

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce



**Fuzzy regulace pohonu
se stejnosměrným motorem**

Fuzzy Control of DC Drive

Bakalářská práce

2024

Petr Hönig

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hönig** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **507682**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fuzzy regulace pohonu se stejnosměrným motorem

Název bakalářské práce anglicky:

Fuzzy Control of DC Drive

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s podstatou fuzzy řízení.
2. Prostudujte možnosti fuzzy řízení pro stejnosměrné motory.
3. Sestavte simulační model pohonu se stejnosměrným motorem řízeným fuzzy logikou.
4. Výsledky porovnejte s tradiční PID regulací stejného pohonu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Perduková, D., Fedor, P., Lacko, M., DC Motor Fuzzy Model Based Optimal Controller. MM Science Journal, October, 2021.
- [2] Shi, A. et al., The research of fuzzy PID control application in DC motor of automatic doors. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, Oct. 2011, Yichang, China.
- [3] Tang, W., Cao, S., A Fast Realization Method of Fuzzy PID Control for DC Motor. Proceedings of the 37th Chinese Control Conference, July 2018, Wuhan, China.
- [4] Dutta, V. et al., PI-Fuzzy rule based controller for Analysis and performance evaluation of dc motor speed control. 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, Dec. 2014, Bali, Indonesia.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Koblí, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Koblí, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Petr Hönig

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlovi Kobrlemu, PhD. za cenné rady. Také bych chtěl poděkovat rodině a Chrisovi, kteří mi byli oporou během psaní této práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá určováním parametrů motoru, dále pak sestavením regulátorů pomocí fuzzy logiky. Tyto regulace jsou porovnány s klasickou PID regulací. Samotné modely jsou vytvořeny v prostředí MATLAB Simulink s pomocí aplikací Fuzzy Logic Toolbox a PID Tuner. Simulovaný pohon se skládá ze tří částí: modelu motoru, modelu usměřovače a regulační smyčky, která obsahuje buď samotný fuzzy, PID nebo PID regulátor s proměnnými konstantami. Simulován je stejnosměrný cize buzený motor napájený z tyristorového usměřovače, regulovaným pomocí fuzzy logiky na požadavek otáček. Porovnání je 6 způsobů uskutečnění regulátorů. První je tradiční PID regulace. Pro další regulaci je využit fuzzy PI regulátoru nahrazující PI a PID regulátory v tradiční regulaci. Tento typ regulátoru je také použit jako samostatný, regulující pouze otáčky. Fuzzy logika je využita i pro měnění konstant PID regulátoru otáček. Je zkoumáno využití shlukové analýzy pro tvorbu samotného fuzzy regulátoru a to pro různou velikost dat.

Klíčová slova: fuzzy logika, fuzzy regulátor, PID regulátor, stejnosměrný motor, usměřovač

Abstract

This thesis deals with the determination of motor parameters, and the construction of controllers using fuzzy logic. These regulations are compared with the classic PID regulation. The models themselves are created in the MATLAB Simulink environment using the Fuzzy Logic Toolbox and PID Tuner applications. The simulated drive consists of three parts: a motor model, a rectifier model, and a control loop that contains either a fuzzy, PID, or PID controller with variable constants. The separately excited DC motor is powered by the thyristor rectifier and regulated by fuzzy logic with speed request. Six ways of implementing controllers are compared. The first is traditional PID regulation. For further regulation, a fuzzy PI controller is used, replacing PI and PID controllers in traditional regulation. This type of controller is also used independently, regulating only speed. Fuzzy logic is also used to change the constants of the PID speed controller. The use of cluster analysis for the creation of the fuzzy controller itself is examined for different data sizes.

Keywords: Fuzzy Logic, Fuzzy Controller, PID Controller, DC Motor, Rectifier

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Fuzzy logika	2
1.1 Fuzzy regulátor	2
1.2 Příklad fuzzy regulace - teplota vody	3
2 Stejnoseměrný pohon	7
2.1 Řízení pohonu	7
2.2 Stejnoseměrný motor s cizím buzením	8
2.3 Určování parametrů stejnoseměrného cize buzeného motoru	8
2.4 Napájení stejnoseměrného motoru	11
3 Pohon řízený PID regulací	14
4 Pohon řízený fuzzy logikou	21
4.1 Fuzzy PI regulátor	21
4.2 Fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru	38
4.3 Samotný fuzzy regulátor	48
5 Porovnání způsobů regulací	53
5.1 PID regulace	53
5.2 Regulace pomocí fuzzy logiky	53
6 Závěr	55
Bibliografie	56

Seznam obrázků

Obrázek 1: Tvary funkcí příslušnosti	2
Obrázek 2: Vyhodnocení pravidla pro Mamdamiho postup	3
Obrázek 3: Příslušnostní funkce pro odchylku teploty a její změnu	4
Obrázek 4: Příslušnostní funkce pro otevření ventilu	5
Obrázek 5: Vyhodnocení pravidel	6
Obrázek 6: Jednoduchá regulační smyčka	7
Obrázek 7: Složená regulační smyčka	8
Obrázek 8: Uvažované schéma stejnosměrného cize buzeného motoru	8
Obrázek 9: Model SSCB v Simulinku	10
Obrázek 10: Schéma tyristorového usměrňovače	11
Obrázek 11: Blokové schéma GŘI	12
Obrázek 12: Model tyristorového usměrňovače v Simulinku	13
Obrázek 13: Model stejnosměrného pohonu s PID regulací	14
Obrázek 14: Průběh n (ot/min) pro PID regulaci	15
Obrázek 15: Průběh odchylky otáček (ot/min) a zátěžného momentu m_z (N · m) pro PID regulaci	16
Obrázek 16: Průběh i_a (A) pro PID regulaci	16
Obrázek 17: Průběh u_{dAV} (V) pro PID regulaci	17
Obrázek 18: Průběh otáček (ot/min) pro PID regulaci	18
Obrázek 19: Průběh odchylky otáček e (ot/min) pro PID regulaci	19
Obrázek 20: Průběh i_a (A) pro PID regulaci	19
Obrázek 21: Průběh u_{dAV} (V) pro PID regulaci	20
Obrázek 22: Příslušnostní funkce regulační odchylky e fuzzy regulátoru otáček	22
Obrázek 23: Příslušnostní funkce změny odchylky Δe fuzzy regulátoru proudu	23
Obrázek 24: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru proudu ..	23
Obrázek 25: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru proudu ..	24
Obrázek 26: Model motoru řízeného dvěma fuzzy regulátory	24
Obrázek 27: Průběh n (ot/min) pro dva fuzzy regulátory	25
Obrázek 28: Průběh e (ot/min) a m_z (N · m) pro dva fuzzy regulátory	26
Obrázek 29: Průběh i_a (A) pro dva fuzzy regulátory	26
Obrázek 30: Průběh u_{dAV} (V) pro dva fuzzy regulátory	27
Obrázek 31: Průběh n (ot/min) pro dva fuzzy regulátory	28
Obrázek 32: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro dva fuzzy regulátory	29
Obrázek 33: Průběh i_a (A) pro dva fuzzy regulátory	29
Obrázek 34: Průběh u_{dAV} (V) pro dva fuzzy regulátory	30
Obrázek 35: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru	31
Obrázek 36: Příslušnostní funkce regulační odchylky	32
Obrázek 37: Příslušnostní funkce změny odchylky	32
Obrázek 38: Model motoru řízeného PI a fuzzy regulátorem	33
Obrázek 39: Průběh n (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	33
Obrázek 40: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	34

Obrázek 41: Průběh i_a (A) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	34
Obrázek 42: Průběh u_{dAV} (V) a m_z (N · m) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru .	35
Obrázek 43: Průběh n (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	36
Obrázek 44: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	37
Obrázek 45: Průběh i_a (A) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	37
Obrázek 46: Průběh u_{dAV} (V) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru	38
Obrázek 47: Model motoru řízeného PID regulátorem s Fuzzy proměnnými konstantami	39
Obrázek 48: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru	40
Obrázek 49: Příslušnostní funkce regulační odchylky	40
Obrázek 50: Příslušnostní funkce výstupních veličin	41
Obrázek 51: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty	42
Obrázek 52: Průběh odchylky otáček (ot/min) a m_z (N · m) pro fuzzy proměnné konstanty	43
Obrázek 53: Průběh i_a (A) pro fuzzy proměnné konstanty	43
Obrázek 54: Průběh u_{dAV} (V) pro fuzzy proměnné konstanty	44
Obrázek 55: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty	45
Obrázek 56: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty	46
Obrázek 57: Průběh i_a (A) pro fuzzy proměnné konstanty	46
Obrázek 58: Průběh u_{dAV} (V) pro fuzzy proměnné konstanty	47
Obrázek 59: Model motoru řízeného Fuzzy regulátorem s integrační složkou ..	49
Obrázek 60: Průběh n (ot/min) pro samotný fuzzy regulátor	49
Obrázek 61: Průběh i_a (A) a u_{dAV} (V) pro samotný fuzzy regulátor	50
Obrázek 62: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro samotný fuzzy regulátor ..	50
Obrázek 63: Průběh n (ot/min) pro regulátor s více daty	51
Obrázek 64: Průběh i_a (A) a u_{dAV} (V) pro regulátor s více daty	52
Obrázek 65: Průběh odchylky otáček e (ot/min) pro regulátor s více daty	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Sada pravidel pro fuzzy regulátor	5
Tabulka 2: Hodnoty pro simulaci SSCB	10
Tabulka 3: Hodnoty pro simulaci usměrňovače	13
Tabulka 4: Konstanty regulátorů otáček a proudu	14
Tabulka 5: Pravidla pro náhradu PI regulátoru fuzzy regulátorem	21
Tabulka 6: Pravidla pro fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru	39
Tabulka 7: Porovnání maximálních odchylek otáček jednotlivých typů regulací	54

Úvod

Stejnoseměrný motor s cizím buzením je elektrický točivý stroj. Pracuje na principu elektromagnetické indukce. Skládá se z budicího vinutí, které vytvoří magnetické pole, kotevního vinutí, kterým teče proud a indukuje se do něj napětí, a komutátoru, který plní funkci mechanického měniče. Díky komutátoru, který je ale jednou z hlavních nevýhod tohoto motoru, je napájecí napětí vždy ve žádané polaritě. Stejnoseměrné stroje potřebují ke své činnosti stejnoseměrné napětí. Pro stroje větších výkonů se často používají usměrňovače. Usměrňovače využívají polovodičových součástek. I v dnešní době se stále používají usměrňovače s tyristory, které jsou jednoduše matematicky popsatelné.

Možnost popisu stavů systému jiným než přesně daným popisem, se zkoumala už v meziválečném období. Tato idea byla prvně popsána K. Gödelem a J. Łukasiewiczem. Pojem *fuzzy množina* poprvé použil L. Zadeh v roce 1965, tedy v období, které se krylo s rozmachem počítačů, a proto je považován za autora fuzzy logiky.

Fuzzy logika umožňuje použít pro člověka pochopitelný a intuitivní popis k přesnému vyjádření stavu popisovaného systému. Díky tomu ji lze úspěšně využít nejen při řízení a regulaci různých zařízení ale například i pro řešení diferenciálních rovnic. Při návrhu regulátoru je její využití výhodné, protože se díky intuitivnímu popisu, který nabízí, jeho tvorba omezí na sadu *if ... then ...* pravidel a jejich následná úprava je snadná.

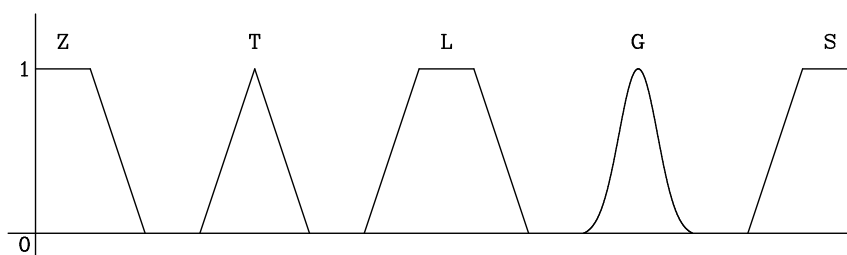
Pro jednoduchou možnost dosáhnouti podobných výsledků jako u klasického řízení, je fuzzy logika hojně využívána například v domácích spotřebičích jako jsou pračky, myčky, dále také v regulátorech teploty vzduchu v místnosti nebo technologických procesů a své využití nachází i v regulaci pohonů, což je v této práci předvedeno.

1 Fuzzy logika

Fuzzy logika se zabývá množinami, které nemají jasné hranice. To umožňuje reflektovat stavy systému, které nejsou jednoduše popsitelné matematicky, nebo mají velmi vágní slovní (lidský) popis. Hlavním znakem tohoto přístupu je, že neurčuje, zda je systém v tom či onom stavu, ale jak moc je v daných stavech. Typickým příkladem bývá třeba míchání *horké* a *studené* vody. Člověk nemá jasnou hranici, od kdy je voda teplá či vlažná a ani ji nepotřebuje. Například pomocí fuzzy logiky můžeme popsat ideální teplotu vody ze 70 % jako *horká* a ze 30 % jako *studená*. Tato teplota vody může být označena jako *příjemná*, její přesná teplota je nepotřebná.

I přes vágní popis zachycující neurčitost se nejedná o pravděpodobnost. Pravděpodobnost popisuje možnost výsledků. „Neurčitost v naší odpovědi vyjadřuje kvantitativní míru splnění nějaké vlastnosti, kterou nevnímáme jako binární (dvouhodnotovou).“ [1] Existuje i kvantová neurčitost, nicméně ani tu nepopisuje fuzzy logika. Kvantová neurčitost se zabývá vlastnostmi měření, kdy samotné měření způsobí nevratné změny v systému. Dobrý příklad kvantové neurčitosti je léčba pacienta, kdy neexistuje možnost vrátit se zpět a zkusit jinou léčbu. [1],[2]

Fuzzy množiny lze popsat více způsoby, třeba pomocí řezů, nicméně v této práci se popisuje pomocí tzv. *membership function*, v češtině se také používá termín *funkce příslušnosti*. Termíny *fuzzy množina* a *funkce příslušnosti* se často ztotožňují, protože fuzzy množina je často popisována právě příslušnostní funkcí. Příslušnostní funkce nabývá hodnot podobně jako pravdivostní funkce od 0 do 1. Může mít spoustu tvarů, často se používá Gaussova funkce G, trojúhelníková T, či lichoběžníková L. Také je možné ji popsat funkcemi ve tvaru S nebo Z. Takové množiny jsou zobrazeny na obrázku 1. [1]



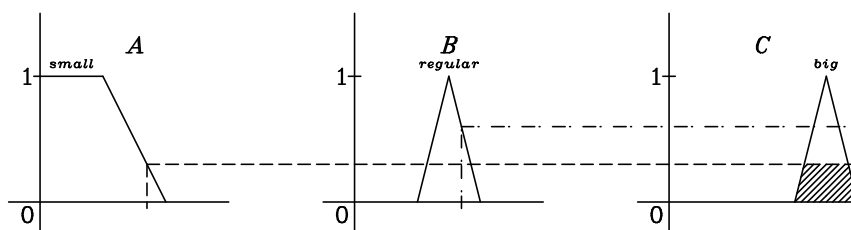
Obrázek 1: Tvary funkcí příslušnosti

1.1 Fuzzy regulátor

Práci fuzzy regulátoru lze popsat pomocí tří kroků - fuzzifikace, vyhodnocení pravidel a defuzzifikace.

- Fuzzifikace převádí vstupní veličiny (například odchylku a její změnu) na stupně příslušnosti k daným fuzzy množinám dle příslušnostní funkce. Stupněm příslušnosti je myšlena hodnota příslušnostní funkce pro danou veličinu. Celý rozsah veličin, které se popisují fuzzy množinami, musí být jimi pokryty, tedy nemůže existovat oblast, na které žádná množina neexistuje.

- Pravidla, která se vyhodnocují, jsou většinou ve formě *if A is small and B is regular then C is big*, kde *A* a *B* jsou vstupní veličiny, *C* je výstupní veličina a *small*, *regular* a *big* jsou příslušnostní funkce. Operace *and* (minimum) může být nahrazena i jinými výrazy, např. *or* (maximum) nebo *not* (negace). Takto se pro každé pravidlo vyhodnotí stupeň příslušnosti každé množiny výstupní veličiny viditelné na obrázku 2. Tímto získané množiny (čárkovaná oblast v množině *big* pro veličinu *C*) se následně zpracují dle zvolené metody, v této práci bude využívána relace *or*, tedy maximum, takže se všechny získané výstupní množiny sečtou.
- Defuzzifikace je proces, při kterém se celková výstupní množina převede zpět na využitelnou informaci. V této práci se využívá Mamdamiho a Sugenuova způsob. Rozdíl mezi nimi je ten, že Sugenuv způsob používá jako výstupní množiny singletony (jednoprvkové množiny), díky čemuž se určování výstupní hodnoty zjednoduší na vážený průměr. Oproti tomu Mamdamiho způsob využívá i pro výstupní veličiny příslušnostní funkce, které nabývají více hodnot. [1], [3]



Obrázek 2: Vyhodnocení pravidla pro Mamdamiho postup

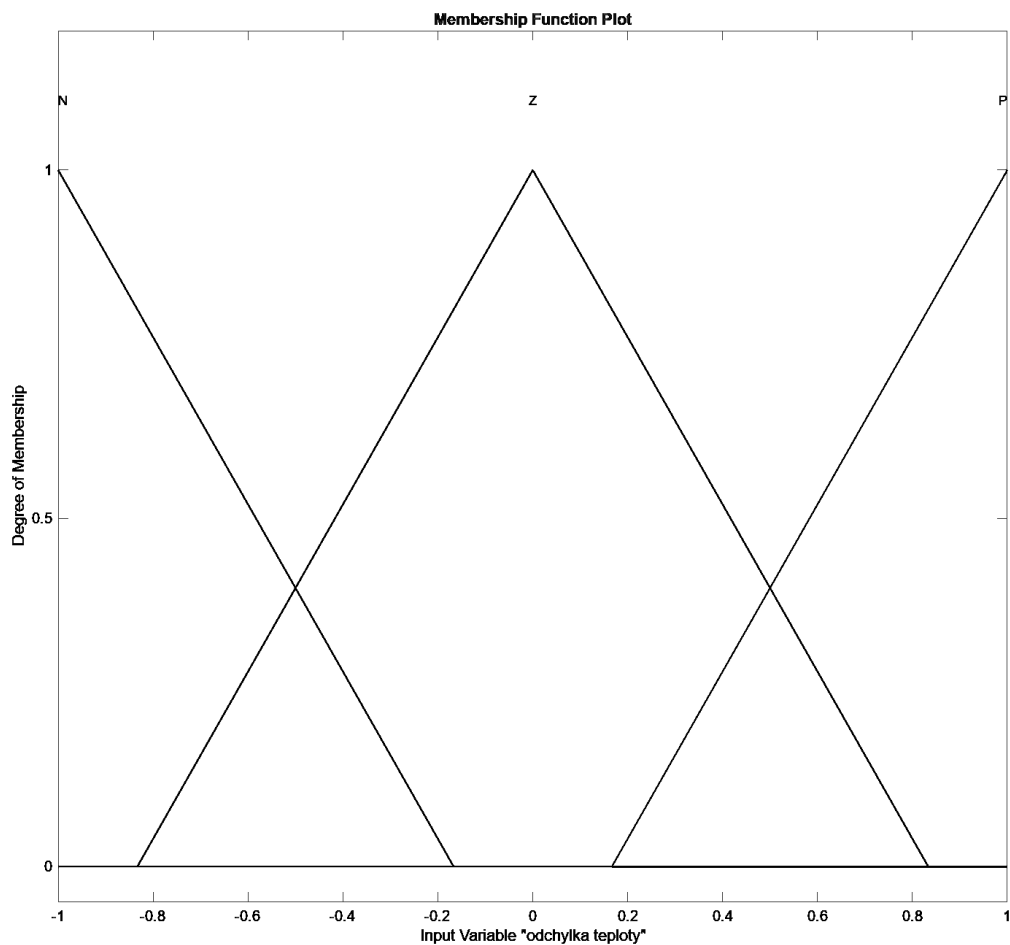
Pravidla pro jednotlivé veličiny lze vytvořit buď ručně díky intuitivní znalosti systému, nebo, pokud je k dispozici velké množství dat, pomocí shlukové analýzy (*cluster analysis*). Pro ruční způsob je vhodnější Mamdamiho postup, který je intuitivnější, ale výpočetně náročnější, protože je třeba pro každý okamžik regulace hledat nové těžiště obrazce. Oproti tomu, Sugenuv postup je výhodnější pro výpočetní techniku (hledají se pouze vážené průměry), ale je méně intuitivní. Proto se využívá, když je k dispozici velké množství dat a soustava složitější. Ke zpracování dat se využívá shluková analýza. Shluková analýza je způsob zpracování dat, při kterém se hledají shluky bodů (dat), které mají podobné vlastnosti. Tímto způsobem lze vytvořit fuzzy množiny a pravidla. [4], [5]

1.2 Příklad fuzzy regulace - teplota vody

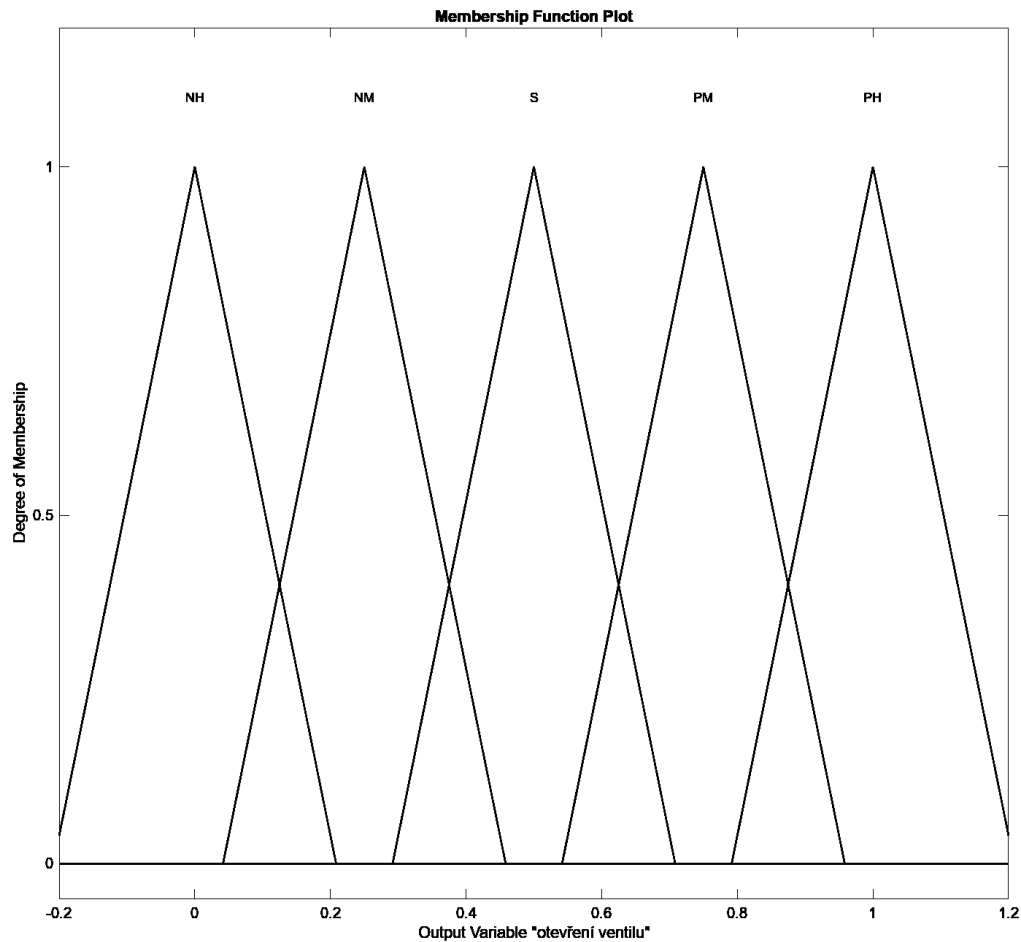
V úvodu této kapitoly byl zmíněn popis teploty vody pomocí fuzzy množin. Tato podkapitola se zabývá možností jednoduché regulace teploty vody pomocí fuzzy regulátoru. Práce regulátoru v regulační smyčce je popsána více v kapitole 2.1, zde je hlavní popis principu vyhodnocování fuzzy pravidel.

