

**АНАЛИТИЧКА МЕТОДА ЗА КОНТРОЛУ ПРОХОДНОСТИ И ПРОРАЧУН
ЕЛЕМЕНАТА СИТУАЦИОНОГ ПЛАНА ПОВРШИНСКИХ РАСКРСНИЦА****ANALYTICAL METHOD FOR VEHICLE SWEEP PATH TESTING AND
CALCULATION OF AT GRADE INTERSECTIONS LAYOUT ELEMENTS**

Марија Долић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ГРАЂЕВИНАРСТВО

Кратак садржај – У оквиру рада приказана је анализа метода за прорачун проходности и прорачун проходности елемената ситуационог плана површинских раскрсница као и експериментална метода одређивања граничних трајекторија.

Кључне речи: Пројектовање путева и раскрсница, анализа проходности возила у кружним кривинама, offtracking

Abstract – The paper presents the analysis of methods for the calculation of the passability and the calculation of the passability elements of the horizontal alignment of at grade intersections, as well as the experimental method of determining the boundary trajectories.

Keywords: Design of roads and intersections, analysis of vehicle passability in roundabouts, offtracking

1. УВОД

При скретању возила малим брзинама задњи точкови возила не прате трајекторије кретања предњих, него се све више заносе ка унутрашњости кривине како возило напредује према крају кривине. Ово постепено заносење задњих точкова ка унутрашњости кривине начешће се дефинише у литератури као “Offtracking” феномен. Највећа “слабост” постојећих математичких модела за прорачун offtracking-а јесте непрецизност при одређивању тачног положаја возила у којем се достиже највеће растојање између граничних трајекторија возила, или на енглеском “Maximum offtracking problem”.

У најширем случају силе отпора које дејствују на возило у кретању могу се поделити на унутрашње и спољашње силе отпора. Под унутрашњим силама отпора подразумевају се све силе које дејствују при преносу снаге од мотора до точка, како инерционе тако и силе трења елемената трансмисије. Стога се ове силе отпора и зову унутрашњим силама. Њихово дејство се може са довољном тачношћу апроксимирати степеном корисности трансмисије, тако да ће се у даљем разматрању узимати као ефективна сила вуче, она која се добија погонским точковима возила.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био доц. др Милош Шешлија.

Уколико се као општи случај претпостави кретање возила устаљеном брзином, на успону уколико то возило вуче приколицу, онда ће се његовом кретању супростављати следеће силе отпора:

- Силе отпора при котрљању R_f
- Силе отпора ваздуха R_v
- Силе отпора при успону R_α ,
- Отпор инерцијалних сила R_i ,
- Сила отпора вуче приколице R_p .

2. СТАБИЛНОСТ ВОЗИЛА

Под стабилношћу возила, у суштини се подразумева способност да се креће задржавајући свој смер кретања без обзира на дејство спољних сила. У том смислу може да се говори о стабилности са аспекта:

- превртање
- проклизавања (попречна)
- дејства центрифугалне силе при вожњи у кривини
- утицаја силе бочног ветра.

2.2. Превртање возила на равном хоризонталном оуту у кривини

Величина центрифугалне силе сразмерна је маси возила и квадрату брзине, а обрнуто пропорционална полупречнику кривине (R), дакле:

$$F_c = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (1)$$

а повећањем угла нагиба коловоза, повећава се и брзина кретања возила.

Да ни при којој брзини кретања не би дошло до превртања, потребно је да израз буде бесконачан, односно да је $h_T - s \cdot \tan \beta = 0$, то јест да угао бочног нагиба коловоза буде:

$$\tan \beta \geq \frac{h_T}{s} \quad (2)$$

У случају коловоза без нагиба ($\beta = 0$), да не би дошло до превртања, потребно је да брзина буде мања од:

$$\frac{v^2}{R} \leq \frac{s \cdot g}{h_T} \rightarrow v_p \leq \sqrt{\frac{g \cdot s \cdot R}{h_T}} \quad (3)$$

2.3. Проклизавање возила на равном хоризонталном путу у кривини

Из горње анализе јасно произилази и закључак да је проклизавање на равном хоризонталном коловозу критичнији случај од случаја када је коловоз са нагибом. Да би дошло до проклизавања тачкова, потребно је да збир хоризонталних реакција тла:

$$Y' + Y'' = \frac{G \cdot v^2}{g \cdot R} \cdot \cos \beta - G \cdot \sin \beta \quad (4)$$

