



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**Közlekedésmérnöki- és járműmérnöki Kar**  
Közlekedés- és járműirányítási tanszék

# **Változtatható geometriájú futómű lineáris aktuátorának modell-prediktív szabályozása**

Készítette: Dalvári Máté  
Járműmérnök szakos hallgató

Konzulens:  
Dr. Németh Balázs  
Dr. Gáspár Péter

**Tudományos Diákköri Konferencia**  
**Budapest, 2017**

## **Köszönetnyilvánítás**

A TDK dolgozat elkészítésével kapcsolatos köszönetnyilvánítás: „EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.”

# Absztrakt

A gépjárművek kormányzását manapság szinte kivétel nélkül a kormánykerék elfordításával arányos kerékelfordulással valósítják meg. Ettől eltérő megoldás lehet a kormányzás végrehajtásához a kerékdőlésnek a szabályozása intelligens, változtatható geometriájú futóművek segítségével. Az MTA SZTAKI-ban található negyed járműmodell ennek a megoldásnak a bemutatására készült. Rendelkezik egy elektromechanikus lineáris aktuátorral, amely szabályozásával beállítható a kívánt elkormányzáshoz szükséges kerékdőlési szög. A beépített lineáris aktuátor korlátozott képességgel rendelkezik, a sebessége állandó értéket képes mindössze felvenni, azonban a dugattyúrúd a két véghelyzet között tetszőlegesen pozícionálható.

A jelen dolgozatom fő célja a lineáris aktuátor korlátozások melletti modell-prediktív irányítástervezésének (MPC) bemutatása, amellyel kezelhető az aktuátor nemlinearitásai. A megvalósításhoz Matlab/Simulink dinamikus tervező rendszert használom. A modell felépítéséhez elvégzem az aktuátor elektromotorjával egybeépített enkóder jelének feldolgozását, az így kinyert adatok lehetővé teszik a modell struktúrájának becslését.

Ezután szimuláció segítségével megvizsgálom a lineáris aktuátor referenciajel követését a tervezett szabályozás alapján, továbbá az aktuátor beavatkozása okozta kerékdőlés változást. A szimuláció során két esetet vizsgálok meg, egy negatív kerék bedöntést és egy összetett, sávváltással megegyező elkormányzást megvalósító kerék bedöntést. Ez a lépés segíthet verifikálni a rendszert. A futómű egyszerűsített modelljét és a szimulációt a Simulink/SimMechanics szimulációs környezet felhasználásával készítem el.

## **Abstract**

Nowadays the steering of motor vehicles is almost always realized with the wheel rotation proportional to the rotation of the steering wheel. Other than this, the steering can be controlled by modifying the tilting of the wheel in an intelligent, variable-geometry suspension. A quarter vehicle model can be found in the MTA SZTAKI, which is designed to demonstrate this solution. The vehicle model features an electromechanical linear actuator that can be used to control the required tilt angle. The built-in linear actuator has a limited capacity, its speed can only be a fix value, but the push rod can be positioned arbitrarily between the two end positions.

The main purpose of this paper is to introduce the model predictive control design of the linear actuator which can handle the nonlinearity of the actuator. For the implementation I use the Matlab/Simulink dynamic design system. To construct the model, I will process the signal of the encoder that built in the electric motor of the actuator and the data thus are obtained will allow the model structure to be estimated.

After all, I examine the motion of the linear actuator by the designed control and the motion conditions it creates in the suspension arms and on the wheel. During the simulation, I examine two cases, a negative wheel tilting and a complex one to realize a lane changing. This step can help to verify the system. I make a simplified model of the suspension and a simulation by using the Simulink/SimMechanics simulation environment.

## Tartalomjegyzék:

1.	Bevezetés .....	6
1.1	Irodalmi áttekintés .....	6
1.2	Negyedjarmú modell bemutatása .....	7
2.	Modell prediktív irányítástervezés (MPC).....	10
2.1	MPC stratégia.....	10
2.2	Rendszer identifikáció.....	12
2.3	MPC tervezés referenciajel követésre .....	16
3.	Szimuláció.....	19
4.	Összegzés .....	27
5.	Ábrajegyzék .....	29
6.	Irodalomjegyzék .....	30

## 1. Bevezetés

A technológiai fejlődésnek köszönhetően a gépjárművek körében megjelentek olyan intelligens futómű konstrukciók, amelyek képesek a futómű jellemző paramétereit módosítani a jobb menetstabilitás, mozgási dinamika és utaskényelem elérésének céljából. Jelen dolgozatomban a futómű főbb paramétereit közül a kerékdőlés szabályozását valósítom meg egy a futóműbe épített lineáris aktuátor felhasználásával. A kerék megdöntésének következménye, hogy megváltozik az el kormányzási sugara a futóműnek, így pedig megvalósul a gépjármű el kormányzása. A módszer bemutatására készült egy negyedjármű modellt reprezentáló futómű konstrukció az MTA Számítástechnika és automatizálási kutatóintézetében. A szerkezet egy McPherson típusú futóművön alapul. A kerék döntésének realizálása egy a futóműbe közvetlenül beépített lineáris aktuátoron keresztül történik, amelynek a munkadugattyúja a kerékagyhoz csatlakozik. A fő feladatom egy modell prediktív szabályozó megvalósítása az aktuátor irányításához és a kerékdőlés változásának szimulálása a szabályozó felhasználásával. A megvalósítás három fő lépésre különíthetünk el:

- Rendszer identifikáció elvégzése a munkahenger elmozdulása és az aktuátor feszültség arányos jele között. Az identifikáció eredménye a rendszer dinamikáját leíró állapotter reprezentáció.
- Jelkövetést megvalósító korlátozott modell prediktív szabályozó tervezése a munkahenger elmozdulásának irányítására
- McPherson típusú futómű konstrukció egyszerűsített modelljének elkészítése SimMechanics környezetben, majd a kerékdőlés szimulálása és értékelése a munkahenger elmozdulás függvényében.

### 1.1 Irodalmi áttekintés

A megfelelő futómű kiválasztása mindig is fontos szempont volt a tervezőmérnökök számára, mivel a beépítésre kerülő futómű alapjaiban határozza meg a gépjármű alap- és leszármaztatott paramétereit, mint: kerékdőlés, kerékösszetartás, csapgeometria, bólintási centrum, billenési momentán centrum. Minden szempontból előnyös lenne egy olyan futómű tervezése, amely változtatni képes a futómű alapvető paramétereit, így különböző útviszonyok között is az optimális menetteljesítmény és a megfelelő kényelmi viszonyok lehetnének elérhetőek. Az ilyen

paraméter módosításokra képes futóműveket intelligens futóműveknek nevezik, amelyeket 3 főbb csoportra különíthetünk el: félaktív, aktív, változtatható geometriájú (VG) futóművek.

Az aktív és a félaktív rendszerek voltak az első típusok. Az aktív rendszereknél egy beavatkozót helyeznek el a futóműben, amely irányítástervezhető, működése során közvetlenül fejt ki erőt a felfüggesztésben. A félaktív rendszereknél nincs közvetlen erőkifejtésre alkalmas aktuátor elhelyezve, a csillapítása módosítható a felfüggesztésnek. Egy fajta megvalósítása a félaktív rendszernek például mágnesezhető csillapító folyadékok alkalmazása. A legújabb intelligens futómű megoldások a változtatható geometriával rendelkezők, amelyek még napjainkban is fejlesztés alatt állnak [1].

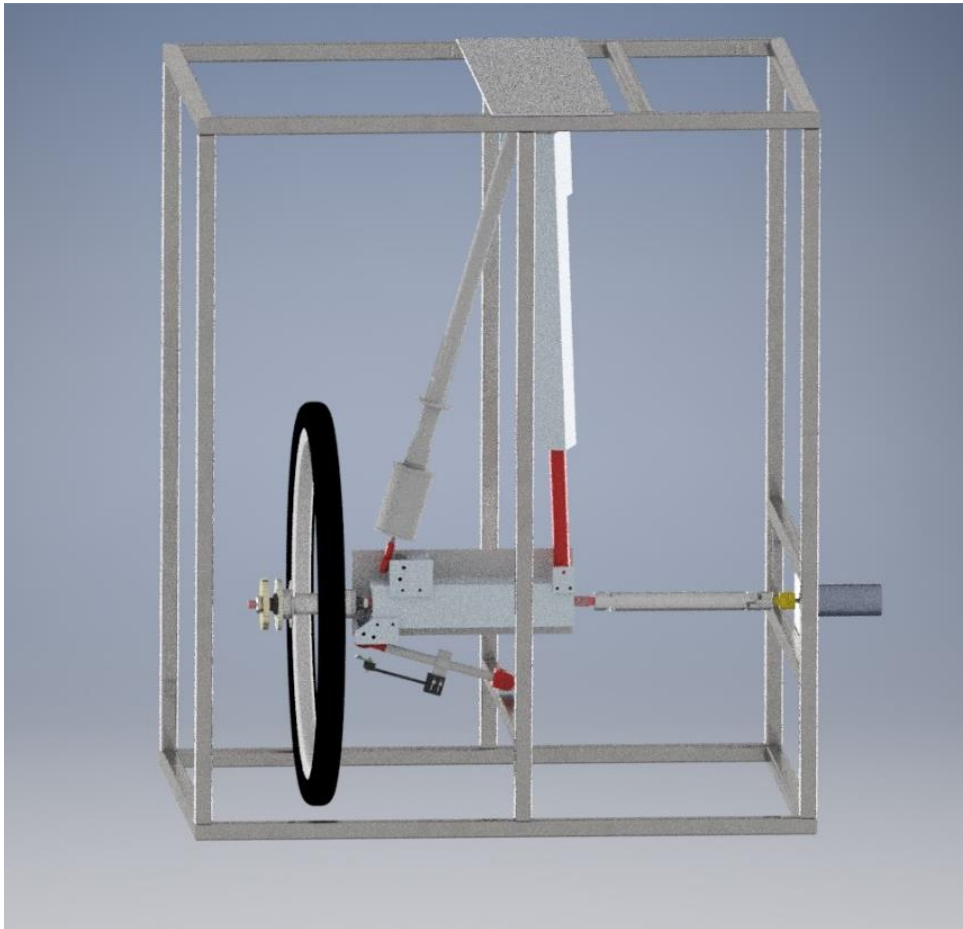
A VG futóművek csoportja közé számos technikai megoldás tartozik. Egy ilyen megoldás például a felfüggesztés rugalmasságának módosítása az alap/passzív rugómerevség modifikációján keresztül. Ehhez egy elektromechanikus aktuátort alkalmaznak, amellyel egy lengőkar megforgatásán keresztül a rugóstagot nyomják összebb a nagyobb passzív merevség eléréséhez vagy fordítva [2]. Egy másik megoldás a jármű borulási centrumának a megváltoztatása a futómű lengőkarjának pozíciójának szabályozásával, amellyel növelhető a menetstabilitás [3].

