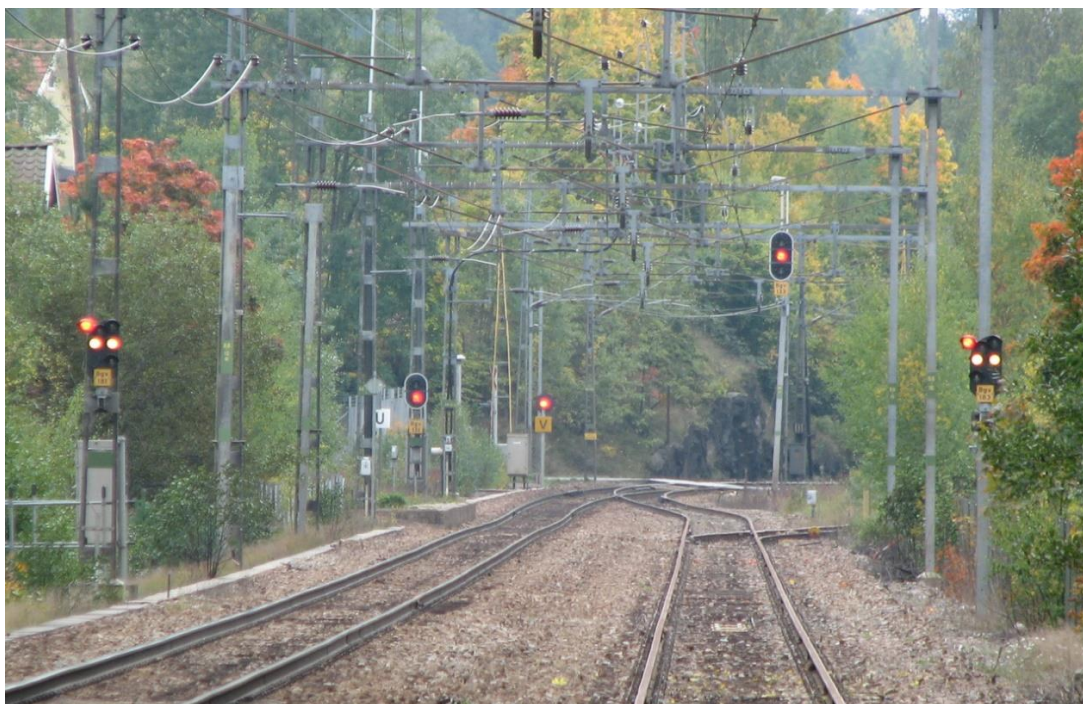
Решење са граничним колосечним сигналимa испред излазних сигнала чија је функција да обезбеде пут претрчавања само до излазног сигнала није примењивано у укрсницама на ИЖС, осим у једном периоду у станици Београд Центар и то на колосецима 9 и 10. У том периоду сав саобраћај се вршио на тим колосецима, па је често постојала потреба за једновременим уласком односно уласком и изласком возова. Пошто због теренских прилика није била могућа уградња штитних колосека примењено је решење са граничним колосечним сигналимa и растојањем између граничних колосечних сигнала и излазних сигнала односно путем претрчавања од 50 m. Приликом наставка изградње станице Београд Центар ово решење је задржано и сада је примењено на колосецима 3, 8 9 и 10 а по завршетку изградње колосека 1 и 2 биће примењено и на њима.

Гранични колосечни сигнали испред излазних сигнала у укрсници је решење које се често примењује у Шведској (слика 2.11). На слици је приказано неколико укрсница на једноколосечној прузи *Eskilstuna – Flen* у источној Шведској како су приказане на панору телекоманде у ТК центру *Norrköping*.



Слика 2.11 Укрснице на прузи Eskilstuna – Flen

Изглед граничних колосечних сигнала и излазних сигнала у једној од приказаних станица, Bälgviken, (горњи леви угао на слици 2.11) приказан је на слици 2.12 У већини случајева као гранични колосечни сигнали се користе патуљasti главни сигнали на високом стубу. Патуљasti главни сигнали су решење примењено у Шведској и представљају спој главног и маневарског сигнала у патуљастој форми. Ови сигнали се могу користити само унутар станичног подручја.



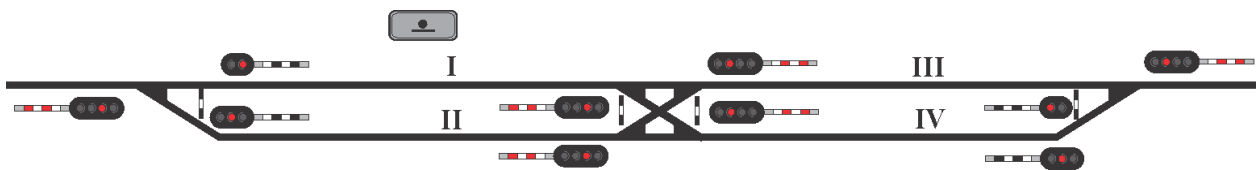
Слика 2.12 Излазни и гранични колосечни сигнали у станици Bälgviken

Удаљеност граничних колосечних сигнала од излазних сигнала је око 200 метара што одговара стандардној дужину пута претрчавања у Шведској. И гранични колосечни сигнали и излазни сигнали су опремљени бализама, па се на тај начин повећава безбедност саобраћаја.

2.4.3. ПОДУЖНЕ УКРСНИЦЕ

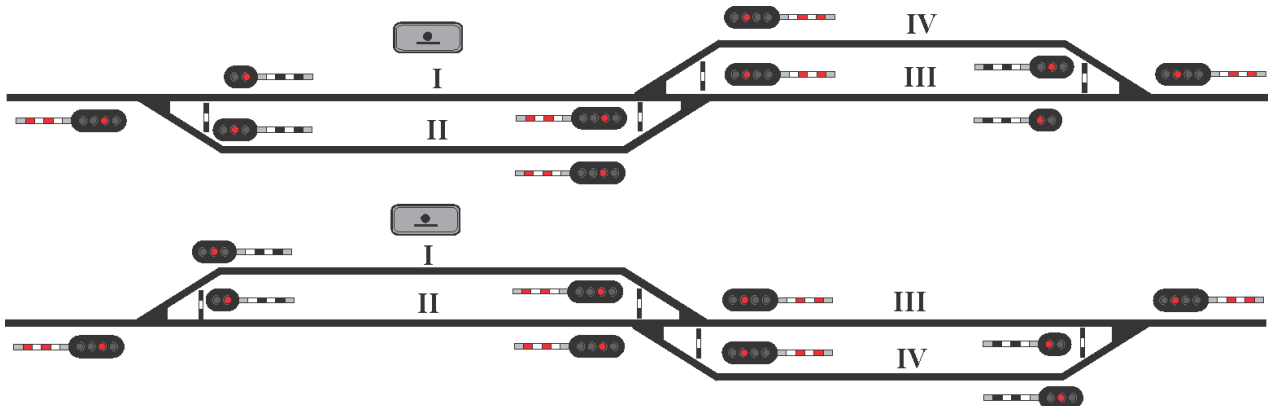
Укрснице са подужним ширењем односно укрснице са смакнутим колосецима не развијају се по ширини као класичне већ се развијају у дужину. Код њих колосеци могу бити распоређени на један од три следећа начина:

- 1) Колосеци за укрштавање постављени су са једне стране главног пролазног колосека (слика 2.13)



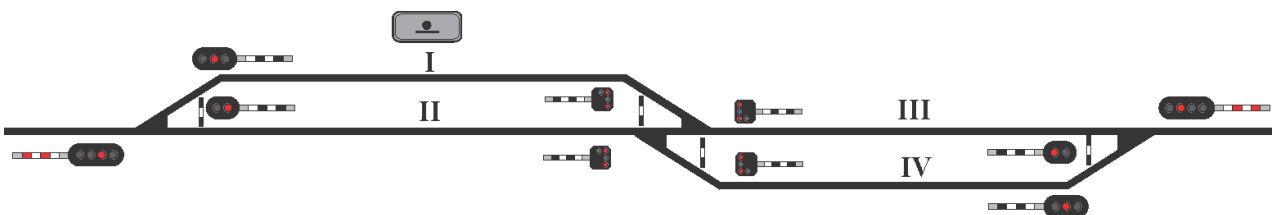
Слика 2.13 Колосеци за укрштавање са једне стране

- 2) Колосеци за укрштавање постављени су са супротне стране главног пролазног колосека (слика 2.14)



Слика 2.14 Колосеци за укрштавање са супротне стране

Уколико је удаљеност од улазног сигнала па до сигнала на првом или другом колосеку у смеру вожње већа или једнака дужини зауставног пута (односно минимум 1000 m код пруга опремљених аутоматским пружним блоком), као и удаљеност од излазних сигнала на првом или другом колосеку и излазних сигнала на трећем или четвртном колосеку у смеру вожње тада се на крајевима колосека 1, 2, 3 и 4 могу уградити главни сигнали. Исти принцип важи и за супротан смер. Истовремено се овим омогућавају и укрштавања без заустављања уколико се супротни возови нађу истовремено испред улазних сигнала крећући се истом или приближном брзином. Уколико је удаљеност мања од дужине зауставног пута тада се на крајевима колосека 1, 2, 3 и 4 уграђују гранични колосечни сигнали (слика 2.15), при чему се код краћих растојања између улазног и граничног колосечног сигнала на улазном сигналу уграђује показивач брзине.



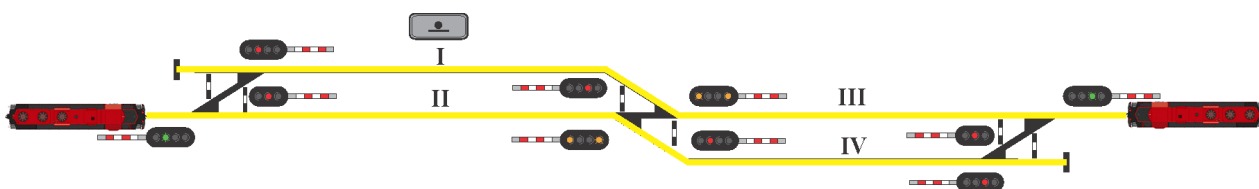
Слика 2.15 Решење подужне укрснице са граничним колосечним сигнализацијама

Код решење када су продужене укрснице довољно дугачке да се могу вршити укрштавања без заустављања онда се оне сматрају посебном врстом укрсница које се називају развучене или америчке укрснице. Овај тип укрсница се сматра зачетком двоколосечне пруге и његове предности долазе до изражаја на јако оптерећеним једноколосечним пругама (Janjić, 1983).

2.4.4. ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ

Продужене укрснице односно укрснице за укрштавање без заустављања представљају посебно решење класичних или подужних укрсница код којих се користе колосеци веће дужине. Минимална дужина колосека мора бити једнака најмање дужини два просторна одсека односно минимално 950 m. Како би се у потпуности искористиле могућности ових укрсница односно како би возови пролазили без заустављања или успоравања, потребно је да се омогући једновремени улазак возова. Предуслов за једновремени улазак возова је да се путеви вожње, где су укључени и путеви претрчавања та два воза не секу, не додирују и не поклапају као и да се супротни возови истовремено налазе испред улазних сигнала односно да у исто односно приближно исто време улазе у укрсницу. То се може извршити уградњом кратких слепих колосека односно штитних колосека („штулц“) или померањем излазних сигнала тако да се омогући да растојање између излазног сигнала и прве улазне скретнице буде веће или једнако од дужине пута претрчавања (100 – 300 m). Прва опција захтева уградњу још по једне скретнице и одговарајућег слепог колосека али је предност овог решења повећана безбедност јер пут претрчавања води на слепи колосек. Друго решење не захтева уградњу додатних скретница, али захтева да станица буде дужа са обе стране за минимално 100 метара колико износи пут претрчавања. Истовремено ово решење пружа мањи ниво безбедности јер у случају да се воз не заустави до краја пута претрчавања он излази на отворену пругу. Овај проблем се може ублажити коришћењем дужег пута претрчавања што опет повећава потребну дужину укрснице или уградњом додатних елемената ауто-стоп уређаја. Дужина воза, брзине возова и дужина зауставног пута такође утичу на потребну дужину овакве укрснице.

Код пројектовања ових укрсница узима се у обзир најнеповољнији случај, односно случај једновременог уласка возова. Самим тим, за дужину укрснице довољна би била дужина воза или минимална дужина блок одсека. Пошто би у таквим условима оба воза улазила у укрсницу смањеном брзином односно „на жуто“ ово решење се не препоручује већ се за дужину ових укрсница усваја минимално два просторна одсека. Може се користити и развучена укрсница, код које би дужина једног колосека била једнака или већа дужини блок одсека. Осим дужине одсека неопходно је обезбедити и да се одговарајући путеви вожње не секу, не додирују и не поклапају. Решење једновременог уласка воза при чему је узето да се супротни возови налазе у исто време испред улазних сигнала приказано је на слици 2.16.

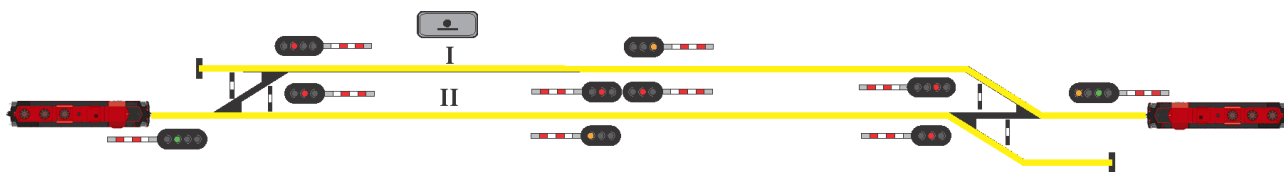


Слика 2.16 Једновремени улазак возова у продужену укрсницу

У овом случају један воз улази на колосеке 2 и 4 а други на колосеке 1 и 3, где путеви претрчавања за оба воза воде на слепе колосеке. Оба воза пролазе поред улазних сигнала редовном брзином и улазе у правац на колосеке 2 и 3. Од средине станице они возе ограниченом брзином због уласка у скретање на колосеке 1 и 4. Пролазак возова без заустављања ће се извршити ако су оба воза истовремено била испред улазних сигнала, у супротном ће се воз који први приспе зауставити. Предност оваквог решења укрснице је што она заправо поседује 3 колосека која се могу користити, па се такође може вршити и укрштавање снопова возова. Мана овог решења је што при укрштавању без заустављања оба воза пролазе кроз скретање.

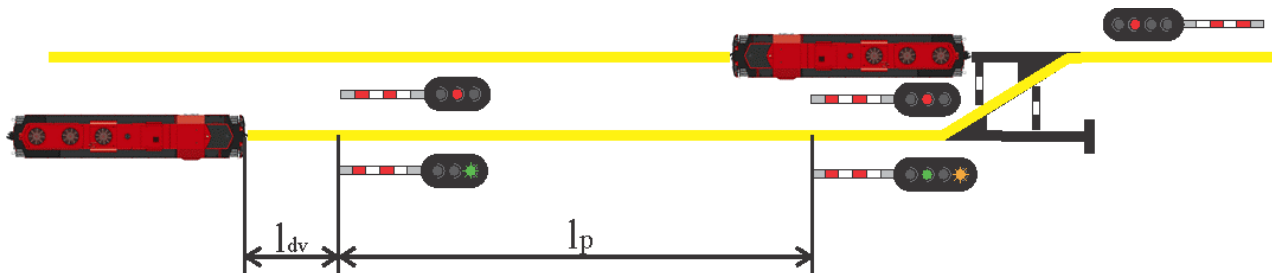
Класична продужена укрсница нема колосечне везе на средини већ само просторне сигнале чиме је омогућена подела колосека на два дела. Ово решење такође омогућава једновремени улазак два воза при чему ће они при уласку имати испред себе слободна два просторна одсека при чему ће једна воз улазити редовном брзином („на зелено“) а други

ограниченом у скретање (слика 2.17). Предност овог решења је што само један воз улази у скретање при укрштавању. Недостатак веза између колосека код овог решења је предност јер смањује трошкове одржавања као и број скретница преко којих возови редовно прелазе. Недостатак веза је уједно и мана јер смањује флексибилност у раду и могућности за комбиновање укрштавања / претицања кад су снопови возова у питању.



Слика 2.17 Решење продужене укрснице без средишњих колосечних веза

Како би се саобраћај несметано одвијао потребно је да супротни возови кроз укрснице пролазе без смањивања брзине односно „на зелено“. Возови ће улазни сигнал пролазити на зелено када су им у укрсници слободна најмање два просторна одсека као у случају на слици 2.13. Да би воз наставио кретање редовном брзином, потребно је и да просторни сигнал испред излазног сигнала показује сигнални знак 5а или 7 односно да буде „на зелено“. У најнеповољнијем случају укрсни воз треба да се налази на даљини видљивости просторног сигнала испред излазног сигнала (l_{dv}) у тренутку када је супротни воз ослободио улазну скретницу и када је формиран пут војње за излаз укрсног воза (слика 2.18).



Слика 2.18 Положај укрсног и супотног воза при укрштавању без заустављања

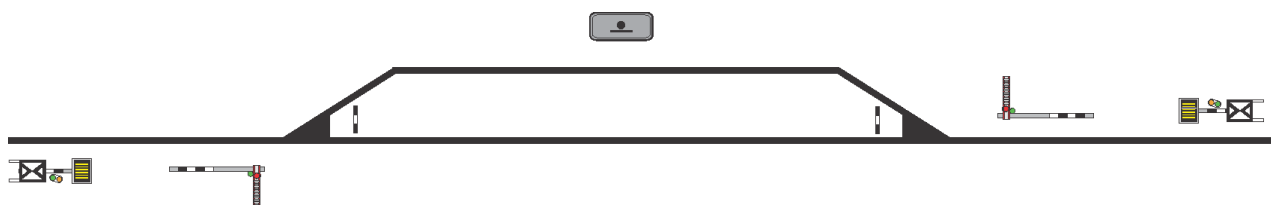
Како би се искористиле предности ових укрсница неопходно је да ред војње буде тако конструисан да возови у ово службено место долазе приближно истовремено. У зависности од усвојене неједновремености доласка као и брзина возова односно дужине зауставног пута дужина оваквих укрсница се креће од 3 – 5 километара.

2.5. ПРЕДНОСТИ И МАНЕ РАЗЛИЧИТИХ РЕШЕЊА УКРСНИЦА

Као што је претходно назначено постоји неколико решења укрсница које су у примени, али и низ модификација тих решења које омогућавају већу флексибилност у раду. Свако решење са собом повлачи и одређене предности и мане.

2.5.1. КЛАСИЧНЕ УКРСНИЦЕ

Класичне укрснице су најчешће решење укрсница. У општем случају ова службена места имају два колосека и две скретнице (слика 2.19).

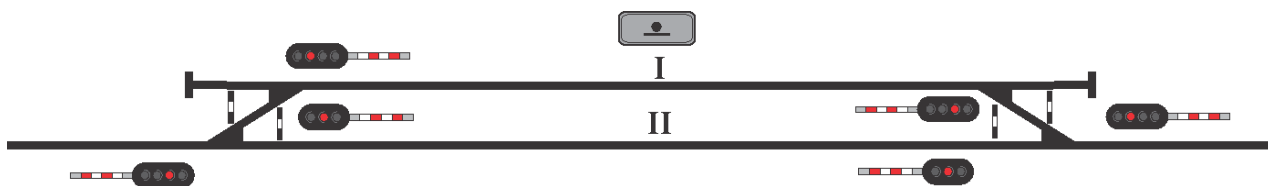


Слика 2.19 Општи изглед укрснице са два колосека

Предност решења укрсница са два колосека представљају мањи трошкови изградње и експлоатације због постојања само две скретнице и два колосека. Мања комплексност укрснице се позитивно одражава и на пројектовање станичног сигнално – сигурносног уређаја као и његово одржавање. Највећа мана представља управо мала флексибилност у раду односно немогућност једновременог уласка супротних возова. Наиме, при уласку воза на било који колосек пут претрчавања обухвата и улазну скретницу са друге стране (или две скретнице код укрснице са три колосека). Због тога се у реду вожње увек мора планирати разлика у доласку супротних возова односно интервал неједновременог доласка t_{nd} . Овај интервал предвиђа да се супротни воз налази најближе на даљини видљивости предсигнала у тренутку када је укрсни воз приспео у станицу односно зауставио се у станици и да му је опозван односно разрешен пут претрчавања. Код савремених сигнално сигурносних уређаја потребно је 90 секунди од уласка последње осовине воза на колосек да би се пут претрчавања аутоматски разрешио па се и о томе мора водити рачуна при одређивању t_{nd} , посебно на пругама опремљеним телекомандом где технички није могуће принудно разрешење пута претрчавања. Овај проблем се може решити померањем излазних сигнала најмање 100 метара од тачке коју штите односно излазне скретнице (њеног међика или изолованог састава, у зависности од опремљености станице сигнално – сигурносним уређајима) али се тиме смањује корисна дужина колосека. Са друге стране ова мера не повећава знатно безбедност јер прелетањем сигнала опет може доћи до бочног угрожавања воза на суседном колосеку односно на улазnoj скретници.

2.5.2. МОДИФИКОВАНЕ КЛАСИЧНЕ УКРСНИЦЕ

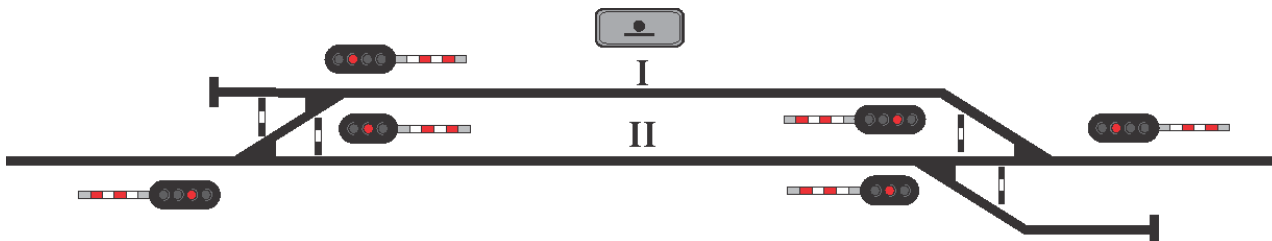
Као што је у првом делу поглавља речено, код модификованих укрсница можемо посматрати два решења и то решење са штитним колосецима и решење са граничним колосечним сигнализима, где се ова решења могу и комбиновати.



Слика 2.20 Укрсница са два штитна колосека на истом колосеку

Решење са два штитна колосека на истом колосеку приказано на слици 2.20 има највећу предност код сустизања возова јер омогућава да један воз улази на први колосек док други излази са другог или код претицања где се пут вожње за узаstopни воз може формирати одмах по уласку воза на први колосек, односно ослобађања прве улазне скретнице. Мана овог решења је што су оба штитна колосека лоцирана у продужетку истог колосека, па се тиме онемогућава једновремени улазак два воза. Оваково решење је било примењено у укрсници Крњача (слика 2.9).

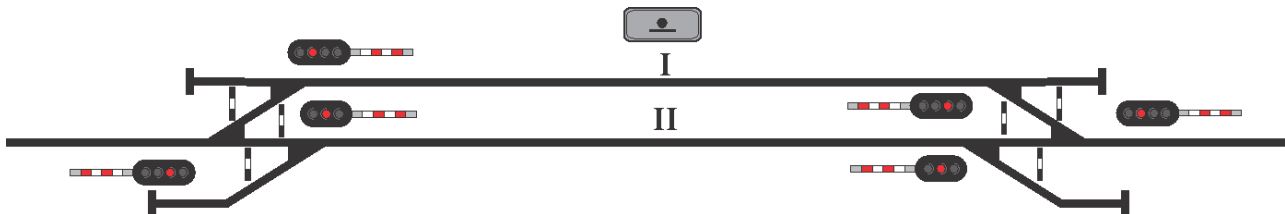
За укрштавања је повољније решење када су штитни колосеци лоцирани на суседним колосецима (слика 2.21). На овај начин се омогућава да воз са десне стране (од краја пруге) уђе на први колосек истовремено да воз са леве стране (од почетка пруге) уђе на други колосек.



Слика 2.21 Укрсница са два штитна колосека

Као и у претходном случају могуће је вршити и сустизања и претицања где се први воз прима на колосек опремљен штитним колосеком за тај смер, односно уколико долази са леве

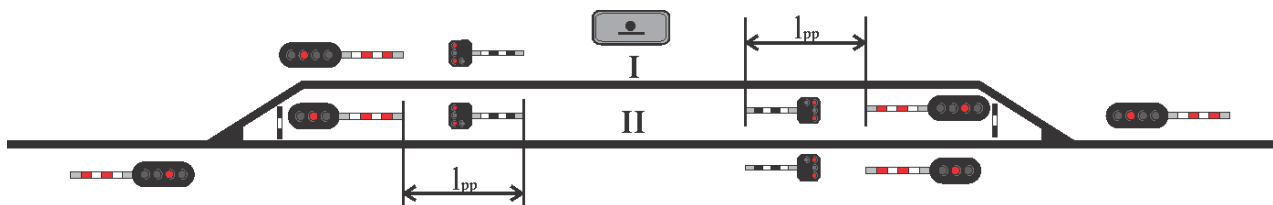
стране на други а уколико долази са десне на први колосек, док се његов узастопни воз пропушта односно прима на суседни колосек. Мана овог решења је што у случају да са леве стране долази путнички воз а са десне теретни или брзи воз односно воз који се не зауставља у станици, дошло би до угрожавања безбедности путника који из путничког воза прелазе преко првог колосека ка станичној згради. Слична ситуација је када у станицу улазе два воза која се заустављају у станици, где први воз улази са леве стране односно на други колосек. Проблем са путницима се може решити изградњом пасарела или потходника што опет има економску оправданост само у случају већих токова путника што код већине укрсница није случај. Друго решење је опремање укрснице са по два штитна колосека са обе стране (слика 2.22).



Слика 2.22 Укрсница са четири штитна колосека

Ово решење омогућава потпуну флексибилност у реализовању укрштавања и претицања у укрсници и једновремени улазак возова на оба колосека из оба смера што је и највећа предност овог решења. Ману представљају трошкови јер уградња 6 скретница у једној укрсници са два колосека представља значајну инвестицију, што касније повећава и трошкове одржавања скретница. Ово решење може бити оправдано једино у случају ако се у укрсници врши велики број састајања возова без заустављања, па се инвестиције могу оправдати уштедама енергије и времена настале проласком возова без заустављања. У пракси је пролазак возова без заустављања кроз класичну укрсницу јако тешко реализовати првенствено због релативно мале дужине укрснице, па је и вероватноћа да се два воза нађу у њој истовремено знатно мања него код продужене укрснице.

Као што је наведено у претходном поглављу решење са граничним колосечним сигналимa представља алтернативу решењу укрснице са штитним колосецима. Код овог решења удаљеност граничних колосечних сигнала од излазних сигнала мора бити минимално 50m, а препоручљиво је да буде 100 – 300m колико износи стандардни пут претрчавања на ИЖС (слика 2.23).



Слика 2.23 Укрсница са граничним колосечним сигналимa

Како се не би морала додатно ограничавати брзина при уласку возова неопходно је да растојање од улазног сигнала до граничног колосечног буде једнако или веће од дужине зауставног пута. Ово решење обезбеђује ниже трошкове инвестиција јер нема потребе уграђивати још четири скретнице и штитна колосека али са друге стране недостатак штитних колосека смањује безбедност због непостојања физичке бочне заштите суседног колосека односно улазне скретница. Уградњом граничних колосечних сигнала се смањује и корисна дужина колосека и то за дужину пута претрчавања. Овај фактор долази до изражаја ако се врши пријем возова само до граничног колосечног сигнала односно у ситуацијама када се врши једновремени улазак возова. Дужина пута претрчавања треба да је пропорционална

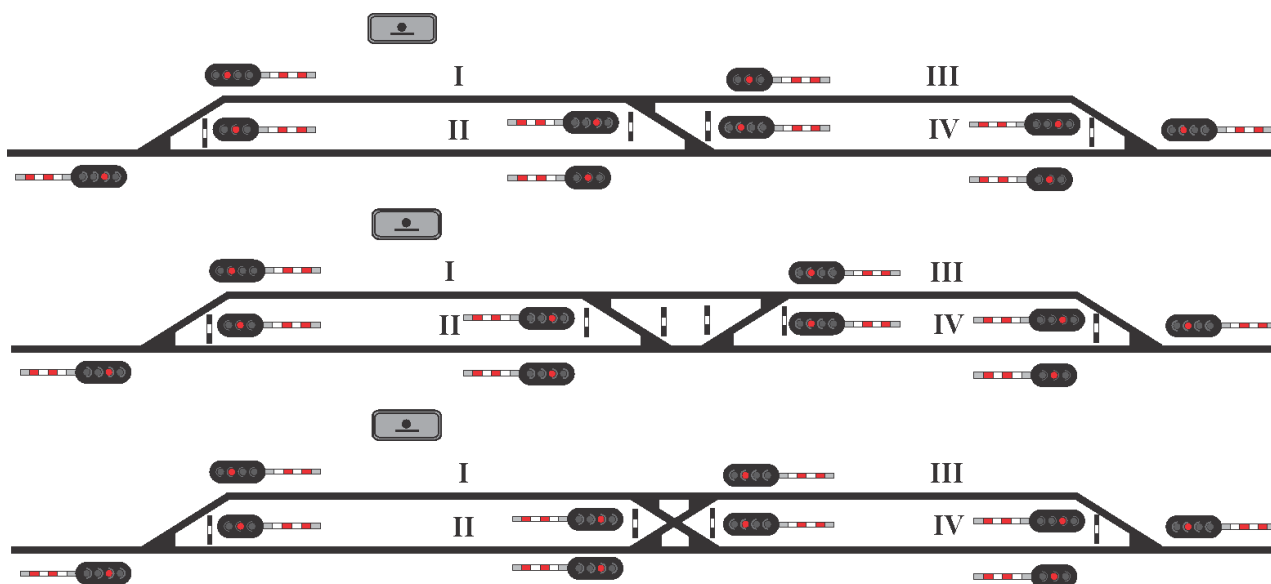
максималној брзини кроз укрсницу па је у случају да се узимају дужа растојања за пут претрчавања неопходно извршити и продужење колосека укрснице на једној или обе стране.

2.5.3. ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ

Појам продужених односно укрсница за укрштавање без заустављања је објашњен у претходном делу док ће се овде разматрати само два карактеристична случаја односно продужене укрснице са и без попречних веза у средини. У оба случаја узимају се у обзир решења по којима је дужина укрснице минимално два блок одсека односно да се у укрсници могу вршити укрштавања без заустављања.

2.5.3.1. ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ СА ПОПРЕЧНИМ ВЕЗАМА

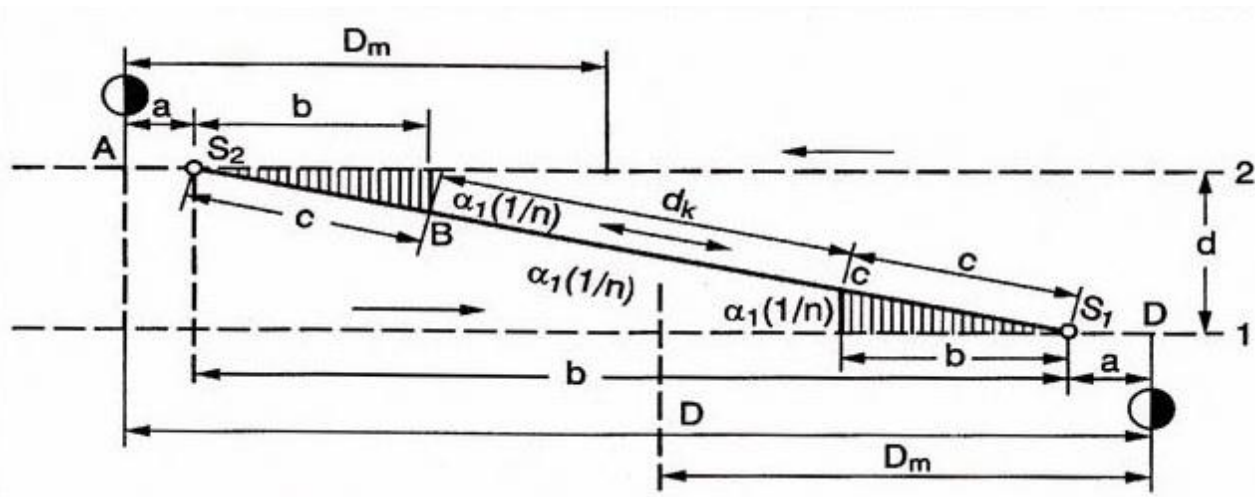
Прво решење са попречним везама захтева да приближно на средини укрснице постоји најмање једна проста колосечна веза, оптимално две просте везе или једна укрсна (слика 2.24). Овде се узима у обзир решење где су колосеци са исте стране главног пролазног колосека.



Слика 2.24 Продужена укрсница са попречним везама

На овај начин се поставља питање које од ових решења је најповољније, и који треба да буду критеријуми за одлучивање. Ако узмемо да је циљ да цела укрсница буде што краћа а да се истовремено обезбеде минималне дужине колосека и минимална потребна растојања између улазних и излазних сигнала, најповољније решење ће бити оно где је дужина колосека који се не може користити најкраћа. У случају постојања колосечне везе на средини укрснице, део који се не може користити је управо део где се налазе колосечне везе, односно између одговарајућих излазних (граничних колосечних) сигнала. Ако занемаримо прво решење код ког постоји само једна колосечна веза због мање флексибилности, остају у оптицају решење са две просте колосечне везе и решење са укрсном везом. У овом случају повољније је решење са укрсном везом јер је краће од решења са две просте везе за дужину једне колосечне везе плус дужина међуправе између скретница.

Ако узмемо да су за просту везу употребљене скретнице полупречника 300 m и преломног угла 6° , где је шема просте скретничке везе приказана на слици 2.25, укупну дужину скретничке везе можемо наћи на следећи начин (Ивић, 2005):



Слика 2.25 Шема просте скретничке везе (извор: Ивић, 2005)

$$D_1 = D + 2a \quad (2.1)$$

где је D растојање између средишта обе скретнице мерено на оси колосека и оно се рачуна по формули:

$$D = S_1 S_2 \cos \alpha = (2c + d_k) \cos \alpha \quad (2.2)$$

$$d_k = \frac{d}{\sin \alpha} - 2c \quad (2.3)$$

Код скретнице 300m и 6° $a = 15,722 \text{ m}$, $c = 17,508 \text{ m}$ и узећемо да је растојање између оса колосека $d = 4,75 \text{ m}$. Тада је:

$$d_k = \frac{d}{\sin \alpha} - 2c = \frac{4,75}{0,104528} - 2 \cdot 17,508 = 45,442168 - 35,016 = 10,426168 \text{ m} \quad (2.4)$$

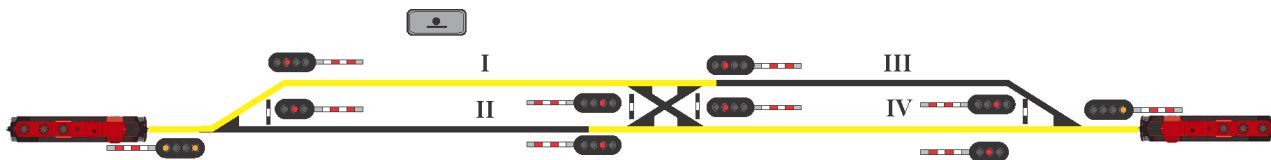
$$D = S_1 S_2 \cos \alpha = (2c + d_k) \cos \alpha = (2 \cdot 17,508 + 10,426168) \cdot \cos 6 = 45,442168 \cdot 0,994522 = 46,43669 \text{ m} \quad (2.5)$$

$$D_1 = D + 2a = 46,43669 + 2 \cdot 15,722 = 46,43669 + 31,444 = 77,88069 \text{ m} \quad (2.6)$$

Као што се види, дужина једне скретничке везе износи 77,88069 m, и када на то додамо и минималну међуправу између скретница од 6 m добијамо да је решење са две просте везе дужа за минимално 83,88 m. Пошто се дужина од 6 m узима само изузетно код употребљених скретница различитог типа, редовно се за међуправу узима минимално $0,2 \cdot V_{max}$ па је рецимо за брзину од 100 km/h дужина међуправе 20 m чиме је решење са две просте везе дужа за 97,88 m. Самим тим по критеријуму дужине укрснице решење са укрсном колосечном везом је повољније. Код неповољних теренских прилика односно када је укрсница у кривини и ако би се укрсна веза морала изводити у кривини, решење са две просте колосечне везе представља боље решење због лакше уградње и одржавања иако је пракса показала да је уградња скретница у кривини односно кривинских скретница јако неповољно решење са становишта одржавања што се показало на примеру станице Рипањ и укрснице Рипањ Тунел где су се у последње време често јављали проблеми приликом саобраћаја возова уз језичак у скретање преко оваквих скретница.

Код овог решења јавља се сличан проблем са штитним колосецима као и код класичне укрснице. Оптимално решење са становишта безбедности би било да се на крајевима свих колосека ка отвореној прузи уграде штитни колосеци, што опет значајно повећава број уграђених скретница у укрсници. Са друге стране, потреба за уградњом штитних колосека код класичне укрснице је узрокована потребом за једновременим уласком возова, што се код

продужене укрснице може извршити на други начин. Наиме, када постоји потреба да се у укрсницу истовремено приме два воза први корак би био да се за се за оба воза формира само улаз на први и четврти колосек или други и трећи, а да се тек по уласку воза на те колосеке формира и наредни део пута вожње (слика 2.26). Безбедност се у овом случају може повећати померањем излазних сигнала од краја колосека за најмање 50 m, што утиче на продужење укрснице од најмање 200 m.

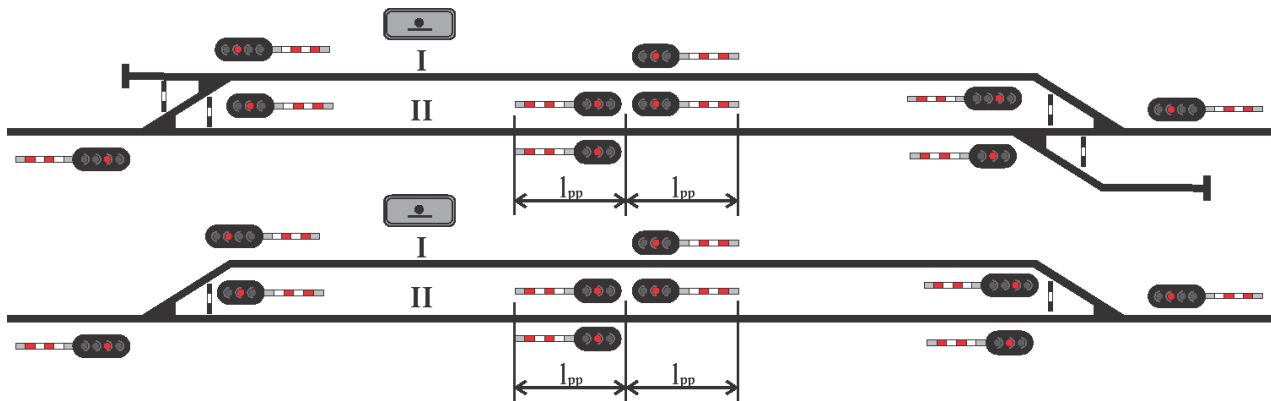


Слика 2.26 Једновремени улазак два воза у продужену укрсницу без штитних колосека

Флексибилност овог решења се огледа у томе да је у оваквом типу укрсница могуће вршити и укрштавање и претицање више возова. Ако посматрамо ситуацију да рецимо сноп од два воза долази са леве стране, и најмање један воз са десне стране, можемо извршити и укрштавање сва три воза, а и међусобно претицање возова у снопу. Ако први воз из снопа примимо на трећи колосек, а други на први, по проласку супротног воза или снопа возова можемо прво отпремити воз са првог колосека а затим онај са трећег чиме смо у укрсници обавили бар два укрштавања и једно претицање.

2.5.3.2. ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ БЕЗ ПОПРЕЧНИХ ВЕЗА

Решење укрсница без попречних веза заправо представља продужење класичне укрснице при чему је минимална дужина продужене укрснице једнака дужини два блок одсека. Предност овог решења представља мањи број употребљених скретница а ману представља мања флексибилност (слика 2.27).



Слика 2.27 Решење продужене укрснице са и без штитних колосека

Међусобна удаљеност просторних сигнала на средини станице треба да је најмање 100 m односно да су просторни сигнали за један и други смер удаљени од тачке коју штите (изоливаног састава или бројача осовина) најмање 50 m. Такође треба да је испуњен услов да је удаљеност од улазног до просторног и од просторног до излазног сигнала најмање 1000 m. Као и код укрснице са попречним везама и овде се поставља питање потребе за уградњом штитних колосека. И овде се једновремени улазак возова може извршити тако што се са обе стране формира улазни пут вожње само до просторног сигнала, а затим и остатак пута вожње када воз уђе потпун и цео на део колосека испред просторног сигнала за супротан смер. Безбедност се и у овом случају може повећати померањем излазних сигнала од краја колосека за најмање 50 m, што утиче на продужење укрснице од најмање 200 m. Сама чињеница да је воз ушао у укрсницу „на жуто“ односно ограниченом брзином повећава безбедност па померање излазних сигнала може и изостати.

Недостатак флексибилности овог решења највише се огледа у чињеници да је у оваквом типу укрснице могуће вршити укрштавања снопова возова, али не и претицања. Наиме, воз који се први пусти на колосек ће ући до излазног сигнала док би се узастопни воз пустио иза њега само до просторног сигнала на средини укрснице. У том случају воз који је први ушао у укрсницу односно на колосек мора први и изаћи, јер други воз нема могућности да га заобиђе осим маневарским кретањима која се не практикују.

2.6. РЕЗИМЕ

У овом поглављу су приказане основне карактеристике укрсница, њихови делови, улога и различита решења која су у примени. Свако од ових решења има одређене предности и мане које утичу како на стварну пропусну моћ деонице једноколосечне пруге тако и на број заустављања односно могућност једновременог уласка возова у укрсницу или укрштавања без заустављања.

Класичне укрснице су решење које је код нас и у свету најчешће у примени и одликују га мали трошкови али и немогућност једновременог уласка супротних возова. Варијантна решења са граничним колосечним сигнаlima и стандардном дужином укрснице нуде могућност једновременог уласка возова што са друге стране смањује безбедност. Тај проблем се отклања код варијанти са слепим штитним колосецима али изградња и одржавање слепих штитних колосека повећавају трошкове.

Варијанте продужених односно смакнутих укрсница поред једновременог уласка супротних возова омогућавају и укрштавање возова без заустављања. Ове могућности захтевају и значајније инвестиције од претходних варијанти, не само на повећању дужине колосека укрснице већ и на уградњи потребних колосечних веза и сигнала. Ове укрснице у суштини представљају зачетак двоколосечне пруге па њихова дужина може бити и значајно већа од дужине класичне укрснице.

3. СИМУЛАЦИЈЕ У ЖЕЛЕЗНИЧКОМ САОБРАЋАЈУ

Циљ сваког система који човек ствара, развија, управља и одржава је да буде што рационалнији и ефикаснији по својим показатељима што се може једино утврдити истраживањима. Нажалост чест је случај да је истраживање на реалним системима неизводљиво а често и прескупо па је истраживање могуће једино креирањем модела односно копије реалног система. Циљ модела је да опонаша реални систем односно да се сви процеси у њему одвијају по законитостима из реалног система. Сам процес креирања модела је моделирање при чему се на основу резултата модела доносе закључци о функционисању реалног система.

Модели могу да се класификују по разним аспектима и критеријумима а и према разним ауторима. Према (*Radenković et al., 1999*) модели могу бити ментални (мисаони), вербални, структурни, физички, аналогни, математички, симулациони рачунарски и разни други. Можемо их поделити и на материјалне (нпр. модел хемијске структуре молекула, модел возила) и симболичке (математички, концептуални, симулациони, рачунарски и др.)

Концептуални модели, представе о логици и структури рада система који се моделира, представљају основ за развој рачунарских модела.

Рачунарски модели су даља надоградња концептуалних модела односно представљање концептуалног модела у облику програма за рачунар. Начин приказа је дефинисан програмским језиком који се користи за моделирање, а сами модели су блиско везани за развој рачунарских наука.

3.1. СИМУЛАЦИОНО МОДЕЛИРАЊЕ

Симулациони модели јесу модели система који се мењају у времену, тј. модели динамичких система који се по правилу не могу описати ни решавати математичким путем. Обично су у облику концепцијских и рачунарских модела. То су нпр. системи масовног опслуживања (СМО), превозних процеса, складиштења и саобраћаја у целини. Код примене симулационог моделирања не може да се добије решење у аналитичком облику, већ се решење проблема добија експериментисањем моделом система.

Два су основна типа поделе симулационих модела: један према врсти променљивих у моделу (дискретни, континуални и мешовити), а други према начину на који се стање модела мења у времену (детерминистички и стохастички).

Детерминистички модели су они чије је понашање потпуно предвидиво, тј. у којима је ново стање система који је моделиран у потпуности дефинисано претходним стањем. Стохастички модели су они модели чије се понашање не може унапред предвидети, али могу да се одреде вероватноће промене стања система. У дискретним моделима стање система мења се само у одређеним временским тачкама док се у континуалним моделима променљива стања мења се континуално у времену.

Према (*Radenković et al., 1999*) можемо дефинисати четири врсте симулационих модела који се разликују са једне стране по приступу моделирању и класи проблема који се решава и са друге стране по техникама моделирања које су за њих развијене. То су:

- 1) Монте Карло симулација,
- 2) Континуална симулација,
- 3) Симулација дискретних догађаја,
- 4) Мешовита, континуално – дискретна симулација.

Монте Карло симулација је заправо статистичка симулација, али је овде сврстана пошто су у њој третман случајних догађаја и генерисање случајних вредности блиски генерисању из симулације дискретних догађаја.

Континуална симулација се користи за оне проблеме код којих се променљиве стања мењају континуално у времену, при чему имамо две врсте проблема. Прву врсту чине једноставни проблеми који се могу описати на релативно једноставан начин путем диференцијалних једначина. Друга врста су сложенији проблеми где се делови система морају редукovati на мањи број елемената. Први проблеми су најчешће из области природних наука док су други из области друштвених наука.

Симулација дискретних догађаја се користи за моделирање система који се могу представити скупом догађаја, при чему се под догађајима подразумева дискретна промена стања делова система. Догађаји се јављају само у одређеним тренуцима времена при чему симулација описује сваку промену померајући се од једног до другог догађаја. Свако померање од једног до другог догађаја доводи до прираста времена симулације.

Мешовита симулација се примењује када ни континуална ни дискретна симулација не могу да у потпуности опишу начин рада система. Да би се ова два супротна начина симулације објединила користе се две врсте догађаја: временски и догађаји стања.

3.2. СИМУЛАЦИОНО МОДЕЛИРАЊЕ И АНАЛИЗА

Симулационо моделирање и анализа представљају процесе креирања и експериментисања одређеног математичког компјутеризованог модела физичког (реалног) система, где се систем дефинише као скуп међусобно повезаних делова који добијају улаз тј. дају излаз (*Milinković, 2007*).

Могу се симулирати системи као што су системи производње, услуга, као и саобраћаја и транспорта. Неки од саобраћајних и транспортних система који се могу симулирати су системи на аеродромима, у лукама, системи за дистрибуцију односно кретање робе и возила у разним видовима саобраћаја, посебно у друмском и железничком саобраћају (*Milinković et al., 2012, Milinković, 2007, Maroti, 2006*).

Може се поставити питање зашто се уопште врши симулационо моделирање односно зашто се један систем представља моделом. Постоји велики број разлога али најзначајнији су следећи (*Radenković et al., 1999*):

- 1) Експеримент над реалним системом може да буде скуп или често и немогућ (нпр. у економским системима или хемијским постројењима);
- 2) Систем може да буде превише комплексан да би се описао аналитички;
- 3) Експериментисање са реалним системом је често неисплативо или превише сложено док моделирање може да покаже да ли је даље улагање у експеримент исплативо или не;
- 4) Израда симулација и модела понекад има за циљ да се схвати функционисање оног система чија је структура непозната односно недоступна за истраживање;
- 5) Када утврђујемо оптимално функционисање неког система најчешће морамо да мењамо одређене параметре што у већини случајева није могуће извести на реалном систему, било због неисплативости, непостојања тог система или дела система, или зато што је немогуће;
- 6) Понекад треба вршити испитивање оштећења или уништења реалног система што је у већини случајева недопустиво;
- 7) Време у реалном систему је константно, не може се убрзавати, успоравати или заустављати док код модела то није случај. У моделу можемо убрзати врло споре

процесе, успорити оне који се пребрзо одвијају па и зауставити симулацију како би испитали одређене параметре система.

3.3. ПРЕДНОСТИ СИМУЛАЦИЈЕ

Предности симулације се најчешће истичу кроз следеће (*Radenković et al., 1999*)::

- 1) Једном када се изгради, модел се најчешће може користити више пута а често и за сродне системе уз мање измене у структури (и/или параметрима). Такође може се вршити понављање симулације више пута како би се повећала статистичка поузданост добијених података;
- 2) Симулациони модели се за разлику од аналитичких могу користити и кад су улазни подаци непотпуни;
- 3) Симулационе моделе је лакше израдити и применити него аналитичке па је круг потенцијалних корисника шири. Пре појаве симулационих метода сложеније моделе су могли да решавају само математичари и аналитичари применом операционих истраживања и статистику.
- 4) Развој симулационих софтверских пакета довео је до појаве и усавршавања њиховог графичког интерфејса чиме је приказ модела постао знатно једноставнији и разумљивији ширем кругу корисника..

3.4. НЕДОСТАЦИ СИМУЛАЦИЈЕ

Недостаци углавном нису у директној вези са процесима моделирања и анализе, него са очекивањима везаним за симулационе моделе. Недостаци симулације су (*Milinković, 2007*):

- 1) Симулациони софтвер је све сложенији, њихов развој захтева читаве тимове и доста времена па су самим тим ови софтверски пакети скупи. Појава софтвера са графичким интерфејсом је значајно поједноставила моделирање па је степен обучености корисника могао да буде мањи. Са друге стране сада су и системи који се моделирају комплекснији тако да модели могу да буду сложенији, а аналитичари који се баве моделирањем осим знања из програмирања морају да имају знања из више дисциплина као што су инжињерство, математика или операциона истраживања. Сами модели да би верно описали симулирани систем често захтевају дуг процес изградње и валидације. Процес креирања модела често захтева стручњаке из разних области и коришћење више различитих софтверских алата што додатно повећава цену самог модела;
- 2) Због статистичког карактера симулације потребно је изводити већи број понављања симулација како би се добио одговарајући узорак резултата симулације што захтева веће ангажовање рачунарских ресурса и времена. Често је потребно да корисник симулационог модела има неко знање о математичкој статистици да би могао разумети и анализирати добијене податке;
- 3) Симулација не даје одговоре на постављени проблем нити се добијају зависности излазних од улазних променљивих. Приликом моделирања сложених система веома је битно да се верно и детаљно прикажу све релације између подсистема како би се добио што тачнији резултат. Сами резултати се морају додатно анализирати при чему је главни циљ анализе примена добијених резултата.

3.5. ВАЛИДАЦИЈА И ВЕРИФИКАЦИЈА

Валидација и верификација представљају један од најзначајнијих и најкомплекснијих задатака креатора модела у процесу изградње (*Milinković, 2013, Milinković, 2007, Radenković et al., 1999*). Чест је случај да корисници модела односно инжењери и аналитичари који користе резултате модела приликом пројектовања посматрају добијене резултате у погледу валидности са извесном дозом скептицизма. Како би се повећало поверење у добијене резултате потребна је тесна сарадња са крајњим корисницима у погледу креирања и валидације самог модела.

Верификација се односи на проверу да ли је симулациони програм којим се креира модел без грешака и у складу са моделом. Она представља поређење концептуалног модела са рачунарским кодом односно софтвером којим се тај модел креира.

Валидација представља поступак одређивања да ли је симулациони модел верна и прецизна репрезентација реалног система. Основни принцип је да се корак по корак пореди понашање реалног система са моделом и уколико се уоче неслагања и разлике та информација се користи за исправку и побољшање модела. Процес побољшавања модела се наставља све док не добијемо задовољавајући ниво поклапања са реалним системом.

Валидација и верификација су појмови који се често мешају из разлога што се они најчешће спроводе симултано од стране креатора модела.

3.5.1. ВЕРИФИКАЦИЈА СИМУЛАЦИОНИХ МОДЕЛА

Процес верификације треба да покаже да ли је модел на одговарајући начин представљен рачунарским кодом и у којој мери постоји слагање модела и рачунарског кода. У поступку верификације нема строго дефинисаног метода. Зато је потребно извршити више различитих провера (*Milinković, 2013, Milinković, 2007, Radenković et al., 1999*):

- 1) Мануелна верификација логичке исправности: модел се извесно време пропушта на рачунару и тестира ручно, а потом се пореде добијени резултати;
- 2) Модуларно тестирање помоћу ког се врши појединачно тестирање сваког модула како би се установило да ли даје логичне и очекиване излазе за све могуће улазе;
- 3) Провера у односу на унапред позната решења модела, при чему се модел подешава тако да представља систем чија су решења већ позната и упоређујемо их са резултатима модела;
- 4) Тестирање осетљивости помоћу варијације одређеног параметра, док остали остају непромењени и проверавамо да ли је понашање модела осетљиво на промене тог параметра;
- 5) Тестирање на поремећаје тако што поставимо параметре модела на неприродне и нелогичне вредности и проверавамо да ли се модел понаша на нелогичан начин. Овим путем се могу уочити грешке у програму које је врло тешко уочити на неки други начин.

Осим наведеног, могу се применити и неки други познате методе које се користе при утврђивању и отклањању грешака у рачунарским кодовима.

3.5.2. ВАЛИДАЦИЈА СИМУЛАЦИОНИХ МОДЕЛА

Процес валидације је неопходан јер се у фази изградње симулационог модела у њега уносе многе апроксимације реалног система. Те апроксимације могу бити функционалне, апроксимације расподеле, независности, агрегације или стационарности.

Функционалне апроксимације настају приликом апроксимације изразито нелинераних функција неким једноставнијим, најчешће линеарним. Апроксимација расподеле је замена реалних вероватноћа расподеле неким једноставнијим и познатијим. Апроксимацијом агрегације обједињујемо више елемената и посматрамо као целину. Апроксимација стационарности претпоставља да се параметри система не мењају у времену.

Циљ самог процеса валидације је двојак, првенствено да креира модел који је довољно близак реалном систему а затим и да поузданост система повећа на прихватљив ниво тако да га могу користити различити доносиоци одлука. Сам просец валидације најчешће пролази кроз више ревизија током којих долази до исправки модела уколико је потребно. Упоредивање са реалним системом врши после сваке ревизије док се не добије довољан степен тачности модела. Поређење се најчешће врши помоћу различитих тестова који могу бити субјективни и објективни. Субјективни тестови заснивају се на закључивању од стране људи који имају искуства у раду са моделираним реалним системом односно имају довољно знања о самом систему. Код објективних тестова статистичким методама врши се упоређивање података које добијамо од реалног система и од модела.

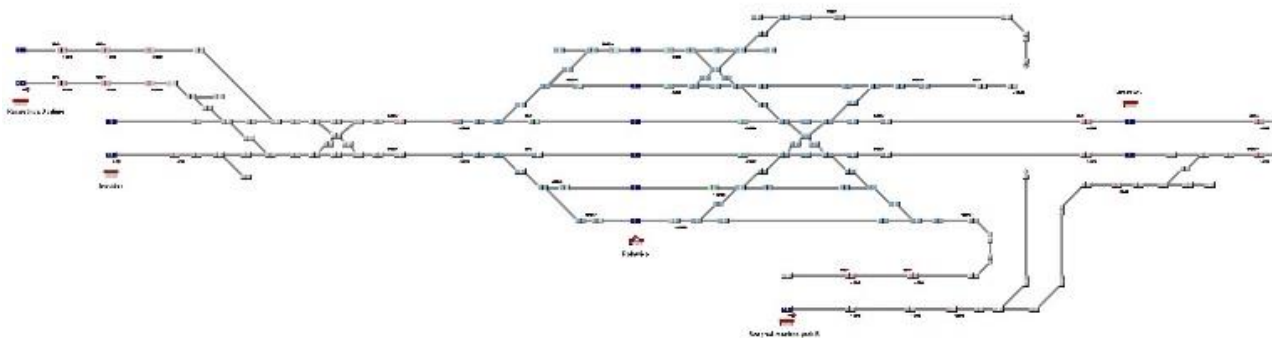
Процена валидности модела захтева да и потенцијални корисници буду укључени у процес изградње модела од почетка до краја чиме се омогућава да се у модел угради висок степен реализма. Тиме се истовремено повећава и степен поверења у модел и олакшава прихватање од стране доносилаца одлука. За проверу валидности модела може се користити и анализа осетљивости. Она представља тестирање модела на различите улазне податке и претпоставке. Пошто код већине модела постоји велики број улазних променљивих често је технички неизводљиво или финансијски неисплативо да се тестирају све вредности већ се узимају само оне најкритичније.

3.6. ПРИМЕНА СИМУЛАЦИЈЕ У ЖЕЛЕЗНИЧКОМ САОБРАЋАЈУ

Анализа саобраћајних процеса који се врше на пругама, станицама и железничким мрежама се може успешно обавити употребом симулационих модела. Системи за микро симулацију као што су *RailSys*, *OpenTrack* и други, могу са великом прецизношћу описати и симулирати процесе у железничким системима на основу детаљних информација о колосечним капацитетима, опремљености сигнално – сигурносним уређајима, геометријским карактеристикама пруге, реду вожње, карактеристикама железничких возила и др. Ови системи се могу користити за читав низ анализа, почев од искоришћења капацитета, реда вожње до кашњења.

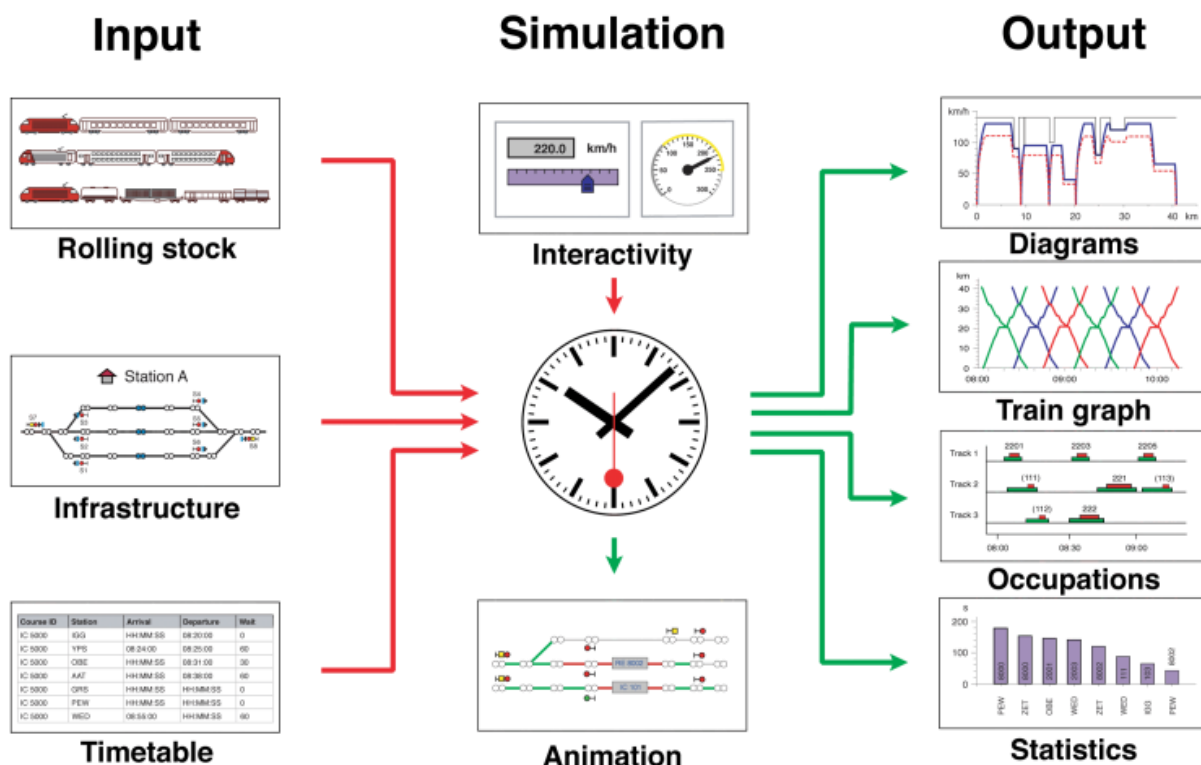
Симулационе моделе можемо поделити на асинхроне и синхроне. Код асинхроних модела времена полазака возова се стохастички генеришу. Њихов циљ је да креирају ред вожње без конфликта тако што се различите категорије возова распоређују по редоследу (асинхроно) при чему се конфликти траса возова решавају по рангу возова. Оваква врста симулације се користи за пругу или део пруге али се не може користити за мрежу пруга. (*Milinković, 2013, D'ariano et al., 2008, Barber et al., 2007, Milinković, 2007*).

