

Układ regulacji ABS z wykorzystaniem zbiorów rozmytych

Założenia projektowe:

- Ograniczenie projektu do jednego koła/ćwiartki pojazdu przyjmując uproszczenia poza ścisłym zagadnieniem założonego modelu.
- Utworzenie dokładnego modelu dynamiki koła wraz z uproszczonym modelem tarcia Burckhardt'a.
- Zaprojektowanie częściowego układu ABS, odpowiedzialnego w szczególności za utrzymanie stabilności podczas hamowania poprzez dostosowanie docisku klocka hamulcowego, aby uzyskać optymalny współczynnik poślizgu.
- Zaproponować alternatywny regulator PID oparty na zbiorach rozmytych, odporny na zmiany warunków powierzchni, wykorzystujący regulator typu fuzzy do kontroli nad poszczególnymi wzmocnieniami K_p , K_i , K_d .

Model układu:

1. Funkcjonowanie:

Skład układu ABS:

- Czujniki prędkości kół (elektromagnetyczne, albo czujniki Halla zamocowane na elementach rotujących)
- Regulator – reguluje poślizg koła, otrzymuje, wzmacnia i filtruje sygnały z czujników służące do kalkulacji prędkości oraz przyspieszenia obrotowego (tutaj zaimplementowany jest właściwy ABS)
- Modulator hydrauliczny – zajmuje się regulacją właściwą ciśnienia płynu hydraulicznego działającego na hamulce bezpośrednio – otrzymuje sygnał z regulatora (bypass)
- Urządzenie hamujące – hamulec

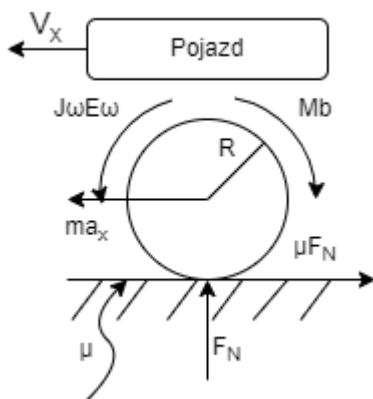
2. Zasada działania:

Gdy wykryte jest blokowanie się koła ECU nakazuje HCU zwolnić hamulce. Po zwiększeniu prędkości koła ECU ponownie aplikuje siłę hamującą, tak aby zachować poślizg (wheel slip) w określonej wartości lub interwale.

HCU kontroluje ciśnienie płynu hamulcowego do każdego klocka hamulcowego na podstawie inputu z układu czujników, regulując tym sposobem prędkość kół.

Model dynamiki koła:

- Moment hamujący, siła tarcia
- Dwa st. swobody: v_x , ω



Równania ruchu:

$$ma_x = -\mu F_N$$

$$J\epsilon = \mu R F_N - M_b$$

Stopień poślizgu:

$$\lambda = \frac{v_x - \omega R}{v_x}$$

Stopień narastania poślizgu ($\dot{\lambda}$):

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{v}_x(1 - \lambda) - R\dot{\omega}}{v_x}$$

Matematyczny model tarcia (Burckhardt model):

$$\mu_r(\lambda, v_x) = [c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda]e^{-c_4\lambda v_x} \quad , \text{ gdzie:}$$

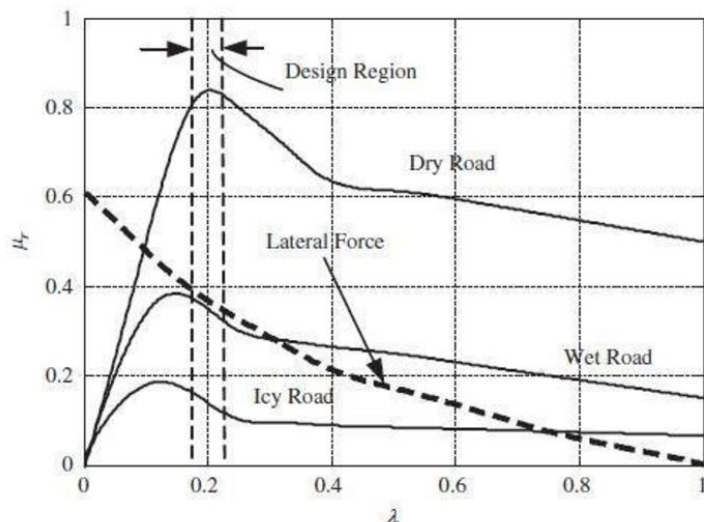
c_1 – max. wartość kąta tarcia

c_2 – kształt kąta tarcia

c_3 – różnica w kącie tarcia między max. wartością, a w $\lambda = 1$

c_4 – wartość charakteryzująca wilgoć, przybiera wartość $0.02 \div 0.04 \left[\frac{s}{m}\right]$

Zależność poślizgu od tarcia:



Hydraulika w układzie / przejście zmiennej wejściowej regulacji na moment hamujący:

Odpowiedź układu hydraulicznego w realnym pojeździe można opisać osobno jako bardzo złożony proces, ale na potrzeby rozważanego układu możemy z dostateczną dokładnością przybliżyć zachowanie jednej części hamulca (pomijając master brake oraz szersze funkcjonowanie hydrauliki pojazdu).

Zdefiniujemy go jako obiekt inercyjny I rzędu o postaci:

$\frac{K}{Ts+1}$, którego parametry są dla nas arbitralne i na potrzeby modelu zostały przyjęte następująco: $K=100$; $T=0.01$.

Dodatkowo, aby otrzymać odpowiedź bardziej odpowiadającą rzeczywistej uwzględnimy opóźnienie występujące w takich elementach jako całkowanie z nasyceniem, także w dziedzinie ciągłej nasz obiekt przyjmuje postać:

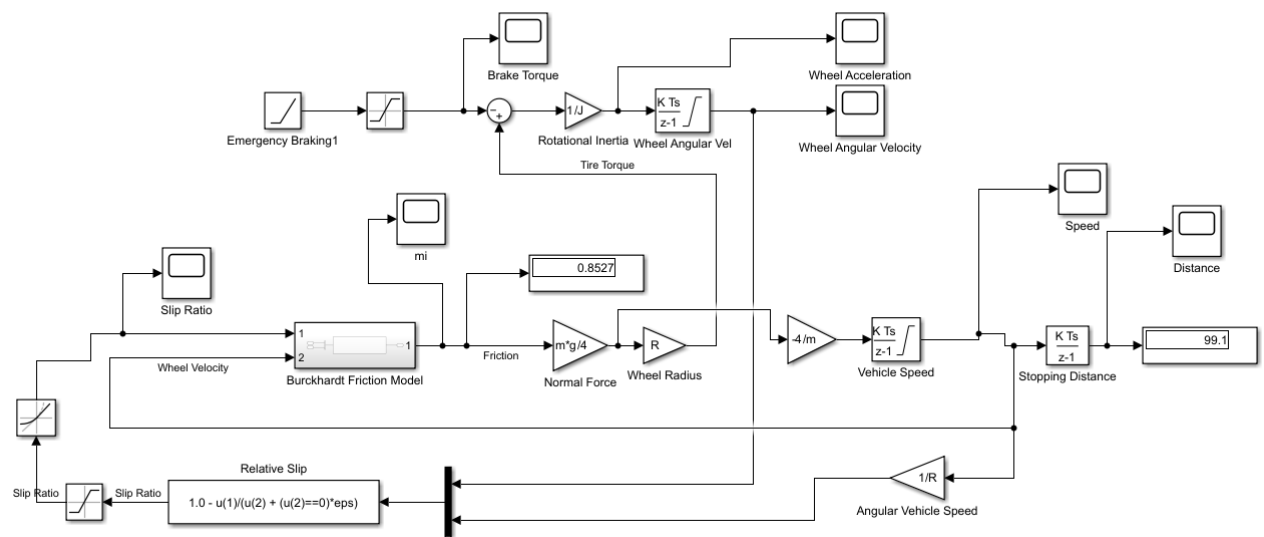
$$\frac{100}{s(0.01s+1)} \cdot$$

Po przejściu na dziedzinę dyskretną za pomocą metody 'zoh' otrzymujemy następującą transmitancję dyskretną:

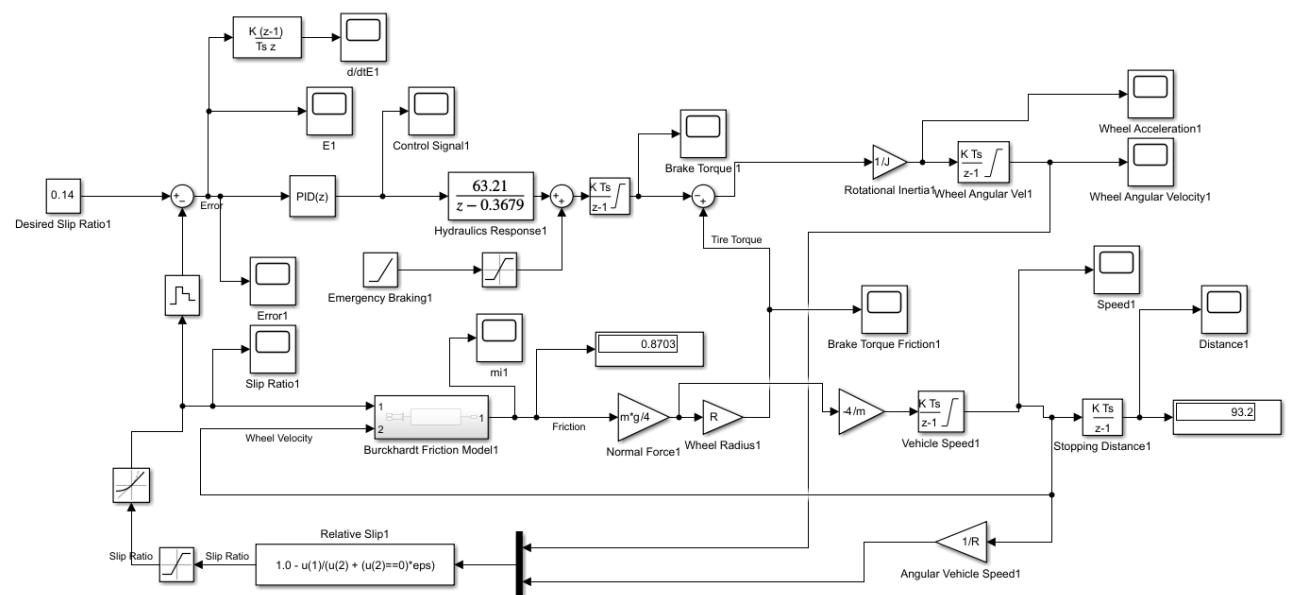
$$\frac{0.3679z + 0.2642}{z^2 - 1.368z + 0.3679}$$

Układ zamodelowany w Simulinku:

a) Układ referencyjny bez zaimplementowanego układu ABS:



b) Układ referencyjny z dyskretnym regulatorem PID:



c) Fragment kodu z dobranymi parametrami dla modelu oraz parametry regulatora:

```
R=0.315;%Promień koła
J=1.6;%Moment bezwładności koła
Mb=900;%Maksymalny moment hamujący
m=1200;%Masa całego pojazdu
g=9.81;
V0=40;%Początkowa prędkość pojazdu [m/s]
```

```
%Suchy asfalt
```

```
c11=1.2801;
```

```
c22=23.99;
```

```
c33=0.52;
```

```
c44=0.03;
```

```
%Mokry asfalt
```

```
c1=0.857;
```

```
c2=33.822;
```

```
c3=0.347;
```

```
c4=0.035;
```

```
Ts=0.01;
```

```
%Hydraulika
```

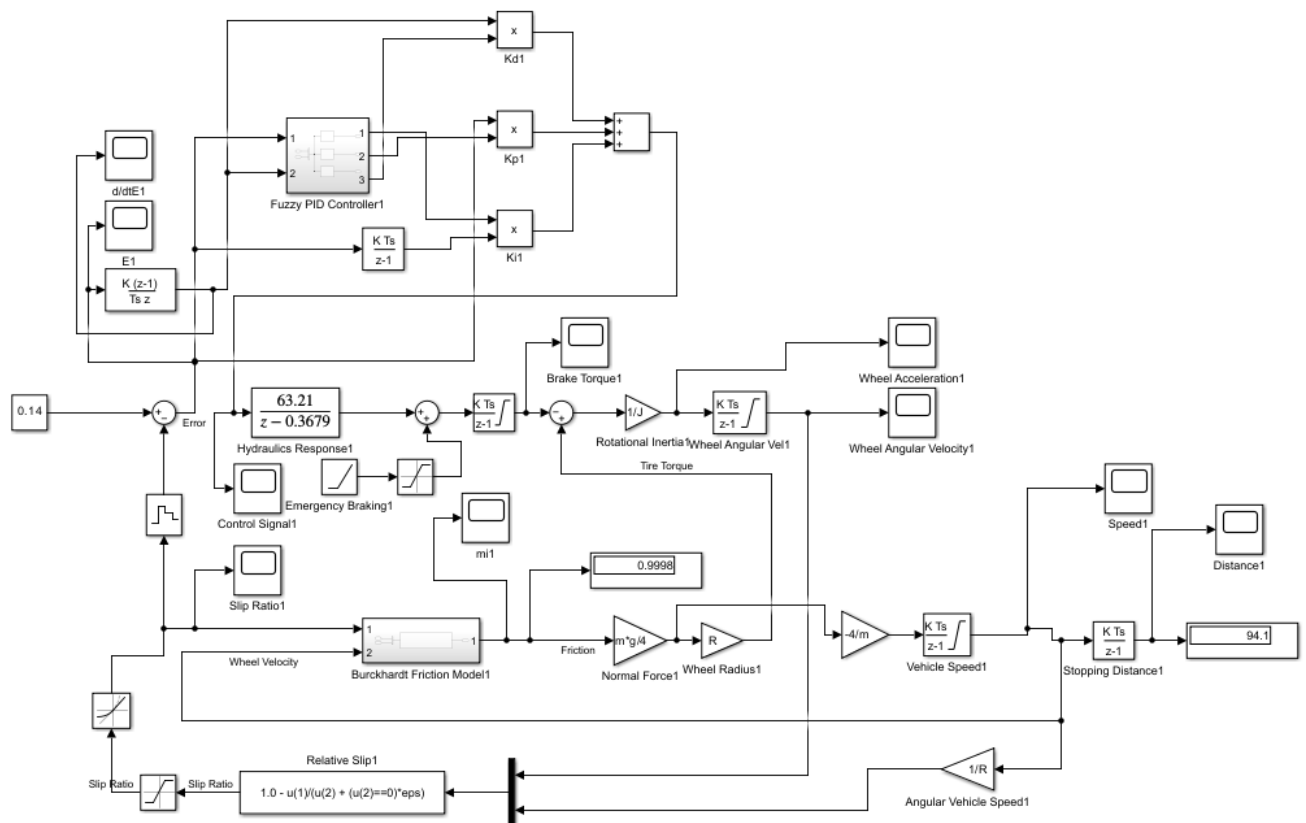
```
Lh=[100];
```

```
Mh=[0.01 1];
```

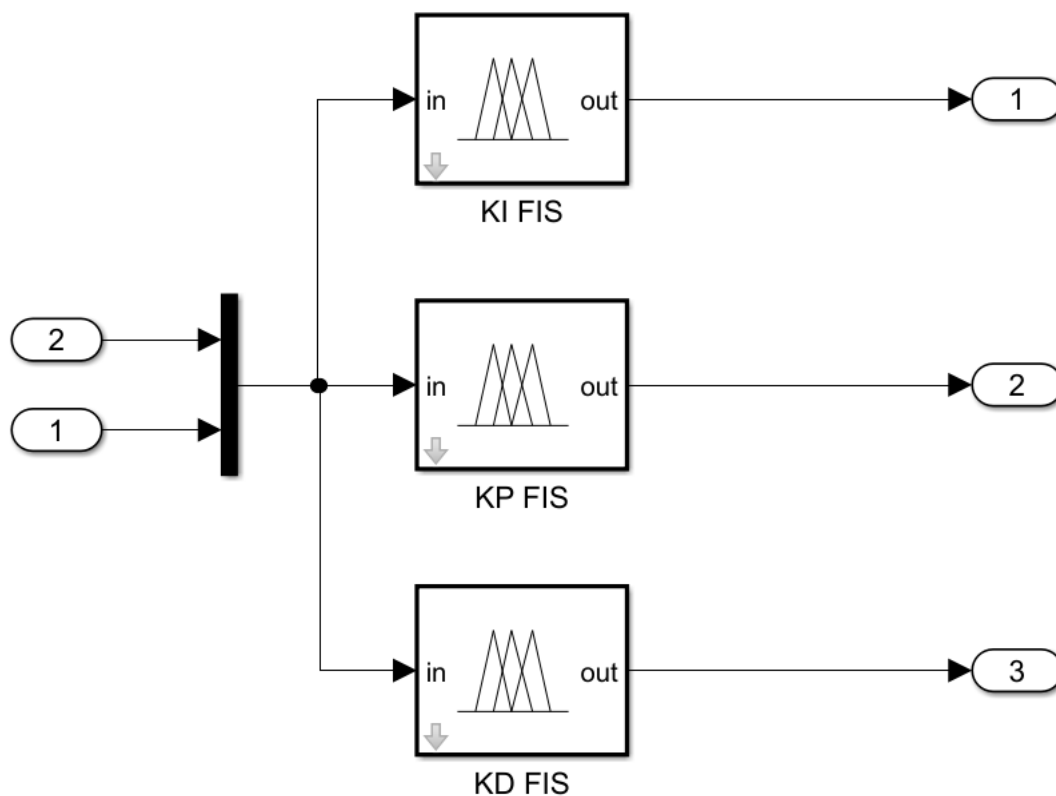
```
Gh=tf(Lh,Mh)
```

```
Ghd=c2d(Gh,Ts,'zoh')
```

d) Układ z regulatorem wykorzystującym logikę fuzzy:



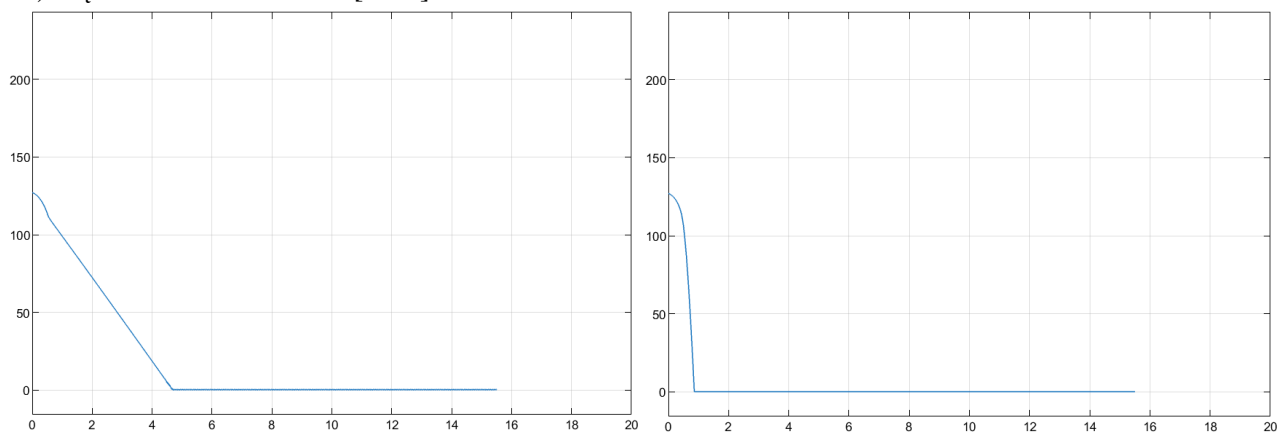
e) Regulator fuzzy PID:



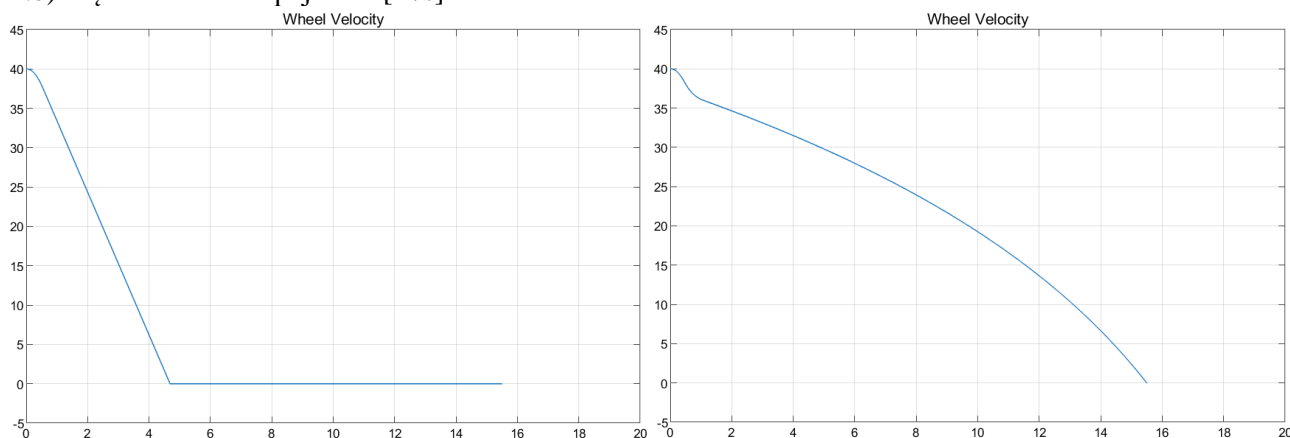
Wybrane wykresy w skali czasu [s] – porównanie dwóch warunków nawierzchni:

1) Dla układu bez systemu ABS: [Suchy asfalt / Mokry asfalt]

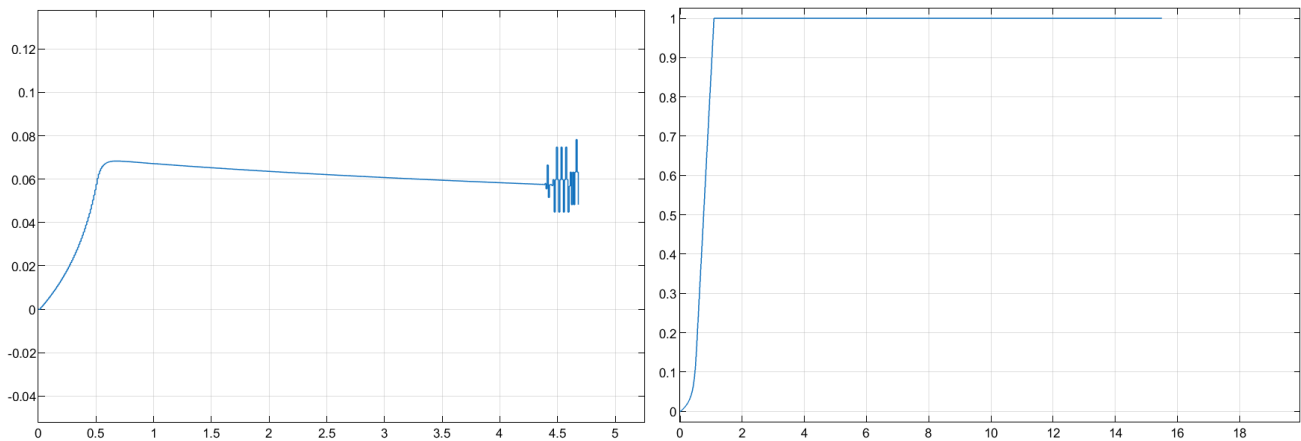
1.a) Prędkość obrotowa koła: [rad/s]



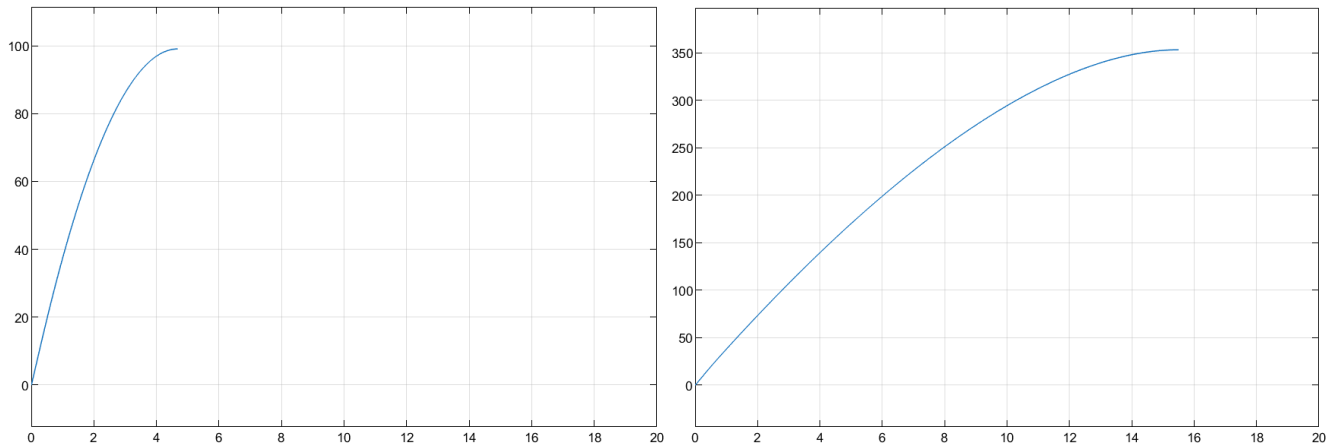
1.b) Prędkość liniowa pojazdu: [m/s]