Uvažuje se ruční nastavení teploty, kontinuálně tekoucí studená voda (např. o teplotě 15 °C) a teplota vody se upravuje otevřením ventilu s teplou vodou (např. o teplotě 90 °C). Fuzzy regulátor nastavuje úhel otevření

od 0 (zavřeno) do 1 (plně otevřeno). Fuzzy regulátor v tomto případě pracuje se vstupními veličinami: odchylkou a změnou teploty. Obě veličiny mají rozsah od -1 do 1 a jména množin jsou Negativní (N), Zero (Z) a Pozitivní (P), viz obrázek 3. Takto navržené vstupy lze lehce doladit přenásobením konstantou, místo sestrojování nových fuzzy pravidel a množin. Výstupní veličina je míra otevření ventilu a rozsah, který je pokryt množinami, je od $-0,2$ do $1,2$. Množiny, pokrývající tento prostor jsou Negativní Hodně (NH), Negativní Málo (NM), Střední (S), Pozitivní Málo (PM) a Pozitivní Hodně (PH), viz obrázek 4. Takto nastavený rozsah je z toho důvodu, aby regulátor mohl ventil úplně otevřít či zavřít (výstupní veličina bude nabývat 0 či 1). Aplikace Fuzzy Logic Control (FLC) nabízí možnost rozložit rovnoměrně příslušnostní funkce po celém rozsahu. Tato možnost byla využita.



Obrázek 3: Příslušnostní funkce pro odchylku teploty a její změnu



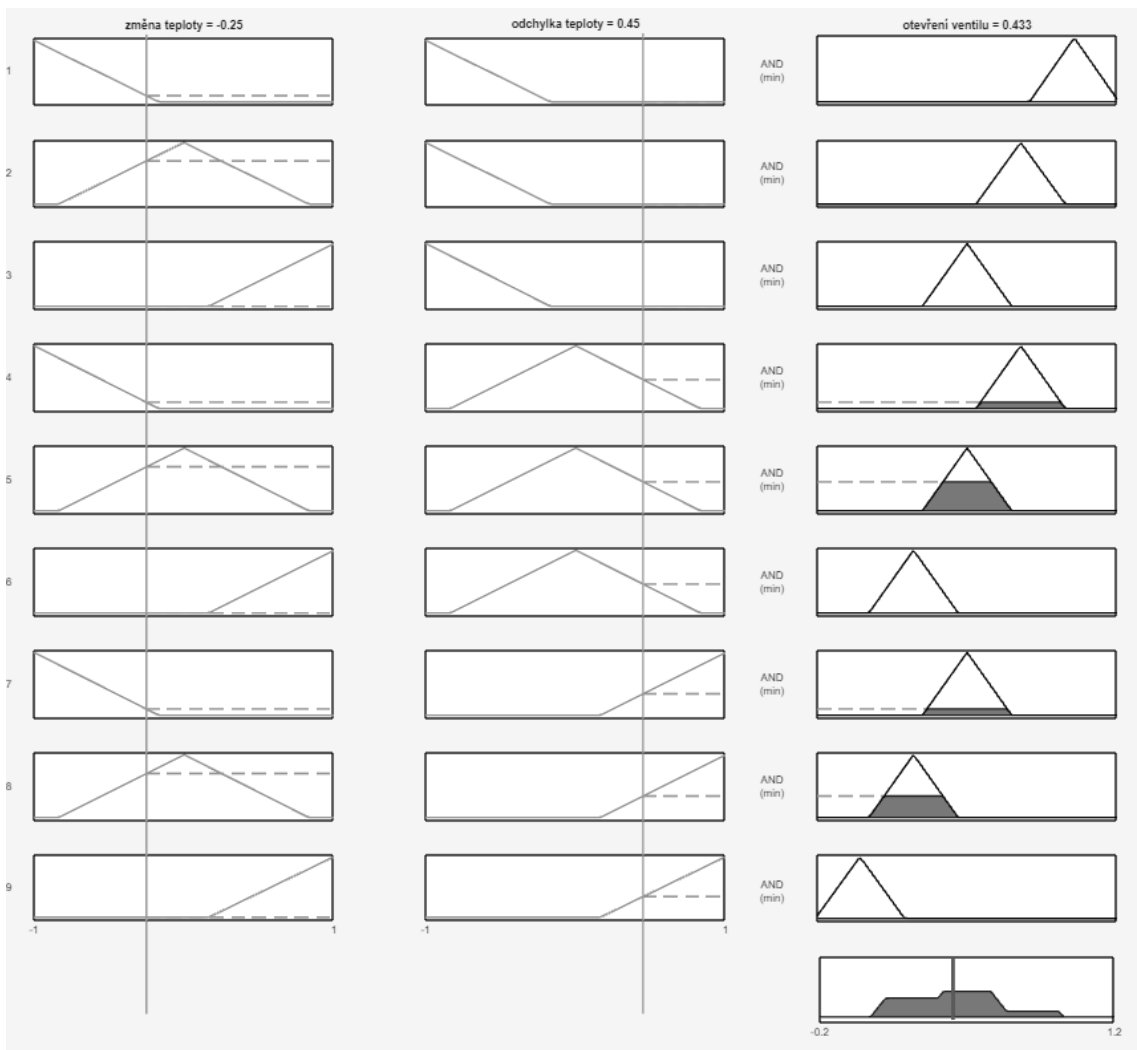
Obrázek 4: Příslušnostní funkce pro otevření ventilu

Sada pravidel pro fuzzy regulátor je v tabulce 1.

Tabulka 1: Sada pravidel pro fuzzy regulátor

$e \backslash \Delta e$	N	Z	P
N	NH	NM	S
Z	NM	S	PM
P	S	PM	PH

Na obrázku 5 je vidět vyhodnocení všech pravidel, podle kterých se určuje výstup. Pokud bude změna teploty (derivace odchylky) $-0,25$ a samotná odchylka teploty $0,45$, nastaví se míra otevření ventilu na $0,433$. Tato hodnota může být dalšími členy upravována, třeba když bude 100% otevření ventilu 90° , tak regulátorem určená hodnota bude 39° .



Obrázek 5: Vyhodnocení pravidel

2 Stejnoseměrný pohon

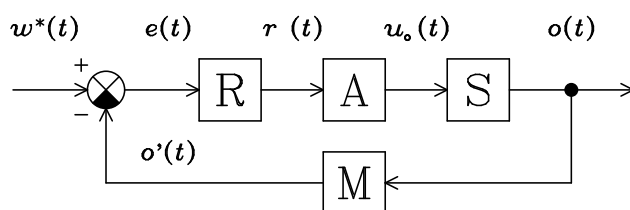
2.1 Řízení pohonu

„Řízení označuje cílevědomou činnost člověka nebo řídicího systému, založenou na vyhodnocení a zpracování informací o řízeném objektu nebo procesu a o dějích vně tohoto objektu. Výsledkem jsou zásahy, které vedou k požadovanému cíli při splnění zadaných kritérií.“ [6] Řízení lze rozdělit na dva druhy, a to ovládání, které předpokládá znalost odezvy na zásah, a regulaci, která spočívá v upravení vstupních veličin pro nastavení požadovaného výstupu v reálném čase tak, aby všechny veličiny byly udrženy v žádaných mezích. [6]

Řízení lze realizovat pomocí dvouhodnotových veličin, které lze popsat Booleovou algebrou a lze ho zkompletovat pomocí relé či stykačů, dnes se více prosazují PLC. Takovému řízení se říká logické. Druhá možnost spočívá v práci se spojitými veličinami, kde se používají zesilovače, a i zde se prosazují více mikroprocesory. Tento způsob se označuje jako spojitý či analogový řízení a v této práci je dále popsáno. [6]

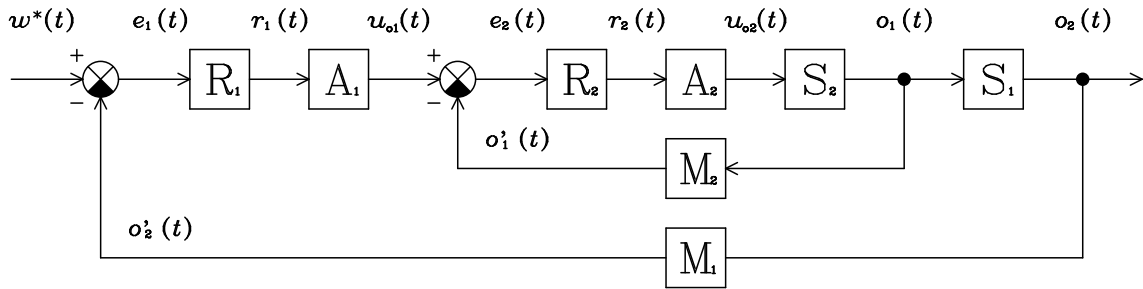
Spojitý regulační řízení

Spojitý regulační řízení lze popsat blokovým schématem, které obsahuje regulovanou soustavu S, akční člen A, regulátor R a měřicí člen M. Názorné schéma jednoduché regulační smyčky je na obrázku 6. Žádaná velikost veličiny $w^*(t)$ je odečtena od současné výstupní veličiny $o(t)$, která je upravena v M. Jejich rozdíl je regulační odchylka $e(t)$, která vstupuje do regulátoru R. Regulátor nastavuje adekvátní reakci, která je dána podle předem zvolených pravidel nebo rovnic, a posílá zregulovaný signál $r(t)$ do akčního členu. Akční člen nastaví dle zregulovaného signálu výstup $u_o(t)$ pro regulovanou soustavu S. Pokud je to třeba, může se kdekoli v regulačním obvodu přidat i tzv. poruchová veličina $p(t)$, která zohledňuje různé externality, jejichž sledováním lze regulaci zlepšit. [6]



Obrázek 6: Jednoduchá regulační smyčka

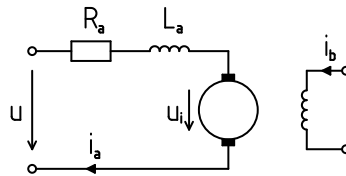
Existují soustavy, kde je třeba regulovat více veličin. Pro tyto případy se pro pohony často používá hierarchická struktura, která dovoluje lehce každou regulovanou veličinu regulovat. Blokové schéma takto složené smyčky je na obrázku 7. Regulátor R_1 a akční člen A_1 nastaví požadovanou veličinu pro podružnou regulační smyčku tvořenou R_2 , A_2 , S_2 . Soustava S_2 posílá svůj výstup do soustavy S_1 , jejíž výstup je regulován na žádanou hodnotu $w^*(t)$. [6]



Obrázek 7: Složená regulační smyčka

2.2 Stejnosměrný motor s cizím buzením

V náhradním schématu stejnosměrného cize buzeného motoru (SSCB) je vyznačeno napájecí napětí u , odpor vinutí R_a , indukčnost vinutí L_a , indukované napětí u_i a budicí proud i_b .



Obrázek 8: Uvažované schéma stejnosměrného cize buzeného motoru

Rovnice, popisující obvod, vypadá následovně:

$$u = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + u_i \quad (1)$$

Pomocí (1) a následujících vztahů lze vytvořit model, popisující chování motoru, kde moment je m , moment zátěže m_z , moment setrvačnosti J , magnetizační konstanta $k\Phi$, úhlová rychlost otáčení Ω a otáčky za minutu n :

$$m - m_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2)$$

$$m = k\Phi i_a \quad (3)$$

$$u_i = k\Phi \Omega \quad (4)$$

$$n = \frac{30}{\pi} \Omega \quad (5)$$

2.3 Určování parametrů stejnosměrného cize buzeného motoru

Z rovnic (1) až (4) vyplývá, že štítek motoru neobsahuje všechny potřebné parametry. V rovnici (1) potřebné parametry jsou R_a a L_a . Indukované napětí u_i závisí na rychlosti otáčení dle (4). V rovnici (2) je třeba určit moment setrvačnosti J . Ze zmiňovaných rovnic poslední dvě obsahují ještě jeden neznámý člen, a to magnetizační konstantu $k\Phi$.

Ke zjištění elektrických kotevních parametrů, tedy R_a a L_a , využijeme faktu, že při připojení samotného kotevního obvodu bez zátěže na konstantní časový průběh napětí, se vlastně jedná o přechodový děj prvního řádu s ustálenou hodnotou proudu, kde I je ustálená hodnota proudu:

$$i_a = I(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}) , \quad (6)$$

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} . \quad (7)$$

Z výše uvedené rovnice je patrné, že stačí změřit τ_a a R_a , abychom zjistili indukčnost kotvy L_a . Odpor vinutí R_a byl změřen běžným multimetrem v režimu měření odporu. Časová konstanta τ_a byla odečtena z osciloskopu, je to čas, za který přechodný děj dosáhne 63 % ustálené hodnoty.

Magnetizační konstanta $k\Phi$ se zjistí dosazením (4) do (1) při ustáleném stavu. Z toho důvodu je derivace proudu nulová a neuplatní se indukčnost. Výsledná rovnice tedy bude vypadat:

$$u = R_a i_a + k\Phi\Omega . \quad (8)$$

Po úpravách dostaneme rovnici, ve které je přímo vyjádřena magnetizační konstanta:

$$k\Phi = \frac{30(u - R_a i_a)}{\pi n} . \quad (9)$$

Moment setrvačnosti J z (2) je složitější. Jelikož průběh proudu, na kterém závisí vyvíjený moment motoru m nemá při rozběhu jednoduše popsitelný průběh, bude nutno využít Laplaceovu transformaci. Rozběh opět bude probíhat naprázdno, takže zátěžný moment m_z je nulový. Po aplikaci Laplaceovy transformace se rovnice (1) až (4) (přičemž (4) byla rovnou dosazena do (1)) upraví na tvar:

$$U(s) = R_a I(s) + sL_a I(s) + k\Phi\Omega(s) , \quad (10)$$

$$M(s) = sJ\Omega(s) , \quad (11)$$

$$M(s) = k\Phi I(s) . \quad (12)$$

Upravením rovnic (10) až (12) lze vyjádřit mechanická časová konstanta τ_m :

$$U(s) = R_a I(s) \left(1 + s \frac{L_a}{R_a}\right) + k\Phi\Omega(s) , \quad (13)$$

$$U(s) = R_a \left(\frac{sJ\Omega(s)}{k\Phi}\right) (1 + s\tau_a) + k\Phi\Omega(s) , \quad (14)$$

$$U(s) = k\Phi\Omega(s) \left[1 + s \left(\frac{R_a J}{(k\Phi)^2}\right) (1 + s\tau_a)\right] , \quad (15)$$

$$U(s) = k\Phi\Omega(s) [1 + s\tau_m (1 + s\tau_a)] . \quad (16)$$

z rovnic (15) a (16) je vidět, že mechanická časová konstanta τ_m se rovná:

$$\tau_m = \frac{R_a J}{(k\Phi)^2} . \quad (17)$$

Úpravou vyplývá vztah pro moment setrvačnosti J :

$$J = \frac{\tau_m (k\Phi)^2}{R_a} . \quad (18)$$

Vzhledem k velikosti obou konstant ($\tau_m \gg \tau_a$) můžeme zanedbat elektrickou časovou konstantu τ_a . Při zanedbání τ_a průběh otáček na skok napětí můžeme uvažovat jako exponenciální a ze znalosti jejich průběhu můžeme stejným

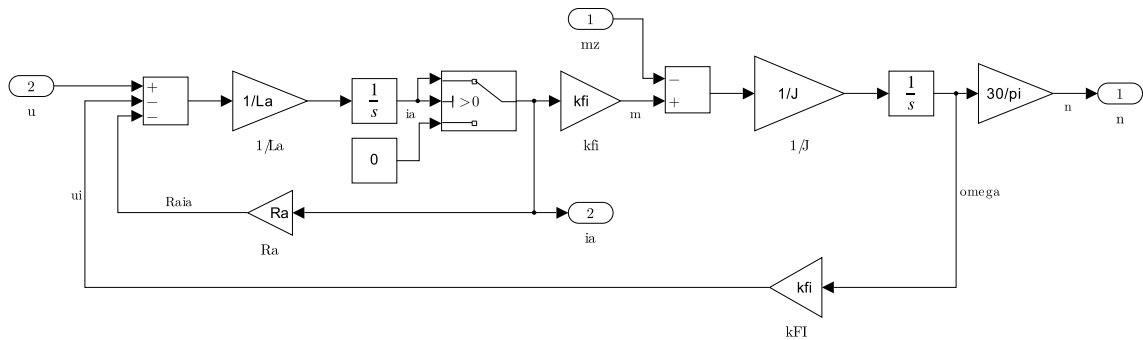
způsobem jako u určení elektrické konstanty τ_a , tedy stroj připojíme na předem určené napětí a změříme časovou konstantu průběhu otáček.

Při měření časové konstanty byl zjištěn ještě proud naprázdno a podle něj určen moment nahrazující ztráty. Tento moment M_l bude zohledňovat mechanické ztráty jako například v ložiskách nebo ventilátorové a bude lineárně stoupat s otáčkami. Takto získané hodnoty jsou zapsány v následující tabulce.

Tabulka 2: Hodnoty pro simulaci SSCB

U_N (V)	220	J (kg·m ²)	0,198
I_N (A)	29	$k\Phi$ (V·s)	0,58
R_a (Ω)	1,4	n_N (ot·min ⁻¹)	1400
L_a (H)	16,52	M_l (N·m)	$9,8n \cdot 10^{-5}$

Na obrázku 9 je znázorněn model stejnosměrného cize buzeného motoru. Jelikož je předpokládán napájení z tyristorového usměrňovače, proud nemůže být záporný a proto je omezen na nulu.

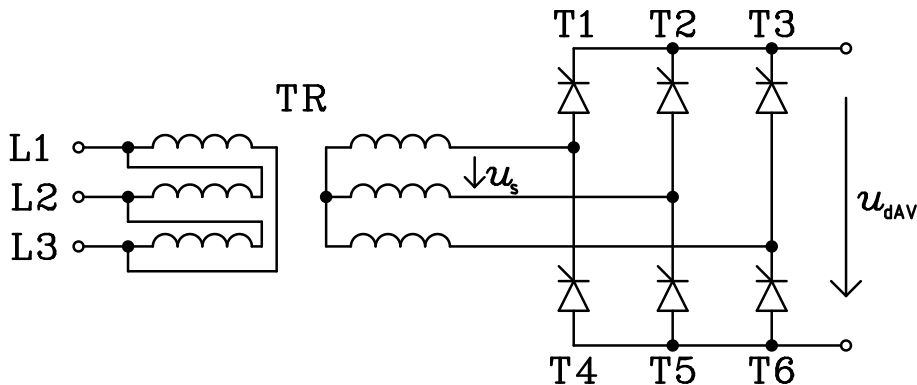


Obrázek 9: Model SSCB v Simulinku

2.4 Napájení stejnosměrného motoru

Stejnosemné stroje obvykle pro svůj chod potřebují stejnosměrné napájecí napětí. V distribuční soustavě ale nalezneme střídavé napětí. Proto je třeba ono napětí vhodným způsobem upravit. K tomuto účelu se pro přeměnu (usměrnění) střídavého napětí na stejnosměrné používají usměrňovače. Tato zařízení mají využití nejen pro stejnosměrné pohony, ale například i pro elektrolýzu, nabíjení baterií, výpočetní techniku a také pro samotný přenos elektrické energie na velké vzdálenosti.

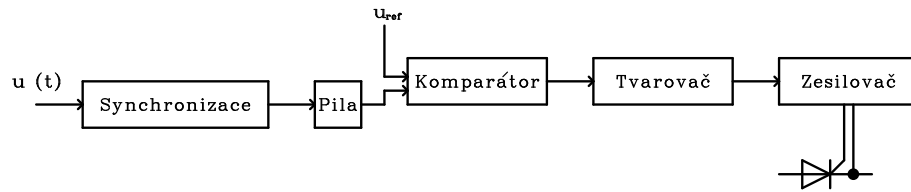
Třífázový můstkový šestipulsní tyristorový usměrňovač obsahuje 6 tyristorů ve dvou řadách, každá fáze je tedy připojena na dva tyristory, jeden v horní a druhý ve spodní řadě. Na obrázku 10 je vyznačen tyristorový můstek (T1-T6), na výstupu je usměrněné napětí u_{dAV} , na vstupu je sdružené napětí u_s . Napájení je realizováno ze třífázové sítě, na obrázku značeny fáze L1, L2, L3. Vzhledem k tomu, že spínání polovodičových součástek může vytvářet a vytváří vyšší harmonické, tedy složky proudu a napětí s vyšší frekvencí, je vhodné tyto složky filtrovat. To může být provedeno například vhodným zapojením transformátoru. Příklad vhodného zapojení je na obrázku 10, kde transformátor TR je zapojen do trojúhelníka na vstupu a do hvězdy na výstupu. Toto zapojení mimo úpravy hladiny střídavého napětí umožňuje i filtraci vyšších harmonických, které spínání polovodičových prvků způsobuje. [7]



Obrázek 10: Schéma tyristorového usměrňovače

Řídicí elektrody jsou zapojeny do generátoru řídicích pulsů (GŘI). Toto zařízení vhodně generuje pulsy, pomocí kterých je polovodičová součástka spínána. Pro tento typ usměrňovače je třeba během žádané doby sepnutí poslat dva řídicí pulsy, jeden na začátku a druhý uprostřed doby spínání, kdy se mění druhý spínaný tyristor. Také se místo jednoho pulsu používá série několika pulsů za sebou, aby se zajistilo správné spínání. GŘI lze popsat pomocí bloku jako na obrázku 11 [7]. Nejdříve je třeba generátor správně načasovat se sítí, to zajišťuje blok synchronizace, který má za úkol správné načasování počátku měření řídicího úhlu. Řídicí úhel je zde označován úhel od počátku průchodu napětí nulou (s kladnou derivací) až do otevření součástky. Po sesynchronizování se sítí se spouští pilový signál (Pila), který se následně porovnává s požadovanou hodnotou u_{ref} . Když je velikost napětí pilového signálu a u_{ref} stejná, komparátor vyše signál

do tvarovače, který signál upraví dle potřeby (hrana, délka). Zesilovač signál zesílí na dostatečnou velikost proudu či napětí pro sepnutí tyristoru. Také odděluje řídicí obvody od silových. [7]



Obrázek 11: Blokové schéma GŘI

U tyristorových usměrňovačů se vyskytuje jev, závislý na typu zátěže. Pokud je čistě odporová, tak proud je ve fázi s napětím a zanikne okolo průchodu napětí nulou. Když je zátěž odporově-induktivní (tedy například motor), proud je fázově posunutý a projde nulou později než napětí. Tím pádem tyristor je otevřen i při závěrném napětí a snižuje se střední hodnota usměrněného napětí u_{dAV} . Při R-L zátěži také může nastat jev, kdy se proud nepřeruší. V našem případě (tyristorového třífázového můstku) to nemusí nutně způsobit škodu, protože při otevření druhého tyristoru vznikne zkratový obvod tvořený tyristory a fázemi transformátoru, přičemž jedna součástka vede zkratový proud v propustném a druhá v závěrném směru. Protože celkový proud tyristorem je vždy kladný a jeden z tyristorů je spojen s fází s menším napětím, proud se v původně vedoucím tyristorem začne zmenšovat a ve druhém narůstá. Když v původním tyristoru dosáhne proud nuly, přestane vést a tím je komutace dokončena. Jedno negativum ale existuje, a to kvůli nedokonalostem součástek. Jelikož spínání tyristoru není okamžité, krátkodobě se je obvod zkratován a jediné omezení je dáno impedancí vodičů a připojených fází transformátoru. [7]

Závislost výstupního usměrněného napětí u_{dAV} na řídicím úhlu α lze popsat vztahem:

$$u_{dAV} = U_{dAV0} \cos(\alpha) \quad , \quad (19)$$

kde U_{dAV0} je střední hodnota napětí při nulovém řídicím úhlu, pro kterou v tomto případě platí:

$$U_{dAV0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} u_s \quad . \quad (20)$$

GŘI mívají funkci pro řídicí úhel zlinearizovanou, takže platí:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{u_r}{U_{rmax}} \right) \quad . \quad (21)$$

Po dosazení a úpravách vyplatí následující vztah pro výstupní napětí usměrňovače:

$$u_{dAV} = U_{dAV0} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{u_r}{U_{rmax}}\right) - \Delta u_k \quad , \quad (22)$$

kde Δu_k je komutační úbytek, který se vypočte jako:

$$\Delta u_k = R_u i_{dAV} \quad . \quad (23)$$

Komutační odpor R_u zohledňuje zkrat vzniklý během komutace a závisí na jmenovitém proudu usměřovače I_{dN} a reaktanci nakrátko napájecího transformátoru x_k :

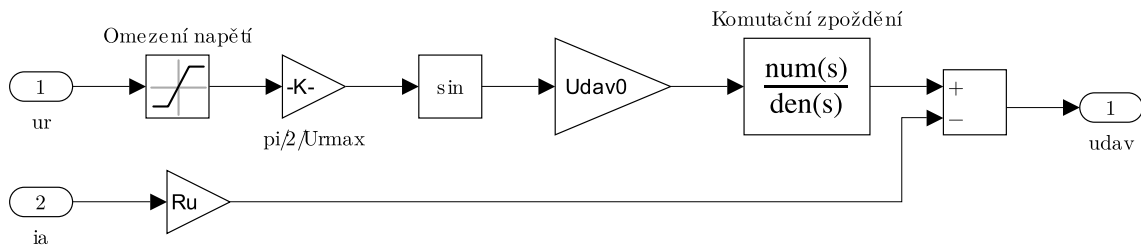
$$R_u = \frac{x_k}{200} \frac{U_{dAV0}}{I_{dN}} \quad (24)$$

Trafa pro napájení musí se zkraty počítat, mimo jiné z důvodu napájení motorů, proto jsou konstruovány s větším rozptylem. Pro simulační účely bylo zvoleno 10%. Hodnoty, se kterými se v simulaci počítá, jsou v tabulce 3.