Бочно проклизавање ће наступити када је:

$$\begin{aligned} \frac{v^2}{R} &\geq \frac{g \cdot (\varphi + \tan \beta)}{1 - \varphi \cdot \tan \beta} \rightarrow v_k \\ &\geq \sqrt{\frac{g \cdot R \cdot (\varphi + \tan \beta)}{1 - \varphi \cdot \tan \beta}} \end{aligned} \quad (5)$$

$$t = \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{1 - e^{K\theta s}}{X - K - X - X \cdot e^{K\theta s} - K \cdot e^{K\theta s}} \quad (6)$$

Једначина (6) је најважнија за први сегмент ИСАО-овог математичког модела, јер се из ње рачуна тренутни скретни угао β између подужне осе авиона и тангенте на лук у зависности од угловне координате положаја кабине авиона θ_s над кружном путањом.

$$\ln\left(\tan\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) = \ln\left(\tan\left(\frac{\beta_{max}}{2}\right)\right) - \frac{F}{d} \quad (7)$$

Једначина (7) најважнија је за други сегмент ИСАО-овог математичког модела. У њој је дефинисано како се, у зависности од тренутног скретног угла β_{max} на узлазној тачки кружног лука, може срачунати тренутни скретни угао β у моменту када се кабина авиона налази на одстојању F од ове излазне тачке.

3. ДЕФИНИЦИЈА ФЕНОМЕНА „OFFTRACKING-A“ ПРИ СКРЕТАЊУ ВОЗИЛА

Током скретања друмских возила при малим брзинама предњи тачкви настоје да „вуку“ задње тачкове директно према њима, секући на тај начин унутрашњост кривине у односу на предње при маневрима скретања, дефинише се у литератури на енглеском језику као „offtracking“ феномен. Код дугачких возила као што су аутобуси, камиони и друга тешка теретна возила, величине offtracking-азнатно су веће и предствљају значајан фактор при пројектовању површинских раскрсница, паркинга, прилазних путева, рампи и других саобраћајних површина.

У зависности од брзине кретања возила могу се јавити два типа offtracking-a:

- Појава offtracking-a при кретању возила малим брзинама ($V = 15.00 \text{ km/h}$) (у литератури се најчешће дефинише као „Low-speed offtracking“);
- Појава offtracking-a при кретању возила већим брзинама ($V = 80.0 \text{ km/h}$) (High-speed offtracking).

3.1. ИСАО математички модел за прорачун offtracking-a

Према начину извођења математичких израза за дефинисање положаја авиона (возила), ИСАО математички модел може се јасно поделити на два одвојена сегмента или суб-модела:

- Први, који се бави прорачуном положаја возила (авиона) када оно, крећући се из почетног положаја у којем је осовина возила идеално поравната са улазном тангентом, базном (почетном) тачком круте базе прати кружни лук.
- Други, када базна тачка круте базе возила (авиона) прати праву линију у виду излазне тангенте на крају просте кружне кривине.

4. АНАЛИЗА НАЈПОПУЛАРНИЈИХ КОМЕРЦИЈАЛНИХ СОФТВЕРСКИХ РЕШЕЊА ЗА СИМУЛАЦИЈУ КРЕТАЊА ВОЗИЛА У САД ОКРУЖЕЊУ

У конкретном примеру тестирана су 4 најзаступљенија комерцијална софтверска решења за симулацију кретања и то: AutoTurn, Vehicle Tracking, Autopath PRO I Gavran Civil Modeller-GCM. Као огледно возило изабран је тегљач са полуприколицом, за меродавна возила. Потребне ширине саобраћајне траке за безбедан маневар возила, односно, растојања између граничних трајекторија мерена су на сваком од 9 попречних пресека постављених управо на исцртане водеће путање. Мерења су обављена редом за све изведене симулације кретања.

Резултати мерења сортирани су по попречним пресецима. Детаљнијом анализом резултата мерења може се видети да се највећа одступања у растојањима између граничних трајекторија јављају на месту попречних пресека 6 и 7 када возило почиње да се исправља после изласка из кружне кривине. Анализом свих мерених вредности, може се запазити да се најужа растојања између граничних трајекторија добијају после симулације кретања шлепера са софтверским пакетом GCM++, а затим, редом, са Vehicle Tracking-ом, AutoTurn-оми Autopath-ом.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ МЕТОДЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ГРАНИЧНИХ

Генерално посматрано, постоје два различита технолошка приступа за прецизно мерење простора обухваћеног граничним трајекторијама возила при извођењу реалних маневра:

- технологије или системи који користе возила опремљена специјалним уређајима за детектовање њиховог положаја (GNSS мерни систем);
- системи који не захтевају никакве унапред инсталиране инструменте у возилу (класичне техиметријске и методе базиране на обради видео и фото снимака).