Ezenkívül a kerékdőlést egy elektromechanikus aktuátorral szabályozó futómű is a VG futóművek csoportjába tartozik. Menetközben a jármű első kerekeinek a megdöntésével a jármű laterális menettulajdonságába lehet beavatkozni. Asszisztens rendszerként alkalmazva kritikus szituációkat lehet megakadályozni, mint például pályaelhagyás megelőzése [4]. Hasonló kerékdőlést módosító megoldást tartalmaz a dolgozatomban vizsgálandó futómű is. A célom ennek a modellezése és irányítástervezése.

## **1.2 Negyedjármű modell bemutatása**

Az 1. ábrán látható negyedjármű modellhez kerül megtervezésre a kerékdőlés irányítását megvalósító modell prediktív szabályozás. A megépített járműmodell egy mechatronikai szerkezet, felépítése két főbb egységre különíthető el. Az egyik a gépészeti elemeket tartalmazó futóműkonstrukció a másik pedig az irányítástervezéshez nélkülözhetetlen elektronikai eszközök. A modellhez megépített futómű a kis- és középkategóriájú személygépjárművekben széleskörben használatos McPherson típus, amelynek fő jellemzői általánosságban, hogy a kerékagy alsó pontjához keresztlengőkar csatlakozik gömbcsuklóval, a felső pontját pedig egy teleszkópos rugóstag vezeti meg, amely szintén gömbcsuklóval csatlakozik a kerékagyhoz.

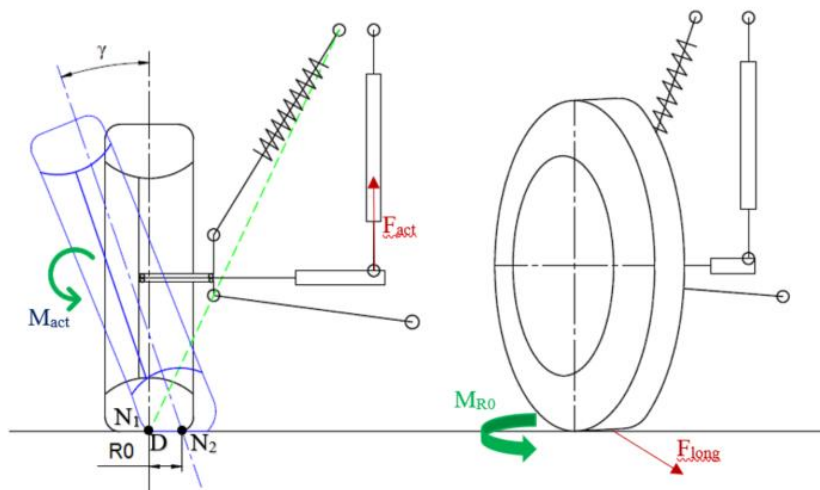
Előnyei, hogy alapvetően nem túl bonyolult szerkezet, az alap paraméterei elfogadhatók és viszonylag olcsó konstrukció.



1. ábra: Szabályozandó negyedjármű modell

A 2. ábrán látható a futómű egyszerűsített ábrája. A kerekek kényszer- vagy önkormányzásakor a függőleges tengelyhez közel álló ún. elkormányzási tengely körül elfordulnak. A McPherson futómű esetén ezt úgy kaphatjuk meg, hogy a rugóstag felső bekötését összekötjük az alsó keresztlengőkar kerékagyhoz csatlakozó bekötési pontjával [5]. Ez az ábrán zöld szaggatott vonallal látható. Az elkormányzási tengely útfelülettel alkotott döféspontja (D) és a keréktalppont (N) közötti távolság alkotja a kormánylegördülési sugarat ( $R_0$ ) vagy más néven az elkormányzási sugarat.





2. ábra: Egyszerűsített negyedjáromú modell, bemutatóva a kerékdőlés közvetlen hatása az elkormányzási sugárra

Az  $F_{long}$  hosszirányú vonóerő az  $R_0$  kormánylegördülési sugáron  $M_{R0}$  elkormányzási nyomatékot ébreszt:

$$M_{R0} = F_{long} \cdot R_0 \quad (1)$$

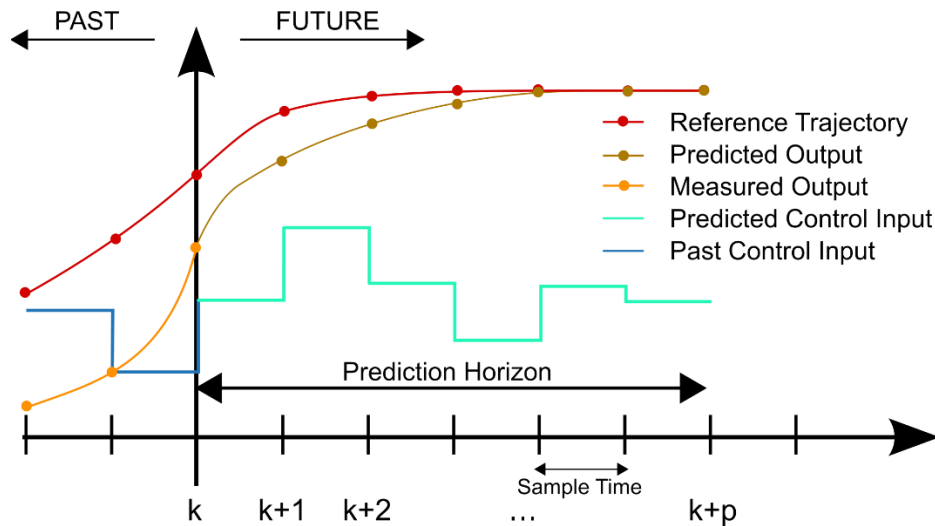
A kerékdőlés külső szabályozásához számos elektronikai elem szükséges. A fontosabbak ezek közül a lineáris aktuátor, amely előállítja a kívánt elmozdulást a kerék döntéséhez, az aktuátort vezérlő mikrokontroller és a hozzá tartozó teljesítményelektronika.

A lineáris aktuátor korlátozott tulajdonsággal rendelkezik, ugyanis csak fix sebességgel üzemeltethető, azonban a munkahenger pozíciója a két végpontja között tetszőleges beállatható. A munkadugattyú két véghelyzetének érzékelése az aktuátorhoz tartozó Hall-szenzorokkal valósul meg. Fontos további jellemzője az aktuátornak, hogy az elektromotorja két szögjeladóval (enkóderrel) van felszerelve, amelynek segítségével a motor forgási szöghelyzete, szögsebessége és forgási iránya mérhető. Az aktuátor trapézorsóval önzáró, így az adott pozíciók fixen rögzíthetők.

## 2. Modell prediktív irányítástervezés (MPC)

### MPC alapjai:

A modell prediktív szabályozó tervezésének általános feladata az  $u$  vezérlőjel jövőbeli értékeinek megbecslése, így optimalizálva az  $y$  kimenet jövőbeli viselkedését. A predikcióhoz a jelenlegi és múltbeli bemeneti és kimeneti értékek rendelkezésre állnak, amelyeket figyelembe véve valósítható meg az előre „látás”. A cél egy  $y_{ref}$  referenciajel sorozat követése, annak minél hamarabb történő elérése, miközben a bemenetek és a kimenetek esetleges korlátozásait figyelembe vesszük.



3. ábra: MPC alapvető működésének ismertetése [7]

A szabályozni kívánt rendszer diszkrét idejű, adott időpontokban vizsgáljuk a be- és kimeneteket. A 3. ábrán megfigyelhetjük az MPC alapvető működését. A  $k$ ,  $k-1$ ,  $k-2$ , ...,  $k-i$  időpontokban a rendszer ismert számunkra. Célunk a  $k+1$ ,  $k+2$ , ...,  $k+N_c$  időpontokra megbecsülni az optimális vezérlőjeleket, miközben a kimenet egyre jobban megközelíti az elérni kívánt referencia értékeket.

