

- Funkce pro interaktivní definování vstupů a pozorovatelných výstupů pro možnost ohodnocení chování modelu,
- Plný přístup do MATLABu s možností analýzy a vizualizace dat, vývoj grafického uživatelského rozhraní a pro získání dat a parametrů modelu.

6.3 Simulink a diferenciální hra

V oddíle 4.2.1 – Diferenciální hra – je popisována metoda výpočtu vyhýbací trajektorie systému automatického zamezení kolize dle Lachnera [14]. Simulink představuje ideální prostředí pro simulaci této metody a byl proto zvolen pro ověření fungování a platnosti uváděné teorie.

Při plánování vyhýbací trajektorie pomocí metody upravené diferenciální hry se předpokládají pouze dvě protijedoucí vozidla (P a E)¹ na obousměrné vozovce. Vozidlo, které opouští svůj jízdní pruh a směřuje do protisměrného pruhu je považováno za překážku a označeno znakem P . Stejným příznakem jsou označeny všechny veličiny, se kterými je v jeho souvislosti počítáno a popisují změnu polohy vozidla P ve smyslu Obrázku 4.2. Systém zamezení kolize ve vozidle E se snaží nalézt vyhýbací trajektorii tak, aby nedošlo ke kolizi s vozidlem P . Vozidla vzájemně nekomunikují, proto si nemohou vyměnit informace o zamýšleném postupu zamezení nehody. Celý vyhýbací manévr tedy spočívá pouze na systému vozidla E .

6.3.1 Popis systému a definování okrajových podmínek

Vzájemnou polohu vozidel ve smyslu Obrázku 4.2 popisují rovnice (6.1) až (6.6).

$$\dot{x}_P = v_P \sin \phi_P \quad (6.1)$$

$$\dot{x}_E = v_E \sin \phi_E \quad (6.2)$$

$$\dot{y} = v_P \cos \phi_P - v_E \cos \phi_E \quad (6.3)$$

$$\dot{v}_E = b_E \eta_E \quad (6.4)$$

$$\dot{\phi}_P = w_P u_P \quad (6.5)$$

$$\dot{\phi}_E = w_E(v_E) u_E \quad (6.6)$$

Jedná se o soustavu nelineárních diferenciálních rovnic prvního řádu s okrajovými podmínkami popsanými rovnicemi (6.9) až (6.13).

Jako normovací faktor byla použita rychlostně závislá maximální otočení vozidla kolem svislé osy procházející těžištěm

$$w_P = \frac{\mu_0 \cdot g}{v_P} \quad (6.7)$$

$$w_E = \frac{\mu_0 \cdot g}{v_E} \quad (6.8)$$

¹ P z anglického *Purser* – pronásledovatel; E z anglického *Evader* – ten, který se vyhýbá

kde g značí gravitační zrychlení s hodnotou $9,81 \text{ m s}^{-2}$ a μ_0 koeficient tření mezi pneumatikou a povrchem. Na suché vozovce se μ_0 běžně pohybuje kolem hodnoty 0,7. Rychlosti v_P a v_E byly považovány za konstantní s hodnotou 10 m s^{-1} . Pro maximální brždění byla použita konstantní hodnota $b_E = -2$.

Konstanta a značí minimální možnou šíři vozovky jednoho jízdního pruhu komunikace kategorie S7,5/60. Na této komunikaci je $a = 3\text{m}$. Hodnota x_P , resp. x_E představuje vzdálenost těžiště vozidla od osy komunikace. V modelovaném případě je v čase $t = 0$ $x_P = -1,5$, resp. $x_E = 1,5$. Tím jsou splněny podmínky rovnic (6.9) a (6.10).