Tabulka 3: Hodnoty pro simulaci usměřovače

u_s (V)	400	x_k (%)	10
U_{dAV0} (V)	540	I_{dN} (A)	1000
U_{rmax} (V)	10	R_u (m Ω)	0,27

Z těchto vztahů lze sestavit model, který je na obrázku 12. Řídicí napětí se omezí, aby nedošlo k prohoření měniče anebo nebyly překročeny jmenovité hodnoty napětí dalších součástek. Obvykle se dává zadní doraz $-0,66 U_{dAV0}$. Poté se signál zpracuje dle rovnice (22). Blok *komutační zpoždění* zohledňuje časovou prodlevu způsobenou komutací a frekvencí sítě a je realizováno přechodným dějem prvního řádu s časovou konstantou 1,67 ms. Od zpožděného signálu se odečítá komutační úbytek a tím vznikne výsledné u_{dAV} . [6]



Obrázek 12: Model tyristorového usměřovače v Simulinku

3 Pohon řízený PID regulací

Regulátory využívající regulaci pomocí proporční (P), integrační (I) a derivační (D) složky se řadí mezi nejjednodušší způsoby regulace. Mohou být realizovány jak pomocí analogových součástek (například rezistor, kondenzátor, operační zesilovač), tak i pomocí počítačového kódu.

P složka vynásobí vstupní odchylku konstantou. Takto se změna na výstupu projeví okamžitě. Jako samotná nevynuluje odchylku. I složka integruje vstup, proto se její reakce projeví více až s časem. Díky tomuto členu je možné dosáhnout nulové odchylky. D složka říká, jak moc se vstup mění, tedy ho derivuje. Samostatně se nepoužívá také proto, protože neříká nic o stavu odchylky. Součtem všech složek lze výstup popsat rovnicí jako:

$$u_o = K_P e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (25)$$

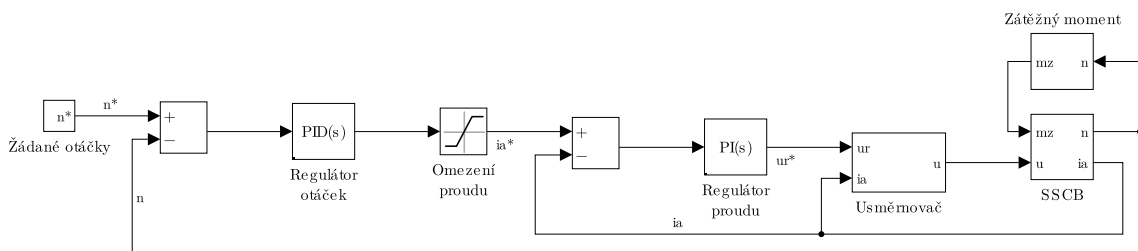
kde u_o je výstup, e je regulační odchylka, t čas a K_P , K_I , K_D jsou konstanty jednotlivých členů. [6]

Konstanty regulátorů se často určují experimentálně, v tomto případě byly určeny pomocí vnitřní aplikace MATLABu „PID Tuner“ a jsou v následující tabulce.

Tabulka 4: Konstanty regulátorů otáček a proudu

Regulátor otáček		Regulátor proudu	
$K_P (-)$	0,86	$K_P (-)$	0,86
$K_I (-)$	3,8	$K_I (-)$	3,8
$K_D (-)$	$6,3 \cdot 10^{-3}$		

Model pohonu řízeného PID regulací je na obrázku 13. Od žádaných otáček jsou odečteny skutečné. Takto vzniklá odchylka vstupuje do PID regulátoru otáček, který nastaví požadovaný proud i_a^* . Od něj se odečítá skutečný a odchylka proudu vstupuje do PI regulátoru proudu, který nastaví požadované řídicí napětí.

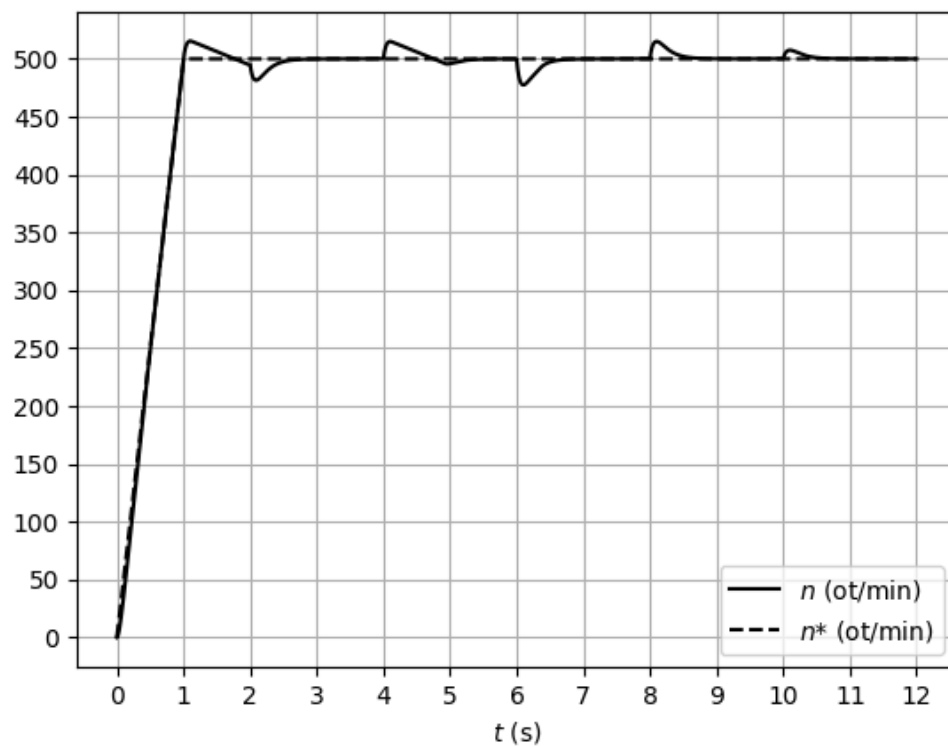


Obrázek 13: Model stejnosměrného pohonu s PID regulací

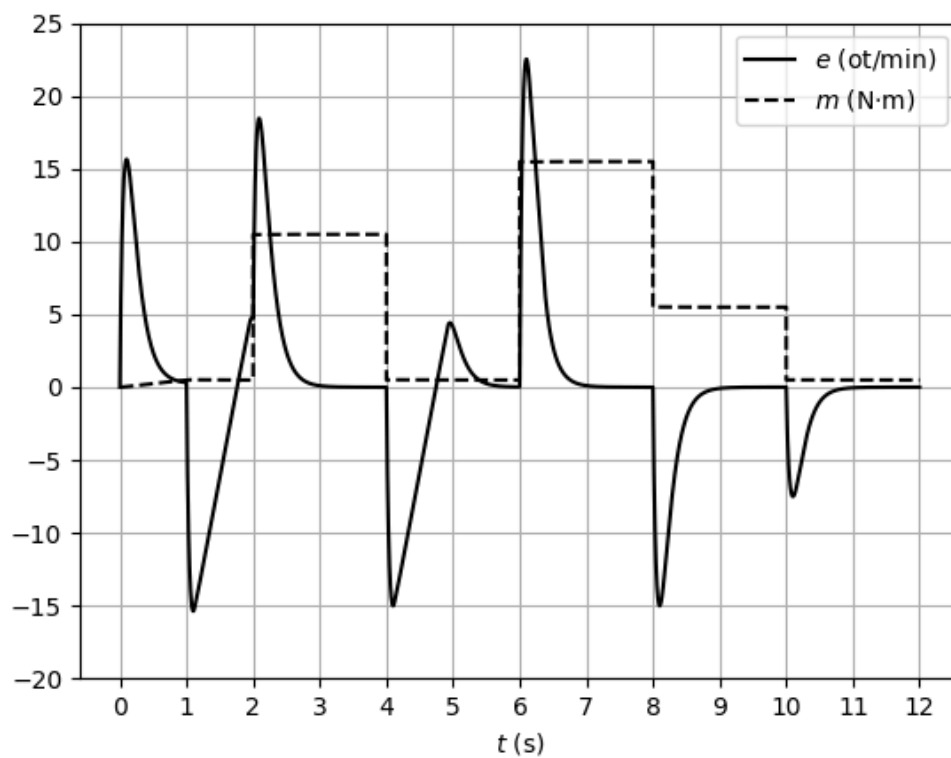
Simulace provozu

- **Proměnná zátěž**

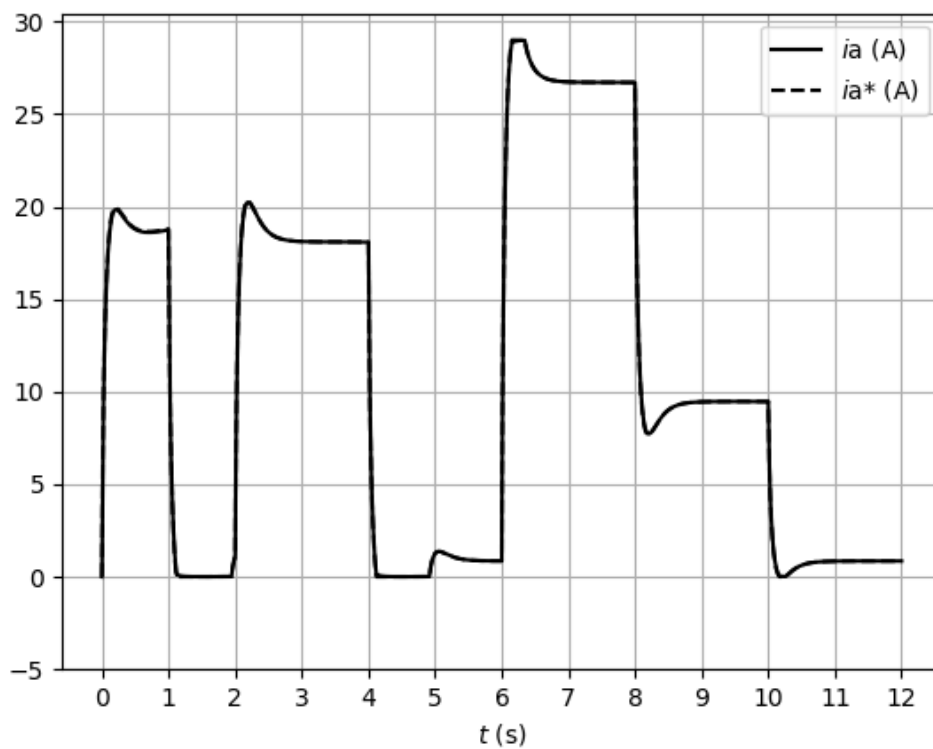
Simulace rozběhu naprázdno na 500 ot/min a následovaného proměnným zatěžováním.



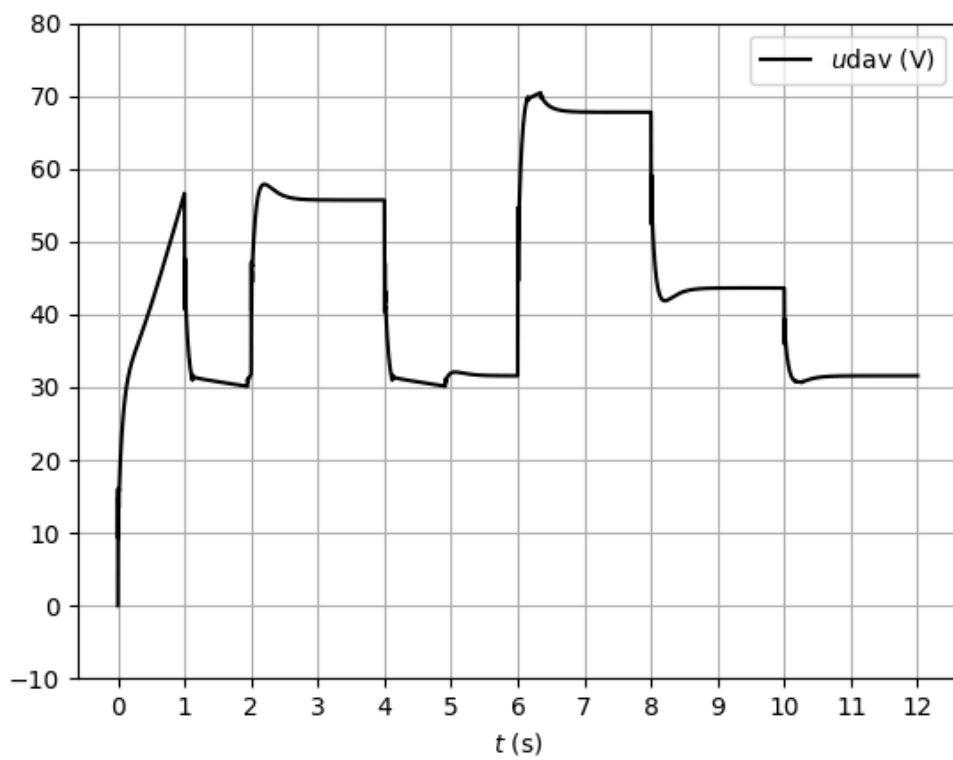
Obrázek 14: Průběh n (ot/min) pro PID regulaci



Obrázek 15: Průběh odchylky otáček (ot/min) a zátěžného momentu m_z ($N \cdot m$) pro PID regulaci



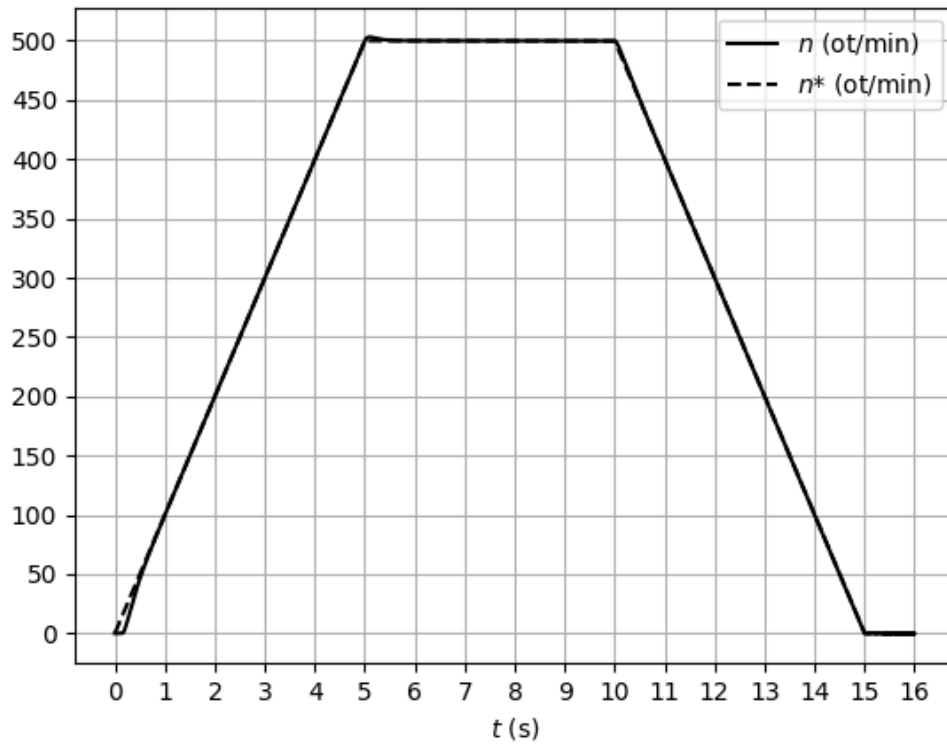
Obrázek 16: Průběh i_a (A) pro PID regulaci



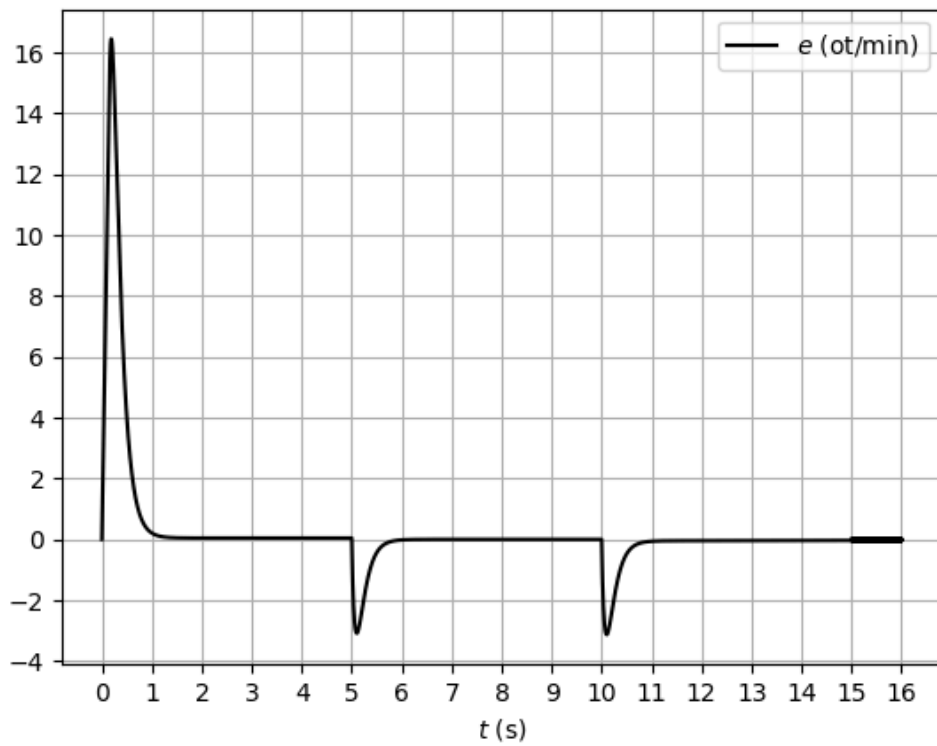
Obrázek 17: Průběh u_{dAV} (V) pro PID regulaci

- **Konstantní zátěž**

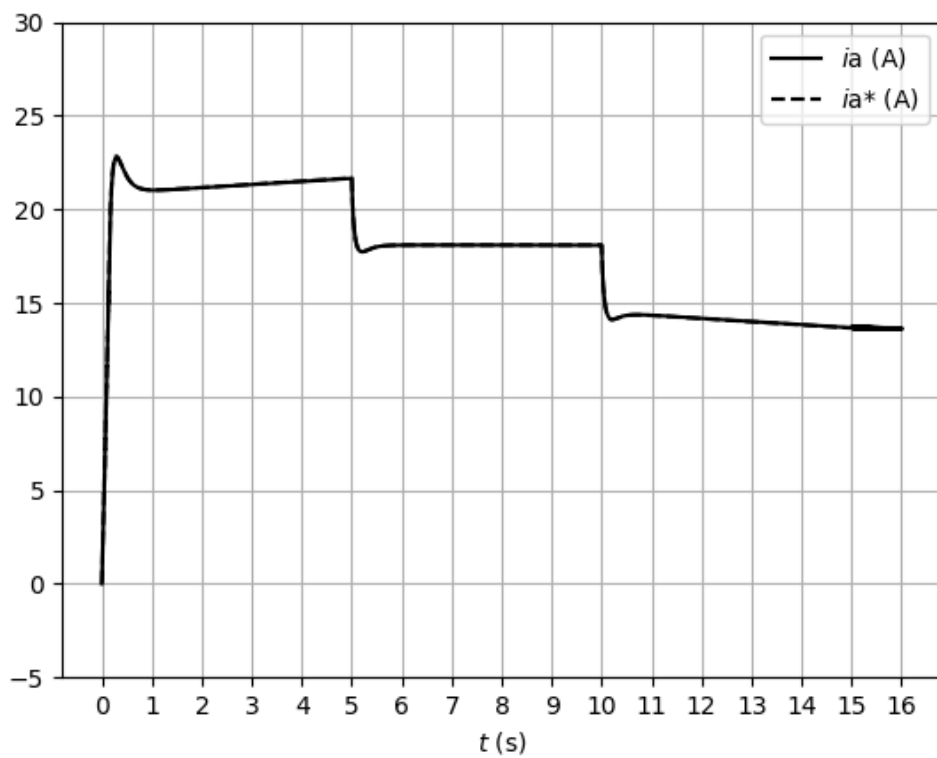
Pohon se rozeběhá na 500 ot/min a zastavuje při konstantní zátěži 10 N · m.