### 2.1 MPC stratégia

Általánosságban az MPC először megtervezi a vezérlőjel néhány meghatározott darabszámú jövőbeni értékét a múltbeli értékek alapján. Ehhez egy optimalizációs időablakot kell definiálni,

ez adja meg, hogy mennyire tekintünk előre a jövőbe. Az időablak elemszáma  $N_c$ , amely egy általunk megválasztható konstans érték. A vizsgált előre tekintés:

$$t(i + 1), t(i + 2), \dots, t(i + N_c)$$

Az  $N_c$  egyben a control horizont elemszáma is, amely tartalmazza a kiszámított jövőbeni bemeneti jeleket. Az  $i$ -edik időpontban a control horizont a következő számsorozat:

$$u(t(i + 1)), u(t(i + 2)), \dots, u(t(k + N_c))$$

Másik fontos jellemzője az MPC stratégiának a predikciós horizont. Ez a jövőbeni kimeneti értékek alakulását tartalmazza a control horizont értékeinek függvényében. A predikciós horizont dimenziója  $N_p$ , megjegyezve, hogy az  $N_p \geq N_c$  relációnak kell teljesülnie. Az  $N_p$  elemszámú jövőbeli kimenet:

$$y(t(i + 1)), u(t(i + 2)), \dots, u(t(k + N_p))$$

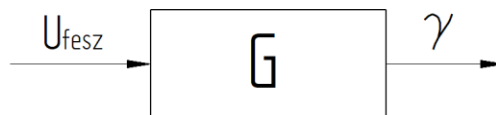
Az optimális jövőbeni bemeneti jelek meghatározása egy költségfüggvény minimalizálásával történik. Az így kapott control horizont első értéke  $u(t(i+1))$  lesz a rendszer következő bemenete.

Az időben előre haladva egy egységet  $(i+1)$  az MPC újra tervezi és optimalizálja az adott darabszámú jövőbeni bemeneti értéket a költségfüggvény alapján. A tervezés és implementálás felváltva követik egymást. Az optimalizálás során a rendszer figyelembe veszi a korábbi értékeket és a rendszer korlátait [6].

Az MPC irányítástervezéshez egy diszkrét idejű állapottérrel felírt rendszer szükséges, ezért az MPC irányítástervezés előtt először identifikálni kell a rendszert.

## 2.2 Rendszer identifikáció

Az identifikáció során keressük a rendszer átviteli függvényét ( $G$ ), amely megteremti a kapcsolatot a rendszer bemenetei ( $u$ ) és kimenetei ( $y$ ) között. A rendszer diszkrét idejű bemeneti és kimeneti jelsorozata adott periódus idejű mintavételezéssel rendelkezésünkre áll. Az identifikáció jelen esetben a lineáris aktuátor elektromotorjára készül. A rendszer bemeneti jele a motornak kiadott vezérlés, amely 3 állapotú lehet: nincs mozgás (0), dugattyúrúd kitolása (-1) és behúzása (1). A rendszer kimeneti jele az enkóder által szolgáltatott szögsebesség vagy szöghelyzet. Tehát egy bemenetű és egy kimenetű SISO rendszerről van szó ez esetben (4. ábra). A keresett átviteli függvény a munkahenger dugattyúrúdjának elmozdulása ( $S$ ) és az aktuátor vezérlőjele ( $U_{fesz}$ ) között teremt kapcsolatot.

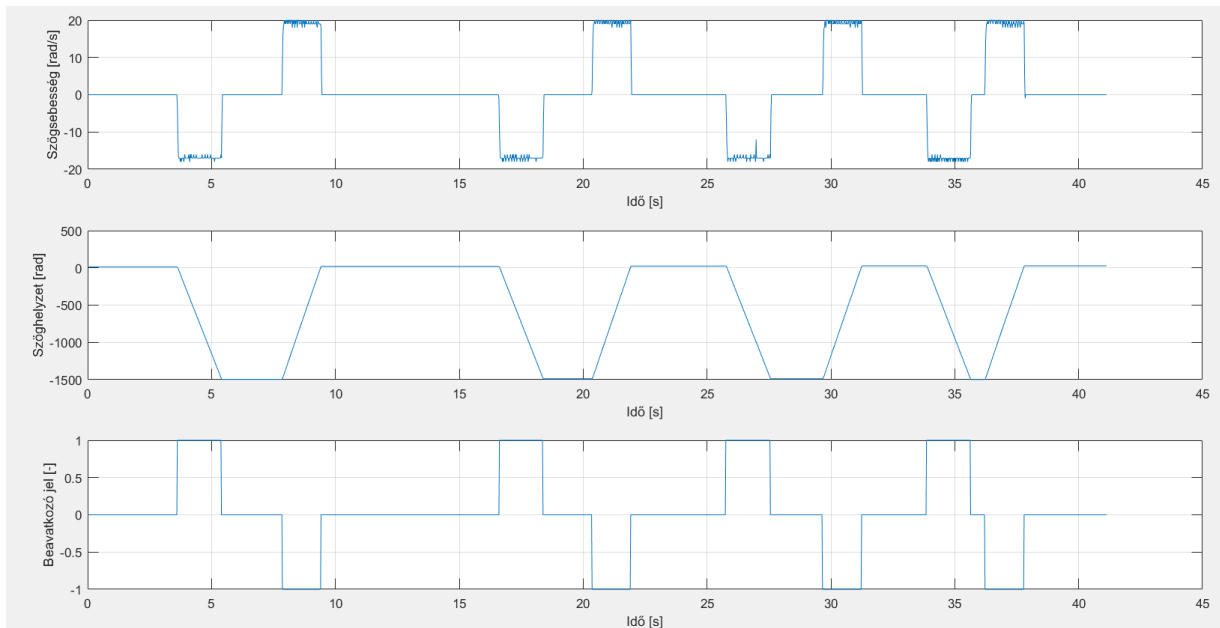


4. ábra: SISO rendszer

### **Ki- és bemeneti jelek mérése:**

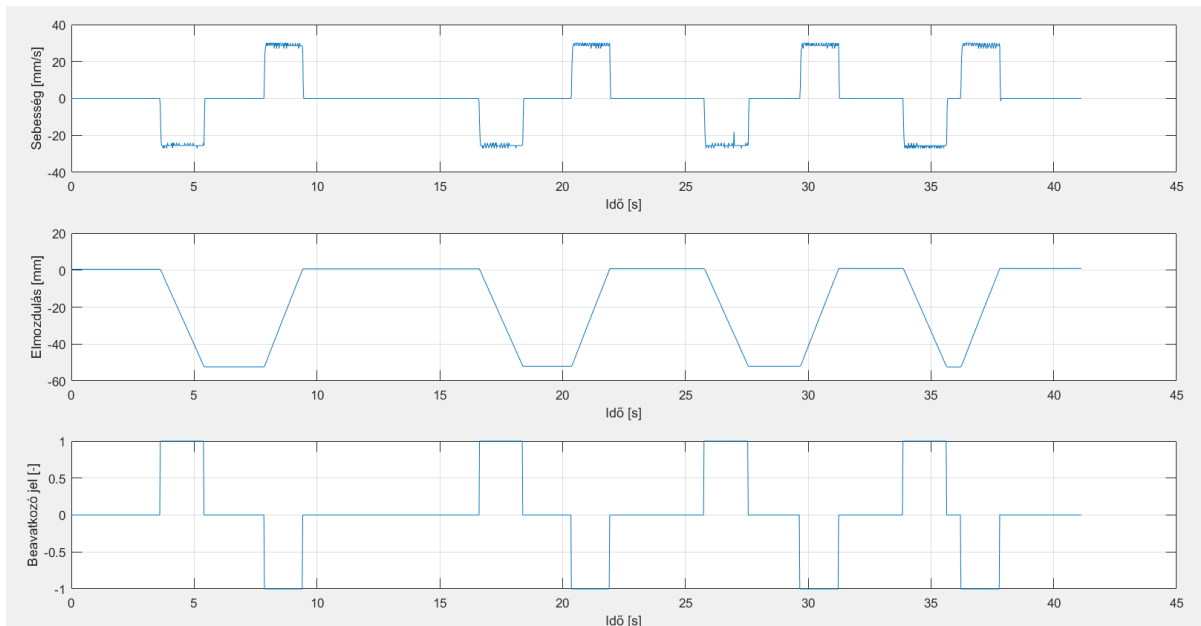
Több mérés lett elvégezve az adatgyűjtés alatt, amely során a dugattyúrúd vég helyzete, vagyis a löket hosszúságok módosítva lettek. Mindegyikre megalkotva az átviteli függvényt kiválasztható közülük a kimenetet legpontosabban előállító modell.

Az 5. ábrán látható az egyik mérés során kapott  $u$  vezérlőjelsorozat és az enkóder szöghelyzet és szögsebesség jelsorozata. A mintavételezési idő  $T = 0,02$  másodperc.