Модел за синхрону симулацију као што су *OpenTrack* или *RailSys* садрже детаљне податке о инфраструктури, возним средствима и реду вожње и на основу њих врше синхрону симулацију кретања возова. Они имају могућност симулирања комплетних железничких мрежа али то захтева обиман рад на креирању улазних података, посебно о инфраструктурним капацитетима и реду вожње. На слици 3.1 приказан је изглед инфраструктуре у програму *OpenTrack*.



Слика 3.1 Железничка инфраструктура у програму OpenTrack

Резултати ових модела не дају директно оптимална решења већ се они користе као улазни подаци за друге оптимизационе моделе. Ови симулациони модели за различите редове возње односно улазне податке могу да пронађу конфликтне ситуације, процене кашњења возова као и искоришћење колосечних капацитета. Како би тај задатак успешно обављали сваки од ових програма садржи одређене процедуре за решавање конфликта базиране на унапред дефинисаним правилима, које са друге стране не могу увек да представе ситуације које се дешавају у реалним системима. Такође, тумачење резултата ових модела захтева познавање правила железничког саобраћаја као и познавање моделиране деонице односно мреже. На слици 3.2 приказан је принцип рада синхроних модела.



Слика 3.2 Принцип рада синхроних модела (извор: <http://www.opentrack.ch/>)

Ток симулације се може пратити кроз анимацију уз могућност убрзавања или успоравања симулационог часовника. Излазни подаци су дати у виду графикана или табела у стандардним форматима погодним за даљу обраду.

3.7. РЕЗИМЕ

У овом поглављу представљене су теоријске основе симулационог моделирања, типови симулационих модела, предности и недостаци симулационих моделирања као и процеси валидације и верификације. Симулационо моделирање је моћан и веома применљив алат у многим људским делатностима што се посебно односи на саобраћај. Железнички саобраћај својим уређеним кретањем возила по железничкој прузи пружа велике могућности за моделирање уз истовремено једноставније креирање модела.

4. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ ПЕТРИ МРЕЖА

4.1. УВОД

У данашње време симулациони програми су све бројнији и са све већим могућностима за моделирање различитих система. То се односи како на опште симулационе програме какви су рецимо *Mathlab Simulink*, *GPSS* и други, који се могу користити за симулацију у многим областима, а тако и специфични програми за одређене области. Када је у питању железнички саобраћај најпознатији су већ поменути *OpenTrack* и *RailSys*. И један и други програм су прилагодљиви ширем кругу корисника где је детаљно познавање функционисања железничког система пожељно али не и неопходно у одређеним аспектима. Као пример можемо навести алгоритме за решавање конфликта који су саставни део оба програма при чему корисник не мора познавати њихов принцип рада. Са друге стране у питању су комерцијални програми који осим високе цене не нуде кориснику могућност да утиче на саме принципе функционисања програма што се посебно односи на правила регулисања саобраћаја, детекције и решавања конфликта. Из тог разлога општи симулациони алати као што су Петри мреже омогућавају много већу слободу приликом креирања модела што са собом повлачи и знатно комплекснији процес моделирања. Петри мреже су графички и математички алат применљив на многе системе (*Murata, 1989*). Њих је у својој докторској дисертацији дефинисао Карл Адам Петри (*Petri, 1962*). Од те почетне дефиниције па до данас Петри мреже су доста унапређене као алат за моделирање при чему су развијени различити дијалекти које једним именом називамо Петри мреже високог нивоа.

4.2. ДЕФИНИЦИЈА ПЕТРИ МРЕЖА

Основна идеја Петри мрежа се заснива на математичкој теорији графова, у овом случају то су бипаритни графови. Они представљају комбинацију математичке теорије и графичког представљања динамичког понашања система (*Wang, 2007*). Петри мреже чине места, прелази (догађаји) и усмерени лукови. Усмерени лукови повезују места и прелазе односно прелазе и места. У најједноставнијем облику Петри мреже се могу представити као прелази који повезују улазна и излазна места. Осим ових елемената саставни део Петри мрежа су и токени. Они представљају маркирање мреже и омогућавају праћење динамичких карактеристика мреже.

Формална дефиниција Петри мрежа (*Murata, 1989*):

Петри мрежа је формално дефинисана петорка

$$PN = (P, T, F, W, M_0) \quad (4.1)$$

где је:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – коначан скуп места $p_i, i = 1, 2, \dots, m$

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – коначан скуп прелаза $t_j, j = 1, 2, \dots, n$

при чему важи да је $P \cap T = \emptyset$ и $P \cup T \neq \emptyset$

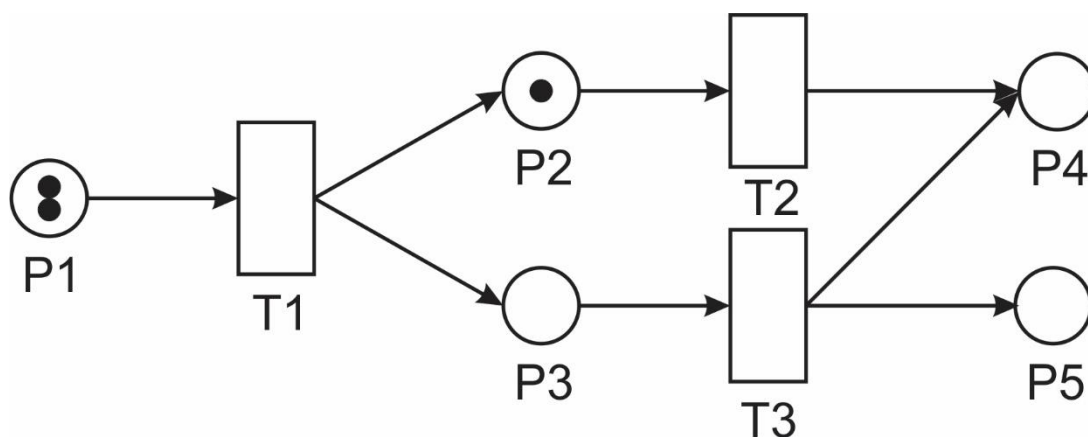
$I: P \times T \rightarrow N$ је улазна функција која дефинише усмерене лукове од места до прелаза при чему је N скуп ненегативних целих бројева

$O: T \times P \rightarrow N$ је излазна функција која дефинише усмерене лукове од прелаза до места и

$M_0: P \rightarrow N$ је почетно маркирање

Маркирање у Петри мрежама представља распоред токена по местима при чему се он може мењати током извршења Петри мреже.

Осим формалне дефиниције за боље разумевање функционисања Петри мреже погоднији је графички приказ (слика 4.1).



Слика 4.1 Графички приказ једноставне Петри мреже

Структура мреже се приказује као усмерени тежински бипаритни граф заједно са почетним стањем које се назива почетно маркирање M_0 (*initial marking*). Граф се састоји од две врсте чворова, места и прелаза који су међусобно повезани усмереним тежинским луковима. Места (*places*) и прелази (*transitions*) су повезани усмереним тежинским гранама односно луковима (*arcs*) при чему лук може водити од места до прелаза и од прелаза до места. Места се представљају као кругови а прелази као квадрати или правоугаоници. Лукови се обележавају њиховим тежинама при чему је тежински коефицијент позитиван цео број. Ако лук обележимо k ненегативним целим бројем можемо посматрати као да имамо скуп k паралелних лукова. Маркирање додељује сваком месту у мрежи ненегативан цео број па ако маркирање додели месту p ненегативан цео број k кажемо да је место p маркирано са k токена. Графички се токени представљају у виду црних кругова односно тачака унутар места.

4.3. ПРИНЦИП РАДА ПЕТРИ МРЕЖА

Функционисање Петри мрежа се заснива на два правила и то правилу за омогућавање прелаза (*transition enabling*) и прелаза (*firing*). У моделирању, користећи принцип услова и догађаја места представљају услове а прелази догађаје. Сваки прелаз (догађај) има одређени број улазних (*input*) и излазних (*output*) места која представљају предуслове и постуслове догађаја. Присуство токена у месту се интерпретира као тврдња о тачности услова повезаних са тим местом. По другом тумачењу k токена у одређеном, месту показује да је k објеката или ресурса расположиво у том месту (Milinković, 2013).

Понашање многих система се може описати помоћу стања система и промена стања. Како би се симулирало динамичко понашање система, стање односно маркирање у Петри мрежама се мења на основу следећих правила прелаза (*transition-firing rule*):

- 1) За прелаз t се каже да је омогућен (*enabled*) ако је свако улазно место p маркирано са барем $w(p, t)$ токена при чему је $w(p, t)$ тежински коефицијент лука од p до t ;
- 2) Омогућени прелаз може али и не мора да се изврши у зависности да ли се догађај десио или не;
- 3) Извршење омогућеног прелаза t уклања $w(p, t)$ токена из сваког улазног места p од t и додаје $w(p, t)$ токена у свако излазно место p од t , при чему је $w(p, t)$ тежински коефицијент лука од p до t .

Прелаз без иједног улазног места назива се изворни прелаз (*source transition*) а онај без иједног излазног места завршни прелаз (*sink transition*). Петри мрежа код које је p и улазно и излазно место од t назива се затворена петља (*self-loop*). Петри мрежа се назива чистом ако нема ни једну затворену петљу. За мрежу код које су сви тежински коефицијенти лукова једнаки 1 каже се да је обична.

За претходно поменуто правило прелаза претпостављено је да свако место може садржати неограничен број токена, и таква Петри мрежа се назива неограничена. Приликом моделирања многих система логично је размотрити горњу границу броја токена које свако место може садржати. Таква Петри мрежа се назива мрежа са коначним капацитетом, и код ње свако место има додељен коначни капацитет $K(p)$ који представља максимални број токена који може да се нађе у том месту у било ком тренутку. Правила прелаза са ограничењем капацитета места називају се стриктна правила прелаза (*strict transition rule*) док се правила прелаза без ограничења капацитета називају слаба правила прелаза (*weak transition rule*).

Три најчешћа приступа анализи Петри мрежа су анализа доступности (*reachability analysis*), *matrix – equation* анализа и симулација. Први приступ укључује набрајање свих доступних маркирања, *matrix – equation* приступ је погодан само за одређене типове Петри мрежа и специјалне ситуације, док је код комплексних дискретних система најпогоднија примена симулације.

4.4. ОСОБИНЕ ПЕТРИ МРЕЖА

Моделирање применом Петри мрежа није само по себи циљ већ је то анализа моделираног система. На основу добијених резултата можемо утврдити понашање моделираног система као и да ли он испољава спецификацијом захтеване пожељне карактеристике или не. Два основна типа карактеристика који се могу изучавати применом Петри мрежа су она везана за понашање модела и она везана за структуру модела. Особине везане за понашање система су у директној зависности од почетног маркирања док оне везане за структуру не зависе од маркирања већ од саме структуре мреже. Од најважнијих особина везаних за понашање мреже могу се истаћи доступност (*reachability*), безбедност (*safeness*) и живост (*liveness*) (Wang, 2007).

Доступност

Као важно питање у моделирању система заснованог на догађајима појављује се могућност система да дође у одређено стање или оствари одређено функционално понашање. У циљу да се утврди да ли моделирани систем може доћи у одређено стање као резултат захтеваног функционалног понашања, потребно је пронаћи такав редослед окидања прелаза који ће претворити маркирање M_0 у маркирање M_i при чему M_i представља одређено стање а редослед окидања захтевано функционално понашање. У стварности моделирани систем може доћи до жељеног стања остварењем дозвољених образаца понашања који би трансформисали M_0 у M_i . То са друге стране може указивати на постојање скривених или неочекиваних функционалних понашања, под условом да модел Петри мрежа верно приказује дати систем. За маркирање M_i се каже да је доступно из маркирања M_0 ако постоји низ окидања прелаза који ће претворити маркирање M_0 у M_i . За маркирање M_1 се каже да је моментално доступно из маркирања M_0 ако ако окидање прелаза из M_0 резултира маркирањем M_1 .

Безбедност

За одређене примене Петри мрежа као што су симулације телекомуникационих и рачунарских система где се места у Петри мрежама посматрају као складишта важно је утврдити да ли долази до засићења. Особина Петри мрежа која омогућава да се утврди постојање засићења је концепт ограничења (*boundedness*).

За место p се каже да је k -ограничено ако је број токена у p увек мањи или једнак k , при чему је k ненегативан цео број, за свако маркирање M доступно из почетног маркирања M_0 , тј. $M \in R(M_0)$. Мрежа је безбедна ако је 1-ограничена (*1-bounded*). У општем случају Петри мрежа $PN = (P, T, F, W, M_0)$ је k -ограничена ако је свако место у P k -ограничено (безбедно).

Живост

Концепт живости односно живе мреже је уско повезан са ситуацијом застоја (*deadlock*). Петри мрежа која моделира систем без застоја мора бити жива. Ово указује да је свако доступно маркирање M увек могуће извршити окидање сваког прелаза у мрежи преко одређеног низа окидања. Пошто је ова дефиниција сувише строга за неке моделиране системе, постоји неколико нивоа живости за прелазе t и маркирања M_0 .

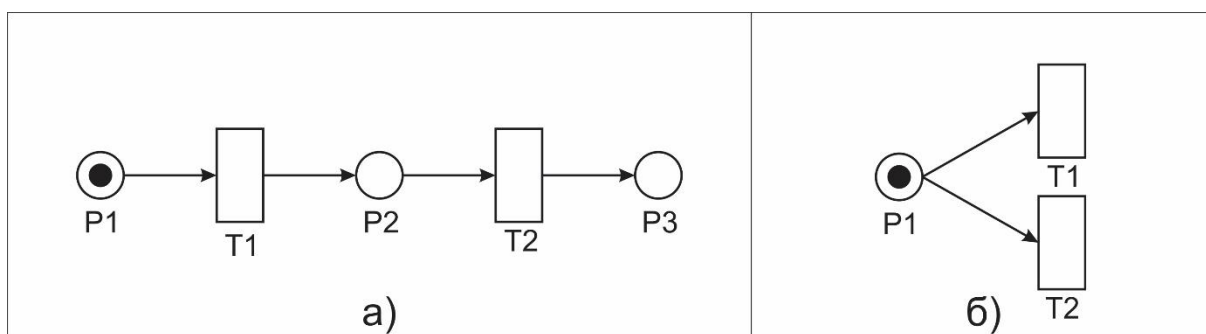
4.5. МОГУЋНОСТИ ЗА МОДЕЛИРАЊЕ

Типичне карактеристике које се уочавају у дискретним динамичким системима као што су паралелно извршавање, доношење одлука, синхронизација и приоритети може бити ефикасно моделирано применом Петри мрежа. Особине Петри мрежа које омогућавају моделирање дискретних система и њихову анализу су (*Milinković, 2013, Wang, 2007, Murata, 1989*):

- 1) Узастопна извршења (*Sequential Execution*)
- 2) Конфликт (*Conflict*)
- 3) Конкурентност (*Concurrency*)
- 4) Синхронизација (*Synchronization*)
- 5) Међусобна искључивост (*Synchronization*) и
- 6) Приоритети (*Priorities*)

Узастопна извршења су приказана на слици 4.2а. Прелаз t_2 се може извршити тек пошто се изврши прелаз t_1 . Ово намеће ограничење „ t_2 после t_1 “, које је типично за извршење активности у динамичким системима.

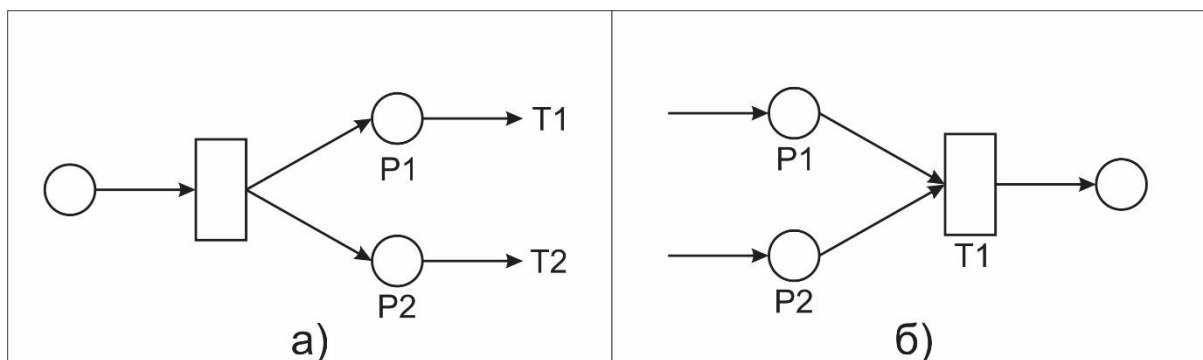
Конфликт је приказан на слици 4.2б. Прелаз t_1 и t_2 су у конфликту јер су и један и други омогућени али извршење било ког прелаза онемогућава извршење оног другог. Оваква ситуација може настати када рецимо воз при уласку у станицу има могућност избора уласка на више различитих колосека и слично. Конфликт се може решити на чисто недетерминистички или детерминистички начин, додељивањем одговарајућих вероватноћа прелазима који су у конфликту.



Слика 4.2 Узастопна извршења и конфликт

Конкурентност је приказана на слици 4.3а, где су прелаз t_1 и t_2 конкурентни. Услов за постојање конкурентности је да постоји претходни прелаз код ког се врши рачвање на два или више излазних места.

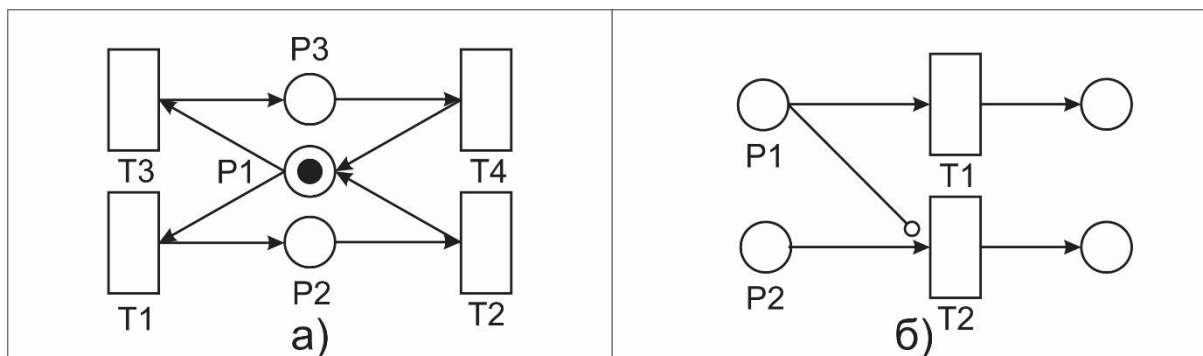
У динамичким системима је често нормално да одређени догађај захтева више ресурса. Синхронизација је приказана на слици 4.3б, где је прелаз t_1 омогућен само ако места p_1 и p_2 садрже токен. Долазак токена у места p_1 и p_2 може бити резултат комплексних операција у неком другом делу Петри мреже, при чему t_1 симболизује операцију спајања.



Слика 4.3 Конкурентност и синхронизација

Када се два процеса због ограничења коришћења заједничких ресурса не могу извршити у исто време тада имамо међусобну искључивост која је приказана на слици 4.4а. Међусобна искључивост може бити паралелна или редна.

Класичне Петри мреже немају механизам за представљање приоритета већ се та могућност може увести помоћу ограничавајуће гране (*inhibitor arc*). Она повезује улазна места са прелазима и приказује се као права линија на чијем се крају налази мали круг. Присуство ограничавајуће гране мења услове омогућавања прелаза. У присуству ограничавајуће гране прелаз се посматра као омогућен ако свако улазно место, повезано са прелазом нормалним луком садржи барем онај број токена колики је тежински коефицијент тог лука и ако нема токена у улазном месту повезаном са прелазом ограничавајућом граном. На слици 4.4б прелаз t_1 је омогућен ако место p_1 садржи токен а прелаз t_2 је омогућен ако место p_2 садржи токен док у месту p_1 нема токена. Овим се постиже приоритет прелаза t_1 у односу на t_2 .



Слика 4.4 Међусобна искључивост и приоритети

4.6. ПЕТРИ МРЕЖЕ ВИСОКОГ НИВОА

Петри мреже у свом оригиналном облику како их је дефинисао Карл Адам Петри имају ограничене могућности за моделирање. То је условило појаву Петри мрежа високог нивоа (*HLPN – High Level Petri Nets*). Петри мрежа високог нивоа је структура (*ISO/IEC 15909, 2004*):

$$HLPN = (P, T, D, Type, Pre, Post, M_0) \quad (4.2)$$

где је:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – коначан скуп места $p_i, i = 1, 2, \dots, m$

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – коначан скуп прелаза $t_j, j = 1, 2, \dots, n$

при чему важи да је $P \cap T = \emptyset$

D = непразан коначни скуп домена при чему се сваки елемент D назива тип (*type*)

$Type: P \cup T \rightarrow D$ је функција која се користи да додели типове местима и да дефинише начине прелазака

$Pre, Post: TRANS \rightarrow \mu PLACE$ су пре и пост маркирање са

$$TRANS = \{(t, m) | t \in T, m \in Type(t)\} \quad (4.3)$$

$$PLACE = \{(p, g) | p \in P, g \in Type(p)\} \quad (4.4)$$

$M_0 \in \mu PLACE$ је је мултисет дефинисан као почетно маркирање мреже при чему је $\mu PLACE$ скуп мултискупова за $PLACE$

Петри мреже високог нивоа се такође нормално представљају у графичком облику. Граф Петри мреже високог нивоа (*HLPNG*) се састоји из (*Milinković, 2013*):

- Мрежног графа кога чине скуп две врсте чворова, места и прелази, и лукови који повезују места са прелазима и прелазе са местима;
- Типова места, који представљају непразне скупове при чему је сваки тип додељен свако месту;
- Ознака места које се дефинишу као скуп елемената изабраних од типа места и повезаних са местом при чему је дозвољено понављање елемената. Елементи повезани са местом називају се токени;
- Ознаке лукова које могу бити константе, променљиве или функције. Константе су у напред дефинисане док код променљивих мора постојати нека почетна вредност.
- Услови прелаза који су логички изрази који дефинишу прелаз и
- Декларације које садрже дефиниције типова места, променљивих и дефиниције функција.

Извршење *HLPN* може се пратити и визуелно при чему се може пратити кретање самих токена кроз мрежу. Основни концепт који управља извршењем мреже је омогућавање прелаза (*enabling of transitions*) и појава прелаза (*occurrence of transitions*) који су дефинисани у правилима прелаза (*Transition Rule*).

Прелази су омогућени у зависности од ознаке мреже (*Net marking*). Ознака или стање мреже се састоји из скупа свих ознака места у мрежи. Прелаз је такође омогућен у одређеном режиму прелаза (*Transition mode*). Режим прелаза је додела вредности променљивима прелаза које задовољавају услове прелаза. Променљиве прелаза су све оне променљиве које се појављују у изразима додељеним прелазу. То су услови прелаза и ознаке лукова повезаних са тим прелазом.

Омогућавање прелаза укључује означавање његових улазних места. Улазно место прелаза је место које је повезано са прелазом луком који води од места ка прелазу. Лук који води од места ка прелазу назива се улазни лук прелаза. Прелаз је омогућен у одређеном стању за одређено означавање мреже. Свака ознака улазне гране се процењује за стање прелаза, дајући мултискуп токена истог типа као и улазно место. Ако означавање сваког улазног места садржи барем онај мултискуп токена као улазни лук (добити процену израза улазног лука) тада је прелаз омогућен. Два прелаза су истовремено омогућена за одређено маркирање ако свако улазно место садржи барем суму омогућених токена сваког улазног лука повезаних са тим улазним местом.

Омогућени прелази се могу остварити. Остварењем прелаза токени се уклањају из улазног места и додају излазном месту. Излазно место прелаза је место повезано са прелазом помоћу лука који води од прелаза до места. Лук који води од прелаза до места (излазног места прелаза) се назива излазна грана прелаза. Ако је прелаз омогућен у одређеном стању, он се може извршити у том стању. Приликом извршења прелаза у одређеном стању, следећи догађаји се остварују:

- 1) За свако улазно место прелаза: омогућени токени улазног лука се уклањају из улазног места
- 2) За свако излазно место прелаза, мултискуп токена као резултат прорачуна излазног лука се додаје излазном месту

Могућности примене основне и Петри мреже високог нивоа су исте, главна разлика је у нивоу функционалности. Код основне Петри мреже токени се не разликују међусобно док код Петријеве мреже високог нивоа токени могу бити носиоци података јер се сваком токenu додељује одређена „боја“ као ознака информације коју носи. Самим тим на овакве токене могуће је применити и логичке функције и дефиниције код дефинисања услова прелаза. Такође, Петри мреже високог нивоа омогућавају употребу хијерархије у моделу, па се знатно олакшава креирање великих модела применом поднивоа односно модула.

Обојене Петри мреже

Концепт обојених Петри мрежа је дефинисао Курт Јенсен (*Jensen, 1991*), где су за разлику од простих Петри мрежа токени носиоци информација, односно имају одређену „боју“. Код простих Петри мрежа токени су сви идентични и представљени црним круговима односно тачкама без додатних обележја јер они са собом не носе никакве информације. Код обојених токена боја нам означава врсту токена односно информацију коју носи. Боја односно информације могу бити различити па тако може постојати више токена са различитим информацијама у моделу. Боја токена се може посматрати и као променљива па постоји могућност њене промене односно промене информације коју токен носи током његовог кретања кроз модел односно извршења симулације. Чест је случај да је боја токена комплекса структура која се састоји из више различитих информација као што су низови текста, реални и цели бројеви и др.

Поред токена, места и прелази у моделу су обележена одговарајућом бојом и могу садржати односно пропуштати само оне токене који су исте боје као место и прелаз. Овде се осим стандардних услова прелаза појављују и додатни услови да прелаз може да се догоди односно активира само ако се боје токена и прелаза поклапају. Прелаз се врши на исти начин као и код простих Петри мрежа, активирањем прелаза се токен односно скуп токена уклања из улазног места и додаје у излазно место.

Временске Петри мреже

Потреба за укључивањем временских променљивих у различите моделе динамичких система је логична пошто се ови системи увек посматрају у функцији времена. У оригиналној дефиницији Карл Адама Петрија (*Petri, 1962*) време је намерно избегнуто пошто увођењем времена топологија мреже више нема примарни утицај на њено функционисање. У стварности је сваки догађај везан за време и потребно је знати и када се неку догађај десио а и колико је трајао. Када Петри мрежа садржи временску константу t тада она постаје временска Петри мрежа (*Timed Petri Net*). Основни елементи овакве мреже су (*Wang, 2007, Hruz et al., 2007*):

- тополошка структура,
- обележавање структуре и
- правила активирања

Тополошка структура је најчешће иста као код класичних Петри мрежа док се обележавање структуре састоји из додељивања нумеричких вредности прелазима, местима и

луковима који повезују места и прелазе. Правила активирања су различито дефинисана у зависности како је Петри мрежа обележена временским променљивим. У односнu на класичну Петри мрежу, услови прелаза су у зависности од времена односно симулационог часовника. Постоји низ типова временских Петри мрежа али су најчешће коришћене детерминистичке временске Петри мреже и стохастичке временске Петри мреже.

Постоји неколико начина за убацивање времена у модел петри мреже (Milinković, 2013). Могуће је додати време сви елементима графа Петри мреже односно местима, прелазима и луковима, али се у пракси временско задржавање најчешће додељује прелазима. Код обојених Петри мрежа и токени су носиоци податка о времену, у овом случају то је прелазно време које говори када је токен на располагању за следећи прелазак. Задржавања могу бити детерминистичка, недетерминистичка и стохастичка. Детерминистичко задржавање у месту, прелазу и на луку је фиксно. Оно се може користити у одређеним случајевима, најчешће у неким једноставнијим анализама док је у стварним системима задржавање најчешће променљиво. Недетерминистичка задржавања се најчешће дефинишу одређеним временским интервалом који одређује трајање активности. Код стохастичког задржавања користи се претпостављена расподела вероватноћа за свако задржавање. Задржавања можемо поделити и на дискретна и непрекидна, при чему дискретна користе природне бројеве а непрекидна ненегативне реалне бројеве за дефинисање дужине задржавања.

Увођење времена у Петри мреже доводи и до промена у правилима окидања и преласка. Код класичних Петри мрежа прелаз је омогућен ако улазно место има довољно токена и при активацији прелазак је тренутан, односно истог тренутка се токен уклања из улазног места и додаје у излазно. Ако је једно место повезано са више прелаза тада су прелазу у конфликту (слика 4.26). Код временских Петри мрежа правила улаза и прелаза се морају променити како би се дефинисао начин решавања конфликта и да ли је активирање тренутно или не. Овај проблем се решава помоћу преселекције (*Preselection*) и семантиком распореда (*Race semantics*). У ситуацији када је активирање тренутно потребно је доделити време омогућавању прелазу. Ако је време додељено омогућавању прелазу тада нема потребе на други начин дефинисати како се решавају конфликти, јер ће се прво извршити онај прелаз који је први на реду. Могуће је и експлицитно дефинисати који ће се прелаз први активирати и то је преселекција.

4.7. РЕЗИМЕ

Петри мреже су ефикасан алат за моделирање и анализу динамичких система. Почев од основне дефиниције њихова применљивост се повећава развојем нових врста односно дијалеката Петри мрежа. Њиховој све већој примени је допринео и развој одговарајућих софтверских алата (Прилог 1) који су или самостална софтверска решења или додаци за постојеће симулационе програме као што је *Matlab*. Већина ових програма поседује графички интерфејс и могућност анимације одвијања симулације што их чини доступним и разумљивим широком кругу корисника. Особине сложенијих дијалеката Петри мрежа као што су Петри мреже високог нивоа (*HLPN*) чини их погодним за симулације саобраћајних система. Могућност креирања хијерархије и модуларности као и примена „обојених“ токена могу успешно моделирати железнички саобраћајни систем а уз примену графике и анимације на релативно једноставан начин, и анализирати добијене резултате. Додатне могућности за моделирање се добијају коришћењем Фази Петри мрежа (Milinković et al., 2013, Milinković et al., 2010, Palit et al., 2005, Přibyl et al., 2003, Pedrycz et al., 2003, Teodorović, 1999, Virtanen, 1995) које обједињују Петри мреже високог нивоа и фази логику.

5. МОДЕЛИРАЊЕ ЖЕЛЕЗНИЧКОГ САОБРАЋАЈА ПОМОЋУ ПЕТРИ МРЕЖА

5.1. УВОД

Као што је у претходном делу показано, постоји читав низ софтвера за моделирање железничке инфраструктуре и уопште железничког система. Тај модел мора да испуњава врло строге критеријуме и правила кретања возова, са посебним нагласком на безбедност. У овом поглављу представљен је модел Петри мрежа високог нивоа за симулирање саобраћаја у железничким системима. Захваљујући могућностима Петри мрежа високог нивоа модел је израђен у модуларној структури где су елементи који се понављају и који сами по себи функционишу на исти начин као што су изоловани одсеци и скретнице урађени као модули и чине најнижи хијерархијски ниво. Излазни подаци и анимација омогућавају праћење кретања сваког воза као и стање сваког изолованог одсека, брзину и друге карактеристике неопходне за анализу саобраћаја. Овим се омогућава праћење возова као у стварном систему.

Осим модула одсека који одговарају изолованим одсечима у реалном систему и скретница у моделу је неопходна управљачка логика за регулисање саобраћаја уз испуњавање безбедносних критеријума. Управљачка логика је у моделу децентрализована где један део чине елементи који симулирају станичну поставницу и примењује одговарајуће зависности из табеле зависности. Други део чини диспечерски систем који је задужен за регулисање саобраћаја на међустаничним растојањима и избегавање настанка *deadlock* ситуација односно у станицама и на међустаничним растојањима.

5.2. ИЗРАДА МОДЕЛА ПЕТРИ МРЕЖА

Петри мреже су моћан алат за моделирање и симулацију динамичких система (*Vanit-Anunchai, 2010, Ricci i Tieri, 2008, Kaakai et al., 2007, Fanti et al, 2006, Burkolter, 2005, Kluge, 2003, Vernez et al., 2003*). Железница и прецизније гледано железничка инфраструктура такође спада у динамички систем који је могуће моделирати помоћу Петри мрежа (*Potekhin et al. 2016, Khan et al., 2014, van der Aalst et al., 1995*). Наравно, нису сви дијалекти Петри мрежа погодни за моделирање железничке инфраструктуре већ морају испуњавати одређене услове с обзиром на специфичности железничког саобраћаја. Софтверски пакет за симулацију Петри мрежа првенствено мора да има могућност креирања Петри мрежа високог нивоа (*HLPN*) које саме по себи морају подржавати (*Milinković, 2007*):

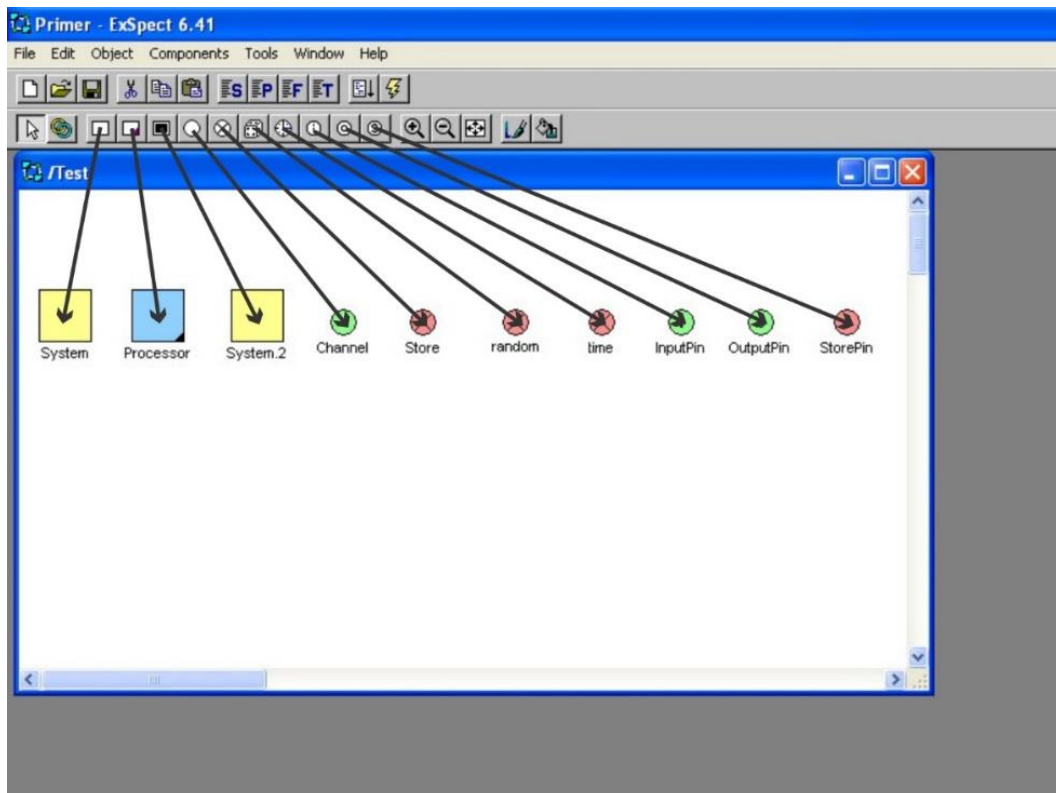
- Хијерархијске Петри мреже где постоји могућност креирања модуларне структуре железничке инфраструктуре како би се кретање токена могло пратити у више нивоа;
- Временске Петри мреже које омогућавају кретање и праћење возова кроз модел;
- Обојене Петри мреже које омогућавају да токени који представљају воз носе са собом детаљне информације о самом возу као и да омогуће да се возови разликују. Осим возова те информације могу бити и управљачке команде за регулисање саобраћаја. Те информације се током извршења симулације могу мењати;
- Стохастичке Петри мреже које омогућавају да се у мрежу убаце кашњења возова или времена долазака возова по одређеној теоријској расподели.

Осим захтева које морају саме Петри мреже испуњавати, постоји и други захтев за симулациони софтвер као што су могућност увоза података из екстерних база, извоза података о кретању токена кроз модел у облику погодном за даљу обраду као и карактеристике које олакшавају моделирање. Ту се првенствено мисли на постојање јасног и разумљивог графичког интерфејса, могућност рада у различитим оперативним системима, актуелност и

ажурност софтвера и др. У овом раду модел железничке инфраструктуре је развијен помоћу софтвера *ExSpect v6.41* (Aalst, 1999, Basten et al., 1995, Van Hee et al., 1993).

5.3. ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ПРОГРАМА EXSPECT

На слици 5.1 приказан је основни прозор програма *ExSpect* у коме су приказани његови елементи. Сви елементи су приказани графички као готови програмски блокови са јасно дефинисаним и препознатљивим симболима. Дуплим кликом се улази у детаљнија подешавања сваког објекта. За дефинисање функционисања самог објекта користи се једноставан програмски језик, специфичан за овај софтвер а по структури сличан као *StandardML* програмски језик.



Слика 5.1 Основни елементи програма *ExSpect*

Објекти који постоје у програму су:

- 1) **Систем** (*System*) који дефинише систем у самом моделу. Програм нуди могућност дефинисања и система у систему односно подсистема, а повезује се са системом вишег нивоа помоћу улазних и излазних веза (*Input* и *Output pin*).
- 2) **Процесор** (*Processor*) представља прелаз у мрежи. У њему се дефинишу услови прелаза при чему се услови могу дефинисати и врло сложеним функцијама које укључују и боју токена. У условима прелаза могуће је дефинисати не само начин већ и време обављања прелаза као и закашњења (задржавања) помоћу функције *delay*. У симулацијама железничког система процесори управљају кретањем возова кроз модел.
- 3) **Канал** (*Channel*) у моделу представља место. Канали чине везу између два процесора и сваки канал може да садржи само један тип односно једну боју токена. Токени имају и временску одредницу (*timestamp*) на основу које се може утврдити време доласка односно одласка из места. Подаци о токенима у месту се могу у току трајања симулације извозити у неколико формата од којих је најпогоднији за каснију обраду *.xls* формат *Microsoft Excel-a*. Са сваког места је могуће извозити податке у различите фајлове али такође и у исти фајл чиме се омогућава праћење кретања токена кроз цео

модел. Осим извоза података могућ је и увоз података из екстерног фајла. Фајл мора бити у текстуалном .txt формату и написан на одговарајући начин са одговарајућим редоследом података што се посебно односи на токене који имају више боја односно носе више различитих информација. У симулацији железничког саобраћаја места се могу посматрати као изоловани одсеци (колосечни, скретнички, блоковни...) док су токени возови. Праћењем кретања токена се заправо прати кретање воза кроз одсеке а задржавање у одсечима се симулира помоћу функције *delay* у процесорима.

- 4) **Складиште (Store)** такође по структури представља место, али такво да увек мора садржати токен. Главна улога му је чување података током извршења симулације и осим што је за свако складиште неопходно дефинисати почетну вредност на почетку симулације, ти подаци се могу мењати током извршења симулације. Осим чувања могуће је и извозити податке у току трајања симулације у неколико формата од којих је најпогоднији за каснију обраду .xls формат *Microsoft Excel-a*. Постоји читав низ складишта која се користе у моделу, нека се користе у модулима односно подсистемима а нека у главном систему. Најважнија су:
- а) складиште *vreme_voznje* које се налази у свим модулима и служи да складишти информацију о времену путовања кроз одсек. Време путовања се добија на основу података о дужини и брзини на том одсеку из других екстерних складишта. Трајање времена путовања се затим помоћу функције *delay* користи да се токен (воз) задржи унутар одсека за тај временски интервал;
 - б) складиште *info* које садржи основне податке о одсеку као што су дужина одсека, брзина кроз одсек, брзина у правац и скретање ако је у питању скретнички одсек а за неке одсеке као што је просторни одсек испред улазног (заштитног) сигнала и брзину у скретање на наредном скретничком одсеку. Сви ови подаци се користе за прорачун времена путовања (задржавања токена) кроз одсек, и уносе се пре почетка симулације за сваки одсек засебно;
 - в) складиште *stanje* које показује стање односно заузеће одсека. За колосечне одсеке дефинишу се три стања и то 0 – одсек слободан, 1 – одсек заузет путем вожње (путем претрчавања) и 2 – одсек заузет возом. Код скретничких одсека због постојања могућности кретања у правац или скретање и упрошћавања модела се користи шест стања и то:
 - ✓ 0 – скретнички одсек слободан, скретница у положају у правац;
 - ✓ 1 – скретнички одсек слободан, скретница у положају у скретање;
 - ✓ 2 – скретнички одсек заузет путем вожње (путем претрчавања), скретница у положају у правац;
 - ✓ 3 – скретнички одсек заузет путем вожње (путем претрчавања), скретница у положају у скретање;
 - ✓ 4 – скретнички одсек заузет возом, скретница у положају у правац и
 - ✓ 5 – скретнички одсек заузет возом, скретница у положају у скретање.
 - д) складиште *sig* које чува информацију о тренутном сигналном знаку сигнала. Та информација се користи за прорачун брзине кроз одсек, а такође и у анимацији симулације и олакшава праћење функционисања модела.
 - е) складиште *privola* које садржи податке о смеру и стању приволе при чему се складиште може налазити у четири стања: 1 – привола у смеру од почетка ка крају пруге, 2 – привола у смеру од краја ка почетку пруге, 3 – привола блокирана у смеру од почетка ка крају пруге и 4 – привола блокирана у смеру од краја ка почетку пруге.
 - ж) складишта *kom* која унутар диспеческог подсистема складиште информације о путевима вожње који се користе у моделу. Складиште команди диспечерски подсистем користи за формирање путева вожње у станицама и спречавање *deadlock* ситуација.

- 5) **Генератор случајних бројева** (*Random*) служи за генерисање случајних бројева као што су рецимо кашњења возова.
- 6) **Генератор времена** (*time*) представља системски часовник који се користи у свим прелазима који имају и временску компоненту.
- 7) **Улаз у подсистем** (*InputPin*) се користи за повезивање система вишег и нижег нивоа односно представља улазно место подсистема нижег нивоа.
- 8) **Израз из подсистема** (*OutputPin*) има сличну намену као и претходни елемент, само што у овом случају представља излазно место система нижег нивоа.
- 9) **Веза складишта подсистема** (*StorePin*) се користи у системима нижег нивоа како би се повезали са складиштима на вишем нивоу. Оно је посебно корисно код модула који се више пута понављају као што су модули изолованог одсека где се они повезују са складиштем *info* или *sig* у коме су дефинисани параметри само за тај одсек односно сигнал или са генератором времена (*time*).

Системи се у програму *ExSpect* могу моделирати на два начина. Први начин је да се сви елементи система представе помоћу места и прелаза и затим повежу одговарајућим функционалним везама. Овакав начин је једноставан за моделирање, прецизан и поуздан јер омогућава лако проналажење грешака. Али са друге стране ефикасан је само за мање системе јер захтева појединачно повезивање и уношење свих потребних података за све елементе система. Најчешће се овакав начин користи само за модуле односно подсистеме који се могу више пута убацити у модел (*System from Library*).

Други начин је коришћење постојећих или израда нових модула (*System from Library*) који омогућава да се модули који се у моделу више пута понављају, као што су модули изолованих одсека убацују као подсистеми. При томе је неопходно дефинисати и унети само оне податке који су карактеристични за тај модул (одсек) као што су дужина, брзина и сл. Модули се убацују оним редоследом као и у реалном систему, повезују како међусобно тако и са одговарајућим складиштима, при чему се примењују сва правила из табеле зависности. Овакав начин моделирања захтева више времена на почетку приликом дефинисања и креирања модула али знатно олакшава моделирање код великих станица или деоница пруге где постоји доста изолованих одсека и скретница. Са друге стране овакав начин моделирања отежава праћење извршења симулације и откривања грешака.

5.4. ДЕФИНИЦИЈЕ У ПРОГРАМУ EXSPECT

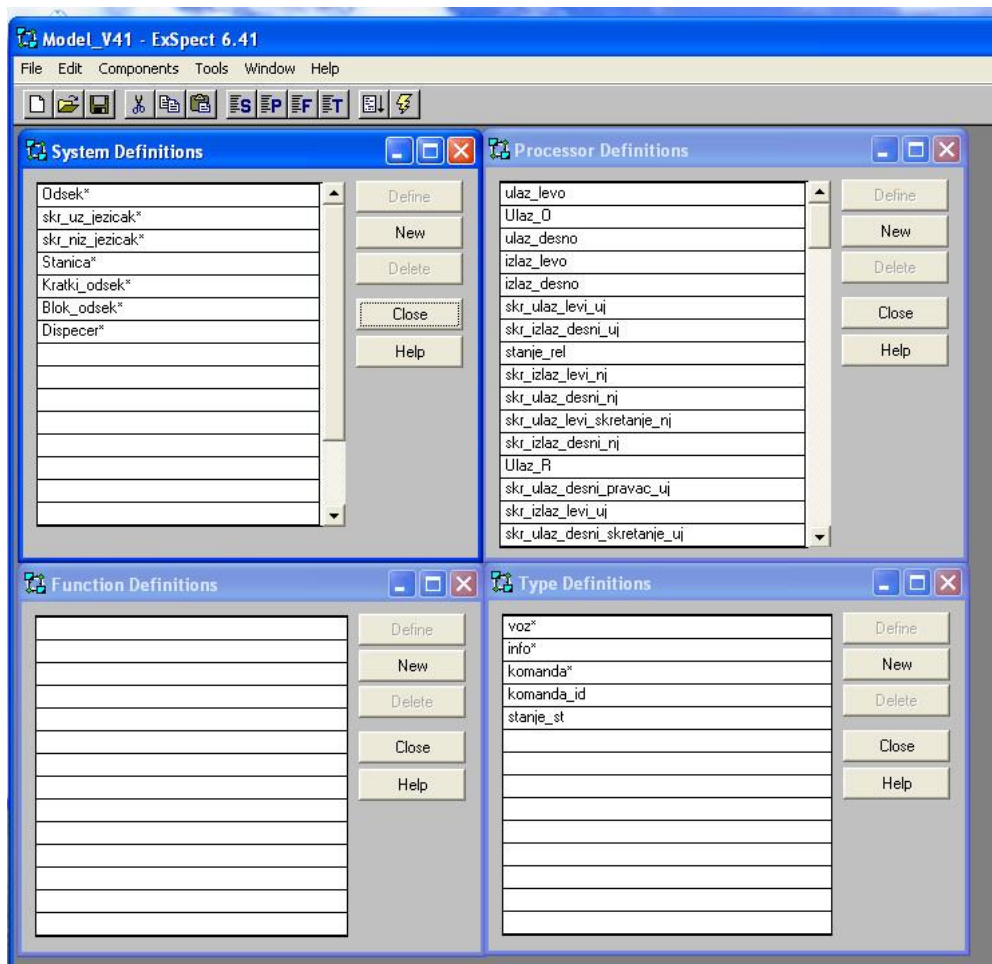
У програму *ExSpect* дефиниције система, функција, типова и процесора се чувају у бази из које их је могуће позивати, прегледати и мењати. Дефиниције се позивају преко главног менија у виду четири прозора који су приказани на слици 5.2.

Дефиниције система (*System definitions*) приказују све системе и подсистеме који су коришћени у моделу. Само затворени односно они системи (модули) који не садрже везу са системом вишег реда (*Input* и *OutputPin*) се могу симулирати.

Дефиниције процесора (*Processor Definitions*) приказују све процесоре који су коришћени у систему односно подсистемима. Процесори се приказују оним редоследом којим су креирани при чему не постоји могућност филтрирања процесора по подсистему у ком су коришћени или неким другим параметрима, што отежава претрагу када је неопходно модификовати одређени процесор.

Дефиниције функција (*Function Definitions*) приказују све функције коришћене у моделу. Уколико се нека функција понавља више пута у моделу тада ју је могуће дефинисати и позивати сваки пут када се користи. То рецимо може бити функција која прорачунава време путовања кроз одсек јер је то функција која се понавља у свим модулима одсека.

Дефиниције типова (*Type Definitions*) приказују све типове података односно токена коришћене у моделу. У програму већ постоје одређени стандардни типови података који се не приказују као што су *num*, *real*, *str* и други али и могућност креирања нових типова који могу бити мултисет односно сложена комбинација постојећих типова. Постоји и могућност хијерархијског креирања типова где се сложени тип креира од више сложених типова података. У моделу је дефинисано пет типова: *voz*, *info*, *komanda*, *komanda_id* и *stanje_st*. Прва два типа се користе у главном систему, тип *komanda* се користи и у главном систему и у диспечерском подсистему док су последња два типа карактеристична само за диспечерски подсистем.

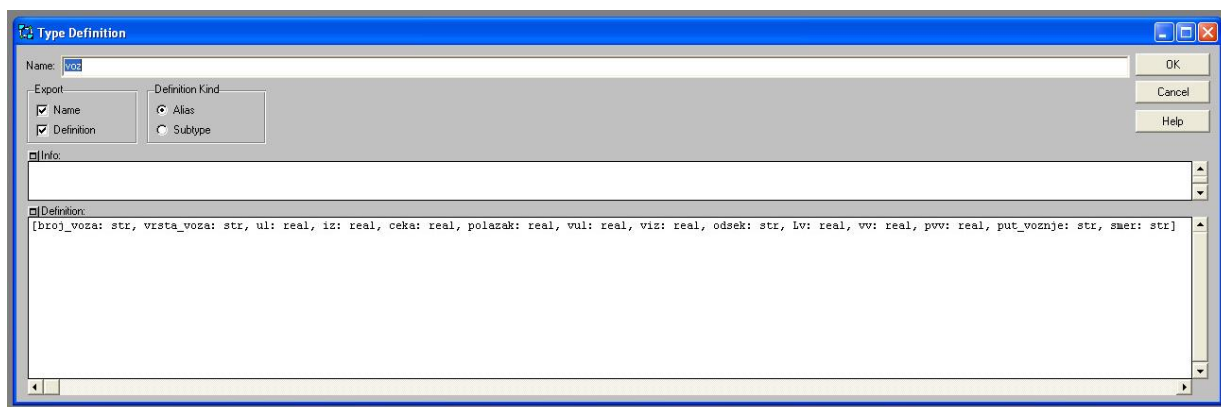


Слика 5.2 Дефиниције у програму ExSpect

Тип *voz* као што му и сам назив каже представља воз у систему, његова дефиниција приказана је на слици 5.3. Састоји се од низа података којима дефинишемо карактеристике воза неопходне за симулацију. Сви подаци се дефинишу у екстерној бази података (.txt фајл) и учитавају пре почетка симулације. То су:

- *broj_voza* који представља број воза, дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *vrsta_voza* који представља врсту односно категорију воза, дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *ul* представља улазно време у одређено место, у овом моделу је то улаз на изоловани одсек. Дефинише се као реални број (тип *real*) и добија на основу симулационог часовника;
- *iz* представља излазно време из одређеног места, у овом моделу је то излаз из изолованог одсека. Дефинише се као реални број (тип *real*) и добија на основу симулационог часовника;

- *seka* је податак о задржавању воза на одређеном изолованом одсеку преко потребног времена вожње кроз одсек. Добија се када се од разлике излазног и улазног времена одузме време вожње кроз одсек и такође се дефинише као реални број (тип *real*);
- *polazak* дефинише време поласка односно време уласка воза на моделирану деоницу, дефинише се као реални број (тип *real*);
- *vul* представља улазну брзину на одсек, тај податак се користи у прорачуну времена вожње кроз одсек, дефинише се као тип *real*;
- *viz* је слично као и претходни сам што је у овом случају у питању излазна брзина из одсека;
- *odsek* је текстуални податак који показује на ком се одсеку воз налази односно који последњи одсек је напустио, то је текстуални податак (*str*);
- *Lv* представља дужину воза, дефинише се као тип *real*;
- *vv* представља чисто време вожње кроз одсек које добијамо када дужину одсека поделимо са максималном брзином кроз одсек, дефинише се као тип *real*, користи се за израчунавање времена путовања у односу на чисто време вожње;
- *rvv* представља продужење времена вожње узроковано успоравањем због заустављања на сигналу или вожње ограниченом брзином на наредном одсеку. Добија се као разлика чистог времена вожње и времена путовања, дефинише се као тип *real*;
- *put_voznje* представља податак о коришћеном путу вожње за сваки воз, додељује се возу после проласка поред одговарајућег главног сигнала иза кога постоји избор пута вожње, то је текстуални податак (*str*);
- *smer* представља смер кретања воза односно излаз из модела, дефинише се као текстуални податак (*str*).



Слика 5.3 Дефиниција типа *voz*

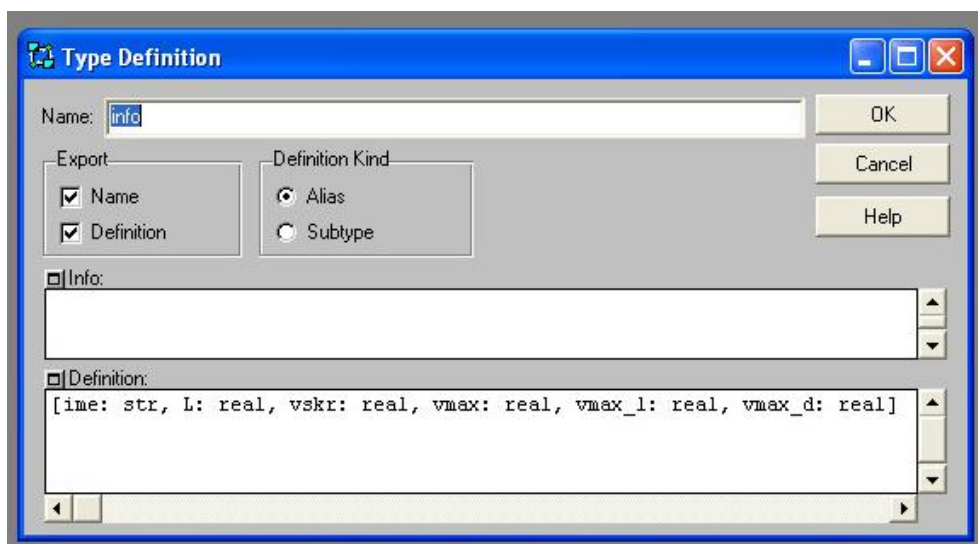
Сви подаци се могу мењати у току извршења симулације, неки као што су *ul*, *iz*, *seka* и *odsek* се мењају увек током извршења симулације док други као што су *broj_voza*, *vrsta_voza* и *smer* само по потреби. Сви подаци се на одређеним унапред дефинисаним местима извозе у екстерну базу података чиме се омогућава детаљно праћење кретања воза кроз модел.

Тип *info* се користи код складишта повеаних са одсеком, у њему се дефинишу карактеристике одсека као што су име, дужина и брзина. Приказан је на слици 5.4 и састоји се из следећег:

- *ime* представља назив одсека и дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *L* представља дужину одсека и користи се за прорачун времена путовања кроз одсек, дефинише се као реални број (тип *real*);
- *vskr* је максимална брзина у скретање на суседном одсеку, овај податак се користи код просторних одсека испред улазних односно заштитних сигнала и користи у прорачуну времена путовања кроз одсек. Код скретничких одсека овај податак дефинише брзину у скретање на том одсеку, у оба случаја дефинише се као тип *real*;
- *vmax* је максимална брзина кретања кроз одсек, дефинише се као тип *real*;

- *vmax_l* је максимална брзина кретања на суседном одсеку који се у моделу налази лево од посматраног одсека. Користи се код одсека између којих постоји прелом брзине и дефинише се као тип *real*;
- *vmax_d* је максимална брзина кретања на суседном одсеку који се у моделу налази десно од посматраног одсека. Користи се код одсека између којих постоји прелом брзине и дефинише се као тип *real*.

Ови подаци се дефинишу унапред пре почетка симулације, не морају се сви подаци дефинисати за сваки одсек већ само они које тај одсек (модул) користи у прорачуну. На пример *vmax_l* и *vmax_d* се не морају дефинисати за скретнички одсек јер се за тај одсек ови подаци не користе у прорачуну времена путовања.

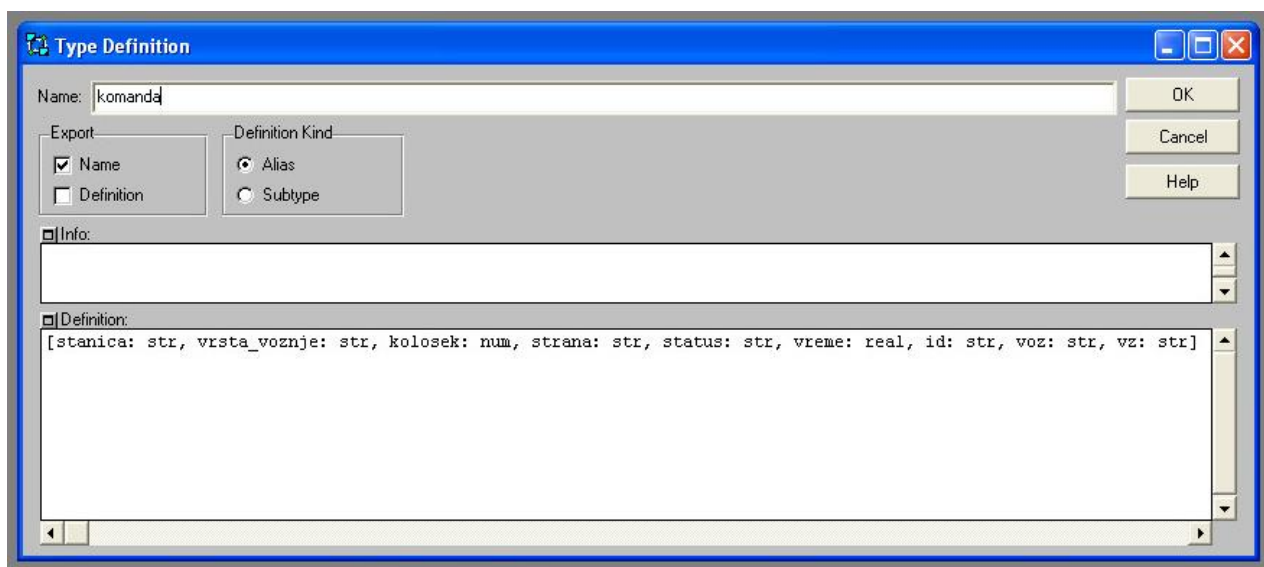


Слика 5.4 Дефиниција типа *info*

Тип *komanda* се користи како у главном систему тако и у диспечерском подсистему. Његова основна улога је размена команди и информација између главног система и диспечерског подсистема. Помоћу овог типа се из диспечерског подсистема у главни систем преносе команде за формирање одређеног пута вожње а из главног система се у диспечерски подсистем враћају информације о формирању односно статусу одређеног пута вожње. Приказан је на слици 5.5 и састоји се из следећег:

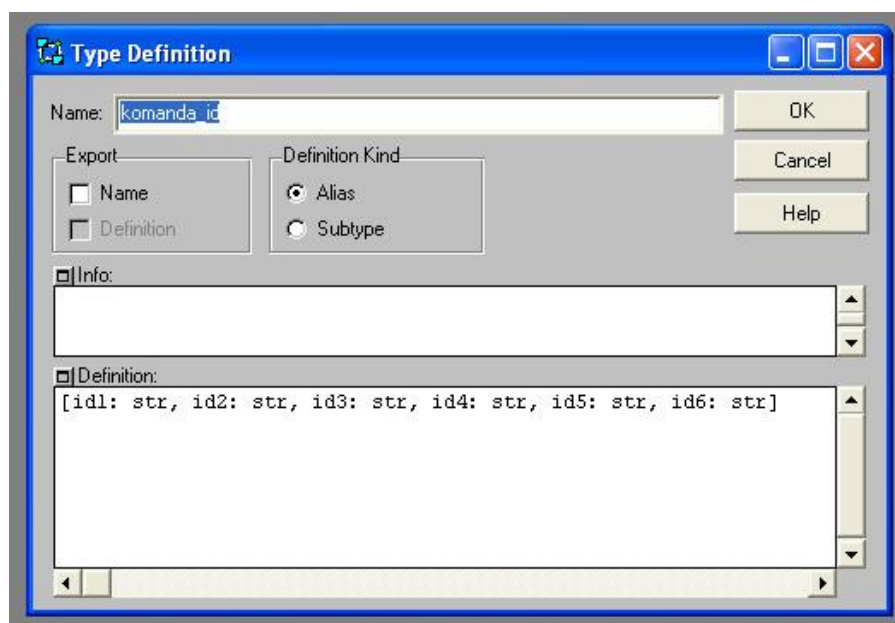
- *stanica* представља станицу односно службено место коме се упућује команда за формирање пута вожње и дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *vrsta_voznje* представља врсту пута вожње који се формира (улазни или излазни), такође се дефинише као текстуални податак (*str*);
- *kolosek* представља улазни односно излазни колосек на који односно са ког се пут вожње формира. То је нумерички податак (*num*);
- *strana* представља страну станице односно ознаку међустаничног растојања са кога односно на који се одговарајући пут вожње формира. То је као и ознака међустаничног растојања велико слово абетеде (*str*);
- *status* представља статус одговарајуће команде за формирање пута вожње. То може бити захтев за формирање пута вожње или информацију о реализацији команди за формирање пута вожње, дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *vreme* представља време на системском часовнику промене статуса одређене команде, дефинише се као тип *real*;
- *id* представља скраћену ознаку команде за формирање пута вожње, састоји се из скраћенице имена станице, стране са које се формира пут вожње и колосека на који или са кога се пут вожње формира, дефинише се као текстуални податак (*str*);

- *voz* представља податак о броју воза за који се одређена команда упутила ондосно извршила, дефинише се као текстуални податак (*str*);
- *vz* представља врсту заузећа због ког одређена команда није могла бити реализована. Заузеће може бити заузеће возом или путем претрчавања, дефинише се као текстуални податак (*str*).