$$-3\text{m} \leq x_P \leq 3\text{m} \quad (6.9)$$

$$-3\text{m} \leq x_E \leq 3\text{m}, \quad (6.10)$$

Pro bezrozměrné stavové veličiny popsané rovnicemi (6.11) až (6.13),

$$u_{P,\min} \leq u_P \leq u_{P,\max} \quad (6.11)$$

$$u_{E,\min} \leq u_E \leq u_{E,\max} \quad (6.12)$$

$$\eta_{P,\min} \leq \eta_P \leq \eta_{P,\max} \quad (6.13)$$

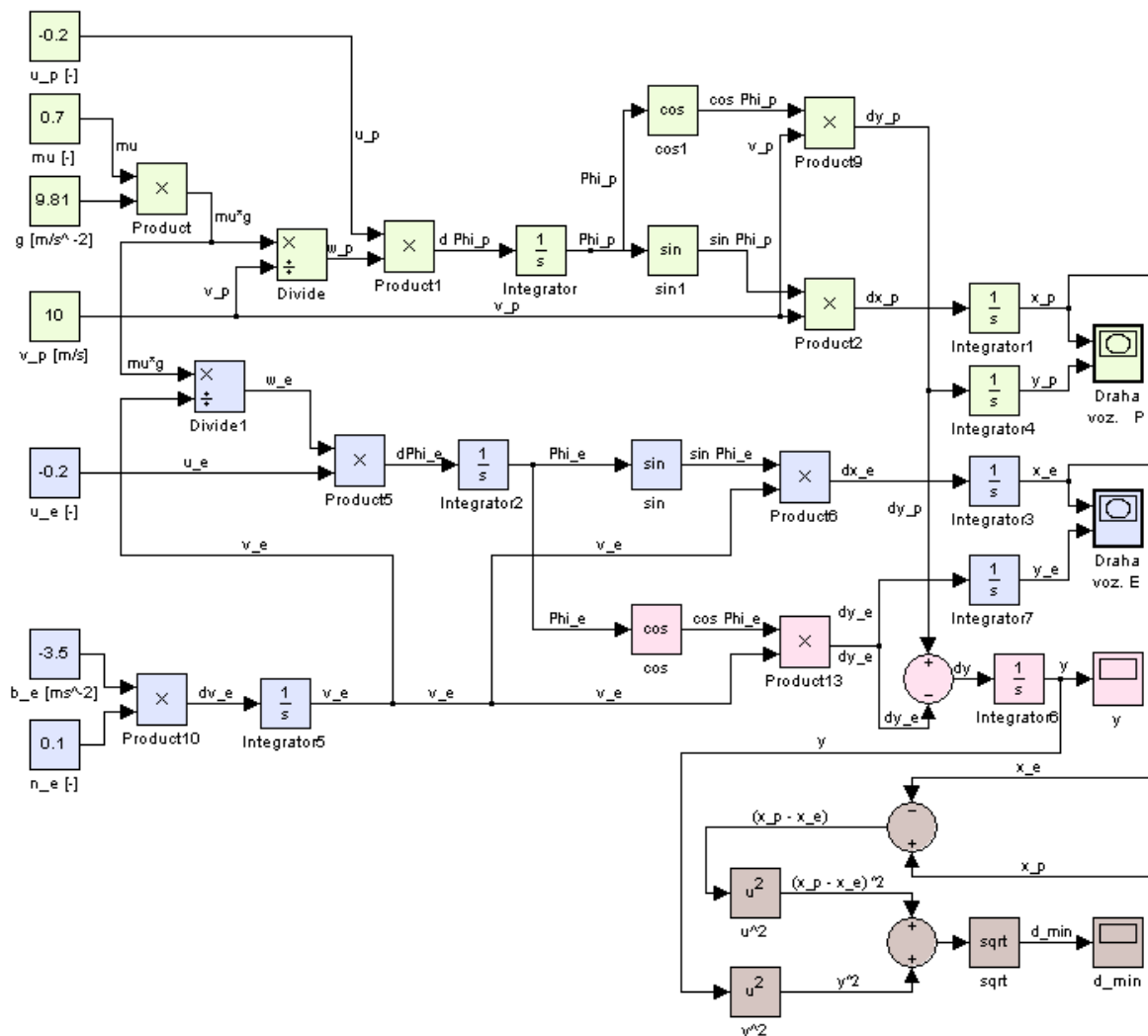
byly použity následující hodnoty: složky u_P , resp. u_E jsou z intervalu $-1; 1$. V maximálních hodnotách představují vytočení kol zcela vlevo ($-$), respektive vpravo ($+$). Pro maximální brzdnou sílu b_E byla použita hodnota $-3,5 \text{ m s}^{-2}$, což přibližně odpovídá maximální hodnotě zpomalení $0,4G$ u systémů ACC. Brzdná síla η_E byla stanovena na hodnotu 0,1.

Cílem E je zabránit kolizi s P . K tomu musí být po celou dobu sledování dodržen minimální odstup mezi P a E

$$d_{\min} := \min_{0 \leq t \leq \infty} \sqrt{(x_P(t) - x_E(t))^2 + y(t)^2}. \quad (6.14)$$

6.3.2 Model nalezení vyhýbací trajektorie v Simulinku

Systém diferenciálních rovnic (6.1) až (6.6) spolu se stavovými podmínkami (6.7) až (6.13) je v Simulinku modelován pomocí funkčních bloků. Schéma zapojení modelu je znázorněno na Obrázku 6.1. Zelenou barvou jsou zvýrazněny funkční bloky popisující chování vozidla P . Modře je zvýrazněna souvislost bloků popisujících průběh vyhýbacího manévru vozidla E . Vzdálenost vozidel měřená rovnoběžně s osou komunikace, v Obrázku 4.2 označena y , je v modelu zvýrazněna červeně. V modelu bylo maximální y zvoleno s hodnotou 30m . Klíčovou veličinou pro zamezení kolize vozidla P s vozidlem E je vzájemný odstup vozidel vypočítaný dle rovnice (6.14). V reálném systému hodnota d_{\min} představuje řídicí veličinu systému regulace trajektorie vozidla v průběhu vyhýbacího manévru a nesmí klesnout pod předem stanovenou hodnotu. V našem případě představuje hodnota d_{\min} popisnou veličinu reálné vzdálenosti těžišť vozidel v závislosti na nastavení okrajových podmínek u_P , resp. u_E .



Obrázek 6.1: Model nalezení vyhýbací trajektorie v Simulinku popsany rovnicemi (6.1) až (6.14).

6.3.3 Rozdílné strategie vyhýbacího manévru

Pro demonstraci průběhu trajektorií vozidel P a E byly zvoleny čtyři rozdílné strategie. Počáteční podmínky všech vyhýbacích manévrů je možné rozdělit do dvou kategorií.

Konstantní počáteční podmínky modelu. Některé počáteční podmínky je vhodné zachovat u všech manévrů shodné. Důvodem je možnost následného vzájemného porovnání jednotlivých strategií. Jedná se o rychlost v_P a v_E protijedoucích vozidel, jež je konstantní. Dále zůstávají neměnné veličiny charakterizující brždění vozidla E (η_E a b_E), hodnota koeficientu tření pneumatiky s vozovkou μ_0 pro obě vozidla a hodnota gravitačního zrychlení.

Proměnné počáteční podmínky modelu. V představeném modelu se jedná o typ a velikosti řídicích veličin u_P a u_E . Vychází se z předpokladu, že vozidlo P do okamžiku $t \leq t_0$ jede rovnoběžně s osou svého jízdního pruhu. V okamžiku $t_0 = 0$ začne lineárně opouštět svůj jízdní pruh a směřovat do pruhu protijedoucího. Pod tímto manévrem si lze představit například mikros pánek řidiče nebo jinou řidičovu indispozici. Rychlost této změny je udávána hodnotou u_P . Na vzniklou situaci reaguje systém zamezení kolize vozidla E . Typ reakce lze popsat veličinou u_E . Pro demonstraci byly zvoleny dva základní typy řídicího signálu u_E : konstantní a sinusový.