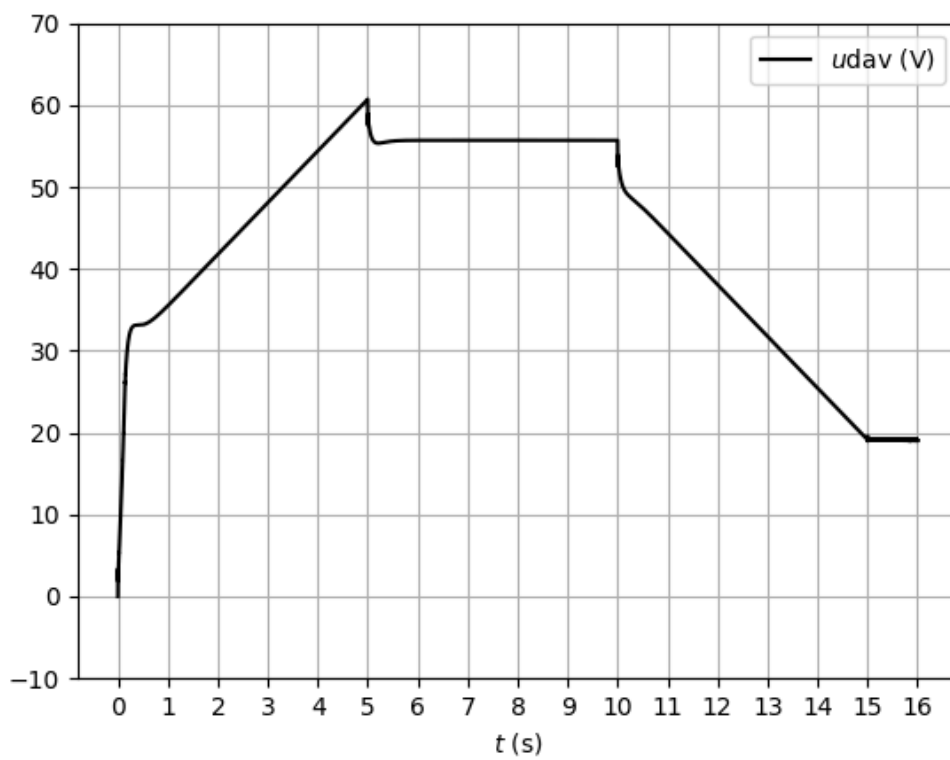
Obrázek 18: Průběh otáček (ot/min) pro PID regulaci



Obrázek 19: Průběh odchylky otáček e (ot/min) pro PID regulaci



Obrázek 20: Průběh i_a (A) pro PID regulaci



Obrázek 21: Průběh u_{dAV} (V) pro PID regulaci

4 Pohon řízený fuzzy logikou

Regulační smyčka zde obsahuje fuzzy regulátor. Tento regulátor může akční veličinu měnit přímo nebo nepřímo, například pomocí změny konstant PID regulátoru. Provedení fuzzy regulátorů je počítačovým kódem, v této práci byly zhotoveny v prostředí MATLAB Simulink.

4.1 Fuzzy PI regulátor

Pomocí fuzzy logiky lze do určité míry nahradit PI regulátor. Do určité míry proto, že fuzzy regulátor jako samotný člen je proporčního charakteru, takže k dosažení nulové odchylky je třeba přidat integrační složku [8], [9], [5]. Pro fuzzy PI regulátor byla použita Mamdamiho defuzzifikace. Pravidla byla určena podle následujících úvah:

- Když je odchylka e a derivace odchylky Δe nulová, výstup se měnit také nebude.
- Při kladné e a Δe je třeba zvětšit výstup.
- Při záporné e a Δe je výstup třeba snížit.
- Pokud je odchylka kladná a její změna záporná (a naopak), výstup se sníží.

Takto vytvořená sada pravidel je v tabulce 5. Funkce příslušnosti pro e a Δe jsou označeny názvy Negativní Velká, Negativní Střední, Negativní Malá, Žádná, Pozitivní Malá, Pozitivní Střední a Pozitivní Velká, ve zkratkách NV, NS, NM, Ž, PM, PS a PV. Pro výstup podobně jen s dvěma stupni navíc Negativní Největší, Negativní Velká, Negativní Střední, Negativní Malá, Žádná, Pozitivní Malá, Pozitivní Střední, Pozitivní Velká a Pozitivní Největší, ve zkratkách NNV, NV, NS, NM, Ž, PM, PS, PV a PNV. [8], [9]

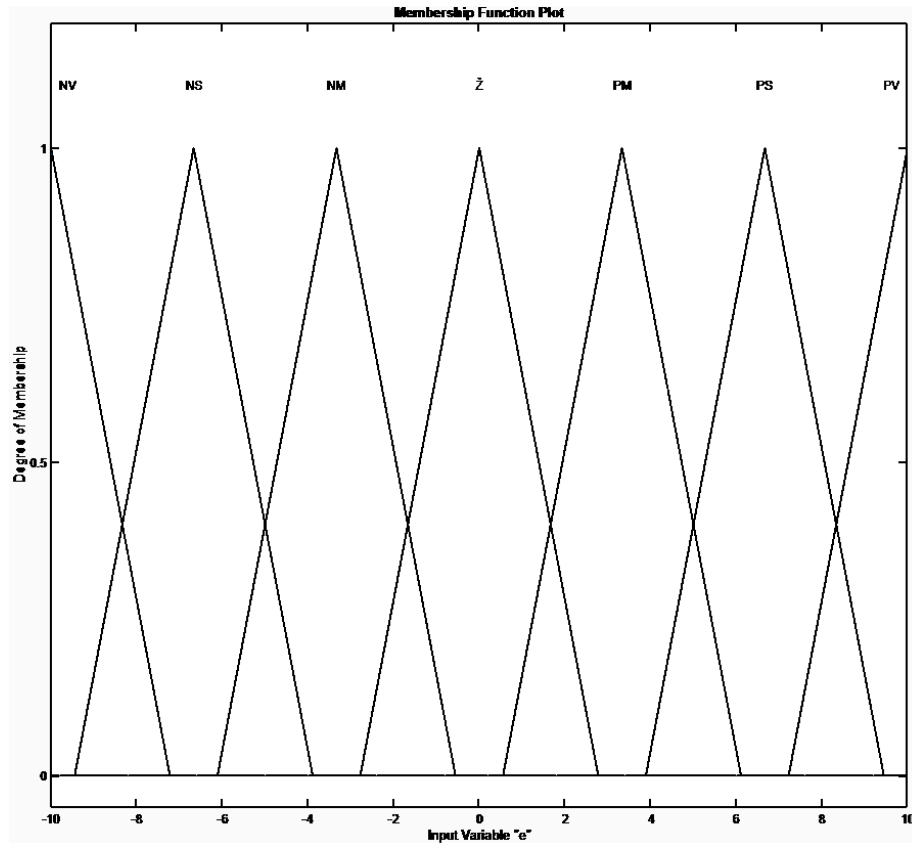
Tabulka 5: Pravidla pro náhradu PI regulátoru fuzzy regulátorem

$e \backslash \Delta e$	NV	NS	NM	Ž	PM	PS	PV
NV	NNV	NNV	NNV	NV	NS	NM	Ž
NS	NNV	NNV	NV	NS	NM	Ž	PM
NM	NNV	NV	NS	NM	Ž	PM	PS
Ž	NV	NS	NM	Ž	PM	PS	PV
PM	NS	NM	Ž	PM	PS	PV	PNV
PS	NM	Ž	PM	PS	PV	PNV	PNV
PV	Ž	PM	PS	PV	PNV	PNV	PNV

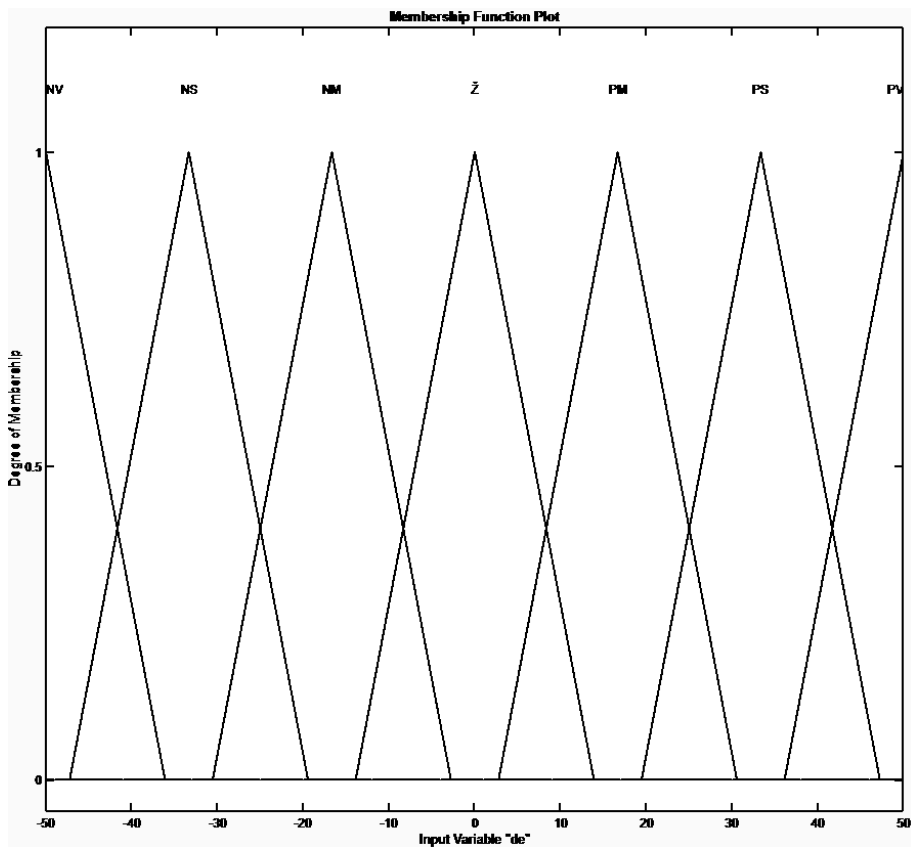
Regulace pomocí dvou fuzzy regulátorů

Regulační smyčka se dvěma fuzzy regulátory je téměř shodná s klasickou PID regulací popsanou v kapitole 3 s rozdílem, že PID a PI regulátory jsou nahrazeny fuzzy PI regulátory. Tímto způsobem se regulují otáčky n a proud kotvy i_a v samotných podružných smyčkách. Bloky *Fuzzy regulátor otáček* a *proudu* obsahují samotný fuzzy regulátor a ještě zpracování derivace, která potřebuje filtraci z důvodu šumu. Žádané otáčky se odečítají od reálných a jejich rozdíl je

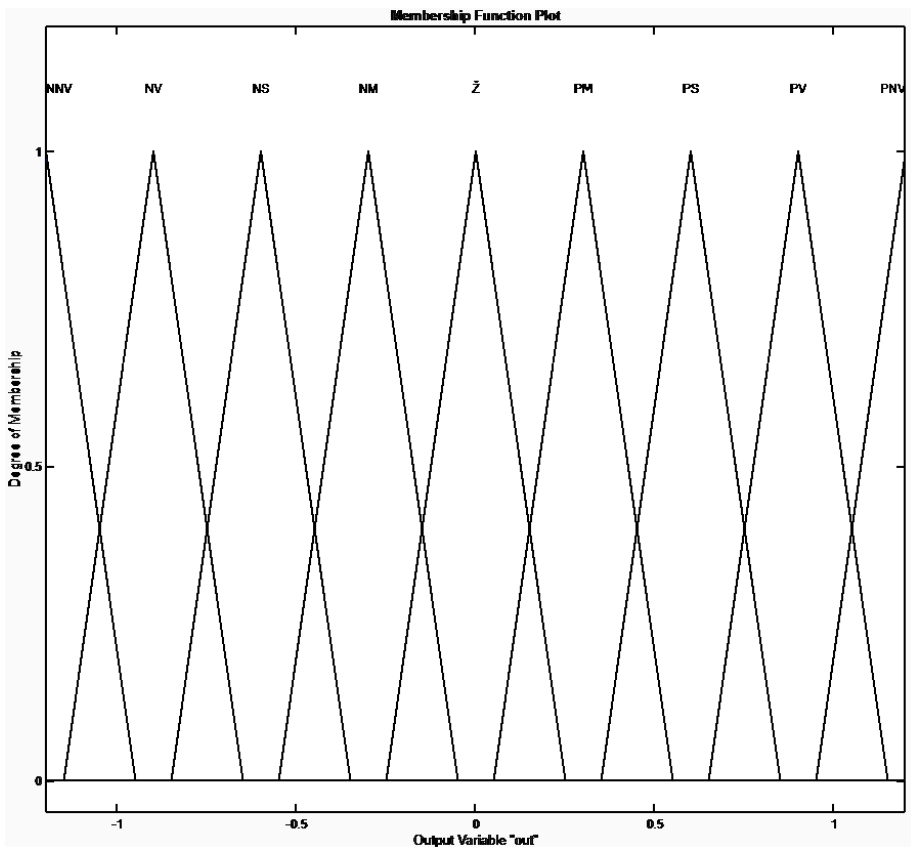
vyhodnocován ve fuzzy regulátoru otáček. Vstupy do fuzzy regulátoru otáček jsou odchylka a její derivace. Tímto se vytvoří požadavek na proud, který se následně odečte od reálné hodnoty proudu. Odchylka proudu a její změna jsou vstupy fuzzy regulátoru proudu, který pomocí fuzzy logiky nastaví požadovaný proud pomocí hodnoty řídicího úhlu, který je jeho výstupem. Řídicí úhel je poslán do usměrňovače, který napájí motor. [8]



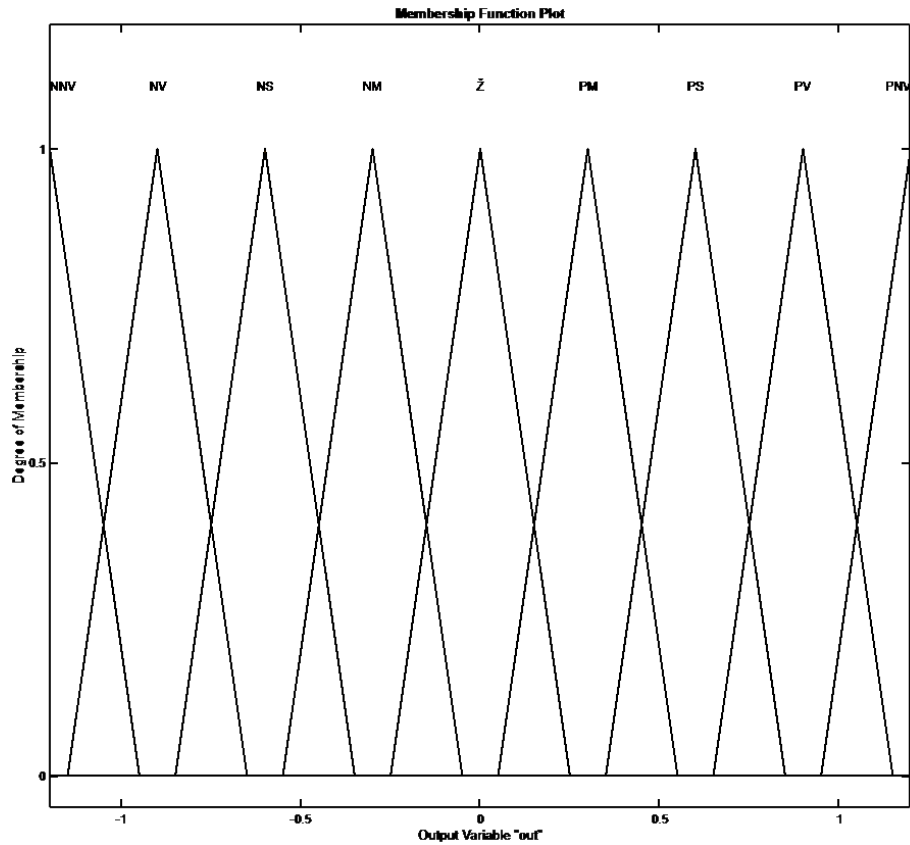
Obrázek 22: Příslušnostní funkce regulační odchylky e fuzzy regulátoru otáček



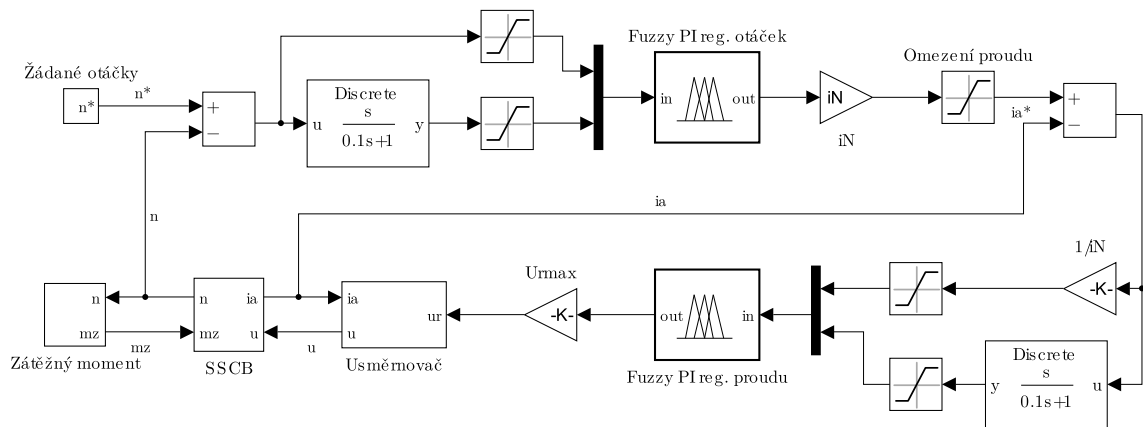
Obrázek 23: Příslušnostní funkce změny odchylky Δe fuzzy regulátoru proudu



Obrázek 24: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru proudu



Obrázek 25: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru proudu

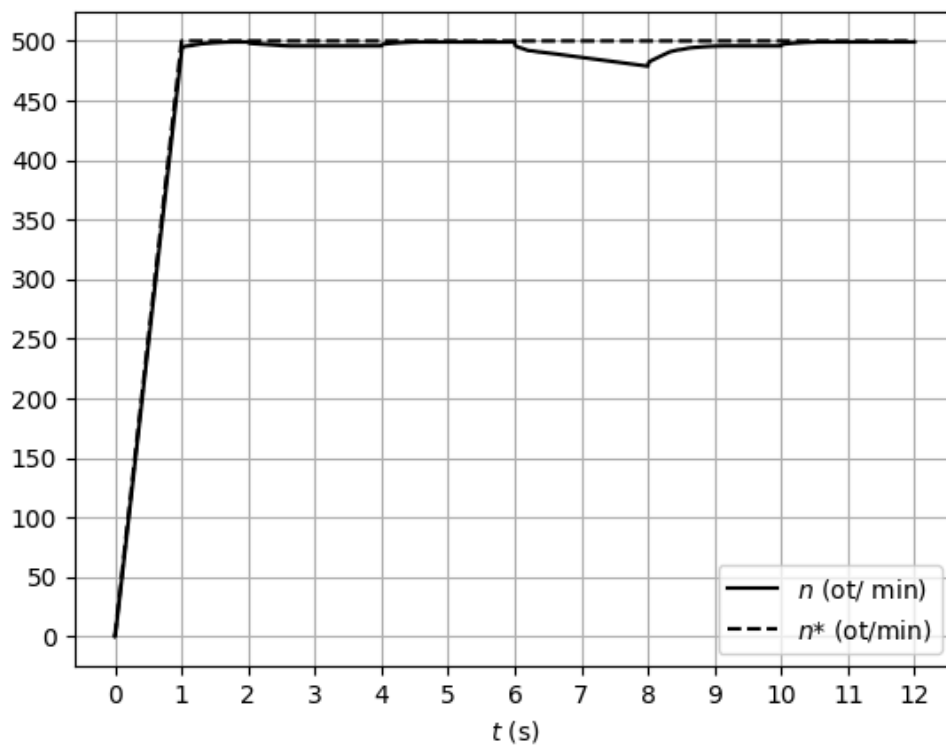


Obrázek 26: Model motoru řízeného dvěma fuzzy regulátory

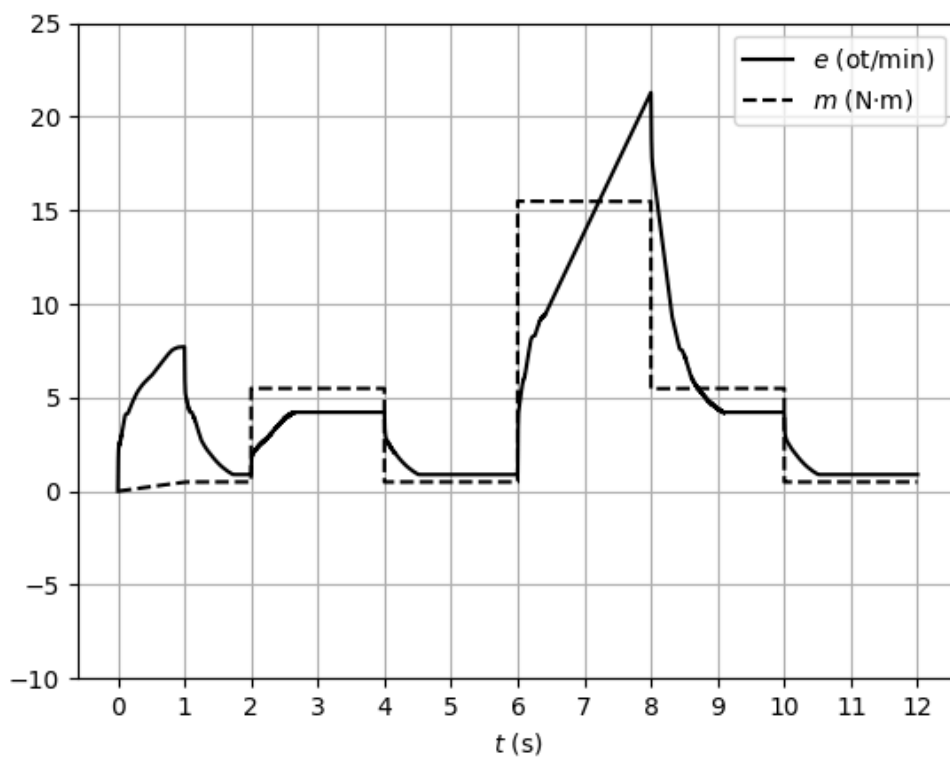
Simulace provozu pohonu regulovaný dvěma fuzzy regulátory

- **Proměnná zátěž**

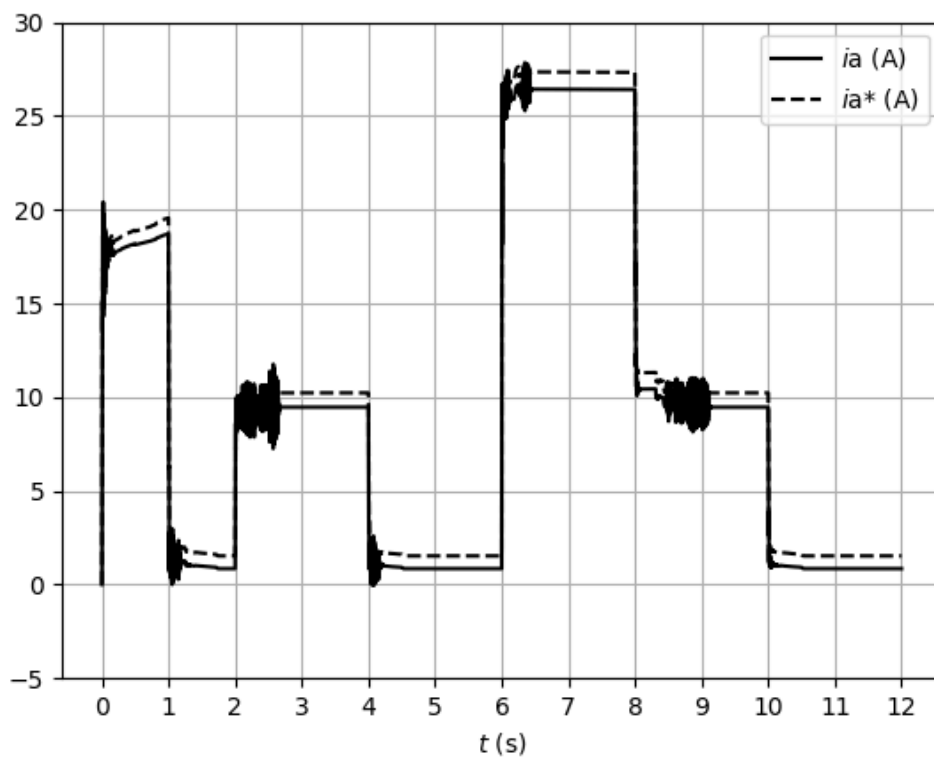
Simulace rozběhu naprázdno na 500 ot/min následovaného proměnným zatěžováním. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 27 až 30.