5. ábra: Mért ki- és bemeneti jelsorozatok. A bemenet az aktuátor elektromotorjának feszültséggel arányos vezérlőjele, a két kimeneti jel az aktuátor enkódere által szolgáltatott szöghelyzet és szögsebesség

A kerékdőlés szabályozását a dugattyúrúd elmozdulásának függvényében szeretnénk megfigyelni, ezért célszerű az enkóder kimenetén kapott szöghelyzet és szögsebesség értékeket átváltani egyenes vonalú dugattyúrúd elmozdulásra és sebességre. Az aktuátor áttételének információja nem áll rendelkezésre, azonban a méréskor a két véghelyzet távolsága le lett mérve, amiből kiszámolható egy arányszám a lökethossz és az elektromotor elfordulás között. Az így kapott módosított kimeneti jelsorozat a 6. ábrán látható.



6. ábra: Dugattyúrúd elmozdulás és sebesség, mint új kimeneti jelek. A bemeneti jel maradt az aktuátor elektromotorjának feszültségáramos jele

Az adatok feldolgozását Matlab fejlesztői környezetben végeztem el. Az input (vezérlő) jelek értéke 3 diszkrét érték között volt változtatható, mint korábban is említésre kerül. A huzamosabb ideig kivezérelt 1-es (UP) és -1-es (DOWN) értékek esetén zajos jelet rögzített a mérés. Azért, hogy teljesen sima négyszög jeleket megkapjunk végig kellett menni egy jelsimító algoritmussal a mért értékeken. Vezérlőjel simítást végrehajtó Matlab kódsor:

```

Umod=zeros(2057,1);
for i=2:2056
    if U(i)~=U(i-1) && U(i-1)==U(i+1) && abs(U(i))<abs(U(i-1))
        Umod(i)=U(i-1);
    else
        Umod(i)=U(i);
    end
end
end

```

Az  $i$ . adat össze van hasonlítva az  $i-1$ . és az  $i+1$ . értékkel. Ha nem egyezik meg velük és a mellette lévő két jel egyenlő akkor az  $i$ . érték felveszi az értéküket. Ez a módszer azért lehetséges, mert két rossz adat egymást nem követte a mérésben, mindig egyesével jelentek meg a jelsorozatban. Tehát most már rendelkezésre áll az ideális bemeneti és kimeneti jelsorozat.

## Rendszer állapotér reprezentációjának felírása:

A keresett állapotér reprezentáció:

$$\text{Állapotegyenlet:} \quad \dot{x}_{act} = A \cdot x_{act} + B \cdot u \quad (2)$$

$$\text{Mérési egyenlet:} \quad y = C \cdot x_{act} + (D \cdot u) \quad (3)$$

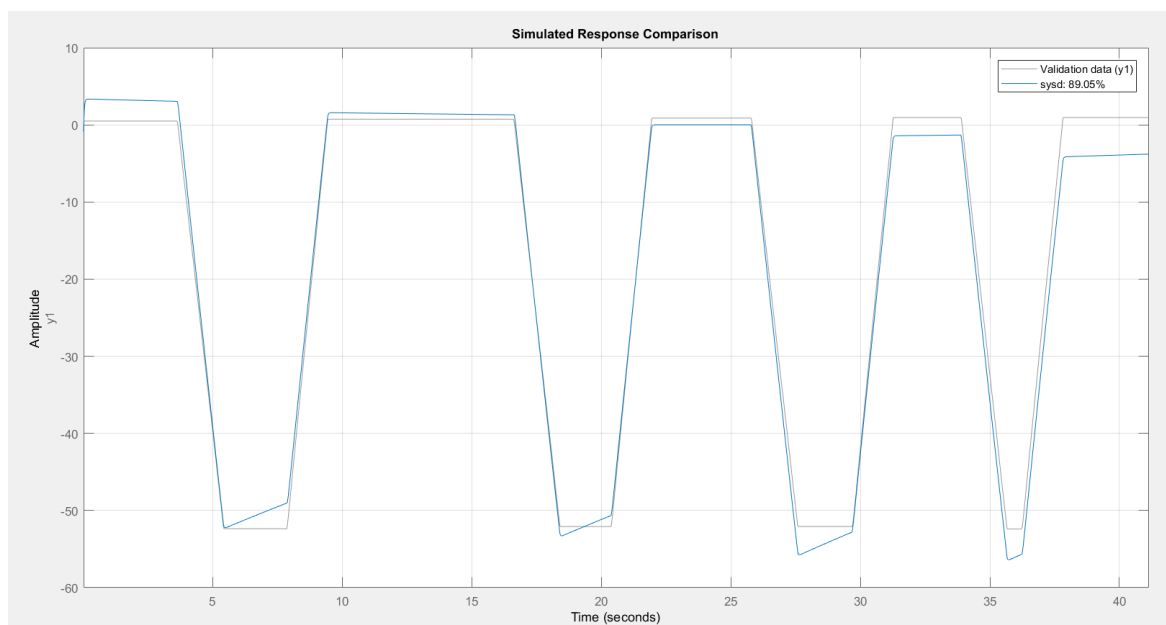
Az egyenletben az állapotok  $x_{act} = [s \ v]^T$ , ill. a vezérlőjel  $u = U_{feszt}$ , ahol „s” a dugattyúrúd elmozdulása, „v” a sebessége.

## Állapotmátrixok meghatározása:

Az egyik leggyakrabban használt identifikációs modellosztály, az ARX osztály paraméterei Matlab függvénnyel előállíthatók. Az átviteli függvény diszkrétizálva lett  $T = 0,02$  másodperces mintavételi idővel. Ezután a diszkrét rendszer átírható újabb Matlab függvénnyel állapotétes felírásra. Az így kapott állapotmátrixok a következők:

$$A = \begin{bmatrix} 1.4639 & -0.4642 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = [1 \ 0]^T; \quad C = [-0.3590 \ 0.0186]; \quad D = 0;$$

A 7. ábrán a méréssel és a rendszerrel kapott kimeneti jelsorozat (elmozdulás az idő függvényében) hasonlítható össze egymással. Látható, hogy a modell 89,05%-os pontossággal illeszkedik a mérésre, amely elfogadhatónak mondható. Most, hogy ismert a rendszer el lehet kezdeni az MPC megtervezését.



7. ábra: Mért jelsorozat összehasonlítása a modell által kapott kimenettel

## 2.3 MPC tervezés referencijel követésre

Az MPC feladata egy jelkövetés realizálása, amely a lineáris aktuátor dugattyújának a pozíciójának az irányítására vonatkozik. Célom egy előre meghatározott dugattyú mozgás lekövetése egy adott referencijel alapján.

Az ismert állapottér reprezentáció:

$$\text{Állapotegyenlet:} \quad \dot{x}_{act} = \begin{bmatrix} 1,4639 & -0,4642 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_{act} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \quad (3)$$

$$\text{Mérési egyenlet:} \quad y = [-0,359 \quad 0,0186] \cdot x_{act} \quad (4)$$

### Kezdeti feltételek:

- **k:** a pillanatnyi idő
- **T<sub>s</sub>:** mintavételi idő, ebben az esetben T<sub>s</sub> = 0,02 s
- **N<sub>p</sub> predikciós horizont:** az optimalizációs ablak hossza, a megbecsült jövőbeni állapotok elemszáma:

$$x(k+1|k), x(k+2|k), \dots, x(k+m|k), \dots, x(k_i + N_p|k)$$

Az  $x(k+1|k)$  egy becsült állapotváltozó adott aktuális tervezési információkkal  $x(k_i)$ -ből.

- **N<sub>c</sub> kontrol horizont,** a megbecsült jövőbeni vezérlőjelek elemszáma

$$u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+N_c)$$

A kontrol- és predikciós horizontot is 4-nek választottam meg, így az időben előre 4 bemeneti jelet és 4 állapotot vizsgálunk.

### Predikció:

Az irányítástervezés performancia egyenlete a  $k$ -edik időpontban a következő:

$$z(k) = C \cdot x(k) - r(k) \quad (5)$$

ahol  $r(k)$  a referencijel a  $k$ -edik időpontban.

Az irányítástervezés performancia egyenlete a  $(k+1)$ -edik időpontban a következő:

$$z(k+1) = C \cdot x(k+1) - r(k+1) = C \cdot A \cdot x(k) + C \cdot B \cdot u(k) - r(k+1) \quad (6)$$



A performancia egyenletrendszer a teljes predikcióra mátrixos alakban [8]:

$$Z = \begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N_p) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r(k+1) \\ r(k+2) \\ \vdots \\ r(k+N_p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Z = \underbrace{\begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}}_F \cdot x(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2} & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}}_\phi \cdot \begin{bmatrix} u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N_c) \end{bmatrix} - \underbrace{\begin{bmatrix} r(k+1) \\ r(k+2) \\ \vdots \\ r(k+N_p) \end{bmatrix}}_{Y_{ref}}$$

$$Z = F + \phi \cdot U - Y_{ref} \quad (8)$$

Megj.: Z dimenziója  $N_p$ , U dimenziója pedig  $N_c$ .

Az F mátrix tartalmazza a rendszer állapotait, a  $\phi$  mátrix pedig az állapotmátrixokból épül fel.

### Költségfüggvény:

A jövőbeni U bemenet meghatározásához a következő költségfüggvény minimalizálása szükséges [8]:

$$J(U) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N Z^T(U) Q Z(U) + U^T R U \rightarrow \min! \quad (9)$$

ahol Q és R súlyozó mátrixok. R egy  $N_c \times N_c$ -s egységmátrix, a Q pedig egy  $N_p \times N_p$  dimenziójú

mátrix.  $N_p = 5$  esetén:

$$Q = \begin{bmatrix} 10^6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^4 \end{bmatrix}.$$

Előbbi minta szerint megválasztva a Q mátrix értékei jobban súlyozzák a jelenhez (k-hoz) közelebbi predikciós értékeket.