Na základě konstantních okrajových podmínek (rychlost protijedoucích vozidel a počáteční vzdálenost) byly stanoveny pro všechny níže demonstrovány manévry důležité okamžiky pro sledování vývoje trajektorií obou vozidel. V dílčích okamžicích průběhu vyhýbacího manévru je monitorována trajektorie² vozidel a v textu označena jako: fáze 1 (pro $t_1 = 1$ s), fáze 2 (pro $t_1 = 1,5$ s), fáze 3 (pro $t_1 = 2$ s), resp. fáze 4 (pro $t_1 = 3$ s).

Nulové vyhýbání

Pro seznámení s průběhem manévru byl zvolen model, kdy vozidlo P opouští svůj jízdní pás v okamžiku t_0 pod konstantním úhlem vzhledem k ose komunikace. Hodnota u_P je tedy rovna nule. Vozidlo E má hodnotu u_E také rovnou nule. Tuto situaci si lze představit jako pozvolné a konstantní opouštění jízdního pruhu vozidlem P , jež systém zamezení kolize ve vozidle E vyhodnotil jako neohrožující vozidlo E . Průsečík trajektorií obou vozidel nastane až za vozidlem E .

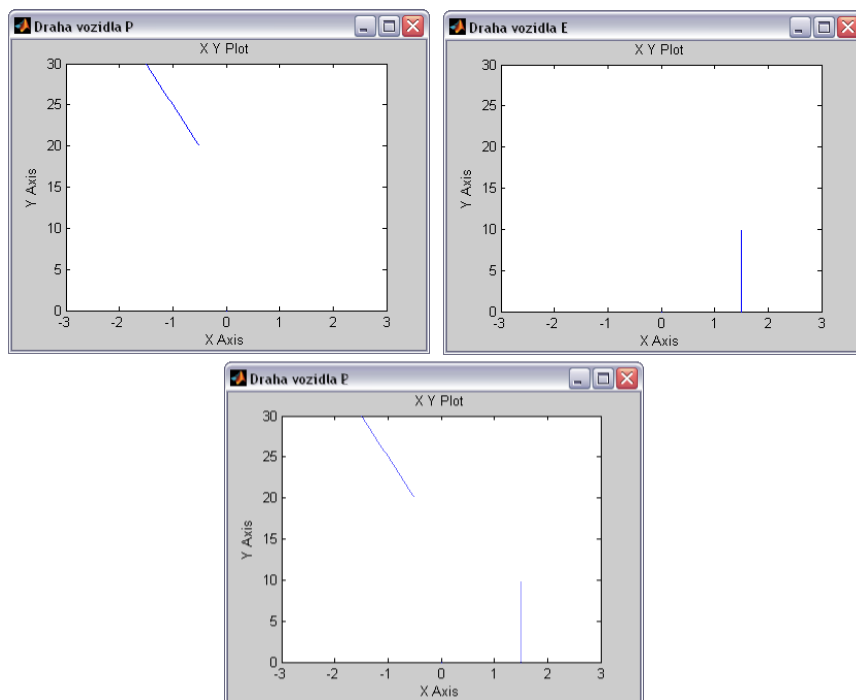
Fáze 1 v Obrázku 6.2 znázorňuje vývoj trajektorií v čase $t_1 = 1$ s. Vozidlo P se pomalu blíží k ose komunikace. Vozidlo E pokračuje v jízdě ve svém jízdním pruhu a není ohroženo. Obě vozidla mají nulové natočení předních kol ($u_P = u_E = 0$).

Fáze 2 je vykreslena na Obrázku 6.3. Vozidla se vzájemně minou ve vzdálenosti. Ke kolizi nedojde.

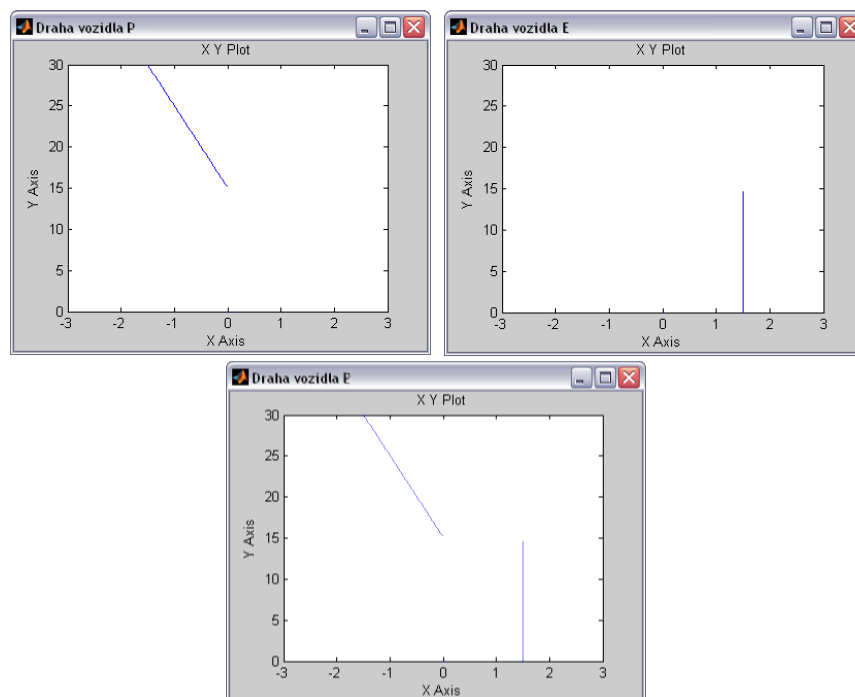
²Funkční blok *Plot XY* v prostředí Simulinku je schopen vykreslit do jednoho okna trajektorii pouze jednoho vozidla. Pro zjednodušení představy o konkrétní poloze obou vozidel v prostoru vozovky bylo použito grafického editoru a dílčí trajektorie byly vzájemně proluty do jednoho obrázku.