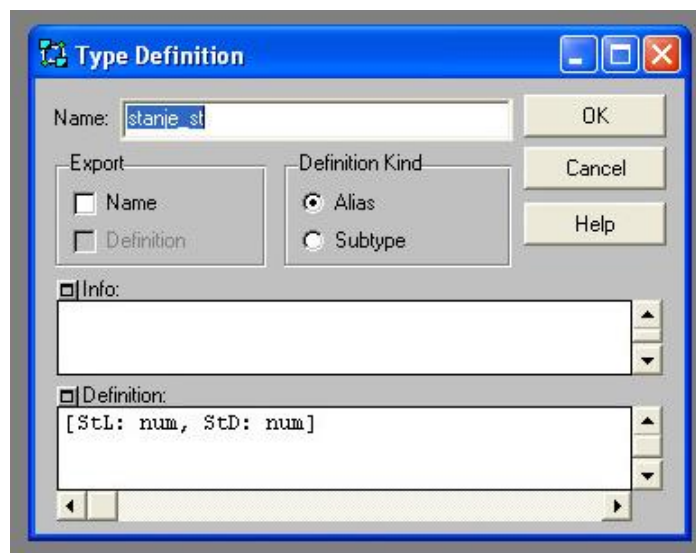
Слика 5.5 Дефиниција типа *Komanda*

Тип *komanda_id* је интерни тип диспечерског подсистема и служи за складиштење идентификације сваке команде за формирање пута вожње. Идентификација команде (*id*) из типа *komanda* служи за утврђивање расположивости одређене команде односно пута вожње. Састоји се из неколико текстуалних типова *id1*, *id2*,... при чему је број типова одређен максималним бројем путева вожње у свим станицама. Тип *komanda_id* је приказан на слици 5.6.



Слика 5.6 Дефиниција типа *komanda_id*

Тип *stanje_st* је такође интерни тип диспечерског система. Чине га два нумеричка типа и користи се за складиштење информација о расположивом капацитету станица, подељено по смеровима (лево и десно). Дефинише се за сваку станицу посебно и служи за спречавање загушења (*deadlock*), овај тип је приказан на слици 5.7.



Слика 5.7 Дефиниција *muna stanje_st*

5.5. МОДУЛИ У СИМУЛАЦИОНОМ МОДЕЛУ

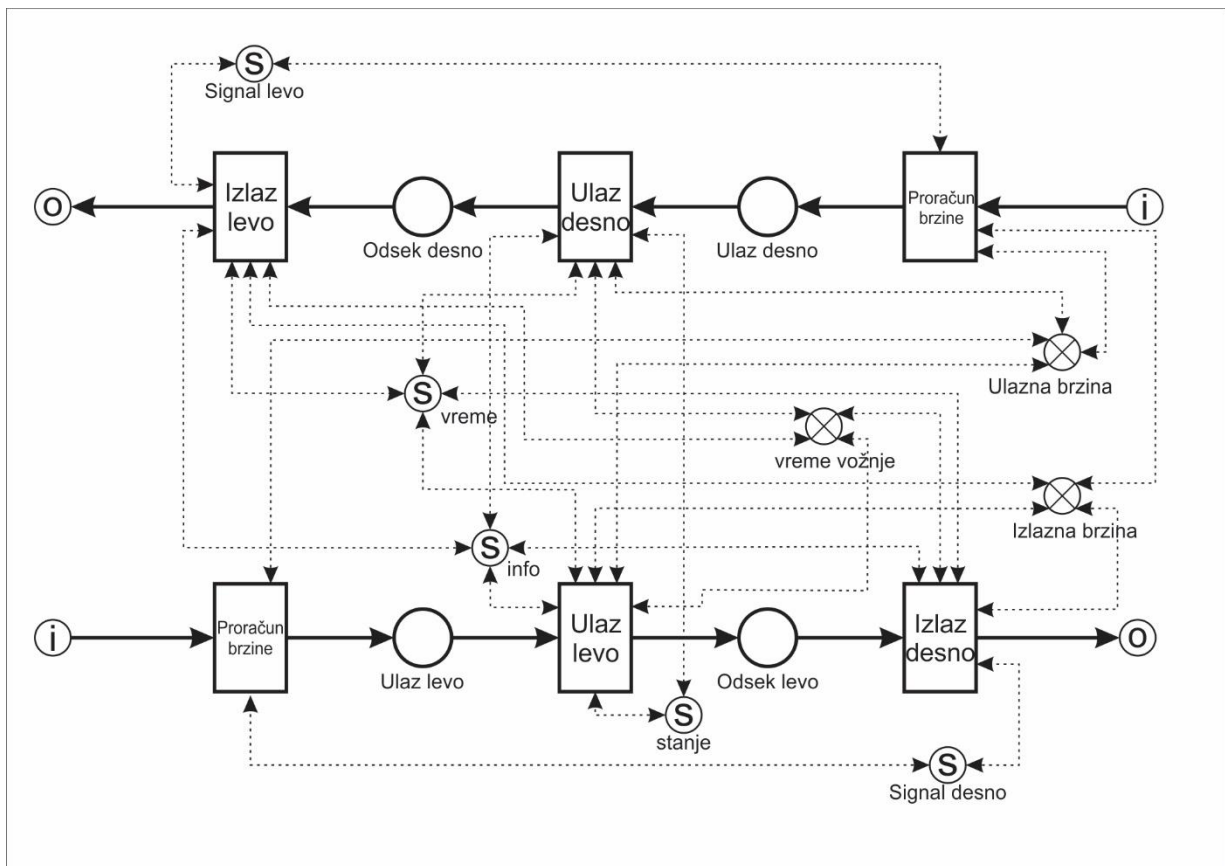
У овом раду је примењен метод креирања модела помоћу подсистема односно модула. Модули су креирани за све елементе који се понављају као што су колосечни и скретнички одсеци. Код колосечних одсека разликују се модул блок одсека, модул кратког одсека између улазног сигнала и прве улазне скретнице и модул станичног колосека. Код скретничких одсека разликују се модул скретнице за вожњу уз језичак и низ језичак, гледано од почетка ка крају пруге односно у моделу са лева на десно. Као јединствен модел појављује се диспечерски подсистем који је задужен за регулисање саобраћаја и он представља највиши хијерархијски ниво система.

5.5.1. МОДУЛ КОЛОСЕКА

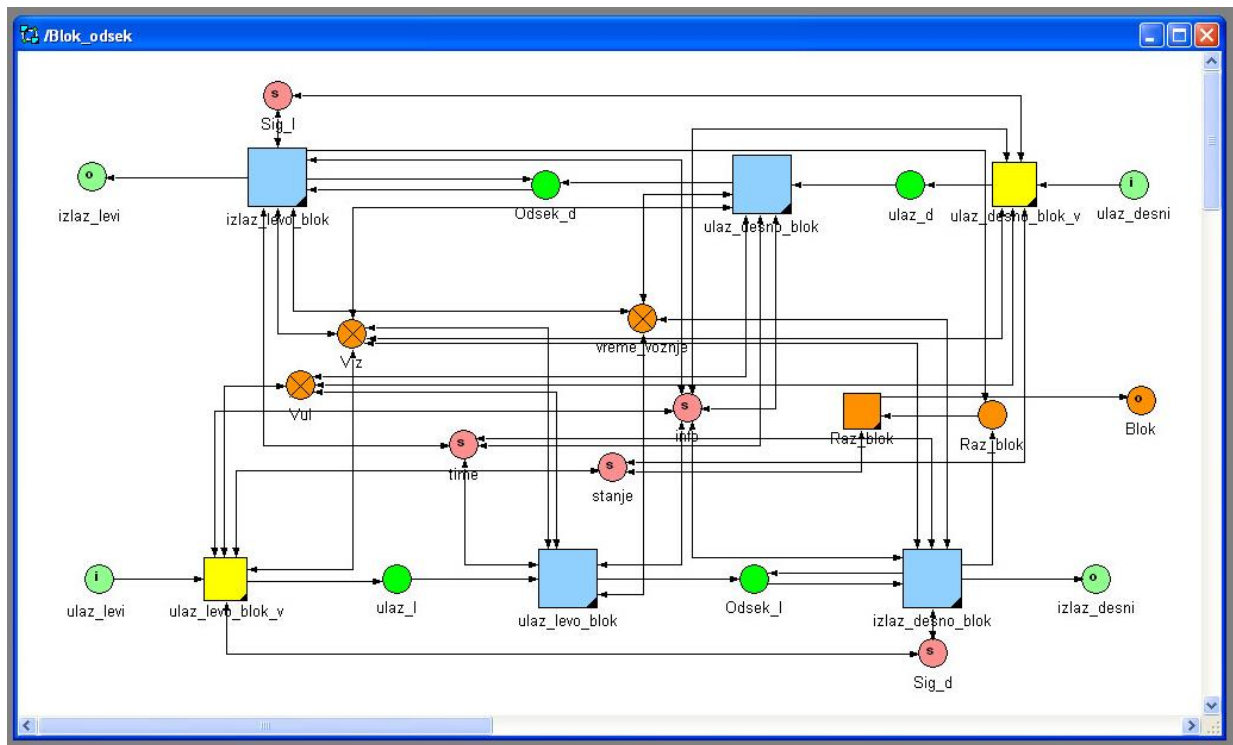
Код модула колосека заправо постоје три различита модула чија се структура у великој мери међусобно поклапа. Заједничко за све три врсте модула је да имају улаз и излаз у оба смера повезан са системом вишег реда, да се прорачун времена путовања врши на основу дужине одсека и брзине кроз одсек и да се на једном одсеку у једном тренутку може наћи само један воз. Главна разлика између модула се односи на прорачун брзине путовања кроз одсек па самим тим постоје и одређена додатна повезивања и зависности. Овај модул је у суштини надоградња модула колосека приказаних у (*Jeremić et al. 2016, Milinković et al., 2013, Jeremić, 2010, Milinković, 2007*)

Шематски приказ модула просторног одсека приказан је на слици 5.8. Правоугаоници представљају процесоре, кругови места, кругови са *X* у средини складишта у модулу, кругови са *S* у средини везу са складиштима вишег нивоа и кругови са *I* и *O* улазну односно излазну везу са системом вишег нивоа. Када токен (воз) уђе у модул на једној или другој страни прво долази до процесора за прорачун брзине кретања. Овај процесор прво поставља стање одсека на 2 (заузето возом) а затим се на основу сигналног знака наредног главног сигнала тј. главног сигнала на крају одсека прорачунава излазна брзина из одсека. Она може бити 0 (заустављање), ограничена брзина односно брзина у скретање преко скретница или максимална дозвољена брзина. На основу те брзине и дужине одсека наредни процесор прорачунава време вожње кроз одсек. Процесор прорачуна брзине и времена вожње су раздвојени како би се лакше модификовали односно ради лакшег откривања грешака. На крају процесор излаза из одсека ажурира све релевантне информације у токenu *voz* као што су име одсека, улазна, излазна брзина, време вожње, чекање и продужење времена вожње. Такође овај процесор шаље информацију процесору за разрешење (ослобађање) одсека који на основу

излазне брзине и дужине воза прорачунава када ће одсек бити слободан, што се шаље систему вишег реда. На слици 5.9 приказан је изглед модула блок одсека у самом програму *ExSpect*.

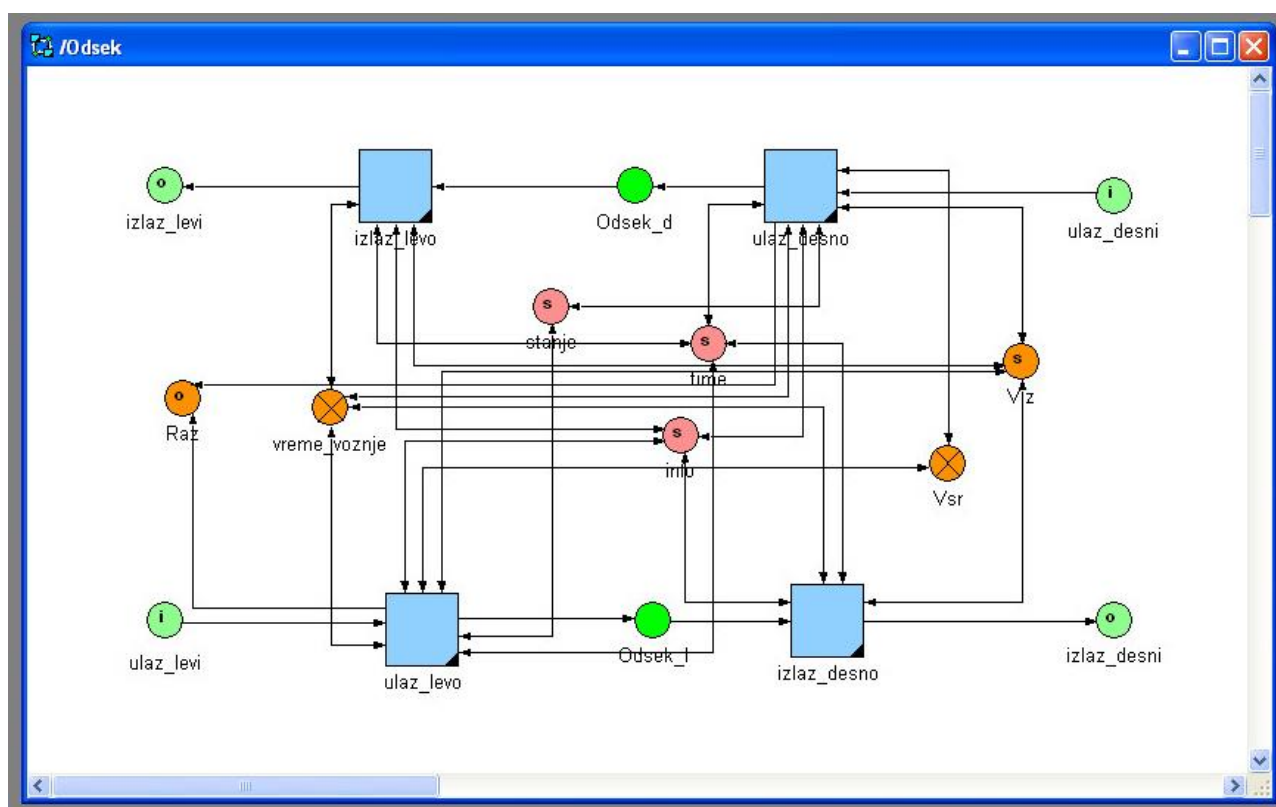


Слика 5.8 Шематски приказ модула блок одсека



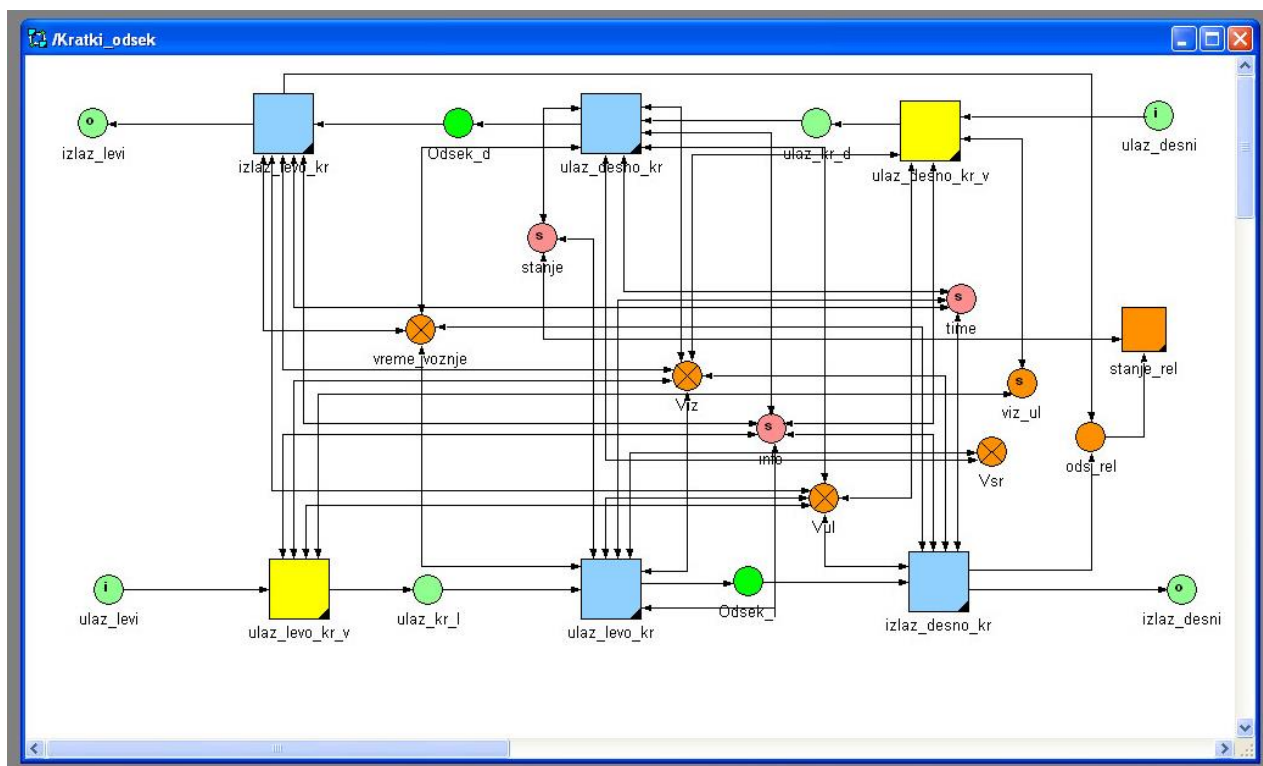
Слика 5.9 Модул блок одсека у програму *ExSpect*

Модул станичног колосека је нешто једноставнији јер код њега не постоји веза са сигнаlima на крају одсека а ни процесор за израчунавање улазне / излазне брзине. За разлику од просторног одсека, одсек колосека не мора на оба краја да има главне сигнале већ суседни елемент може бити и скретница. Зато се као једноставније решење показало да се податак о излазној брзини добија из екстерног складишта у које тај податак уписује процесор формирања путева возње. Такође и део за ослобађање одсека је нешто другачији пошто се не врши у самом одсеку већ се податак о разрешењу шаље у екстерни процесор. Разлог лежи у чињеници да је код станичних колосека осим разрешења (ослобађања) самог одсека најчешће потребно и разрешити одговарајући пут претрчавања испред тог одсека гледано у смеру возње. Пошто разрешење пута возње захтева проверу стања одређених сигнала и скретница, што се разликује за сваки одсек и сваку станицу, самим тим се не може вршити у самом модулу одсека. Такође и задржавања возова на одсеку колосека су често знатно дужа него у блоковном одсеку. Изглед модула станичног колосека приказан је на слици 5.10.



Слика 5.10 Модул станичног колосека у програму ExSpect

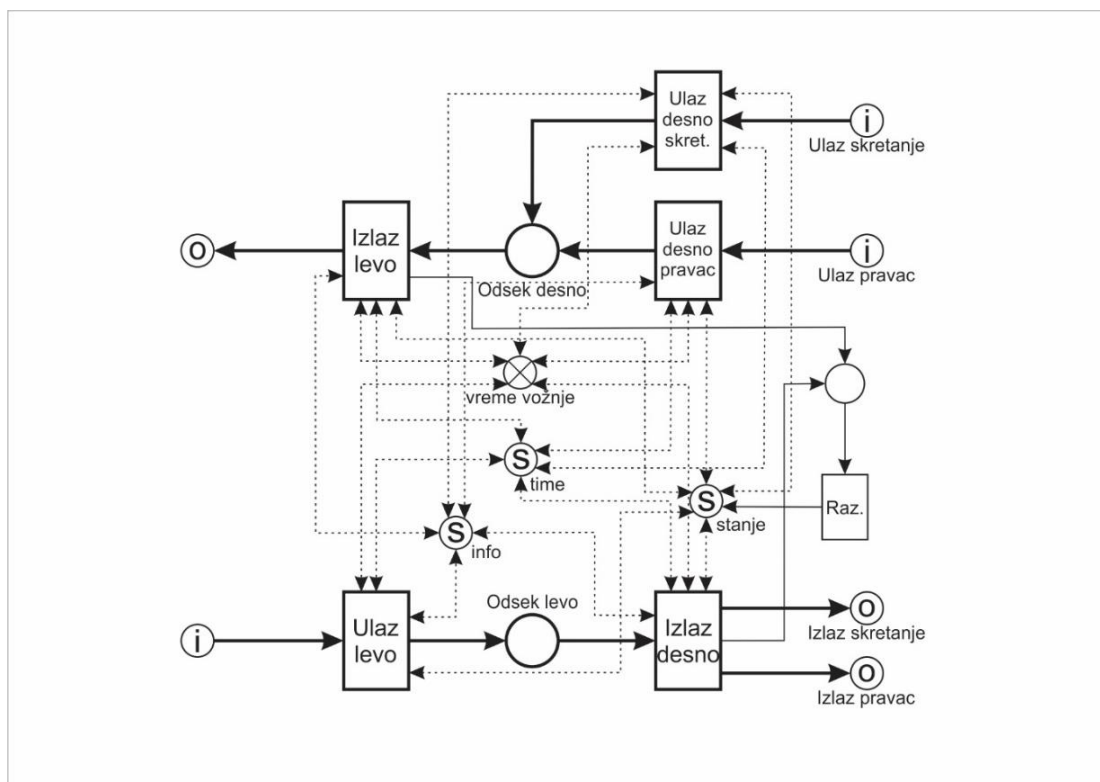
Као трећи модул се појављује модул кратког одсека између улазног сигнала и прве улазне скретнице. По броју елемената и принципу рада представља решење између блок одсека и станичног колосека. Као и станични колосек и овај модул добија податак о излазној брзини из спољашњег складишта и нема везу са главним сигнаlima а сличност са блок одсеком се огледа у механизму ослобађања одсека пошто испред овог одсека не постоји пут претрчавања. Овај модул приказан је на слици 5.11.



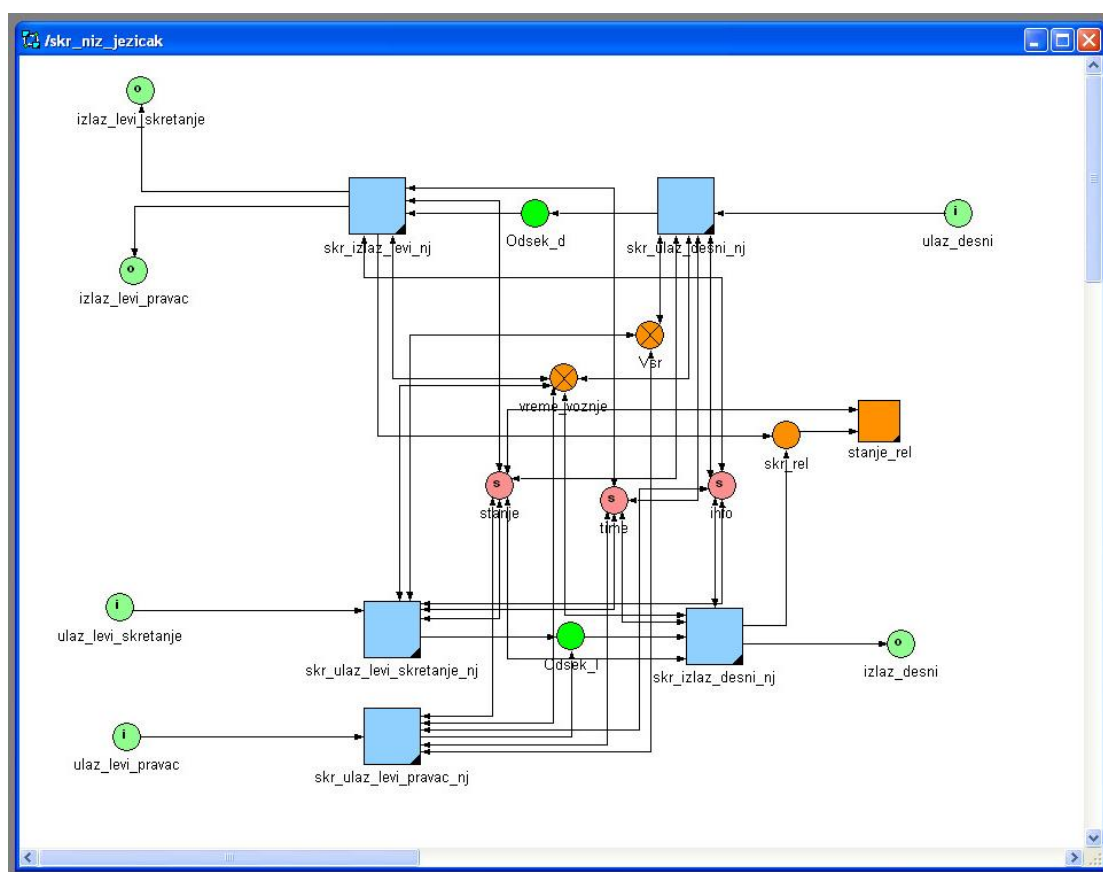
5.5.2. МОДУЛ СКРЕТНИЦЕ

Код модула скретнице заправо разликујемо два модула, један за вожњу уз језичак а једна за вожњу низ језичак. Да ли ће скретница бити за вожњу уз језичак или низ језичак се посматра с лева на десно односно од почетка ка карају пруге. Оба модула имају сличну структуру, главна разлика се односи на положај улазних и излазних места у самом модулу.

Шематски приказ скретничког модула „уз језичак“ приказан је на слици 5.12 а приказ модула „низ језичак“ у програму *ExSpect* на слици 5.13. Код овог одсека ослобађање се врши слично као код модула просторног одсека док је прорачун брзине нешто једноставнији и усвојен је принцип да су улазна и излазна брзина исте. Разлог лежи у чињеници да је скретнички одсек најчешће врло кратак као и да се на самим скретницама ретко врши убрзавање или успоравање, посебно кад је у питању возња у скретање. Главна разлика у односу на модул одсека је што код скретничког модула „уз језичак“ имамо два излаза на десној страни и два улаза са десне стране. Код модула „низ језичак“ имамо два улаза са леве стране и два излаза на левој страни. Избор излаза се врши на основу складишта стања одсека, при чему стања одсека 0, 2 и 4 говоре да је скретница у положају у правац а 1, 3 и 5 да је у положају у скретање.



Слика 5.12 Скретнички модул „уз језичак“



Слика 5.13 Скретнички модул „низ језичак“ у програму ExSpect

Стања 0 и 1 су почетна стања, она говоре да ли је скретница постављена за вожњу у правац или скретање где је 0 положај у правац а 1 положај у скретање. Ова стања такође говоре да скретница није заузета ни путем вожње ни возом. Стања 2 и 3 показују да је скретница

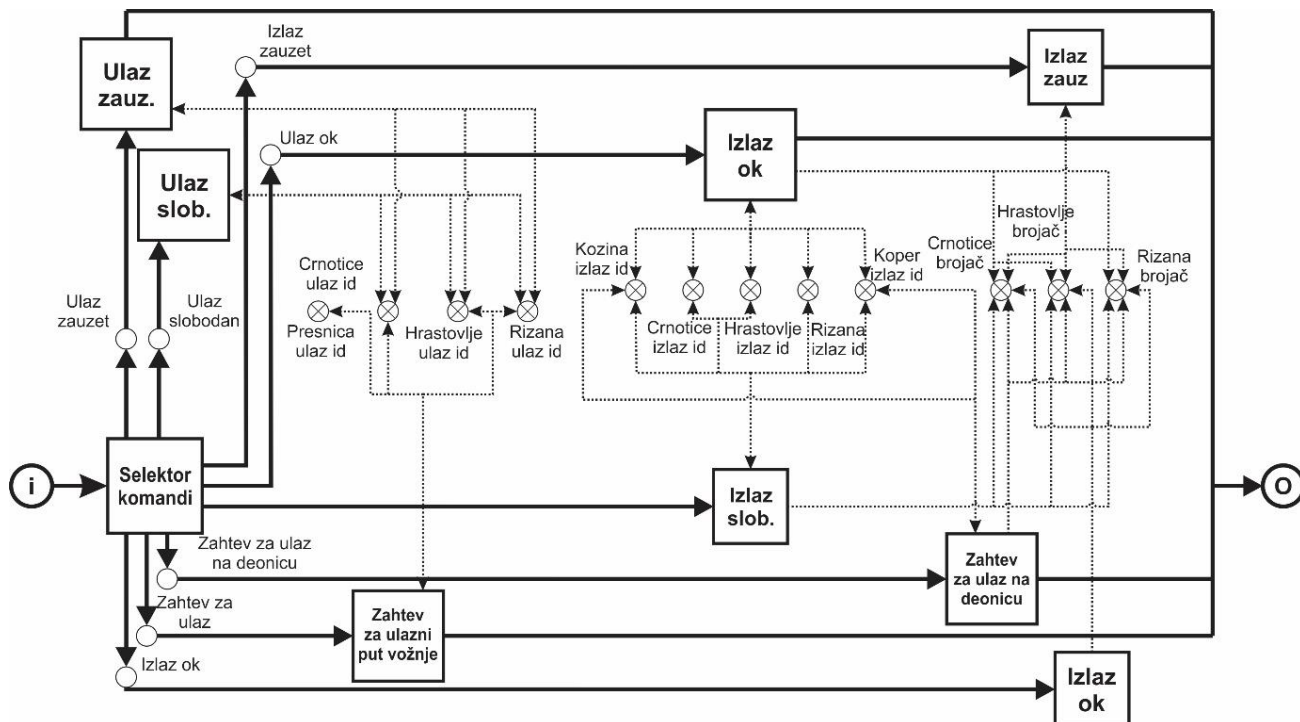
заузета путем вожње или путем претрчавања. Ова стања уписује екстерни процесор задужен за постављање пута вожње. Када се скретница користи у бочној заштити тада се уместо стања 2 и 3 уписују стања 0 и 1 као да је скретница слободна, а додатним зависностима се онемогућава њено коришћење за сво време које је она у бочној заштити. Стања 4 и 5 уписује пролазећи воз у зависности да ли се креће у правац или скретање. По проласку воза и извршењу разрешења (ослобађања) одсека у складиште стања скретнице уписују се вредности 0 и 1 чиме је скретница слободна за поновно коришћење.

5.6. ДИСПЕЧЕРСКИ ПОДСИСТЕМ

Иако по структури такође спада у модуле као и модул колосека и скретнице, због своје комплексности и чињенице да представља највиши хијерархијски ниво у моделу диспечерски систем је приказан засебно. Главна улога овог подсистема је регулисање саобраћаја и спречавање појаве загушења (*deadlock*) док се формирање пута вожње обавља помоћу процесора у самом систему. Ови процесори (*RU* – релејни уређај) постоје за сваку станицу односно службено место, формирају путеве вожње на основу команди добијених од диспечерског подсистема и шаљу повратну информацију диспечерском подсистему о извршењу команде и представљају извршне елементе који су у директној вези са елементима железничке инфраструктуре као што су скретница, колосек и сигнал.

5.6.1. СТРУКТУРА ДИСПЕЧЕРСКОГ ПОДСИСТЕМА

Структура диспечерског система коришћеног у (*Jeremić et al., 2021*) приказана је на слици 5.14. Као и сви коришћени подсистеми и диспечерски подсистем има везу са системом вишег реда (*Input* и *OutputPin*). Те везе служе за улаз односно излаз токена *komanda* који носи наређење за формирање и информације о статусу формирања пута вожње. Сам токен садржи неколико података као што су станица односно службено местои коме се команда упућује односно из које се добија повратна информација, врста вожње (улаз или излаз), колосек на који / са ког се пут вожње формира, страна станице (службеног места) са које / на коју се пут вожње формира, статус команде (команда или информација) и време.



Слика 5.14. Структура диспечерског подсистема

По уласку у подсистем токен *komanda* се обрађује у процесору селектор команди (*Command selector*). Пошто процесор на основу статуса команде одреди њену врсту (команда за улаз, излаз или информација) она се упућује у одговарајући део подсистема. Диспечерски подсистем се састоји из неколико међусобно повезаних делова, где је сваки део одређен да процесуира одређену врсту команде. Сваки део се састоји из једног или више процесора, одговарајућих места која их повезују и складишта.

Први део је задужен за обраду захтева за постављање улазних путева вожње. Захтев за постављање пута вожње се може упутити са било ког места у моделу, али је у овом случају узето да захтеве за улазне путеве вожње односно настанак токена *komanda* врши процесор другог просторног сигнала испред улазног сигнала приликом проласка воза, а уколико такав сигнал не постоји, онда уласком у блок одсек испред просторног предсигнала улазног сигнала.

Други део је задужен за обраду захтева за постављање излазних путева вожње. Захтев за формирање излазног пута вожње се генерише у самом подсистему у делу који прима информације о успешно формираном улазном путу вожње. На овај начин може се брзо формирати пролазни пут вожње без успоравања односно заустављања возова у станици.

Трећи део се бави путевима вожње који се из неког разлога нису могли формирати, па је у подсистем враћена команда са статусом „заузето“. Овде се разликују две карактеристичне ситуације односно два начина решења конфликта. Разликујемо ситуације када пут вожње није могао бити формиран због заузетости пута претрчавања или возом који излази са колосека и ситуацију када пут вожње није могао бити формиран због заузетости колосека возом који се не креће.

Четврти део врши разрешење односно ослобађање путева вожњи за наредно коришћење. Ово разрешење се разликује од разрешења одсека јер се може извршити и пре него што је одређени одсек ослобођен, али се нови пут вожње не може формирати пре него што сви потребни одсеци буду слободни. Разрешење и улазних и излазних путева вожње се врши проласком поред излазног сигнала.

Сви наведени делови су у одређеној мери међусобно повезани како би се осим извршења команди спречила и појава загушења (*deadlock*). У извршењу овог задатка осим типа *komanda* користе се и неки типови података (токена) карактеристичних само за диспечерски подсистем као што су *komanda_id* и *stanje_st*. Детаљан приказ функционисања појединих делова диспечерског система биће приказан у наредним поглављима.

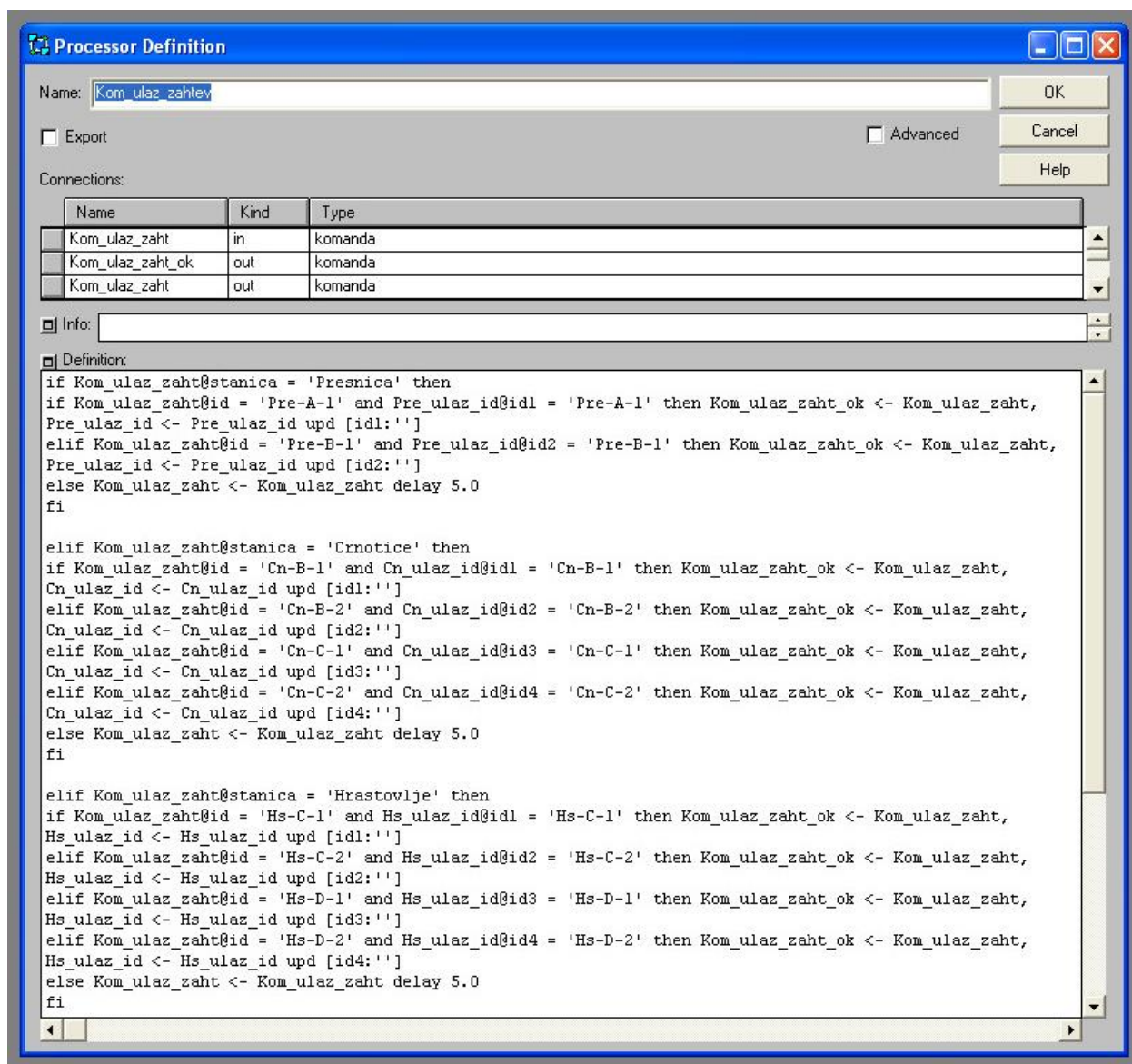
5.6.2. ФОРМИРАЊЕ УЛАЗНОГ ПУТА ВОЖЊЕ

Као што је већ наведено за формирање пута вожње се користи посебан део диспечерског подсистема који се састоји из неколико процесора, места и складишта, као и веза са одређеним екстерним складиштима. Захтев за постављање улазног пута вожње може доћи или из система вишег реда или из подсистема који се бави путевима вожње који се не могу формирати. У првом случају команда која улази из система вишег реда има статус „захтев“, долази до селектора команди који је упућује у део диспечерског система задужен за формирање улазног пута вожње. У другом случају команда долази из трећег дела диспечерског подсистема, и то само у случају када се одређени пут вожње не може формирати јер је улазни колосек заузет возом који стоји. Тада је команда за формирање улазног пута вожње заправо команда за промену улазног колосека, и у овом случају она има статус „захтев“.

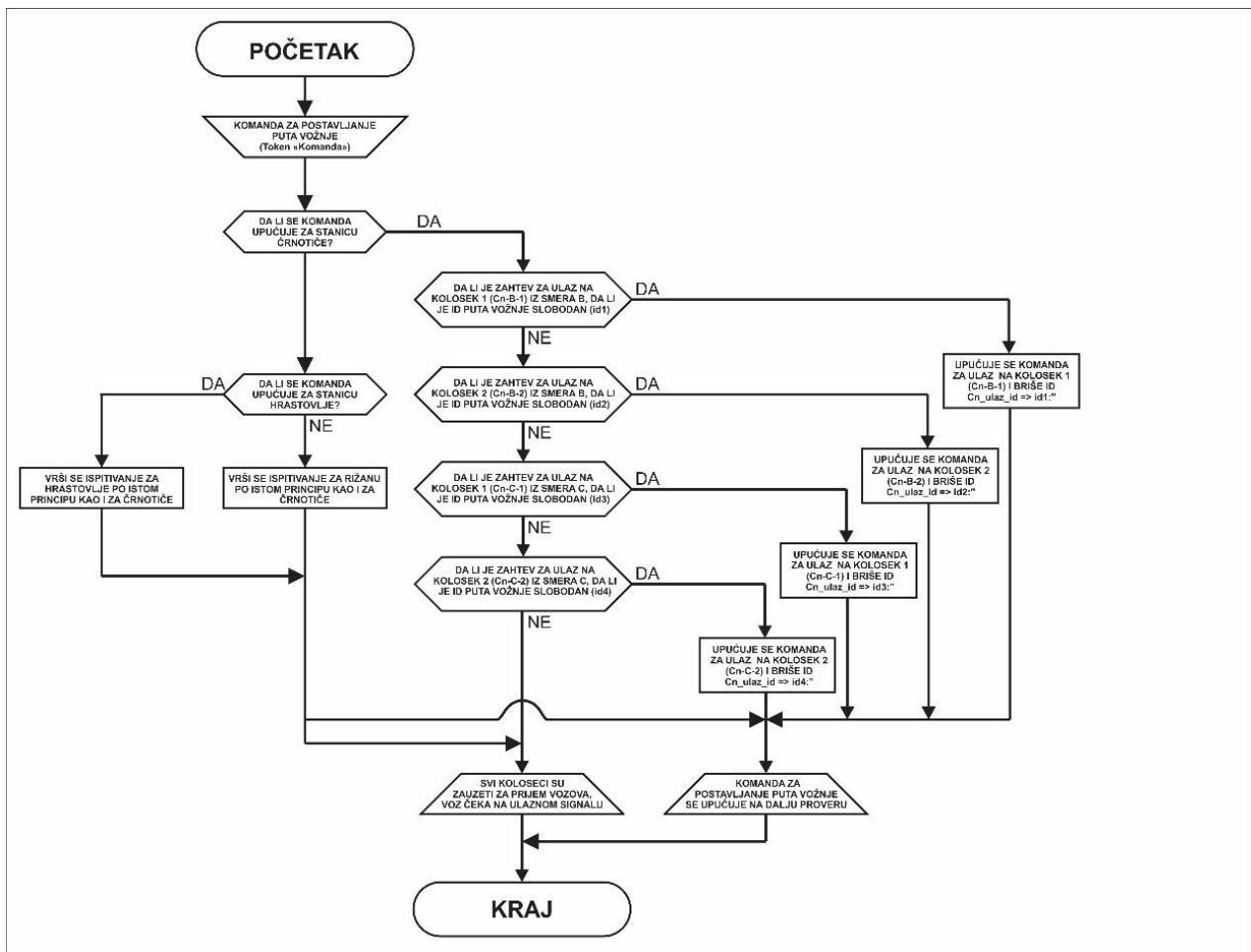
Токен *komanda* прво долази до процесора *Kom_ulaz_zajt* чија дефиниција је приказана на слици 5.15. Код овог процесора први корак је провера из које станице потиче команда односно за коју станицу се упућује, а затим се упоређивањем *id* команде утврђује да ли је она расположива. Провера се врши у складишту команди за сваку станицу, свако од ових складишта садржи све команде за улазне путеве вожње који се у станици могу формирати. Уколико команда није расположивато значи да је тај пут вожње већ формиран или у процесу

формирања за неки претходни воз или је колосек на који пут вожње води заузет заустављеним возом. У том случају се команда за постављање пута вожње понавља после 5 секунди. Овај интервал се може по потреби мењати у зависности од густине саобраћаја и брзине возова. По резервисању одговарајућег пута вожње токен *komanda* се прослеђује на следећу проверу.

Како би се лакше разумело функционисање појединих процесора они односно њихов најважнији део су приказани у виду алгоритма. Ради веће прегледности делови процесора који су идентични за сваку станицу односно чија структура се понавља за све станице у моделу су приказани упрошћено. Упрошћавање је узвршено на тај начин да је у алгоритму приказан принцип рада процесора само на примеру једне односно прве станице у моделу а да је за остале наведено да је принцип рада идентичан. Процесори код којих је разумевање функционисања на основу кода у програму лако разумљиво као што су нпр. процесори чија је основна функција поређење стања одговарајућих складишта односно бројача, нису приказани у виду алгоритма. Алгоритам процесора *Kom_ulaz_zajt* приказан је на слици 5.16.

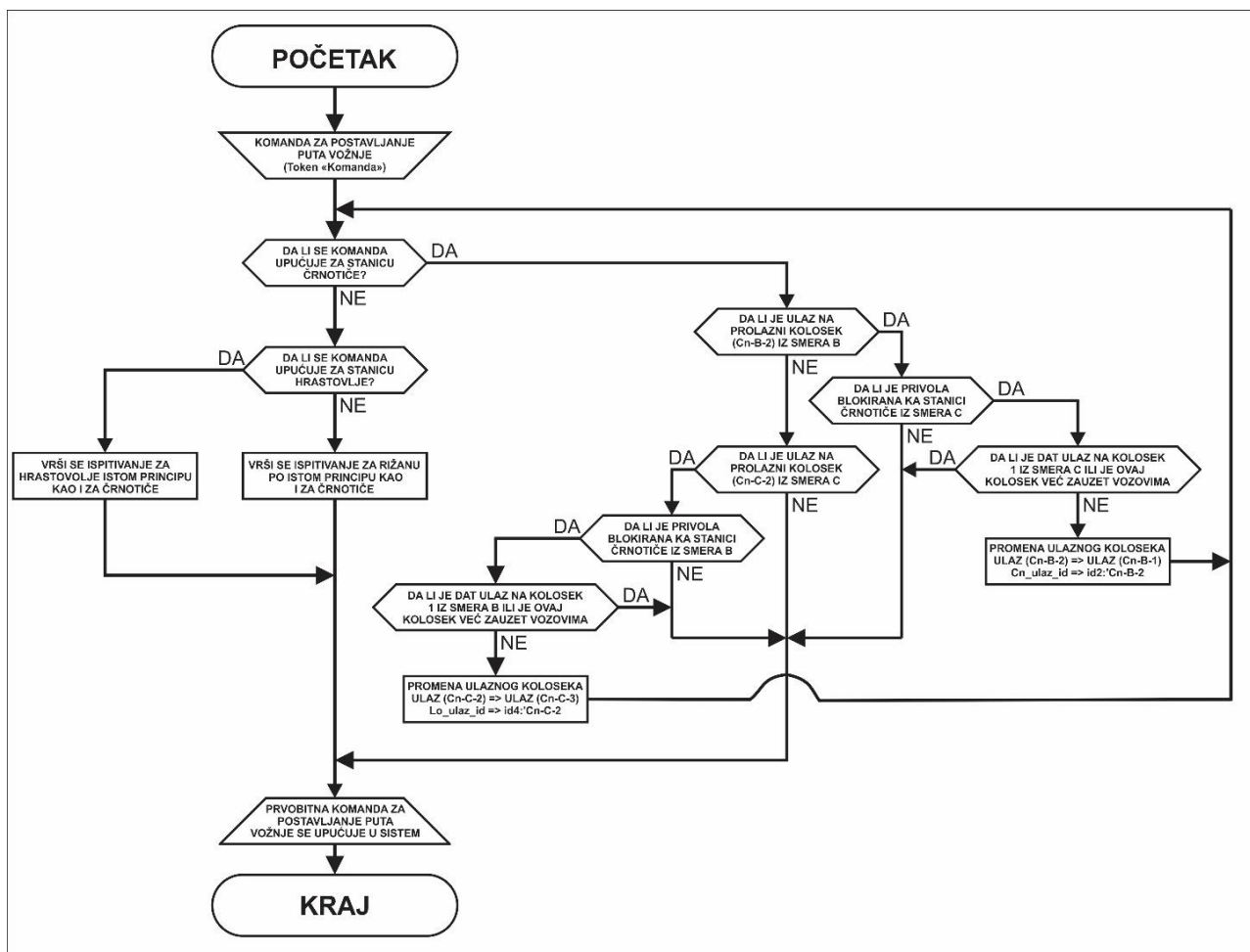


Слика 5.15 Дефиниција процесора *kom_ulaz_zajt*



Слика 5.16. Алгоритам процесора *kom_ulaz_zajt*

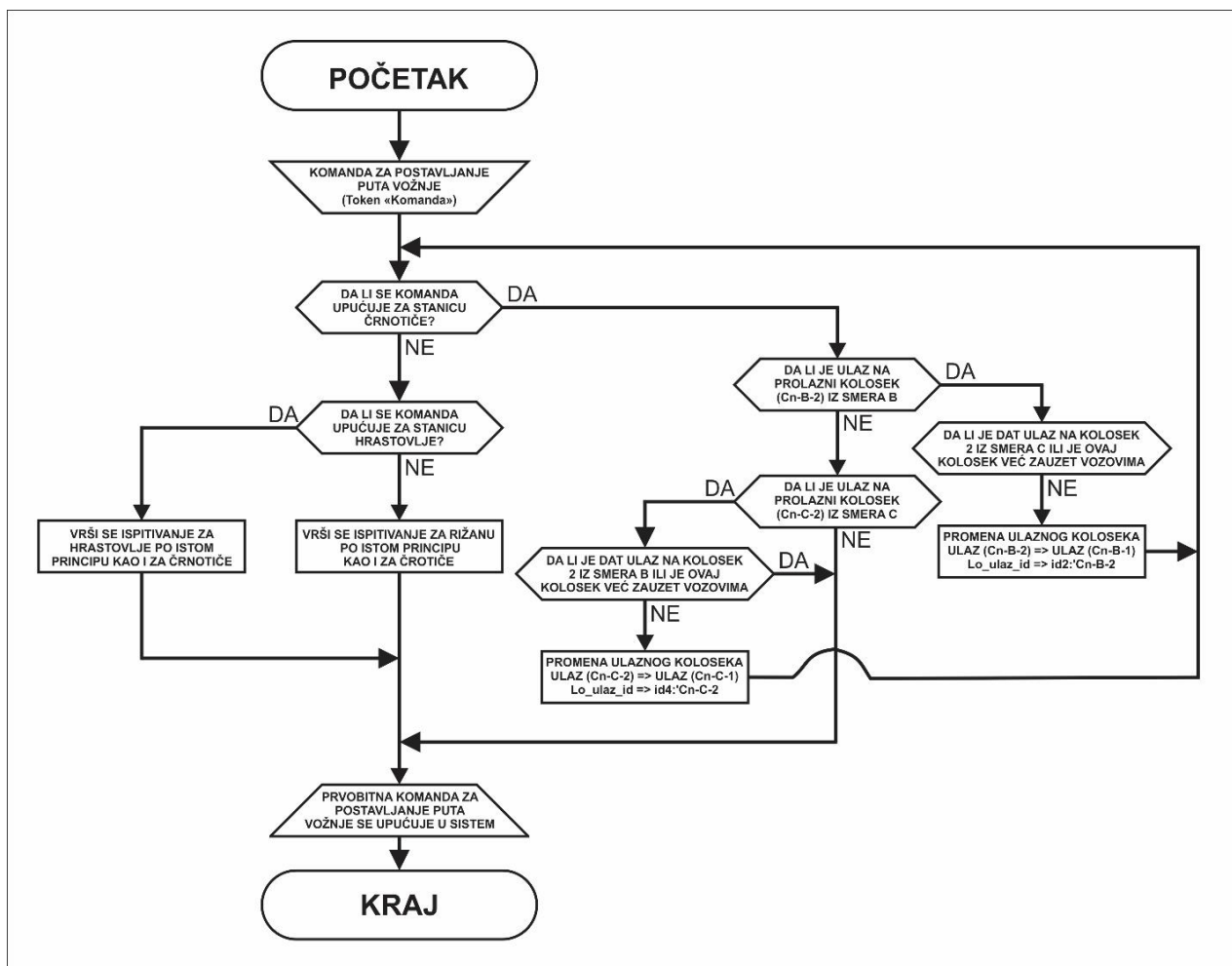
Следећи процесор на који се токен прослеђује је *Kom_ulaz_zajt_od* и његов алгоритам је приказан на слици 5.17. Главна улога овог процесора је промена улазног колосека у ситуацији када предстоји укрштавање у станици. Наиме, наилазком воза на одсек испред просторног предсигнала увек се активира команда за формирање улазног пута војње на главни пролазни колосек. Уколико истовремено постоји воз из супротног смера, онда је воз који први приспева у станицу потребно скренути на неки други колосек. Да ли постоји супротан воз се проверава по стању приволе на суседном међустаничном растојању, ако је привола блокирана у смеру ка посматраној станици тада је сигурно да на том међустаничном одстојању постоји супротан воз или да је на то међустанично растојање формиран излазни пут војње из суседне станице. Процесор је повезан са свим складиштима приволе у систему вишег реда како би се директно у реалном времену проверило њихово стање.



Слика 5.17 Алгоритам процесора *kom_ulaz_zajt_od*

У случају да постоји супротан воз, принцип рада овог процесора је да се већ узета команда за улазни пут вожње на пролазни колосек враћа у складиште станице, а токен *komanda* се шаље на почетак односно на процесор *Kom_ulaz_zajt* са измењеним улазним колосеком односно захтевом за улаз у скретање. Пошто на моделираној деоници постоје само укрснице са два колосека самим тим нема могућности избора више колосека, већ постоји само опција уласка у правац или скретање. Осим провере да ли постоји супротан воз такође се проверава и да ли је колосек у скретање већ заузет супротним возом. Ако је заузет тада се команда не мења, и као и у случају да привола није блокирана прослеђује наредном процесору.

Следећи процесор је *Kom_ulaz_zajt_p1* и његов алгоритам је приказан на слици 5.18. Главна улога овог процесора је промена улазног колосека у случају да привола није блокирана, али је главни пролазни колосек заузет возом супротног смера. И у овом случају се већ узета команда за улазни пут вожње на пролазни колосек враћа у складиште станице а токен *komanda* се шаље на почетак односно на процесор *Kom_ulaz_zajt* са измењеним улазним колосеком односно захтевом за улаз у скретање. По успешном проласку сва три процесора команда за формирање улазног пута вожње се шаље на излаз из диспечерског подсистема.

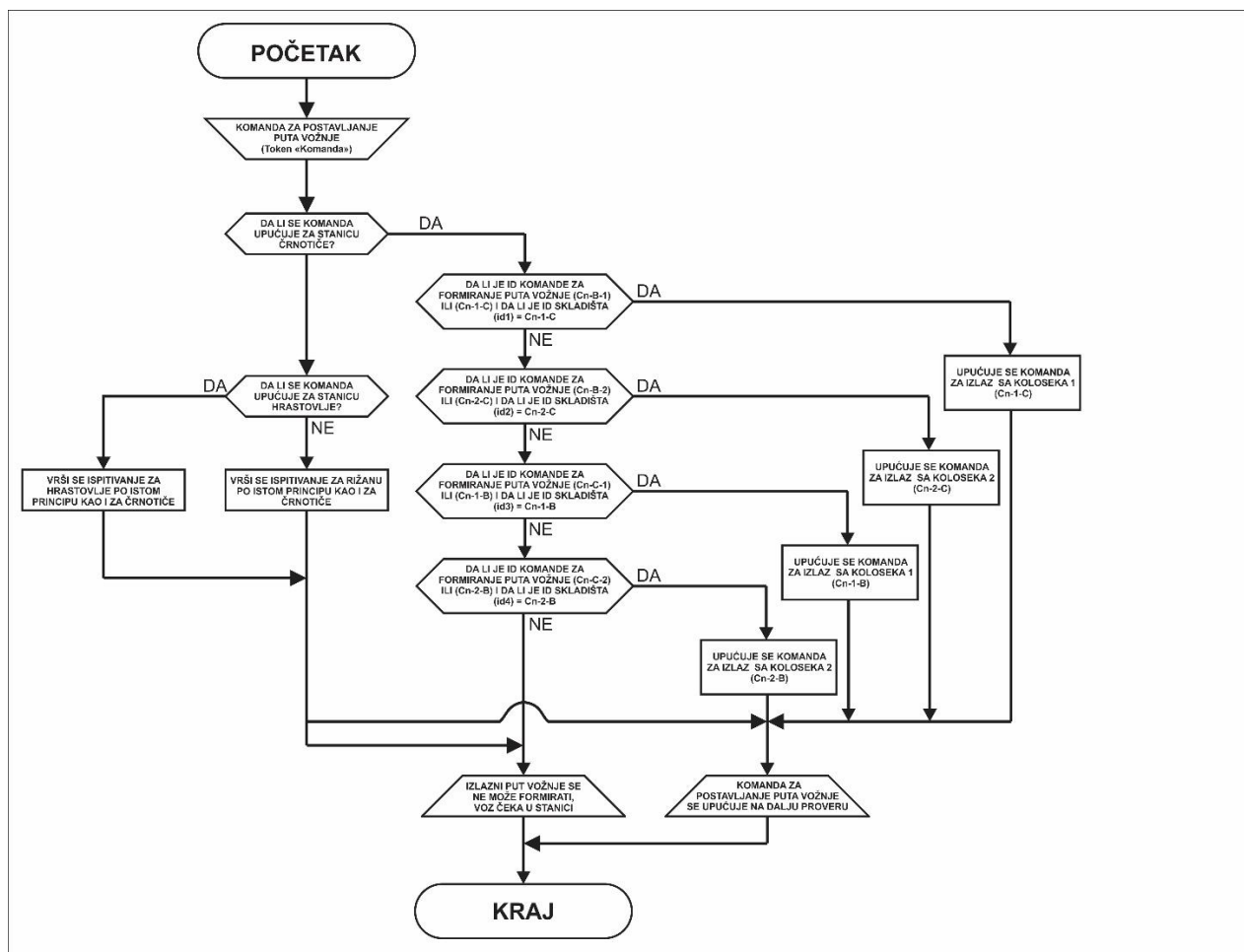


Слика 5.18 Алгоритам процесора *kom_ulaz_zajt_p1*

5.6.3. ФОРМИРАЊЕ ИЗЛАЗНОГ ПУТА ВОЖЊЕ

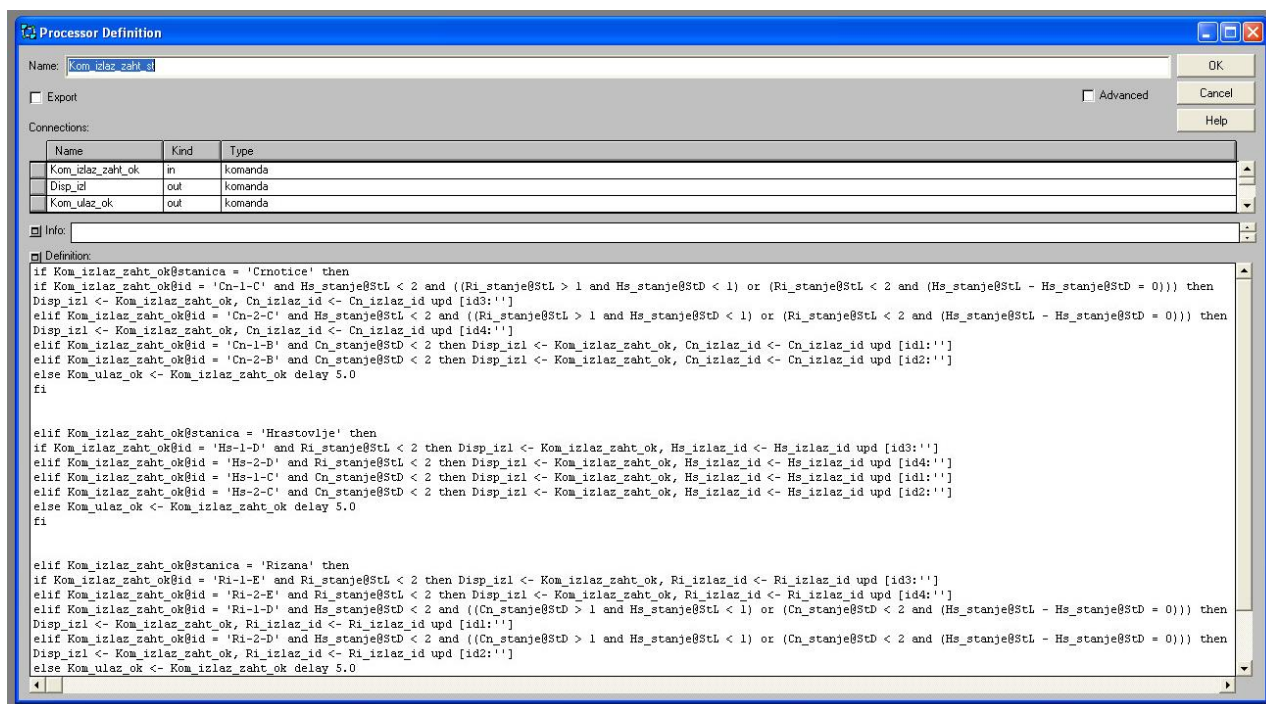
Као што је већ наведено команда за излазни пут вожње са неког колосека се активира успешним формирањем улазног пута вожње на тај колосек. Пошто су у питању укрснице где није предвиђена промена смера вожње возова није узимана у обзир опција да воз уђе на колосек а затим се враћа у супротном смеру. Диспечерски систем има могућност обраде и таквог захтева, само би у том случају захтев за формирање излазне вожње морао да потекне директно из система. И овај део диспечерског подсистема се састоји из неколико процесора, места и складишта као и веза за одређеним екстерним складиштима. Команда са статусом „ок“ долази до селектора команди који је упућује у овај део диспечерског подсистема.