A performancia egyenlet (8) behelyettesítve a (9) -es egyenletbe a következő új költségfüggvényt eredményezi [8]:

$$J(U) = \frac{1}{2} U^T \underbrace{(\phi^T Q \phi + R)}_{\delta} + \underbrace{(F^T Q \phi + Y_{ref} Q \phi)}_{\beta} U + \varepsilon \quad (10)$$

$$J(U) = \frac{1}{2}U^T \delta U + \beta^T U + \varepsilon \quad (11)$$

ahol  $\varepsilon$  konstans érték, ezért figyelmen kívül hagyható a minimalizálásnál.

A költségfüggvény minimalizálásával biztosítható az  $Y_{\text{ref}}$  referencia jel követése.

### Rendszerkorlátok figyelembevétele:

A rendszer kimeneti és bemeneti jelei korlátozásokat tartalmaznak, amiket az irányítástervezés során figyelembe kell venni.

#### 1. Bemeneti jelre vonatkozó korlátozás:

Az  $u$  bemeneti jel 3 diszkrét értéket vehet fel:  $u \in U [-1, 1, 0]$ . Ha a control horizont elemszáma  $N_c = 4$ , akkor a jövőbeni bemeneti jelek variációja a 3 lehetséges diszkrét jel alapján  $3^{N_c} = 3^4 = 81$ . Ez azt jelenti, hogy 81 esetben kell kiszámítani a költségfüggvényt, majd ezek közül kiválasztható a legkisebb értéket adó jövőbeni bemeneti jel variáció.

#### 2. Prediktált kimeneti jelre vonatkozó korlátozása:

Azért, hogy a lineáris aktuátor dugattyújának pozíciója ne fusson túl a két adott véghelyzet között a lehetséges prediktált állapotokat ( $y_{k+i}$ ) korlátozni kell. A prediktált jövőbeni állapotoknak egy maximális és egy minimális érték között kell lenniük. Ha a vizsgált vezérlőjelre a rendszer olyan kimenetet adna, hogy az kifut a megengedett számtartományból, akkor a szóban forgó vezérlő jelet levonjuk a lehetséges bemenetek közül.

A felső határ jelen esetben  $y_{\text{max}} = 50$  (mm), az alsó határ pedig  $y_{\text{min}} = -50$  (mm). A következő formában írható fel a korlátozás a prediktált állapotokra vonatkozóan [8]:

$$\begin{aligned} y_{k+1}^{\text{max}} &\geq y_{k+1} \geq y_{k+1}^{\text{min}} \\ y_{k+2}^{\text{max}} &\geq y_{k+2} \geq y_{k+2}^{\text{min}} \\ &\vdots \\ y_{k+N_p}^{\text{max}} &\geq y_{k+N_p} \geq y_{k+N_p}^{\text{min}} \end{aligned}$$

Mátrixos formában felírva a következőnek kell teljesülnie [8]:

$$Y^{\text{max}} \geq F + \phi U \geq Y^{\text{min}} \quad (12)$$

A jelen esetben a korlátok értékei vektorosan:

$$Y^{\text{max}} = [50, 50, 50, 50] \text{ és } Y^{\text{min}} = [-50, -50, -50, -50].$$

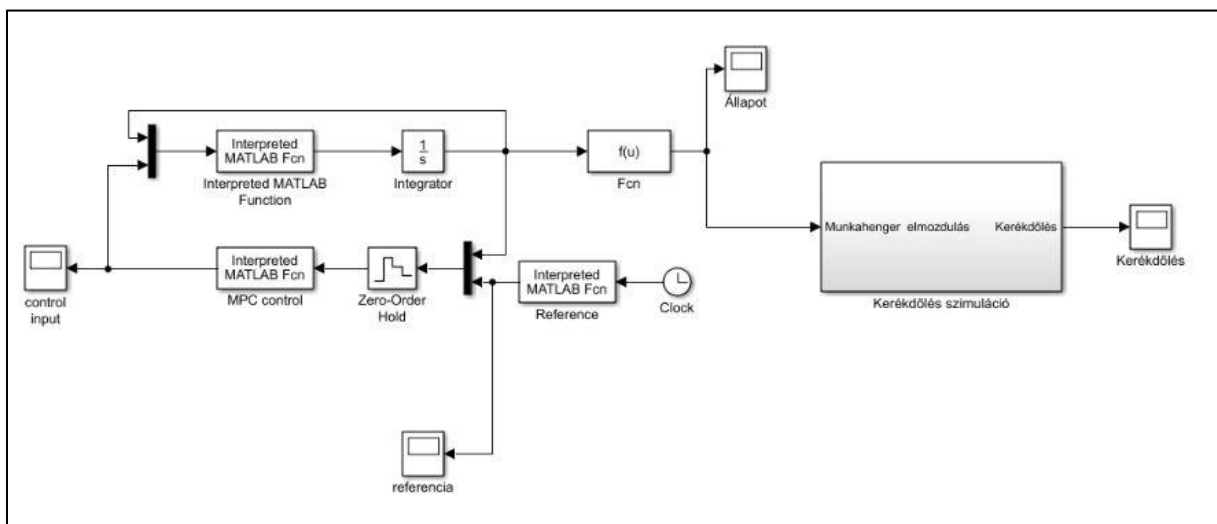
Összegezve a szabályozónak a következő kritériumoknak kell megfelelnie:

- az  $y_{ref}$  referenciajel pontos követése
- a bemeneti korlátok figyelembe vétele,  $u \in [-1,0,1]$
- fizikai korlátok figyelembe vétele, a munkahenger két véghelyzet között mozoghat egy zárt intervallumon ( $y \in [-50;50]$ )
- költségfüggvény minimalizálása

### 3. Szimuláció

#### Zárt hurok:

A 8. ábrán látható a zárt körű MPC szabályozó Simulink blokksémája. Az MPC függvény kiszámítja (aktuális idő:  $k$ ) a rendszer következő  $(k+1)$ -edik optimális bemeneti jelét, amit megkap az állapotter reprezentációval definiált rendszer. Ez a rendszer a kapott vezérlő jel alapján kiszámítja a következő  $y(k+1)$  kimenetet, amit ezután az MPC megkap, hogy kitudja számítani az aktuális állapotok alapján  $(k+2)$ -edik  $u$  bemeneti jelet, amit majd tovább ad. Ez a zárt kör ismétlődik folyamatosan. Az MPC blokk az aktuális állapoton kívül megkapja még a követendő referencia jelet.



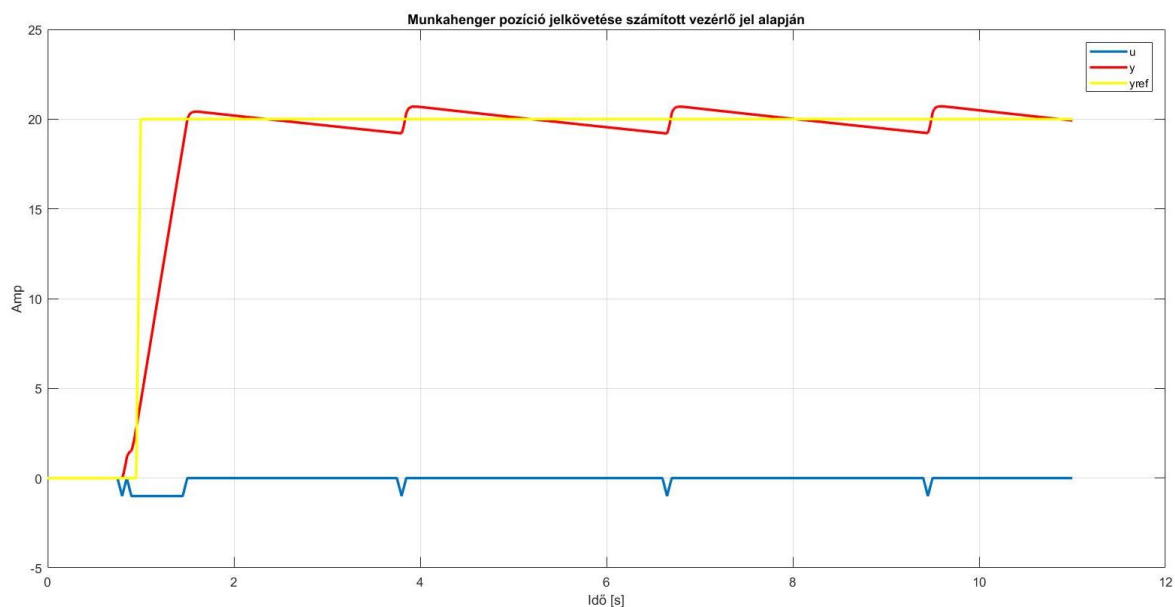
8. ábra: Zárt hurokú szabályozó rendszer kiegészítve a kerékdőlés szimulációval

A 8. ábrán a „Kerékdőlés szimuláció” blokk tartalmazza a futómű SimMechanics modelljét. A futómű modell megkapja a zártkörű rendszer aktuális kimenetét (munkahenger pozíció), a kimeneten pedig a kerékdőlés jelenik meg fokban számítva.