Fáze 3 na Obrázku 6.4 pouze potvrzuje skutečnost, že se vozidla minula s bezpečným odstupem a ke kolizi nedošlo.

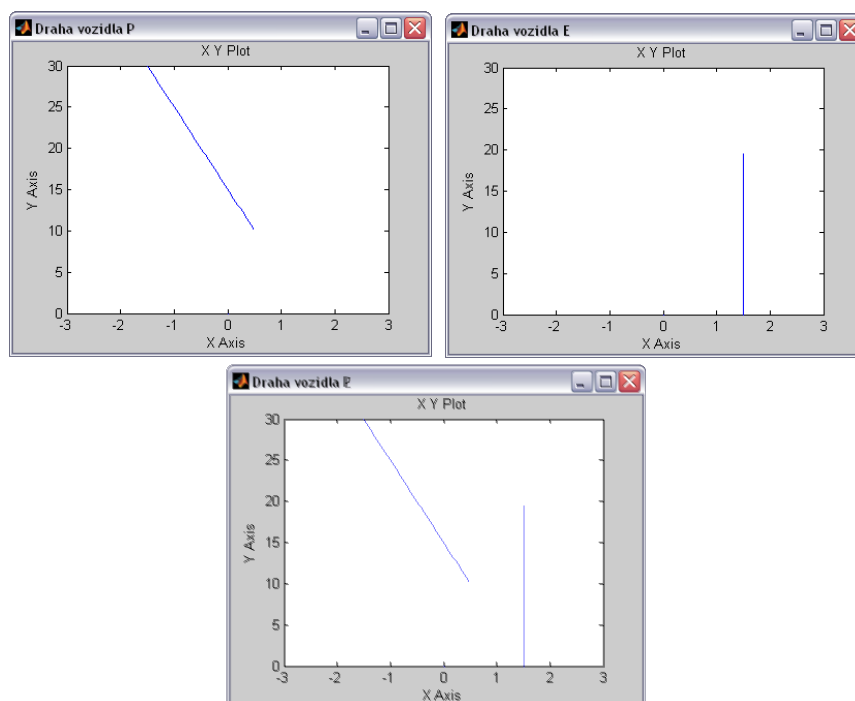
Průběh vzdálenosti d_{\min} ve směru osy y , ve smyslu Obrázku 4.2 je znázorněn v příloze na Obrázku 7.1.



Obrázek 6.2: Nulové vyhýbání. Fáze 1: Pohyb vozidel P a E s nulovým natočením kol a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_1 = 1\text{s}$ (uprostřed dole).



Obrázek 6.3: Nulové vyhýbání. Fáze 2: Pohyb vozidel P a E a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_2 = 1,5$ s.



Obrázek 6.4: Nulové vyhýbání. Fáze 3: Pohyb vozidel P a E a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_3 = 2$ s.

Lineární vyjetí vozidla P a nepozorný řidič ve vozidle E : Kolize

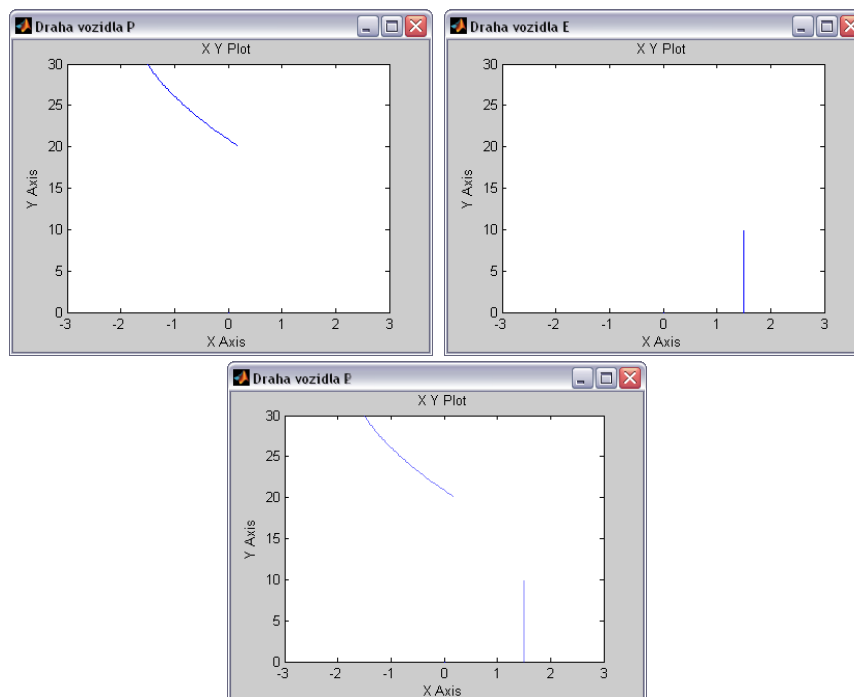
Následující může demonstrovat reálnou situaci. Řidič vozidla P upadne do mikrosnánku. Předpokládejme, že mikrosnánek trvá minimálně 1,5 sekundy. V jeho průběhu řidič sjede jedna ruka z volantu a druhou začne samovolně zatáčet vlevo na 20% maximálního poloměru zatáčení vozidla. Současně tímto jede v protisměru vozidlo, jehož řidič se nedostatečně věnuje řízení a nezaregistruje vyjíždějící vozidlo z protisměrného jízdního pruhu.