Токен *komanda* прво долази до процесора *Kom_ulaz_ok* чији алгоритам је приказан на слици 5.19. Код овог процесора први корак је провера из које станице потиче односно за коју станицу се упућује команда а затим се проверава да ли је та команда за излаз расположива. Пошто се ослобађање команди и за излазни пут вожње са неког колосека и за улазни пут вожње на тај колосек у истом смеру врши проласком воза поред излазног сигнала, самим тим ако је улазни пут вожње на тај колосек успешно формиран, и команда за излаз ће бити расположива. Овим провера расположивости команде делује као сувишан корак али њу користе и други процесори у циљу провере да ли ће доћи до загушења па је самим тим неопходно њено резервисање. У случају да команда није расположива захтев се понавља сваких 5 секунди при чему се временски интервал понављања команде може мењати по потреби.



Слика 5.19 Алгоритам процесора *kom_ulaz_ok*

Следећи процесор је *Kom_izlaz_zahtev_st* чија је дефиниција приказана на слици 5.20. Овај процесор је део система за спречавање загушења (*deadlock*). Његов главни задатак је провера капацитета суседних станица и због тога је повезан са бројачима капацитета свих станица. Бројачи капацитета су заправо складишта у којима се чувају информације типа *stanje_st*. Овај тип садржи податке о расположивом броју колосека у станици по смеровима (*St_L* и *St_D*). Заузеће колосека представља збир броја возова који се налазе у тој станици, броја возова који се крећу ка тој станици и броја возова који имају формиран излазни пут вожње из суседне станице ка тој станици. За сваку станицу се у складишту дефинише максимални капацитет по смеровима и сваким формирањем излазног пута вожње из суседне станице ка тој станици се капацитет смањује за 1. Изласком воза из посматране станице односно ослобађањем команде за излазни пут вожње се и бројач капацитета станице повећава за 1. Усклађеност смањивања и повећавања бројача капацитета је таква да не може бити мањи од нуле и већи од максимално предвиђеног, и на почетку симулације дефинисаног капацитета. Овај део диспечерског подсистема практично само врши проверу да ли се одређена излазна вожња може реализовати у смислу капацитета суседних станица а не и да ли се тај пут вожње може формирати. Пошто формирање пута вожње спада у делатност извршног процесора (*RU*) самим тим се у њему врши и провера стања приволе. Уколико нека команда за излазни пут вожње није могла бити формирана, њу извршни процесор враћа у диспечерски подсистем са статусом „заузето“. По завршеној провери команда за излазни пут вожње се шаље у главни систем.

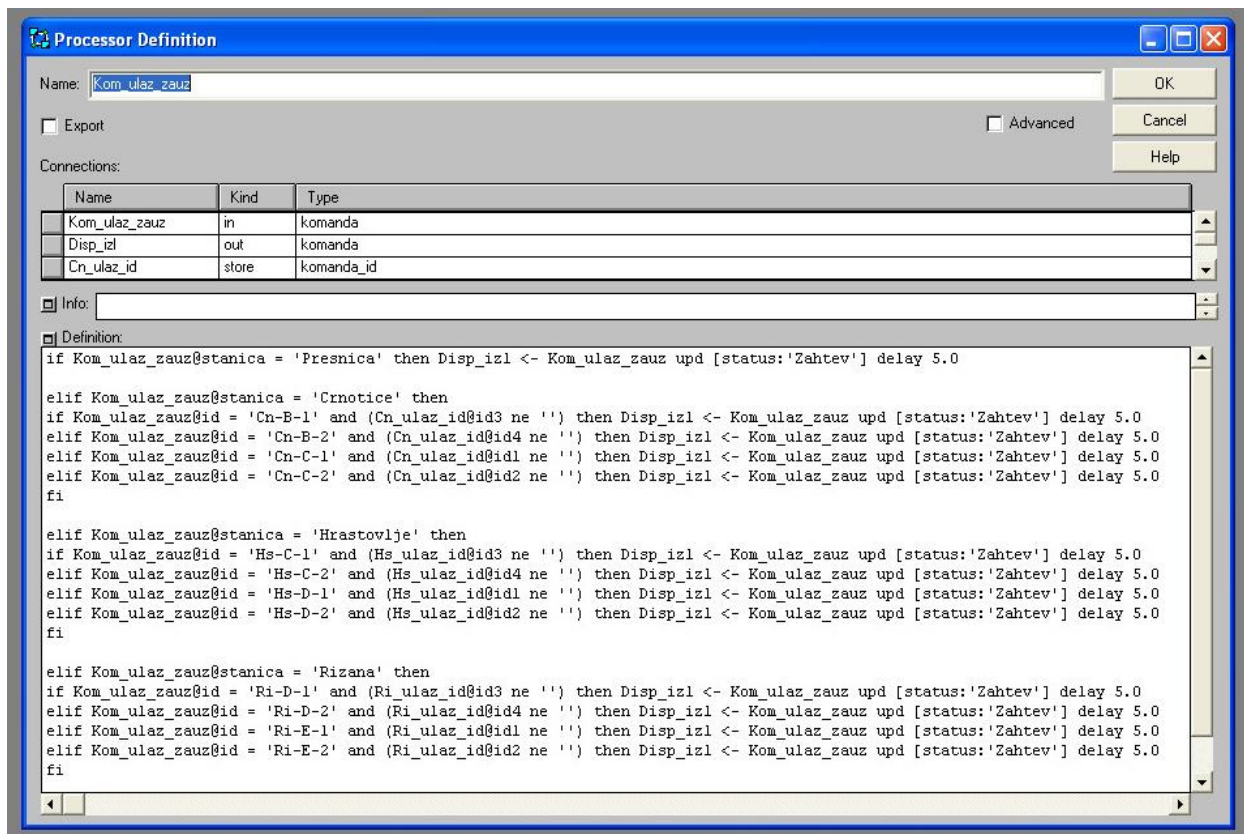


Слика 5.20 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_zahtev_st*

5.6.4. ФОРМИРАЊЕ УЛАЗНИХ ПУТЕВА ВОЖЊИ У СЛУЧАЈУ КОНФЛИКТА

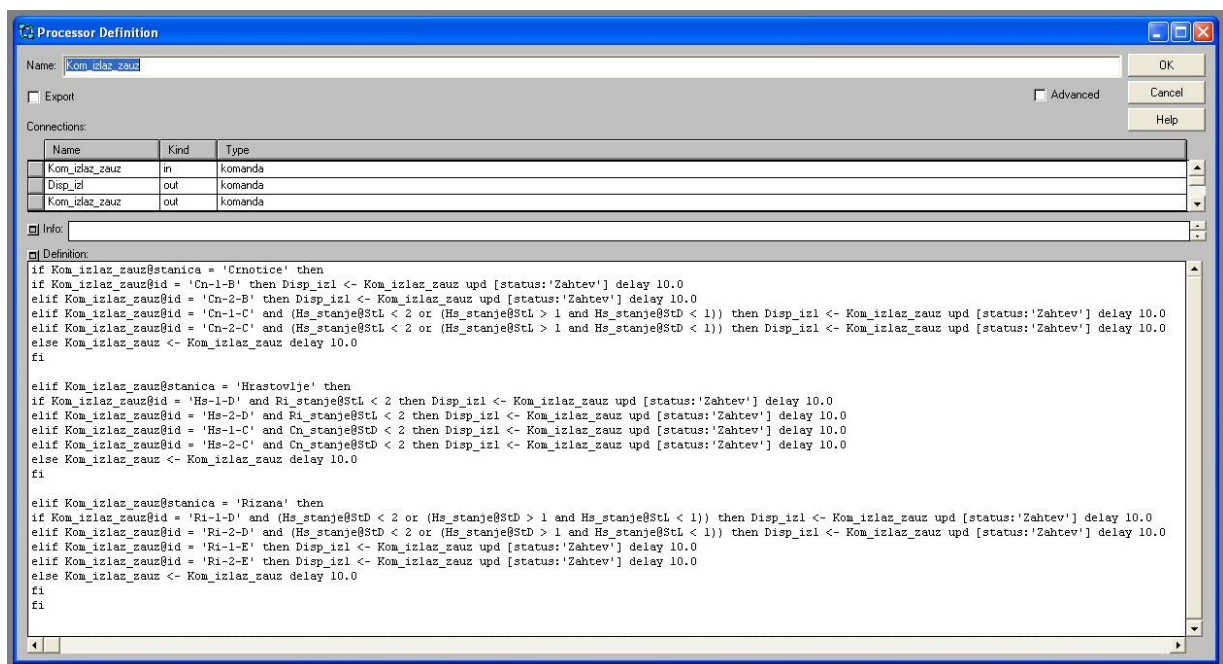
Уколико се неки пут вожње није могао формирати тада извршни процесор у систему враћа ту команду назад у диспечерски подсистем са статусом „заузето“. Разлог може бити заузеће одређеног одсека (скретнице, колосека) путем вожње односно возом за улазне вожње или непостојање приволе код излазних путева вожње. Заузеће колосека или скретница је карактеристично за улазне вожње а заузеће скретница и недостатак приволе карактеристично за неуспешно формирање излазних путева вожње. Команда са статусом „заузето“ се по доласку на селектор команди упућује у одговарајући сегмент диспечерског подсистема при чему постоје два засебна дела, један који решава проблем улазних путева вожње и други који решава проблем излазних путева вожње који се нису могли формирати.

Када су у питању улазни путеви вожње, команда се упућује на процесор *Kom_ulaz_zauz* чија дефиниција је приказан на слици 5.21. Овај процесор у суштини понавља команду за формирање пута вожње на одређени колосек уз проверу да ли је на суседни колосек већ формиран пут вожње из супротног смера. У ситуацији када станица има само два колосека ова провера је сувишна јер је она већ обављена код провобитног захтева за формирање пута вожње како би се спречило загушење. У станицама са више од два колосека провера се врши и за остале станичне колосеке при чему овај процесор тада има и могућност упућивања захтева за формирање пута вожње на неки други колосек односно промену улазног колосека.



Слика 5.21 Дефиниција процесора *Kom_ulaz_zauz*

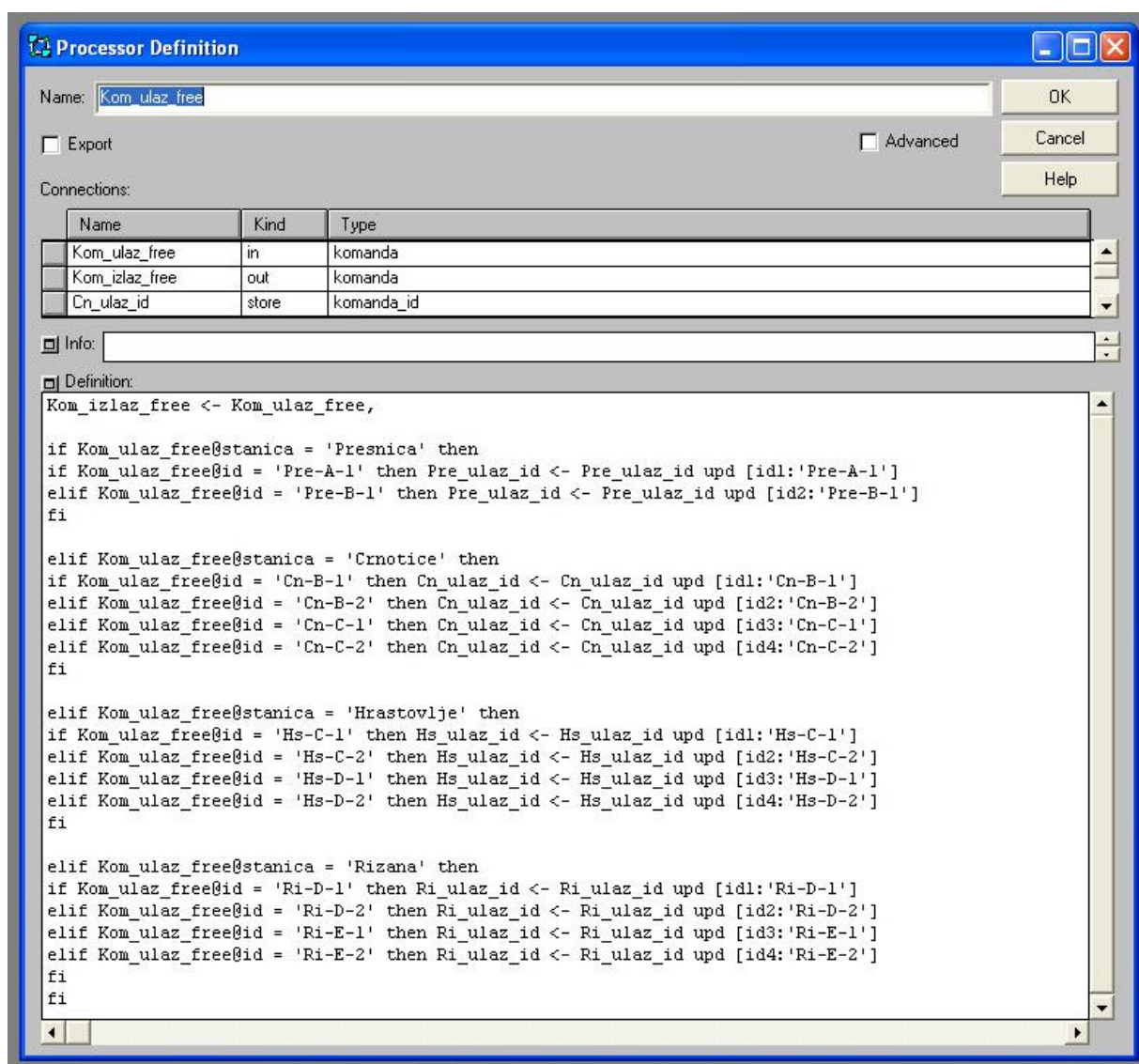
Код излазних путева војње команда се упућује на процесор *Kom_izlaz_zauz* чија дефиниција је приказан на слици 5.22. Овде се првенствено врши провера капацитета суседне станице како би се елиминисала могућност загушења. Уколико у суседној станици постоји слободан колосек, команда се прослеђује на излаз из диспечерског подсистема. Уколико не постоји слободан колосек команда остаје у овом делу диспечерског подсистема и провера се врши на сваких 10 секунди. Овај интервал се такође може мењати по потреби у зависности од брзине возова и густине саобраћаја.



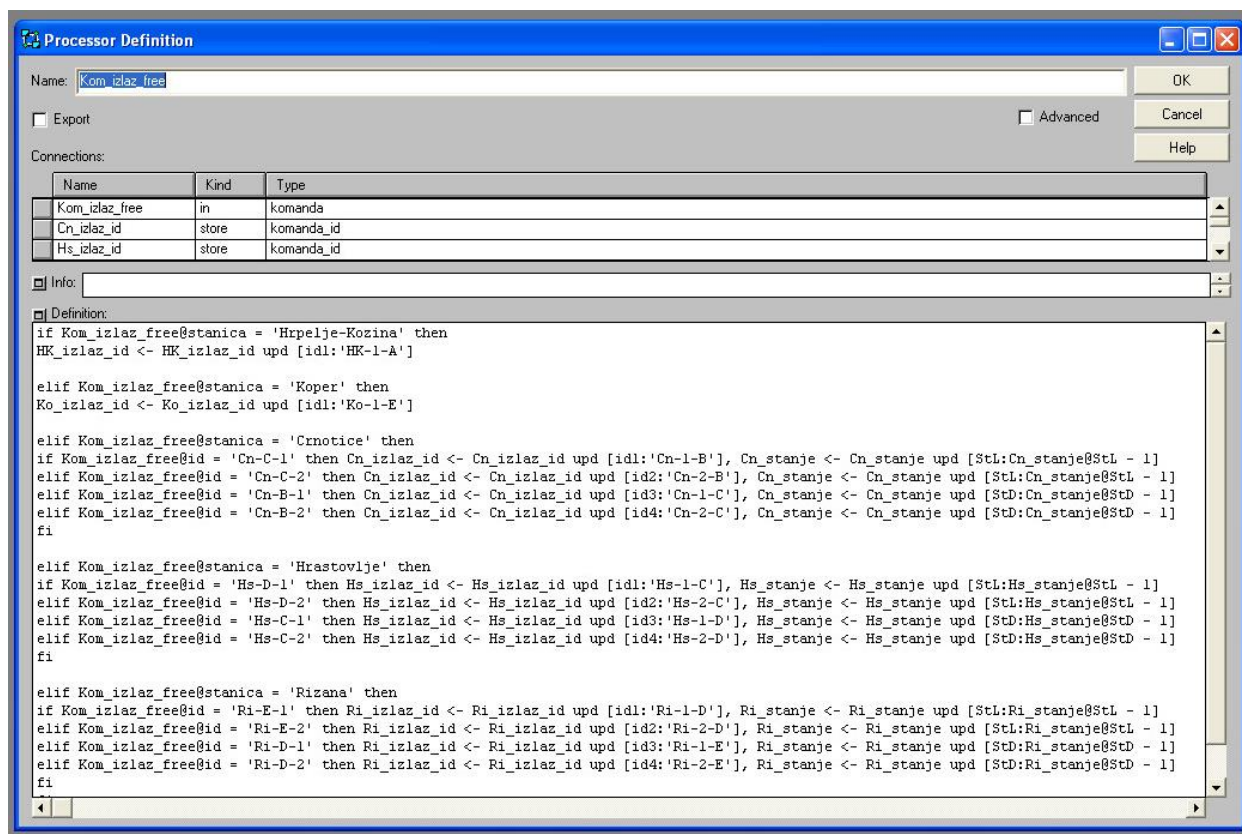
Слика 5.22 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_zauz*

5.6.5. ОСЛОБАЂАЊЕ ПУТЕВА ВОЖЊЕ

Четврти део диспечерског подсистема је задужен за разрешење односно ослобађање одговарајућих команди при чему постоје посебни делови односно процесори за улазне и излазне вожње. Ослобађање команди улазних вожњи врши процесор *Kom_ulaz_free* и његова дефиниција је приказана на слици 5.23. Ослобађање се врши путем команде за формирање улазног пута вожње која има статус „free“. Овај статус команда добија проласком воза поред одговарајућег излазног сигнала, при чему се истовремено овај статус даје и команди за улазни пут вожње на тај колосек и излазног пута вожње са тог колосека. Процесор за сваку примењену команду уписује њен *id* у одговарајуће складиште станице и тиме омогућава њену поновну употребу. Излазни пут вожње се ослобађа помоћу процесора *Kom_izlaz_free* приказаног на слици 5.24. Овај процесор такође уписује *id* команде за излазни пут вожње у одговарајуће складиште станице али поред тога врши и промену бројача капацитета станица. Наиме, сваки ресет команде за излазни пут вожње односно пролазак воза поред излазног сигнала смањује бројач капацитета те станице за 1 односно повећава капацитет станице за још једно место. На овај начин се у ту станицу омогућава пријем још једног воза.



Слика 5.23 Дефиниција процесора *Kom_ulaz_free*



Слика 5.24 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_free*

5.6.6. УЛАЗАК НА МОДЕЛИРАНУ ДЕОНИЦУ

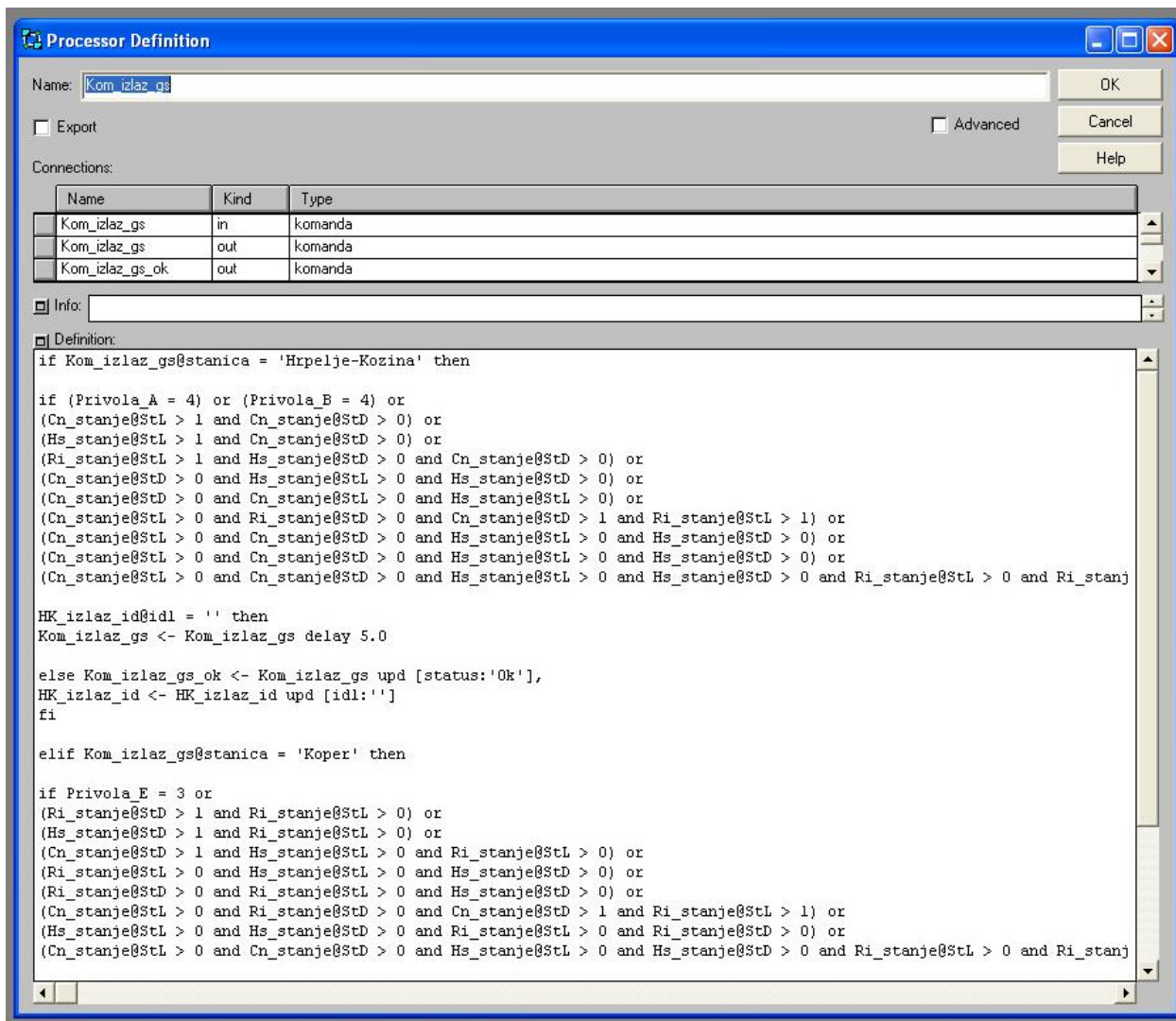
Као засебан део који се у функционалном смислу може посматрати као део за формирање улазних путева вожње је процесор уласка на моделирану деоницу. Пре уласка воза на моделирану деоницу шаље се команда из крајњих (граничних) станица за улаз која је по синтакси иста као и команда за улазни пут вожње. Процесор задужен за њену обраду је *Kom_izlaz_gs* и приказан је на слици 5.25.

Код овог процесора не постоји избор путева вожњи већ је главна улога команде да провери да ли је улаз на деоницу дозвољен или не. Дозвола за улаз није директно повезана са заузећем првог просторног одсека на улазу већ се врши провера капацитета свих станица на деоници и приволе на првом међустаничном одстојању.

Провера капацитета свих станица подразумева проверу свих могућих комбинација заузећа колосека у станицама односно међустаничним растојањима. Ова провера се може и упростити елиминисањем одређених комбинација али се тиме смањује и капацитет деонице односно станица. Пошто су капацитети станица динамичка категорија у случају немогућности уласа на деоницу провера се понавља све док улаз не буде могућ. Број могућих комбинација не зависи у великој мери од броја колосека у станици већ највише од броја станица односно службених места. Провера се заснива на утврђивању испуњености неке од комбинација заузећа станица односно комбинација бројача капацитета станица. Уколико је нека комбинација стања бројача испуњена команда за улаз се понавља после пет секунди, уколико ниједна комбинација није испуњена улаз на деоницу је могућ и команда се прослеђује даље. На овај начин је смањен број комбинација за проверу односно проверавају се само она критична стања код којих би долазак новог воза изазвао загушење (*deadlock*).

У ситуацији када је као у овом случају број службених места мањи тада се провера може вршити централизовано помоћу једног процесора док је за већи број службених места погоднија варијанта са децентрализованим процесорима који проверавају одређене мање деонице а затим се централно проверава укупан капацитет. На овај начин се омогућава лакша

контрола рада и проналажење грешака у моделу. По извршеној провери уколико постоји довољан капацитет команда се шаље на процерор *Kom_izlaz_gs_ok* који је даље прослеђује у главни систем истовремено повећавајући бројач капацитета прве станице од почетка деонице за један односно смањујући капацитет станице за један воз.



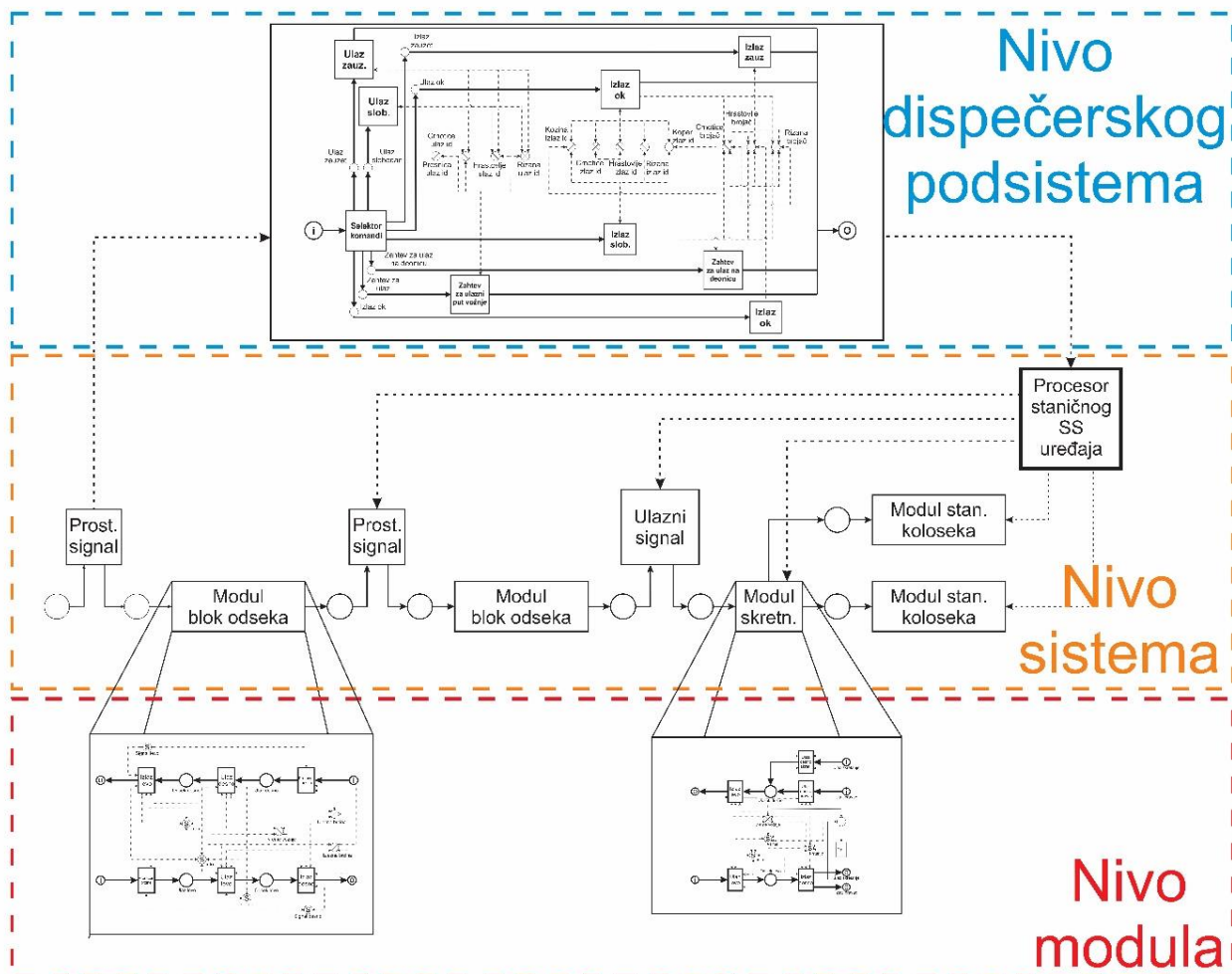
Слика 5.25 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_gs*

5.7. ХИЈЕРАРХИЈСКА СТРУКТУРА МОДЕЛА

Приказани диспечерски подсистем заправо чини највиши ниво хијерархијске структуре модела. Она са једне стране омогућава комплексно управљање саобраћајем а са друге стране смањује комплексност модела и олакшава унапређења и откривање грешака. Хијерархијска структура модела приказана је на слици 5.26 и састоји се из три велике целине односно три нивоа.

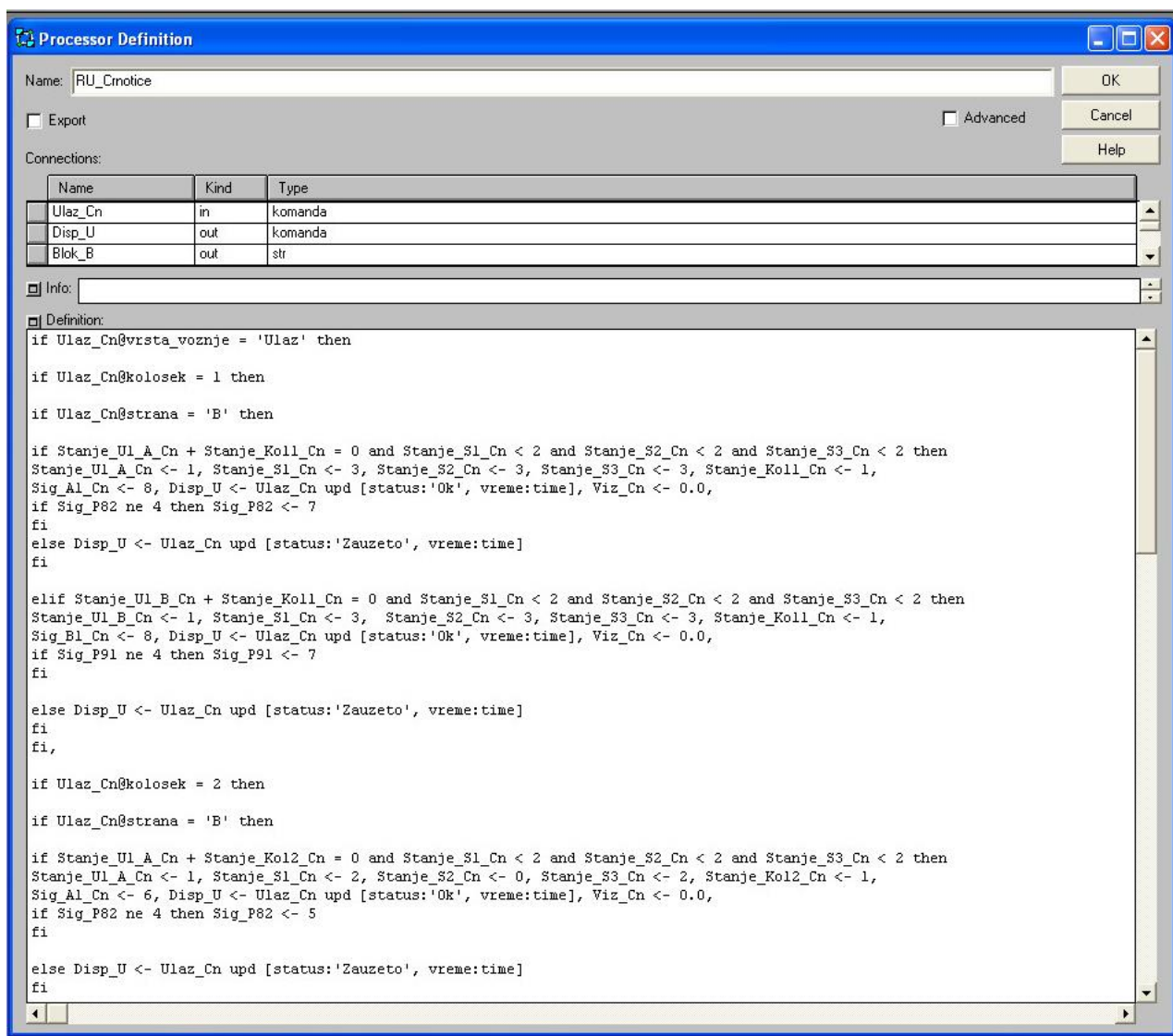
Први односно најнижи је ниво модула одређених елемената. У овом моделу коришћени су модули скретнице и изолованог одсека (блок, кратког и станичног колосека). Ово су основни елементи у које су инкорпориране основне зависности кретања возова кроз одсек. Токен воз улази на једном крају одсека, у модулу му се на основу дозвољене брзине и дужине одсека прорачунава време путовања и тек по истеку тог времена токен се прослеђује ван модула. Код модула скретнице примењен је сличан принцип, једина разлика је што код скретнице постоји избор излазног места. Стање одсека се прати у екстерним складиштима повезаним са одсекком. Уласком токена у модул он добија статус „заузето“ док се ослобађање

не врши одмах по изласку токена већ је потребно да протекне време једнако количнику дужине воза и излазне брзине из одсека. Статус „заузето путем вожње“ у одсеке уписује екстерни процесор и то само код станичних колосека и скретница. Код скретница је у статус укључен и положај скретнице па тако одсек има три статуса а скретница шест.



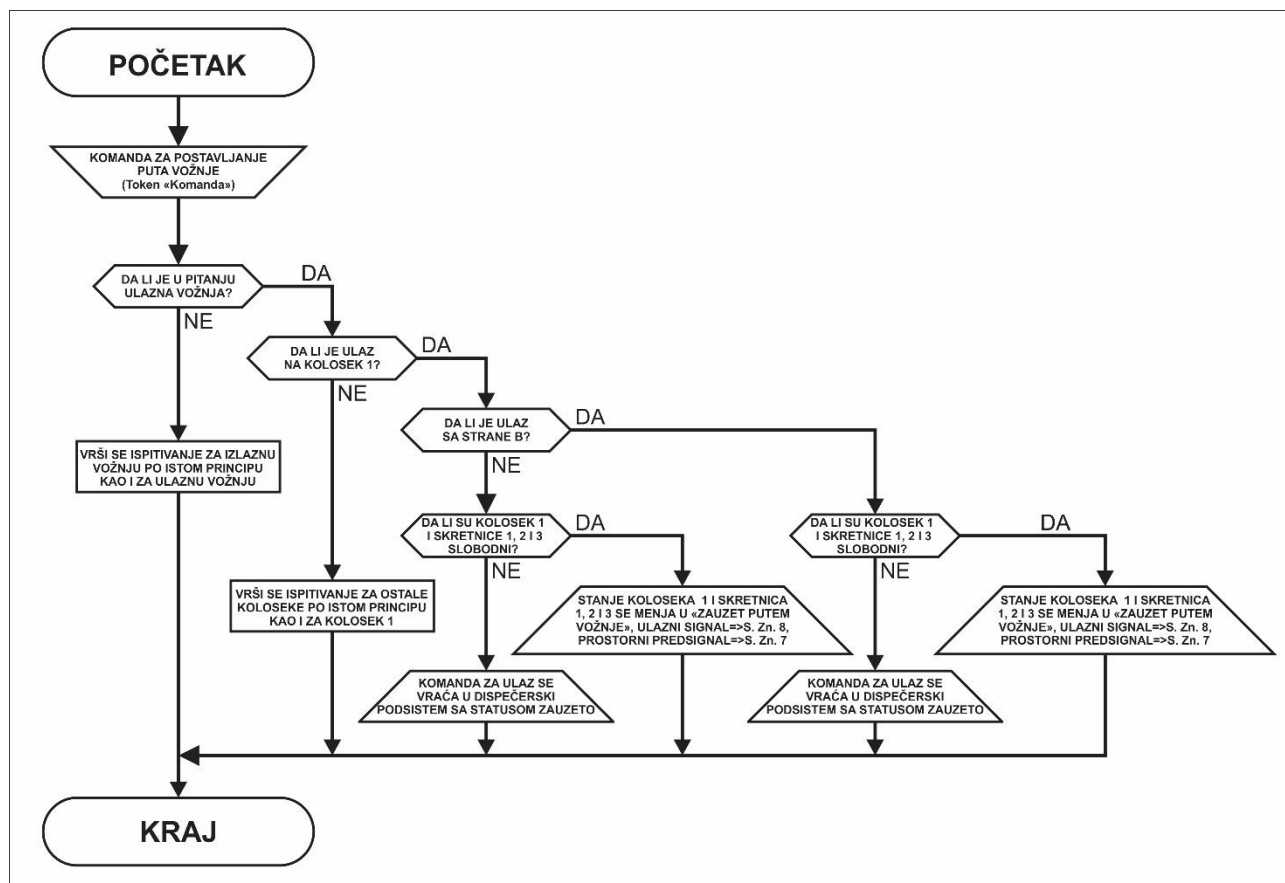
Слика 5.26 Хијерархијска структура модела

Други односно главни ниво је ниво система. На овом нивоу се модули међусовно повезују редоследом као у реалном систему. Неки модули се могу повезати директно као што су рецимо кратки одсек и прва улазна скретница или више скретница међусобно док између неких модула постоје процесори који симулирају главне сигнале. Осим процесора сваки главни сигнал поседује и складиште које чува податак о тренутном сигналном знаку главног сигнала, на њега се повезују и модули просторног одсека којима тај податак служи за прорачун излазне брзине из одсека односно времена вожње. Са модулима односно њиховим складиштима су повезани и процесори станичног и пружног сигнално – сигурносног уређаја. Дефиниција процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја приказана је на слици 5.27 а на слици 5.28 део алгоритма принципа рада процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја.



Слика 5.27 Дефиниција процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја

Задатак овог процесора је да по добијању токена *komanda* изврши формирање пута вожње. Процес формирања пута вожње се састоји из два корака где је први корак провера стања елемената пута вожње (скретница, колосека и сигнала) а други промена стања тих елемената уписивањем одговарајућих података у њихова складишта. Провера се врши како за елементе који се налазе у путу вожње тако и за елементе који се налазе у путу претрчавања и бочној заштити. Уколико су сви елементи слободни у њихова складишта се уписује стање 1 односно „заузето путем вожње“. У складишта главних сигнала се такође уписује одговарајући број који одговара сигналном знаку према Правилнику 1. Код излазних вожњи уколико није постојала привола за тај смер, а иста није блокирана, процесор станичног сигнално – сигурносног уређаја шаље захтев процесору пружног сигнално – сигурносног уређаја за промену смера и блокирање приволе.



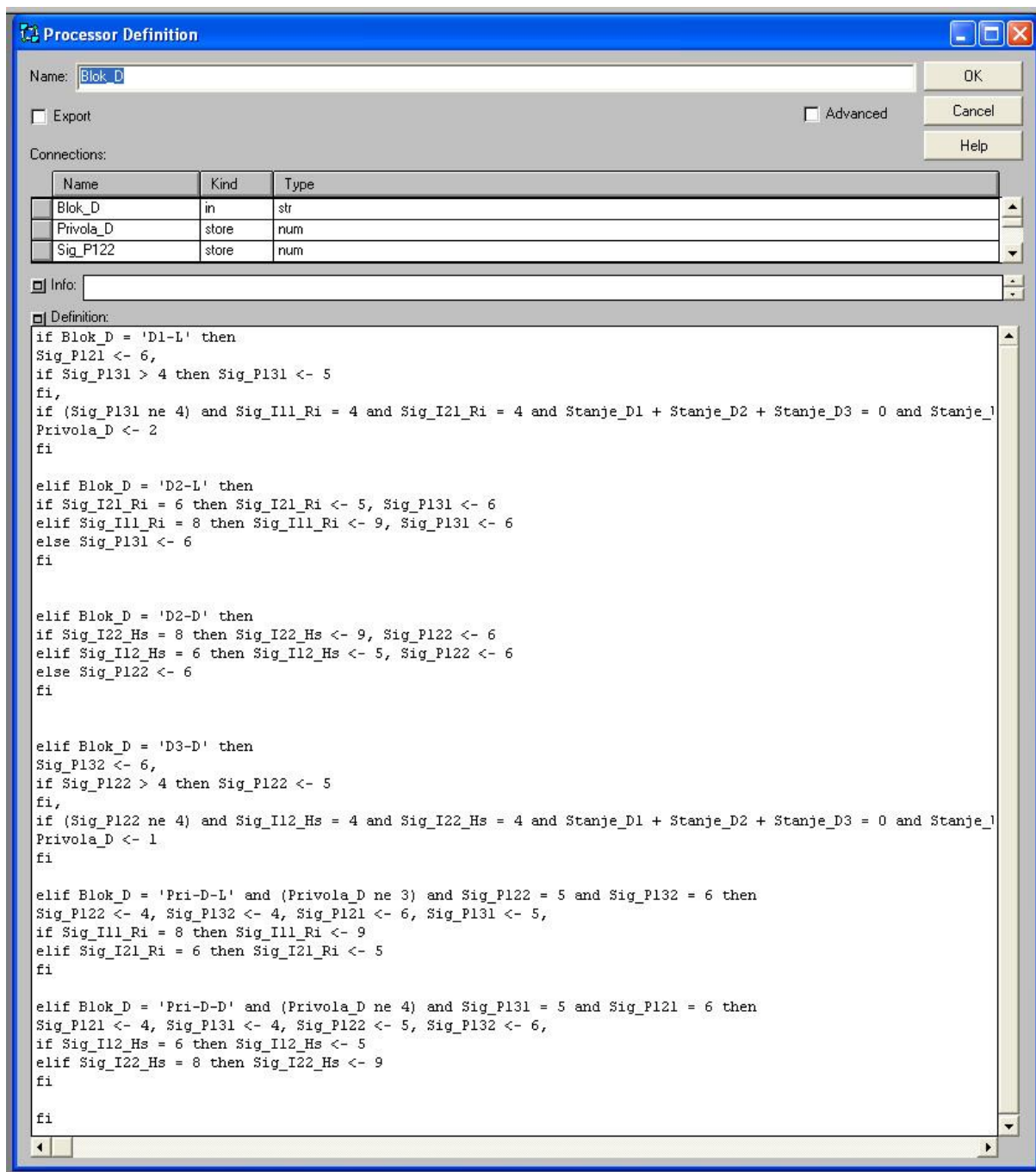
Слика 5.28. Алгоритам процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја

По успешном формирању пута војње шаље се повратна информација диспечерском подсистему у виду токена *komanda* коме је статус из „захтев“ промењен у „ок“. Уколико је из неког разлога пут војње немогуће формирати тада се статус токена команда мења из „захтев“ у „заузето“. Осим промене статуса команде уписује се и разлог неуспешног формирања пута војње. Разлози су подељени у заузеће одређених елемента возом и заузеће одређених елемента путем војње. Заузеће возом подразумева да се на неком колосеку налази воз који се у том тренутку не креће и говори диспечерском подсистему да је потребно променити улазни колосек ако је то могуће. Заузеће путем војње подразумева да су одређени елементи заузети путем војње, било у путу војње или путу претрчавања и да у том тренутку није потребно мењати улазни колосек већ да се команда за улаз понавља у регуларним временским интервалима. У заузеће путем војње се сврстава и случај воза који се креће, што се препознаје као заузеће још неког елемента осим станичног колосека односно заузеће барем једне суседне скретнице. Код излазних путева војњи не постоји могућност промене колосека већ се у случају заузећа неког елемента или непостојања приволе за тај смер команда за формирање пута војње понавља у регуларним интервалима.

Процесор пружног сигнално – сигурносног уређаја је задужен за регулисање кретања возова на међустаничним одстојањима где се саобраћај возова регулише у блоковном размаку односно где постоји аутоматски пружни блок. Самим тим је овај процесор осим управљања приволом задужен и за промену сигналних знакова на просторним сигнаlima. На деоницама где се саобраћај одвија у станичном размаку задатак овог процесора је знатно простији и своди се само на управљање приволом. У том случају се његова функција може преbacити на процесоре станичног сигнално – сигурносног уређаја. Дефиниција процесора пружног сигнално – сигурносног уређаја приказана је на слици 5.29.

Захтев за промену приволе процесор пружног сигнално – сигурносног уређаја добија од процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја у виду текстуалне информације односно

токена типа *str*. Прво се врши провера да ли је привола блокирана у супротном смеру а затим се врши провера стања одсека на основу стања (сигналног знака) просторних сигнала.



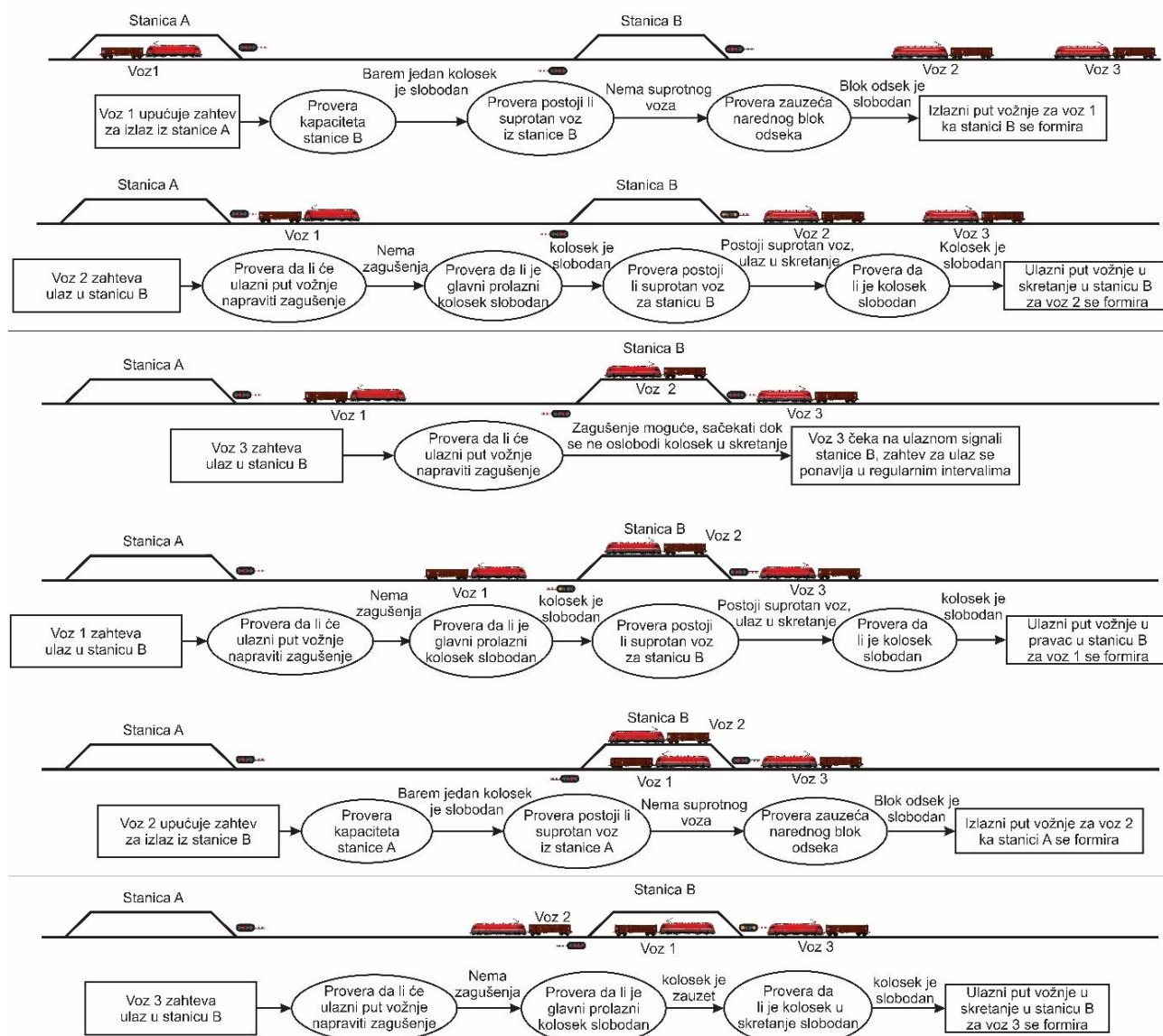
Слика 5.29 Дефиниција процесора пружног сигнално – сигурносног уређаја

Овај процесор такође врши промену сигналних знакова на просторним сигналимa. Сваки модул блок одсека у себи садржи процесор за разрешење, који информацију о успешном разрешењу (ослобађању) блок одсека шаље у текстуалном облику процесору пружног сигнално – сигурносног уређаја. Он по добијеној информацији врши проверу стања одређених просторних и излазних сигнала а затим на њима поставља одговарајући сигнални знак. Такође овај процесор нема могућност блокирања приволе јер то ради процесор станичног сигнално – сигурносног уређаја већ само деблокаду по ослобађању последњег блок одсека.

У станичном подручју такође постоји засебан процесор разрешења односно ослобађања колосека. За разлику од блок одсека где се разрешење врши у самом модулу одсека, за станичне колосеке је морао да се користи засебан систем. Два су разлога довела до примене

таквог решења. Први је чињеница да се возови на станичним колосецима чешће заустављају и дуже задржавају за разлику од блок одсека, а други да се код станичних колосека мора узети у обзир и пут претрчавања. Пошто пут претрчавања није стриктно везан за одређене и унапред дефинисане елементе већ зависи од станице до станице самим тим његово разрешење (опозивање) се није могло интегрисати у модул станичног колосека који је универзалан. Опозив пута претрчавања се врши 90 секунди од доласка задње осовине на одсек циља што је у овом случају долазак воза на станични колосек. Када токен *voz* дође до излазног сигнала шаље се захтев за разрешење пута претрчавања са закашњењем од 90 секунди. Пошто у моделу нису коришћени возови са прекораченом дужином сама чињеница да је токен *voz* дошао до процесора излазног сигнала говори да је он ослободио улазне скретнице односно да је задња осовина ушла на одсек циља.

Трећи и највиши ниво је диво диспечерског подсистема. Његов задатак је да по добијању команде за формирање пута војње исту обради, утврди да ли ју је могуће реализовати и ако је могуће проследи ту команду процесору станичног сигнално – сигурносног уређаја. Осим регулисања саобраћаја најважнији задатак овог подсистема је детекција и отклањање могућности појаве загушења. Основни принцип детекције и отклањања загушења приказан је на слици 5.30.



Слика 5.30 Детекција и отклањање загушења

Овде је приказан једноставнији пример са само два колосека у станици али по сличном принципу се ради и када постоји више од два колосека. Провера капацитета станице се врши на основу бројача капацитета станице, док се провера да ли ће нека возња изазвати загушење врши на основу поређења бројача капацитета станице, броја формираних путева возњи у наредној станици и броја возова из супротног смера.

5.8. ВЕРИФИКАЦИЈА СИМУЛАЦИОНОГ МОДЕЛА

Симулациони модел Петри мрежа тестиран је на деоници једноколсечне пруге Хрпеље-Козина – Копер у Словенији. Ова деоница је одабрана како због великог броја возова тако и због постојања великог броја укрсница са два колосека. Резултати су поређени са резултатима добијеним помоћу симулационог модела ове деонице урађеном у програму *OpenTrack* као и са подацима из реда возње. Фокус је био на задржавањима возова, како у станицама тако и на отвореној прузи са посебним освртом на задржавање испред улазних сигнала.

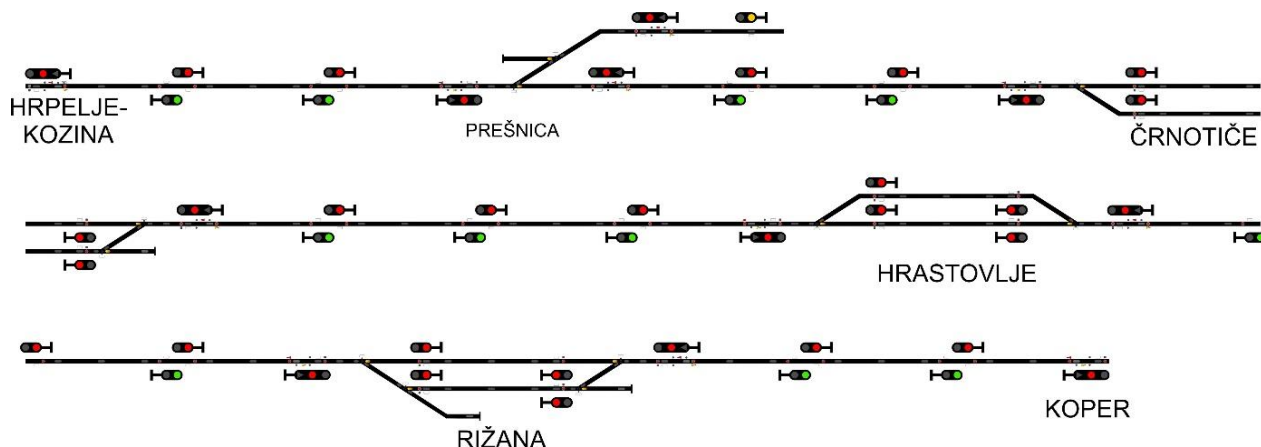
5.8.1. КАРАКТЕРИСТИКЕ ДЕОНИЦЕ ХРПЕЉЕ-КОЗИНА - КОПЕР

Деоница Хрпеље-Козина – Копер је део пруге Дивача – Копер која повезује пругу Љубљана – Пивка – Дивача – Сежана – (Villa Orisina) са луком Копер. Ова лука је тренутно једна од најоптерећенијих лука на Јадрану са површином од 400 ha и 2284 m оперативне обале на којој се налазе 24 веза за пристајање бродова. Поседује 12 специјализованих терминала и преко 55 ha простора за складиштење.

У периоду 1964 – 1967. године изграђена је железничка пруга Прешница – Копер чиме је Копер повезан са пругом Дивача – Прешница – Пула изграђеној у другој половини XIX века. Пруга је свечано пуштена у рад 16.11.1967. године. Карактерише је велики обим саобраћаја пошто је користе највећим делом теретни возови из Словеније, Аустрије, Немачке, Чешке, Словачке и Мађарске. Због тешког терена на коме је изграђена, пруга је и дан данас једноколосечна са неколико укрсница и максималним нагибом од 25,75‰. Ово су главни разлози зашто пруга са око 100 возова дневно има искоришћеност капацитета око 90% од максималног теоријског капацитета. Пројекат изградње другог колосека предвиђа изградњу 27,1 km нове пруге са 8 тунела, два вијадукта, два моста и преко 75% дужине трасе у тунелима. Предвиђени трошкови су били 1.047 милиона евра и пројекат је усвојен као „*Zakon o izgradnji, upravljanju in gospodarjenju z drugim tirom železniške proge Divača–Koper*“. Закон је био на референдуму у септембру 2017. године чије резултате је због начина финансирања поништио Врховни суд Словеније а на поновљеном референдуму у мају 2018. излазност је била мања од 10% па је закон остао на снази. Предвиђени други колосек иде само мањим делом паралелно са постојећим, већином је у питању потпуно нова траса са повољнијим карактеристикама и максималним успоном од 17 ‰. Због знатно повољнијег успона нови колосек би се користио за возове који иду из Копра ка Дивачи пошто су они углавном товарени, а стари колосек за возове из Диваче ка Копру.

Тренутно на овој прузи постоји осам службених места а на посматраној деоници шест и то станице Хрпеље – Козина и Копер, укрснице Чрнотиче, Храстовље и Рижана и распутница (и стајалиште) Прешница. Станице Хрпеље – Козина и Копер у моделу нису приказане већ представљају улазне тачке односно границу моделиране деонице док приказ креће почев од првог блок одсека испред / иза поменутих станица. Укрснице Чрнотиче, Храстовље и Рижана поседују по два колосека односно још један пријемно отпремни колосек осим главног пролазног па се користе искључиво за укрштавања и у ретким случајевима и претицања возова. Брзине на прузи су прилично уједначене за све категорије возова и крећу се од 65 – 90

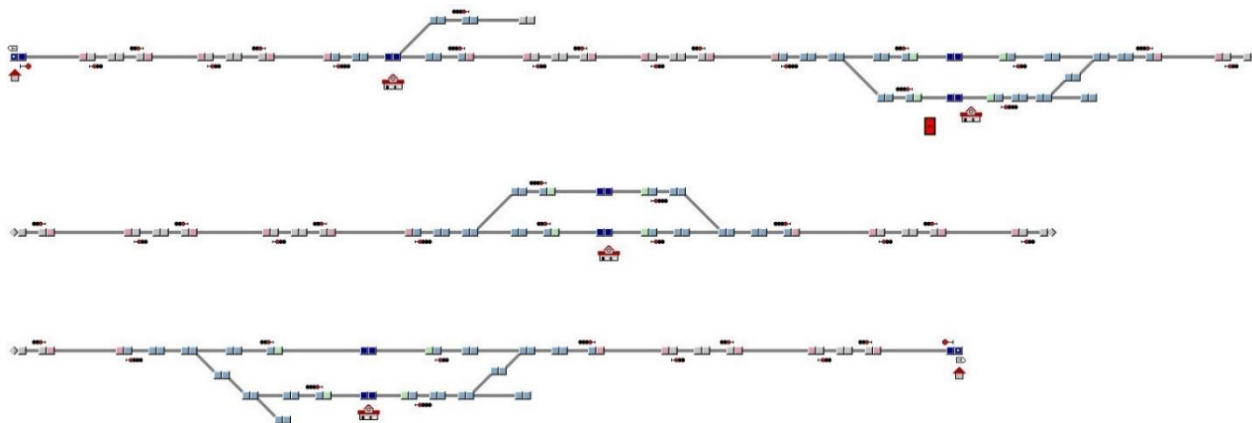
km/h при чему су највеће за путничке гарнитуре са нагибном техником док разлика између максималне брзине за најбржи и најспорији воз по деоницама износи у просеку 10 km/h. Све станице на прузи су опремљене *Thales* електронским сигнално – сигурносним уређајима којима се управља путем телекоманде лоцоране у станици Постојна на прузи Љубљана – Сежана. Пруга је опремљена аутоматским пружним блоком при чему између свих службених места постоје по три блок одсека осим на међустаничном растојању Чрнотиче – Храстовље где постоје четири блок одсека. Шематски приказ деонице са свим колосецима, скретницама и сигнаlima приказан је на слици 5.31.