## Lineáris aktuátor szabályozása

### Első szimuláció:

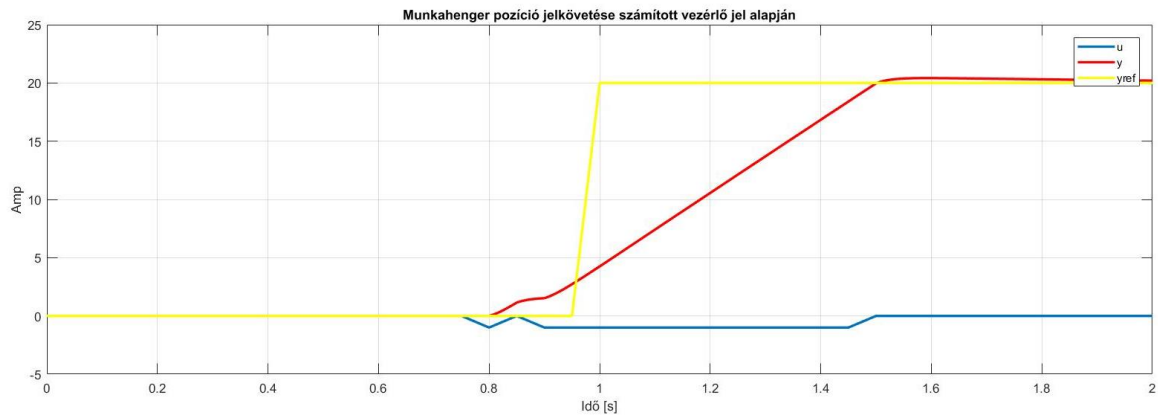
A dugattyúrúd kezdeti állapotában a nulla pozícióban van, vagyis nincs kerékdőlés. A referencia jel értéke kezdetben szintén nulla, majd az 501. mintavételezésre tartósan 20-ra vált. Az elkészített Simulink modell futtatása után a 9. ábrán látható eredményeket kaptam. Sárga színnel látható az előre megadott referencia jel, amelyet követni szeretnénk. A kék jel az MPC által meghatározott  $u$  vezérlőjelek, a piros jel pedig a rendszer tényleges kimenetei (dugattyú elmozdulás).



9. ábra: Munkahenger pozíció követése a szabályozó által megbecsült vezérlőjel alapján

A 10. ábrán jobban kiemelve látható az a tranziens folyamat, ahol a kimeneti jel 0-ról 20-ra elér és felvesz egy közel állandósult állapotot jelen esetben. Jól megfigyelhető az MPC módszer alkalmazásának előnye ezen az ábrán. Mivel az MPC-vel előre vizsgáljuk a kontrol horizontnak köszönhetően a lehetséges bemeneteket a jövőbeni referencia értékek eléréséhez, ezért a rendszer előbb veszi észre, hogy a referencia jelben ugrás lesz és előbb kezdi el növelni a kimeneti jelet. Míg a referencia jel 0,95 s körül kezd felugrani az állandósult értékre, addig az

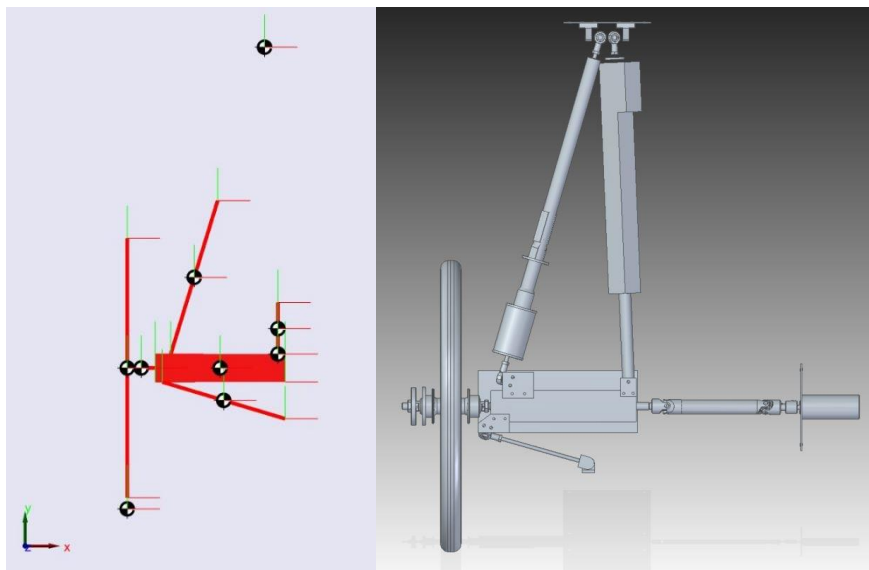
előre tekintésnek köszönhetően a kimeneti jel már 0,8 s-nél elkezd kiadni a (-) -es vezérlő jelet és elkezd növekedni a munkahenger pozíciójának értékét. Ezzel a módszerrel hamarabb elérhető az állandósul állapot és ezáltal a kimeneti jelnek szép felfutása van.



10. ábra: Munkahenger pozíció követés tranziensének megfigyelése

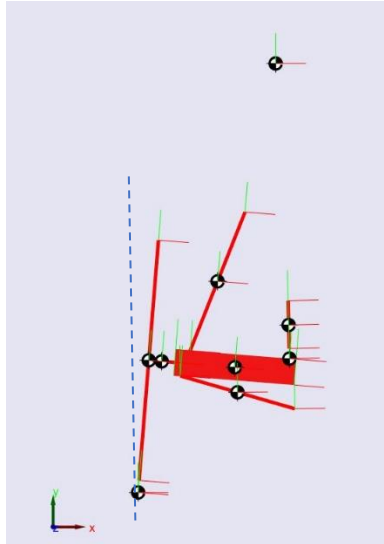
### SimMechanics futómű:

A vizsgált McPherson futómű egyszerűsített változata a Simulink SimMechanics tool-jával lett elkészítve, segítségével a kerékdőlés változása megfigyelhető az aktuátor beavatkozásának függvényében. A 11. ábrán a futómű 3D CAD modellje (jobb oldalt) és az egyszerűsített SimMechanics modell megjelenítése (bal oldalt) látható. A bekötési pontok megegyeznek a két modellben.



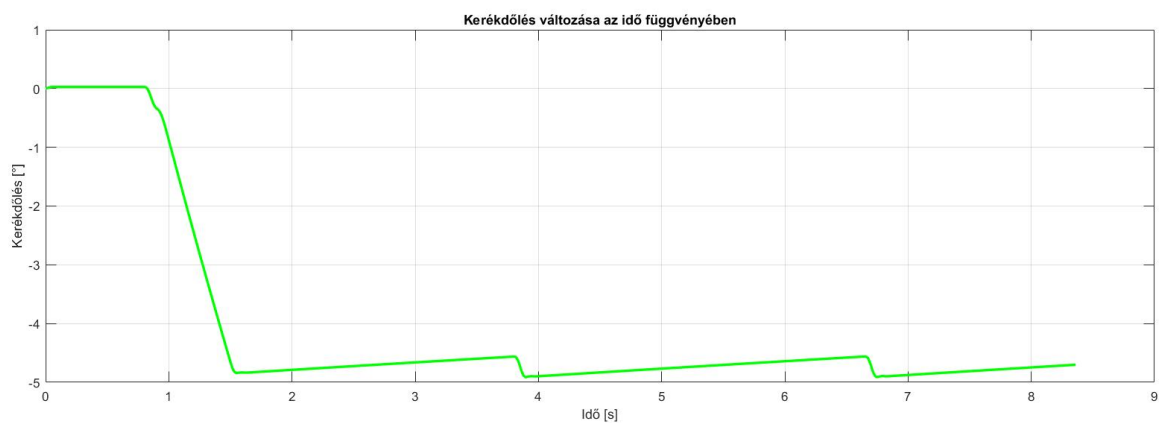
11. ábra: 3D CAD futómű modell (jobbra) és ennek az egyszerűsítése SimMechanics környezetben (balra)

A szimuláció közben az aktuátor pozíciót módosít, a referencia jelnek megfelelően 20 mm-t kitolódik, aminek hatására megdőnti a kereket. A kerékdőlés további hatása, hogy a kerék talppontja (N) is elmozdul, ezáltal létre jön az elkormányzási sugár.



12. ábra: Futómű negatív kerékdőlésének bemutatása

A szimuláció során kapott kerékdőlés változást az idő függvényében a 13. ábra mutatja. Alaphelyzetben nincs kerékdőlés, azaz  $0^\circ$ , majd az aktuátor beavatkozásával elkezdi csökkenni  $-5^\circ$ -ig. A kapott dőlés mértékegysége helyesen negatív, mivel a kocsiszekrény felé, óramutató járással megegyezően elforgatva értelmezzük a negatív kerékdőlést.