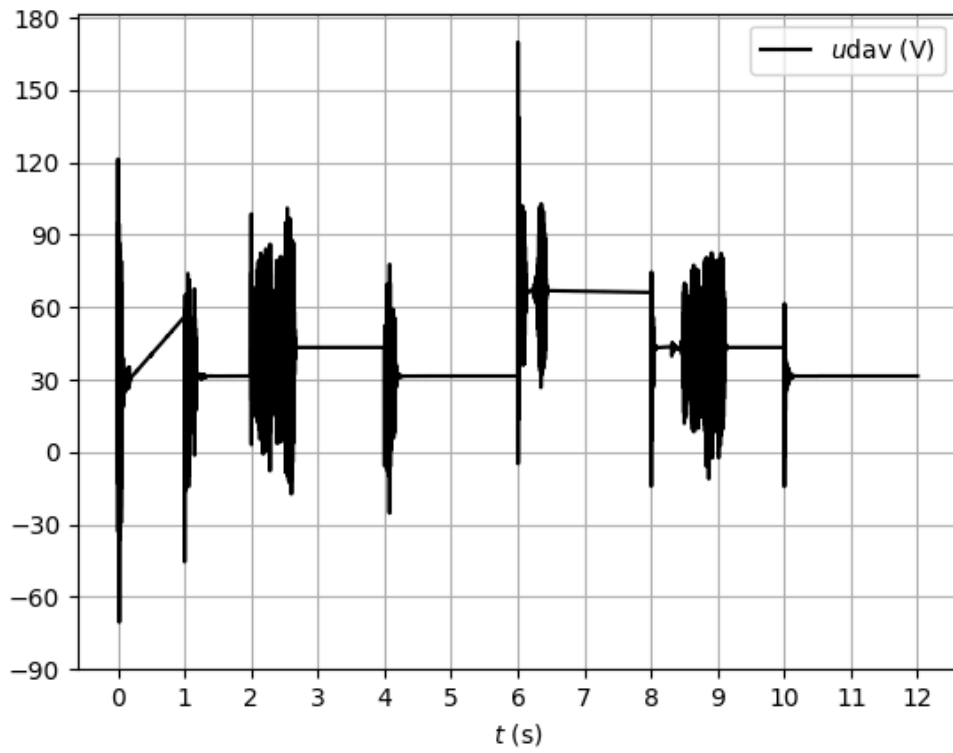
Obrázek 27: Průběh n (ot/min) pro dva fuzzy regulátory



Obrázek 28: Průběh e (ot/min) a m_z (N · m) pro dva fuzzy regulátory



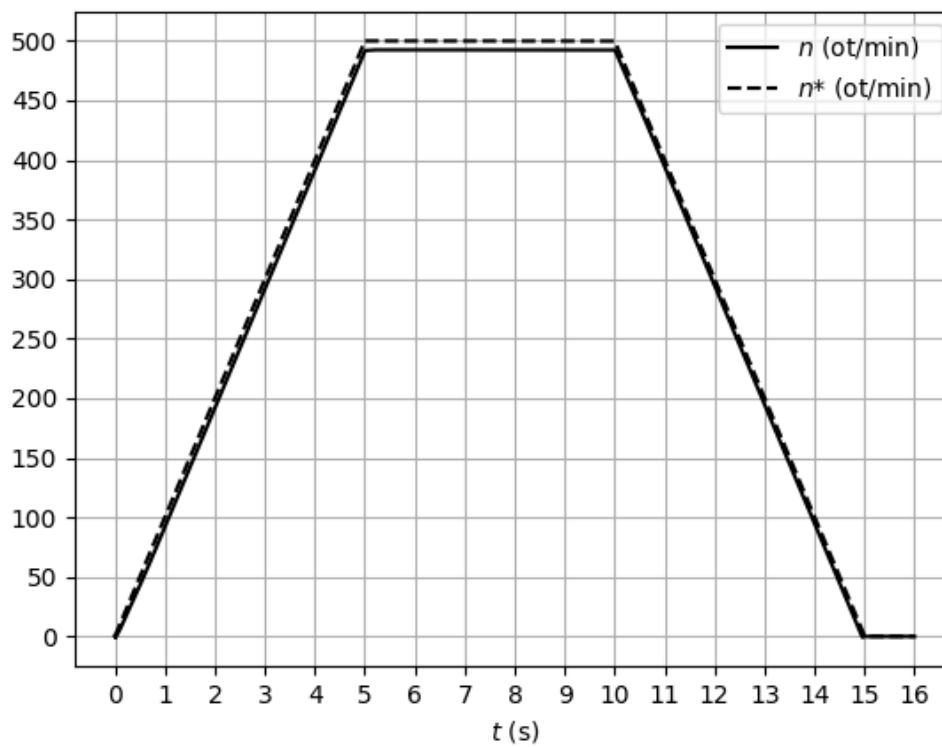
Obrázek 29: Průběh i_a (A) pro dva fuzzy regulátory



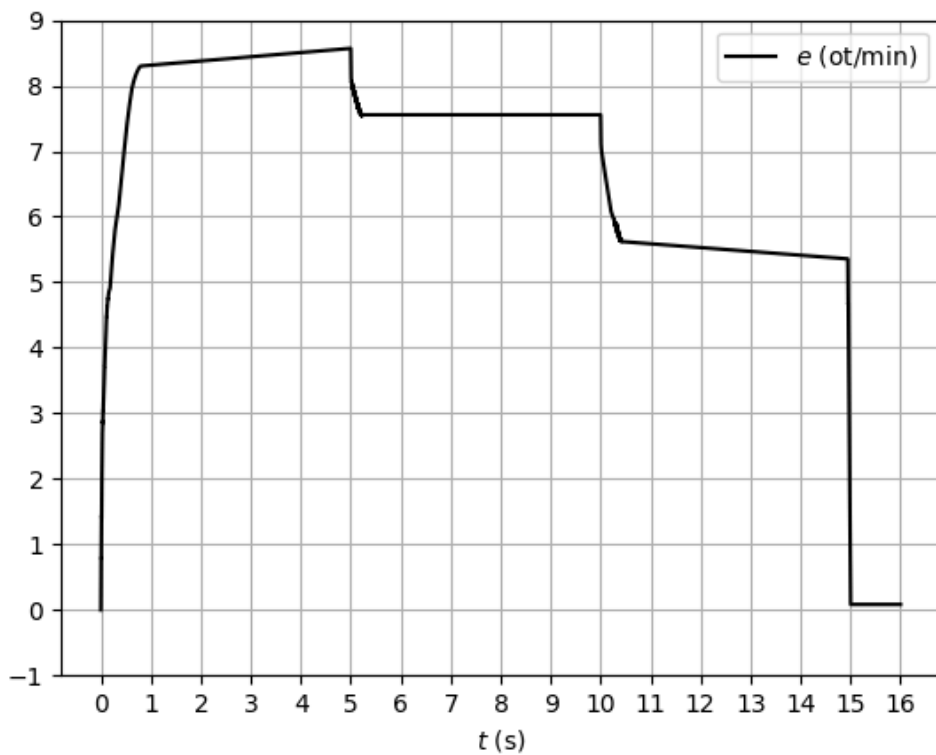
Obrázek 30: Průběh u_{dAV} (V) pro dva fuzzy regulátory

- **Konstantní zátěž**

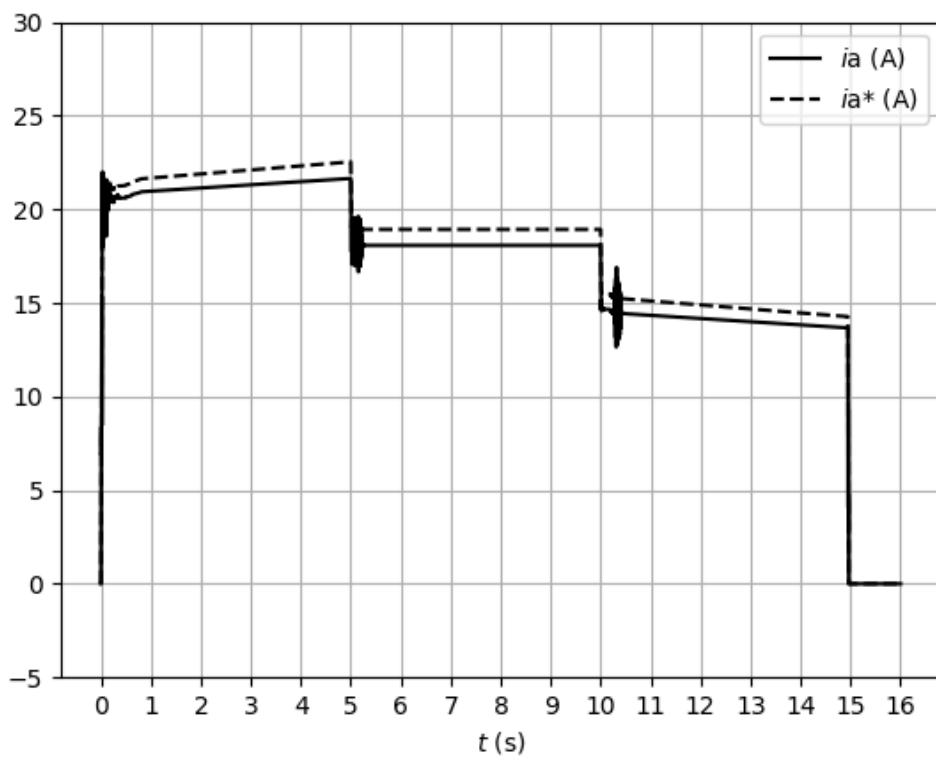
Pohon se rozeběhá na 500 ot/min a zastavuje při konstantní zátěži 10 N · m. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 31 až 34.



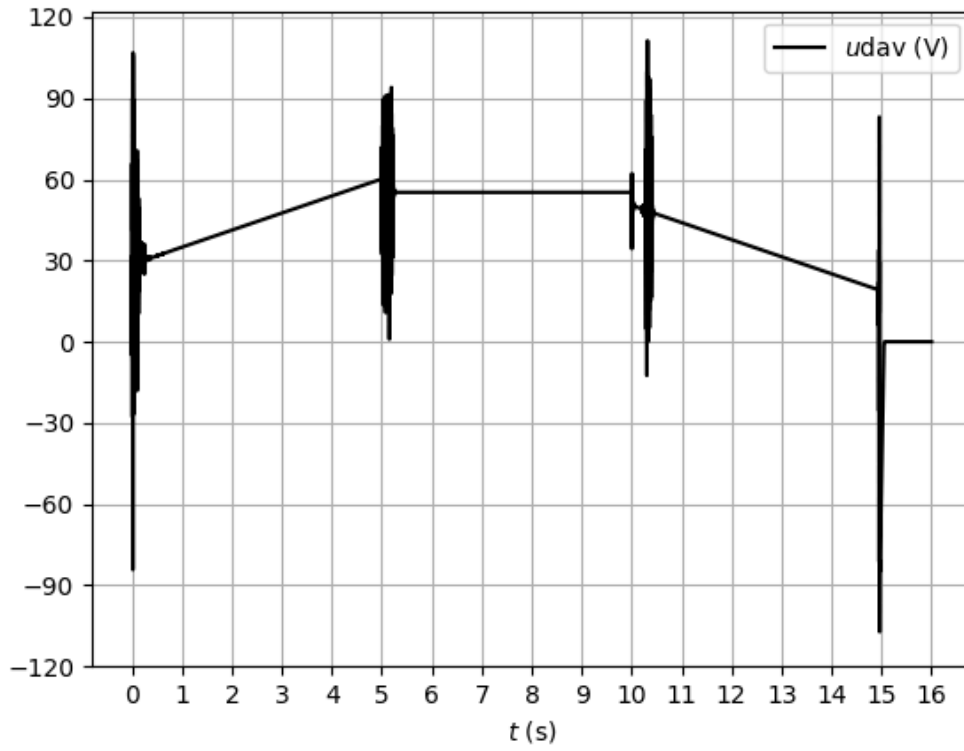
Obrázek 31: Průběh n (ot/min) pro dva fuzzy regulátory



Obrázek 32: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro dva fuzzy regulátory



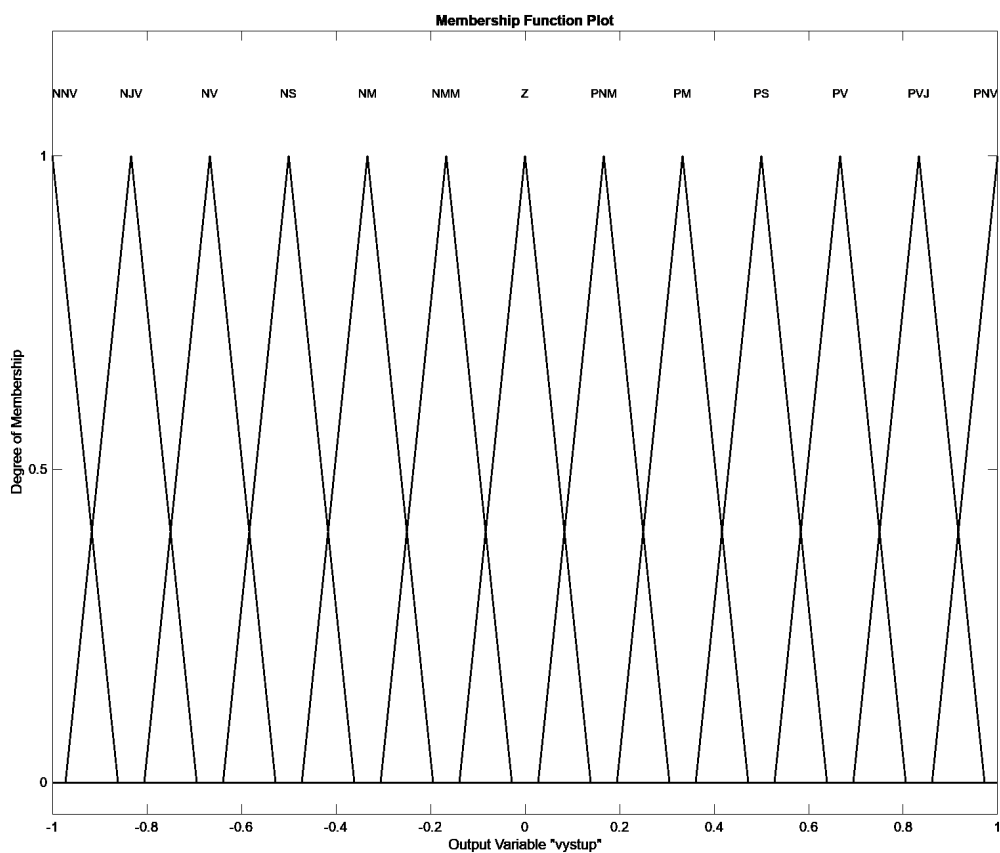
Obrázek 33: Průběh i_a (A) pro dva fuzzy regulátory



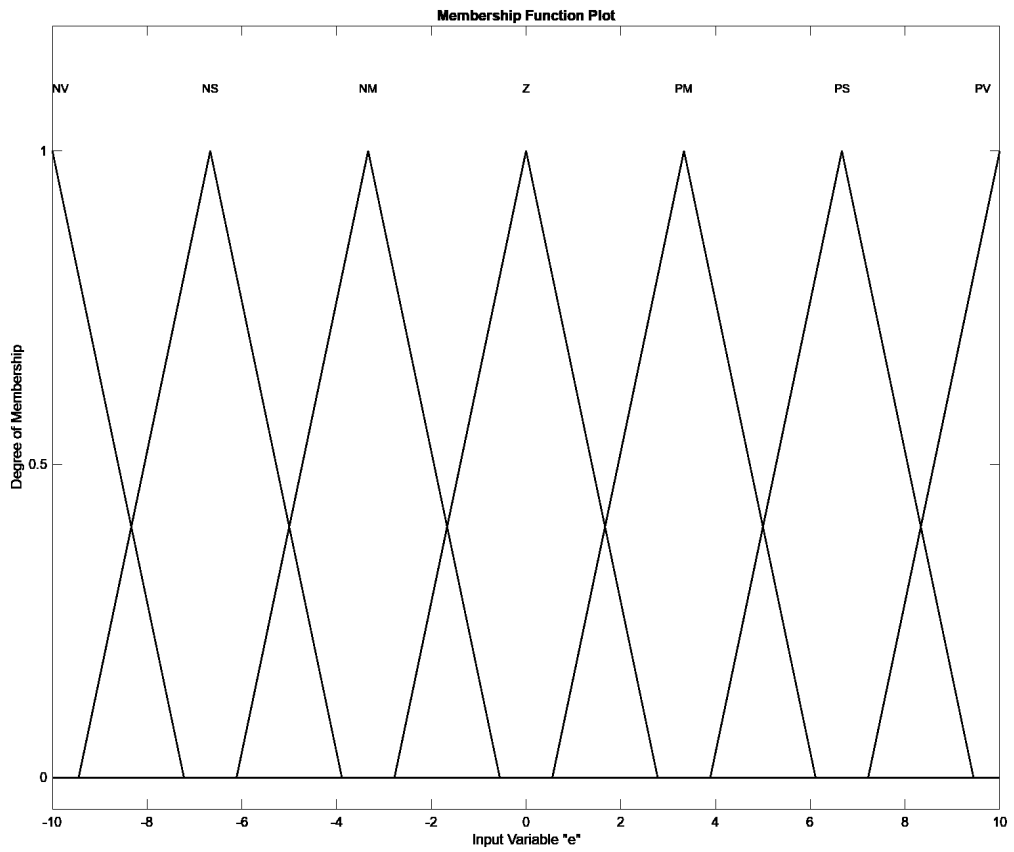
Obrázek 34: Průběh u_{dAV} (V) pro dva fuzzy regulátory

PI regulátor kombinovaný s fuzzy regulátorem

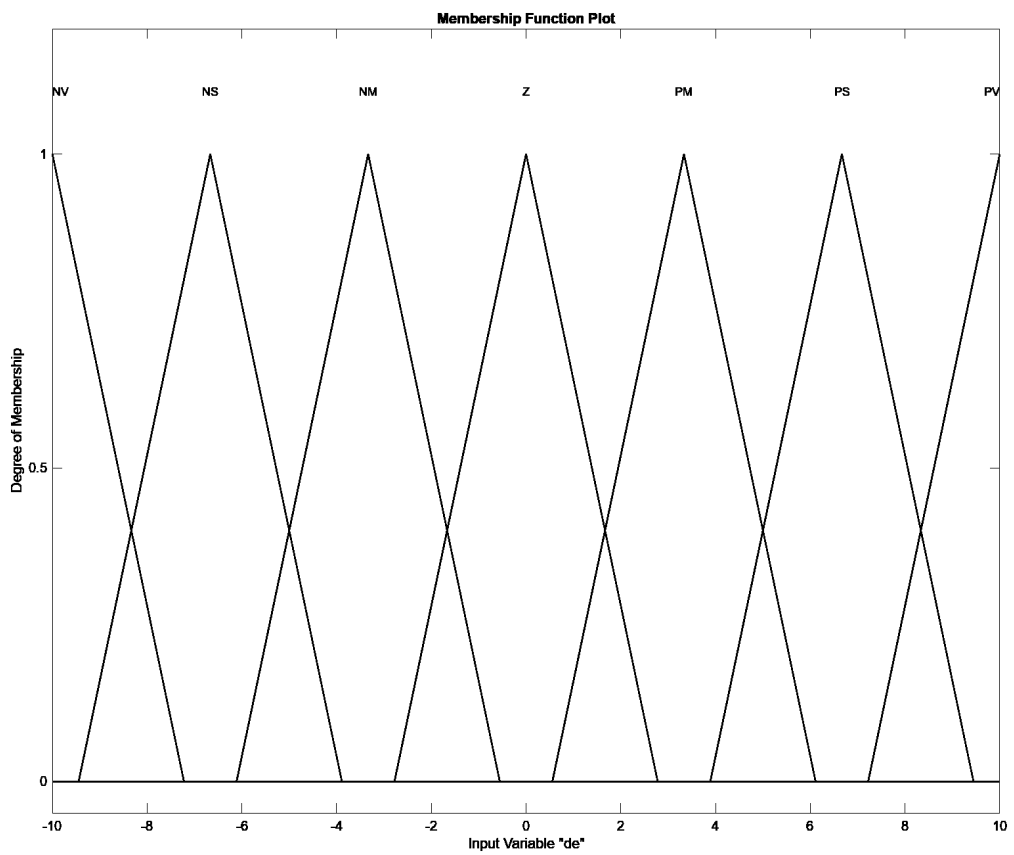
Fuzzy člen je zasazen za PI regulátor. Díky tomu je již integrační složka obsažena v signálu a nemusí se přidávat. Odchylka od žádaných otáček je poslána do PI regulátoru. Konstanty PI regulátoru jsou $K_P = 0,01$ a $K_I = 0,03$. Za ním následuje fuzzy regulátor, jehož vstupní veličiny jsou zregulovaná odchylka a její derivace. Proud je zde omezen požadavkem nulového řídicího úhlu při překročení jmenovité hodnoty a následně vyfiltrován filtrem. Výstup je v poměrných jednotkách, proto se násobí maximální hodnotou U_{rmax} . Takto se získá řídicí napětí pro usměrňovač, který jej převede na úhel a ze sítě přemění střídavé napětí na stejnosměrné o hodnotě u_{dAV} . Nastavení fuzzy regulátorů je na obrázcích 35 až 37 [9]



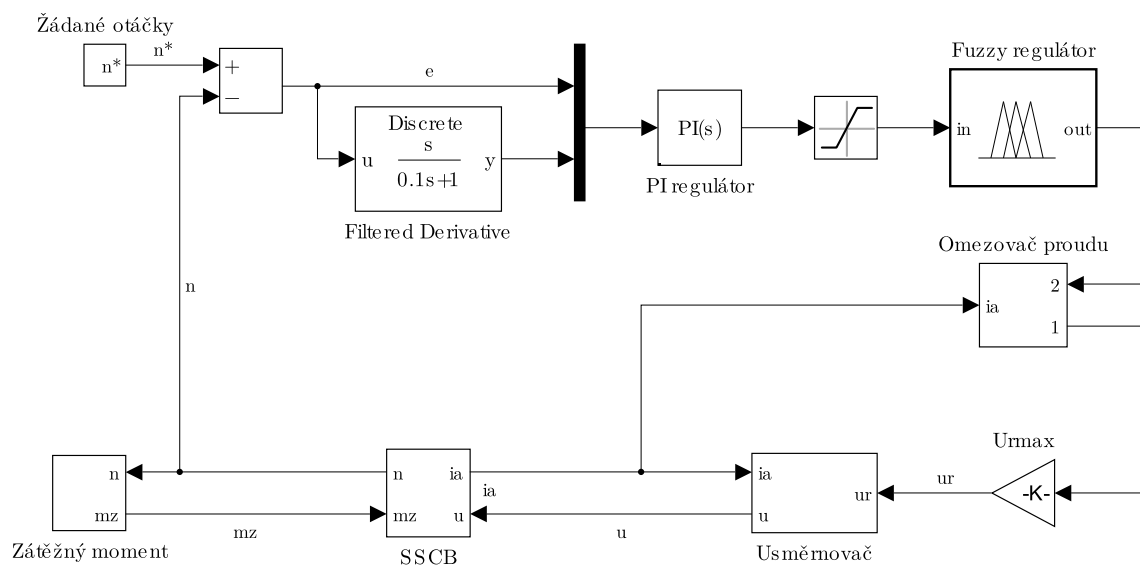
Obrázek 35: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru



Obrázek 36: Příslušnostní funkce regulační odchylky



Obrázek 37: Příslušnostní funkce změny odchylky

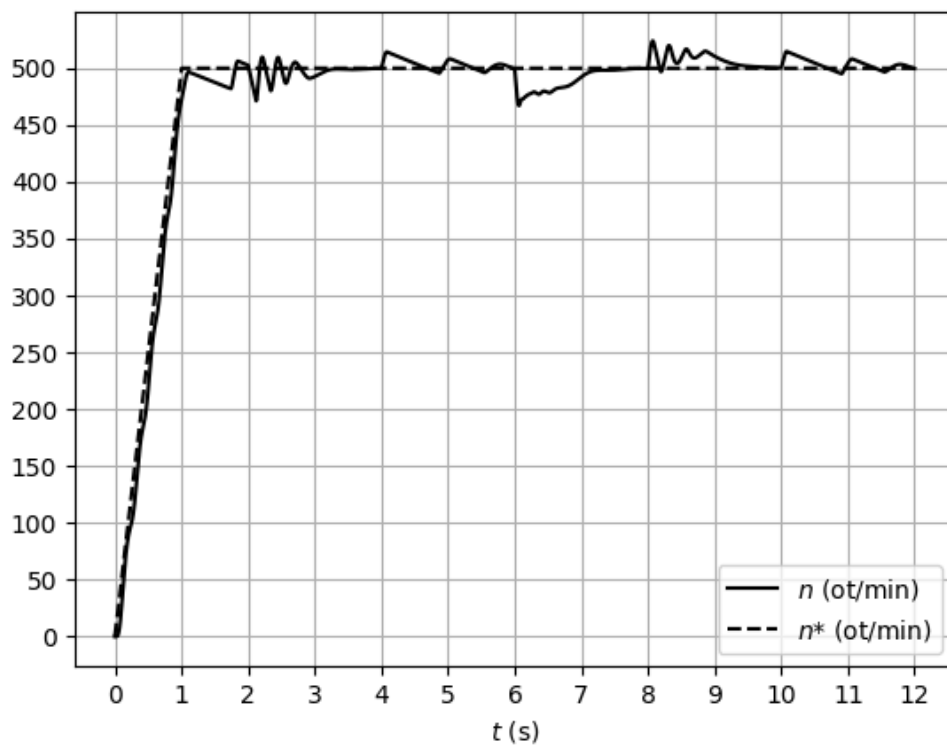


Obrázek 38: Model motoru řízeného PI a fuzzy regulátorem

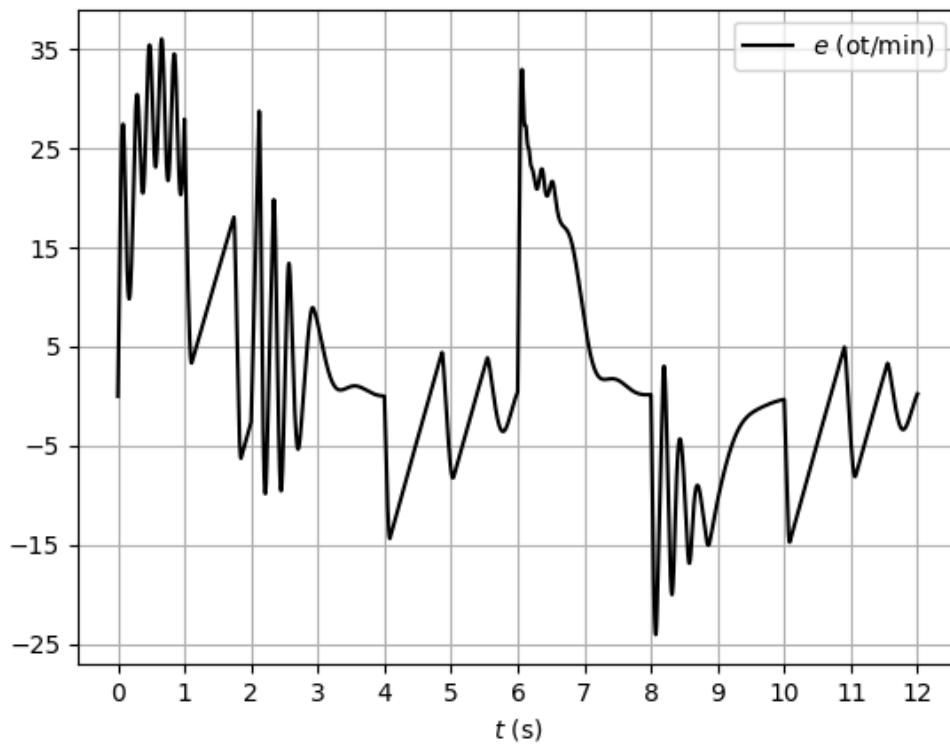
Simulace provozu s kombinovaným PI a fuzzy regulátorem

- **Proměnná zátěž**

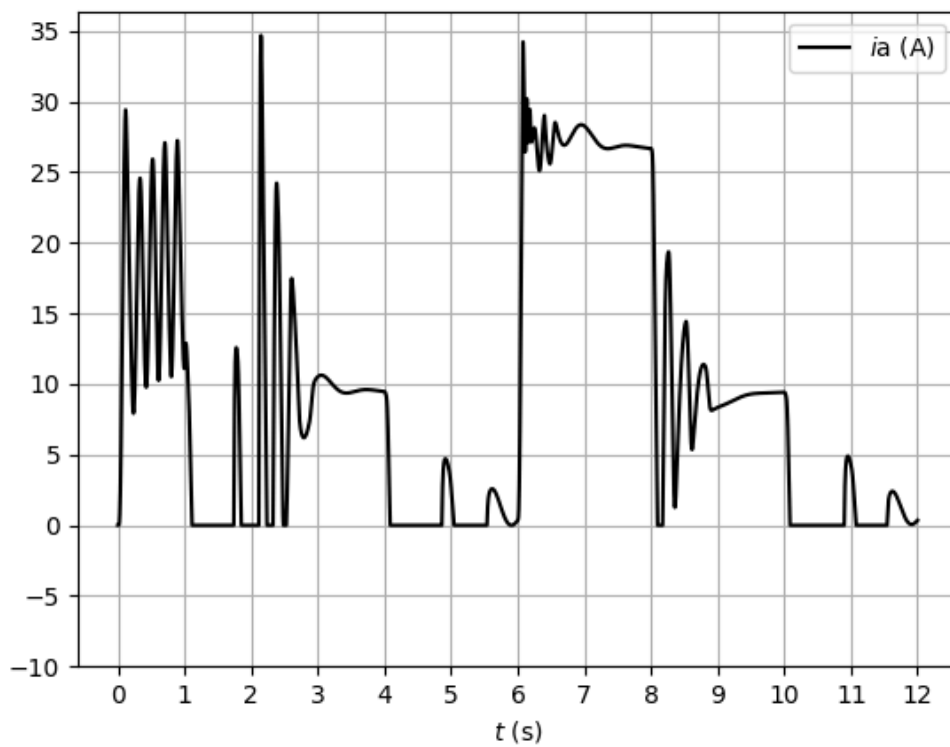
Simulace rozběhu naprázdno na 500 ot/min následovaného proměnným zatěžováním. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 39 až 42.



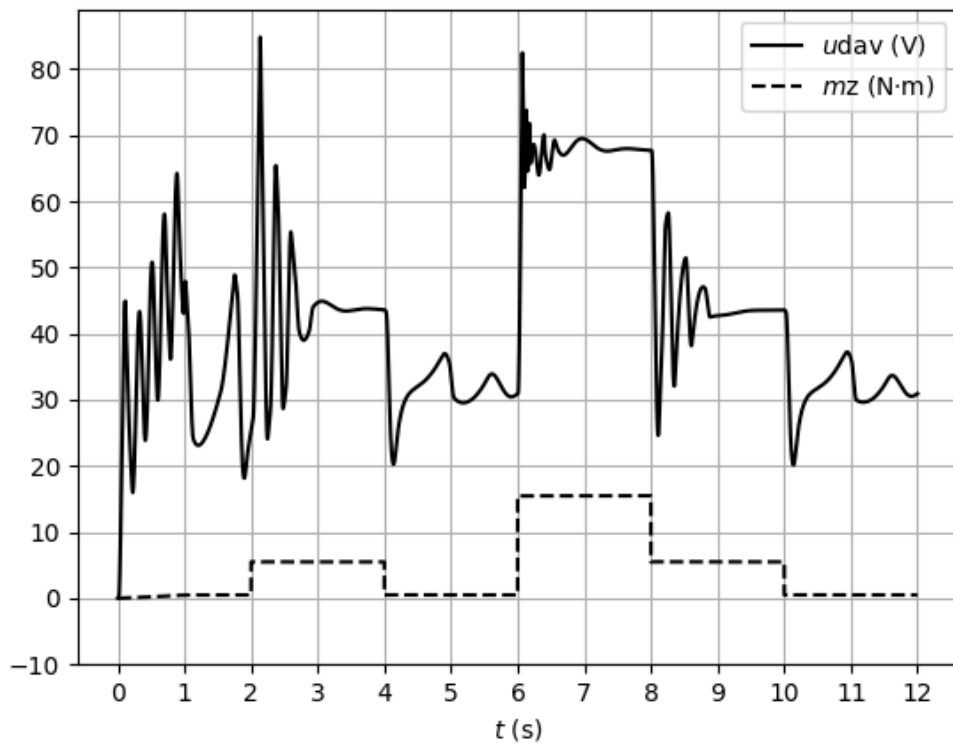
Obrázek 39: Průběh n (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru



Obrázek 40: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru



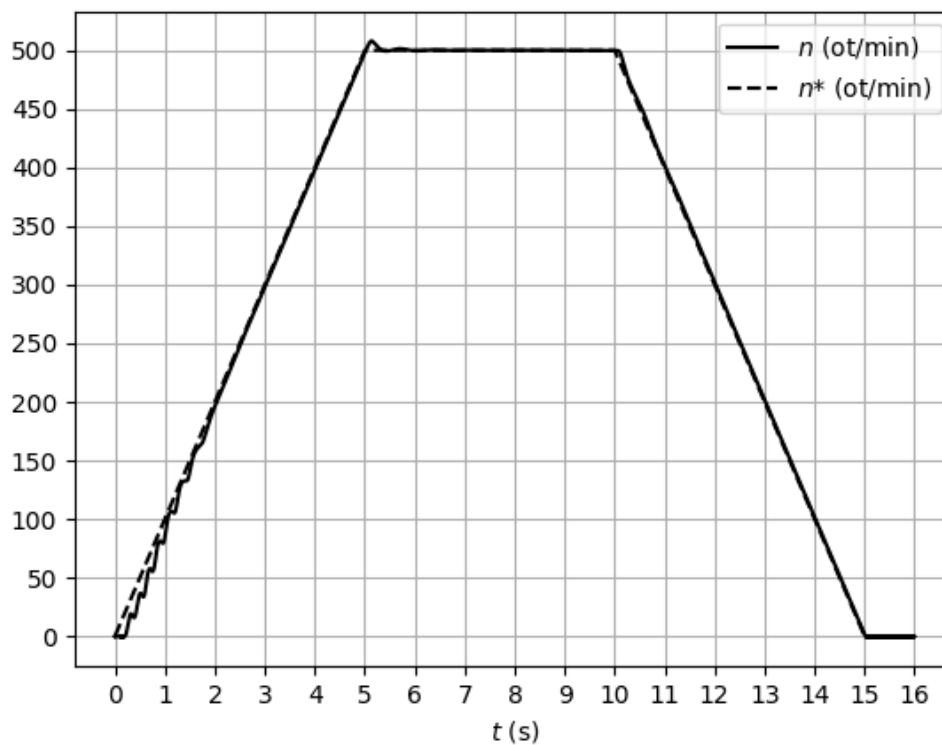
Obrázek 41: Průběh i_a (A) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru



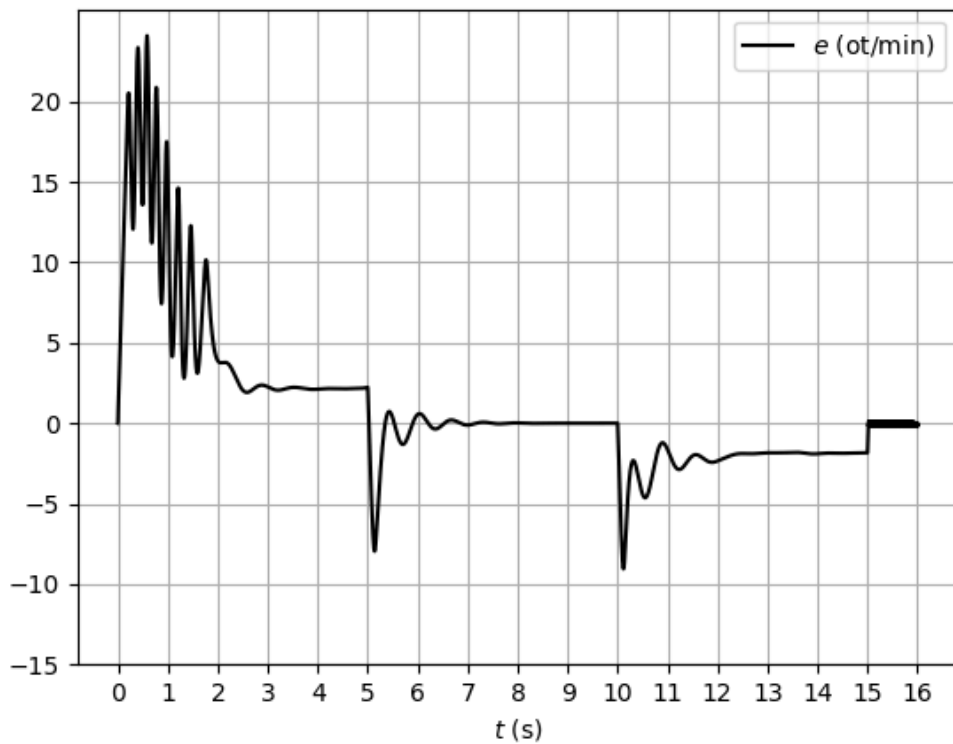
Obrázek 42: Průběh u_{dAV} (V) a m_z (N·m) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru

- **Konstantní zátěž**

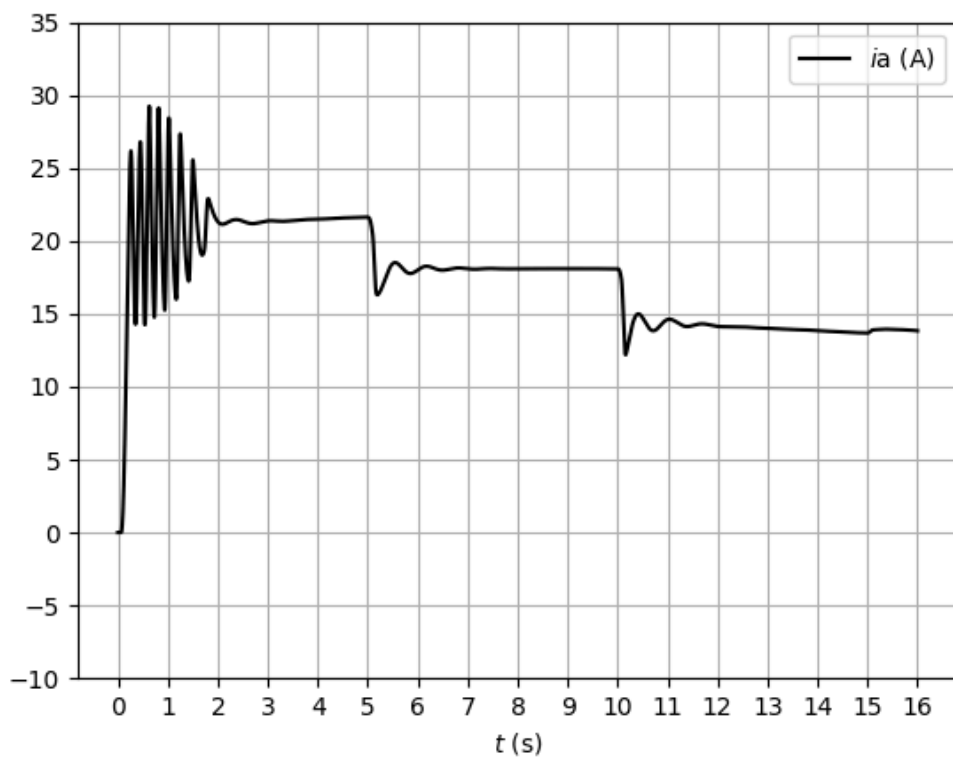
Pohon se rozeběhá na 500 ot/min a zastavuje při konstantní zátěži 10 N · m. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 43 až 46.



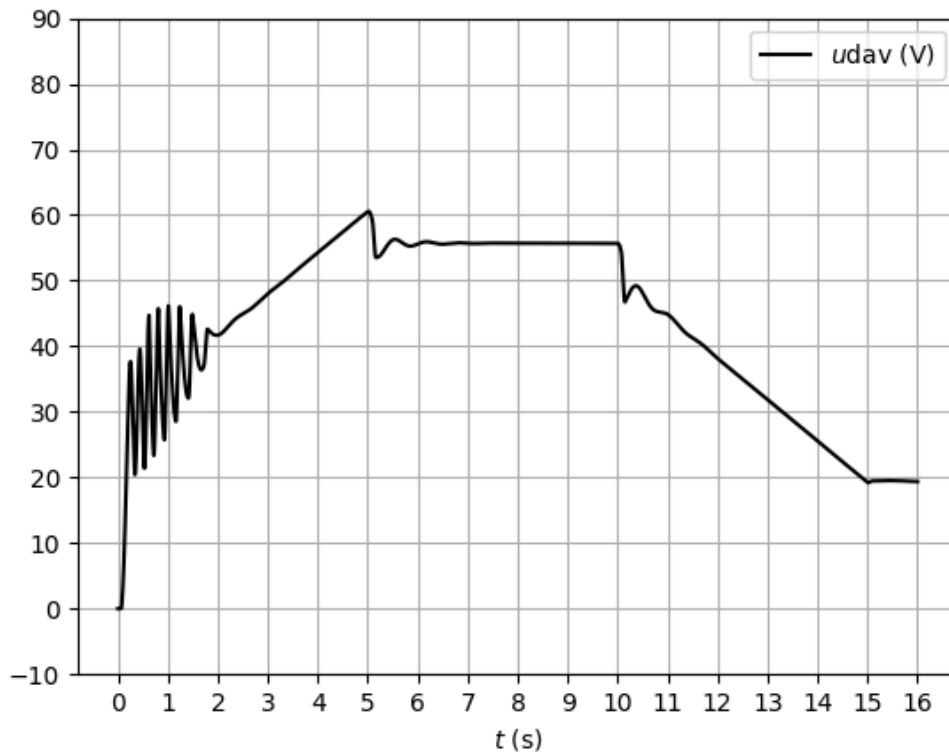
Obrázek 43: Průběh n (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru



Obrázek 44: Průběh odchyly otáček (ot/min) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru



Obrázek 45: Průběh i_a (A) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru

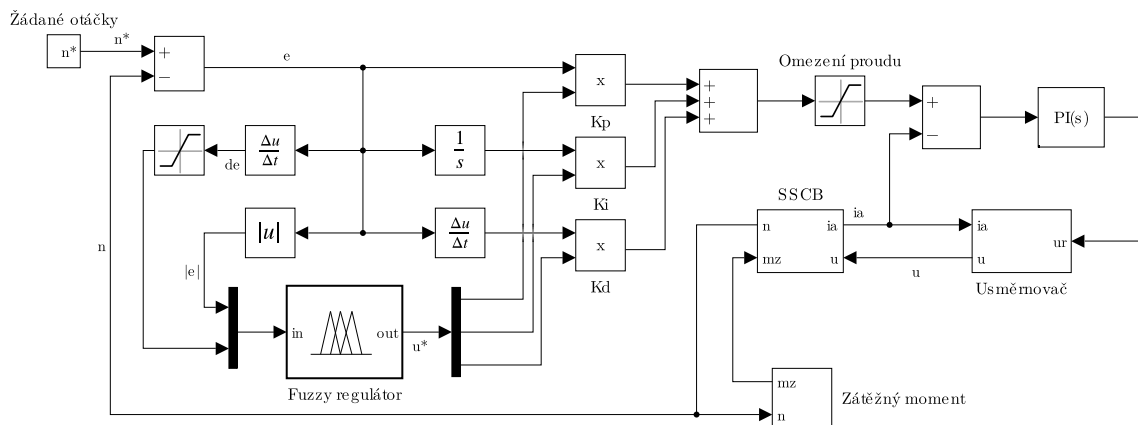


Obrázek 46: Průběh u_{dAV} (V) pro kombinaci PI a fuzzy regulátoru

4.2 Fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru

Proměnné konstanty jsou vhodné v systémech, kde je častá časová změna anebo v nelineárních systémech. v této regulační smyčce je využit PID regulátor, jehož konstanty jsou nastavovány pomocí fuzzy logiky.

Žádáná velikost otáček se odečítá od skutečné. Tímto určená odchylka vstupuje do PID a fuzzy regulátoru. Vstupy do fuzzy regulátoru jsou absolutní hodnota odchylky $|e|$ a derivace odchylky Δe (na obrázku 47 „de“). Výstupy jsou konstanty pro složky PID regulátoru, do kterého vstupuje také odchylka e . Výstup takto regulovaného PID regulátoru se omezí podle rozsahu proudu. Další regulační smyčka, smyčka pro proud, je totožná jako v kapitole 3. [10], [11]



Obrázek 47: Model motoru řízeného PID regulátorem s Fuzzy proměnnými konstantami

Konstanty jsou upravovány podle následujících úvah:

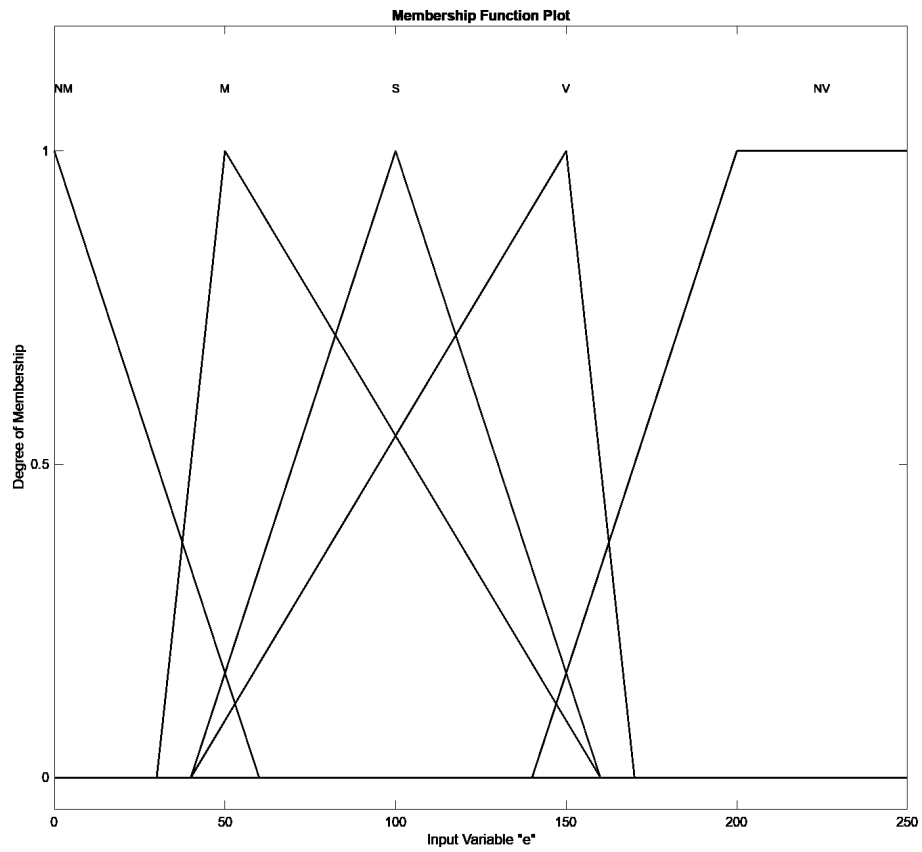
- Pokud je odchylka e vysoká, tak K_P je vyšší a K_D menší. Aby nebylo přestřelení moc veliké, K_I se volí malá až nulová.
- Při střední odchylce e má K_P větší vliv a aby se zabránilo přestřelení žádané hodnoty, nevolí se velká. K_I by měla být větší.
- Když je odchylka e malá, využívá se více K_D , jejíž velikost závisí na změně odchylky Δe . Pokud je Δe malá, volí se K_D velká, když je Δe velká, K_D se nastaví malá.