Слика 5.31 Шематски приказ деонице Хрпеље-Козина - Копер

5.8.2. МОДЕЛИ ДЕОНИЦЕ ХРПЕЉЕ-КОЗИНА – КОПЕР

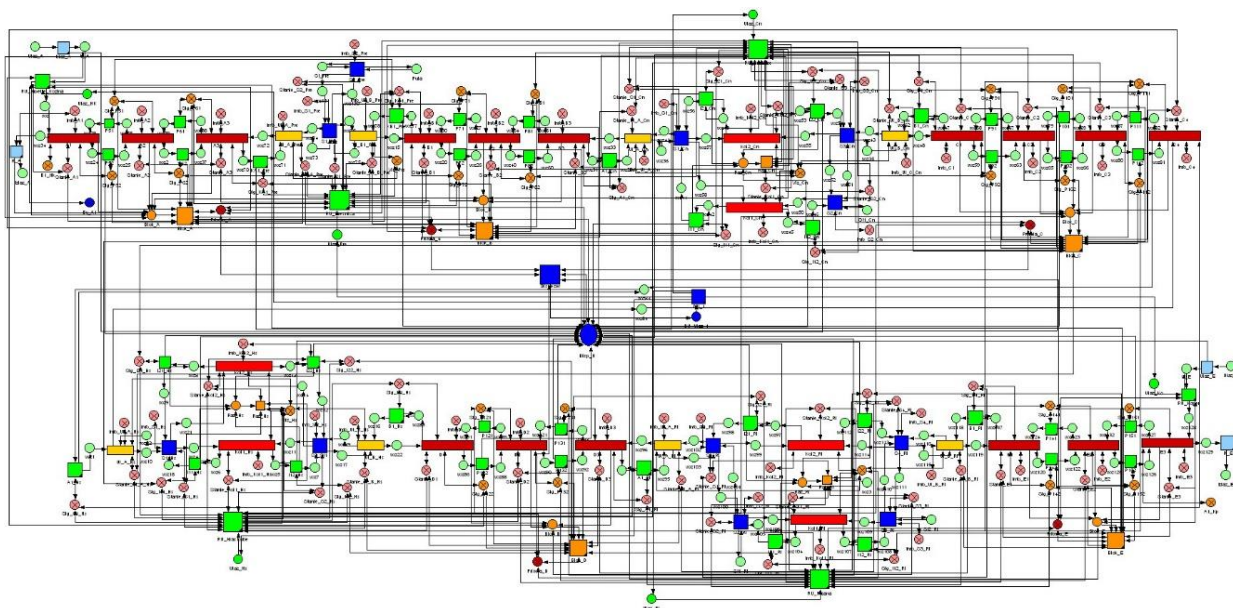
Као што је наведено, урађена су два модела ове деонице, један применом Петри мрежа у програму *ExSpect* а други у програму *OpenTrack*. Резултати и једног и другог модела су упоређени са графиконом саобраћаја возова. Модел деонице Хрпеље-Козина – Копер у у програму *OpenTrack* приказан је на слици 5.32.



Слика 5.32 Модел деонице Хрпеље-Козина – Копер у програму *OpenTrack*

Принцип рада модела урађеног помоћу Петри мрежа је објашњен у претходним поглављима. Састоји се из креирања основних елемената односно модула као што су одсек и скретница, њиховим повезивањем као у реалном систему и додавањем одговарајућих процесора (прелаза). Ти прелази су најчешће главни сигнали и они се постављају између одговарајућих елемената (између два одсека или одсека и скретнице) као и са одговарајућим складиштима. Осим ових елемената додају се и остали процесори као што су процесори за разрешење станичних и блок одсека. Да би се могло вршити регулисање саобраћаја за свако службено место (станицу, распутницу) се додају и процесори сигнално – сигурносног уређаја који су повезани са свим елементима у службеном месту и служе за постављање одговарајућег пута вожње постављањем одсека, скретница и сигнала у одговарајуће стање (положај). Све ово

су извршни елементи, који информације и команде за рад добијају од система вишег реда који је у моделу Петри мрежа представљен диспечерским подсистемом. Овај подсистем прима захтеве за постављање пута вожње од одређених унапред дефинисаних елемената у моделу, нпр. за улазне путеве вожње то је други просторни сигнал испред улазног сигнала. Захтев за формирање пута вожње је у унапред дефинисаном формату токена *komanda*. На основу захтева, расположивости одговарајућих колосека као и провере и спречавања појаве загушења се формира одговарајући пут вожње. Ред вожње возова се у модел уноси на улазним местима у виду текстуалног фајла чија структура одговара структури токена *voz*. Комплетан модел Петри мрежа приказан је на слици 5.33. Црвени правоугаоници представљају станичне колосеке или блок одсеке, наранџасти правоугаоници кратке одсеке између улазног сигнала и прве улазне скретнице а плави квадрати представљају скретнице. Наранџасти квадрати су пружни сигнално – сигурносни уређаји, мањи зелени квадрати представљају главне сигнале а већи станичне сигнално – сигурносне уређаје. Плави кругови и квадрати у средини представљају диспечерски подсистем.



Слика 5.33 Модел деонице Хрпеље-Козина – Конер у програму ExSpect

Ова деоница је моделирана и помоћу програма *OpenTrack*, програма за синхрону микроскопску симулацију железничког саобраћаја. *OpenTrack* симулира понашање елемената железничког система (инфраструктурне мреже, возног парка и реда вожње), као и свих процеса који их повезују. Може се користити за читав низ истраживања почев од тестирања робусности реда вожње, процене дугорочних ефеката и исплативости улагања у унапређење инфраструктуре па до испитивања утицаја различитог возног парка

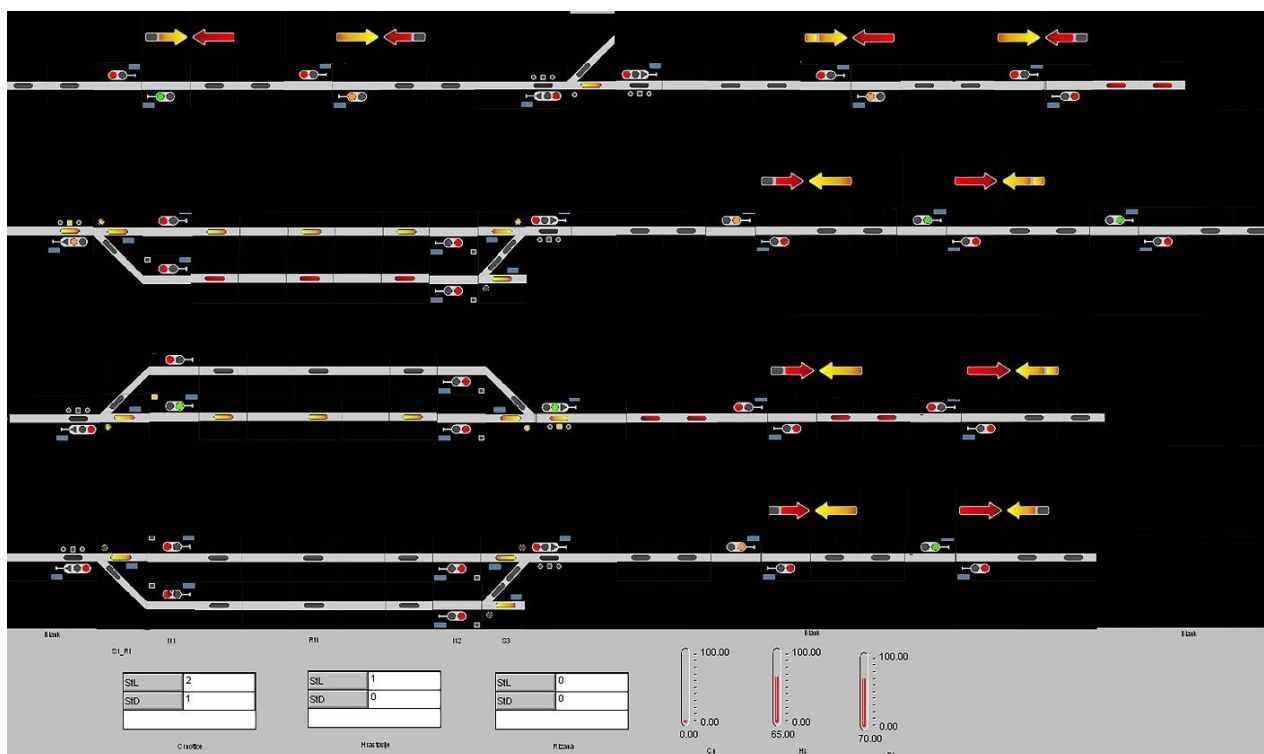
5.8.3. ПРИКАЗ РАДА МОДЕЛА ПЕТРИ МРЕЖА

Резултати оба модела су упоређени са редом вожње за 2016/2017. годину са приближно 100 возова дневно што је блиско теоријском капацитету деонице. За темељније тестирање модела Петри мрежа коришћене су и варијанте са 150 и 300 возова и случајним временима доласка.

Пошто *ExSpect* има могућност извоза података у *Excel* фајл и у моделу Петри мрежа је вршен извоз података из сваког места (канала) у заједнички фајл *izlaz.xls* док је из складишта вршен у засебне фајлове са називом самог складишта. Информације које се уносе у један *.xls* фајл се користе за праћење рада целокупног система као што су чекања, закашњења, коришћени путеви вожње, време путовања и брзине возова кроз одсеке. Из сваког места које је подешено да експортује податке у *.xls* фајл уписују се тренутни подаци из токена *voz* односно боја токена. За разлику од овог токена подаци из складишта су углавном

једноставнији и уписују у посебне фајлове са именом складишта пошто би уписивање у исти фајл довело до забуне из ког складишта потиче тај податак. Најчешће су то складишта заузећа одсека где је податак о заузећу нумерички. Сви они се касније могу објединити у један *Excel* фајл за даљу обраду и бољи преглед заузећа одсека. Сви подаци о кретању возова и заузећима одсека се уз мању обраду могу експортирати у *AutoCAD* и приказати графички.

Ток симулације се може пратити и графички путем кориснички креиране анимације повезивањем елемената са сликама у *bitmap* формату. Елементи као што су скретнице, сигнали и изоловани одсеци су представљени различитим сличицама које се мењају како се мења стање тог елемента. Најчешћи начин је повезивање са одговарајућим складиштима где свака промена стања складишта мења и сличицу. У овом моделу као сличице коришћен је изглед мозаик поља са система телекоманде *Flexicode 560/I* произвођача *Westinghouse Wabco* из Торина пошто он даје довољну прегледност и једноставност приказа. Анимација деонице Хрпеље-Козина – Копер приказана је на слици 5.34.

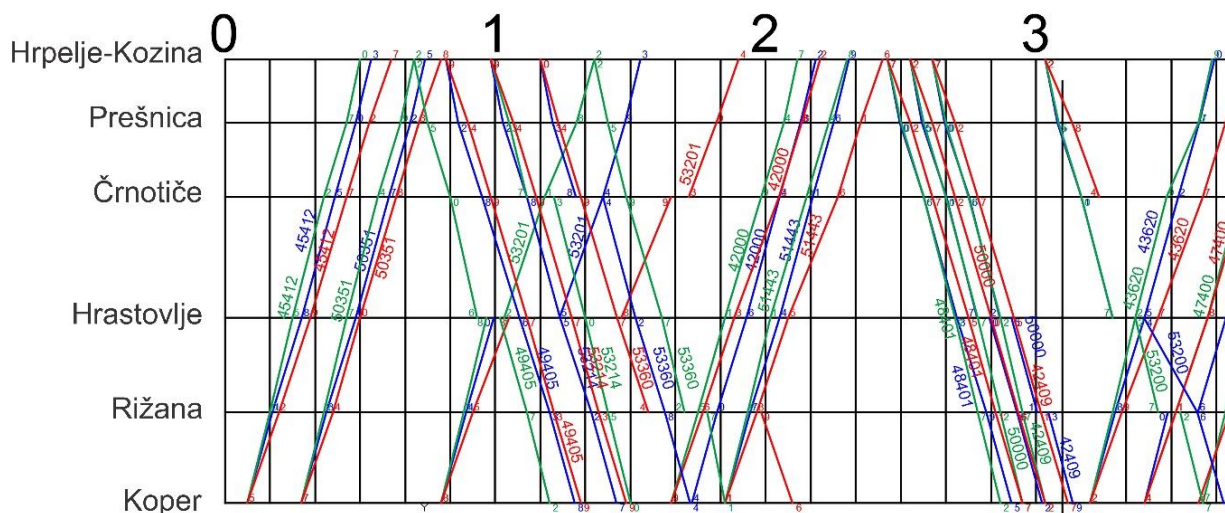


Слика 5.34 Анимација модела деонице Хрпеље-Козина – Копер

Горња половина слике представља колосечну ситуацију са свим блок одсецима, скретницама и сигнаlima као и показивачима смера приволе. Као и на телекоманди путеви вожње су приказани жуто док су заузећа одсека приказана црвено. Пошто се код овог система телекоманде сигнални знаци главних сигнала приказују упрошћено тако да је је сигнални знак 4 „Стој“ приказан једном црвеном мирном светлошћу а сви сигнални знаци слободне вожње зеленом мирном светлошћу, тај принцип је примењен и код ове анимације са изузетком да је сигнални знак 6 „Опрезно очекуј стој“ приказан једном мирном наранџастом светлошћу. Табеле у доњем левом углу показују стање бројача капацитета станице, за све станице у оба смера вожње. Вертикалне линије поред њих представљају дозвољену брзину изласка из станица и у функцији су формираног пута вожње. Као што се на овој слици може видети у станици Храстовље је формиран пролазни пут вожње па је излазна брзина постављена на максималну а у станици Чрнотиче формиран је само улазни пут вожње па је излазна брзина нула.

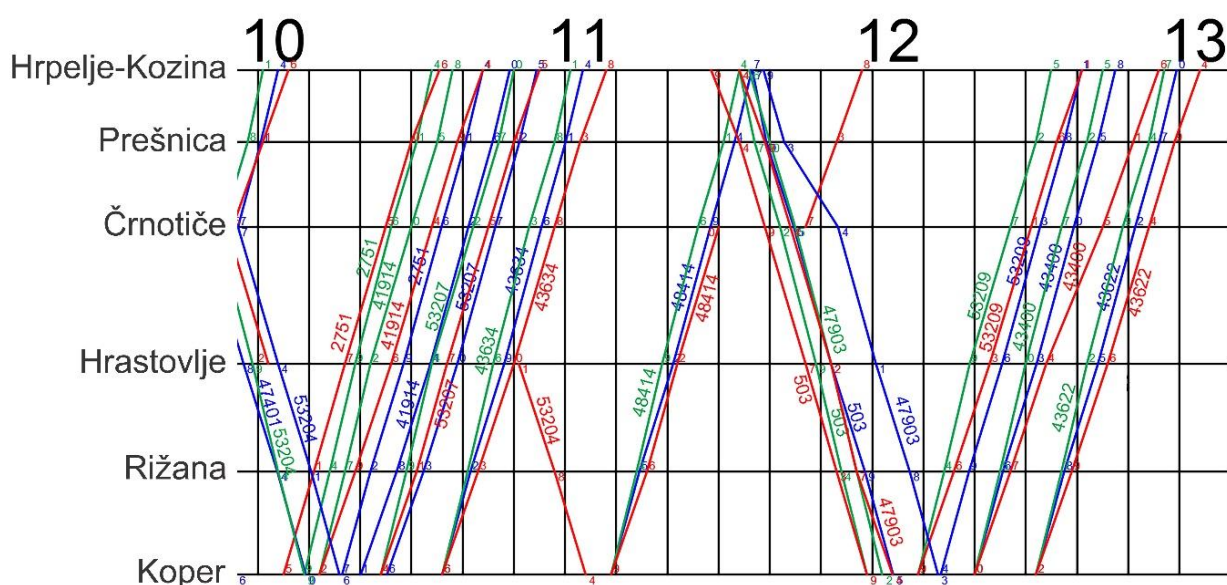
5.8.4. УПОРЕЂИВАЊЕ РЕЗУЛТАТА МОДЕЛА

Циљ моделирања је био креирање прецизног и тачног модела једноколосечне пруге са великим обимом саобраћаја применом Петри мрежа и креирање диспечерског система који може регулисати саобраћај без стварања загушења и непотребних кашњења. Модел је верификован помоћу модела исте деонице урађеном у програму *OpenTrack*. Резултати оба модела су упоређени са редом возње и приказани у форми графикана реда возње на сликама 5.35 и 5.36. Због прегледности су узета два карактеристична перода са већим бројем возова и то један од 00:00 до 03:30 и други од 10:00 до 13:00 часова. Црвене линије представљају планирани ред возње, зелене линије резултате симулације у *OpenTrack*-у а плаве линије резултате симулације модела Петри мрежа.



Слика 5.35 Део графикана од 00:00 до 03:30

Као и код класичног графикана на х-оси су приказане станице (службена места) а на у-оси временски интервали по 10 минута. Тачно време доласка, поласка / проласка је приказано бројевима у оштром углу између трасе воза и линије службеног места.



Слика 5.36 Део графикана од 10:00 до 13:00

Модел Петри мрежа је успешно симулирао и ситуације са 150 и 300 возова дневно али те варијанте нису симулиране у *OpenTrack*-у, или поређене са редом возње пошто су коришћени случајни доласци возова. Други разлог лежи у чињеници да је варијанта са 300

возова показала тенденцију ка груписању возова односно креирању снопова возова који су без прекида кретали од почетка до краја моделиране деонице, па се самим тим није могло вршити тестирање способности диспечерског система да регулише укрштавања возова.

Вршена су три поређења симулационих модела, при чему су прво и друго поређење вршени у два временска интервала и то од 00:00 до 03:30 и од 10:00 до 13:00 часова, док је последње поређење вршено за период од 00:00 до 24:00. Прво поређење је вршено за ситуације када нема укрштавања и сврха је била утврђивање у којој мери симулациони модели верно симулирају кретање возова када нема поремећаја. Као што се може видети на оба графика, време путовања у оба модела је незнатно краће него у реду вожње. Разлог лежи у чињеници да времена вожње која су дата у реду вожње садрже и временске резерве за случај поремећаја. Између модела Петри мрежа и *OpenTrack* модела разлике су још мање а у неким случајевима време вожње је идентично као у планираном реду вожње. Резултати показују да оба модела успешно управљају саобраћајем узастопних возова и да не стварају непотребна закашњења и заустављања.

Друго поређење је вршено у ситуацијама када постоје укрштавања возова. У оба временска интервала решавање конфликта и извршење укрштавања вршено је различито код оба модела и у реду вожње. Различито решавање конфликта је узроковано различитим временима вожње која резултирају различитим временима доласка у станице што доводи до премештања укрштавања односно претицања у суседне станице. У свим случајевима може се приметити да су задржавања у станицама мања него у реду вожње. На пример, воз 53360 у реду вожње чека 25 минута у станици Рижана, у *OpenTrack* моделу чека 5 минута а у Петри нет моделу не чека уопште. Или воз 48414, у реду вожње чека 17 минута у станици Чрнотиче док у симулационим моделима не чека уопште. Слична ситуација се понавља са возовима 53201 и 42003.

Треће поређење је вршено на основу укупних чекања у станицама. Резултати показују да су код оба симулациона модела чекања сведена на минимум и у многим случајевима краћа него у реду вожње. У варијантама са 150 и 300 возова које су тестиране само у моделу Петри мрежа чекања су била знатно дужа, али је то узроковано већим бројем возова у сноповима. Задржавања возова у станицама, у оба модела као и укупно планирано задржавање по реду вожње приказана су у табели 3.

Табела 5.1 Трајање задржавања по моделу

Модел	Укупно трајање заустављања	Максимално трајање заустављања	Просечно трајање заустављања
	(h:mm:ss)	(h:mm:ss)	(h:mm:ss)
Петри мреже	3:24:00	0:16:45	0:06:11
<i>OpenTrack</i>	3:33:00	0:18:00	0:06:27
Планирана задржавања по реду вожње	17:56:00	1:04:00	0:17:56

Резултати показују значајно смањење чекања код оба модела у односу на ред вожње, како у укупном трајању чекања тако и у просечном и највећем трајању чекања. Када се пореде само два модела, Петри нет модел показује нешто краћа укупна, као и просечна и најдужа чекања. Чекања се могу проверити и анализирањем графика на коме се јасно види различито решавање конфликта уз слично трјање чекања.

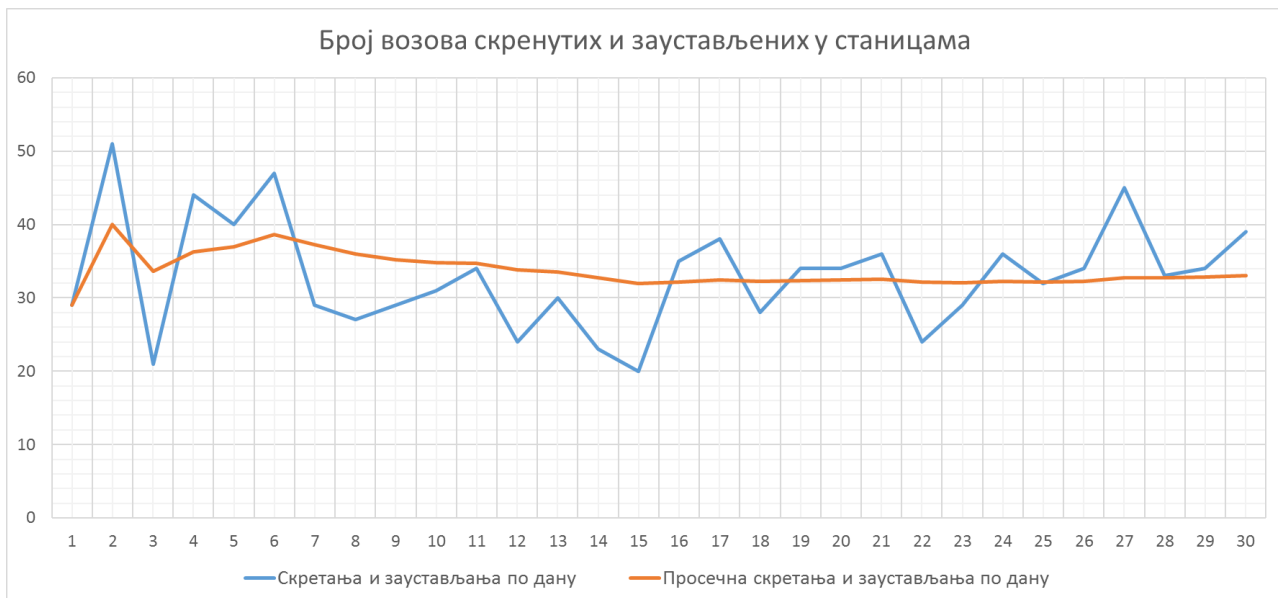
Перформансе самог диспечерског система могу бити оцењене поређењем броја диспечерских акција у ситуацији случајних долазака возова. За ово испитивање коришћен је постојећи ред вожње са 100 возова али са случајно генерисаним кашњењима односно одступањима од реда вожње. Како би се добили прецизнији и просечни резултати коришћен је период од 30 дана са различитим закашњењима за све возове. Модел је тестиран са

различитим распоном закашњења која су генерисана у *Excel*-у помоћу функције генерисања случајних бројева. Три диспечерске акције су посматране и то: воз заустављен на главном пролазном колосеку, воз пропуштен кроз неки други главни колосек („у скретање“) и воз примљен на неки други главни колосек и заустављен. Прва акција заустављања воза на главном пролазном колосеку је примењивана у два случаја, где је први заузеће наредног блок одсека или непостојање интервала слеђења узастопних возова (слеђење „на зелено“). Други случај је заустављање воза због предстојећег укрштавања и то најчешће у ситуацији када су остали главни колосеци заузети. Друга акција односно пропуштање воза кроз неки други колосек се користи када је главни пролазни колосек заузет због укрштавања, а могуће је формирати излазни пут вожње односно наредни блок одсек је слободан. Трећа акција односно пуштање воза у скретање и заустављање се користи углавном у ситуацијама када се очекује укрштавање возова, мада се користи и у ситуацији када су и главни пролазни колосек и наредни блок одсек заузети, па се не може формирати излазни пут вожње. Пошто диспечерски систем примарно формира пролазни пут вожње кроз главни пролазни колосек, сваки пут када је воз заустављен или пропуштен кроз скретање у станици значи да је диспечерски систем извршио неку акцију осим прослеђивања добијене улазне команде. Број диспечерских акција у периоду од 30 дана приказан је у табели 5.2.

Табела 5.2 Број диспечерских акција у периоду од 30 дана

Диспечерска акција	Станица	Интервали кашњења (мин)						Случајни доласци
		0-10	10-20	20-30	0-30	0-60	0-120	
Заустављен на глав. прол. колосеку	Чрнотиче	148	150	148	137	170	201	204
	Храстовље	88	82	87	78	154	151	149
	Рижана	77	48	65	61	137	174	166
Пропуштен кроз скретање	Чрнотиче	217	207	227	180	178	246	239
	Храстовље	105	101	113	101	237	251	228
	Рижана	102	71	85	86	149	180	181
Пуштен у скретање и заустављен	Чрнотиче	379	297	278	278	337	382	344
	Храстовље	294	273	293	286	390	422	388
	Рижана	185	159	173	167	217	243	230

Резултати показују да се у већини случајева број диспечерских акција повећава са повећањем интервала кашњења. Код случајних долазака возова број диспечерских акција је приближан као у случајевима са интервалима кашњења од 0 – 60 и од 0 – 120 минута. Број диспечерских акција се такође може посматрати као укупан и просечан број акција дневно. Као пример узета је диспечерска акција скретања и заустављања воза у станици, приказана на слици 5.37.



Слика 5.37 Број возова скренутих и заустављених у станицама по дану

Резултати показују да број диспечерских акција односно број возова који су скренути и заустављени у свим станицама варира од 20 до 50 дневно али да је просечан дневни број акција око 33. Слични резултати се могу уочити и за преостале две диспечерске акције, при чему број заустављања на главном пролазном колосеку варира од 4 до 36, а просечан број се креће око 17. Број возова који су пропуштени кроз скретање варира од 8 до 43 са просечним бројем од 23 воза. Када се ове акције пореде за све три станице појединачно добијају се слични резултати.

Друго поређење је вршено анализом просечних и укупних кашњења у станицама која су приказана на слици 5.38. Као и у претходном поређењу коришћен је ред вожње са случајним наилазцима возова у периоду од 30 дана. Резултати показују варијације у просечним кашњењима између 7 и 12 минута док су укупна просечна кашњења око 9 минута. Слични резултати се добијају када се кашњења посматрају засебно по станицама, тада су просечна кашњења у распону од 6 до 16 минута, док су укупна просечна кашњења и у овом случају око 9 минута у свим станицама.



Слика 5.38 Просечна кашњења у свим станицама

5.9. РЕЗИМЕ

У овом поглављу је детаљно приказан принцип моделирања железничког саобраћајног система применом Петри мрежа и софтвера *ExSpect*. Приказано је како овај софтвер може да се користи за моделирање основних елемената железничке инфраструктуре као што су изоловани одсеци и скретнице, а затим да се они обједине у функционалну целину једне станице односно службеног места и тиме успешно симулирају кретање возова на железничкој инфраструктури.

Посебна пажња посвећена је диспечерском систему за управљање саобраћајем без кога симулирање одвијања саобраћаја на једноколосечној прузи не би било могуће. Док се на двоколосечној прузи са једностраним саобраћајем регулисање може релативно једноставно симулирати, код једноколсечне пруге то није случај. Из тог разлога је развијен диспечерски систем који у реалном времену врши праћење и регулисање саобраћаја возова.

Како би се утврдила успешност симулационог модела извршена је верификација поређењем са моделом исте деонице рађене у софтверу *OpenTrack* на примеру деонице пруге Дивача – Копер у Словенији између станица Хрпеље-Козина и Копер. Модел је тестиран како са планираним редом вожње тако са и са случајним доласцима возова и у свим варијантама је показао успешност у регулисању саобраћаја, већу и од комерцијалног софтвера *OpenTrack*.

6. СИМУЛАЦИОНО МОДЕЛИРАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА УКРСНИЦА

6.1. УВОД

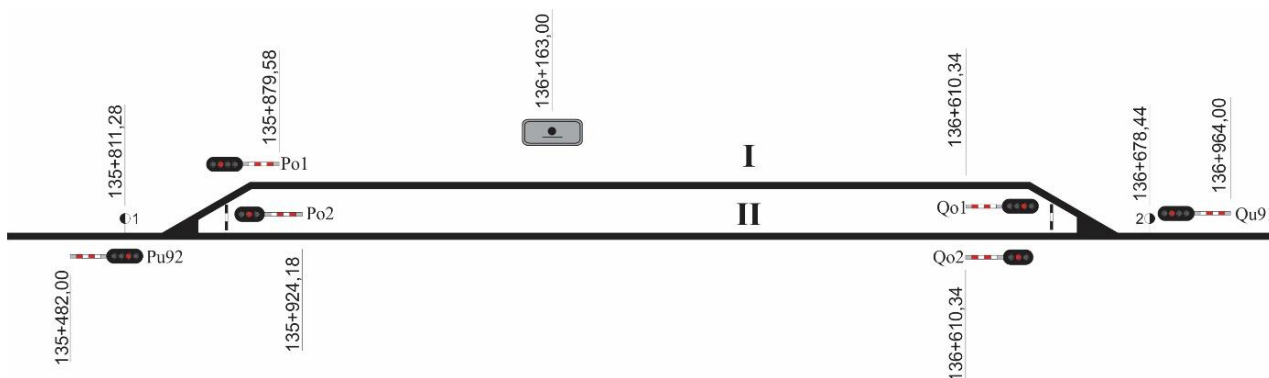
У овом поглављу је приказано моделирање одабране деонице пруге применом Петри мрежа и софтвера *ExSpect*. На основу модела развијеног у (*Jeremić et al., 2021*) извршено је моделирање деонице Врбас – Жедник на прузи (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). На овој деоници постоје четири станице Врбас, Ловћенац, Бачка Топола и Жедник и једна укрсница Мали Иђош Поље. Ова укрсница је узета као пример анализе различитих варијантних решења укрсница. Развијено је укупно осам модела при чему је први, основни модел тренутно стање док су код осталих примењене одређене модификације саме укрснице Мали Иђош Поље и припадајућих међустаничних одстојања. Детаљне карактеристике деонице Врбас – Жедник дате су у Прилогу 2.

6.2. ВАРИЈАНТНА РЕШЕЊА УКРСНИЦЕ МАЛИ ИЂОШ ПОЉЕ

У овом поглављу приказане су основне карактеристике варијантних решења укрсница. Као пример је узета укрсница Мали Иђош Поље пошто има само два колосека а то је најчешћи број колосека у укрсници који се може видети у пракси. Такође, код укрсница са 3 колосека теже је приказати варијантна решења и модификације су знатно комплексније него код укрсница са два колосека, а са друге стране добијени резултати су слични као и код укрсница са два колосека.

6.2.1. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ

У постојећем стању укрсница Мали Иђош Поље има два колосека, први пријемно – отпремни и други главни пролазни. Такво решење се може видети код многих укрсница на мрежи ИЖС као што су Ваљевски Градац, Пиносава, Рипањ Тунел, Стеванац, Старо Трубарово и друге. Шематски приказ постојећег стања укрснице Мали Иђош Поље приказан је на слици 6.1.



Слика 6.1 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, постојеће стање

Као што се може видети у постојећем стању постоје само две просте једноструке скретнице и два колосека на чијим крајевима се налазе излазни сигнали. Ово решење одликује једноставност за изградњу и одржавање, како због малог броја скретница тако и због чињенице да су и скретнице као и цела укрсница у правцу. Са експлоатационе стране ово је такође једноставно решење са укупно четири могућа пута вожње и без могућности избора пута претрчавања. Управо пут претрчавања је највећа мана овог решења пошто при формирању улазног пута вожње на било који колосек обухвата и излазну скретницу, односно улазну

скретницу из супротног смера. Пут претрчавања код савремених сигнално сигурносних уређаја остаје блокиран 90 секунди по уласку задње осовине на одсек циља односно станични колосек. Отправник возова путем станичне поставнице може опозвати пут претрчавања али само ако се визуелним путем уверио да се воз зауставио на колосеку. Пошто то није могуће извести када се станицом управља на даљину путем телекоманде, пут претрчавања остаје блокиран тих 90 секунди. Тиме се онемогућава истовремени улазак у станицу возова из супротног смера што може довести до заустављања или успоравања воза на улазном сигналу. У случају одвијања саобраћаја без поремећаја ово не представља проблем али представља значајан фактор који се мора узети у обзир приликом конструисања реда вожње како не би дошло до непотребних успоравања и заустављања возова. На неким железничким управама као што су железнице у САД пут претрчавања не постоји, па је самим тим ово решење укрснице сасвим довољно и врло често се примењује. Са друге стране на таквим железницама је чест случај да је брзина у скретање знатно мања него брзина у правац, у просеку 4-5 пута мања и ретко већа од 25 km/h чиме се повећана безбедност.

6.2.2. ВАРИЈАНТА УКРСНИЦЕ СА ГРАНИЧНИМ КОЛОСЕЧНИМ СИГНАЛИМА

Као друго варијантно решење је узета варијанта укрснице са граничним колосечним сигналимa. Гранични колосечни сигнали се користе за сигналисање дозвољене или забрањене вожње возовима и маневарским саставима. Њихова примена је разнолика и могу се користити у следећим ситуацијама:

- за поделу колосека на ограничене одсеке пута вожње;
- за означавање краја колосека који није опремљен главним сигналом и
- за означавање краја слепог колосека (грудобрана).

У прва два случаја користе се светлосни гранични колосечни сигнали а у трећем искључиво ликовни.

Означавање краја колосека који није опремљен главним сигналом се примењује или у чеоним станицама као што су рецимо у Црној Гори Никшић и Бар или у станицама у којима возови редовно не настављају даљу вожњу као што је рецимо Београд ранжирна парк А. У овим станицама се гранични колосечни сигнали користе како би се омогућио редован пријем возова на колосеке опремљене граничним колосечним сигналимa, при чему возови односно њихов део даљу вожњу могу наставити искључиво као маневарски састави.

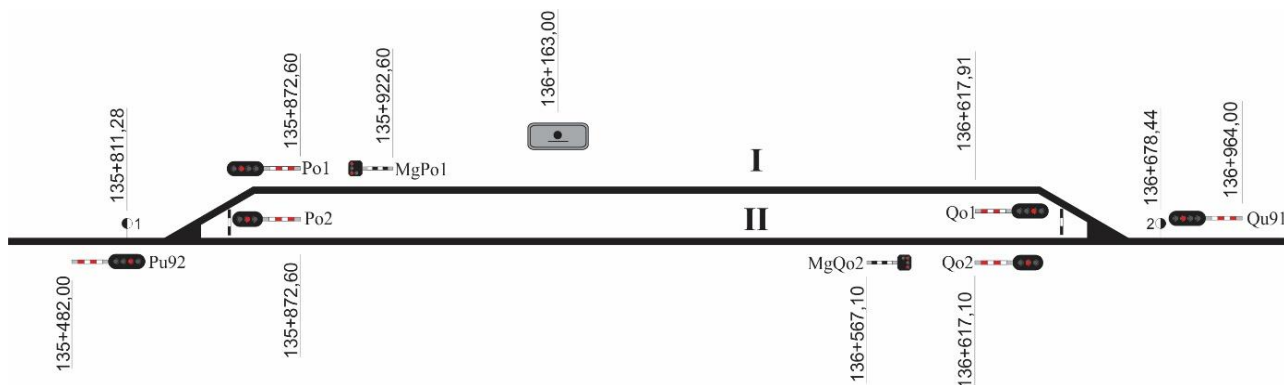
Подела колосека на ограничене одсеке пута вожње се може вршити из експлоатационих разлога, када се колосек најчешће дели на приближно једнаке делове како би се омогућио пријем више возова на исти колосек, или из чисто техничких разлога када се гранични колосечни сигнал уграђује због промене пута претрчавања. Први случај је примењен у станицама као што су Шид, Рума и Ниш на по два колосека који се користе за пријем путничких возова, при чему су то углавном краће гарнитуре.

Решење са граничним колосечним сигналимa испред излазних сигнала чија је функција да обезбеде пут претрчавања само до излазног сигнала није примењивано у станицама на ИЖС и уопште на ЈЖ све до изградње станице Београд Центар. У једном периоду изградње од средине деведесетих година па до 2010. године у овој станици су постојали само колосеци 9 и 10. У том периоду сав саобраћај се вршио по тим колосецима, па је често постојала потреба за једновременим уласком односно уласком и изласком возова, појачана чињеницом да су ти колосеци били повезина са пругом и за Раковицу и за Панчево. Пошто због теренских прилика није била могућа уградња штитних колосека примењено је решење са граничним колосечним сигналимa и растојањем између граничних колосечних сигнала и излазних сигнала односно путем претрчавања од 50 m. Приликом наставка изградње станице Београд Центар ово решење је задржано и сада је примењено на колосецима 3, 8, 9 и 10 а по завршетку изградње колосека 1 и 2 биће примењено и на тим колосецима.

Када је у питању укрсница Мали Иђош Поље и овде је могуће уградити граничне колосечне сигнале из техничких разлога. Гранични колосечни сигнали би били уграђени на 50 m испред излазних сигнала што чини минималан пут претрчавања. На овај начин, и уз извесна померања излазног сигнала са другог колосека ближе крају колосека добија се корисна дужина при пријему до граничног колосечног сигнала од око 700 m. Пошто би у том случају удаљеност од граничног колосечног сигнала до улазног сигнала била већа од дужине зауставног пута за ову пругу не постоји обавеза уградње показивача за брзину на улазним сигналимa што смањује трошкове инвестиција и одржавања.

Решење са граничним колосечним сигналимa може се извести у две варијанте при чему је прва варијанта приказана на слици 6.2. У овој варијанти уграђују се само два гранична колосечна сигнала и то по један за сваки смер, али на различитим колосецима. Решење приказано на слици 6.2 подразумева уградњу граничног колосечног сигнала у смеру ка Београду на првом колосеку а у смеру ка Суботици на другом колосеку. На овај начин се омогућава да се истовремено формирају улазни пут вожње на први колосек из смера Суботице и на други колосек из смера Београда. Обрнута варијанта, са уградњом једног граничног колосечног сигнала на први колосек гледано из смера Београда и други колосек из смера Суботице има исте ефекте, само се у том случају омогућава истовремени улаз воза из Београда на први колосек и Суботице на други колосек.

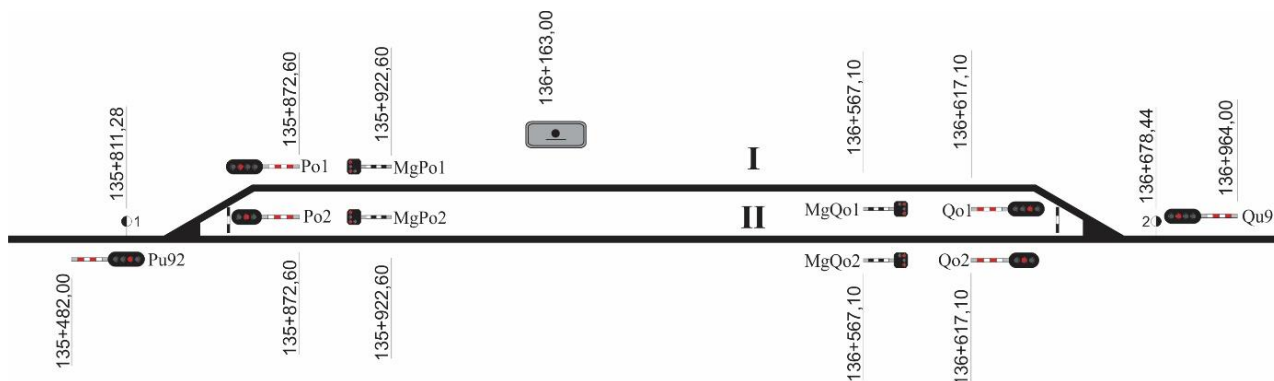
Предност овог решења лежи у малим трошковима инвестиција пошто је потребно уградити само два гранична колосечна сигнала и уз њих бројаче осовина односно изоловане саставе, као и обавити извесне модификације сигнално – сигурносног уређаја. Како би се повећала безбедност пожељно је поред граничних колосечних сигнала уградити по једну бализу од 2000 Hz мада то на ИЖС није пракса, па је чест случај де се ове бализе не уграђују ни поред излазних сигнала који се не налазе на главном пролазном колосеку. Мана овог решења лежи у малој флексибилности, како би се искористила могућност једновременог уласка возова они се морају примати на тачно одређене колосеке за тај смер, конкретно воз из Београда на други а воз из Суботице на први колосек. У случају да се воз из Београда мора примити на први колосек као рецимо у ситуацији укрштавања путничког и теретног воза тада ова варијанта не доноси никакву корист у односу на постојеће стање.



Слика 6.2 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење са два гранична колосечна сигнала

Друга варијанта би била уградња четири гранична колосечна сигнала, на сваки колосек по два за оба смера, ова варијанта је приказана на слици 6.3. Као и код претходног решења гранични колосечни сигнали се уграђују на 50 m од излазних сигнала. За разлику од претходног решења у овој варијанти је могућ истовремен пријем колосека у обе комбинације односно на први колосек из правца Београда и на други из Суботице или на други из Београда и први колосек из Суботице. Ово је посебно значајно код укрштавања путничких или путничких и теретних возова како би се омогућио несметан и безбедан улазак односно излазак путника пошто је правило да се путнички воз који први стигне прима на колосек ближе

станичној згради. Ово решење захтева нешто веће инвестиције него претходно које се огледају у уградњи четири гранична колосечна сигнала и бројача осовина (шинских струјних кола), као и модификације сигнално – сигурносног уређаја.



Слика 6.3 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење са четири гранична колосечна сигнала

Као што је већ наведено, код оба решења остаје питање безбедности када се упореди са постојећим стањем. Наиме, код ових решења је узет пут претрчавања од 50 метара, што када се дода растојање од излазног сигнала до међика од око 10 метара даје укупно растојање од 60 метара од граничног колосечног сигнала до потенцијалне конфликтне тачке. Код постојећег стања потенцијална конфликтна тачка би био улазни сигнал при чему је растојање од излазног до улазног сигнала од 350 на једној до 400 метара на другој страни станице. Чак и да дође до ситуације да оба воза прођу поред сигнала који показују с.зн. 4 „Стој“ то опет оставља довољно растојање да ауто-стоп уређај реагује и заустави воз.

Као решење за овај проблем могу се користити пружне бализе учестаности 2000 и 500 Hz. Бализа учестаности 2000 Hz би се уграђивала поред граничних колосечних сигнала а бализа учестаности 500 Hz на растојању 150 – 250 метара испред одговарајућег граничног колосечног сигнала. Подразумева се да би и поред осталих главних сигнала биле уграђене бализе 1000/2000 Hz. На овај начин би се повећала контрола брзине и самим тим повећала безбедност.

6.2.3. ВАРИЈАНТА УКРСНИЦЕ СА ШТИТНИМ КОЛОСЕЦИМА

Као трећа варијаната узето је решење са кратким слепим колосецима односно штитним колосецима на крајевима главних колосека. Ови штитни колосеци (штулц) се користе искључиво као бочна заштита односно намењени су да на њих води пут претрчавања иза излазног сигнала. Према (Janjić, 1983) пут претрчавања треба да према прописима ЈЖ у нормалним условима износи 100 – 200 m, при чему нема смисла да дужина пута претрчавања буде већа од 300 m. У извесним случајевима пут претрчавања може бити и краћи, али не краћи од 50 m. Када пут претрчавања води на штитни колосек узима се да он мора бити дуг најмање 100 m, рачунајући од излазног сигнала. Уколико је могуће штитни колосек треба градити у успону а преко шина засипати песак. С обзиром на дужину скретнице, растојање од излазног сигнала до врха штитне скретнице добија се да дужина штитног колосека од међика штитне скретнице па до краја штитног колосека мора бити минимално 30 m како би се обезбедило растојање од излазног сигнала до краја штитног колосека од 100 m.

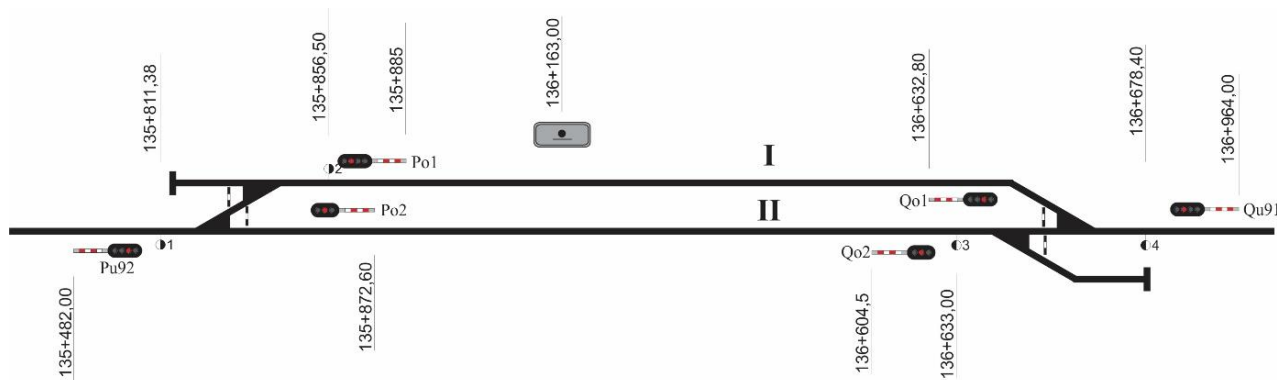
Осим у укрсницама штитни колосеци се могу користити и на распутницама, местима одвајања индустријских колосека, местима прелаза са двоколосечне на једноколосечну пругу и слично. На распутницама и местима прелаза са двоколосечне на једноколосечну пругу уградња штитних колосека се може избећи померањем заштитних сигнала на већу удаљеност

и уградњом одговарајућих бализа, док је код индустријских колосека уградња штитних колосека знатно кориснија због спречавања одбегнућа кола на отворену пругу.

У оквиру ове варијанте укрснице разматрано је неколико подваријанти, које се разликују по броју и локацији штитних колосека. Разматране су следеће варијанте: два штитна колосека на истом колосеку, два штитна колосека на различитим колосецима и четири штитна колосека, на сваком главном колосеку по један у оба смера.

Варијанта са два штитна колосека на истом колосеку је већ помињана као решење које је било примењено у укрсници Крњача. Код ове варијанте уградњом штитних колосека омогућено је краће задржавање супротног воза пред улазним сигналом код укрштавања односно краће задржавање узастопног воза код претицања пошто пут претрчавања укрсног односно првог воза води на штитни колосек, па је самим тим прва улазна скретница из супротног смера слободна. Пут вожње за наредни воз се може формирати одмах по приспећу првог воза на колосек са штитним колосецима, без чекања 90 секунди на разрешење пута претрчавања. Ово је посебно значајно код даљински управљаних станица јер се код њих пут претрчавања не може опозвати пре истека 90 секунди. Највећа мана овог решења лежи у чињеници да се оба штитна колосека налазе у продужетку истог главног колосека, па је самим тим онемогућен истовремени пријем два воза из супротних смерова. Такође у случају укрштавања путничког и теретног воза, где теретни воз долази први он се мора примити на колосек који је удаљенији од станичне зграде односно на онај главни колосек који нема штитне колосеке па се самим тим предности овог решења поништавају. Из тог разлога ова варијанта није симулирана односно није даље анализирана.

Варијанта са два штитна колосека на различитим главним колосецима и на различитим странама укрснице решава проблем једновременог уласка возова јер у овом случају постоји могућност да пут претрчавања супротних возова води на штитне колосеке. Такође, у ситуацији укрштања путничког и теретног воза пријем теретног воза на удаљенији колосек ће за разлику од претходне варијанте онемогућити једновремени улазак само у једном смеру. Варијанта укрснице Мали Иђош Поље са два штитна колосека приказана је на слици 6.4.



Слика 6.4 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење са два штитна колосека

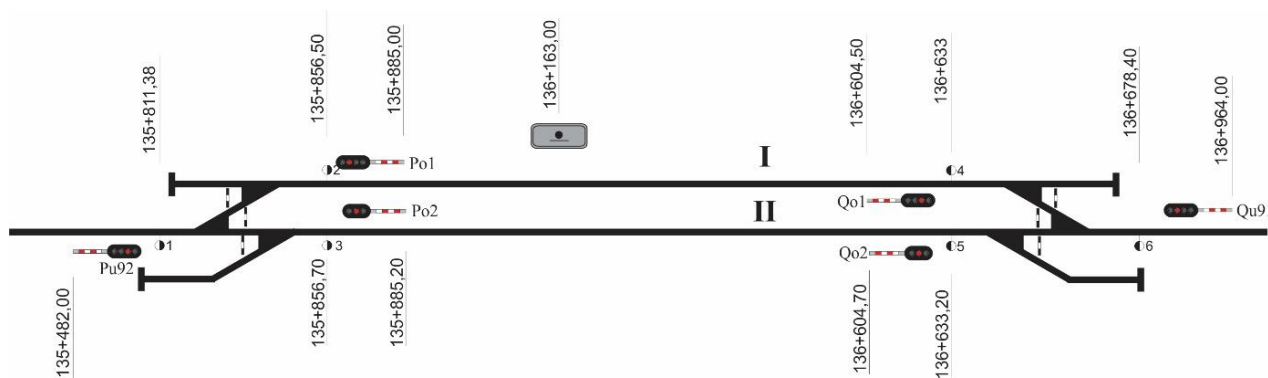
У овој варијанти је одабрано да штитни колосек на првом колосеку буде у смеру ка Београду а штитни колосек на другом колосеку у смеру ка Суботици. Обрнут распоред штитних колосека не мења драстично суштину решења. Основни принцип код овог решења је био да се инвестиције сведу на минимум односно да се постојећи елементи што више искористе. То је значило да су скретнице 1 и 2 у постојећем стању остале у истом километарском положају и да је број скретнице 2 промењен у 4. На првом колосеку је уграђена нова скретница 2 а на трећем скретница 3 при чему обе скретнице повезују штитне са главним колосеком. Због уградње нових скретница промењен је положај одређених излазних сигнала како би се максимално повећала корисна дужина колосека.

За разлику од претходне варијанте са граничним колосечним сигналимa овде је корисна дужина колосека нешто већа и износи 753,86 m за први и 737,89 m за други колосек што је

нешто дуже и у односу на постојеће стање и у односу на варијанту са граничним колосечним сигналимa.

Предност ове варијанте се огледа у могућности истовременог пријема два воза из супротних смерова уз истовремено одржавање вишег степена безбедности и нешто веће дужине колосека него код варијанти са граничним колосечним сигналимa и постојећег стања. Мана овог решења су већи трошкови инвестиција који се огледају у уградњи две скретнице и штитних колосека као и каснијим већим трошковима одржавања. Осим већих трошкова ово решење карактерише и могућност истовременог пријема возова само у одређеној комбинацији, тачније у варијанти приказаној на слици 6.4 могућ је истовремени пријем воза из смера Суботице на први колосек и из смера Београда на други колосек. Уколико се јави потреба за супротним редоследом пријема тада би пут претрчавања оба воза водио на отворену пругу и истовремени пријем возова не би био могућ. Ови недостаци се могу делимично отклонити уградњом граничних колосечних сигнала на оне колосеке који немају штитни колосек али тиме се скраћује корисна дужина колосека, повећавају инвестиције а не повећава степен безбедности приликом пријема возова до граничног колосечног сигнала.

Варијанта са четири штитна колосека, на крајевима оба колосека по један отклања неке од недостатака претходног решења. Ова варијанта приказана је на слици 6.5.



Слика 6.5 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење са четири штитна колосека

Уградња додатне две скретнице и штитна колосека у одређеној мери смањује корисну дужину оба колосека па је у овој варијанти корисна дужина оба колосека по 725,52 m што је нешто краће у односу на претходну варијанту али опет дуже у односу на обе варијанте са граничним колосечним сигналимa. Постојање четири штитна колосека омогућава несметан истовремени пријем супротних возова из оба смера и на оба колосека. Степен безбедности је такође већи у односу на претходне варијанте јер четири штитна колосека обезбеђују додатну бочну заштиту свих вожњи. Тако рецимо при уласку на први колосек из смера Београда скретнице 1 и 2 се постављају у положај за скретање за намеравану вожњу а скретница број 3 се такође поставља у скретање, али као бочна заштита.

Највећи недостатак овог решења огледа се у степену инвестиција, који је већи него у претходним варијантама. У односу на до сад изложене варијанте овде су инвестиције најкомплексније и најскупље и односе се на уградњу укупно четири скретнице, четири штитна колосека, померање излазних сигнала и значајније модификације сигнално – сигурносног уређаја. Трошкови одржавања такође нису занемарљиви што се посебно односи на скретнице, што због њиховог броја што због већег броја прекретања при формирању путева вожње у скретање. Тако рецимо ако су скретнице постављене за вожњу кроз главни пролазни колосек постављање пролазног пута вожње кроз скретање захтева прекретање свих шест скретница ако је претходни пут вожње био постављен кроз скретање односно први колосек.

6.2.4. ВАРИЈАНТА ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ

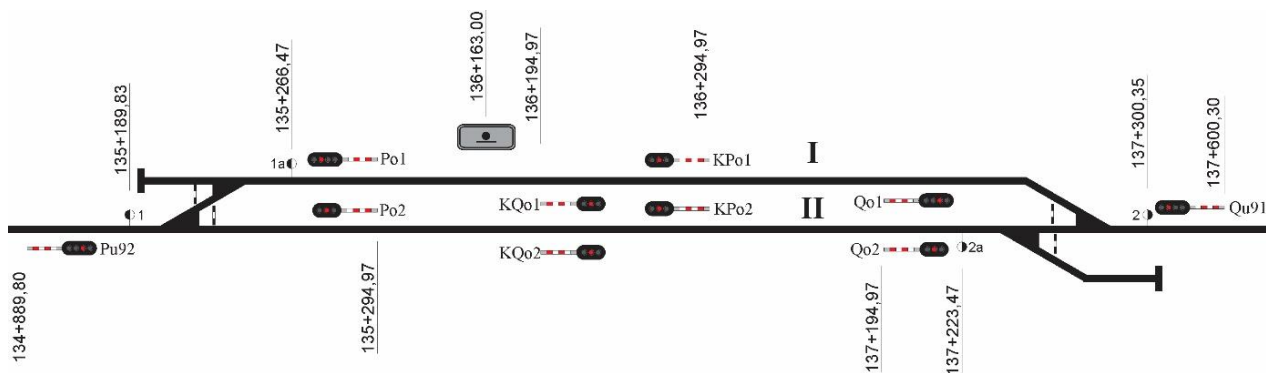
Продужене укрснице, често назване подужне укрснице или укрснице за укрштавање без заустављања су решење које на мрежи некадашњег ЈЖ није примењивано иако је за тим на неким оптерећеним једноколосечним пругама било потребе. Практично ово решење представља зачетак двоколосечне пруге јер има много већу дужину него класичне укрснице са заустављањем.

Код овог решења укрсница се не развија у ширину као код класичне укрснице већ у дужину. Та дужина зависи од низа фактора као што су брзина кретања возова, дужине возова, дужине зауставног пута и допуштена неједновременост доласка возова из једног и другог смера. Што је већа дужина и брзина возова, већа дужина зауставног пута и што се допушта већа разлика у времену пристизања возова у укрсницу из једног и другог смера, то укрсница мора имати већу дужину.

На прузи (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia) зауставни пут износи 700 m а максимална дужина воза 590 m (дужина станичних колосека у станици Бешка). Са друге стране најкраћа дужина просторног одсека на прузи опремљеној аутоматским пружним блоком износи 1000 m (950 m ако посматрамо случај са дозвољеним скраћењем од 5%). Самим тим из разлога безбедности нужно је да оваква укрсница има бар два до три просторна одсека. Тако да се као решење са најмањом потребном дужином укрснице намеће решење у коме је укрсница дужине минимум два просторна одсека односно око 2000 m.

Као варијантна решења продужене укрснице појављују се продужена укрсница без попречних веза и продужена укрсница са попречним везама. Код укрснице са попречним везама те везе могу бити просте када су остварене само са две просте скретнице и двојне када су остварене са четири просте скретнице или четири просте скретнице и укрштајем. Продужена укрсница без попречних веза представља знатно простије решење и у суштини представља продужење већ представљеног решења укрснице са два штитна колосека. Оваква укрсница би у зависно од дужине имала једно или више блок места односно просторних сигнала. Технички гледано, пошто прописи на ИЖС не препознају просторне сигнале унутар станица они би се заправо сматрали граничним колосечним сигналимa (и били обележени као такви, додавањем слова К испред ознаке излазног сигнала испред кога се налазе), али би имали изглед и функцију просторних сигнала. У суштини, могуће је уградити и стандардне граничне колосечне сигнале али само у условима добре даљине видљивости излазног сигнала односно могућности да се од граничног колосечног сигнала види излазни сигнал. Разлог лежи у чињеници да гранични колосечни сигнал не може да предсигналише сигналне знаке наредног главног сигнала па је самим тим потребно обезбедити даљину видљивости излазног сигнала једнаку дужини зауставног пута. Пошто је то у пракси често немогуће ово решење се не препоручује.

Иако је могуће да се продужена укрсница састоји од неколико просторних одсека, за укрсницу Мали Иђош Поље разматрано је решење са два просторна одсека. Разлог лежи у чињеници да је ово са једне стране најпростије решење и најмеродавније за поређење са осталим варијантним решењима а са друге стране што више одсека продужена укрсница има то она више личи на двоколосечну пругу него на укрсницу. Решење које је овде разматрано чине два блок одсека чије границе на једној страни представљају излазни сигнали а на другој страни просторни сигнали. На крајевима колосека такође постоје по један штитни колосек, по један за оба смера. Ово решење је приказано на слици 6.6.

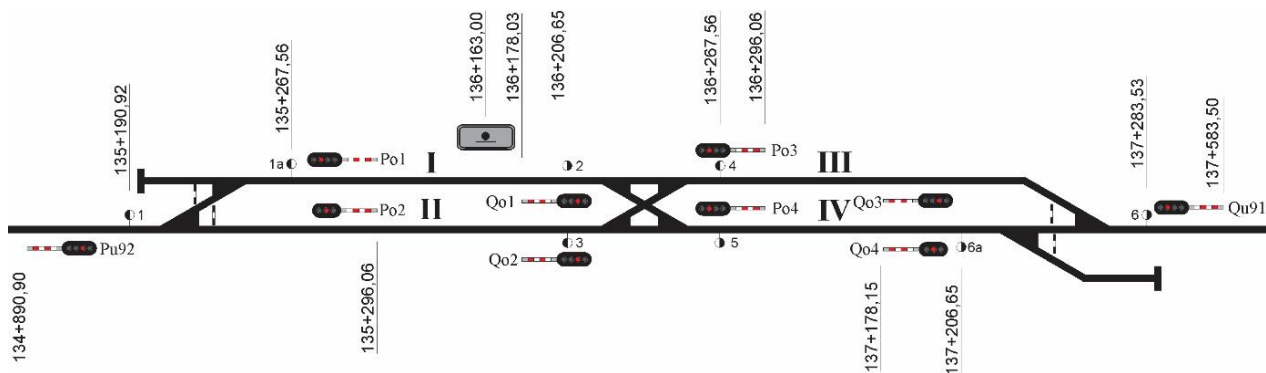


Слика 6.6 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење продужене укрснице без попречних веза

Ово решење доноси значајније промене и инвестиције у односу на претходно изложена, не само због изградње нових капацитета већ и због потребе за померањем постојећих елемената. Наиме, продужавање станице у односу на постојеће стање би се вршило ка суседним међустаничним растојањима, па би продужавање довело до осетно различите дужине међустаничних растојања између станица Ловћенац, Бачка Топола и укрснице Мали Иђош Поље. Пошто су међустанична растојања у тренутном стању приближно једнака, свака озбиљнија промена дужине би смањила упоредивост резултата симулације различитих варијантних решења. Зато је при модификацији укрснице примарни критеријум био да међустанична растојања ка суседним станицама остану приближно једнаке дужине. Због тога је први критеријум био да оса постојећег решења станице у km 136+244,97 буде и оса продужене укрснице. У односу на ту осу су уграђени просторни сигнали на растојању од 50 метара на обе стране, а у односу на њих одговарајући излазни сигнали. Оба излазна сигнала на једној и другој страни су уграђени у истом километарском положају, при чему је меродавна била километража оног излазног сигнала иза кога се налази штитни колосек. Тај сигнал је уграђен на минималном могућем растојању од врха штитне скретнице односно на 28,5 m. Сигнал на суседном колосеку ће се притом налазити на растојању од 123 m од тачке коју штити односно изолованог састава иза скретнице број 1 чиме се повећава безбедност. Сличан принцип је коришћен и на другој страни станице. Скретнице су затим уграђене у односу на излазне сигнале поштујући већ наведени принцип а улазни сигнали на 300 метара од прве улазне скретнице.