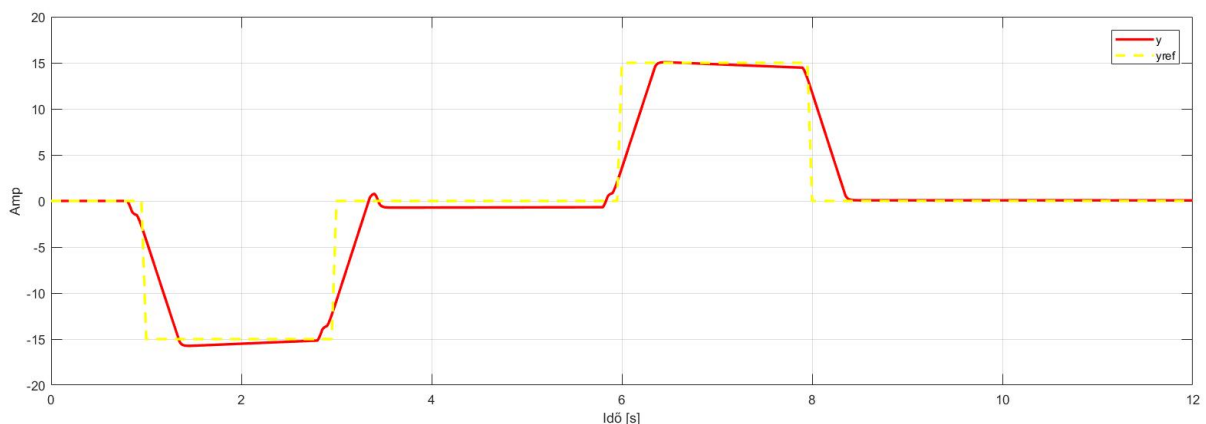
13. ábra: Kerékdőlés változása az idő függvényében az első szimuláció során

### Sávváltás szimuláció:

A lineáris aktuátor irányítástervezésével lehetőség nyílik asszisztens rendszerek megvalósítására. Egy ilyen segédrendszer lehet az önálló sávváltás megvalósítására képes kormányzás a gépjárművezető beavatkozása nélkül.

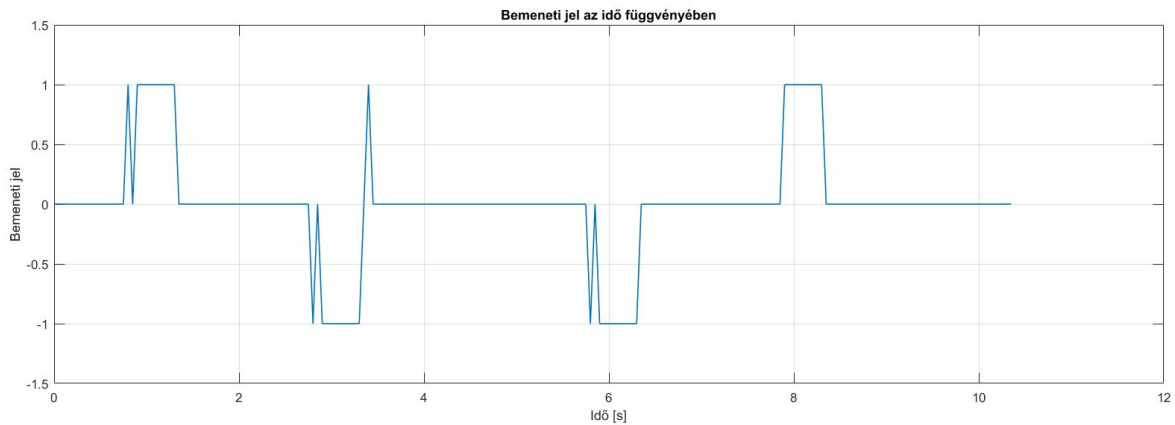
Első lépésként az aktuátor felfelé húzza a dugattyút, ezáltal pozitív kerékdőlést realizál. Mivel egy jármű bal első kerekét reprezentálja a negyedjármű modell, ezért a pozitív kerékdőlés hatására a jármű balra, a belső sáv felé fog befordulni. Meg kell jegyezni, hogy a jobb első keréknek a bal elsőhöz képest ellentétesen, a kocsiszekrény vagy másként a belső sáv felé kell bedőlnie (negatív kerékdőlés). Erre van is lehetőség a két kerékhez külön beépített egy-egy aktuátorral. Második lépés a kerék bedöntésének megszüntetése. Ilyenkor a jármű már ferdén áll a sávban és tart balra a belső sáv felé. Harmadik lépésként az első lépéshez hasonló, de ellentétes kerék bedöntés kezdődik. Ezalatt a jármű visszakormányozódik a haladási irányba. Ha ez is megtörtént, akkor a kerékdőlést meg kell szüntetni, majd a sávváltás befejezettnek tekinthető. A szimuláció során a különböző műveletek végrehajtásához körülbelüli időtartamokat vettem fel, ezért ez tovább fejlesztést igényelne a jövőben egy tényleges sávváltás megvalósítására.

A 14. ábrán látható a szimuláció során kapott jelkövetés eredménye. A piros színnel jelölt görbe a munkahenger elmozdulás, a sárgával jelölt pedig a referenciajel, amelyet követni szeretnénk. Itt is jól megfigyelhető, hogy az előre látásnak köszönhetően a referenciajel ugrása előtt megindult a munkahenger mozgására a kivezérlés, ezáltal gyorsabb referenciajel követés valósul meg.



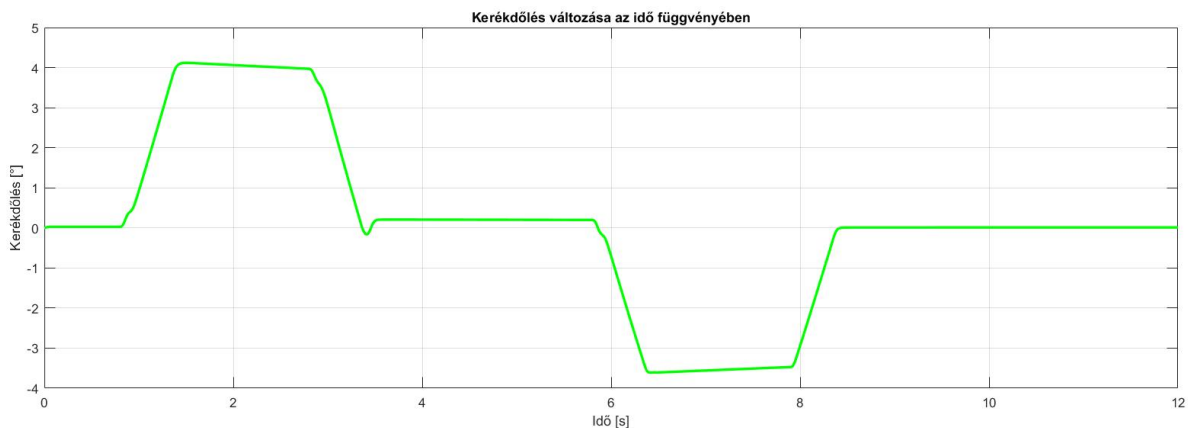
14. ábra: A sávváltás során a munkahenger pozíciójának alakulása a referencia jelhez viszonyítva az idő függvényében

A 15. ábrára került külön bemutatásra a vezérlő jel a jobb áttekinthetőségért. Helyesen -1, 0 és 1 diszkrét értékeket vesz fel, annak megfelelően, hogy éppen lefelé mozog, áll vagy felfelé mozog a munkahenger dugattyúrúdja.



15. ábra: A bemeneti vezérlő jel a sávváltás során az idő függvényében

A 16. ábrán a kerékdőlés alakulása figyelhető meg, amely a munkahenger elmozdulással arányos jelet ad. Először a balra kormányzásnak megfelelően a bal első kereket pozitívan, a kocsiszekrénytől kifelé kell megdönteni, utána 6 másodperctől ennek a fordítottja zajlik le a haladási irányba álláshoz.



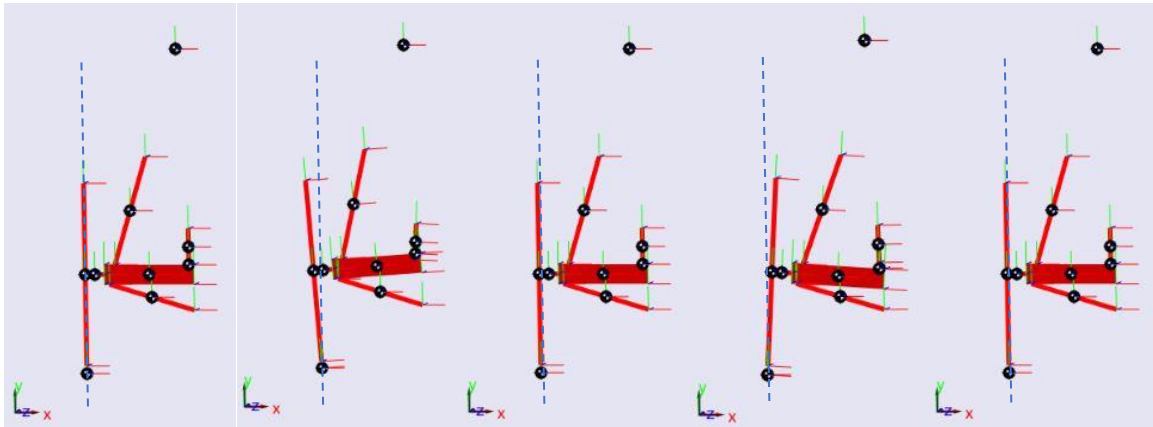
16. ábra: A sávváltás során a kerékdőlés változása az idő függvényében

A 17. és 18. ábrán jól megfigyelhető a kerékdőlési irányok és a sávváltási folyamat ( $\gamma$  a kerékdőlés értéke fokban). Itt szintén a konstrukciónak megfelelően a bal első kereket vizsgáljuk, a jobb első kerék esetén a bedőlések ellentétes irányúak, de azonos nagyságúak lennének.