Fuzzy množin pro e a Δe je 5, a to Nejmenší, Malá, Střední, Větší, Největší, ve zkratkách NM, M, S, v a V. Množiny konstant regulátoru jsou Nejmenší, Ještě Menší, Malá, Střední, Větší, Ještě Větší a Největší, zkráceně NM, JM, M, S, V, JV a NV, celkem tedy 7. Pravidla, dle kterých fuzzy regulátor konstanty upravuje, jsou v tabulce 6. [11]

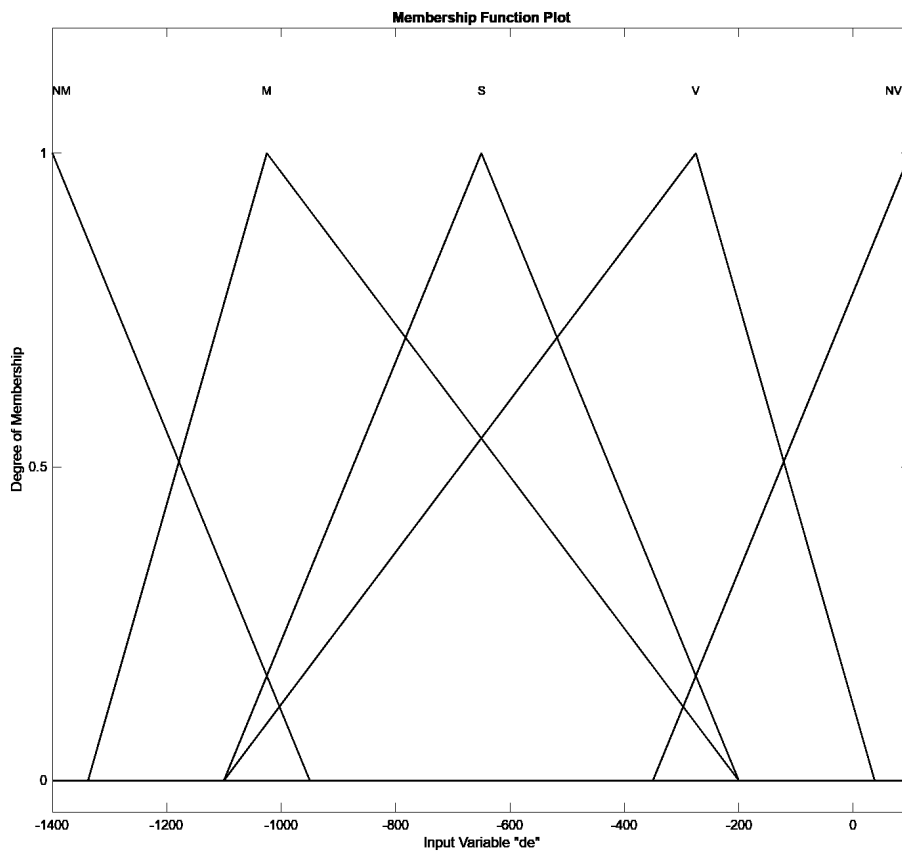
Tabulka 6: Pravidla pro fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru

		K_P					K_I						K_D					
$e \backslash \Delta e$		NM	M	S	V	NV	$e \backslash \Delta e$	NM	M	S	V	NV	$e \backslash \Delta e$	NM	M	S	V	NV
NM	NM	NV	NV	NV	NV	NV	NM	S	S	S	S	S	NM	NM	M	S	JV	NV
M	M	V	V	V	JV	NV	M	M	M	M	M	M	M	M	V	JV	NV	NV
S	S	NM	NM	JM	M	M	S	JM	JM	NM	JM	JM	S	S	JV	JV	NV	NV
V	V	V	V	V	JV	NV	V	M	M	M	M	M	V	V	NV	NV	NV	NV
NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV	S	S	S	S	S	NV	NV	NV	NV	NV	NV

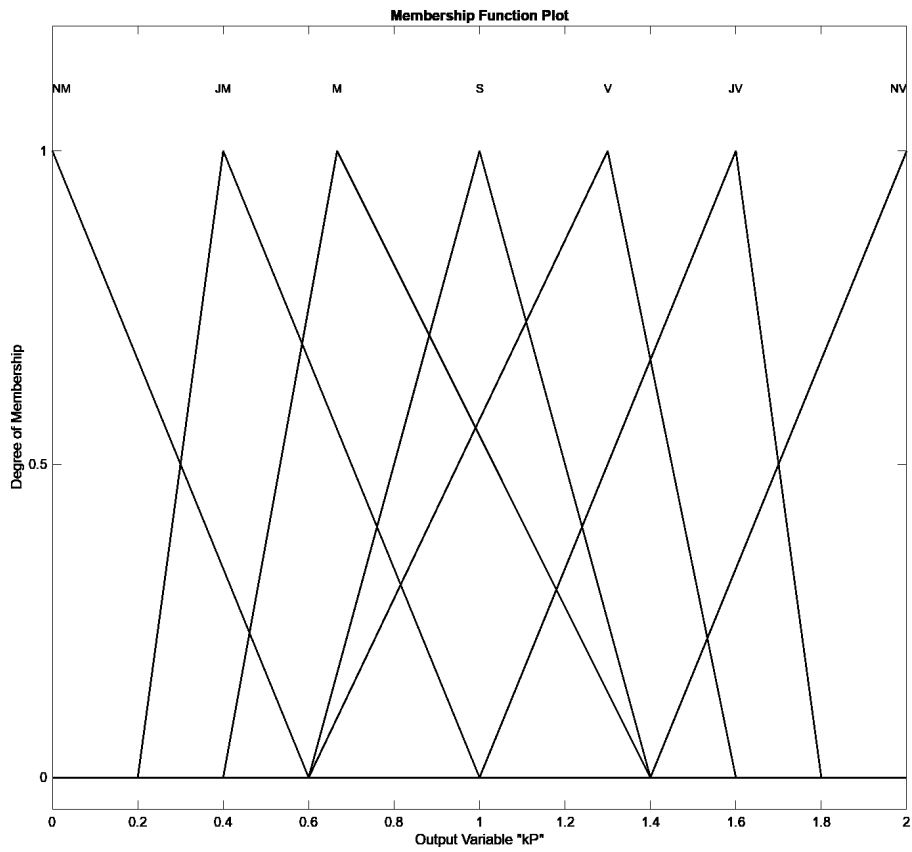
Na obrázku 48 je rozsah omezen, ve skutečnosti je rozsah vstupní veličiny od 0 do 1400, ale mimo rozsah je jen funkce NV, která je typu S dle obrázku 1. Příslušnostní funkce pro výstupní veličinu, zde konstanty regulátoru, jsou stejné a příklad pro K_P je na obrázku 50.



Obrázek 48: Příslušnostní funkce výstupní veličiny fuzzy regulátoru



Obrázek 49: Příslušnostní funkce regulační odchylky

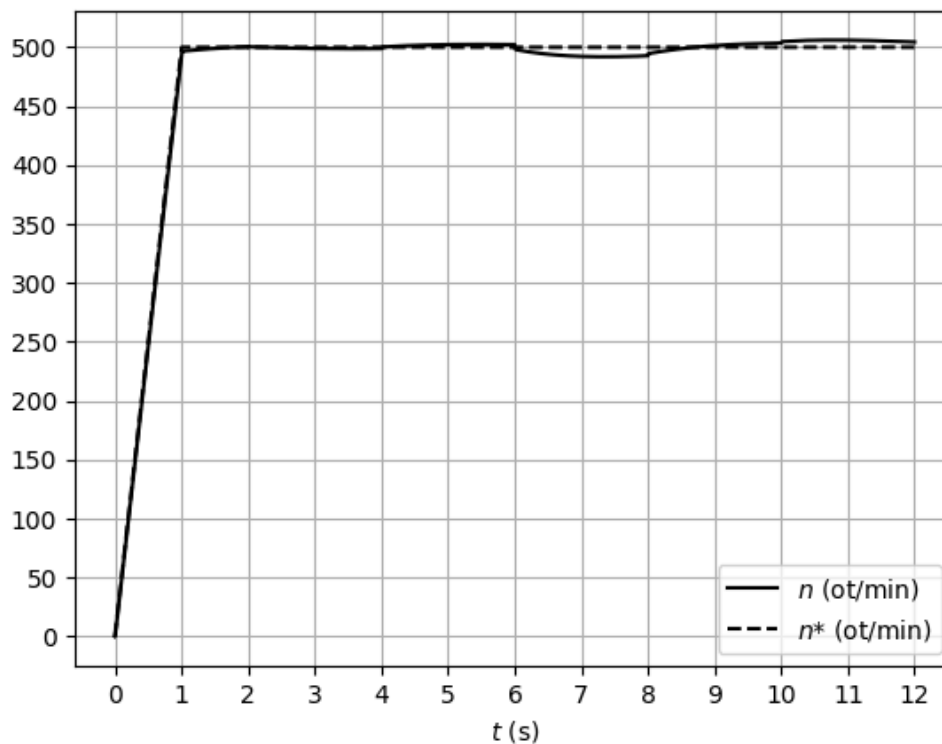


Obrázek 50: Příslušnostní funkce výstupních veličin

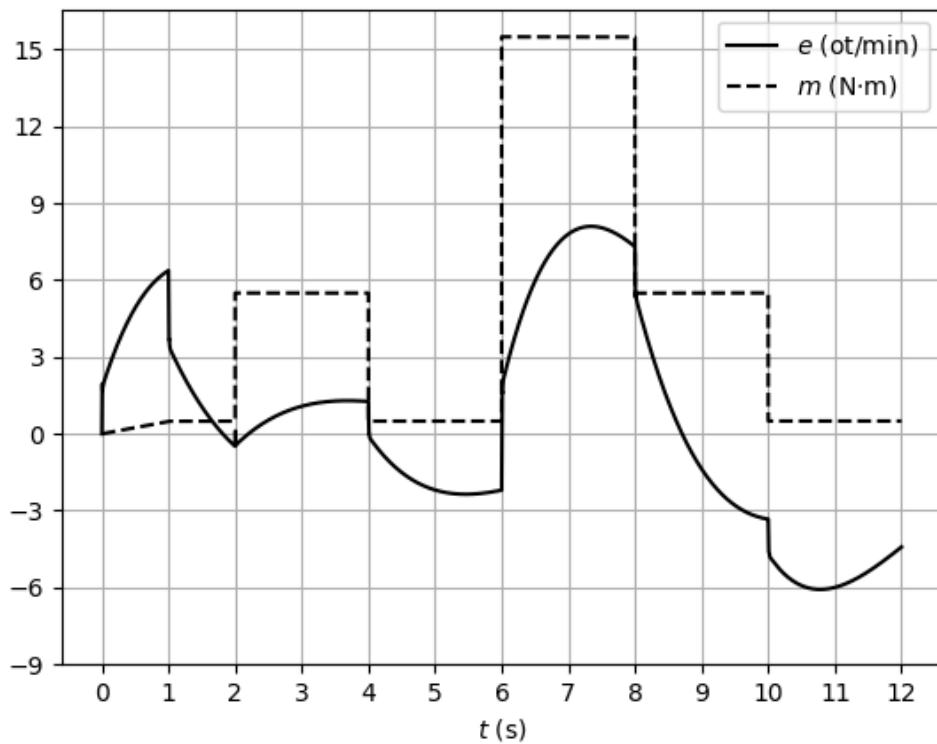
Simulace provozu s fuzzy regulátorem upravující konstanty PID regulátoru

- **Proměnná zátěž**

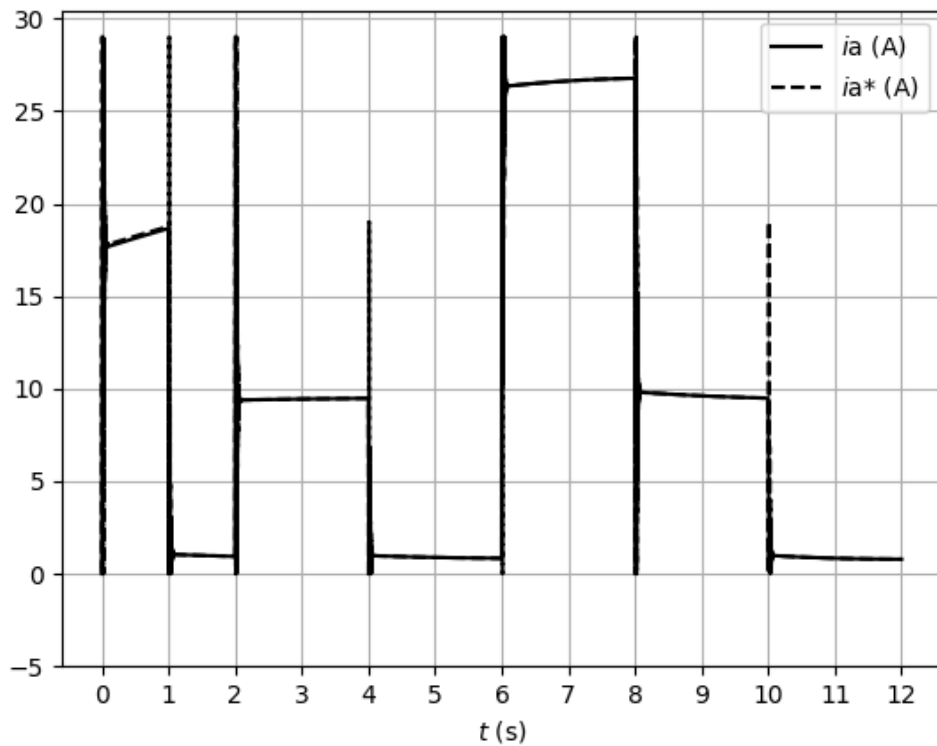
Simulace rozběhu naprázdno na 500 ot/min následovaného proměnným zatěžováním. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 51 až 54.



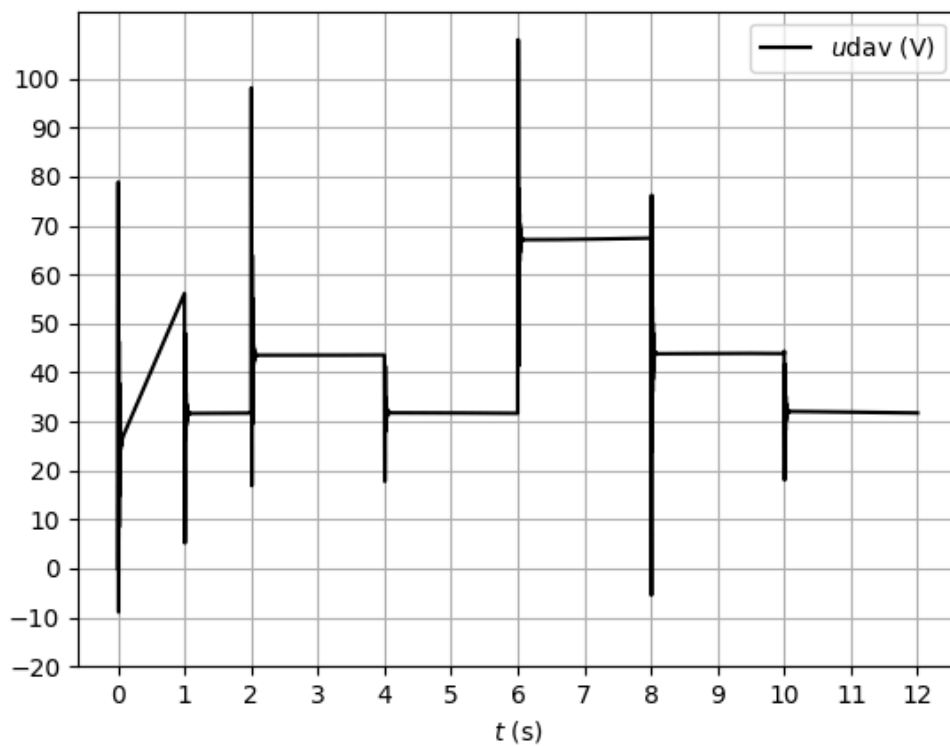
Obrázek 51: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty



Obrázek 52: Průběh odchyly otáček (ot/min) a m_z ($N \cdot m$) pro fuzzy proměnné konstanty



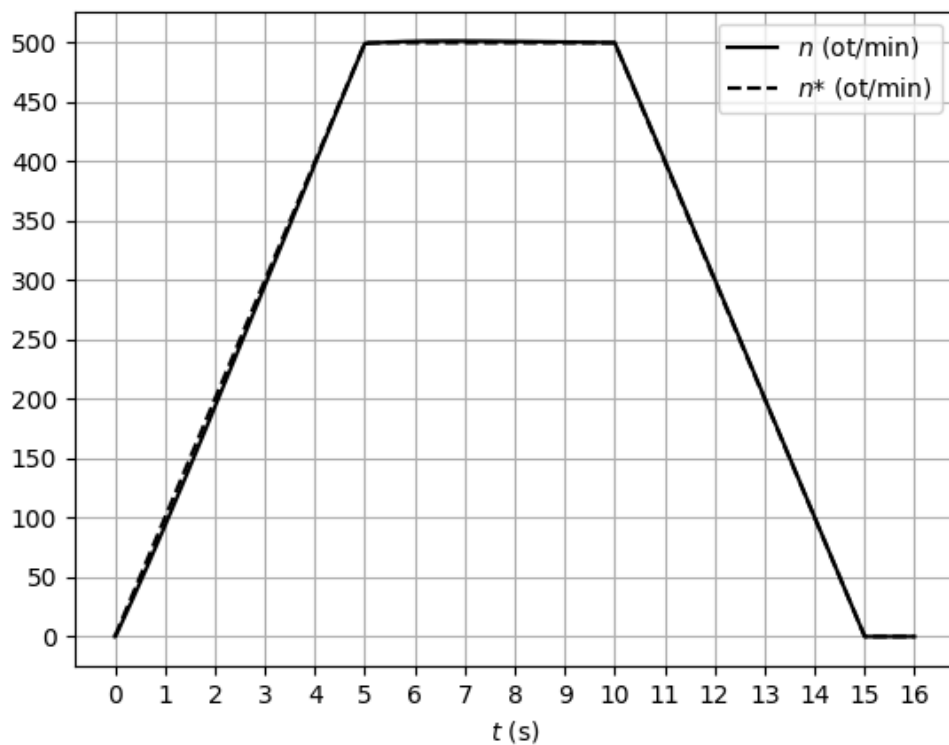
Obrázek 53: Průběh i_a (A) pro fuzzy proměnné konstanty



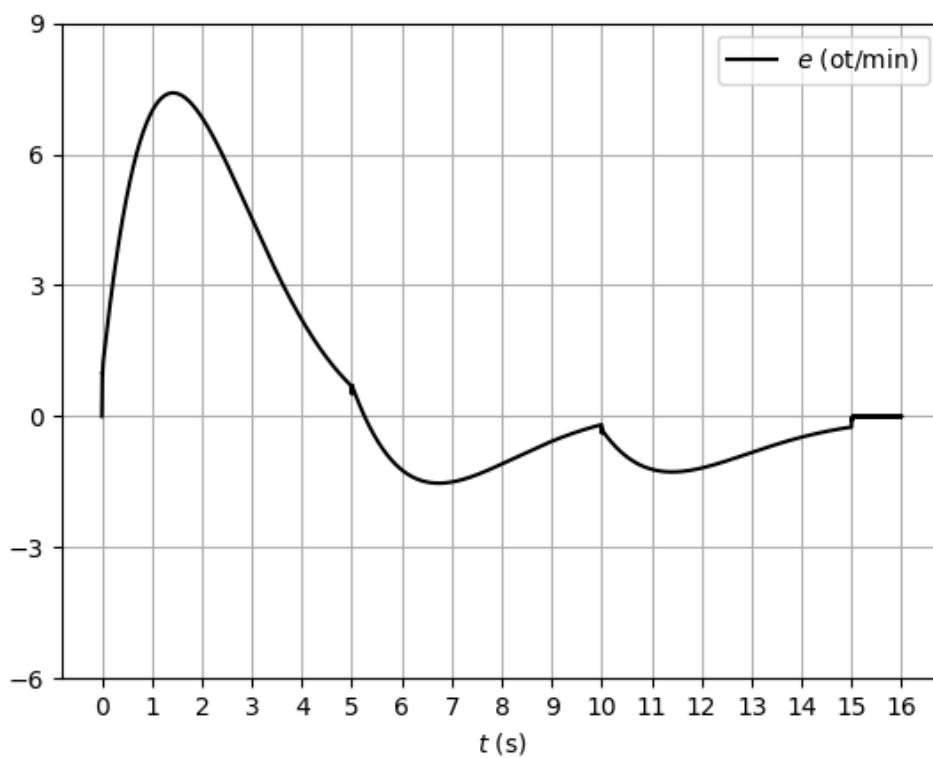
Obrázek 54: Průběh u_{dAV} (V) pro fuzzy proměnné konstanty

- **Konstantní zátěž**

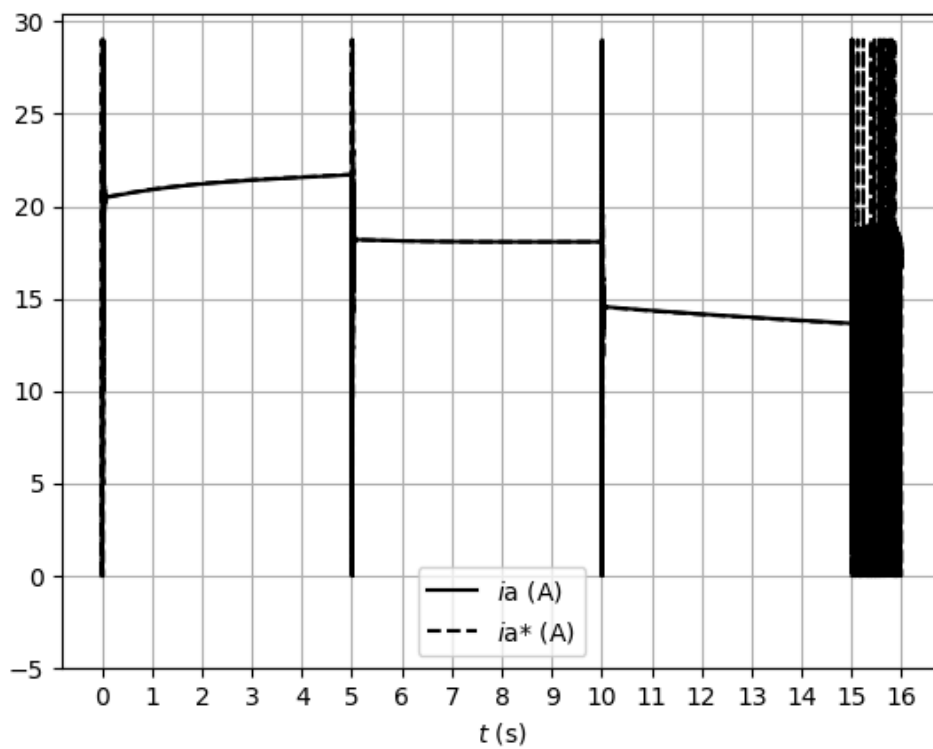
Pohon se rozeběhá na 500 ot/min a zastavuje při konstantní zátěži 10 N · m. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 55 až 58.