Пошто су ове промене довеле и до скраћења међустаничних растојања, самим тим су и дужине или број просторних одсека морале бити промењене. Како би смањење броја блок одсека довело до смањења капацитета деонице односно смањења броја узастопних возова који се могу наћи на деоници тај варијанта није разматрана већ је усвојено смањење дужине блок одсека. Код смањења дужине је примарни критеријум био да дужина просторних одсека не буде краћа од 1000 m. Исти критеријум је примењен и ка Ловћенцу и ка Бачкој Тополи, при чему су на оба међустанична одстојања за први и последњи блок одсек усвојена растојања од 1100 m. Преостали одсеци ка Ловћенцу су дужине 1850 m а ка Бачкој Тополи 1650 m што је приближно једнако тренутним дужинама просторних одсека. На овај начин је задржана приближно иста пропусна моћ међустаничног растојања уз мала смањења дужине просторних одсека.

Када је у питању варијанта са попречним везама она има доста сличности са варијантом без попречних веза као што су метод одређивања осе станице, прорачун дужине колосека и блок одсека као и места уградње сигнала и скретница. Иако је поменуто неколико подваријанти решења са колосечним везама, овде је разматрана варијанта са двоструком колосечном везом и укрштајем. Двострука колосечна веза је усвојена због максималне флексибилности у раду а верзија са укрштајем због скраћења дужине скретничког подручја у средишњем делу станице. Ова варијанта је приказана на слици 6.7.



Слика 6.7 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење продужене укрснице са попречним везама

Овде је као оса станице узета средина укрштаја, на њега се настављају припадајуће скретнице а главни сигнали који их штите на минималном растојању испред њих. У овом случају сигнали имају могућност сигнаписања вожње ограниченом брзином у скретање па се не могу посматрати стриктно као просторни сигнали већ као гранични колосечни сигнали. Пошто у овој варијанти захваљујући скретницама имамо четири различита колосека, самим тим сви сигнали на крајевима тих колосека имају ознаку као излазни сигнали. Излазни сигнали се уграђују на 1000 метара у односу на одговарајуће граничне колосечне сигнале. Прве и последње скретнице као и улазни сигнали на обе стране се уграђују по истом принципу као и у претходној варијанти.

Просторни сигнали на међустаничним растојањима ка Ловћенцу и Бачкој Тополи се уграђују по истом принципу као и у претходној варијанти. Пошто су и у варијанти са и без попречних веза међустанична растојања ка Ловћенцу и Бачкој Тополи скоро иста, и локације просторних сигнала ће бити скоро исте. За први и последњи блок одсек су усвојена растојања од 1100 m. Преостали одсеци ка Ловћенцу су дужине 1850 m а ка Бачкој Тополи 1650 m што је и у овом случају приближно једнако тренутним дужинама просторних одсека.

Предности обе варијанте продужене укрснице су могућност укрштавања без заустављања и то не само појединачних возова већ, у теорији и снопова возова. У пракси је то тешко изводљиво јер би се сви возови у снопу морали кретати „на жуто“ што је неповољно са експлоатационог становишта. Са друге стране дужина укрснице омогућава већу неједновременост времена долазака возова који се укрштавају без заустављања и та неједновременост се повећава повећањем дужине укрснице. Варијанта продужене укрснице са два блок одсека омогућава укрштавање до четири воза, с тим што код варијанте без попречних веза када се укрштавају четири воза онда два морају саобраћати у једном смеру а два у супротном. Код продужене укрснице са попречним везама овај услов није неопходан.

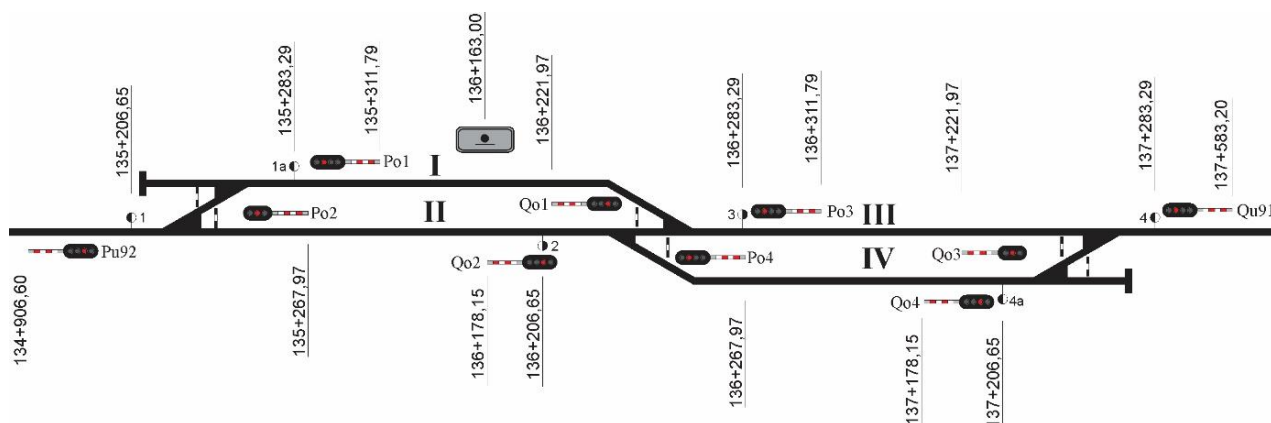
Мана обе варијанте се огледа првенствено у трошковима изградње, а затим и у трошковима одржавања. Ове варијанте у најједноставнијем случају са два блок одсека практично захтевају дуплирање дужине укрснице, уз додатак већег броја скретница код варијанте са попречним везама. Ово може бити и предност на неким пругама где због теренских прилика није могуће развијање укрсница у ширину. Такође мана варијанте без попречних веза је и мања флексибилност у односу на варијанту са попречним везама код које се истовремено може вршити и укрштавање и претицање возова.

6.2.5. ВАРИЈАНТА СМАКНУТЕ УКРСНИЦЕ

Варијантно решење смакнуте укрснице представља комбинацију класичне укрснице са три колосека и продужене укрснице. Померањем једног од колосека тако да почетак једног колосека буде у непосредној близини краја другог добијамо укрсницу која по функционалности има особине класичне укрснице са три колосека а по дужини је блиска продуженој укрсници. Код ове варијанте главни колосеци се морају налазити са супротне

стране главног пролазног колосека, у супротном би то била продужена укрсница. Чест је случај да се ова варијанта у литератури посматра као подужна односно продужена укрсница, првенствено због своје дужине. И код овог варијантног решења може се вршити укрштавање без заустављања само што у том случају оба воза морају улазити у скретање, било на почетку било на средини укрснице.

Када је у питању укрсница Мали Иђош Поље одабрана варијанта је приказана на слици 6.8. Овде је одабрано решење да први колосек буде са леве стране а четврти са десне стране у односу на главни пролазни колосек али се суштински ништа не мења и да је први колосек са леве а четврти са десне стране. Колосеци 1 и 4 су на крајевима ка отвореној прузи опремљени штитним колосецима и излазним сигнализима, крајеви колосека 2 ка отвореној прузи су опремљени излазним сигнализима, а крајеви свих колосека гледано ка оси укрснице су опремљени граничним колосечним сигнализима. Пошто у овој варијанти као и у претходној постоје четири засебна колосека ови гранични колосечни сигнали носе ознаке као излазни сигнали ради лакше оријентације.



Слика 6.8 Шематски приказ укрснице Мали Иђош Поље, решење смакнуте укрснице

За полазну тачку односно осу нове укрснице од које је даље развијана је као и код продужене укрснице узета оса укрснице у постојећем стању. И у овом случају циљ је био да нова укрсница буде приближно на средини међустаничног растојања Ловћенац – Бачка Топола. У односу на осу се уграђују скретнице 2 и 3 на минималном могућем растојању а у односу на њих гранични колосечни сигнали Qo1 и Po3 на удаљености од 28,5 m од врха а Qo2 и Po4 на 12 m од међика одговарајуће скретнице. И овде је узет услов да удаљеност између граничних колосечних и излазних сигнала у истом смеру мора бити минимално 1000 m. У овој варијанти то минимално растојање је између сигнала Po4 и Po2 у једном смеру и Qo2 и Qo4 у другом смеру. На основу стационаже сигнала Po2 се уграђује скретница 1, затим 1a и на крају сигнал Po1. Са друге стране сигнал Qo4 се уграђује на 1000 m у односу на сигнал Qo2, у односу на њега се уграђује скретница 4, у односу на њу 4a а затим излазни сигнал Qo4. На овај начин је удаљеност између сигнала сигнала Po3 и Po1 у једном смеру и Qo1 и Qo3 у другом смеру такође 1000 m. При овим растојањима корисна дужина свих колосека је 916,18 m што је сасвим довољно за пријем најдужих возова.

Предност овог решења је као и код претходна два у могућности укрштавања без заустављања уз дужи интервал неједновремености доласка у односу на варијанте са штитним колосецима и граничним колосечним сигнализима. Интервал неједновремености се још више повећава повећањем дужине колосека у укрсници. Као и код претходна два решења у теорији је могуће укрштавати и снопове возова без заустављања мада је то у пракси тешко изводљиво. Такође ово решење поседује већу флексибилност у односу на решење без попречних веза али нешто мању него решење са попречним везама.

Мана ове варијанте као и код варијанти продужене укрснице се огледа такође у трошковима изградње, а затим и у трошковима одржавања у односу на класичну укрсницу са

два колосека. Ако посматрамо класичну укрсницу са три колосека разлика у трошковима је осетно мања. Такође, код укрштавања без заустављања, оба воза морају пролазити кроз средишњи део укрснице у скретање, тачније у једном смеру кроз први и трећи а у другом кроз други и четврти колосек. Због положаја скретница 2 и 3 ово решење одликује мања флексибилност због немогућности преласка возова са првог на четврти колосек и обратно.

6.3. СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛИ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

За све напред изложене варијанте урађени су одговарајући модели Петри мрежа. Основ свих модела чини модел развијан у (*Jeremić et al., 2021*) који је надограђен и адаптиран за различита варијантна решења укрсница. Основни елементи свих модела односно модули као што су блок одсек, скретница и станични колосек су остали по структури исти. Нешто мање разлике су претрпели процесори релејног уређаја у складу са новим могућностима за формирање пута вожње и путевима претрчавања, док је највеће измене претрпео диспечерски подсистем. Општа структура и основни принцип управљања саобраћајем и путевима вожње је задржана и врши се помоћу токена „komanda“ чија синтакса је остала непромењена. Измене су биле неопходне у подсистему за промену улазног пута вожње као и у подсистему за спречавање загушења. У претходном моделу ти подсистеми су били донекле упрошћени јер су у њему симулиране варијанте укрсница са само два колосека што је значајно поједностављивало структуру ових подсистема. Подсистем за спречавање загушења је такође морао да претрпи измене јер је повећање броја колосека сразмерно повећало број могућих путева вожње и њихових комбинација које могу довести до загушења. У суштини нови диспечерски подсистем је универзалнији у односу на претходни модел јер омогућава моделирање станица са више од два колосека, при чему се станице различитих величина моделирају уз знатно мање измене него у претходном моделу.

6.3.1. СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ПОСТОЈЕЋЕГ СТАЊА

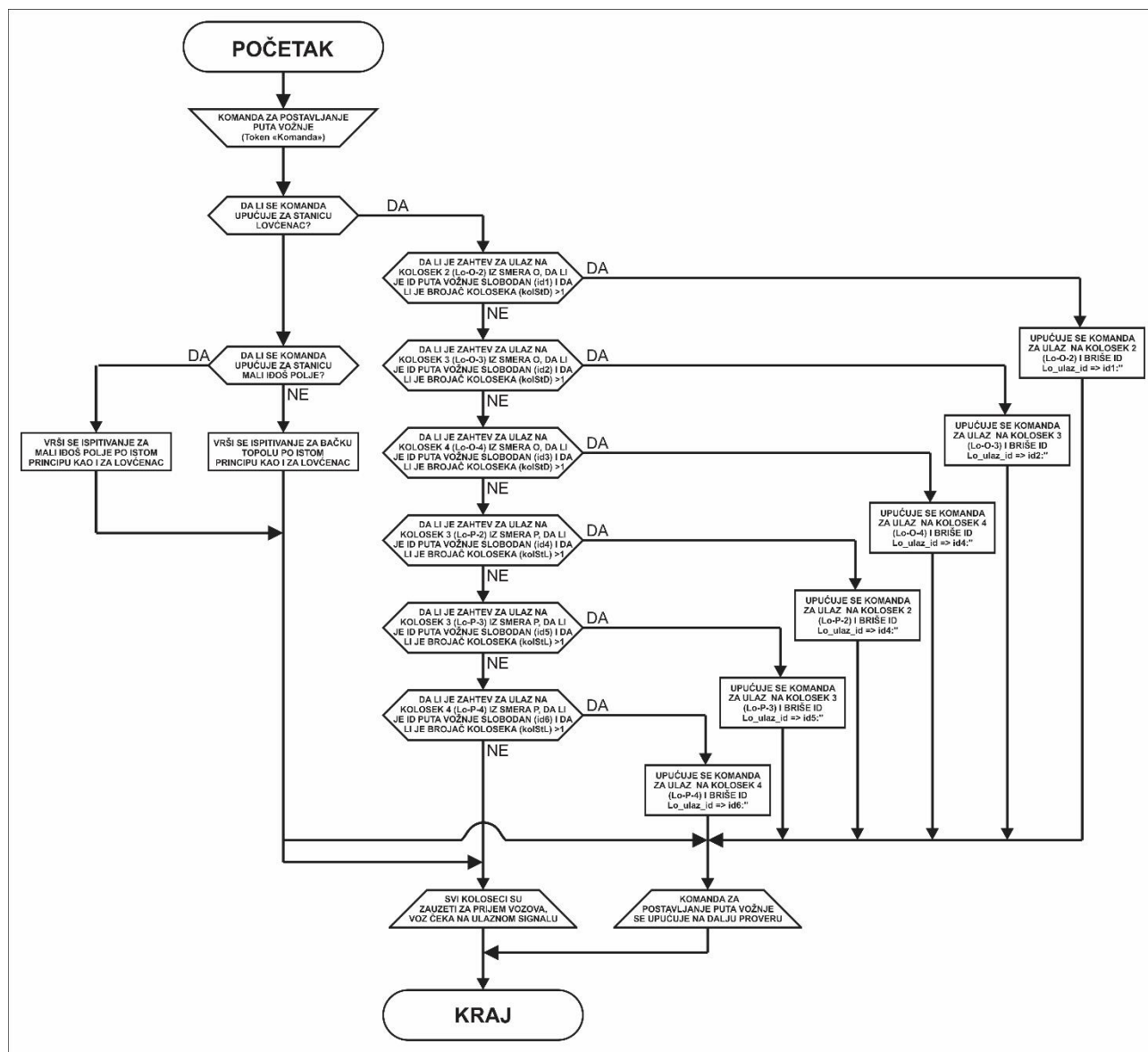
У постојећем стању су извршене највеће измене у структури диспечерског система, које су примењене и на остала варијантна решења. Као и код развоја варијантних решења која су била надоградња на основни модел тако је и диспечерски систем осталих варијантних решења надоградња диспечерског система основног модела. Иако је у основном моделу укрсница Мали Иђош Поље са само два колосека измене су биле неопходне због суседних станица Ловћенац и Бачка Топола. Ове станице су приказане донекле упрошћено, само са главним колосецима за пријем и отпрему возова. У станици Ловћенац су уместо четири приказана три главна колосека и изостављен први, магацински колосек. У станици Бачка Топола су приказана 3 од шест колосека пошто су колосеци 1, 5 и 6 манипулативни. Такође су изостављење и скретнице које воде на ове колосеке пошто нема потребе за њиховим коришћењем, што се односи и на скретнице уграђене на овим споредним колосецима, а које се користе за бочну заштиту.

Процесори станичног сигнално – сигурносног уређаја такође су претрпели одређене измене условљене повећањем броја колосека у станицама. Измене су се односиле на повећање броја могућих путева вожњи као и елемената (сигнала, скретница, колосечних одсека) којима се управља. Структура самог процесора као и принцип рада је остао исти. Слично је и са процесором пружног сигнално – сигурносног уређаја, измене су се односиле на број блок одсека и просторних сигнала којима се управља. Главне измене су вршене на диспечерском подсистему и то углавном у делу за промену улазног пута вожње и детекцију и отклањање загушења.

6.3.1.1. ФОРМИРАЊЕ УЛАЗНОГ ПУТА ВОЖЊЕ

Као и у претходном моделу формирање пута вожње се врши на основу токена „komanda“ који има статус „захтев“. И у овом случају токен *komanda* прво долази до процесора *Kom_ulaz_zahrt* чији алгоритам је приказан на слици 6.9. И у овом случају је први корак је

провера из које станице потиче команда а затим се упоређивањем *id* команде утврђује да ли је она расположива. Осим расположивости команде овде је убачена и проверка расположивог капацитета станице. Наиме, пошто у овом моделу станице имају више колосека самим тим постоји могућност пријема више возова који саобраћају у истом смеру. Како би се избегла ситуација да се на све колосеке приме возови истог смера у тренутку када се ка станици креће воз из супротног смера, провером капацитета се утврђује да ли ће формирање одређеног улазног пута вожње довести до загушења. Уколико неку команду није могуће реализовати односно формирати одговарајући улазни пут вожње, тада се та команда шаље у део диспечерског подсистема који мења улазне колосеке у случају заузећа. По резервисању одговарајућег пута вожње токен *komanda* се прослеђује на следећу проверу.



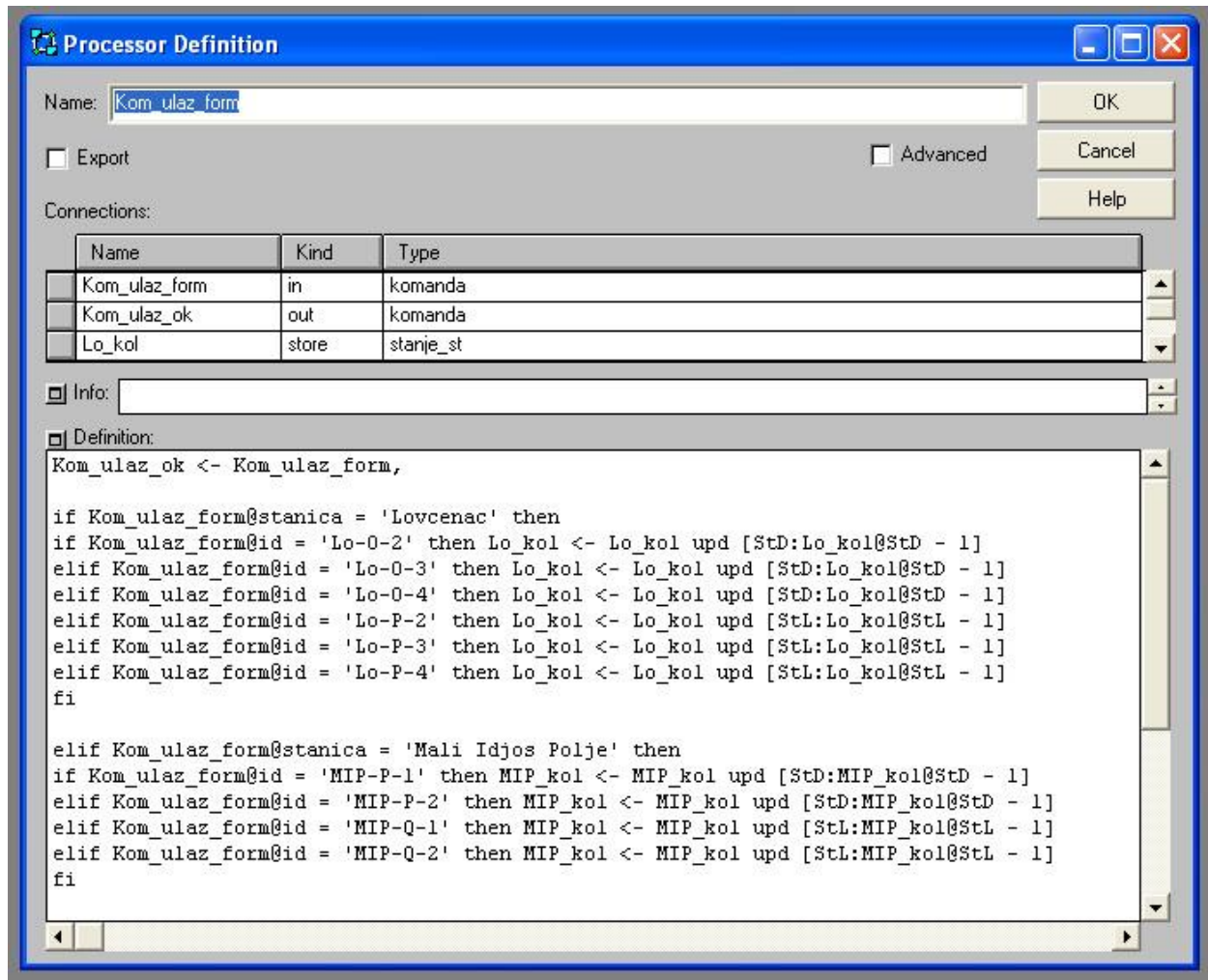
Слика 6.9 Алгоритам процесора *Kom_ulaz_zagt* у новом моделу

Следећи процесор је као и у претходном моделу *Kom_ulaz_zagt_od* и његова дефиниција је слична као и у претходном моделу. Главна улога овог процесора је промена улазног колосека у ситуацији када предстоји укрштавање у станици. За разлику од претходног модела овде се врши више провера пошто има и више могућности за формирање путева вожње, док је сам принцип провере преко стања приволе остао исти. Уколико се утврди да предстоји укрштавање већ узета команда за улазни пут вожње на пролазни колосек враћа у складиште станице а токен *komanda* се шаље на почетак односно на процесор *Kom_ulaz_zagt* са измењеним улазним колосеком односно захтевом за улаз у скретање. Процесор

Kom_ulaz_ziht_p1 је у овом моделу уклоњен пошто је његове функције преузео део диспечерског система за промену улазног колосека приликом заузећа колосека. По проласку оба процесора команда за формирање улазног пута вожње се шаље на излаз из диспечерског подсистема.

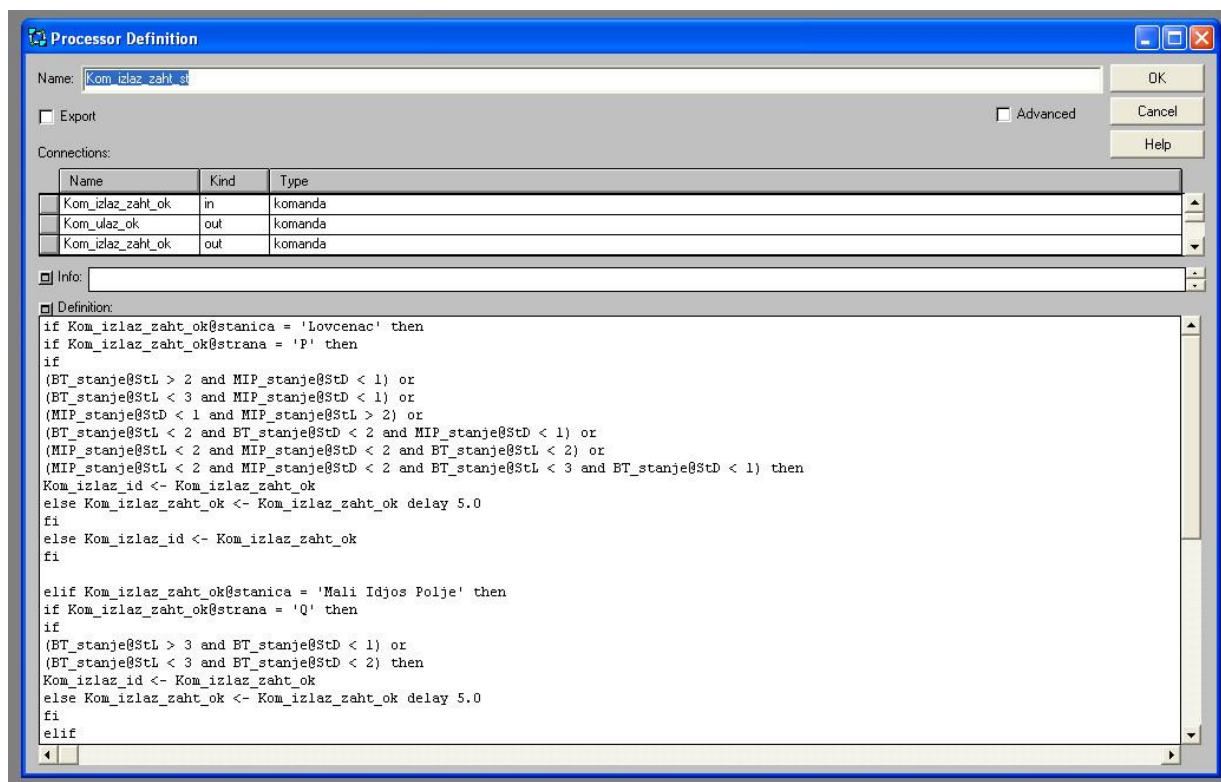
6.3.1.2. ФОРМИРАЊЕ ИЗЛАЗНОГ ПУТА ВОЖЊЕ

Као и у претходном моделу команда за излазни пут вожње са неког колосека се активира успешним формирањем улазног пута вожње на тај колосек. Токен *komanda* прво долази до процесора *Kom_ulaz_form* чија дефиниција је приказана на слици 6.10. Овај процесор је повезан са бројачима капацитета станице и смањује слободан капацитет за један и, посебно по смеровима како би се спречила загушења.



Слика 6.10 Дефиниција процесора *Kom_ulaz_form*

Токен *komanda* затим долази до процесора *Kom_ulaz_ok* чија дефиниција је слична као у претходном моделу. Код овог процесора први корак је провера из које станице потиче команда, а затим се на основу успешно формираног улазног пута вожње и расположивости команде за излаз формира команда за излазни пут вожње. По успешном избору команде за излаз токен одлази на процесор *Kom_izlaz_zahtev_st* чија је дефиниција приказана на слици 6.11.



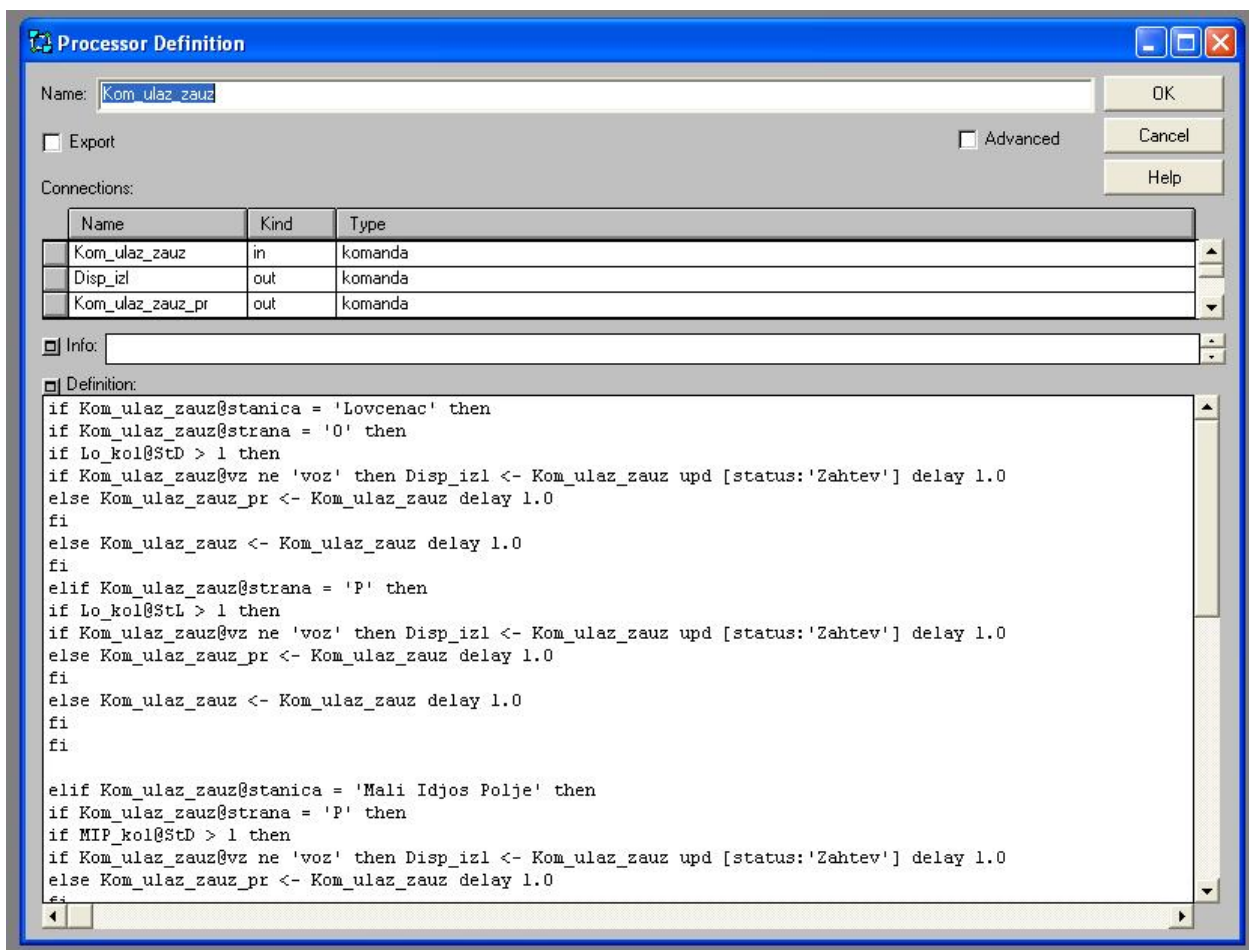
Слика 6.11 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_zah_tev_st* у новом моделу

Овде су због већег броја колосека по станицама и провере детаљније па се осим капацитета појединачних станица проверава и комбинација капацитета више суседних станица. Сложеност саме провере и број комбинација зависе од жељеног капацитета деонице, што је већи број испитаних комбинација, веће је искоришћење колосечних капацитета. Последњи процесор *Kom_izlaz_azur_id* врши ажурирање складишта команди тиме што из складишта брише *id* ознаку команде која је узета. На самом токenu се не врши никаква измена већ се он по ажурирању прослеђује у систем вишег реда.

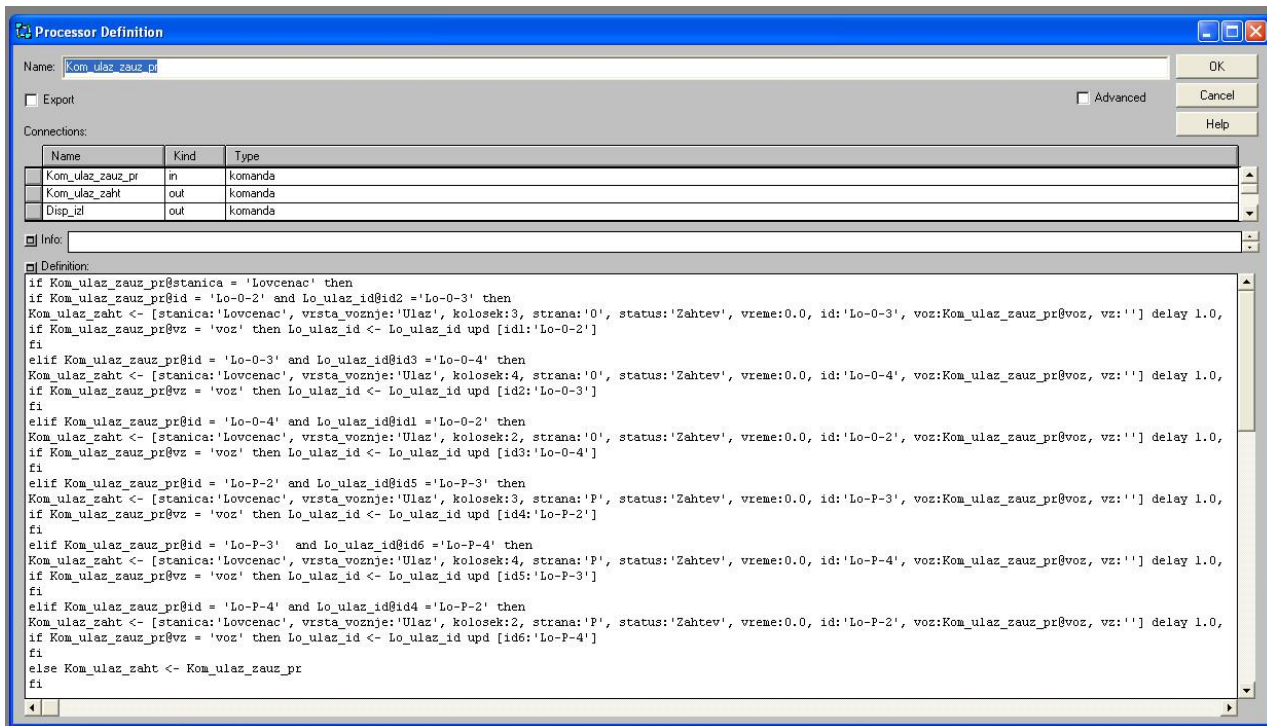
6.3.1.3. ПРОМЕНА УЛАЗНИХ ПУТЕВА ВОЖЊИ

Део диспечерског подсистема који је задужен за решавање проблема путева вожњи који се нису могли формирати је у односу на претходни модел претрпео значајније измене. Ове измене су узроковане постојањем већег броја колосека а самим тим и већих могућности за формирање пута вожње. Први процесор на који token наилази је *Kom_ulaz_zauz* чија дефиниција је приказан на слици 6.12. За разлику од претходног модела овај процесор разврстава команде по врсти заузећа, при чему се првенствено посматра заузеће колосека. Уколико је заузеће колосека праћено и заузећем бар једне од скретница тада се сматра да је то краће заузеће и да га ствара воз који излази или улази на колосек. Пошто је заузеће краће самим тим се очекује да у неком краћем временском интервалу колосек буде ослобођен за улазак наредног воза па се команда за улаз на тај колосек само понавља, односно директно прослеђује на излаз из диспечерског подсистема уз одређено краће чекање. Уколико уз заузеће колосека не постоји и заузеће скретница, тада се сматра да је колосек заузет возом који се не креће, чије стајање може дуже трајати, и да се тај колосек неће у краћем временском интервалу ослободити. Тада се команда за улаз шаље на процесор *Kom_ulaz_zauz_pr* чија дефиниција је приказана на слици 6.13. Овај процесор детаљније проверава и остале путеве вожње по смеру за ту станицу и уколико су слободни захтева улаз на други колосек односно команду са новим захтевом за улазни пут вожње шаље у део подсистема за формирање улазног пута вожње. У случају да су сви остали путеви вожње заузети тада се добијена команда прослеђује у систем вишег реда односно воз се задржава на улазном сигналу станице све док се бар један од

колосека у станици не ослободи. Улога овог дела подсистема је да смањи трајање чекања а истовремено спречи појаву загушења у станици.



Слика 6.12 Дефиниција процесора *Kom_ulaz_zauz* у новом моделу



Слика 6.13 Дефиниција процесора *Kom_ulaz_zauz_pr* у новом моделу

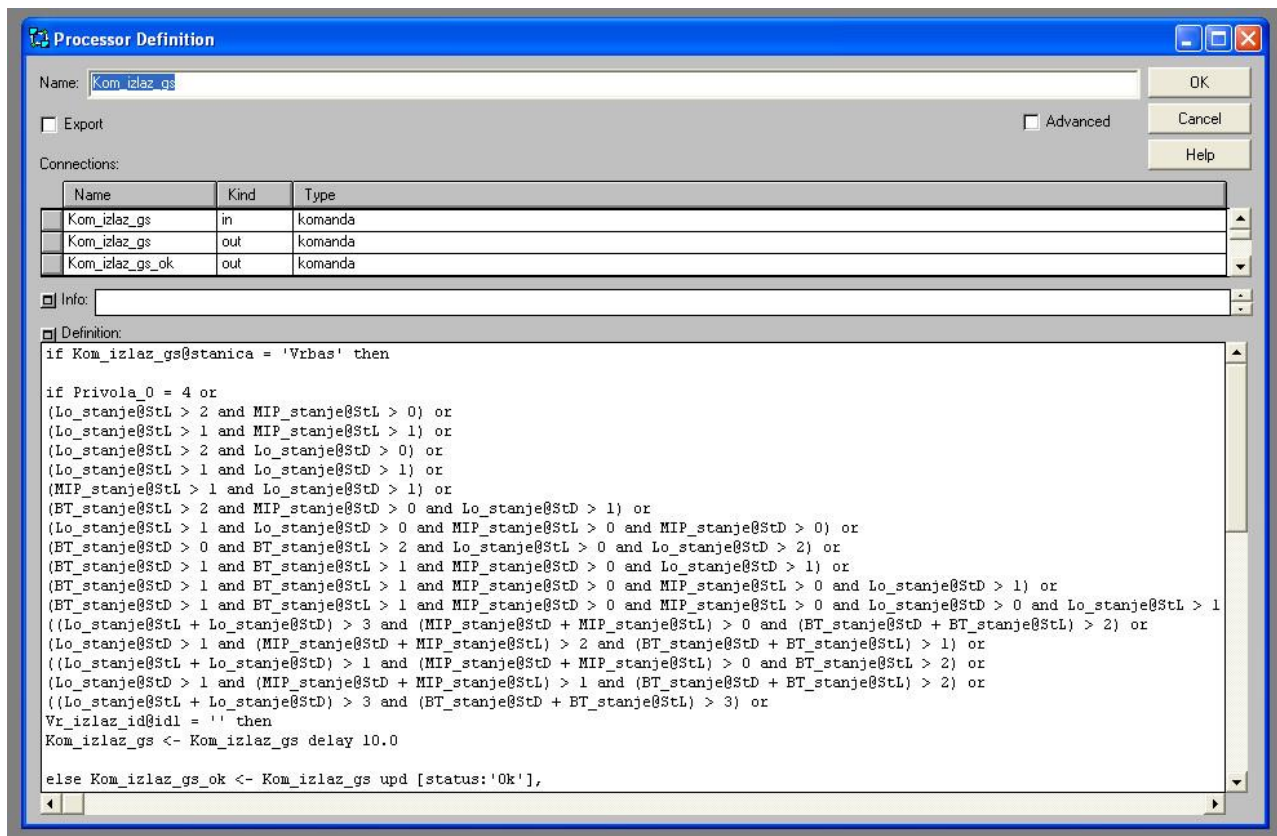
6.3.1.4. ОСЛОБАЂАЊЕ ПУТЕВА ВОЖЊЕ И УЛАЗ НА МОДЕЛИРАНУ ДЕОНИЦУ

Ослобађање путева вожње се врши на сличан начин као и у претходно описаном моделу. Главна разлика је што у овом случају постоје две врсте бројача капацитета станице који су независно повезани са улазним односно излазним вожњама.

Процесор ослобађања улазног пута вожње је повезан са складиштима капацитета станице. Ових складишта није било у претходном моделу јер тамо нису постојале станице са више од два колосека, самим тим није ни узимана у обзир варијанта промене улазног колосека за узастопне возове. По структури су исти као бројачи капацитета који се користе за излазне вожње пошто је тип података исти тј. *stanje_st*. Тип *stanje_st* за оба бројача садржи податке о расположивом броју колосека у станици по смеровима (*St_L* и *St_D*). Главна разлика је што овај бројач евидентира само возове који се налазе у станици. Сваки успешно формиран улазни пут вожње смањује вредност овог бројача за 1 а сваки ослобођен односно разрешен улазни пут вожње повећава вредност бројача за 1. Почетно стање бројача је једнако укупном броју колосека расположивих за формирање улазних путева вожње, у оба смера.

Код бројача стања за излазне вожње се посматрају и возови који се налазе у тој станици, возови који се крећу ка тој станици и возови који имају формиран излазни пут вожње из суседне станице ка тој станици. За сваку станицу се у складишту дефинише максимални капацитет по смеровима и сваким формирањем излазног пута вожње из суседне станице ка тој станици се капацитет смањује за 1. Изласком воза из посматране станице односно ослобађањем команде за излазни пут вожње се и бројач капацитета станице повећава за 1. За оба бројача важи да је усклађеност смањивања и повећавања бројача капацитета је таква да не може бити мањи од нуле, и већи од максимално предвиђеног и на почетку симулације дефинисаног капацитета.

Улаз на моделирану деоницу се као и у претходном моделу регулише посебним делом кога чине два процесора, један који врши проверу капацитета станица и други који врши ажурирање бројача капацитета станица, за оба процесора то су бројачи за излазне вожње. Процесор *Kom_izlaz_gs* је задужен за проверу капацитета и приказан је на слици 6.14.



Слика 6.14 Дефиниција процесора *Kom_izlaz_gs* у новом моделу

Принцип рада је исти као и у претходном моделу, врши се провера капацитета станица анализирањем стања њихових бројача. Главна разлика се односи на број комбинација које се проверавају што је условљено већим капацитетом станица. Провера се врши тако што се испитује свака од датих комбинација капацитета једне или суседних станица и ако је било која комбинација капацитета испуњена тада се команда за улаз на моделирану деоницу задржава и захтев понавља после 10 секунди. Број комбинација је могуће и смањити како би се олакшало моделирање али то повлачи и смањење капацитета целе деонице а у неким случајевима и повећава могућност појаве загушења (*deadlock*). У ситуацији када је као у овом случају број службених места мањи тада се провера може вршити централизовано помоћу једног процесора док је за већи број службених места погоднија варијантра са децентрализованим процесорима који проверавају одређене мање деонице а затим се централно проверава укупан капацитет. На овај начин се обогућава лакша контрола рада и проналажење грешака у моделу. По извршеној провери уколико постоји довољан капацитет команда се шаље на процерор *Kom_izlaz_gs_ok* који је даље прослеђује у главни систем истовремено повећавајући бројач капацитета прве станице од почетка деонице за један односно смањујући капацитет станице за један воз.

6.3.2. МОДЕЛИ ВАРИЈАНТИ СА ГРАНИЧНИМ КОЛОСЕЧНИМ СИГНАЛИМА И ШТИТНИМ КОЛОСЕЦИМА

Код свих варијанти са граничним колосечним сигналимa и штитним колосецима није било драстичних модификација у односу на основни модел. Диспечерски систем је у већини делова и аспеката остао исти јер је у све четири варијанте број колосека односно расположивих путева вожње остао исти. Код варијанти са два гранична колосечна сигнала и два штитна колосека извршене су одређене модификације дела за формирање улазних путева вожње тако што су ако предстоји укрштавање улазни путеви вожње формирани на оне колосеке на којима постоји гранични колосечни сигнал односно штитни колосек, уколико је то могуће, како би се максимално искористиле могућности укрснице за једновремени пријем два воза. Код варијанти са четири гранична колосечна сигнала односно четири штитна колосека за тим није

било потребе пошто је код ових варијанти једновремени пријем возова могућ на оба колосека из оба смера.

За разлику од диспечерског подсистема највеће измене је претрпео процесор сигнално – сигурносног уређаја укрснице Мали Иђош Поље. У варијанти са два и четири гранична колосечна сигнала у ситуацијама када предстоји укрштавање, што се проверавало по стању приволе ка суседним станицама, пут вожње је формиран до граничних колосечних сигнала, самим тим у пут претрчавања нису улазиле скретнице 1 односно 2. Код варијанти са штитним колосецима приликом уласка на први колосек пут претрчавања је увек водио на штитне колосеке док је при уласку воза на други колосек пут претрчавања водио на штитне колосеке само ако предстоји укрштавање, што се и у овом случају утврђивало по стању приволе. То је учињено како би се смањила непотребна прекретања скретница које воде на штитне колосеке. Код варијанти са штитним колосецима такође је дефинисано да се приликом формирања улазног или излазног пута вожње скретнице које воде на штитне колосеке прекрећу у положај бочне заштите за одговарајући пут вожње, осим у случају да су већ блокиране у путу вожње.

6.3.3. МОДЕЛ ВАРИЈАНТЕ ПРОДУЖЕНЕ УКРСНИЦЕ

Модел продужене укрснице је у односу на основни претрпео значајније измене, што се посебно односи на варијанту продужене укрснице са попречним везама. Измене су извршене како у диспечерском подсистему тако и самом систему односно процесору сигнално – сигурносног уређаја укрснице Мали Иђош Поље. Код варијанте са попречним везама измене су биле нешто веће у односу на варијанту без попречних веза, што је узроковано већим бројем расположивих путева вожње као и већим зависностима између путева вожње у циљу спречавања загушења у самој укрсници.

Код варијанте без попречних веза прва и једноставнија измена је била на самом процесору сигнално – сигурносног уређаја. Овде се осим броја могућих вожњи повећала и врста вожњи увођењем засебног пута вожње од граничног колосечног (просторног) сигнала па до излазног сигнала. Овај пут вожње се постављао после успешног постављања улазног пута вожње на први део колосека односно у ситуацији када је на првом делу колосека већ стајао воз који треба да настави вожњу на други део колосека.

Измене у диспечерском систему су нешто сложеније. Сама структура диспечерског система у односу на основни модел није драстично мењана али је додат посебан део који регулише кретање унутар укрснице Мали Иђош Поље. Структура му је слична као део за формирање улазних путева вожње осим што је упрошћен за управљање једном станицом (укрсницом) и мањим бројем путева вожње. Команду за формирање тог „средишњег“ пута вожње диспечерски систем добија од процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја по успешном формирању улазног пута вожње на одговарајући колосек. Провера слободности пута вожње се врши на исти начин као и за улазне путеве вожње, само што у овом случају није могуће променити улазни колосек јер је та средишња вожња увек наставак улазне вожње. Такође овај део подсистема врши ажурирање бројача капацитета станице тако што смањује капацитет за 1. У суштини укрсница без попречних веза има експлоатационе карактеристике као деоница двоколосечне пруге. Самим тим би се сличан принцип формирања пута вожње могао применити и у ситуацијама када би се продужена укрсница састојала од више блок одсека где би сваки успешно формиран пут вожње истовремено слао захтев за формирање наредног пута вожње. Са друге стране у ситуацијама када постоји више блок одсека тада укрсница више поприма одлике двоколосечне пруге при чему се један и други крај укрснице могу посматрати као места прелаза са двоколосечне на једноколосечну пругу. У том случају практичније решење је да се путеви вожње не формирају већ да просторни сигнали редовно показују „слободно“ у једном смеру а да њихов положај регулише процесор пружног сигнално – сигурносног уређаја на начин као што је већ приказано, уз постојање приволе за сваки колосек како би се повећала флексибилност рада односно како би на деоници двоколосечне пруге био могућ обострани саобраћај.

Код варијанте продужене укрснице са попречним везама извршене су значајније модификације у односу на претходну варијанту условљене повећањем могућих путева вожњи. И у овој варијанти постоји посебан део диспечерског подсистема који се састоји из два процесора и чији је главни задатак да управља путевима вожње унутар станице. Као и у претходној варијанти захтев за постављање пута вожње унутар укрснице долази од процесора станичног сигнално – сигурносног уређаја по успешном формирању улазног пута вожње на одговарајући колосек. У односу на претходну варијанту где је број могућих путева вожње био ограничен на четири, у овом случају је захваљујући попречним везама могуће формирати осам различитих путева вожње. Али док у претходној варијанти провере могућности загушења нису вршене за ове средишње путеве вожње јер они сами по себи нису ни могли да створе загушење, у варијанти продужене укрснице са попречним везама то није случај. Могућност да се два воза истог смера нађу на суседним колосецима, односно колосецима 1 и 2 или 3 и 4, у ситуацији када постоји воз из супротног смера се код варијанте укрснице без попречних веза решавала код провере улазних вожњи. Код варијанте са попречним везама се због постојања могућности преласка возова са првог на трећи и другог на четврти колосек и обратно ова провера морала вршити и код формирања улазних путева вожњи и код формирања средишњих путева вожњи унутар саме укрснице.

Као што је поменуто за претходну варијанту, у ситуацији када постоји више блок одсека у самој укрсници, она би се могла посматрати као деоница двоколосечне пруге, па би се самим тим кретање између блок одсека могло регулисати процесором пружног сигнално – сигурносног уређаја уз постојање приволе. Код варијанте са попречним везама те попречне везе би се могле уграђивати после сваког или одређеног броја блок одсека у зависности од жељене флексибилности рада. И као што је већ наведено, почетак и крај овакве продужене укрснице би се посматрали као места прелаза са двоколосечне на једноколосечну пругу док би се места где су уграђене попречне везе такође посматрали као места прелаза. Оваква места прелаза, где се на отвореној двоколосечној прузи може вршити прелазак са једног колосека на други се у прописима ИЖС (ЈЖ) не дефинише као службено место из разлога што ниједно такво службено место на мрежи ЈЖ није ни постојало нити тренутно постоји на мрежи ИЖС.

6.3.4. МОДЕЛ ВАРИЈАНТЕ СМАКНУТЕ УКРСНИЦЕ

Као што је већ наведено смакнута укрсница настаје „смицањем“ једног од колосека класичне укрснице са три колосека. На тај начин добијамо укрсницу са четири колосека при чему је формирање путева вожње на те колосеке у зависности са стањем суседног колосека. Самим тим и принципи формирања путева вожње и методе спречавања загушења су сличне као и у претходној варијанти продужене укрснице са попречним везама. Ово решење је по функционалности негде између варијанте продужене укрснице без и са попречним везама. Са једне стране нису омогућене све комбинације путева вожње као код продужене укрснице са попречним везама а са друге стране постоји довољан број комбинација да се могу вршити и укрштавања и претицања.

И у овој варијанти су у односу на основни модел вршене измене и на процесору станичног сигнално – сигурносног уређаја и на диспечерском систему и те измене су сличне као и код варијанти продужене укрснице. Као и у претходној варијанти успешно формирање улазног пута вожње активира захтев за „средишњи“ пут вожње. За разлику од варијанте продужене укрснице са попречним везама овде нису могуће све вожње, па тако није могуће формирати пут вожње са првог на четврти колосек и обратно. И диспечерски подсистем као и претходне две варијанте поседује посебан део за регулисање средишњих путева вожње само што је број путева вожње као и број провера за спречавање загушења мањи.

6.4. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈЕ

6.4.1. УЛАЗНИ ПОДАЦИ СИМУЛАЦИОНИХ МОДЕЛА

Како би се резултати симулација могли упоредити коришћени су исти улазни подаци. Од инфраструктурних улазних података коришћени су подаци о дужинама одсека са посматране деонице, уз неопходне измене и скраћења код неких варијанти. Због лошег стања деонице брзине на отвореној прузи и у станицама већ дуги низ година знатно испод пројектованих односно 40 km/h на отвореној прузи и 30 km/h у станицама и у правац и у скретање па се нису могле користити за добијање валидних резултата симулације модела. Зато су за брзине возова у моделу узете су пројектоване брзине за теретне возове од 80 km/h на отвореној прузи и у правац у станицама а брзине у скретање у станицама су узете у складу са конструктивним карактеристикама скретница односно 40 km/h и 50 km/h. Самим тим се за ред вожње возова нису могли искористити подаци из важећег реда вожње а ни из редова вожње у претходних 20 година. Уместо њих су за све моделе генерисани редови вожње са случајним временима долазака возова.

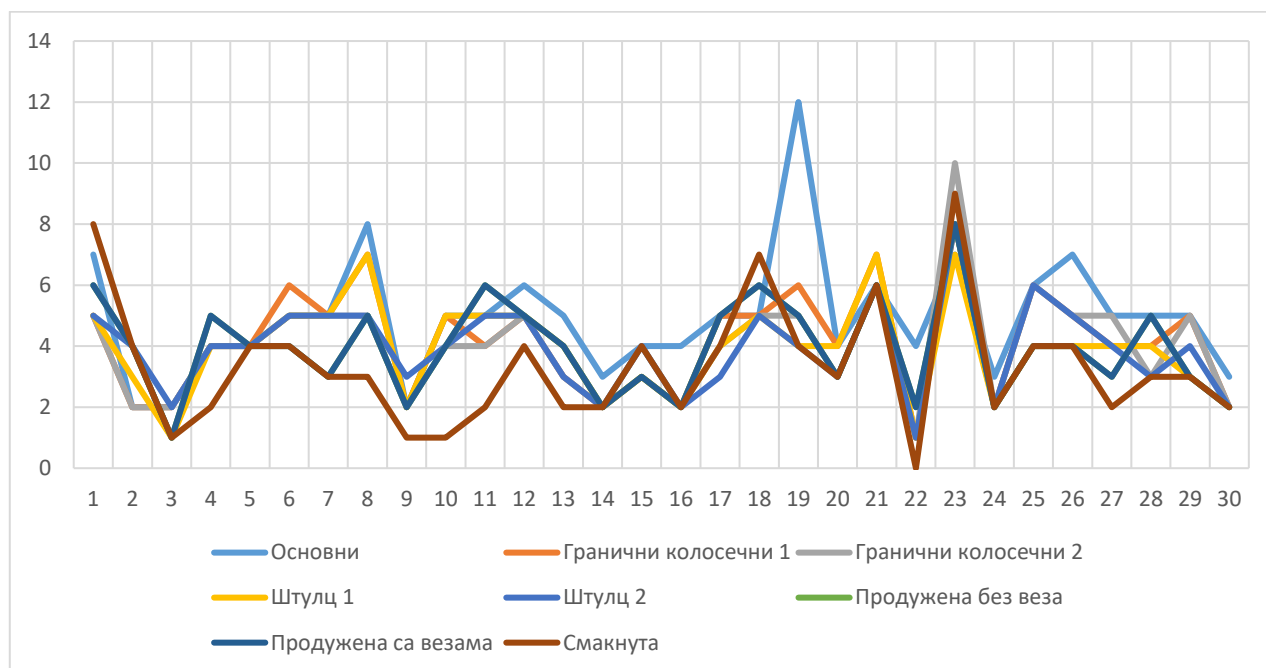
За генерисање времена случајних долазака возова коришћена је Ерлангова расподела II реда. Ова теоријска расподела је одабрана јер су досадашња истраживања показала да је најприближнија стварним доласцима теретних возова. Теретни возови иако поседују ред вожње ретко саобраћају по истом па се њихови наиласци могу сматрати случајним. Ред вожње је генерисан за период од 30 дана при чему је ред вожње генерисан истовремено за цео период па број возова није био једнак по данима. Разматране су три варијанте које су се разликовале по просечном дневном броју возова и то варијанта са 50, 100 и 150 возова. Варијанта са 100 возова је узета као приближна теоријској пропусној моћи ове деонице, варијанта са 50 возова као 50% мањи број возова и варијанта са 150 возова као варијанта са 50% више возова у односу на теорисјку пропусну моћ. Варијанте са мање од 50 возова нису разматране јер би у том случају број укрштавања био минималан па би било много мање ситуација где се варијанта решења укрсница могу упоредити. Слично је и са варијантама преко 150 возова, пошто је због великог броја возова односно кратког интервала између доласка узастопних возова на почетак деонице долазило до груписања возова у снопове. Самим тим иако је број укрштавања био већи, број ситуација у којима се појављивала потреба за једновременим уласком возова у станице био знатно мањи. Пошто је један од циљева симулације био да се пронађе оптимално решење укрснице са становишта могућности за једновремени улазак возова, било је битно пронаћи онај број и комбинацију долазака возова са највећим бројем захтева за једновремени улазак у станицу.

6.4.2. ВАРИЈАНТА СА 50 ВОЗОВА ДНЕВНО

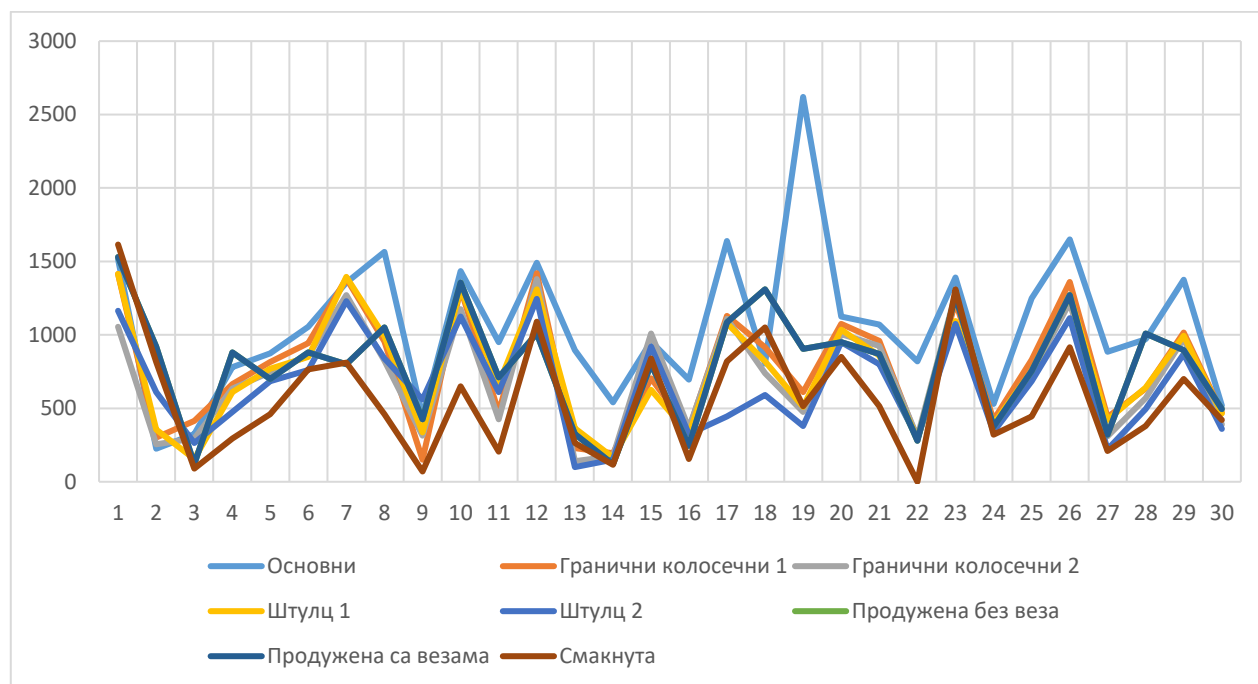
У свим варијантама су као показатељ успешности решавања проблема једновременог уласка возова коришћени задржавање у самим станицама и задржавање испред улазног сигнала односно у првом блок одсеку испред улазног сигнала а у смеру ка станици. Иако трајање задржавања у самој станици није директан показатељ могућности за једновремени улазак возова пошто је задржавање на станичном колосеку узроковано другим разлозима као што је чекање на укрштавање или довољан интервал слеђења. Али са друге стране, трајање задржавања у станици ће код укрштавања често бити краће уколико постоји могућност једновременог уласка два воза. Задржавање на улазном сигналу је у већини случајева из разлога немогућности истовременог уласка два воза, знатно ређе због непостојања слободног колосека за улаз.

Пошто код станица Ловћенац и Бачка Топола нису вршене никакве модификације код њих није ни могао бити вршен једновремени улазак возова. Самим тим, задржавање у и испред ових станица по варијантама се незнатно разликовало јер су и станице биле исте. Тако да је анализа чекања вршена само за укрсницу Мали Иђош Поље. И за задржавање у укрсници и

задржавање испред укрснице посматран је како број заустављања тако и трајање задржавања. Број заустављања возова у самој укрсници за период од 30 дана приказан је на слици 6.15 а трајање задржавања у укрсници на слици 6.16.