Fáze 1 znázorněná na Obrázku 6.5 popisuje situaci, kdy vozidlo P lineárně přejíždí do protisměrného jízdního pruhu. Nic netušící řidič vozidla E se blíží k bočnímu střetu s vozidlem P ($u_P = -0,2$; $u_E = 0$).

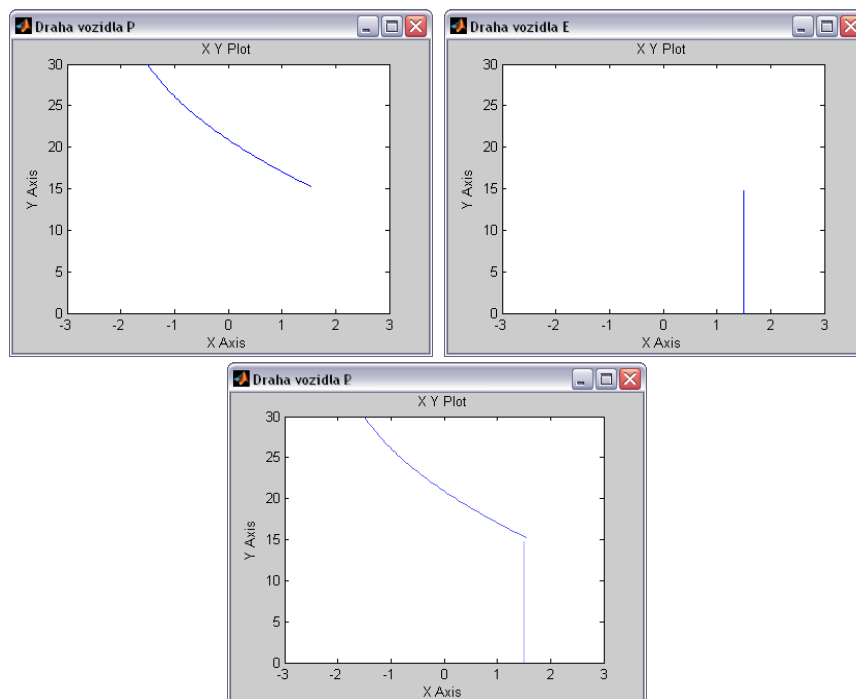
Fáze 2 Boční náraz. Na Obrázku 6.6 je jasně patrné, že přibližně v čase $t_2 = 1,5$ s dojde ke kolizi.

Fáze 3 představuje důkaz o neodvratitelné kolizi vozidel P a E . Pokud bychom připustili alternativu, že by řidič vozidla E z různých důvodů druhé vozidlo minul, k nehodě vozidla P by přesto došlo. Stále spící řidič by se ocitl v okamžiku $t_3 = 2$ s se svým vozidlem na krajnici vozovky a v rychlosti $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ by ji opustil, viz Obrázek 6.7.

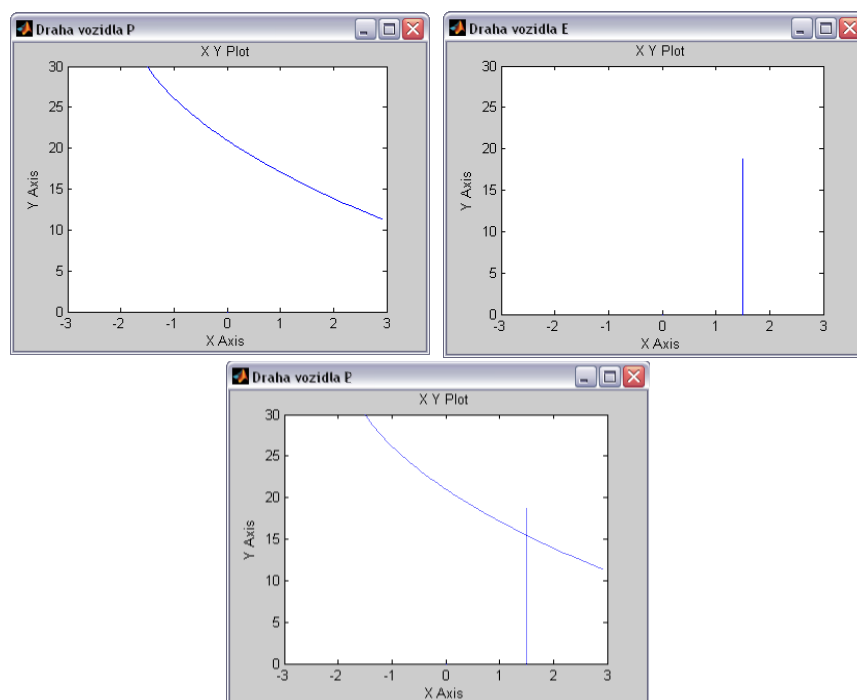
Příloha s Obrázkem 7.2 znázorňuje průběh vzdálenosti d_{\min} vozidel P a E ve směru osy y , ve smyslu zavedeném v Obrázku 4.2.



Obrázek 6.5: Lineární vyjetí vozidla P . Fáze 1: Pohyb vozidla P a vozidla E a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_1 = 1$ s.



Obrázek 6.6: Lineární vyjetí vozidla P . Fáze 2: Střet vozidla P a vozidla E a jejich pozice na vozovce v čase $t_2 = 1,5$ s.



Obrázek 6.7: Lineární vyjetí vozidla P . Fáze 3: Hypotetický pohyb vozidla P a vozidla E a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_3 = 2$ s.