1.c) Poślizg: [-]



1.d) Droga hamowania: [m]

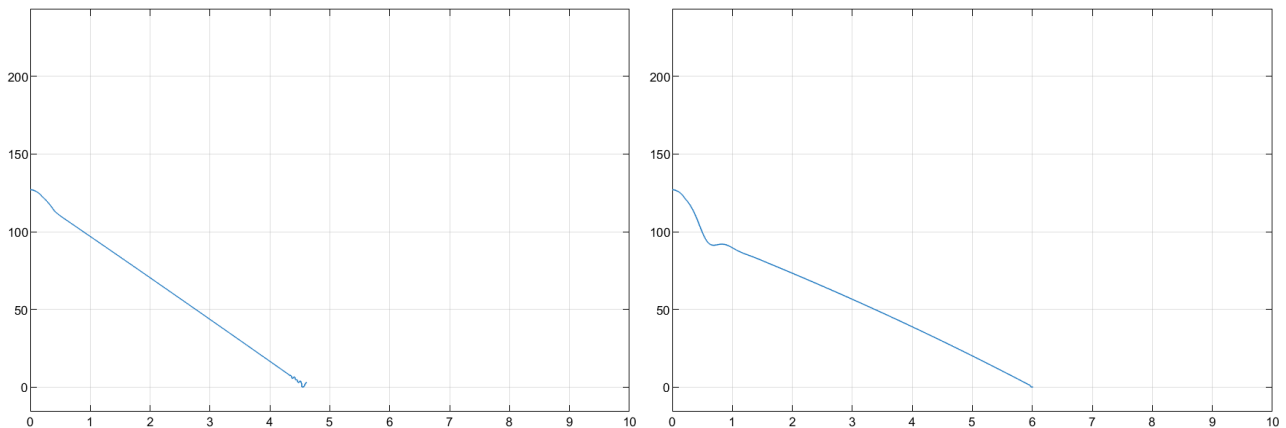


Te wykresy pokazują nam różnicę pomiędzy dobrymi oraz złymi warunkami na drodze dla hamowania awaryjnego. Informują nas o tym, że w przypadku nieświadomego kierowcy oraz dostatecznie sprawnego hamulca pojazd może bardzo szybko wpaść w poślizg, co w symulacji jest oddane jako dramatyczne wydłużenie drogi hamowania, a w praktyce oznaczałoby również niemalże całkowitą utratę kontroli nad pojazdem.

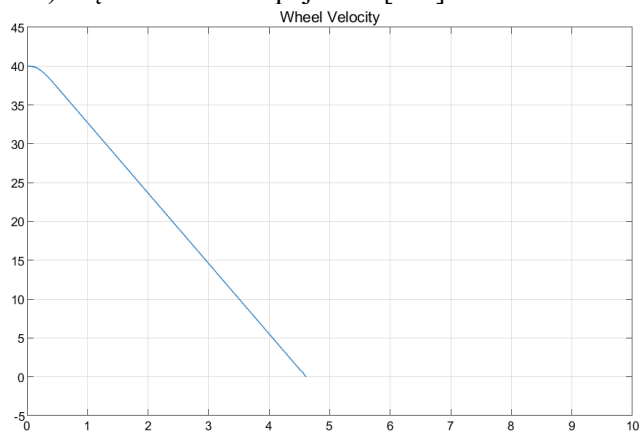
2) Dla układu referencyjnego z regulatorem dyskretnym PID:

[Suchy asfalt / Mokry asfalt]

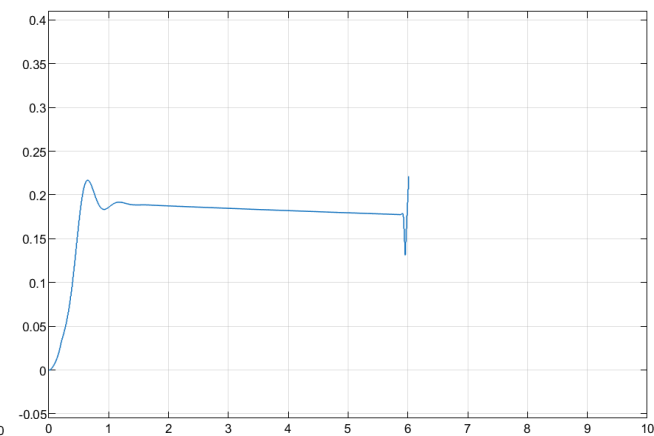
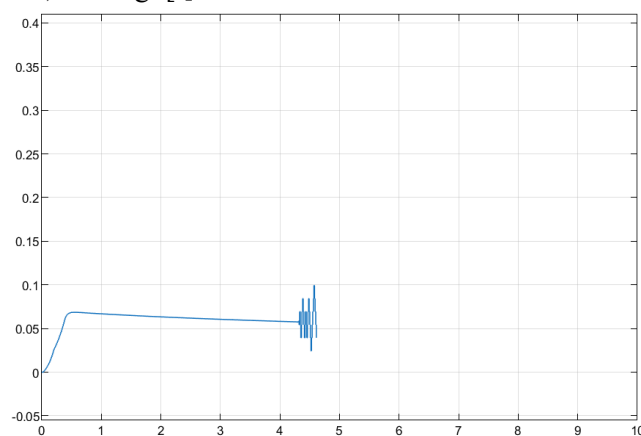
2.a) Prędkość obrotowa koła: [rad/s]



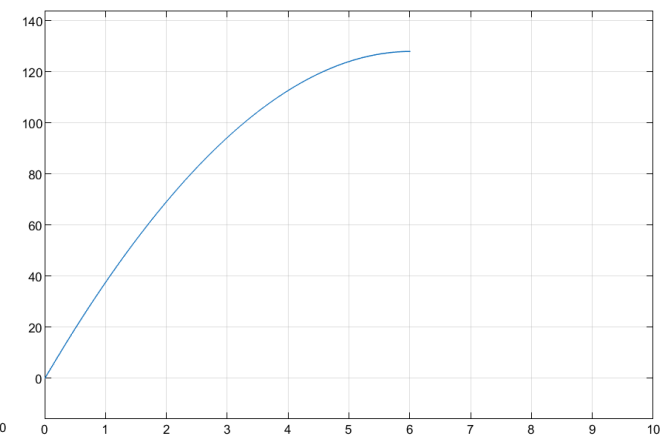
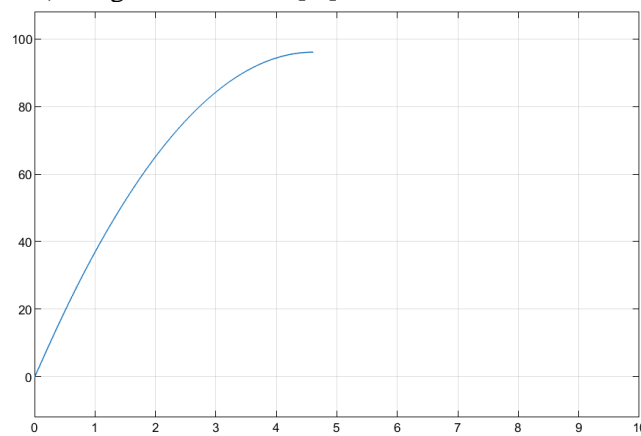
2.b) Prędkość liniowa pojazdu: [m/s]



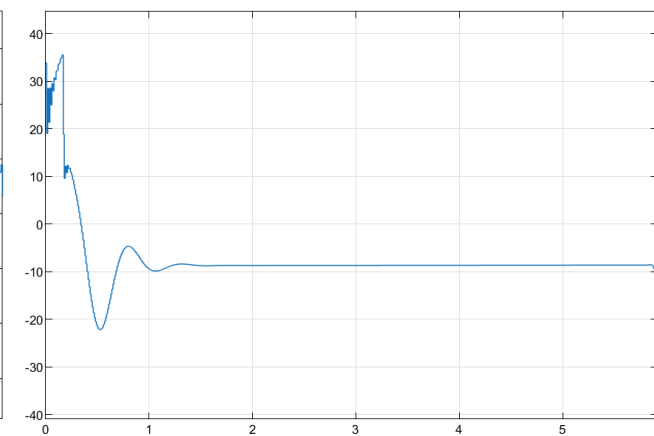
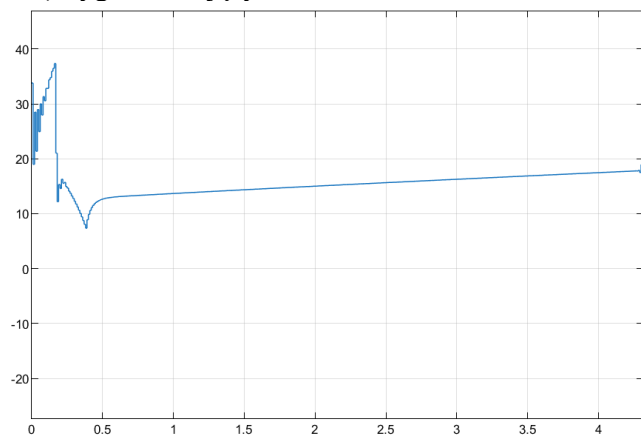
2.c) Poślizg: [-]