Слика 6.15 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 50

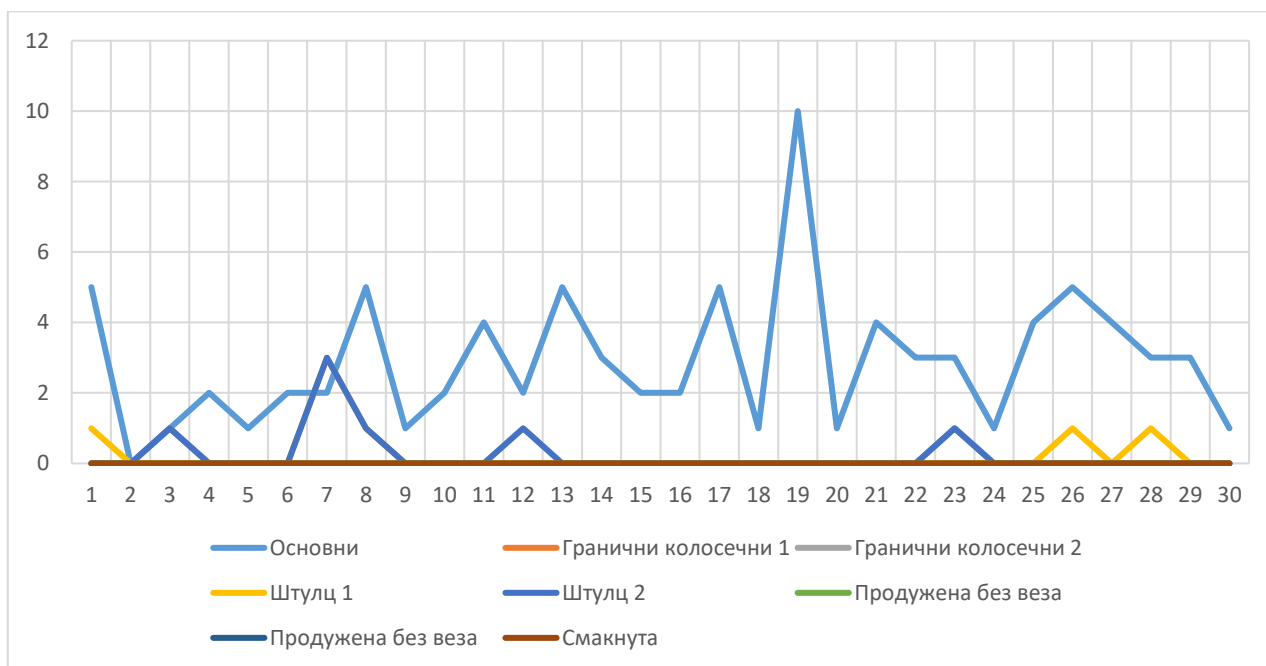


Слика 6.16 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 50

Као што се на слици 6.15 може видети број задржавања возова у укрсници је приближно једнак за сва варијантна решења али и да је број задржавања код основног модела без могућности једновременог уласка у укрсницу највећи. Код основног модела просечно 4,93 односно 9,87% возова је имало задржавање у укрсници док се код осталих модела тај проценат око 8% са изузетком смакнуте укрснице код које је 6,67%. Слични резултати се виде и на слици 6.16 где је приказано трајање задржавања, и у овом случају задржавање код основног модела укрснице најдуже. Са друге стране број и трајање задржавања код обе варијанте продужене укрснице као и код смакнуте укрснице је најмањи. То се може оправдати двоструко већом

дужином ових укрсница у односу на варијанте класичне укрснице, па је самим тим вероватноћа да се обави укрштавање возова без заустављања знатно већа. Број и трајање заустављања је најмање код смакнуте укрснице јер код ње не само да је већа вероватноћа укрштавања без заустављања настала дужином укрснице, већ се та вероватноћа и повећава чињеницом да у случају једновременог уласка два воза оба воза кроз укрсницу иду ограниченом брзином због вожње у скретање на средини укрснице.

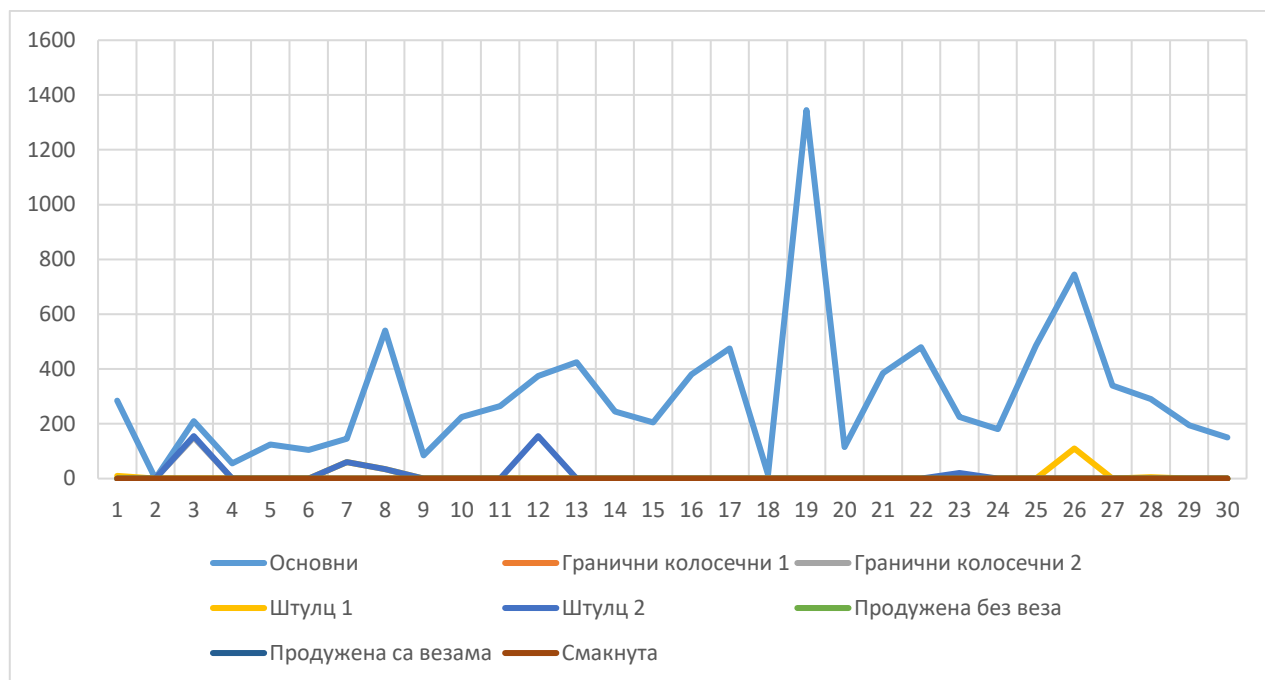
У суштини овај показатељ више говори о способности диспечерског система да регулише саобраћај без стварања непотребних и предугачких задржавања. Регулисање саобраћаја је олакшано чињеницом да 50 возова дневно ретко ствара снопове, па су самим тим и задржавања кратка. Са друге стране, задржавања на улазном сигналу односно првом блок одсеку испред улазног сигнала у смеру ка станици су знатно прецизнији показатељ способности укрснице за истовремени пријем више возова. И док су задржавања у укрсницама „нуžno зло“ неопходна за регулисање саобраћаја, задржавања испред улазних сигнала су показатељ немогућности једновременог уласка два воза у станицу односно лоше организације саобраћаја. Приликом пројектовања реда вожње ова задржавања се као експлоатационо неповољна не планирају али је у пракси дешавају због појаве закашњења. Што је већи број возова већа је вероватноћа да се деси заустављање. Иако су задржавања воза пред улазним сигналом у неким случајевима због непостојања слободног колосека у станици или спречавања стварања загушења, у варијанти са 50 возова је већина задржавања на улазном сигналу код основне верзије настала због немогућности једновременог уласка возова. Број задржавања на улазном сигналу прилазан је на слици 6.17.



Слика 6.17 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 50

Као што се на графику може видети број заустављања на улазном сигналу је код свих варијанти осим основне занемарљив и појављује се само у малом броју случајева, што се може приписати непостојањем слободног колосека. Код основне верзије је просечан број чекања 2,9 што је 5,8% од укупног броја возова. Код осталих варијанти број чекања је практично занемарљив и креће се испод 0,5% од укупног броја возова. Пошто посматрамо само једну станицу, свако задржавање представља једно задржавање различитог воза. Слични резултати се могу видети и на графику трајања задржавања возова на улазном сигналу приказаном на слици 6.18. Овде су разлике између основног модела и осталих варијанти још уочљивије при чему су код осталих варијанти задржавања у неким случајевима толико кратка да се на овом графикону и не виде. Код основног модела просечно задржавање на улазном сигналу је 303

секунде док се код осталих модела креће испод 10 секунди што још једном указује да је узрок заузеће станичног колосека возом или још вероватније излазећим возом.

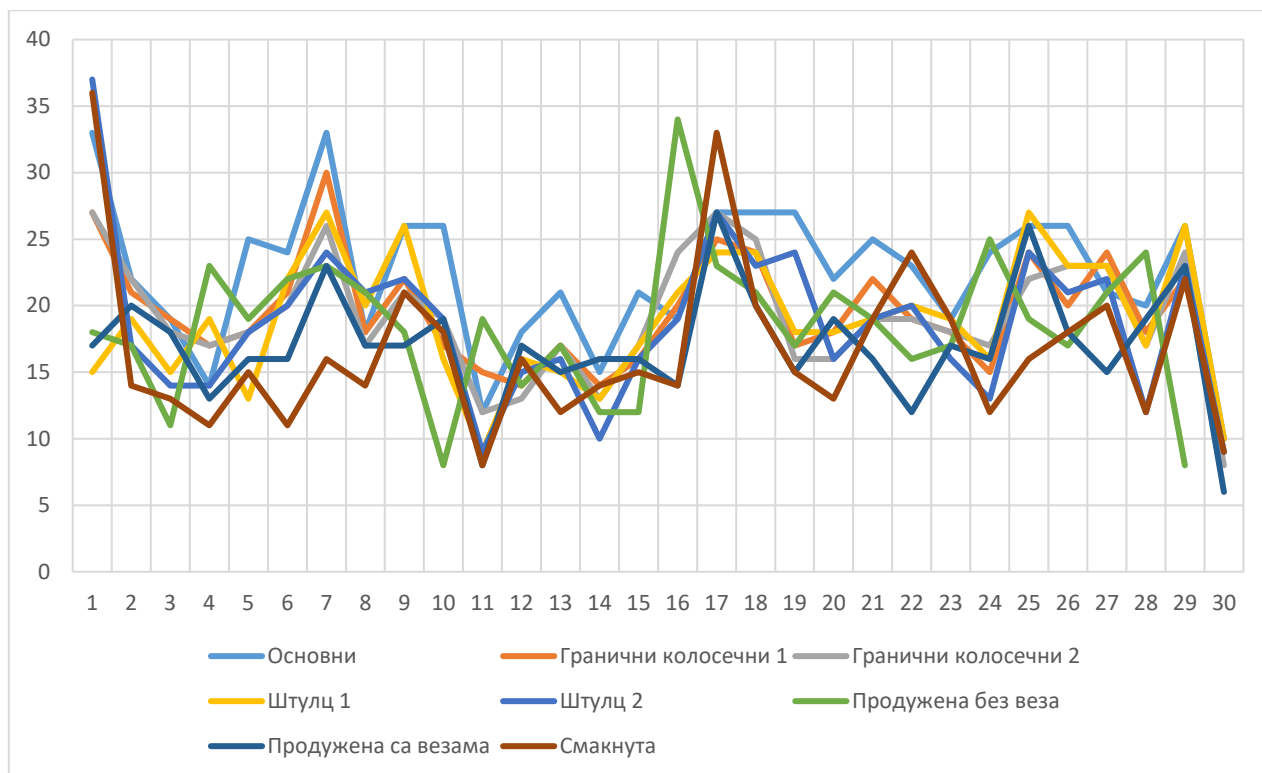


Слика 6.18 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 50

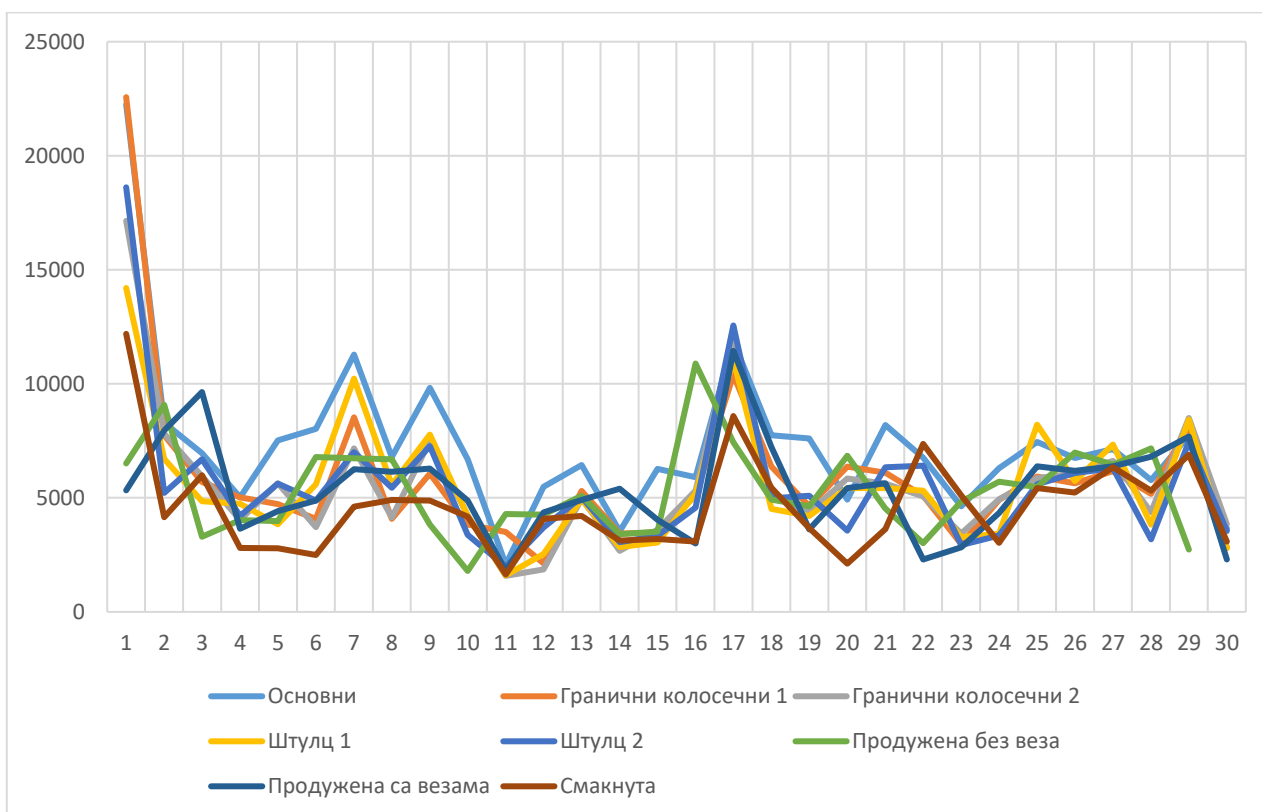
6.4.3. ВАРИЈАНТА СА 100 ВОЗОВА ДНЕВНО

Код варијанте са 100 возова дневно број возова одговара теоријској пропусној моћи деонице за паралелни прани графикон. И у овој варијанти су посматрани исти параметри као и у варијанти са 50 возова дневно односно задржавање возова станици (укрсници) и задржавање у првом блок одсеку испред станице тј. на улазном сигналу. И у овом случају посматрана је само укрсница Мали Иђош Поље, при чему је број задржавања у укрсници приказан на слици 6.19 а трајање задржавања на слици 6.20.

Као што се са графика може видети број заустављања је значајно већ што је поседица већег броја возова и самим тим већег броја укрштавања. У овој варијанти су разлике између модела мање приметне али су продужене односно смакнута варијанта и са 100 возова показале најбоље резултате односно најкраћа задржавања. Код основног модела просечан број возова који се задржавају у укрсници је 22,3 односно 22,3% од укупног броја возова. Код осталих варијанти број задржавања је нешто мањи и креће се од 16 – 20% укупног броја возова и најмањи је код варијанте смакнуте укрснице. Трајање задржавања показује сличне карактеристике као и број задржавања при чему је најкраће код варијанте смакнуте укрснице.

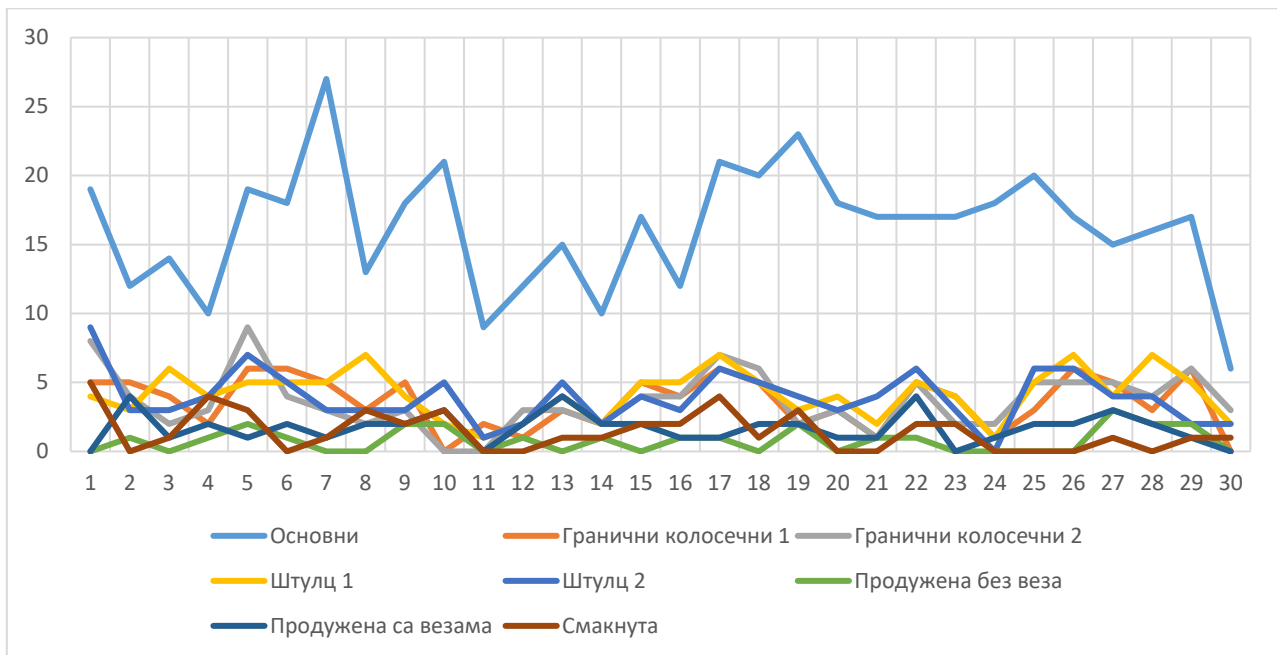


Слика 6.19 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 100



Слика 6.20 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 100

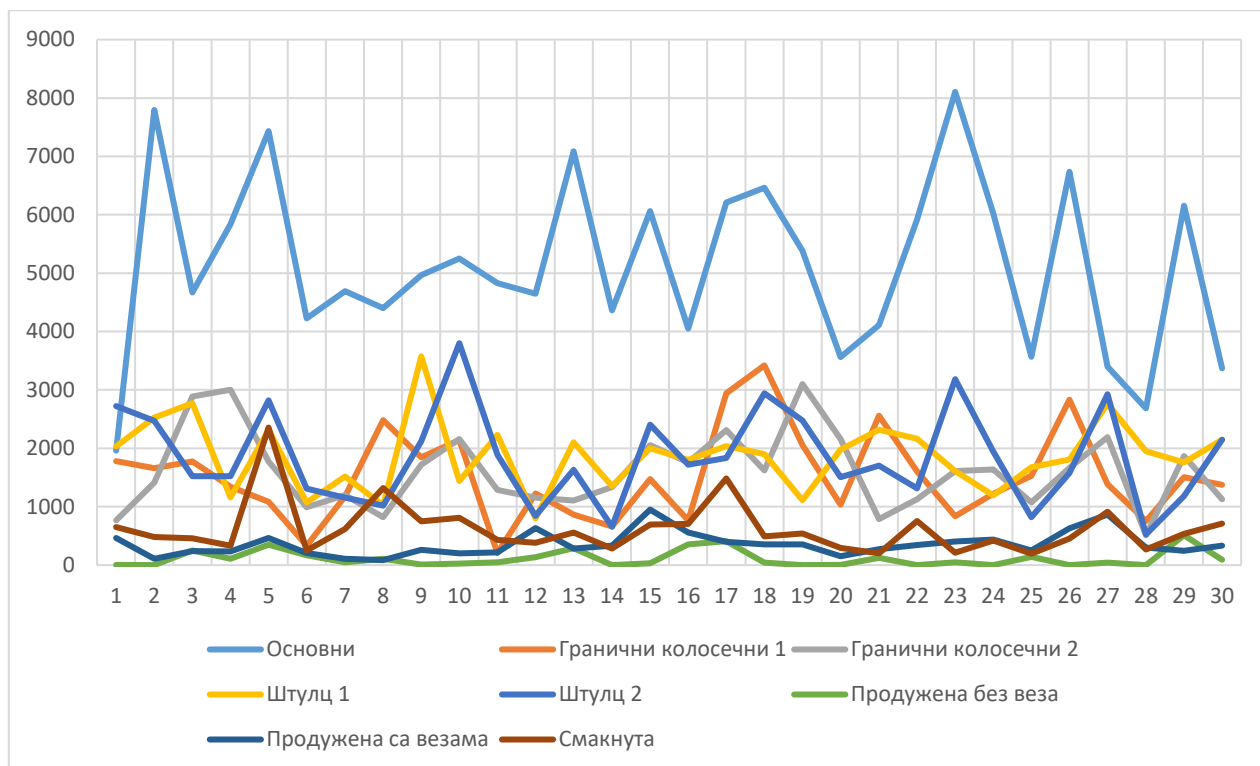
Са друге стране број задржавања на улазном сигналу односно првом блок одсеку испред улазног сигнала је и у варијанти са 100 возова значајно мањи него у самој укрсници. Као и у варијанти са 50 возова, највећи број и трајање задржавања је код основног модела док је код осталих модела знатно мањи. Број задржавања на улазном сигналу приказан је на слици 6.21 а трајање задржавања на слици 6.22.



Слика 6.21 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100

Код основног модела број возова који се зауставља на улазном сигналу просечно износи 16,27 односно 16,27% укупног броја возова. Код осталих модела број заустављања је знатно мањи и креће се од 0,80% код продужене укрснице без попречних веза па до 4,17% код варијанте укрснице са два штитна колосека. Генерално код варијанти продужене и смакнуте укрснице број возова који се заустављају на улазном сигналу је у просеку 1,31 односно 1,31% од укупног броја возова где код варијанти са граничним колосечним сигнаlima и штитним колосецима тај број је 3,83 односно 3,83% од укупног броја возова. Разлог мањег броја заустављања код продужених укрсница лежи у самој дужини укрснице чиме се вероватноћа заустављања на улазном сигналу смањује. Такође варијанте продужених укрсница имају дупло већи капацитет односно четири колосека у односу на два код решења са граничним колосечним сигнаlima и штитним колосецима, па је самим тим вероватноћа заустављања на улазном сигналу због непостојања слободног колосека у укрсници знатно мања.

Трајање задржавања показује сличне карактеристике као и број задржавања, где је најдуже задржавање управо код основног модела и креће се просечно око 38 минута дневно. Код осталих варијанти су просечна задржавања у распону од 9 минута код варијанте са четири штитна колосека па чак до једног минута код продужене укрснице без попречних веза. Генерално код варијанти продужених укрсница задржавања су испод два минута што се може објаснити чињеницом да у посматраном периоду појединим данима није било ни једног заустављања на улазном сигналу.

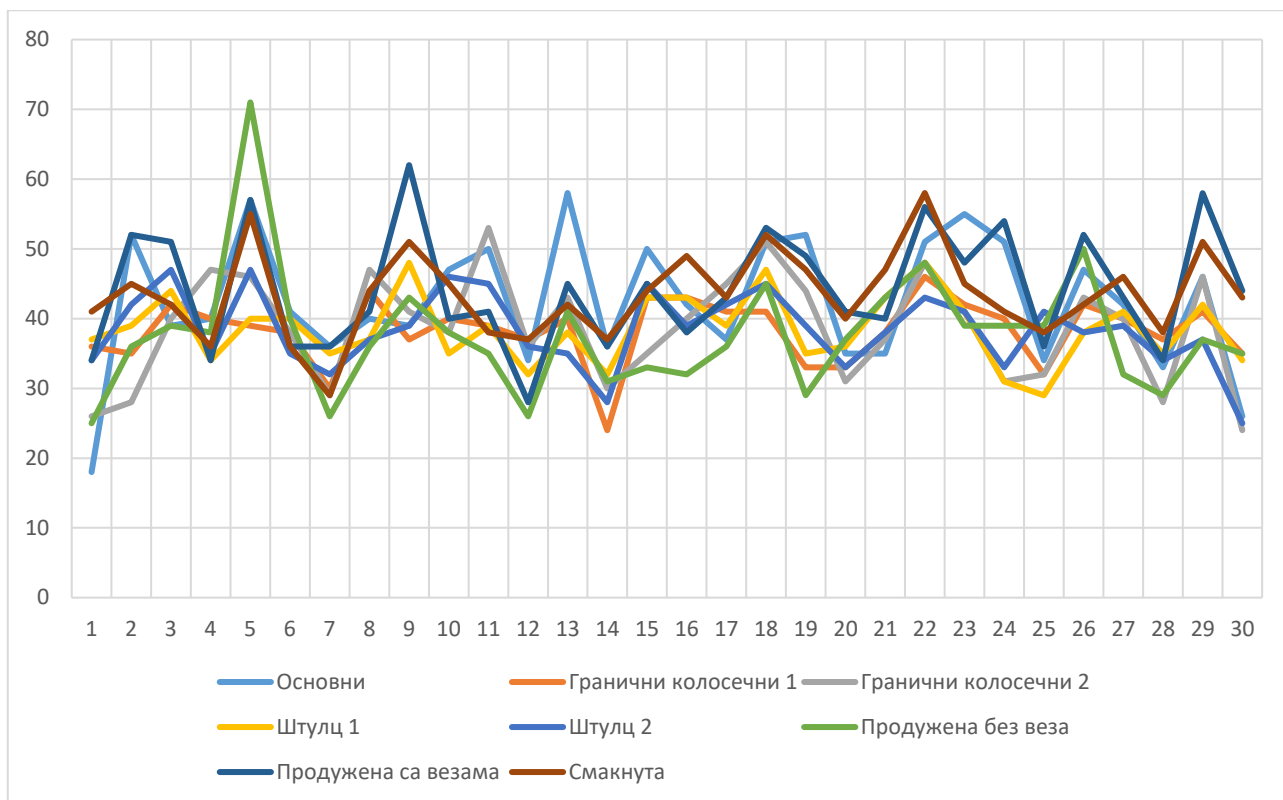


Слика 6.22 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100

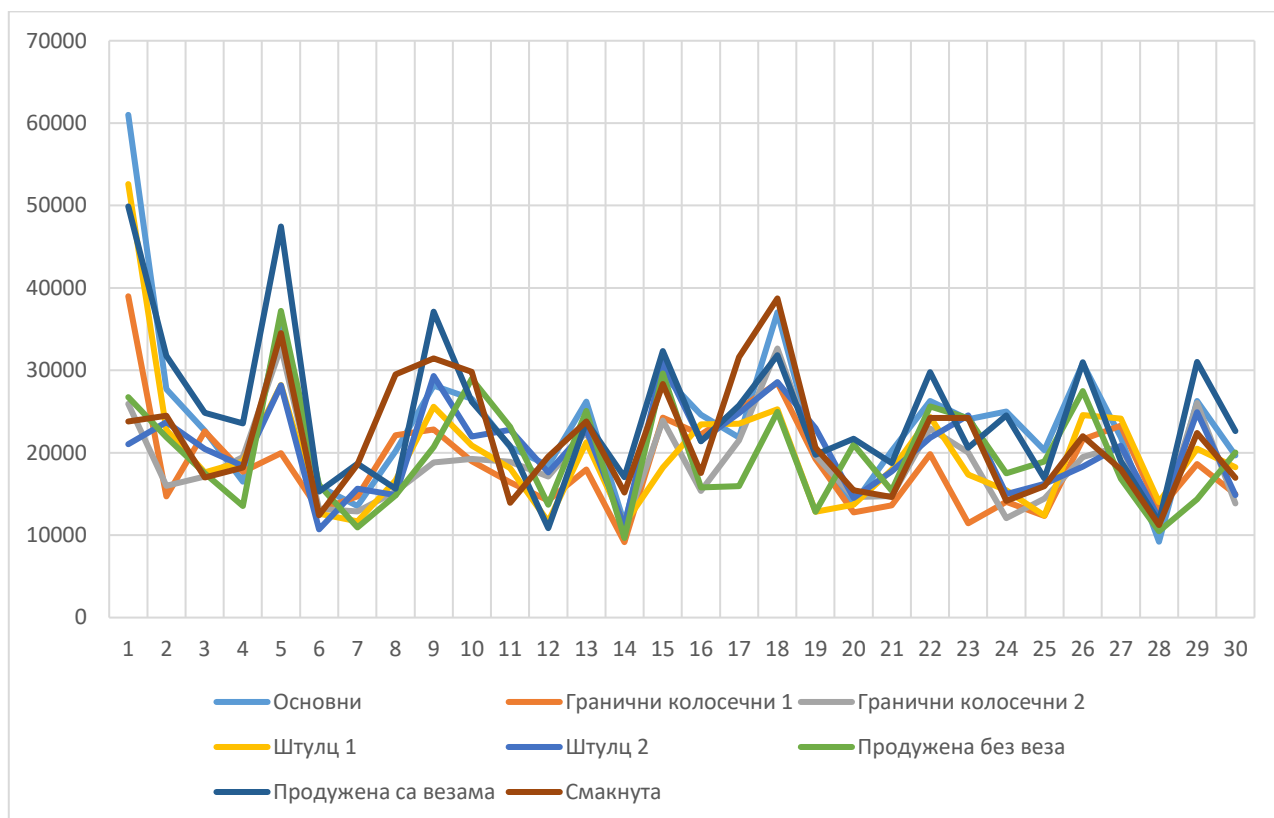
6.4.4. ВАРИЈАНТА СА 150 ВОЗОВА ДНЕВНО

Код варијанте са 150 возова дневно разматрана је ситуација где је просечан дневни број возова за 50% већи од теоријске пропусне моћи. Овај број возова је повећао број састајања али не пропорционално повећању броја возова, што се објашњава повећањем броја и трајања снопова возова. Повећање интензитета доласка возова узрокује и већи број узастопних возова, посебно на најдужим међустаничним растојањима Врбас – Ловћенац и Бачка Топола – Жедник која су уједно и улазна одстојања на моделирану деоницу. Повећан број узастопних возова креира већи број и дуже трајање снопова возова па се самим тим нису могли у потпуности сагледати ефекти варијантних решења укрсница.

Као и у претходним случајевима са мањим бројем возова и овде су посматрани исти параметри као и у варијанти са 50 и 100 возова дневно односно задржавање возова у станици (укрсници) и задржавање у првом блок одсеку испред станице тј. на улазном сигналу. И у овом случају посматрана је само укрсница Мали Иђош Поље, при чему је број задржавања у укрсници приказан на слици 6.23 а трајање задржавања на слици 6.24.



Слика 6.23 Број заустављања возова у укрсници – варијанта 150

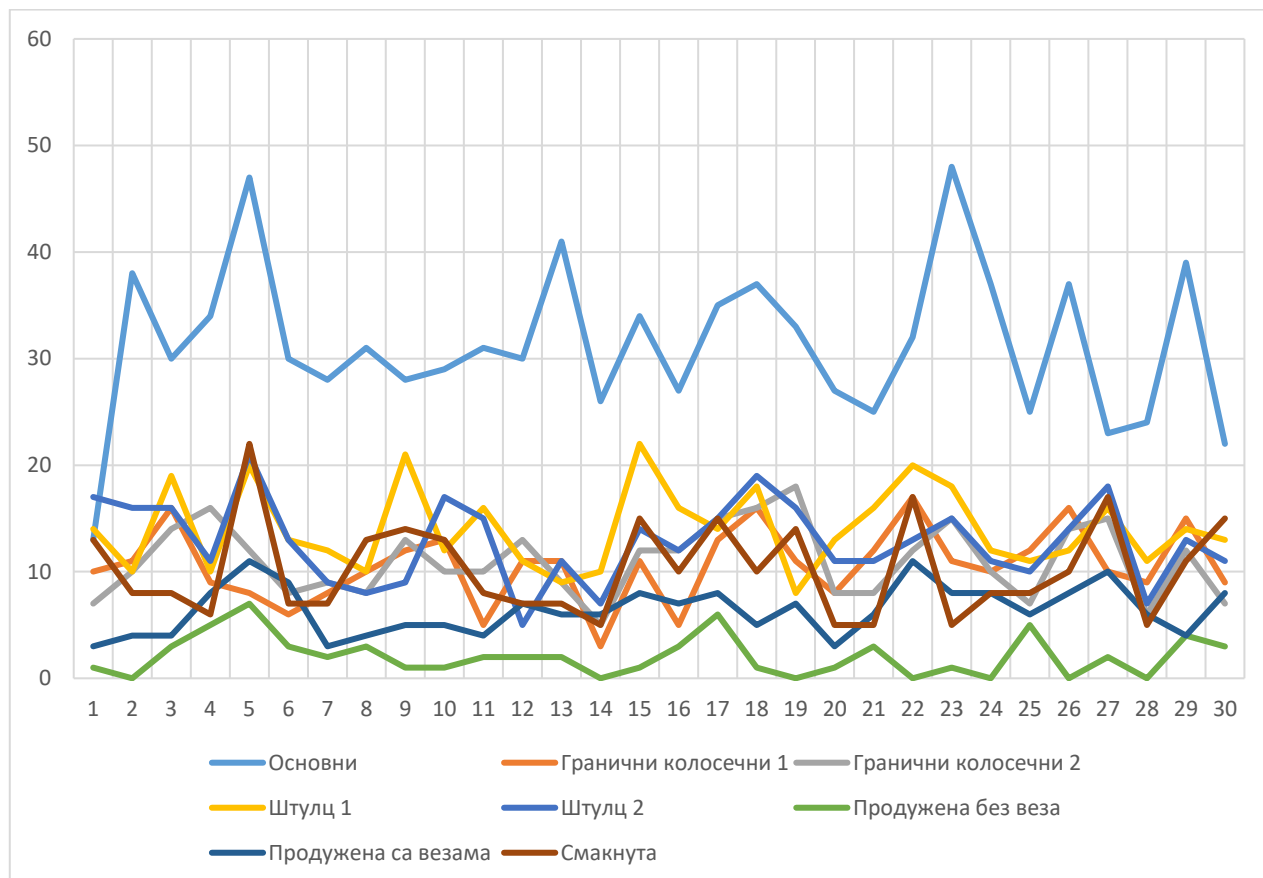


Слика 6.24 Трајање заустављања возова у укрсници – варијанта 150

И у овом случају је број заустављања знатно већи него у претходној варијанти са 100 возова за 26,95% и износи 28,31% од укупног броја возова код основног модела. Код осталих варијанти број заустављања је такође нешто већи и износи максималних 29,49% од укупног

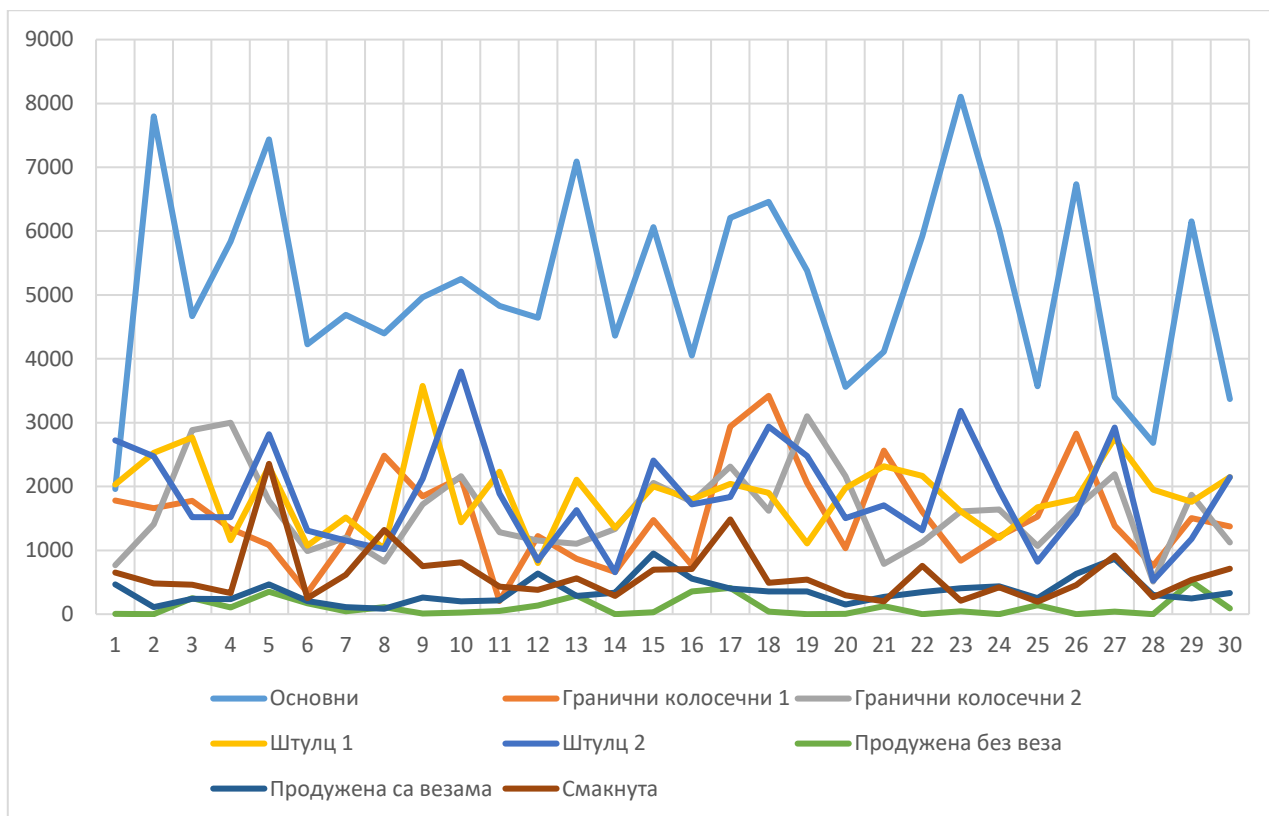
броја возова код варијанте продужене укрснице без попречних веза. Најбољи резултати су добијени код варијанте продужене укрснице без попречних веза и износе 25,07% заустављених возова од укупног броја возова. У суштини број задржавања је приближан код свих варијанти што је одраз великог броја возова а не способности укрснице да решава конфликтне ситуације. Када се анализира трајање укрштавања уочава се да показује сличне тенденције као и број укрштавања уз мале разлике међу варијантним решењима.

Број задржавања на улазном сигналу са друге стране показује као и у претходним случајевима највећи број задржавања код основног модела. Број задржавања на улазном сигналу приказан је на слици 6.25 а трајање задржавања на слици 6.26.



Слика 6.25 Број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150

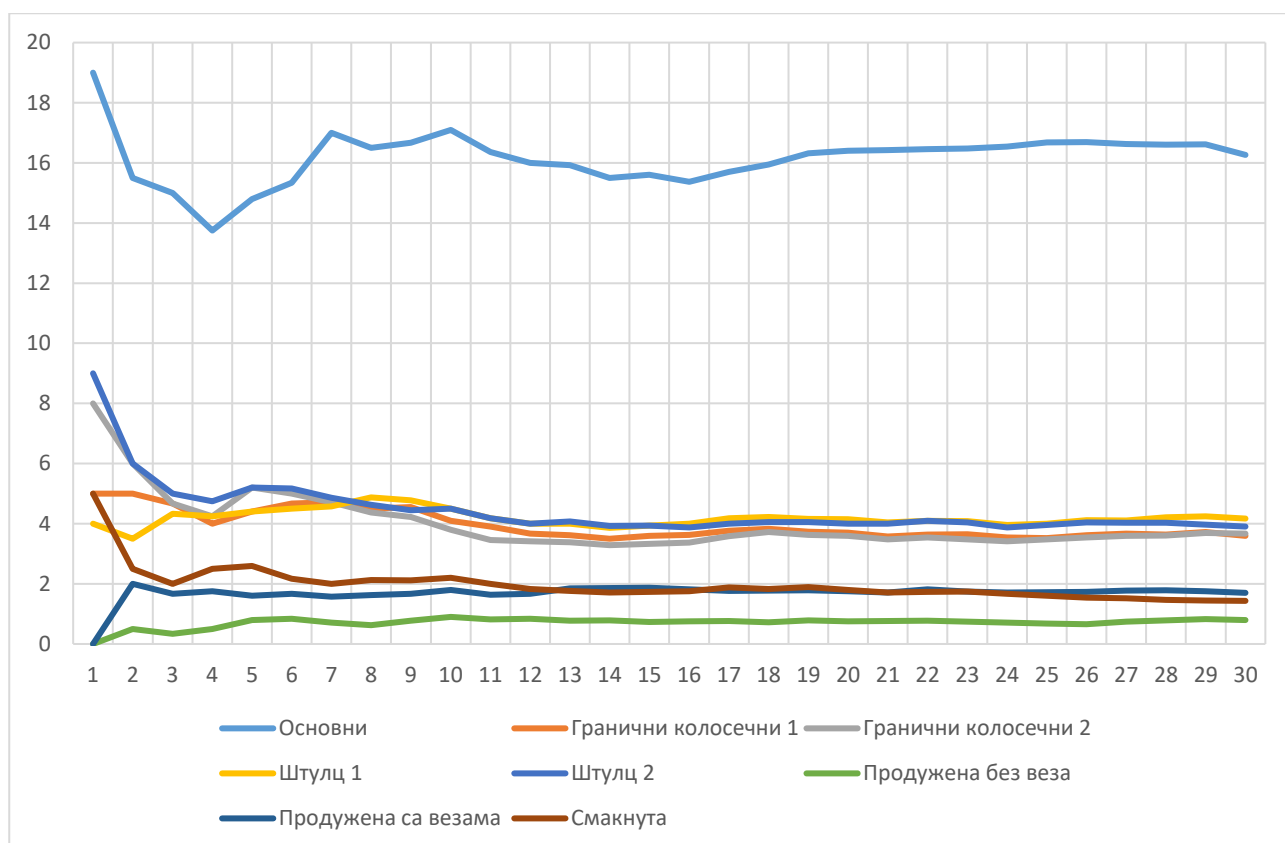
И овде је број заустављања на улазном сигналу код основног модела највиши и износи 20,91% од укупног просечног броја возова што је 28,52% више него у варијанти са 100 возова. Раст од преко 100% броја заустављања се може уочити и код осталих варијантних решења, што је опет последица великог броја возова па велики број задржавања није настао због немогућности једновременог уласка возова већ због заузећа колосека у укрсници.



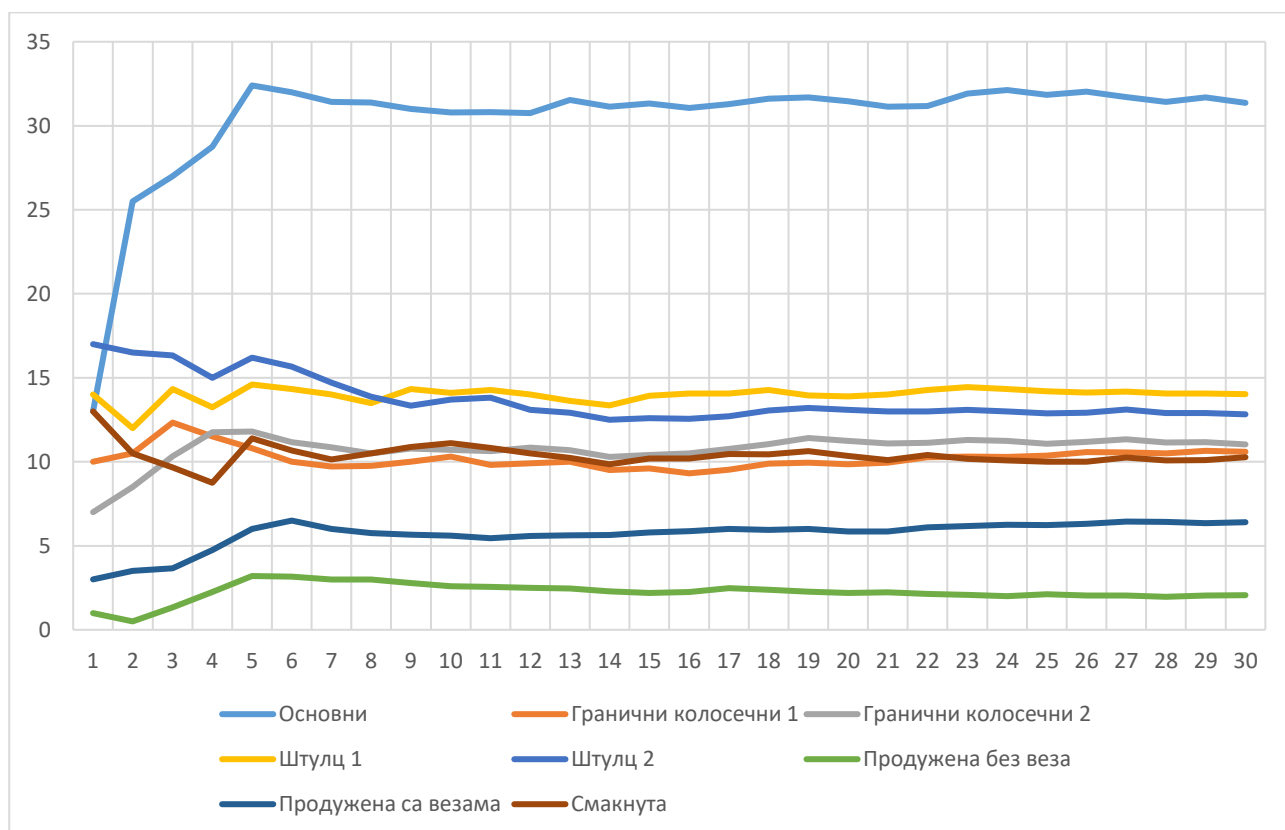
Слика 6.26 Трајање заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150

Трајање задржавања показује сличне карактеристике као и број задржавања, где је најдуже задржавање и у овом случају код основног модела и креће се просечно 85 минута дневно. Код осталих варијанти су просечна задржавања у распону од 31 код варијанте са два штулца па до 2 минута код продужене укрснице без попречних веза. И са овим бројем возова задржавања код продужених варијанти укрсница трајање задржавања је значајно мање него код осталих варијанти и креће се од 11 минута код смакнуте па до 2 минута код продужене укрснице без попречних веза. Код осталих варијанти су просечна задржавања око 30 минута.

Број и трајање задржавања се такође може посматрати и на просечном дневном нивоу. Као пример су дати случајеви са 100 и 150 возова пошто је број задржавања на улазном сигналу код варијанте са 50 возова био једнак нули за поједине варијанте. На слици 6.27 је приказана варијанта са 100 возова а на слици 6.27 са 150.



Слика 6.27 Просечни дневни број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 100



Слика 6.28 Просечни дневни број заустављања возова на улазном сигналу – варијанта 150

Као што се на слици 6.27 може видети просечни број задржавања на улазном сигналу код основног модела се креће око 17 док је код свих осталих испод 5 што је у сагласности са резултатима на претходним графиконима. И на слици 6.28 за варијанту са 150 возова дневно

результати су пропорционални варијанти са 100 возова дневно, односно и у овом случају највећи број задржавања је код основног модела и креће се око 32, док је код осталих модела знатно мањи. У оба случаја најмањи број задржавања се уочава код модела продужене укрснице без попречних веза што се може објаснити једноставнијим постављањем пута вожње у средишњем делу укрснице. Наиме, код продужене укрснице са попречним везама у средишњем делу се налазе скретнице па је при формирању пута вожње у средишњем делу станице потребно и скретнице блокирати односно прекретати што у одређеној мери продужава постављање пута вожње, што на крају може довести и до заустављања воза на улазном сигналу.

6.5. РЕЗИМЕ

У овом поглављу приказана су варијантна решења укрснице Мали Иђош Поље, делови симулационог модела који се разликују од претходно приказаног модела у (*Jeremić et al., 2021*) као и резултати симулационих модела. Ради лакше прегледности сви резултати су приказани у табели 6.1. У овој табели варијанте укрснице су приказане графички у виду шеме станице, а трајање чекања је дато у минутима.

Када су у питању чекања у самој укрсници резултати показују нешто мања чекања у броју и трајању код осталих модела у односу на основни. Та разлика се смањује повећањем броја возова што је и логично јер чекања у самој укрсници највише зависе од броја возова на посматраној деоници. Са друге стране чекања на улазном сигналу много боље описују могућности за једновремени улазак возова у укрсницу. Задржавања су у свим варијантама знатно мања од основног модела а код продужених укрсница и 50 возова дневно заустављања на улазном сигналу уопште и нема. Код варијанте са 150 возова задржавања на улазном сигналу код свих варијанти су једним делом узрокована и заузећем колосека у самој укрсници односно малим капацитетом а не немогућношћу једновременог уласка.

Резултати недвосмислено показују предности осталих варијантних решења укрсница у односу на основно решење (модел) али како би се одредило оптимално решење односно варијанта потребно је у анализу укључити и друге критеријуме као што су безбедност трошкови инвестиција и одржавања.

Табела 6.1. Просечна чекања по варијантама

Варијантна решења	Број чекања у укрсници			Трајање чекања у укрсници (min)			Број чекања на улазном сигналу			Трајање чекања на улазном сигналу (min)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150	50	100	150
	4,9	22,3	42,5	17,6	121,6	397,1	2,9	16,3	31,4	5,1	38,1	85,5
	4,2	19,4	38,3	12,8	97,8	310,2	0	3,6	10,6	0	8,6	25,5
	4	19,2	38,6	11,9	94	312,9	0,1	3,7	11	0,1	8,4	26,8
	3,9	18,9	38,5	12,4	92,7	331	0,2	4,2	14	0,1	8,8	31,2
	3,9	18,7	38,3	10,9	93	337,9	0,2	3,9	12,8	0,2	9	30,9
	3,9	18,6	37,6	13,1	88,4	328,3	0	0,8	2,1	0	0,9	1,9
	3,9	17	44,2	13,1	89,7	411,9	0	1,7	6,4	0	1,4	5,9
	3,3	16,7	43,4	9,5	77,5	360,1	0	1,4	10,3	0	1,2	10,3

7. ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКИ ИЗБОР ВАРИЈАНТНОГ РЕШЕЊА

Како би се извршио избор најповољнијег решења укрснице примењено је вишекритеријумско одлучивање. Избор најповољније варијанте је вршен помоћу неколико критеријума од којих су неки добијени као резултат симулационог модела а остали су усвојени у складу са потребним карактеристикама укрсница.

За одређивање тежинских критеријума коришћене су *FUCOM*, *CRITIC* и *Entropy* метода док су за рангирање алтернатива коришћене *TOPSIS* и *MABAC* метода.

7.1. МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ТЕЖИНСКИХ КОЕФИЦИЈЕНАТА

7.1.1. FUCOM МЕТОДА

FUCOM (*Full Consistency Method*) је метода за одређивање тежинских критеријума (*Milosavljević et al., 2019a, Milosavljević et al., 2019b, Pamučar et al., 2018*). У стварности упоредне вредности $a_{ij} = w_i/w_j$ при чему a_{ij} приказује релативну преференцију критеријума i према критеријуму j се не заснивају на прецизним мерењима већ на субјективним проценама. У ситуацијама када постоји велики број упоредних критеријума може доћи до недоследности у решавању проблема што са собом повлачи смањење поузданости резултата. Метода *FUCOM* смањује могућност грешака захваљујући:

- 1) Малом броју поређења
- 2) Дефинисаним ограничењима при одређивању вредности критеријума. *FUCOM* метода омогућава валидацију критеријума израчунавањем вредности грешака за добијене векторе тежине.

Ова метода се спроводи у неколико корака, први корак представља рангирање критеријума на основу унапред дефинисаних критеријума

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (7.1)$$

при чему се рангирање врши на основу значајности критеријума. Почиње се од оног критеријума који има највећи утицај односно највећу вредност тежинског коефицијента па до критеријума са најмањим утицајем. На тај начин се добијају критеријуми ранжирани према очекиваним вредностима тежинских коефицијената

$$C_j(1) > C_j(2) > \dots > C_j(k) \quad (7.2)$$

где је k ранг посматраног критеријума. Ако постоје два или више критеријума са истим значењем између ових критеријума се ставља „=” уместо „>”.

У другом кораку се врши поређење ранжираних критеријума, и одређује се компаративни приоритет критеријума $\varphi k/(k+1)$, $k = 1, 2, \dots, n$ где k представља ранг критеријума. Овај компаративни приоритет нам показује колика је предност ранга критеријума $C_j(k)$ у односу на ранг критеријума $C_j(k+1)$. На тај начин се добијају вектори компаративних приоритета оцењених критеријума:

$$\Phi = (\varphi_{1/2}, \varphi_{2/3}, \dots, \varphi k/(k+1)) \quad (7.3)$$

Компаративни приоритет критеријума се дефинише на два начина:

- 1) У складу са својим преференцијама доносиоци одлука одређују компаративни приоритет $\varphi k/(k+1)$ између посматраних критеријума. Приликом решавања

стварних проблема компаративни приоритет се одређује на основу субјективног мишљења доносилаца одлука. Ако два критеријума имају исти значај тада је компаративни приоритет 1.

- 2) На основу предефинисане скале за поређење критеријума доносиоци одлука упоређују критеријуме и одређују значај сваког појединачног критеријума. Поређење се врши у односу на први (најзначајнији) критеријум и на тај начин се добија значај критеријума за све критеријуме рангиране у првом кораку. Пошто се први критеријум пореди сам са собом, самим тим је његов значај 1 па би због тога требало извршити $n-1$ поређење критеријума.

У трећем кораку израчунавају се коначне вредности тежинских коефицијената оцењених критеријума $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$. Ове коначне вредности морају да испуне два услова:

- 1) Однос тежинских коефицијената мора бити једнак компаративном приоритету посматраних критеријума $\varphi_{k/(k+1)}$ дефинисаних у претходном кораку односно да је испуњен следећи услов:

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} = \varphi_{\frac{k}{k+1}} \quad (7.4)$$

- 2) Поред претходног услова коначне вредности тежинских коефицијената треба да задовоље услов математичке транзитивности:

$$\varphi_{k/(k+1)} \cdot \frac{\varphi_{(k+1)/(k+2)}}{\varphi_{(k+2)/(k+3)}} = \varphi_{k/(k+2)} \quad (7.5)$$

Како је $\varphi_{k/(k+1)} = \frac{\omega_k}{\omega_{k+1}}$ и $\varphi_{(k+1)/(k+2)} = \frac{\omega_{k+1}}{\omega_{k+2}}$ онда је $\frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} \cdot \frac{\omega_{k+1}}{\omega_{k+2}} = \frac{\omega_k}{\omega_{k+2}}$ па се овим добија још један услов да се задовоље крајње вредности тежинских критеријума:

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \cdot \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (7.6)$$

Поптуна конзистентност односно минимално одступање од потпуне конзистентности (*DFC – Deviation from Full Consistency χ*) је испуњена само ако се у потпуности поштује транзитивност односно када су испуњени услови:

$$\frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} = \varphi_{k/(k+1)} \text{ и } \frac{\omega_k}{\omega_{k+2}} = \varphi_{k/(k+1)} \cdot \varphi_{(k+1)/(k+2)} \quad (7.7)$$

На овај начин се задовољава услов да је $\chi = 0$ за добијене вредности тежинских коефицијената. Вредности тежинских коефицијената $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ такође морају да задовоље следеће услове, чиме се задовољава захтев за максималном конзистентношћу:

$$\left| \frac{\omega_k}{\omega_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi \text{ и } \left| \frac{\omega_k}{\omega_{k+2}} - \varphi_{\frac{k}{k+1}} \cdot \varphi_{\frac{k+1}{k+2}} \right| \leq \chi \quad (7.8)$$

Решавањем једначина (7.8) уз испуњење услова да је χ минимално и $\sum_{j=1}^n w_j = 1, \forall j, w_j \geq 0, \forall j$ добијамо коначне вредности тежинских коефицијената.

7.1.2. CRITIC МЕТОДА

CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) метода (Димитријевић, 2017) приликом одређивања тежинских критеријума комбинује стандардно одступање вредности алтернатива по критеријумима и коефицијент корелације између критеријума.

Први корак код ове методе је нормализација вредности алтернатива по критеријумима а затим се за сваки пар критеријума израчунава коефицијент корелације који представља коефицијент њихове међусобне зависности:

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j) \cdot (r_{ik} - \bar{r}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2 \cdot \sum_{i=1}^m (r_{ik} - \bar{r}_k)^2}} \quad j, k = 1, \dots, n \quad (7.9)$$

Како би се утврдила мера конфликтности критеријума $K_j, j = 1, \dots, n$ у односу на остале критеријуме користи се следећа формула:

$$\sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}) \quad (7.10)$$

Количина информација C_j садржана у критеријуму $K_j, j = 1, \dots, n$ добија се на следећи начин:

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - \rho_{jk}), \quad j = 1, \dots, n \quad (7.11)$$

При чему је σ_j стандардно одступање вредности алтернатива по критеријуму $K_j, j = 1, \dots, n$. Ово стандардно одступање се одређује по формули:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - \bar{r}_j)^2}{m}}, \quad j = 1, \dots, n \quad (7.12)$$

Већа вредност параметра C_j говори да је у одговарајућем критеријуму садржана већа количина информација а самим тим да је већа и његова важност која се одређује по следећој формули:

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j}, j = 1, \dots, n \quad (7.13)$$

7.1.3. ENTROPY МЕТОДА

Entropy метода или метода ентропије (Димитријевић, 2017) се заснива на дефиницији ентропије коју је дао Клод Шенон половином 20. века. Ентропија као мера неизвесности може да се користи у одређивању тежинских критеријума полазећи од претпоставке да вредности алтернатива по критеријумима носе неку информацију. Уколико су вредности алтернатива сличне по неком критеријуму, тада он има мању важност него онај критеријум код кога се вредности алтернатива у великој мери разликују.

Ентропија (E_j) свих алтернатива се израчунава по следећој формули:

$$E_j = -\varepsilon \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij} \quad j = 1, \dots, n \quad (7.14)$$

при чему је константа $\varepsilon = 1/\ln m$

Комплемент ентропије (d_j) се добија по следећој формули:

$$d_j = 1 - E_j, j = 1, \dots, n \quad (7.15)$$

Као последњи корак добијају се тежински коефицијенти:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, j = 1, \dots, n \quad (7.16)$$

7.2. МЕТОДЕ ЗА РАНГИРАЊЕ АЛТЕРНАТИВА

7.2.1. TOPSIS МЕТОДА

TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) метода је вишекритеријумска метода која вреднује варијанте на основу њихове удаљености од идеалног и антиидеалног решења (*Hwang et al., 1981*). Ову методу карактерише формирање отежане нормализоване матрице а затим и идеалног и антиидеалног решења. Идеално решење (A^+) представља ону алтернативу која има најбоље вредности по свим критеријумима. Са друге стране антиидеално решење (A^-) има најлошије вредности по свим критеријумима. Код ове методе се такође израчунава и удаљеност сваке алтернативе од антиидеалног и идеалног решења, као и релативна блискост алтернативе идеалном решењу. Варијанта која има најмање растојање од идеалног а највеће растојање од антиидеалног је најбоља (*Димитријевић, 2017, Ćićak, 2003*).