6. АНАЛИЗА ПРИМЕНЕ КОНЦЕПАТА ЕКВИВАЛЕНТНЕ БАЗЕ ЗА ПРОРАЧУН ТРАЈЕКТОРИЈЕ ПОВЛАЧЕЊА КОМБИНОВАНИХ ВОЗИЛА

Тек када су познати положај базне тачке и скретни угао водећег возила, као и одговарајући углови артикулације прикључних возила, могуће је у потпуности дефинисати положај свих слогова комбинованог возила у односу на водећу путању. На основу међусобног поређења трајекторија повлачења од дугачких комбинованих и њихових заменских возила, закључено је следеће:

- Трајекторије повлачења комбинованих и одговарајућих заменских возила у оба случаја не поклапају се идеално;
- Све док се возила крећу дуж кружног одсека водеће путање и почну да се исправљају дуж излазне тангенте, након достизања положаја са максималном вредношћу offtracking-a, трајекторија повлачења заменских возила нису на „страни сигурности“ у односу на трајекторије повлачења комбинованих возила;
- Након што базне тачке заменских возила, мерено од краја кружног лука, пређу растојање приближно једнако дужини тих возила, и даље наставе да прате излазну тангенту све до краја водеће путање, трајекторија повлачења заменских прелаза на „страну сигурности“ у односу на трајекторије повлачења комбинованих возила;
- Код комбинованог возила састављеног од три слога, одступања између трајекторија повлачења комбинованог и заменског возила мања су него између трајекторија повлачења за комбиновано возило са два слога и њему одговарајуће заменско возило;
- Што се комбиновано возило састоји од више слогова приближно једнаке дужине, то ће и одступање између трајекторија повлачења тог комбинованог и њему одговарајућег заменског возила бити мања;
- Комбиновано возило, било са два или три слога, достиже максималну вредност offtracking-a у ситуационо разичитом положају у односу на њему одговарајуће заменско возило.

7. АНАЛИЗА ПОДОБНОСТИ ПРИМЕНЕ ПОСТОЈЕЋИХ ГЕОМЕТРИЈСКИХ ФОРМИ ТРОЦЕНТРИЧНЕ КРИВИНЕ ЗА АПРОКСИМАЦИЈУ ТРАЈЕКТОРИЈА ПОВЛАЧЕЊА И ПРЕДЛОГ НОВЕ

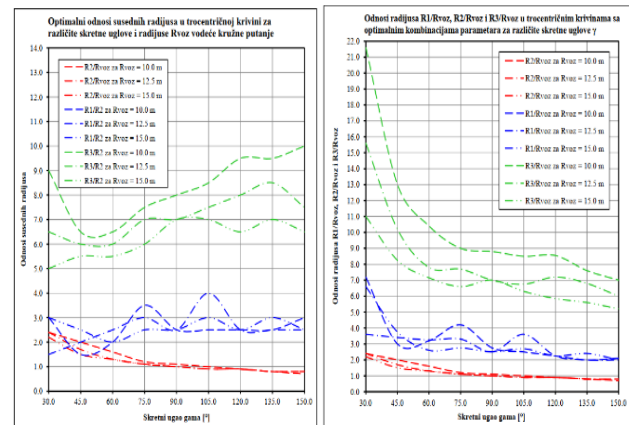
7.1. Геометријске форме троцентричних кривина за апроксимацију трајекторија повлачења соло аутобуса

Прво су одређене комбинације геометријских параметара троцентричних кривина које најмање одступају на „страну сигурности“ од трајекторија повлачења сваког од изабраних возила (соло аутобус,

тегљач са полуприколицом и камион са приколицом) за различите радијусе и скретне углове водећих кружних путања. Потом су срачунате оптималне комбинације геометријских параметара троцентричних кривина које најбоље апроксимирају све трајекторије повлачења појединих типова возила, као и оптимална комбинација параметара „јединствене“ троцентричне кривине за апроксимацију свих трајекторија повлачења од свих возила. Оптималне комбинације геометријских параметара троцентричних кривина срачунате помоћу „3R_OPTIMA“ рутине, које најбоље апроксимирају трајекторије повлачења соло аутобуса за различите радијусе и скретне углове водећих путања, приказане су у табели (1).