Základní vyhýbací manévr vozidla E

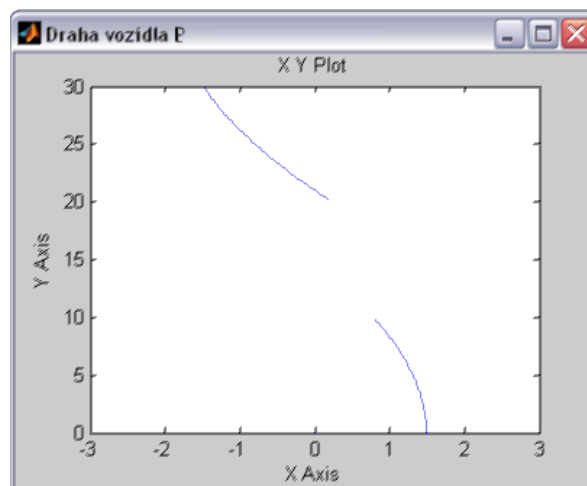
Za nejjednodušší vyhýbací manévr systému automatického zamezení kolize lze považovat sled úkonů, jež vedou ke změně trajektorie vozidla takovým způsobem, že se vozidlo vyhne bezprostřednímu nebezpečí. Popsaný proces by se dal připodobnit k situaci, kdy řidič vozidla otočí volantem vlevo natolik, aby se překážce vyhnul. Nelze vyloučit, že náš fiktivní řidič začne i brzdit, ale již se nepodaří navrátit vozidlo zpět do původního směru.

V prostředí Simulinku lze takového chování docílit přenastavením počátečních podmínek ve výše popisovaném modelu. Mějme již zmíněné vozidlo P s řidičem nacházejícím se v mikrospánku. Nechť řídicí veličina u_P nabyde hodnoty $-0,2$. Stejnou hodnotu pootočení volantu ve vozidle E bude používat i systém zamezení kolize. Potom průběh vyhýbacího manévru bude vypadat následovně.

Fáze 1 Obě vozidla začínají lineárně opouštět svůj jízdní pruh, viz Obrázek 6.8. Vzdálenost y je relativně velká ($u_P = u_E = -0,2$).

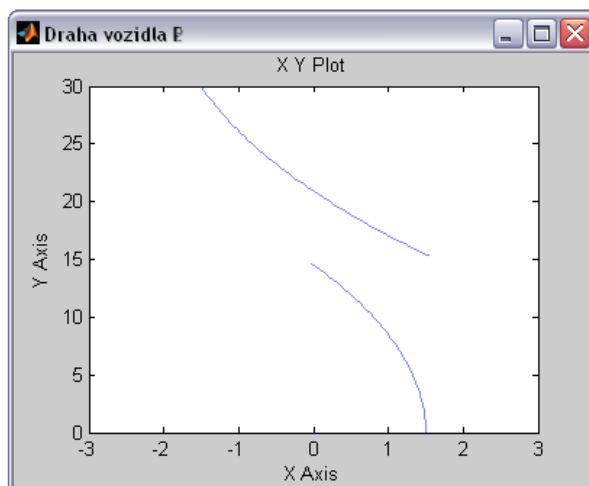
Fáze 2 V kritické chvíli s časem $t_2 = 1,5\text{s}$ od počátku vyhýbacího manévru se vozidla vzájemně přiblíží nejvíce, přesto je zde dostatečný prostor k minutí překážky. Vozidlo P se již zcela nachází v protisměrném jízdním pruhu, vozidlo E je právě na hranici svého jízdního pruhu a směřuje do protisměrného, jak ukazuje Obrázek 6.9.

Fáze 3 nasvědčuje tomu, že vozidlo P opět vyjede mimo prostor vozovky. Vozidlo E se ani po 2 sekundách od počátku vyhýbacího manévru nenachází ani v polovině protisměrného jízdního pruhu, viz Obrázek 6.10. Je zde stále prostor k okraji vozovky, na kterém by bylo možné vozidlo zastavit.

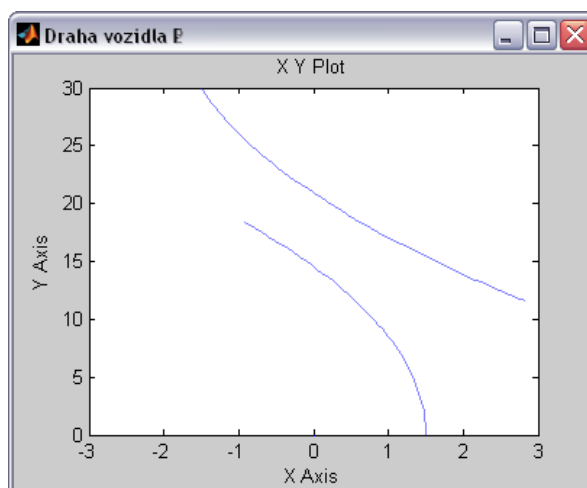


Obrázek 6.8: Základní vyhýbací manévr. Fáze 1: Lineární vyjíždění vozidla P i vozidla E a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_1 = 1\text{s}$.

Příloha s Obrázkem 7.3 znázorňuje průběh vzdálenosti d_{\min} vozidel P a E ve směru osy y , ve smyslu zavedeném v Obrázku 4.2.



Obrázek 6.9: Základní vyhýbací manévr. Fáze 2: Nejbližší pozice vozidla P a vozidla E a jejich pozice na vozovce v čase $t_2 = 1,5$ s.



Obrázek 6.10: Základní vyhýbací manévr. Fáze 3: Současné opuštění prostoru vozovky vozidel P i E v čase $t_3 = 2$ s a jejich vzájemná poloha na vozovce v čase $t_3 = 2$ s.