Први корак код ове методе је израда почетне матрице одлучивања $X = \|x_{ij}\|_{m \times n}$ односно:

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1m} & x_{2m} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.17)$$

Други корак је нормализација почетне матрице одлучивања односно $X = \|x_{ij}\|_{m \times n} \Rightarrow R = \|r_{ij}\|_{m \times n}$

$$R = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \cdots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{1m} & r_{2m} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.18)$$

при чему је
$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (7.19)$$

Трећи корак је отежавање нормализоване матрице односно укључивање тежинских критеријума у матрицу одлучивања $V = \|v_{ij}\|_{m \times n}$:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{1m} & v_{2m} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (7.20)$$

где су
$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (7.21)$$

У четвртм кораку се одређује идеално и антиидеално решење:

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K' \right), \left(\min_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K'' \right) \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+\}, \quad i = 1, \dots, m \quad (7.22)$$

$$A^- = \left\{ \left(\min_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K' \right), \left(\max_i v_{ij} \mid \forall K_j \in K'' \right) \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-\}, \quad i = 1, \dots, m \quad (7.23)$$

при чему су K' и K'' подскупови типа *max* и *min*.

У петом кораку се рачуна удаљеност алтернатива од идеалног и антиидеалног решења и то на основу Еуклидског растојања у критеријумском простору:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad \text{и} \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (7.24)$$

Шести корак је израчунавање релативне блискости алтернатива идеалном решењу:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}, \quad 0 \leq C_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (7.25)$$

И последњи корак је налажење решења и рангирање алтернатива:

$$A^* = \{A_{i^*} | C_{i^*} = \max_i C_i\} \quad (7.26)$$

Ранг вредности C_i поређаних у опадајући низ (од највеће до најмање вредности) одговара рангу алтернатива A_i (од најбоље до најлошије).

$C_i = 0$ – алтернатива је антиидеално решење

$C_i = 1$ – алтернатива је идеално решење

7.2.2. МАВАС МЕТОДА

МABAC (*Multi Attribute Border Approximation area Comparison*) је метода новијег датума, први пут представљена 2015. године (Milosavljević et al., 2019a, Pamučar et al., 2018). Основна поставка ове методе заснива се на дефинисању удаљености критеријумске функције свих посматраних алтернатива од неке граничне апроксимативне области (Božanić et al., 2016, Pamučar et al., 2015). Ова метода састоји се из шест корака.

Први корак је формирање почетне матрице одлучивања X при чему се врши m евалуација по n критеријума. Алтернативе се приказују помоћу вектора A_i где је x_{ij} вредност i -те алтернативе по j -том критеријуму ($i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$).

У другом кораку се врши нормализација елемената почетне матрице $X = \|x_{ij}\| \Rightarrow R = \|r_{ij}\|$

при чему се за критеријуме бенефитног типа елементни нормализоване матрице добијају по изразу:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (7.27)$$

док се за критеријуме трошковног типа добијају по изразу:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^+}{x_i^- - x_i^+} \quad (7.28)$$

При томе x_{ij} , x_i^+ и x_i^- представљају елементе почетне матрице одлучивања а x_i^+ и x_i^- се дефинишу као:

$$x_i^+ = \max(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad \text{и} \quad x_i^- = \min(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (7.29)$$

и представљају максималне и минималне вредности посматраног критеријума по алтернативама.

Трећи корак је израчунавање отежане матрице $V = \|v_{ij}\|$ при чему се елементи отежане матрице рачунају по обрасцу:

$$v_{ij} = w_i \cdot r_{ij} + w_i \quad (7.30)$$

Четврти корак је одређивање матрице граничних апроксимативних области (G), при чему се гранична апроксимативна област израчунава на основу:

$$g_i = (\prod_{j=1}^m v_{ij})^{1/m} \quad (7.31)$$

при чему су v_{ij} елементи отежане матрице V док је m укупан број алтернатива

Пети корак је израчунавање матрице удаљености алтернатива од граничне апроксимативне области Q . Удаљеност алтернатива од граничне апроксимативне области налази се као разлика елемената отежане матрице V и вредности апроксимативних области G .

Шести корак је рангирање алтернатива где се вредност критеријумских функција по алтернативама добија као сума растојања свих алтернатива од граничних апроксимативних области g_i . Сабирањем елемената матрице Q по редовима добијају се коначне вредности критеријумских функција алтернатива (7.24).

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}, j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m \quad (7.32)$$

при чему је n број критеријума а m број алтернатива.

7.3. ИЗРАДА МОДЕЛА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ОДЛУЧИВАЊА

На основу теоријских поставки приказаних у предходном поглављу, у овом поглављу биће дефинисани критеријуми и алтернативе као и почетна матрица одлучивања вишекритеријумског модела. Након тога биће извршен прорачун тежинских коефицијената критеријума. Последњи део поглавља посвећен је прорачуну и рангирању алтернатива применом *TOPSIS* и *MAVAC* методе као и дискусији и анализи добијених резултата.

7.3.1. ДЕФИНИСАЊЕ КРИТЕРИЈУМА

У овом раду као најзначајнији су издвојени следећи критеријуми:

- 1) C_1 – Критеријум броја задржавања возова у укрсници. Овај критеријум показује колико се возова просечно дневно задржава у укрсници из саобраћајних разлога. Број задржавања је у корелацији са трајањем задржавања у укрсници и показује способност диспечерског система за регулисање саобраћаја са што мање непотребних задржавања. Овај критеријум је минимизационог карактера и вредности се добијају као излазни податак симулација.
- 2) C_2 – Критеријум броја задржавања возова на улазном сигналу укрснице. Овај критеријум показује колико се возова просечно дневно зауставља на улазним сигнаlima укрснице. Број задржавања на улазним сигнаlima је такође у корелацији са трајањем задржавања и показује способност диспечерског система да регулише саобраћај без непотребних задржавања као и могућност укрснице за једновремени улазак возова. И овај критеријум је минимизационог карактера и вредности се добијају као излазни податак симулација.
- 3) C_3 – Критеријум трошкова инвестиција. Овај критеријум описно приказује трошкове инвестиција за различита варијантна решења, где у трошкове инвестиција спадају уградња нових скретница, сигнала и продужење постојећих колосека укрснице. Критеријум је минимизационог карактера.

- 4) С₄ – Критеријум безбедности саобраћаја. Овај критеријум показује степен безбедности саобраћаја у односу на примењена решења модификације укрсница и максимизационог је карактера. Приликом модификације укрсница примењена су решења са граничним колосечним сигналимa, штитним колосецима и продужењем колосека укрснице при чему су као безбеднија решења оцењена она решења код којих је мања могућност појаве несрећа и незгода уколико се возови не зауставе на предвиђеном месту.

7.3.2. ДЕФИНИСАЊЕ АЛТЕРНАТИВА

Као алтернативе дефинисано је осам варијантних решења укрснице Мали Иђош Поље и то:

- 1) А₁ – Укрсница у постојећем стању без икаквих модификација,
- 2) А₂ – Укрсница са два гранична колосечна сигнала уграђена на различитим колосецима у оба смера,
- 3) А₃ – Укрсница са четири гранична колосечна сигнала уграђена на оба колосека у оба смера,
- 4) А₄ – Укрсница са два кратка штитна колосека уграђена на различитим колосецима у оба смера,
- 5) А₅ – Укрсница са четири кратка штитна колосека уграђена на оба колосека у оба смера,
- 6) А₆ – Продужена укрсница без средишњих попречних веза,
- 7) А₇ – Продужена укрсница са средишњим попречним везама,
- 8) А₈ – Смакнута укрсница.

Укрсница у постојећем стању поседује само две просте једноструке скретнице и два колосека на чијим крајевима се налазе излазни сигнали. У овој варијанти не постоји могућност једновременог уласка возова већ се супротни воз може примити у укрсницу тек по разрешењу (опозиву) пута претрчавања укрсног воза.

Укрсница са два гранична колосечна сигнала уграђена на различитим колосецима осим две просте једноструке скретнице и два колосека на чијим се крајевима налазе излазни сигнали, поседује још и два гранична колосечна сигнала уграђена на различитим колосецима на 50 m испред излазних сигнала. Ови сигнали омогућавају једновремени улазак возова у укрсницу, али само из једног смера односно на колосеке опремљене граничним колосечним сигналимa.

Укрсница са четири гранична колосечна сигнала у односу на претходну алтернативу поседује још два гранична колосечна сигнала па у овој варијанти постоје гранични колосечни сигнали на оба колосека у оба смера. Овим се омогућава једновремени улазак возова из оба смера.

Укрсница са два штитна колосека у односу на постојеће стање поседује два штитна колосека уграђена на крајевима различитих колосека чиме се као и код варијанте са граничним колосечним сигналимa омогућава једновремени улазак возова само из једног смера односно само на колосеке опремљене кратким штитним колосецима.

Укрсница са четири штитна колосека у односу на претходну варијанту поседује и штитне колосеке на крајевима преосталих станичних колосека чиме се омогућава једновремени улазак возова на оба колосека из оба смера.

Продужена укрсница без средишњих попречних веза представља продужетак постојећег решења чиме се добијају колосеци дужине два просторна одсека. На крајевима колосека такође постоје два штитна колосека, по један за оба смера.

Продужена укрсница са средишњим попречним везама за разлику од претходног решења поседује и попречне колосечне везе на средини укрснице чиме се омогућава прелазак возова са једног колосека на други унутар саме укрснице.

Смакнута укрсница представља комбинацију класичне укрснице са три колосека и продужене укрснице. Померањем једног од колосека тако да почетак једног колосека буде у непосредној близини краја другог добијамо укрсницу која по функционалности има особине класичне укрснице са три колосека а по дужини је блиска продуженој укрсници.

На основу дефинисаних алтернатива и критеријума дефинише се почетна матрица одлучивања, где су приказане вредности сваког критеријума за сваку алтернативу. Почетна матрица одлучивања приказана је у табели 7.1.

Табела 7.1 Почетна матрица одлучивања

Алтернатива	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
A ₁	22,3	16,27	1	3
A ₂	19,4	3,6	3	1
A ₃	19,17	3,67	3	1
A ₄	18,87	4,17	5	5
A ₅	18,67	3,9	5	9
A ₆	18,57	0,8	7	5
A ₇	17,03	1,7	9	5
A ₈	16,67	1,43	9	7

7.3.3. ПРОРАЧУН ТЕЖИНСКИХ КОЕФИЦИЈЕНАТА КРИТЕРИЈУМА

У овом делу биће представљен начин одређивања тежинских коефицијената на основу три методе, *FUCOM*, *CRITIC* и *ENTROPY*, представљене у поглављу 7.1.

Применом *FUCOM* методе тежински коефицијенти критеријума добијени су праћењем корака алгорита из поглавља 7.1.1. док су значајности критеријума дефинисне на основу разговора са експертима из области железничког саобраћаја.

Корак 1. Рангирање критеријума на основу значајности критеријума

$$C_2 > C_4 > C_3 > C_1 \quad (7.33)$$

Из корака 1 може се видети да највећи значај има критеријум K₂ односно број задржавања возова на улазном сигналу укрснице док је најмање значајан критеријум K₁ тј. број задржавања возова у укрсници.

Корак 2. У овом кораку врши се поређење критеријума у односу на прворангирани критеријум K₂. Поређење се заснива на скали [1-4]. Значајност критеријума представљена је у табели 7.2.

Табела 7.2 Значајност критеријума

Критеријум	C ₂	C ₄	C ₃	C ₁
$\omega C_{j(k)}$	1	1,7	2,4	3,8

На основу дефинисаних значајности критеријума у односу на најзначајнији критеријум, израчунати су компаративни приоритети критеријума.

$$\varphi_{2/4} = \frac{1,7}{1} = 1,70, \varphi_{4/3} = \frac{2,4}{1,7} = 1,41, \varphi_{3/1} = \frac{3,8}{2,4} = 1,583$$

Корак 3. Израчунавање коначних вредности тежинских коефицијената оцењених критеријума.

Да би добили коначне вредности тежинских коефицијената критеријума, морају бити задовољена два услова:

- коначне вредности тежинских коефицијената морају да задовоље услов из једначине (7.4).

$$\frac{\omega_2}{\omega_4} = 1,70, \frac{\omega_4}{\omega_3} = 1,41, \frac{\omega_3}{\omega_1} = 1,583$$

- поред услова (7.4), коначне вредности тежинских коефицијената треба да задовоље услов математичке транзитивности (7.5).

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = 1,70 \times 1,41 = 2,397, \frac{\omega_4}{\omega_1} = 1,41 \times 1,583 = 2,232$$

Коришћењем једначине (7.6) можемо дефинисати коначан модел за одређивање вредности тежинских коефицијената критеријума.

$$\begin{aligned} \min \chi \\ \left| \frac{\omega_2}{\omega_4} - 1,70 \right| \leq \chi, \left| \frac{\omega_4}{\omega_3} - 1,41 \right| \leq \chi, \left| \frac{\omega_3}{\omega_1} - 1,583 \right| \leq \chi, \\ \left| \frac{\omega_2}{\omega_3} - 2,397 \right| \leq \chi, \left| \frac{\omega_4}{\omega_1} - 2,232 \right| \leq \chi, \\ \sum_{j=1}^4 \omega_j = 1; \omega_j \geq 0, \forall j \end{aligned}$$

Решавањем модела добијају се коначне вредности тежинских коефицијената приказаних у табели 7.3 (0,1161; 0,4407; 0,1838; 0,2592)^T и вредност DFC-а који износи $\chi=0,000075$. Модел је решаван применом софтвера *Lingo 18.0*.

Табела 7.3 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом FUCOM методе

Критеријум	C ₂	C ₄	C ₃	C ₁
ω_j	0,4407	0,2592	0,1838	0,1161

На основу табеле 7.3, може се видети да је најзначајнији критеријум C₂ значајнији за око 1,7 пута од другог критеријума по значајности (C₄), док су остала два критеријума приближнија по значајности.

Вредности тежинских коефицијената критеријума применом CRITIC методе одређене су применом корака алгоритма из поглавља 7.1.2. На основу једначине (7.9) одређена је нормализација почетне матрице одлучивања и добијене вредности приказане су у табели 7.4.

Табела 7.4 Нормализована матрица одлучивања применом CRITIC методе

Алтернатива	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
A ₁	1,000	1,000	0,000	0,250
A ₂	0,485	0,181	0,250	0,000
A ₃	0,444	0,186	0,250	0,000
A ₄	0,391	0,218	0,500	0,500
A ₅	0,355	0,200	0,500	1,000
A ₆	0,337	0,000	0,750	0,500
A ₇	0,064	0,061	1,000	0,500
A ₈	0,000	0,042	1,000	0,750

Применом једначина (7.10 – 7.12) одређене су вредности конфликтности сваког од критеријума у односу на све остале критеријуме, стандардно одступање σ_j и количина информација C_j . Вредности стандардног одступања по критеријумима износе (0,304; 0,320; 0,364; 0,347) за сваки критеријум респективно.

Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом *CRITIC* методе прорачунате су на основу једначине (7.13) и приказане су у табели 7.5.

Табела 7.5 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом *CRITIC* методе

Критеријум	c_j	w_j
C_1	1,0622	0,2293
C_2	0,9934	0,2145
C_3	1,4838	0,3203
C_4	1,0929	0,2359

Из табеле 7.5 можемо видети коначне вредности C_j односно w_j за сваки критеријум. Применом ове методе вредности тежинских коефицијената су приближније односно крећу се у распону од 0,21 до 0,32. Најзначајнији критеријум је C_3 а најмање значајан је критеријум C_2 .

Вредности тежинских коефицијената критеријума применом *ENTROPY* методе одређене су применом корака алгоритма из поглавља 7.1.3. На основу једначине (7.14) одређена је ентропија E_j свих алтернатива. На основу једначина (7.15) и (7.16) одређене су вредности комплемента ентропије d_j и коначне вредности тежинских коефицијената w_j што је приказано у табели 7.6.

Табела 7.6 Коначне вредности тежинских коефицијената критеријума применом *ENTROPY* методе

Тежински коефицијент	C_1	C_2	C_3	C_4
e_j	0,998	0,807	0,929	0,911
d_j	0,002	0,193	0,071	0,089
w_j	0,0048	0,5434	0,2003	0,2515

Табела 7.6 приказује вредности ентропије и комплемента ентропије сваког критеријума на основу кога су израчунате коначне вредности тежинских коефицијената критеријума. Применом ове методе најзначајнији критеријум је C_2 док је најмање значајан критеријум C_1 .

Поређењем резултата добијених применом све три методе можемо да закључимо да је критеријум C_2 најзначајнији код две методе док је код треће методе (*CRITIC*) на последњем месту, иако су у ток случају изузетно мале разлике у вредностима w_j другог и трећег критеријума. Критеријум C_2 налази се на другом месту код све три варијанте док се критеријум C_1 налази у два случаја на трећем а у једном случају на последњем месту. Критеријум C_3 је такође код *FUCOM* и *ENTROPY* методе на последњем или претпоследњем месту док је код *CRITIC* методе на првом месту.

Разлика у вредностима по методама значајно одступа између *CRITIC* и остале две методе из разлога што се методологија и алгоритми ових метода значајно разликују. Вредности тежинских коефицијената за све три методе приказане су у табели 7.7.

Табела 7.7 Вредности тежинских коефицијената критеријума по методама

w_j	C_1	C_2	C_3	C_4
FUCOM	0,1161	0,4407	0,1838	0,2592
ENTROPIJA	0,0048	0,5434	0,2003	0,2515
CRITIC	0,2293	0,2145	0,3203	0,2359

7.3.4. ВРЕДНОВАЊЕ ВАРИЈАНТНИХ РЕШЕЊА

TOPSIS метода

На основу почетне матрице одлучивања применом *TOPSIS* методе извршено је вредновање варијантних решења и рангирање алтернатива према критеријумима. У кораку 1 ове методе извршена је нормализација почетне матрице одлучивања применом једначине (7.17) што је приказано у табели 7.8.

Табела 7.8 Нормализована матрица одлучивања R

Алтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	0,4171	0,8966	0,0598	0,2041
A_2	0,3629	0,1984	0,1793	0,0680
A_3	0,3586	0,2022	0,1793	0,0680
A_4	0,3529	0,2298	0,2988	0,3402
A_5	0,3492	0,2149	0,2988	0,6124
A_6	0,3473	0,0441	0,4183	0,3402
A_7	0,3185	0,0937	0,5379	0,3402
A_8	0,3118	0,0788	0,5379	0,4763

Други корак је отежавање нормализоване матрице односно укључивање тежинских критеријума у матрицу одлучивања применом једначине (7.18). Основни модел користи тежинске коефицијенте критеријума добијене применом *FUCOM* методе, док се тежински коефицијенти добијени применом осталих метода користе за анализу осетљивости добијених резултата. Отежана нормализована матрица приказана је у табели 7.9.

Табела 7.9 Отежана нормализована матрица одлучивања V

Алтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	0,0484	0,3951	0,0110	0,0529
A_2	0,0421	0,0874	0,0330	0,0176
A_3	0,0416	0,0891	0,0330	0,0176
A_4	0,0410	0,1013	0,0549	0,0882
A_5	0,0405	0,0947	0,0549	0,1587
A_6	0,0403	0,0194	0,0769	0,0882
A_7	0,0370	0,0413	0,0989	0,0882
A_8	0,0362	0,0347	0,0989	0,1235

У трећем кораку *TOPSIS* методе одређује се идеално и антиидеално решење применом једначина (7.19) и (7.20). Идеално решење A^+ има вредности (0,0362; 0,0194; 0,0110; 0,1587) док антиидеално решење A^- има вредности (0,0484; 0,3951; 0,0989; 0,0176).

У четвртом кораку се рачуна удаљеност алтернатива од идеалног и антиидеалног решења (7.21), док је пети корак посвећен израчунавању релативне блискости алтернатива идеалном решењу (7.22). Последњи корак је налажење решења и рангирање алтернатива (7.23). Ове вредности приказане су у табели 7.10.

Табела 7.10 Удаљеност алтернатива од идеалног и антиидеалног решења, релативна блискост идеалном решењу и коначан ранг алтернатива

Алтернатива	S^+	S^-	C_i	Ранг
A_1	0,39050	0,0947	0,1952	8
A_2	0,15827	0,3147	0,6654	6
A_3	0,15899	0,3131	0,6632	7
A_4	0,11674	0,3055	0,7235	5
A_5	0,08727	0,3349	0,7933	3
A_6	0,09663	0,3830	0,7985	1
A_7	0,11479	0,3610	0,7587	4
A_8	0,09592	0,3758	0,7967	2

Предложени модел вишекритеријумског одлучивања представљен у овом поглављу користи *FUCOM* методу за прорачун тежинских коефицијената критеријума и *TOPSIS* методу за израчунавање коначног ранга алтернатива. Резултати добијени применом наведеног модела показују да је алтернатива шест најбоље решење – продужена укрсница без средишњих попречних веза.

МABAC метода

Након формирања почетне матрице одлучивања, што представља први корак МABAC методе, врши се нормализација елемената почетне матрице и одређивање нормализоване матрице одлучивања R . Елементи ове матрице се рачунају према једначинама (7.27 – 7.32) што је приказано у табели 7.11.

Табела 7.11 Нормализована матрица одлучивања R

Алтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	0	0	1	0,25
A_2	0,515098	0,819005	0,75	0
A_3	0,55595	0,81448	0,75	0
A_4	0,609236	0,782159	0,5	0,5
A_5	0,64476	0,799612	0,5	1
A_6	0,662522	1	0,25	0,5
A_7	0,936057	0,941823	0	0,5
A_8	1	0,959276	0	0,75

Трећи корак је израчунавање отежане матрице која је представљена у табели 7.12.

Табела 7.12 Отежана матрица одлучивања V

Алтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	0,1161	0,4407	0,3676	0,3240
A_2	0,1759	0,8016	0,3217	0,2592
A_3	0,1806	0,7996	0,3217	0,2592
A_4	0,1868	0,7854	0,2757	0,3888
A_5	0,1910	0,7931	0,2757	0,5184
A_6	0,1930	0,8814	0,2298	0,3888
A_7	0,2248	0,8558	0,1838	0,3888
A_8	0,2322	0,8635	0,1838	0,4536

Четврти корак је одређивање матрице граничних апроксимативних области (G), при чему се гранична апроксимативна област израчунава на основу (7.24) и добијене вредности су (0,1842; 0,7628; 0,2623; 0,3629). Израчунавање матрице удаљености алтернатива од граничне апроксимативне области Q представљено је у табели 7.13.

Табела 7.13 Матрица удаљености алтернатива од граничне апроксимативне области Q

Алтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	-0,0681	-0,3221	0,1053	-0,0389
A_2	-0,0083	0,0389	0,0593	-0,1037
A_3	-0,0036	0,0369	0,0593	-0,1037
A_4	0,0026	0,0226	0,0134	0,0259
A_5	0,0067	0,0303	0,0134	0,1555
A_6	0,0088	0,1186	-0,0326	0,0259
A_7	0,0406	0,0930	-0,0785	0,0259
A_8	0,0480	0,1007	-0,0785	0,0907

Последњи корак је рангирање алтернатива, који се добија применом једначине (7.25) и приказан је табелом 7.14.

Табела 7.14 Рангирање алтернатива

Алтернатива	S_i	Ранг
A_1	-0,3238	8
A_2	-0,0138	7
A_3	-0,0111	6
A_4	0,0645	5
A_5	0,2059	1
A_6	0,1207	3
A_7	0,0809	4
A_8	0,1608	2

Применом *MABAC* методе добијени су рангови алтернатива укрснице. У поређењу са *TOPSIS* моделом, у овом случају најпогоднија је алтернатива A_5 - Укрсница са четири кратка штитна колосека уграђена на оба колосека у оба смера, док се алтернатива A_6 која је код *TOPSIS* методе била најбоља у овом случају налази на трећем месту. Ранг алтернатива $A_1 - A_4$ је непромењен код обе методе односно ове методе се налазе од петог до осмог места. Алтернатива A_7 је у оба случаја на четвртном месту док је алтернатива A_8 друга код оба модела.

Анализа резултата показала је да добијени рангови алтернатива применом *TOPSIS* – *FUCOM* и *MABAC* – *FUCOM* модела имају велику корелацију и да одговарају реалном стању на терену што је детаљније представљено у наредном поглављу анализа осетљивости и дискусија резултата.

7.3.5. АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ВИШЕКРИТЕРИЈУМСКОГ ОДЛУЧИВАЊА И АНАЛИЗА ОСЕТЉИВОСТИ

Након одређивања рангова алтернатива свих вишекритеријумских модела, односно добијања резултата потребно је извршити тестирања модела на промене појединих улазних параметара. Тестирање валидности резултата врши се кроз анализу осетљивости како би се са сигурношћу могло тврдити да се резултат може применити у пракси. Извршена анализа осетљивости резултата испитује стабилност добијеног решења на два начина. Први начин је испитивање стабилности решења на промене вредности тежинских коефицијената

критеријума како би се увидело како и колико тежина критеријума утиче на резултате. Други начин представља поређење решења добијених применом различитих вишекритеријумских метода.

Тестирање модела на промене вредности тежинских коефицијената критеријума извршено је применом различитих сценарија приказаних у табели 7.15. Укупан број сценарија је 8 (S_0 - S_7). Сценарио S_0 представља основни модел са којим се пореде остале вредности. Сценарији S_1 и S_2 представљају вредности тежинских коефицијената критеријума добијени *ENTROPY* и *CRITIC* методама. Сценарији S_3 – S_6 приказују промену рангова алтернатива у случајевима када један критеријум има значајно већу важност у односу на остале (на пр. S_3 - критеријум K_1 има вредност 0,7 а сви остали имају вредност 0,1). Сценарио S_7 значи да сви критеријуми имају једнаку вредност која износи 0,25.

Табела 7.15 Сценарији за различите вредности тежинских коефицијената критеријума

Сценарио	C_1	C_2	C_3	C_4
S_0 FUCOM	0,1161	0,4407	0,1838	0,2592
S_1 ENTROPIJA	0,0048	0,5434	0,2003	0,2515
S_2 CRITIC	0,2293	0,2145	0,3203	0,2359
S_3 Приоритет критеријума K_1	0,7	0,1	0,1	0,1
S_4 Приоритет критеријума K_2	0,1	0,7	0,1	0,1
S_5 Приоритет критеријума K_3	0,1	0,1	0,7	0,1
S_6 Приоритет критеријума K_4	0,1	0,1	0,1	0,7
S_7 Подједнак значај	0,25	0,25	0,25	0,25

На основу дефинисаних сценарија извршено је тестирање *TOPSIS* модела и резултати су представљени табелом 7.16.

Табела 7.16 Рангирање алтернатива применом *TOPSIS* методе за различите сценарије

Алтернатива	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
A_1	8	8	8	8	8	1	6	8
A_2	6	6	4	7	4	2	7	6
A_3	7	7	5	6	6	3	8	7
A_4	5	5	2	5	7	5	4	3
A_5	3	3	1	1	5	4	1	2
A_6	1	1	3	3	1	6	3	1
A_7	4	4	7	4	3	8	5	5
A_8	2	2	6	2	2	7	2	4

Рангирање алтернатива за различите сценарије представљено је у табели 7.16. Анализирањем добијених решења приметно је да постоји велика стабилност решења. Алтернатива A_6 налази се на првом месту у 50% случајева (4/8 сценарија) док се у три сценарија налази на трећем месту. Алтернатива A_8 је такође добро рангирана и налази се на другом месту у 62,5% случајева (5/8 сценарија). Са друге стране најлошије је рангирана алтернатива A_1 која представља постојеће решење укрснице. Нешто боље су рангиране алтернативе A_2 и A_3 односно варијанте са једним и два гранична колосечна сигнала.

На основу дефинисаних сценарија извршено је тестирање *MABAC* модела и резултати су представљени табелом 7.17.

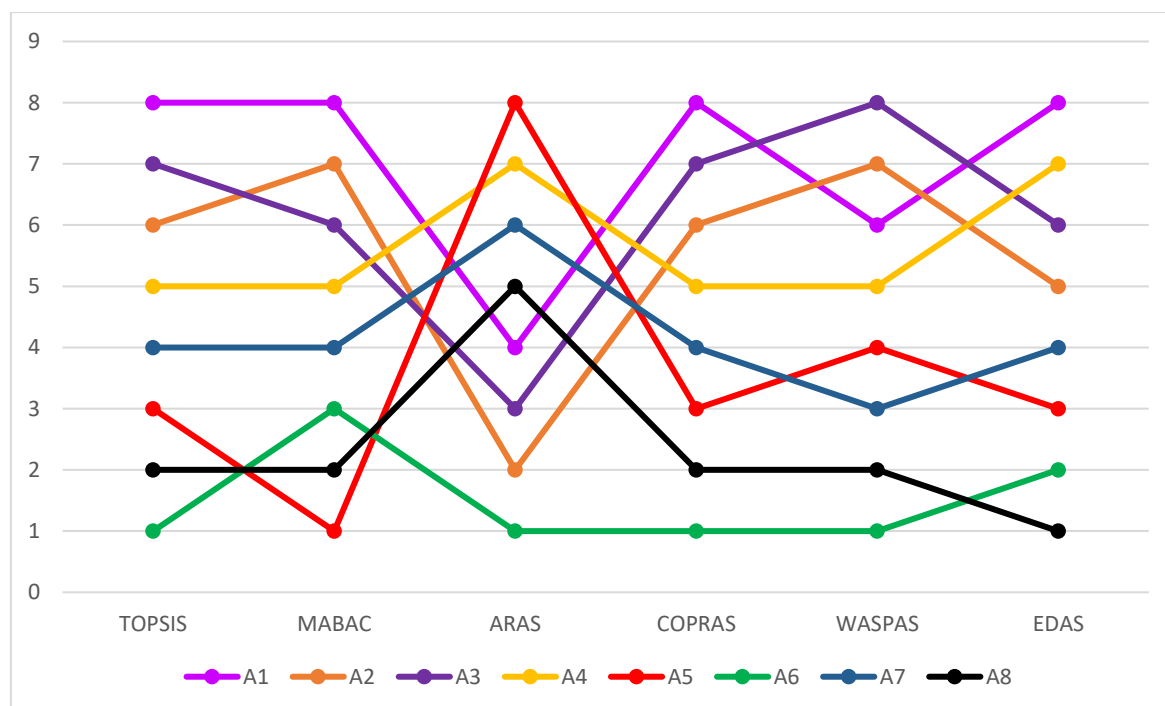
Табела 7.17 Рангирање алтернатива применом MABAC методе за различите сценарије

Алтернатива	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
A ₁	8	8	8	8	8	1	6	8
A ₂	7	6	7	7	7	3	8	7
A ₃	6	7	5	6	6	2	7	6
A ₄	5	4	3	5	5	5	4	4
A ₅	1	1	1	3	4	4	1	1
A ₆	3	2	4	4	2	6	3	3
A ₇	4	5	6	2	3	8	5	5
A ₈	2	3	2	1	1	7	2	2

Други начин тестирања добијених решења извршен је поређењем два предложена модела са неколико других вишекритеријумских метода ARAS, COPRAS, WASPAS и EDAS што је представљено табелом 7.18 и сликом 7.1.

Табела 7.18 Упоредна анализа резултата применом различитих метода

Алтернатива	TOPSIS	MABAC	ARAS	COPRAS	WASPAS	EDAS
A ₁	8	8	4	8	6	8
A ₂	6	7	2	6	7	5
A ₃	7	6	3	7	8	6
A ₄	5	5	7	5	5	7
A ₅	3	1	8	3	4	3
A ₆	1	3	1	1	1	2
A ₇	4	4	6	4	3	4
A ₈	2	2	5	2	2	1



Слика 7.1 Рангови алтернатива за различите методе

Као што се са графика може видети стабилност решења при задатим параметрима је скоро у потпуности задовољена. Код већине метода алтернатива A_6 налази се на првом месту осим код *MABAC* методе где је на трећем и *EDAS* методе где је на другом месту. Алтернатива A_6 такође је на високим местима за све методе осим *ARAS* где је на петом. Са друге стране најлошије је рангирана алтернатива A_1 која представља постојеће решење укрснице што је и очекивано. Нешто боље су рангиране алтернативе A_2 и A_3 односно варијанте са једним и два гранична колосечна сигнала.

7.4 РЕЗИМЕ

У овом поглављу приказано је рангирање алтернатива методом виšekритеријумског одлучивања. За одређивање тежинских коефицијената коришћене су *FUCOM* (*Full Consistency Method*), *CRITIC* (*Criteria Importance Through Intercriteria Correlation*) и *Entropy* метода док су за рангирање алтернатива коришћене *TOPSIS* (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) и *MABAC* (*Multi Atribute Border Approximation area Comparison*) метода. Као алтернативе су посматране свих осам варијантних решења укрсница а за критеријуме су узети просечан број задржавања у укрсници, просечан број задржавања на улазном сигналу укрснице, трошкови инвестиција и безбедност. Задржавања возова су посматрана за случај 100 возова дневно што је приближно теоријској пропусној моћи деонице.

Резултати су показали да је најповољније решење по овим критеријумима варијанта продужене укрснице без средишњих попречних веза. Ову варијанту карактеришу најмања задржавања на улазном сигналу од свих варијанти, задржавања у укрсници која су такође међу најкраћима а карактеришу је и просечан ниво инвестиција и безбедности. Добро је оцењена и варијанта смакнуте укрснице код које су задржавања нешто дужа, али је степен безбедности већи. Са друге стране најнеповољније решење је укрсница у постојећем стању што је и очекиван резултат. Нешто боље су рангиране варијанте са два односно четири гранична колосечна сигнала које карактеришу краћа задржавања у односу на постојеће стање али и мањи степен безбедности. Као просечан резултат имамо варијанте са два или четири кратка штитна колосека које карактерише већа безбедност али и већи трошкови инвестиција и одржавања. Нешто боље је рангирана варијанта продужене укрснице са средишњим попречним везама коју карактеришу још краћа задржавања али и највећи трошкови инвестиција од свих посматраних варијантних решења.

8. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ БУДУЋЕГ ИСТРАЖИВАЊА

У овом раду приказане су укрснице, њихова улога, значај, врсте, варијантна решења као и проналажење оптималног варијантног решења укрснице применом симулационог моделирања и вишекритеријумског одлучивања. Дата је анализа укрсница као важних службених места на једноколосечним пругама, њихова улога, основни елементи и делови као и варијантна решења у примени. За свако варијантно решење дате су предности и мане као и могућности примене. Представљене су теоријске основе симулационог моделирања, типови симулационих модела, предности и недостаци симулационих моделирања као и процеси валидације и верификације. Посебан осврт је дат на примену симулационог моделирања у железничком саобраћају. Приказане су теоријске основе Петри мрежа као и њихова примена у симулацијама са нагласком на симулације железничке инфраструктуре и саобраћаја возова. Као пример примене Петри мрежа дат је симулациони модел деонице једноколосечне пруге Хрпеље-Козина – Копер у Словенији. Овај модел је у наредном делу модификован и проширен за деоницу пруге Врбас – Жедник како би се извршило поређење различитих варијантних решења укрснице Мали Иђош Поље. Резултати симулационих модела су коришћени као улазни податак за моделе вишекритеријумског одлучивања.

Главни допринос овог рада је развој симулационог модела деонице једноколосечне пруге применом Петри мрежа. Како би модел успешно, без загушења и непотребних задржавања регулисао саобраћај возова развијен је као засебна целина диспечерски подсистем. Овај подсистем у реалном времену проверава расположиви капацитет службених места односно број слободних колосека по смеровима и на основу тога дозвољава или забрањује излазне вожње из суседних службених места. Допринос овог рада се огледа и у анализи укрсница и њихових варијантних решења у примени што представља недовољно истражену тему у досадашњим истраживањима. Применом одговарајућег варијантног решења могуће је смањењем заустављања и скраћивањем станичних интервала повећати пропусну моћ деонице једноколосечне пруге чиме се омогућава максимално искоришћење постојећих капацитета.

Резултати добијени симулационим моделима су употребљени као улазни податак за модел вишекритеријумског одлучивања. Коришћено је неколико метода за осам варијантних решења укрсница и четири критеријума: задржавања у укрсници и на улазном сигналу, трошкови инвестиција и безбедност. Добијени резултати као најповољније решење дају варијанту продужене укрснице без средишњих попречних веза. Код овог решења су задржавања у самој укрсници као и испред укрснице минимална док су инвестиције на прихватљиво ниском нивоу уз висок степен безбедности. Добијено најповољније решење продужене укрснице без попречних веза је у суштини класична укрсница повећане дужине где један колосек чине два просторна одсека уз два кратка слепа колосека ради повећања безбедности.

Као правац будућег истраживања може се размотрити оптимална дужину продужене укрснице односно број блок одсека на једном колосеку. Пошто решење продужене укрснице у суштини представља зачетак двоколосечне пруге будућа истраживања би се требала позабавити редоследом, правцем односно деоницом на којој ће се вршити продужавање укрсница као и на којим деоницама би пруга остала једноколосечна. Осим варијанте продужене укрснице без средишњих попречних веза требало би додатно анализирати и варијанте продужене укрснице са попречним средишњим везама као и смакнуте укрснице које су у овом истраживању такође добро оцењене. На тај начин би се уз ниже трошкове инвестиција у односу на комплетно дуплирање колосека могла добити једноколосечна пруга карактеристика и пропусне моћи блиске двоколосечној прузи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Atanasov, I., Dick, C. T. (2015a). Influence of Siding Connection Length, Position, and Order on the Incremental Capacity of Transitioning from Single to Double Track. *TRB 94th Annual Meeting*, Washington DC, USA.
2. Atanasov, I., Dick, C. T. (2015b). Delay and Required Infrastructure Investment to Operate Long Freight Trains on Single-Track Railways with Short Sidings. *Proceedings of IHHA 2015 Conference*, Perth, Australia.
3. Barber, F., Abril, M., Salido, M. A., Ingolotti, L., Tormos, P., Lova, A. (2007). Survey of automated Systems for Railway Management. *Technical Report DSIC-II/01/07*. Technical University of Valencia.
4. Basten, T., Bol, R., Voorhoeve, M. (1995). Simulating and Analyzing Railway Interlockings in ExSpect. *IEEE Parallel & Distributed Technology: Systems & Applications*, 3, 50-62.
5. Božanić, D., Pamučar, D., Karović, S. (2016). Use of the fuzzy AHP - MABAC hybrid model in ranking potential locations for preparing laying-up positions. *Vojnotehnički glasnik*, 64 (3), 705-729.
6. Burdet, R. L. (2016). Optimisation models for expanding a railway's theoretical capacity. *European Journal of Operational Research*, 251, Issue 3, 783-797.
7. Burkolter, D. M. (2005). *Capacity of Railways in Station Areas using Petri Nets*. Doctor of Sciences Thesis, Institute Of Technology Zurich.
8. Castillo, E., Gallego, I., Cambonero, S. S., Menendez, J. M., Rivas, A., Grande, Z. (2015). An Alternate Double-Single Track Proposal for High-Speed Peripheral Railway Lines. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 30, 181-201.
9. Čičak, M. (2003). *Modeliranje u železničkom saobraćaju*, Saobraćajni fakultet, Beograd.
10. D'Ariano, A., Pacciarelli, D., Pranzo, M. (2008). Assessment of flexible timetables in real-time traffic management of a railway bottleneck. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16, 232-245.
11. Dimitrijević, B. (2017). *Višeatributivno odlučivanje*. Saobraćajni fakultet, Beograd.
12. Ероп, С. (2003). *Организација и технологија железничког саобраћаја*, Саобраћајни факултет, Београд.
13. Fanti, M. P., Giua, A., Seatzu, C. (2006). Monitor design for colored Petri nets: An application to deadlock prevention in railway networks. *Control Engineering Practice*, 14, 1231-1247.
14. Филипов, М. М., Уздин, М. М., Ефименко, Ю. И. (1991). *Железные дороги. Общий курс*, Транспорт, Москва.
15. Frank, O. (1966). Two-way traffic on a single line of railway, Royal Institute of Technology, Stockholm.
16. Fransoo, J. C., Bertrand, W. M. Van den Berg, J. H. (1995). An aggregate model for the evaluation of railroad passing constructions, *Research Report TUE/BDK/LBS/95-01*, University of Technology Eindhoven.
17. Hansen, I. A., Pachl, J., Albrecht, T. (2008). *Railway timetable & traffic: analysis, modelling, simulation*, Eurailpress, Hamburg.
18. Harrod, S. (2009). Capacity factors of a mixed speed railway network. *Transportation Research Part E*, 45, 830-841.
19. Harrod, S. (2007). *Railway Capacity Management and Planning*. PhD Thessis, University of Cincinnati.
20. Higgins, A., Kozan, E., Ferreira, L. (1996). Modelling the number and location of sidings on a single line railway. *Computers & Operations Research*, 24, 209-220.
21. Hruz, B., Zhou, M. (2007). *Timed and High-level Petri Nets Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems*. Springer, London.
22. Hwang, C. L., Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and Applications*. Springer, New York.

23. Ивић, М. (2005). *Железничке пруге и станице, постројења за везу колосека*, Саобраћајни факултет, Београд.
24. ISO/IEC. Software and Systems Engineering - High-level Petri Nets, Part 1: Concepts, Definitions and Graphical Notation, *International Standard ISO/IEC 15909*, December 2004.
25. Janjić, S. (1983). *Železničke stanice 1*. Građevinski fakultet, Beograd.
26. Jamili, A. (2018). Computation of practical capacity in single-track railway lines based on computing the minimum buffer times, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8, Issue 2, 91-102.
27. Jensen, K. (1991). Coloured petri nets: A high level language for system design and analysis. In: Rozenberg, G. (ed.) *Advances in Petri Nets 1990*. Springer Berlin / Heidelberg.
28. Jeremić, D. (2010). Utvrđivanje konfliktnih tačaka i parametara rada stanice Mjölby simulacionim modelom Petri mreža, *Diplomski rad*, Saobraćajni fakultet, Beograd.
29. Jeremić, D., Milinković, S., Kasalica, S., (2021). Simulating Train Dispatching Logic with High-Level Petri Nets. *Tehnički vjesnik* 28, 2(2021), 639-648.
30. Jeremić, D., Milosavljević, M., Milinković, S., Vesković, S., Bundalo, Z. (2016). Simulation of a railway mainline junction using High level Petri nets. *Proceedings of 6th International Conference on Information Society and Technology ICIST 2016*, Kopanik, 235-241.
31. Kaakai, F., Hayat, S., El Moudni, A. (2007). A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transit stations. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15, 935-969.
32. Калинин, В. К., Сологуб, Н. К., Казаков, А. А. (1986). *Общий курс железных дорог: Учеб. для сред. ПТУ*. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., Москва.
33. Khan, S. A., Zafar, N. A., Ahmad, F., Islam, S. (2014). Extending Petri net to reduce control strategies of railway interlocking system. *Applied Mathematical Modelling* 38, 413-424.
34. Kluge, O. (2003). Modelling a Railway Crossing with Message Sequence Charts and Petri Nets Petri Net Technology for Communication-Based Systems. In: Ehrig, H., Reisig, W., Rozenberg, G. & Weber, H. (eds.). Springer Berlin / Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-40022-6_10
35. Ковачевић, П. (1976). *Експлоатација железница, књига 1*, Завод за новинско-издавачку и пропагандну делатност ЈЖ, Београд
36. Landex, A. (2008). Methods to estimate railway capacity and passenger delays. *PhD Thesis*, Technical University of Denmark.
37. Landex, A. (2009). Evaluation of Railway Networks with Single Track Operation Using the UIC 406 Capacity Method, *Networks and Spatial Economics* 9: 7. doi:10.1007/s11067-008-9090-7
38. Landex, A., Kaas, A. H., Jacobsen, E. M., Scheneider-Tilli, J. (2007). The UIC 406 capacity method used on single track sections. In *2nd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, Proceedings. Hannover: ISROR.
39. Li, F., Gao, Z., Wang, D. Z.W., Liu, R., Tang, T., Wu, J., Yang, L. (2017). A subjective capacity evaluation model for single-track railway system with δ -balanced traffic and λ -tolerance level, *Transportation Research Part B: Methodological*, 105, 43-66.
40. Li, F., Shey, J.-B., Gao, Z.-Y. (2014). Deadlock analysis, prevention and train optimal mechanism in single-track railway system. *Transportation Research Part B*, 68, 385-414.
41. Lindfelt, O. (2010). Railway operation analysis. Evaluation of quality, infrastructure and timetable on single and double-track lines with analytical models and simulation. *PhD Thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm.
42. Maroti, G. (2006). Operations Research Models for Railway Rolling Stock Planning. *PhD Thesis*, Technische Universiteit Eindhoven.
43. Mattsson, L. G. (2007). Railway Capacity and Train Delay Relationships In: Murray, A. T. & Grubescic, T. H. (eds.) *Critical Infrastructure*. Springer, Berlin / Heidelberg.
44. Milinković, S. (2007). Modeliranje saobraćajnih procesa u složenim sistemima sa rasputnicom. *Magistarska teza*, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet.

45. Milinković, S., Ivić, M., Vesković, S., Marković, M., Pavlović, N. (2012). Simulation Analysis of the Railway Junction Track Layout. *EURO-ŽEL 2012*, 05 - 06.06.2012. Žilina, Slovak Republic.
46. Milinković, S., Marković, M., Vesković, S., Ivić, M., Pavlović, N. (2013). A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 33, 144-157.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.12.005>.
47. Milinković, S., Vesković, S., Marković, M. (2012b). Application of Soft Computing Techniques in Modeling Train Delays. *TRB 91th Annual Meeting*, Washington, DC, USA.
48. Milinković, S., Vesković, S., Marković, M., Ivić, M., Pavlović, N. (2010). Simulation model of a railway junction based on Petri Nets and fuzzy logic. *Selected Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research Society*, 11-15 July, Lisbon, Portugal.
49. Milosavljević, M., Kasalica, S., Tričković G. (2019a). Višekriterijumski FUCOM-MABAC model za izbor železničkih vagon cisterni za prevoz belih derivata nafte. *VII International Symposium New Horizons*, Doboj, BiH, 378-385.
50. Milosavljević, M., Jeremić, D., Milinković, S. (2019b) Selection the best location for RFID wagon monitoring device on Serbian railways based on FUCOM-TOPSIS method and fuzzy set theory, *VIII International Scientific Siberian Transport Forum, International Scientific Siberian Transport Forum - TransSiberia 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing book series*, 1115, 527-539
51. Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77, 541-580.
52. Pachel, J. (2009). *Railway operation and control*, VTD Rail Publishing. Mountlake Terrace, WA, USA
53. Palit, A., Popovic, D. (2005). *Computational Intelligence in Time Series Forecasting: Theory and Engineering Applications (Advances in Industrial Control)*, Springer.
54. Pamučar, D., Stević, Ž., Sremac, S. (2018). A new model for determining weight coefficients of criteria in mcdm models: Full consistency method (fucm). *Symmetry*, 10 (9), 1-22.
55. Pamučar, D., Čirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC). *Expert systems with applications*, 42 (6), 3016-3028.
56. Pedrycz, W., Camargo, H. (2003). Fuzzy timed Petri nets. *Fuzzy Sets and Systems*, 140, 301-330.
57. Petersen, E., Taylor, A. (1987). Design of Single-Track Rail Line for High-Speed Trains. *Transportation Research Part A: General*, 21, No. 1, 47-57.
58. Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Bonn, Institut für Instrumentelle Mathematik.
59. Potehkin, A. I., Branishtov, S. A., Kuznetsov, S. K. (2016). Discrete-Event Models of a Railway Network. *Automation and Remote Control*, 77, No. 2, 344-355.
60. Pouryousef, H., Lautala, P., White, T. (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation*, 23, 1, 30-42.
61. Příbýl, O., Goulias, K. (2003). Application of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Analysis of Travel Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1854, 180-188.
62. Qi, J., Yang, L., Gao, Y., Li, S., Gao, Z., (2016). Integrated multi-track station layout design and train scheduling models on railway corridors. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 91-119.
63. Radenković, B., Stanojević, M., Marković, A. (1999). *Računarska simulacija*, Fakultet organizacionih nauka i Saobraćajni fakultet, Beograd.
64. Ricci, S., Tieri, A. (2008). A Petri Nets Based Decision Support Tool for Railway Traffic Conflicts Forecasting and Resolution. *COMPRAIL'08*, 15-17. September, Toledo, Spain.
65. Shih, M.-C., Dick, C. T., Sogin, S., Barkan, C., (2014). Comparison of Capacity Expansion Strategies for Single-Track Railway Lines with Sparse Sidings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2448, 53-61.

66. Sogin, S., Lai, Y.-C., Dick, C. T., Barkan, C., (2013). Analyzing the Progresion from Single to Double Track Netrworks, *Proceedings of the 2013 Joint Rail Conference*, Knoxville, Tennessee, USA.
67. Соколов, В. К., Жуковский, В. Ф., Котенкова, С. В., Наумов, А. С., (2002). *Общий курс железных дорог*, УМК МПС России, Москва.
68. Teodorovic, D. (1999). Fuzzy logic systems for transportation engineering: the state of the art. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33, 337-364.
69. van der Aalst, W. M. P., Odijk, M. A. (1995). Analysis of railway stations by means of interval timed coloured Petri nets. *Real-Time Systems*, 9, 241-263.
70. Van der Aalst, W. M. P. (1999). ExSpect – User Manual, Deloitte&Touche Bakkeniste, <http://www.exspect.com/ex641usermanual.pdf>
71. Van Hee, K., Rambags, P., Verkoulen, P. (1993). Specification and simulation with ExSpect. In: Lauer, P. (ed.) *Functional Programming, Concurrency, Simulation and Automated Reasoning*. Springer, Berlin / Heidelberg.
72. Vanit-Anunchai S. (2010) Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets. In: Clarke D., Agha G. (eds) *Coordination Models and Languages. COORDINATION 2010. Lecture Notes in Computer Science*, vol 6116. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13414-2_10
73. Vernez, D., Buchs, D., Pierrehumbert, G. (2003). Perspectives in the use of coloured Petri nets for risk analysis and accident modelling. *Safety Science*, 41, 445-463.
74. Virtanen, H. E. (1995.) A study in fuzzy Petri nets and the relationship to fuzzy logic programming. *Reports on Computer Science and Mathematics*.
75. Wang, J. (2007). Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. *Handbook of Dynamic System Modeling*. Chapman and Hall/CRC.
76. Yuan, J., Hansen, I. A. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 202-217.
77. Weik, N., Warg, J., Johansson, I., Bohlin, M., Nießen, N. (2020). Extending UIC 406-based capacity analysis – New approaches for railway nodes and network effects, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 15, 100199, 1-15.

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1 – СОФТВЕР ЗА СИМУЛАЦИЈУ ПЕТРИ МРЕЖА

Табела 9.1. Софтвер за симулацију Петри мрежа

Назив програма	Карактеристике	
	Подржаване Петри мреже	Компоненте
Cosmos Бесплатан	➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Стохастичке симетричне мреже	➤ Брза симулација ➤ Универзални формат фајла ➤ Симулација ретких догађаја
CPN-AMI Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже	➤ Графички едитор ➤ Брза симулација ➤ Структурна анализа ➤ Универзални формат фајла ➤ Сервиси за модуларно моделирање
CPN Tools Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Једноставна анализа перформанси ➤ Универзални формат фајла
ePNK Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Могу се додати нови типови	➤ Графички едитор ➤ Провера модела (за Р/Т мреже) ➤ Могу се додати нове функционалности
ExSpect Комерцијални (бесплатан за академске примене)	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже ➤ Хијерерхија у моделирању	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Једноставна анализа перформанси ➤ Напредна анализа перформанси ➤ Брза израда прототипа ➤ Систем управљања током рада
HiQPN-Tool Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Стохастичке Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Напредна анализа перформанси ➤ Универзални формат фајла
HPSim Бесплатан	➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Једноставна анализа перформанси
HSTPNSim Бесплатан	➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже ➤ Детерминистичке Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Брза симулација

ITS Tools Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Брза симулација
JFern Бесплатан	➤ Објектно орјентисане Петри мреже ➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Једноставна анализа перформанси ➤ Универзални формат фајла
ORIS Бесплатан	➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Напредна анализа перформанси
Petri Net Toolbox Комерцијални (бесплатан за академске примене)	➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже ➤ Генерализоване стохастичке Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Структурна анализа ➤ Једноставна анализа перформанси ➤ Напредна анализа перформанси ➤ Универзални формат фајла
Renew Бесплатан	➤ Објектно орјентисане Петри мреже ➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Универзални формат фајла ➤ Брза израда прототипа ➤ Систем управљања током рада
Snoopy Бесплатан	➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже ➤ Континуалне Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација
TimeNET Комерцијални (бесплатан за академске примене)	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже ➤ Стохастичке Петри мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Брза симулација ➤ Структурна анализа ➤ Једноставна анализа перформанси ➤ Напредна анализа перформанси
Tina Бесплатан	➤ Р/Т мреже ➤ Временске Петри мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена
Wolfgang Бесплатан	➤ Петри мреже високог нивоа ➤ Р/Т мреже	➤ Графички едитор ➤ Анимација токена ➤ Структурна анализа ➤ Универзални формат фајла ➤ Workflow Net Property Analysis

ПРИЛОГ 2 – КАРАКТЕРИСТИКЕ ДЕОНИЦЕ ВРБАС – ЖЕДНИК

Деоница Врбас – Жедник се налази на магистралној прузи (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Чине је четири станице Жедник, Ловћенац, Бачка Топола и Жедник и једна укрсница Мали Иђош Поље. Шематски приказ деонице је приказан на слици 1.

Станица Врбас се налази у km 166+744,75 пруге (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Она је такође одвојна станица за локалну пругу бр. 307 Врбас – Сомбор. Станица има 12 колосека, од којих је трећи главни пролазни колосек, колосеци 2, 4, 5, 6 и 7 су пријемно – отпремни док су преостали колосеци манипулативни. Колосеци 2, 3 и 4 се користе за пријем и отпрему возова за превоз путника па из тог разлога између колосека 2 и 3 као и 3 и 4 постоје ниски перони. У табели 1 приказани су основни подаци о колосецима у станици Врбас.

Табела 9.2. Намена и корисна дужина колосека у станици Врбас

Р. бр.	Корисна дужина (m)		Назив (намена)
	Смер		
	Београд – Суботица	Суботица – Београд	
1.	356	356	магацински
2.	725	662	пријемно – отпремни
3.	943	941	главни пролазни
4.	943	938	пријемно – отпремни
5.	799	795	пријемно – отпремни
5а.	210	210	извлачњак
6.	708	706	пријемно – отпремни
7.	651	636	пријемно – отпремни
8.	627	627	истоварни – војни
9.	125	125	гаражни колосек
10.	254	254	истоварни – вага
11.	240	240	истоварни – башта

Станица Ловћенац налази се у km 128+118,20 пруге (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Станица Ловћенац има четири колосека, од тога су колосеци 2 и 4 пријемно – отпремни, а колосек 3 је главни – пролазни колосек. У табели 2 су приказани основни подаци о колосецима у станици Ловћенац.

Табела 9.3. Намена и корисна дужина колосека у станици Ловћенац

Р. бр.	Корисна дужина (m)		Назив (намена)
	Смер		
	Београд – Суботица	Суботица – Београд	
1.	707	707	манипулативни
2.	705	711	пријемно – отпремни
3.	799	801	главни пролазни
4.	891	891	пријемно – отпремни

Укрсница Мали Иђош Поље налази се у km 136+163,00 пруге (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Укрсница Мали Иђош Поље има два колосека, од тога је колосек 1 пријемно – отпремни, а колосек 2 главни – пролазни колосек. У табели 3 су приказани основни подаци о колосецима у укрсници Мали Иђош Поље.

Табела 9.4. Намена и корисна дужина колосека у Укрсници Мали Иђош Поље

Р. бр.	Корисна дужина (m)		Назив (намена)
	Смер		
	Београд – Суботица	Суботица – Београд	
1.	745	752	пријемно – отпремни
2.	698	691	главни пролазни

Станица Бачка Топола налази се у km 144+198,50 пруге (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Станица Бачка Топола има осам колосека, од тога је колосек 2 главни пролазни колосек, колосеци 3 и 4 су пријемно – отпремни док су остали манипулативни и индустријски. У табели 4 су приказани основни подаци о колосецима у станици Бачка Топола.

Табела 9.5. Намена и корисна дужина колосека у станици Бачка Топола

Р. бр.	Корисна дужина (m)		Назив (намена)
	Смер		
	Београд – Суботица	Суботица – Београд	
1.	561	561	манипулативни
2.	861	871	главни пролазни
3.	826	828	пријемно – отпремни
4.	732	617	пријемно – отпремни
5.	610	610	манипулативни
6.	44	44	манипулативни
7.	162	162	индустријски
8.	153	153	индустријски

Станица Жедник налази се у km 157+818,00 пруге (Београд Центар) – Стара Пазова – Нови Сад – Суботица – државна граница – (Kelebia). Станица Жедник има седам колосека, од тога је колосек 3 главни пролазни колосек, колосеци 2, 4. и 5 су пријемно – отпремни, а остали су манипулативни. У табели 5 су приказани основни подаци о колосецима у станици Жедник.

Табела 9.6. Намена и корисна дужина колосека у станици Жедник

Р. бр.	Корисна дужина (m)		Назив (намена)
	Смер		
	Београд – Суботица	Суботица – Београд	
1.	715	715	манипулативни
2.	722	724	пријемно – отпремни
3.	768	768	главни пролазни
4.	766	766	пријемно – отпремни
5.	679	673	пријемно – отпремни
6а.	224	244	манипулативни
6б.	361	361	манипулативни

Деоница Врбас – Жедник је опремљена аутоматским пружним блоком (АПБ) и саобраћај се врши у блоковном размаку. Све станице су опремљене релејним сигнално – сигурносним уређајима *Westinghouse* и све су поседнуте отправником возова.

Дужина блок одсека се креће у распону од 1250 до 1800 метара при чему су први и последњи блок одсек на сваком међустаничном растојању најкраћи.



Слика 9.1. Шематски приказ деонице Врбас - Жедник

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Душан Јеремић је рођен 29.06.1982 у Ужицу. Основну школу и Гимназију „Миодраг Миловановић Луне“ завршио је у Ужицу. Саобраћајни факултет Универзитета у Београду је уписао 2001. године и дипломирао 2010. године на одсеку за Железнички саобраћај и транспорт са просечном оценом 8,03. У току студија је провео два и по месеца на пракси у Шведској у компанији Banverket задуженој за управљање железничком инфраструктуром где је објавио рад на тему: „Саобраћај кроз одвојну станицу на магистралној прузи – испитивање станице Mjölby“ објављен на web страници Banverket- а. Дипломски рад са темом „Утврђивање конфликтних тачака и параметара рада станице Mjölby симулационим моделом Петри мрежа“ одбранио је код проф. др Милана Марковића са оценом 10.

Од 2012. године ради на Високој железничкој школи струковних студија у Београду као наставник практичне наставе за уже стручне области „Експлоатација железница“ и „Организација железничког превоза“. Од 2018. године ради на Високој железничкој школи струковних студија у Београду као асистент за уже стручне области „Експлоатација железница“, „Саобраћајнице, возила и организација друмског саобраћаја“, Педагошке науке“ и „Логистика“ за предмете: Транспортне и комерцијалне особине робе, Железничке пруге, Железничке станице, Експлоатација железница 1, Експлоатација железница 2, Експлоатација железница 3, Организација превоза опасних материја, Организација јавног превоза путника, Планирање и организација железничког саобраћаја, Интелигентни транспортни системи, Управљање квалитетом у саобраћају, Практична настава и Стручна пракса.

2012. године уписао је Докторске студије на Саобраћајном факултету Универзитета у Београду, на студијском програму Саобраћај и положио следеће испите:

- 1) Одабрана поглавља из Операционих истраживања: математичко програмирање, стохастички модели и њихова примена у саобраћају и транспорту
- 2) Транспортна политика у оквиру стратегије одрживог развоја
- 3) Специјална поглавља из технике управљања возила са електричном вучом
- 4) Савремене физичке методе за контролу и детекцију загађења човекове околине за саобраћајне инжењере
- 5) Менаџмент у саобраћају и комуникацијама
- 6) Информационе технологије у саобраћају
- 7) Физичке основе савремених технологија у саобраћајном инжењерству
- 8) Управљање железничким саобраћајем и транспортом
- 9) Планирање, саобраћајно пројектовање и одржавање инфраструктурних постројења на железници
- 10) Симулационо моделирање

У току 2013. године је обавио приправнички стаж на Железницама Србије у секцији за инфраструктуру чвора Београд и стекао право на самостално обављање послова дипломираног саобраћајног инжењера железничког смера. У досадашњем раду је био аутор или коаутор 12 радова који су објављени у научним и стручним домаћим и међународним часописима, презентовани на домаћим и међународним научним скуповима.