Табела 1. Оптималне комбинације геометријских параметара

Rvoz [m]	gama [°]	R1 [m]	R2 [m]	R3 [m]	R1/R2	R2/Rvoz	R3/R2	alpha	BETA	DELTA	R1/Rvoz	R3/Rvoz
10.00	30.00	72.000	24.000	216.000	3.00	2.40	9.00	1.40	4.70	1.40	7.20	21.60
10.00	45.00	10.000	20.000	130.000	1.50	2.00	6.50	1.40	4.70	1.40	3.00	13.00
10.00	60.00	41.000	16.000	164.000	2.00	1.60	8.20	1.00	5.10	1.40	4.10	16.40
10.00	75.00	42.000	12.000	90.000	3.50	1.20	7.50	0.80	5.40	1.30	4.20	9.00
10.00	90.00	27.500	11.000	55.000	2.50	1.10	5.00	1.00	5.40	1.10	3.75	5.50
10.00	105.00	25.000	10.000	50.000	2.50	1.00	5.00	0.80	5.70	1.00	2.50	5.00
10.00	120.00	27.500	9.000	57.500	3.00	0.90	6.40	0.80	5.10	0.90	3.75	5.75
10.00	135.00	29.000	8.000	76.000	3.60	0.80	9.50	1.00	5.60	0.90	3.90	7.60
10.00	150.00	21.000	7.000	70.000	3.00	0.70	10.00	1.10	5.50	0.90	2.10	7.00
12.50	30.00	45.000	30.000	195.000	1.50	2.40	6.50	0.80	5.30	1.40	3.60	15.60
12.50	45.00	43.500	21.250	177.500	2.00	1.70	6.00	0.80	5.30	1.40	3.40	16.20
12.50	60.00	40.625	16.250	97.500	2.50	1.30	6.00	0.80	5.20	1.40	3.25	7.80
12.50	75.00	41.250	13.750	96.250	3.00	1.10	7.00	0.80	5.40	1.30	3.80	7.70
12.50	90.00	31.250	12.500	87.500	2.50	1.00	7.00	1.00	5.40	1.10	2.50	7.00
12.50	105.00	45.000	11.250	64.375	4.00	0.90	7.50	0.80	5.70	1.00	3.60	6.75
12.50	120.00	38.125	11.250	90.000	3.40	0.80	8.00	1.00	5.70	0.80	3.75	7.50
12.50	135.00	25.000	10.000	65.000	2.50	0.80	8.50	1.20	5.50	0.80	3.90	6.50
12.50	150.00	25.000	10.000	75.000	2.50	0.80	7.50	0.90	5.10	0.80	3.90	6.00
15.00	30.00	99.000	33.000	165.000	3.00	2.20	5.00	0.80	5.30	1.40	6.60	11.00
15.00	45.00	58.250	22.500	123.750	2.60	1.30	3.50	0.80	3.20	1.40	3.75	8.25
15.00	60.00	39.000	19.500	167.500	2.00	1.30	5.50	0.80	5.70	1.70	3.60	7.15
15.00	75.00	41.250	16.500	99.000	2.50	1.10	6.00	0.80	5.60	1.10	2.75	6.60
15.00	90.00	37.500	15.000	105.000	2.50	1.00	7.00	1.00	5.60	0.90	3.50	7.00
15.00	105.00	40.500	13.500	94.500	3.00	0.90	7.00	0.80	5.70	0.90	2.70	6.80
15.00	120.00	33.750	13.500	87.750	2.50	0.90	6.50	0.80	5.80	0.80	2.25	5.85
15.00	135.00	36.000	12.000	84.000	3.00	0.80	7.00	1.10	5.60	0.80	3.40	5.60
15.00	150.00	49.000	12.000	78.000	2.50	0.80	6.50	1.00	5.70	0.80	2.90	5.20



Слика 1. Збирни дијаграм са оптималним односима суседних радијуса (а); Дијаграм са односима R1/R2, R2/Rvoz, R3/R2 у троцентричним кривинама за апроксимацију трајекторија повлачења соло аутобуса

У посебним сиво обојеним колонама на крају табеле 1 израчунати су односи и радијуса R1 и R3 из троцентричних кривина са оптималним комбинацијама параметара и радијуса Rvoz водећих кружних путања соло аутобуса. Затим су тако срачунати односи радијуса R1/R2, R2/Rvoz, R3/R2

приказани у виду збирног дијаграма на слици 1 (а). На дијаграму са слике 1 (б) такође се види да се односи оптималних радијуса $R2/Rvoz$ за разлику од односа $R1/Rvoz$ и $R3/Rvoz$ мењају по сличној законитости за све вожене радијусе $Rvoz$ соло аутобуса, а нарочито за скретне углове γ веће од 75° . Исти поступак је примењен и са тегљач са полуприколицом као и за камион са приколцом.