Sofistikovaný průběh vyhýbacího manévru vozidla E

Cílem automatického zamezení kolize je především kolizím předcházet. To znamená vyhnout se překážce. Zamezíme tím primárním škodám na zdraví či na majetku. Nicméně pokud by se vozidlo pouze dokázalo vyhnout a následně zastavit, viz Základní vyhýbací manévr, mohlo by se v okamžiku zastavení samo stát překážkou pro jiného účastníka silničního provozu. Je proto žádoucí vytvořit systém, který by dokázal nejen zamezit kolizi, ale byl by schopný vozidlo navrátit minimálně do původního jízdního pruhu.

Takové chování systému je možné vyvolat i našem modelu. Opět předpokládejme unaveného řidiče v mikrosprávku ve vozidle P . Dále předpokládejme, že systém vozidla E tuto blížící se překážku dokáže rozpoznat a je schopen vybrat scénář pro bezkolizní

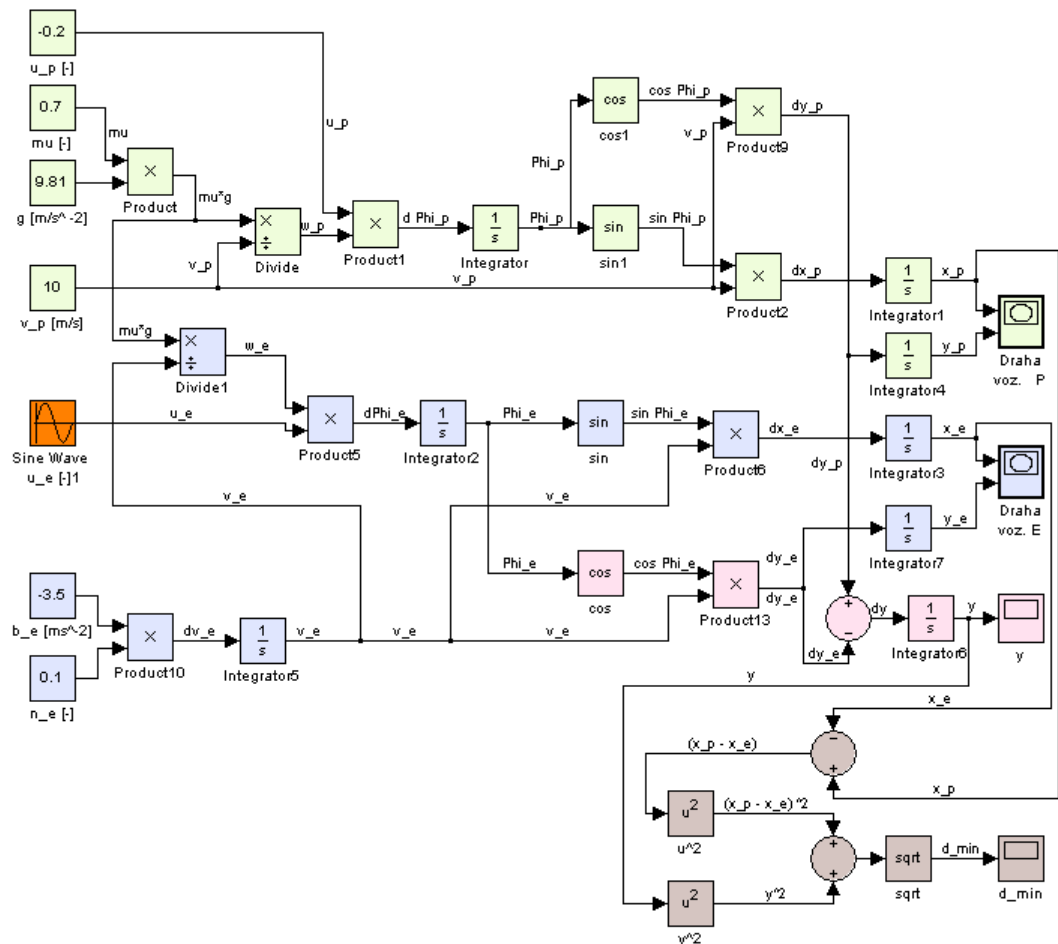
průjezd kolem překážky. Přitom jednou z podmínek je po minutí překážky návrat do svého jízdního pruhu.

V principu jde o to, aby autonomní systém dokázal udělat sled úkonů tak, aby se svým chováním co možná nejvíce přiblížil chování zkušeného řidiče. Předpokládejme, že zkušený řidič by se překážce vyhnul otočením volantu vlevo, následně vpravo a ještě jednou vlevo, aby se vrátil do původní dráhy.

V našem systému takového chování lze docílit záměnou typu řídicí veličiny u_E s pevně daným průběhem za veličinu se sinusovým průběhem

$$u_E(t) = \frac{1}{2} \sin(4\pi t - \frac{\pi}{2}). \quad (6.15)$$

Upravené blokové schéma modelu ukazuje Obrázek 6.11. Blok nové řídicí veličiny u_E je zvýrazněn oranžovou barvou.



Obrázek 6.11: Schéma modelu sofistikovaného průběhu vyhýbacího manévru. Veličina u_E je harmonického průběhu.

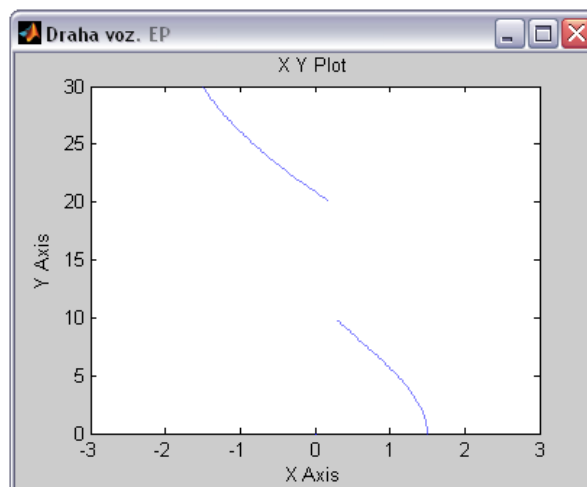
Jednotlivé fáze vyhýbacího manévru jsou znázorněny na Obrázcích 6.12 až 6.14.