2.d) Droga hamowania: [m]



2.e) Sygnał sterujący:*

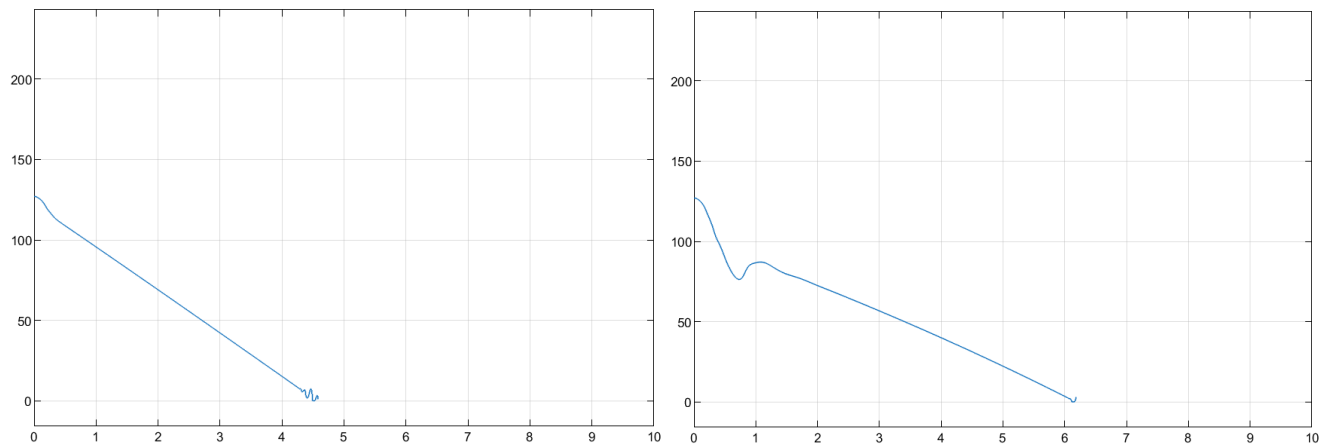


Jak widać układ w pożądanym sposób wykrywa poślizg i zapobiega mu poprzez zmniejszenie siły hamującej. Droga hamowania zostaje znacznie skrócona przy niekorzystnych warunkach bez żadnego wkładu kierowcy. Nawet przy optymalnych warunkach na drodze układ skrócił drogę hamowania o ponad 3 metry.

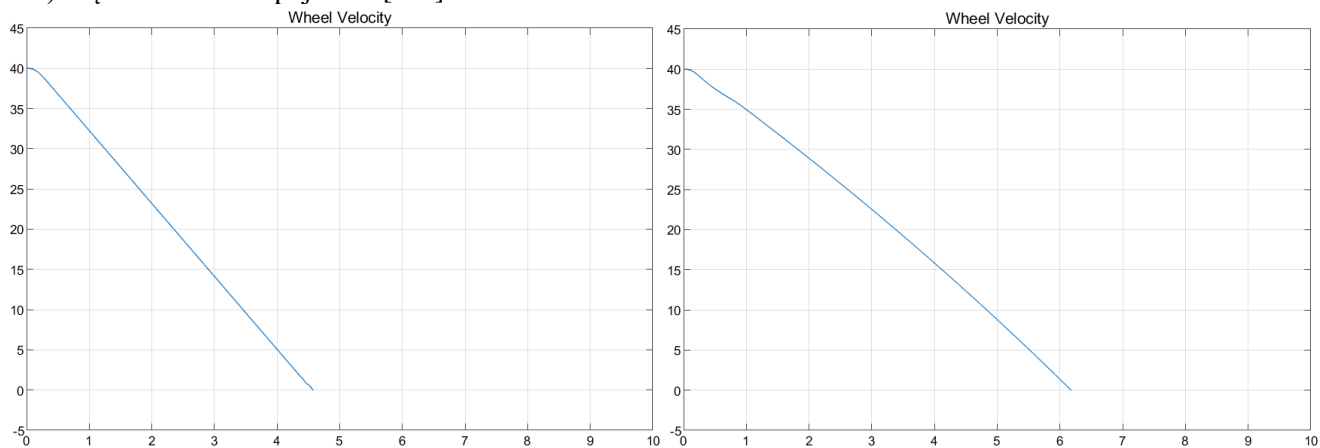
3) Dla układu z regulatorem fuzzy PID:

[Suchy asfalt / Mokry asfalt]

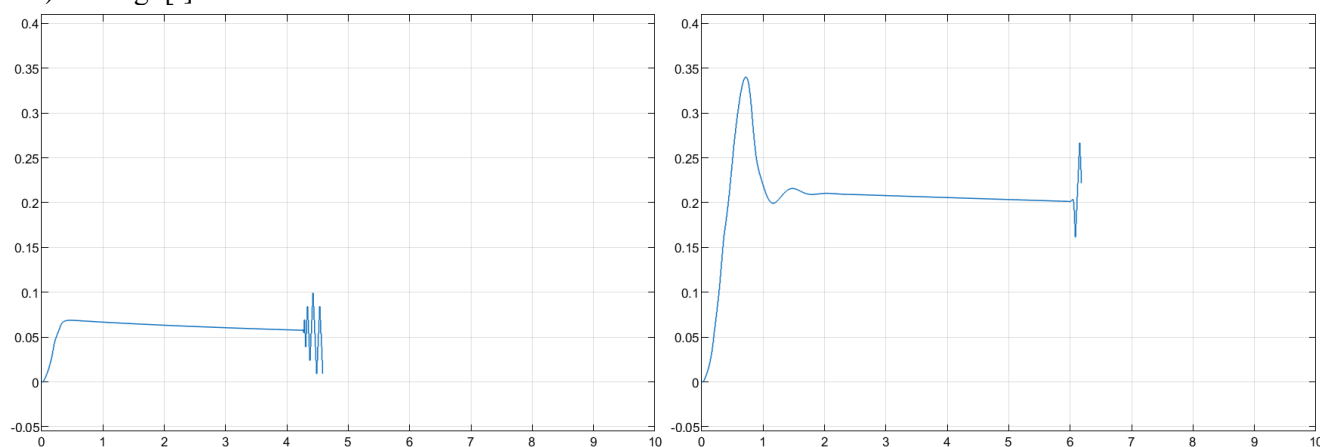
3.a) Prędkość obrotowa koła: [rad/s]



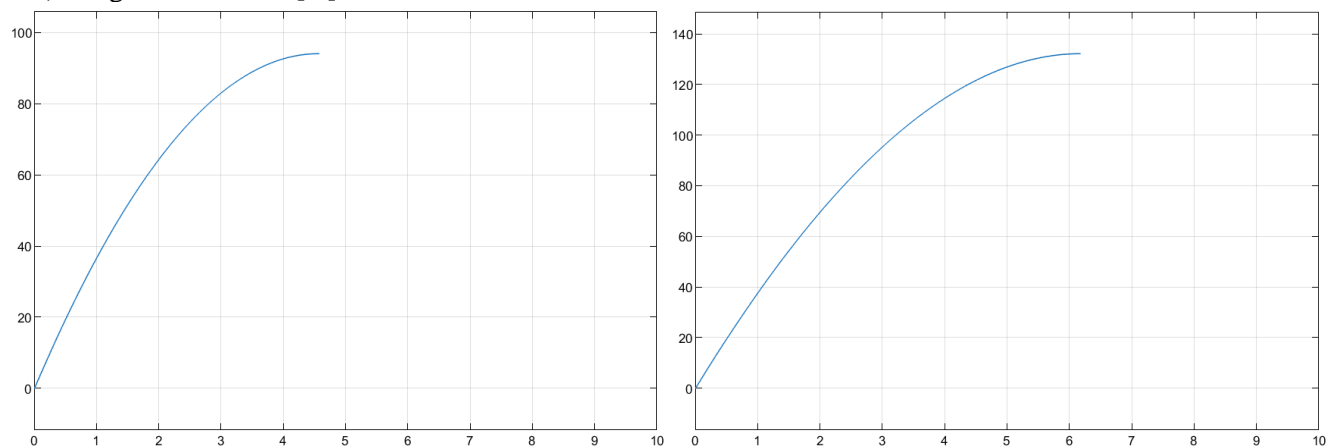
3.b) Prędkość liniowa pojazdu: [m/s]