7.2. Геометријске форме троцентричних кривина за апроксимацију трајекторија повлачења свих изабраних возила

Трајекторије повлачења из *.txt* фајлова, претходно генерисаних за свако од изабраних возила, груписане су по изведеним маневрима за различите вожене радијусе $Rvoz$ и скретне углове γ водећих путања.

На крају, све трајекторије повлачења од свих изабраних возила груписане су у један *.txt* фајл, и за њих је срачуната једноставна оптимална троцентрична кривина. Посматрајући срачунате комбинације долази се до закључка да је јединствена (оптимална) комбинација геометријских параметара троцентричних кривина за апроксимацију свих трајекторија повлачења од свих изабраних возила потпуно је иста као оптимална комбинација параметара у троцентричној кривини за апроксимацију свих трајекторија повлачења тегљача са полуприколицом.

Врло је важно нагласити да су у домаћим смерницама, препоруке за избор централног радијуса $R2$ дата за троцентричне кривине конструисане између тангенти које су паралелно померене тачно за половину ширине возила $b/2$ ка центру кривине у односу на тангенте водеће путање. Стога, у домаћим смерницама није, као у анализи спроведеној у овом мастеру, излазна тангента троцентричне кривине паралелно померена за $0,25m$ ка центру кривине у односу на изворну тангенту.

8. ЗАКЉУЧАК

Применом развијеног софтверског алата, односно „3R_OPTIMA” AutoLISP рутине, за прорачун оптималних комбинација геометријских параметара троцентричних кривина за апроксимацију граничних трајекторија повлачења возила дошло се до следећих закључака:

- На однос суседних радијуса и удела углова и троцентричним кривинама са оптималним комбинацијама параметара много више утичу вредности скретних углова γ од величине вожених радијуса $Rvoz$ водећих кружних путања.
- Ако се тражи оптимална комбинација параметара у троцентричним кривинама за апроксимацију трајекторија повлачења више различитих типова која се крећу дуж истих водећих путања, резултат прорачуна увек ће бити она комбинација параметара троцентричне кривине која најмање одступа на „страну сигурности“ од трајекторија

повлачења возила са највећим вредностима offtracking-a.

- За сва изабрана (тестна) возила односи радијуса $R2/Rvoz$ у троцентричним кривинама са оптималним комбинацијама параметара за апроксимацију трајекторија повлачења свих возила, знатно одступају од традиционалних геометријских форми троцентричних кривина дефинисаних у домаћим смерницама.
- Постојећи дијаграм са кривама за избор централног радијуса $R2$ из домаћих смерница није адекватан за конструкцију троцентричних кривина.

Развијени софтверски алат може се искористити за израду нових дијаграма за избор централног радијуса $R2$ троцентричне кривине у зависности од најмањег полупречника окретања (R_s) изабраног возила и скретног угла γ водеће путање.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] „Закон о јавним путевима“, Службени гласник РС бр.-101/2005;
- [2] Ј. Катанић, В. Катанић, М. Малетин, „Приручник за пројектовање путева“, Београд 1983.
- [3] С. Фриц, Д. Гавран, В. Илић, Ф. Трпчевски, С. Врањевац, „Анализа главних утицајних фактора на брзину и трајекторију кретања возила у путним кривинама“
- [4] С. Фриц, Д. Гавран, В. Илић, Ф. Трпчевски, С. Врањевац, „Експерименталне методе за одређивање граничних кривина проходности возила“
- [5] Ж. Корлает, В. Драгчевић, „Трајекторија повлачења у кинематичком моделу сложеног возила“, часопис Хрватског савеза грађевинских инжењера, 1999;
- [6] „Техничка упутства за пројектовање површинских раскрсница“, Приручник за пројектовање путева у Републици Србији;
- [7] Б. Илић, „Аналитичка метода за контролу проходности и прорачун елемента ситуационог плана површинских раскрсница“
- [8] З. Лалић, „Експлоатација и одржавање моторних возила“;
- [9] М. Ђорђевић, „Друмска моторна возила“;

Кратка биографија:



Марија Долић рођена је у Крушевцу 1994. год. Основне академске студије грађевинарства завршила је 2020. год на Факултету техничких наука. Мастер рад из области Грађевинарства – Саобраћајнице одбранила је 2022. године.

Контакт: marijadolic@gmail.com