Fáze 1 je z pohledu vozidla P stále stejná. Lineárně opouští svůj jízdní pruh a v čase $t_1 = 1\text{s}$ je již v protisměrném pruhu. Vozidlo E začíná úhybný manévr a blíží se ose komunikace ($u_P = -0,2$; $u_E(t) = \frac{1}{2} \sin(4\pi t - \frac{\pi}{2})$).

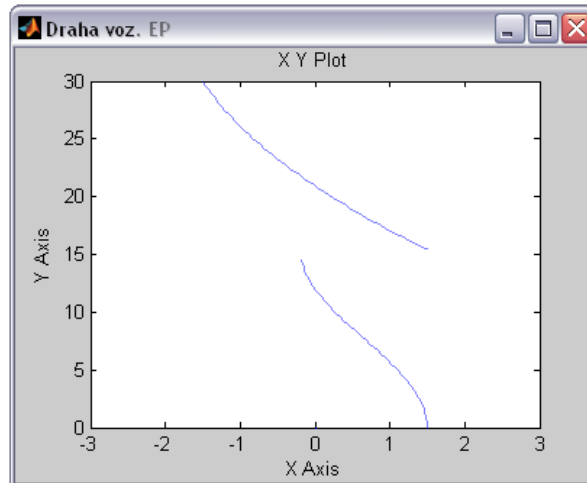
Fáze 2, jak ukazuje Obrázek 6.13, popisuje situaci, kdy P je již za polovinou sousedního pruhu, ale vozidlo E se nachází těsně za středem komunikace. To má za následek dva podstatné jevy. Za prvé vozidlo E je dostatečně daleko od vozidla P a za druhé nikterak významně nezasahuje do protisměrného jízdního pruhu. Takže i v případě, že by se právě v okamžik uskutečňování vyhýbacího manévru v protisměru objevilo další vozidlo, má toto nové vozidlo dostatečný prostor mezi E a okrajem vozovky k tomu úniku.

Fáze 3 demonstruje hlavní výhodu nově zavedené řídicí veličiny u_E . Systém se dokáže navrátit na původní trajektorii vozidla. Napodobuje tak přirozené chování lidského řidiče.

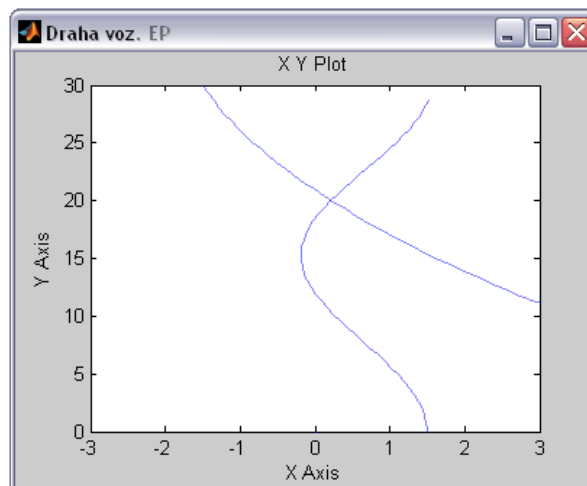
Příloha s Obrázkem 7.4 znázorňuje průběh vzdálenosti d_{\min} vozidel P a E ve směru osy y .



Obrázek 6.12: Sofistikovaný vyhýbací manévr. Fáze 1: Vzájemná poloha vozidel na vozovce v čase $t_1 = 1\text{s}$.



Obrázek 6.13: Sofistikovaný vyhýbací manévr: Fáze 2: Nejbližší pozice vozidel P a E a pozice na vozovce v čase $t_2 = 1,5$ s.



Obrázek 6.14: Sofistikovaný vyhýbací manévr: Fáze 3: Vozidlo P opouští vozovku, vozidlo E se navrácí na původní dráhu před vyhýbacím manévrem. Čas $t_3 = 2$ s.

6.4 Shrnutí

Model v Simulinku ověřil funkčnost navrhované metody diferenciální hry při daných okrajových podmínkách. Bylo ukázáno, že vhodně zvolenou strategií lze uskutečnit vyhýbací manévr tak, aby byla zajištěna maximální ochrana i pro ostatní účastníky provozu. V našem modelu tuto podmínku nejlépe splňoval manévr s řídicí veličinou ve tvaru $u_E(t) = \frac{1}{2} \sin(4\pi t - \frac{\pi}{2})$.

Na druhé straně nelze opomenout fakt, že model vycházel z idealizovaných okrajových podmínek. Otázka proveditelnosti v reálném čase, jak ji uvádí literatura, například Lachner [14], je klíčová. Při větší komplexnosti modelu by zřejmě doba potřebná na výpočet řešení přesáhla dobu přijatelnou pro reálné aplikace. Při modelování na domácím

PC³ výpočet průběhu vyhýbací trajektorie na následujících 5 sekund trval průměrně 0,6 sekundy. To by v případě reálného nasazení při rychlosti vozidla 10 ms^{-1} představovalo 6 m jízdy. To je pro reálné nasazení v automobilu nepřijatelné. V této souvislosti literatura uvádí, například Brandt [11], že metoda elastických pásů je v reálném čase snáze proveditelná.

³Konfigurace PC: Procesor AMD Athlon® 1900+ (pracovní frekvence 1600 MHz), operační paměť 256 MB (pracovní frekvencí 387 MHz), HDD 120 GB Seagate Barracuda IV 7200 ot./min, VGA ATI Radeon 9800, OS Windows XP SP2; Modelováno v prostředí MATLAB 7.0.1