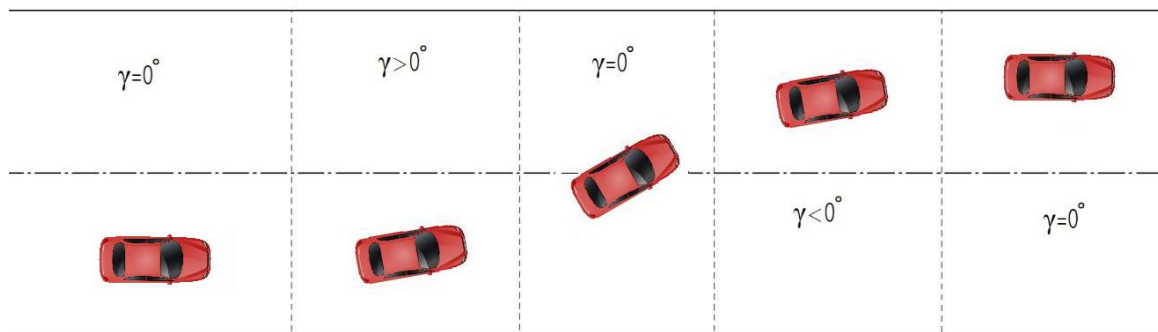


A sávváltásos szimuláció során 5 fő szakaszt különböztethetünk meg időben:

1.  $\gamma = 0^\circ$ , a jármű egyenes halad a külső sávban.
2.  $\gamma = ]0^\circ, 4^\circ[$ , a jármű bekormányozódik a belső sáv felé.
3.  $\gamma = 0^\circ$ , a jármű a sávok irányához viszonyítva ferde helyzetben tart a belső sáv felé.
4.  $\gamma = ]-0^\circ, -4^\circ[$ , a jármű visszakormányozódik a haladási irányba már a belső sávban.
5.  $\gamma = 0^\circ$ , a jármű egyenesen halad a belső sávban



17. ábra: Futómű kerékdőlésének alakulása, az időben balról jobbra



18. ábra: Sávváltás elméleti lebonyolítása, a kerékdőlések előjelei a szakaszokon

### Értékelés:

A két bemutatott szimuláción keresztül megfigyelhető az MPC jelkövető szabályozó működése a lineáris aktuátorra vonatkozóan. Az első esetben 0-ról 20 mm-re lett elmozdítva az aktuátor. Megfigyelhető volt, hogy az előre tekintésnek köszönhetően a rendszer bemenetén előbb, a

referencia jel ugrása előtt megjelent a (-1) -es, dugattyú pozícióját módosító kimenet. Ezáltal hamarabb eléri a rendszer a referencia jelet.

A második esetben a referencia jel úgy lett módosítva, hogy egy sávváltás realizáló mechanizmus menjen végbe. Megállapíthatjuk, hogy a tervezett MPC jelkövető szabályozás képes elvégezni a feladatát figyelembe véve a bemeneti és állapotokra vonatkozó korlátokat.

## 4. Összegzés

A dolgozatomban az MTA SZTAKI-ban megépített változtatható geometriájú negyedjármű modellt megvalósító konstrukció lineáris aktuátorának az MPC irányítástervezését végeztem el. Elsődleges feladatomban az aktuátor dugattyújának a pozíció szabályozására irányult, aminek hatására módosul a kerékdőlés és ezzel együtt a jármű elkormányzása valósítható meg. Ehhez több részfeladatot kellett elvégezni:

1. Először ismertettem az intelligens futóművek főbb csoportjait, majd közülük az itt is vizsgált változtatható geometriájú (VG) futóművek felhasználására mutattam be néhány lehetőséget különböző irodalmakból. Bemutattam továbbá a szabályozandó futómű felépítését.
2. Második fő lépés a lineáris aktuátor identifikációja volt. A mért jelek korrigálása után a Matlab segítségével elkészült az állapottér reprezentáció. A rendszer bemenete 3 diszkrét feszültség arányos jel. A rendszer állapota a munkahenger elmozdulása.
3. Modell prediktív irányítástervezés során megvalósult a referencia jel követés, figyelembe véve a bemenetekre és az állapotokra vonatkozó korlátok. Egy zárt hurokként működik a szabályozott rendszer. Az MPC-hez készült függvény kiszámolja a következő bemenetet, amit a rendszer megkap és ez alapján előállítja a  $(k+1)$ -edik állapotot, amit pedig megkap az MPC.
4. Az irányítástervezés működése két esetre lett megvizsgálva és bemutatva. Első esetben egy darab tranziens volt 0 és 20 mm között, második esetben viszont egy sávváltással megegyező járműmozgást valósítottam meg. A sávváltásnál a  $[-15;15]$  mm-es intervallumot használtam fel munkahenger pozíciókra. Elmondható, hogy mindkét esetben sikerült lekövetni a referencia jelet viszonylag kis eltérésekkel.

A jövőben továbbfejlesztési lehetőség lehet az állandósult állapotú kimenet pontos értéken tartása. A diagrammokon megfigyelhetők, hogy a kapott kimeneti jelek egy kisebb pontatlanságot tartalmaznak, aminek eredményeképpen a referencia jel közelében enyhén

alá-felé mozog a kimeneti jel és emiatt folyton korrigálnia kell magát. Ezen kívül összetettebb továbbfejlesztési lehetőség lehet egy asszisztens rendszer megvalósítása, akár a most is tárgyalt sávváltás vagy egy trajektória lekövetésének megtervezése a kerékdőlés változtatás felhasználásával. A tervezés mellett a szimulációt is érdemes lehet elkészíteni, erre lehetőséget adhat a CarSim gépjárművek mozgásának szimulációjára alkalmas szoftver.

## 5. Ábrajegyzék

1. ábra: Szabályozandó negyedjármű modell.....	8
2. ábra: Egyszerűsített negyedjármű modell, bemutatva a kerékdőlés közvetlen hatása az elkormányzási sugárra.....	9
3. ábra: MPC alapvető működésének ismertetése [7] .....	10
4. ábra: SISO rendszer.....	12
5. ábra: Mért ki- és bemeneti jelsorozatok. A bemenet az aktuátor elektromotorjának feszültséggel arányos vezérlőjele, a két kimeneti jel az aktuátor enkódere által szolgáltatott szöghelyzet és szögsebesség .....	13
6. ábra: Dugattyúrúd elmozdulás és sebesség, mint új kimeneti jelek. A bemeneti jel maradt az aktuátor elektromotorjának feszültségarányos jele .....	14
7. ábra: Mért jelsorozat összehasonlítása a modell által kapott kimenettel.....	15
8. ábra: Zárt hurokú szabályozó rendszer kiegészítve a kerékdőlés szimulációval .....	19
9. ábra: Munkahenger pozíció követése a szabályozó által megbecsült vezérlőjel alapján .....	20
10. ábra: Munkahenger pozíció követés tranziensének megfigyelése .....	21
11. ábra: 3D CAD futómű modell (jobbra) és ennek az egyszerűsítése SimMechanics környezetben (balra).....	21
12. ábra: Futómű negatív kerékdőlésének bemutatása.....	22
13. ábra: Kerékdőlés változása az idő függvényében az első szimuláció során.....	22
14. ábra: A sávváltás során a munkahenger pozíciójának alakulása a referencia jelhez viszonyítva az idő függvényében .....	23
15. ábra: A bemeneti vezérlő jel a sávváltás során az idő függvényében .....	24
16. ábra: A sávváltás során a kerékdőlés változása az idő függvényében .....	24
17. ábra: Futómű kerékdőlésének alakulása, az időben balról jobbra.....	25
18. ábra: Sávváltás elméleti lebonyolítása, a kerékdőlések előjelei a szakaszokon.....	25

## 6. Irodalomjegyzék

- [1] Fényes Dániel - Változtatható geometriájú futóművön és differenciális nyomatéklosztáson alapuló kormányzási rendszerintegrált irányítástervezése
- [2] Min Yu, Simos A. Evangelou, Daniele Dini – Model Identification and Control for a Quarter Car Test Rig os Series Active Variable Geometry Suspension IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, July 2017, Pages 3376-3381
- [3] U. Lee and C. Han, \_A suspension system with a variable roll centre for thmprovement of vehicle handling characteristics,\_ Journal of Automobile Engineering, vol. 215, pp. 677\_696, 2001.
- [4] Balázs Németh, Péter Gáspár - LPV-based Variable-Geometry Suspension Control Considering Nonlinear Tyre Characteristics IFAC-PapersOnLine, Volume 48, Issue 26, 2015, Pages 61-66
- [5] Kádár Lehel, Dr. Varga Ferenc, Kőfalusi Pál – Közúti járművek szerkezetana. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014
- [6] Liuping Wang – Model Predictive Control System and Implementation Using MATLAB. School of Electrical and Computer Engineering, RMIT University Melbourne, VIC 3000 Australia
- [7] <https://math.stackexchange.com/questions/1098070/model-predictive-control>
- [8] Balázs Németh, Péter Gáspár, Tamás Hegedűs – Design of probability -based overtaking strategy for autonomous vehicles