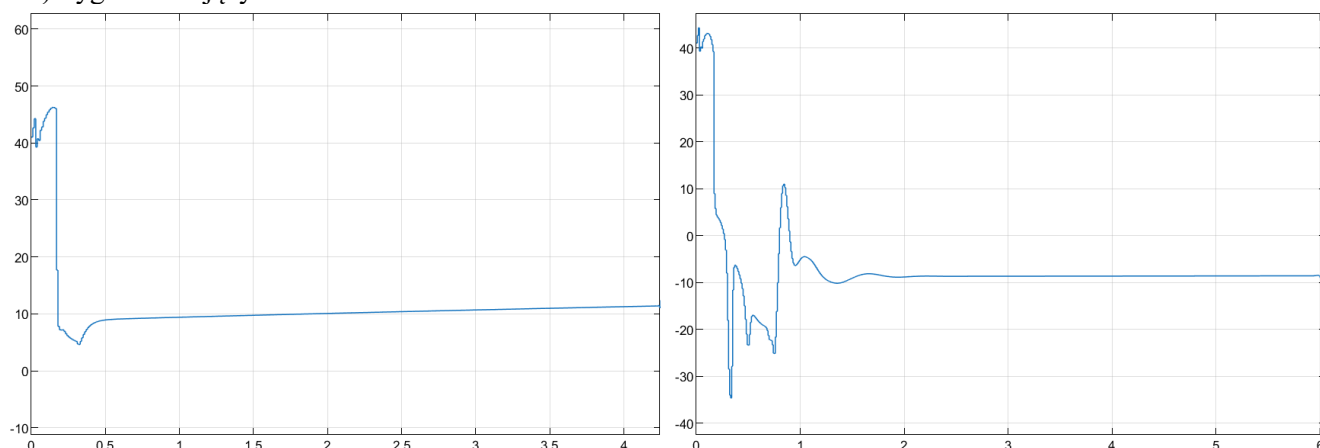
3.c) Poślizg: [-]



3.d) Droga hamowania: [m]



3.f) Sygnał sterujący:*

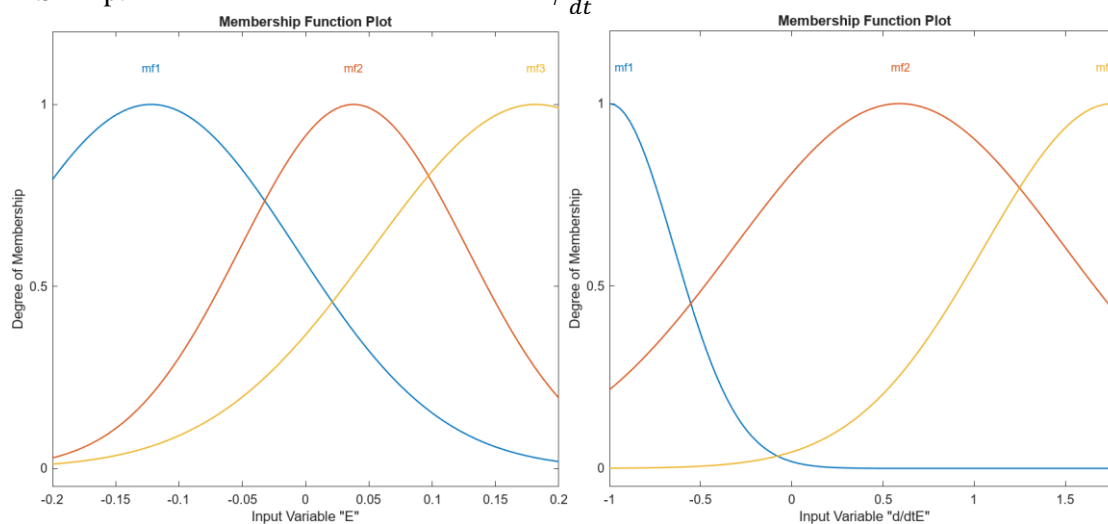


Parametry regulatora fuzzy PID:

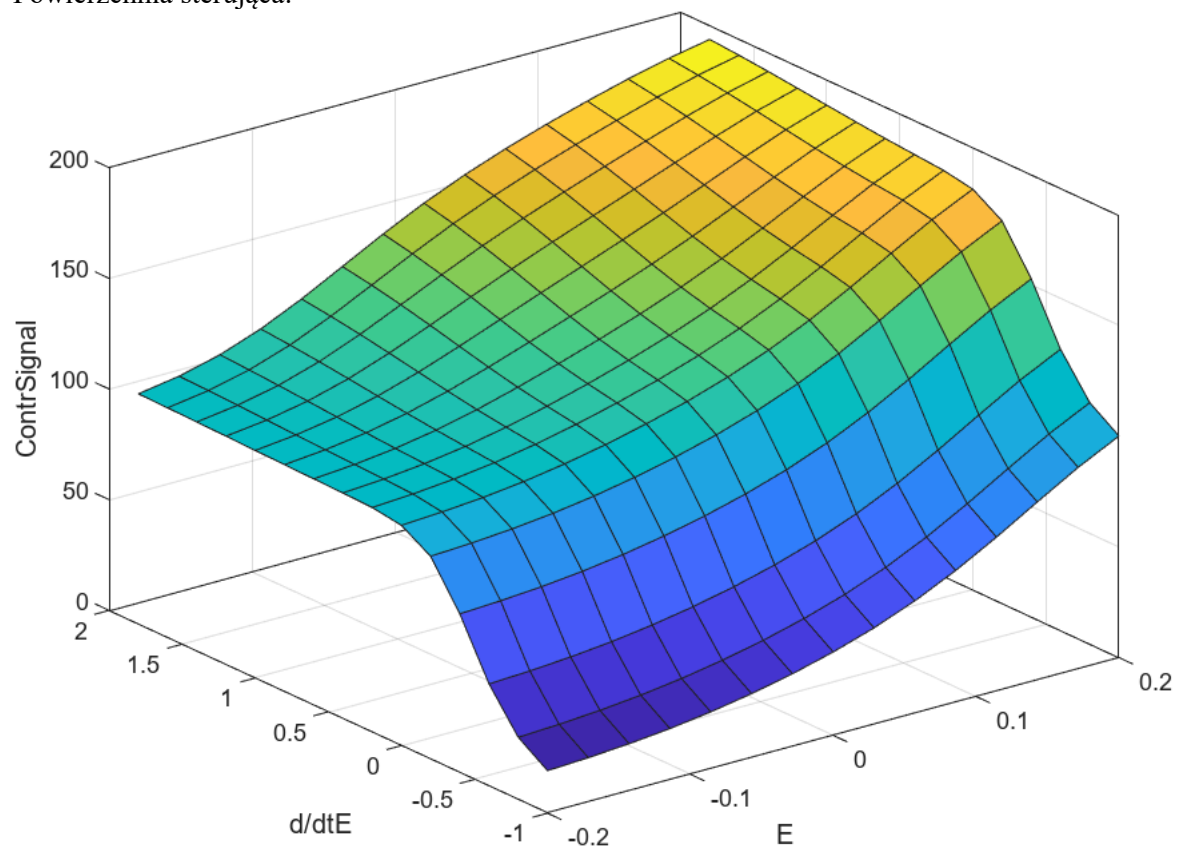
W konstrukcji zastosowanego regulatora zostały wykorzystane 3 regulatory fuzzy typu Sugeno 1, odpowiadające za poszczególne wzmacnienia regulatora PID:

1. FIS – Kp:

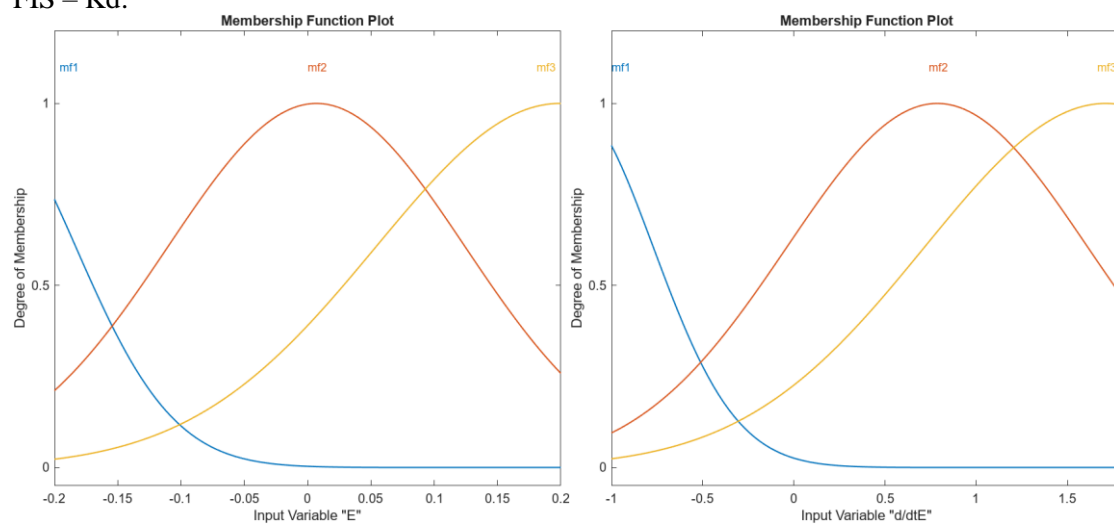
$$E / \frac{d}{dt}E$$



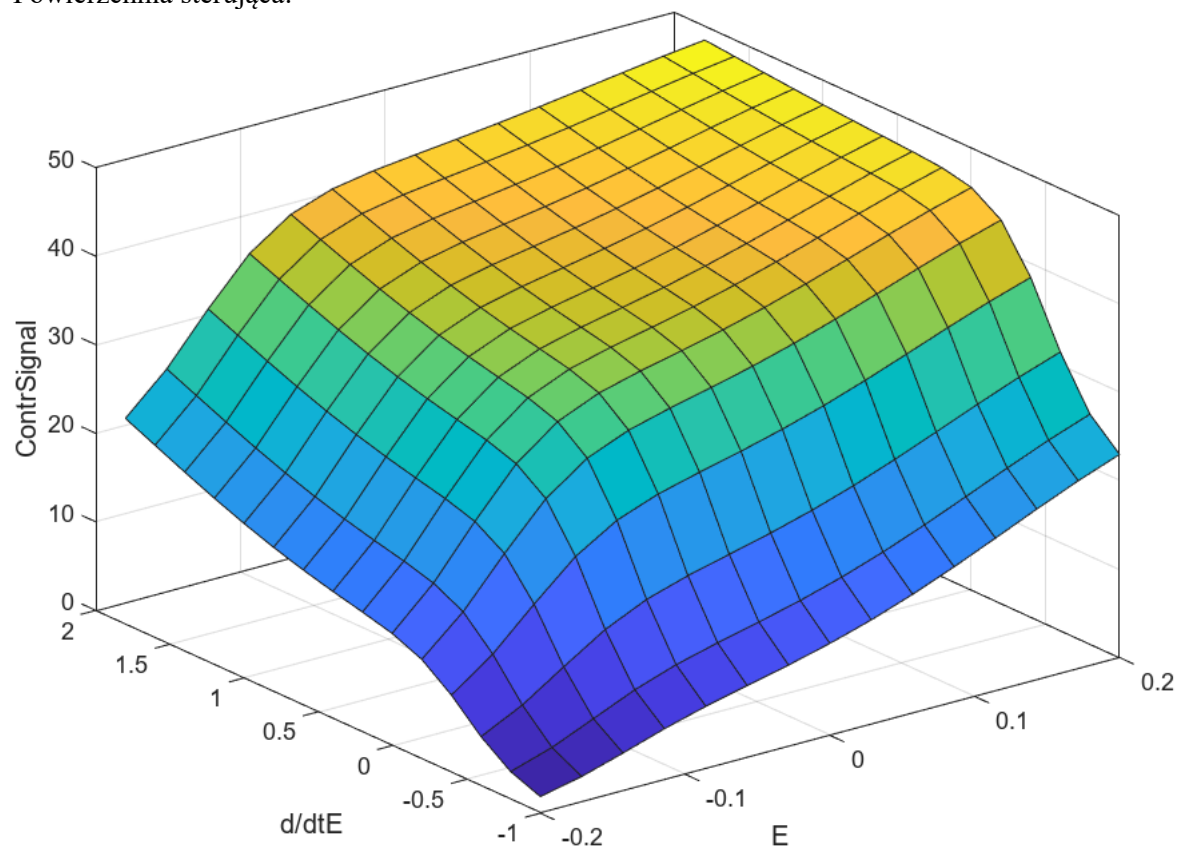
Powierzchnia sterująca:



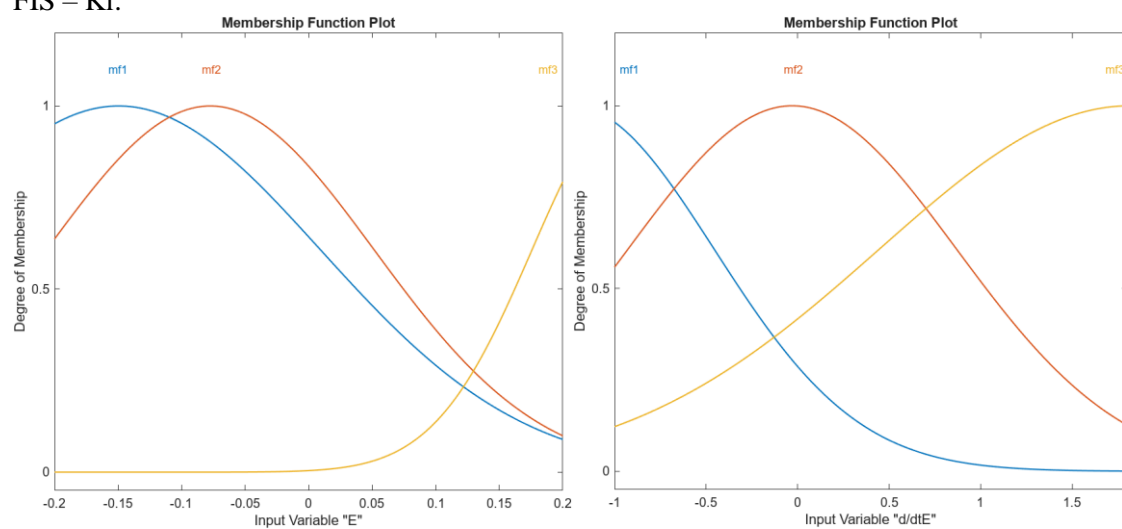
2. FIS – Kd:



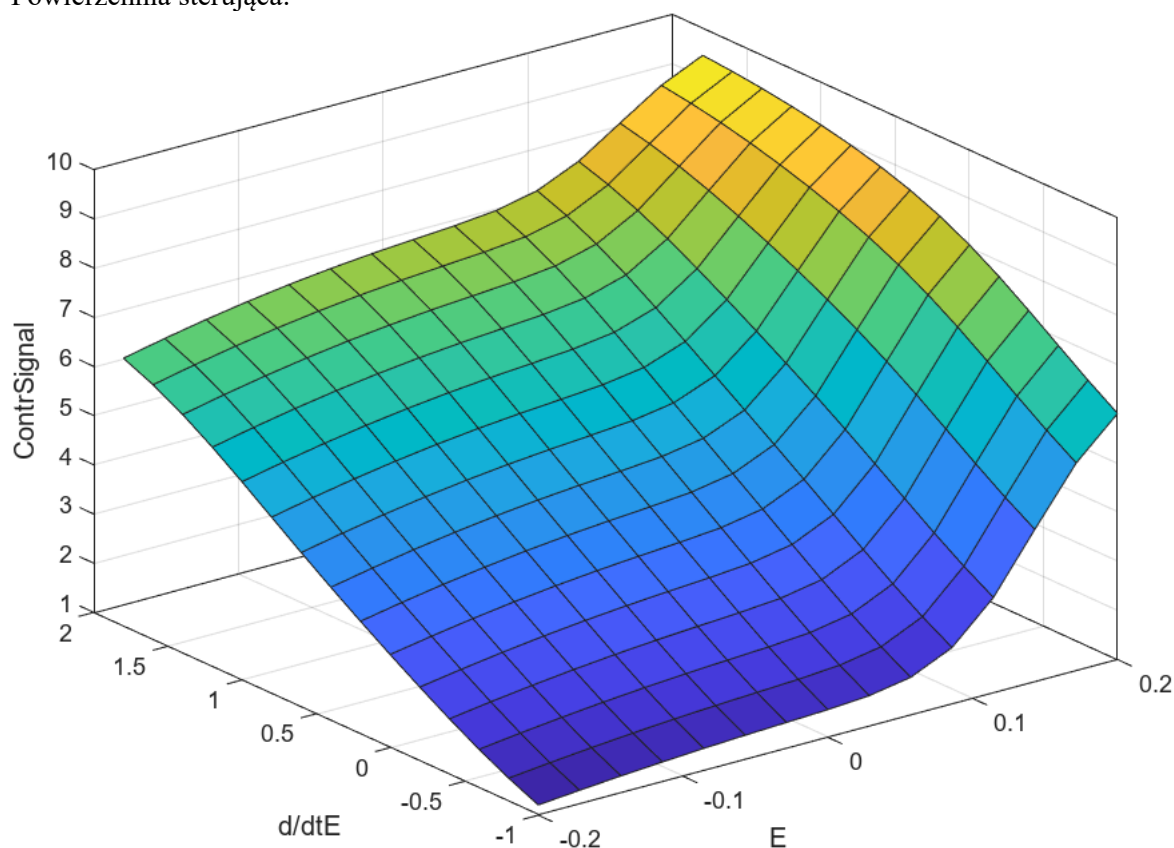
Powierzchnia sterująca:



3. FIS – Ki:



Powierzchnia sterująca:



Wszystkie regulatory korzystają z analogicznego zestawu zasad:

	Rule	Weight	Name
1	If E is mf1 and d/dtE is mf1 then ContrSignal is mf1	1	rule1
2	If E is mf2 and d/dtE is mf1 then ContrSignal is mf1	1	rule2
3	If E is mf3 and d/dtE is mf1 then ContrSignal is mf2	1	rule3
4	If E is mf1 and d/dtE is mf2 then ContrSignal is mf2	1	rule4
5	If E is mf2 and d/dtE is mf2 then ContrSignal is mf2	1	rule5
6	If E is mf3 and d/dtE is mf2 then ContrSignal is mf3	1	rule6
7	If E is mf1 and d/dtE is mf3 then ContrSignal is mf2	1	rule7
8	If E is mf2 and d/dtE is mf3 then ContrSignal is mf3	1	rule8
9	If E is mf3 and d/dtE is mf3 then ContrSignal is mf3	1	rule9

**W rzeczywistości sygnał sterujący byłby sygnałem napięciowym przekazywanym z regulatora zaimplementowanego cyfrowo w ECU, wysyłanym do HCU, aczkolwiek na potrzeby tego modelu pomijamy ten element układu. Z tą myślą sygnał sterujący jest wyrażony bez jednostki.*

Wnioski:

Zaprojektowany układ ABS daje oczekiwane rezultaty, skraca w każdym przypadku drogę hamowania, zapobiega zafundowaniu przy niekorzystnych warunkach jeźdźni i zwiększa znacząco stabilność pojazdu w każdym z rozważanych przypadków.

Regulator wykorzystujący zbiory rozmyte sprawdza się w swojej roli, jego skutki działania są bardzo zbliżone do zaimplementowanego w układzie referencyjnym regulatora dyskretnego PID, uzyskując krótszą drogę hamowania przy lepszych warunkach oraz dłuższą przy gorszych. Oba regulatory uzyskują stabilność pojazdu na analogicznym poziomie.

Pomimo obiecujących rezultatów z eksperymentu należy jednak zwrócić uwagę na znaczące wady zastosowanego rozwiązania. Wyszczególnić można podatność regulatora o zbiorach rozmytych na błędy przy nieoczekiwanych warunkach, które wynikają z ograniczenia zdefiniowanych zbiorów, według których odbywa się sterowanie. W ekstremalnych przypadkach może to skutkować zatrzymaniem działania systemu ABS i wpadnięciem pojazdu w nagły poślizg.

Co więcej regulator typu fuzzy potrzebuje niepomijalnie więcej mocy obliczeniowej do spełniania swojej funkcji, a co za tym idzie zwiększenie kosztów implementacji podobnego rozwiązania rzeczywistym pojeździe.

Biorąc to pod uwagę eksperyment wciąż pozostawia optymistyczne wrażenie odnośnie potencjału zastosowania alternatywnej metody regulacji układu trakcji w samochodzie. Dobrym krokiem byłoby spojrzenie na możliwości oparcia sterowania układu o sieć neuronową, mogącą swobodniej brać pod uwagę więcej czynników z większej ilości czujników w aucie. Podobne rozwiązania są już implementowane poprzez komputery pokładowe mające dostęp do globalnej bazy danych tworzonej z informacji gromadzonych przez pojazdy aktywnie na drodze. Zezwala to w teorii na niemalże nieskończoną naukę komputerów w celu zoptymalizowania odpowiedzi układu w zależności od sytuacji w jakiej znajduje się pojazd.

Bibliografia: (Data dostępu 18.01.25)

1. Burckhardt tyre model parameters for different friction coefficients https://www.researchgate.net/figure/Burckhardt-tyre-model-parameters-for-different-friction-coefficients_tbl1_270684635
2. Mathworks help – ABS model example in Simulink <https://uk.mathworks.com/help/simulink/slref/modeling-an-anti-lock-braking-system.html>
3. Mathworks help – ABS <https://uk.mathworks.com/help/sdl/ug/antilock-braking-system-sdl.html>
4. Mathworks help – Extremum seeking control example <https://uk.mathworks.com/videos/extremum-seeking-control-for-anti-lock-braking-systems-1623132603653.html>
5. ABS model – Scilab <https://x-engineer.org/anti-lock-braking-system-abs-modeling-simulation-xcos/>
6. Analiza systemów ABS w pojazdach mechanicznych <https://bibliotekanauki.pl/articles/249844.pdf>
7. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski – Układ regulacji i stabilizacji dynamiki jazdy <https://www.uwm.edu.pl/studydays/files/abs-asr-esp.PDF>
8. Investigation of Anti-Lock Braking System Performance Using Different Control Systems https://www.researchgate.net/publication/340539375_Investigation_of_Anti-Lock_Braking_System_Performance_Using_Different_Control_Systems
9. Slip Ratio Control of Anti-Lock Braking System with Bang-Bang Controller <https://www.semanticscholar.org/paper/Slip-Ratio-Control-of-Anti-Lock-Braking-System-with-Gowda/9a0d5db20cc2c577d9c382df438c3a982d235210>
10. PID-Type Fuzzy Control for Anti-Lock Brake Systems with Parameter Adaptation <https://www.semanticscholar.org/paper/PID-Type-Fuzzy-Control-for-Anti-Lock-Brake-Systems-Chen-Shih/de27a5292945195d2a4e6eb9d823127843bbc062>
11. Genetic fuzzy self-tuning PID controllers for antilock braking systems <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095219761000134X>
12. A New Approach in Anti-lock Braking System (ABS) Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Self-tuning PID Controller https://www.researchgate.net/publication/261310943_A_new_approach_in_Anti-lock_Braking_System_ABS_based_on_adaptive_neuro-fuzzy_self-tuning_PID_controller
13. Design and Analysis of Output Feedback Constraint Control for Antilock Braking System with Time-Varying Slip Ratio https://www.researchgate.net/publication/330122835_Design_and_Analysis_of_Output_Feedback_Constraint_Control_for_Antilock_Braking_System_with_Time-Varying_Slip_Ratio

14. A Systematic Review of Emergency Braking Assistant System to Avoid Accidents Using Pulse Width Modulation and Fuzzy Logic Control Integrated with Antilock Braking
[https://www.researchgate.net/publication/374637600_A_Systematic_Review_of_Emergency_Braking_Assistant_System_to_Avoid_Accidents_Using_Pulse_Width_Modulation_and_Fuzzy_Logic_Control_Integrated_w
ith_Antilock_Braking](https://www.researchgate.net/publication/374637600_A_Systematic_Review_of_Emergency_Braking_Assistant_System_to_Avoid_Accidents_Using_Pulse_Width_Modulation_and_Fuzzy_Logic_Control_Integrated_with_Antilock_Braking)
15. Ecutesting remanufacturing – ABS pumps and modules <https://www.ecutesting.com/categories/abs-pump-modules/bosch-abs-pumps-modules/>
16. Bosch – history of ABS <https://www.bosch.com/stories/beginnings-of-abs/>
17. Bosch mobility – ABS module <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/driving-safety/abs-module/>