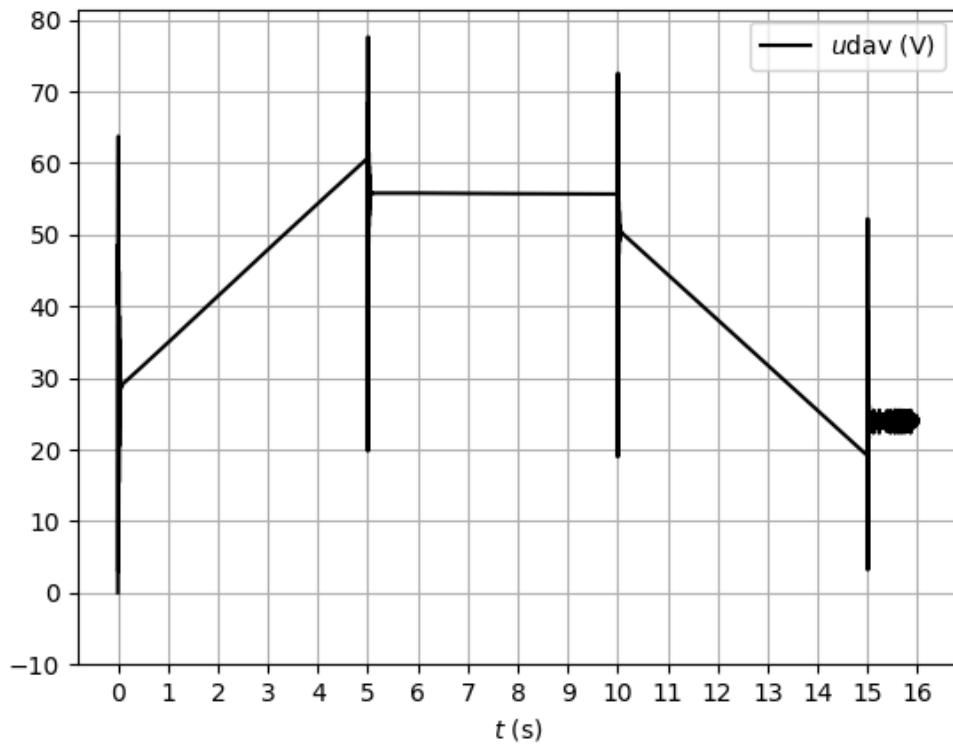
Obrázek 55: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty



Obrázek 56: Průběh n (ot/min) pro fuzzy proměnné konstanty



Obrázek 57: Průběh i_a (A) pro fuzzy proměnné konstanty



Obrázek 58: Průběh u_{dAV} (V) pro fuzzy proměnné konstanty

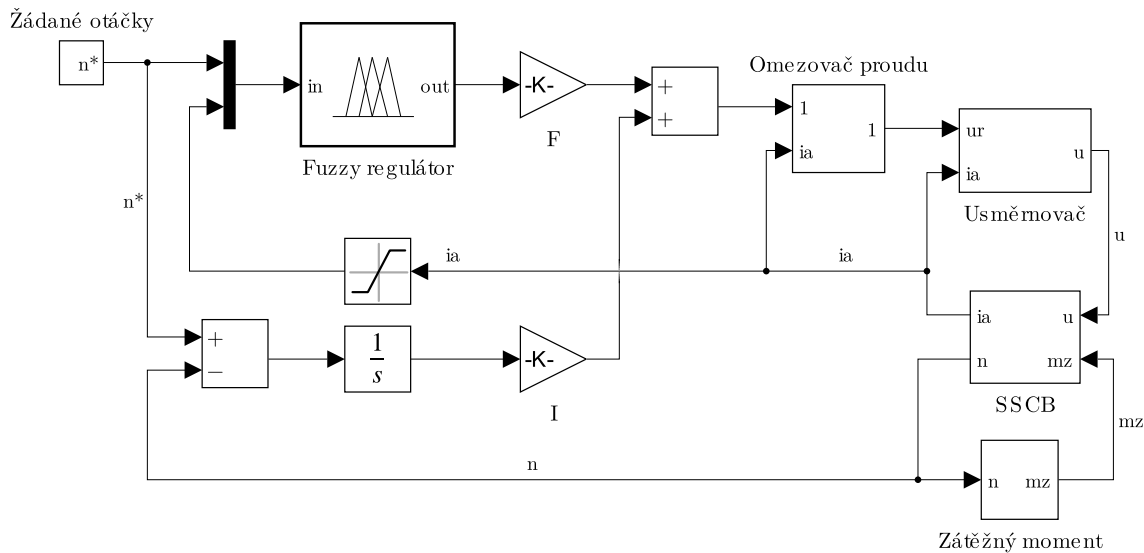
4.3 Samotný fuzzy regulátor

Pro tento způsob je využit Sugenuv systém defuzzifikace a pravidla pro fuzzy logiku byla získána pomocí shlukové analýzy. Data byla získána pomocí simulace skoků vstupní veličiny (řídící napětí u_r). Pro vytvoření pravidel se sledovalo chování u_r , i_a a n . Skoky řídicího napětí pro vytvoření databáze byly naprogramovány v jazyce Python tak, aby obsahovaly všechny skoky z předem daných úrovní a poté nahrány do simulinkového bloku pro generaci signálů. [5]

Byly provedeny dvě simulace popisující reakci samotného motoru s usměřovačem na skoky napětí. Simulace probíhala pro konstatní zátěžný moment v první simulaci byly skoky po pětinach a ve druhé po dvacetinách od 0 do jmenovitého napětí, resp. řídicího úhlu, při kterém je na výstupu usměřovače jmenovité napětí motoru. Takto získané hodnoty u_r , i_a a n byly upraveny do přílušného formátu, aby byly čitelné pro MATLAB aplikaci Fuzzy Logic Controller (FLC). v FLC byla data zpracována funkcí „FIS from Data“, která umožňuje zpracovat data pomocí shlukové analýzy a vytvořit z nich potřebné fuzzy množiny a pravidla. Pro shlukovou analýzu byly využity výchozí parametry, a to:

- *Cluster influence range*: 0,5,
- *Data scale*: auto,
- *Squash factor*: 1,25,
- *Accept ratio*: 0,5,
- *Reject ratio*: 0,15 a
- *Custom cluster centers*: [-].

Regulace zde probíhá trochu odlišně. Žádané otáčky vstupují se skutečným proudem do fuzzy regulátoru, který nastavuje požadované řídicí napětí. Protože je fuzzy regulátor proporčního charakteru, pro dosažení konkrétní hodnoty je nutné přidat integrační složku. v modelu na obrázku 59 jsou I a F označeny ladicí konstanty. v první simulaci jsou konstanty $I = 5 \cdot 10^{-4}$ a $F = 0,75$, ve druhé $I = 3 \cdot 10^{-3}$ a $F = 0,6$. Součet těchto složek vstupuje do jednoduchého omezovače proudu a dále do usměřovače napájecího stejnosměrný motor. [5]

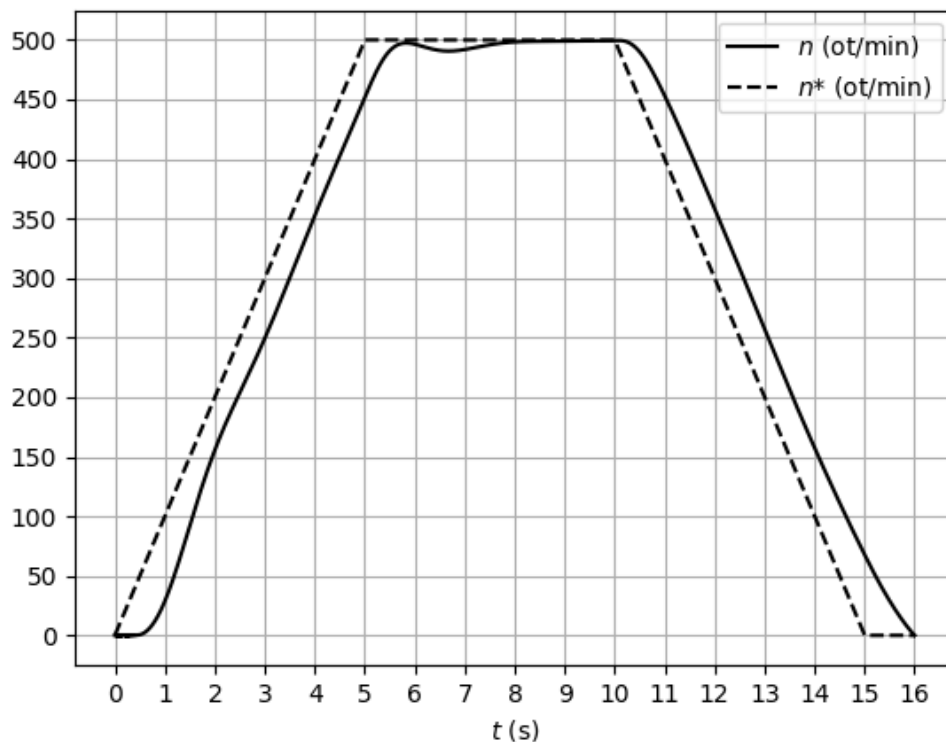


Obrázek 59: Model motoru řízeného Fuzzy regulátorem s integrační složkou

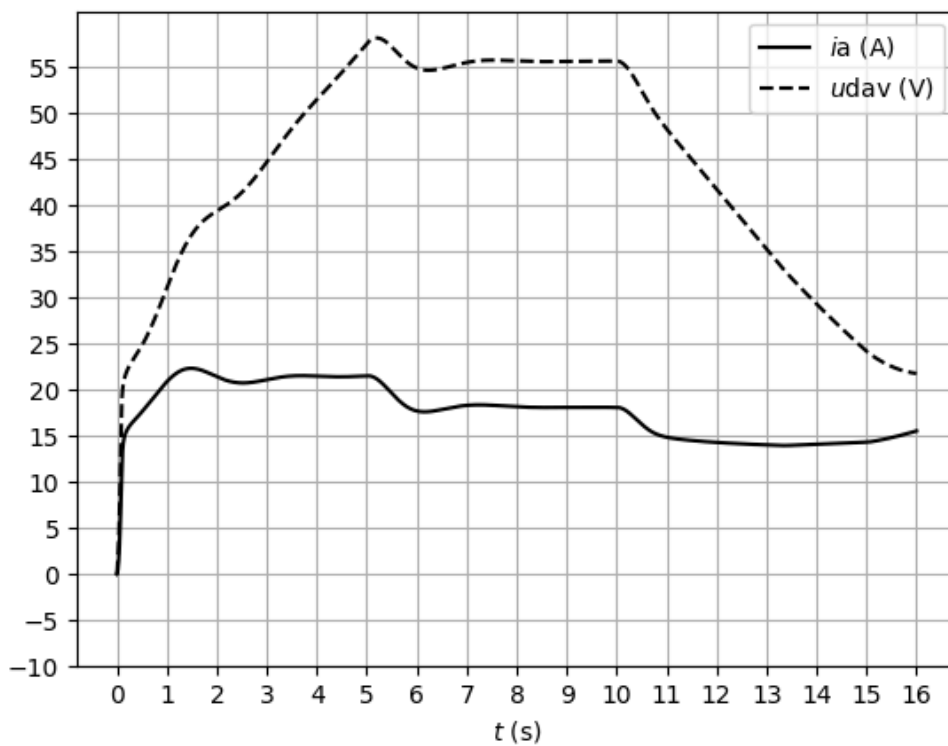
Simulace provozu regulátoru nastaveném shlukovou analýzou

Jelikož vstupní data byla, ze kterých byl regulátor sestaven, byla sbírána při konstantním momentu, simulace provozu jsou také při konstantním momentu $10 \text{ N} \cdot \text{m}$. Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 60 až 62.

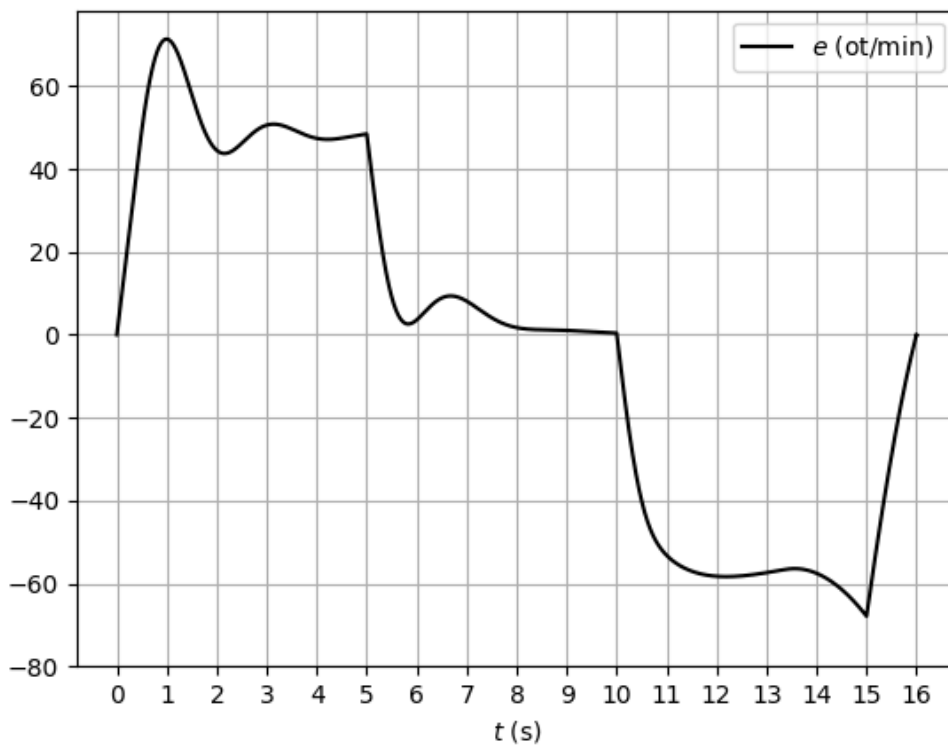
- Simulace s daty po pětinových skocích u_{dAV}



Obrázek 60: Průběh n (ot/min) pro samotný fuzzy regulátor

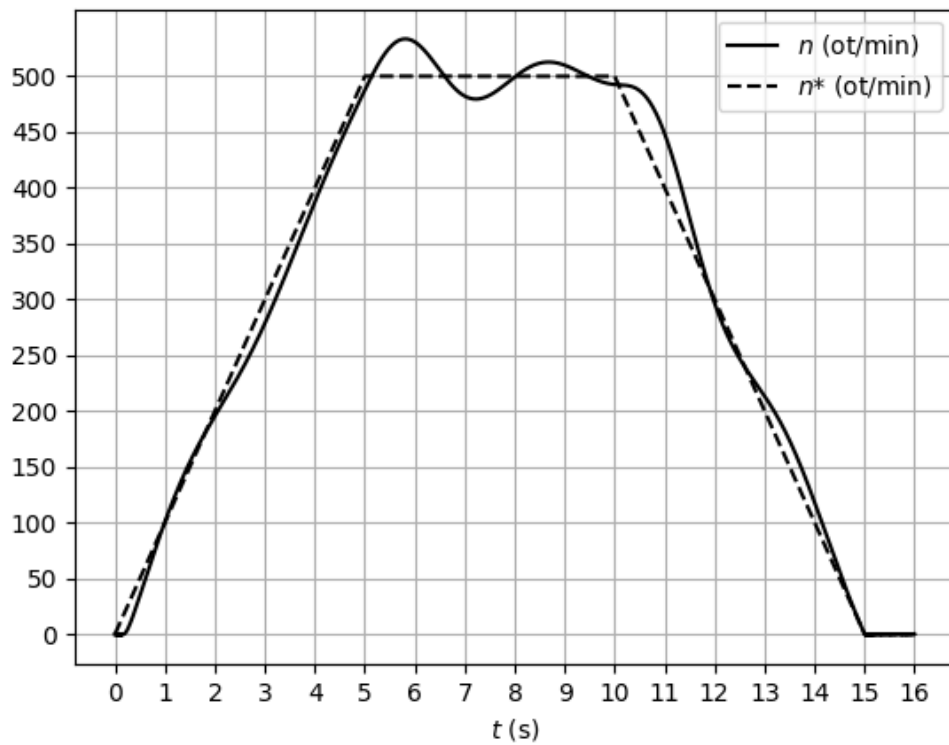


Obrázek 61: Průběh i_a (A) a u_{dAV} (V) pro samotný fuzzy regulátor

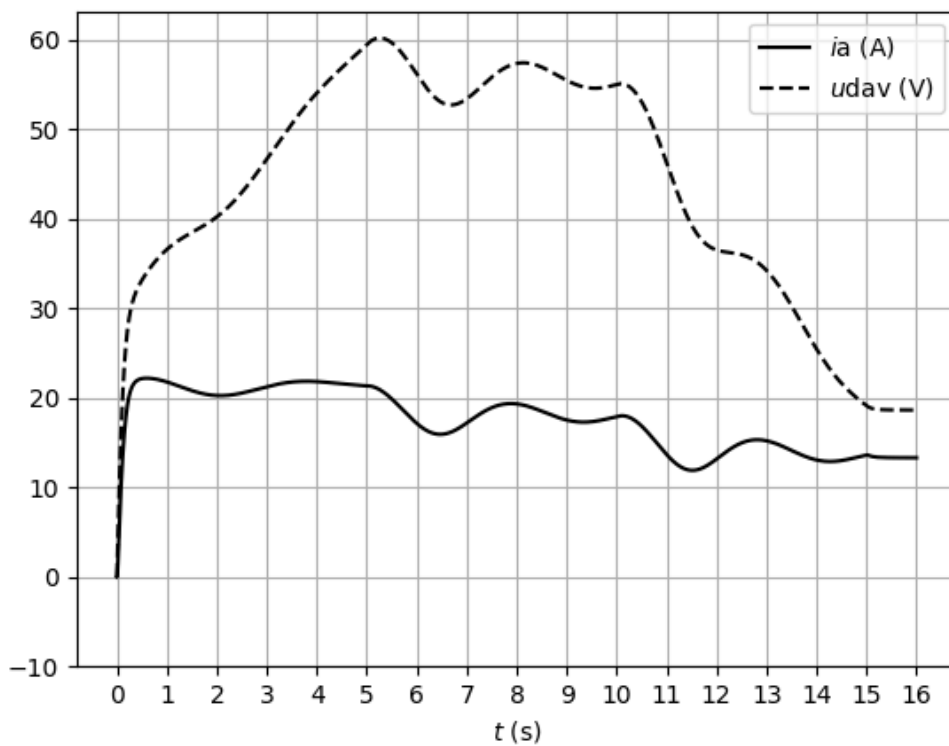


Obrázek 62: Průběh odchylky otáček (ot/min) pro samotný fuzzy regulátor

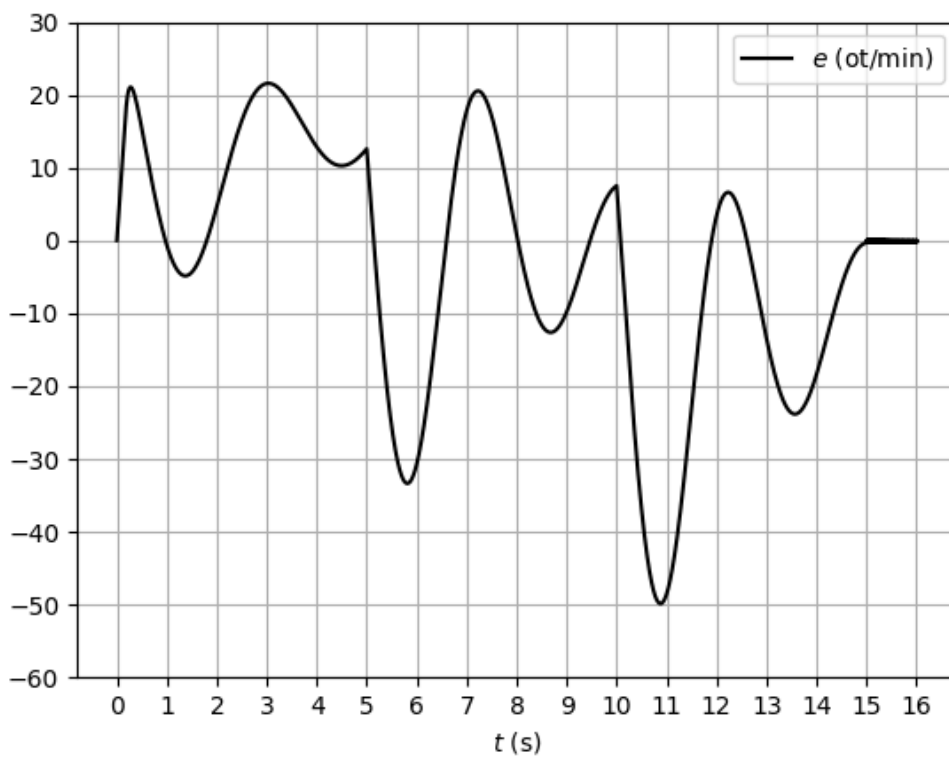
- Simulace s daty po dvacetinových skocích u_{dAV}
Průběhy jednotlivých veličin jsou na obrázcích 63 až 65.



Obrázek 63: Průběh n (ot/min) pro regulátor s více daty



Obrázek 64: Průběh i_a (A) a u_{dAV} (V) pro regulátor s více daty



Obrázek 65: Průběh odchylky otáček e (ot/min) pro regulátor s více daty

5 Porovnání způsobů regulací

5.1 PID regulace

PID regulátor pracuje se třemi složkami, a to proporční, integrační a derivační. Vhodnou velikostí konstant u jednotlivých složek lze dosáhnout vhodné reakce na změny vstupní odchylky od žádaných hodnot.

Regulace motoru pomocí PID regulátorů se skládá ze dvou regulačních smyček, jedna pro otáčky a druhá pro proud. Každý regulátor se musí ladit zvlášť. K ladění lze využít MATLAB aplikaci „PID Tuner“. Regulátor může být zhotoven jak z analogových součástek, tak i pomocí digitálních prostředků. Ze simulací je patrné, že odchylka otáček výrazně nepřesahovala 20 ot/min, což jsou z požadovaných 500 ot/min 4 %.

5.2 Regulace pomocí fuzzy logiky

Fuzzy regulace nabízí více způsobů skládání regulačních smyček. Není potřeba důkladná znalost systému. Regulovaný systém lze popsat fuzzy množinami a pomocí fuzzy logiky určovat reakci výstupů na vstupy. Existuje zde více možností, jak popsat systém fuzzy množinami. Mamdamiho způsob je více intuitivní, ale zato výpočetně náročnější. Sugenoovo přístupu lze vhodně kombinovat se shlukovou analýzou a proto je vhodný pro složitější systém, kde je k dispozici velké množství dat. Tento postup je sice méně intuitivní, ale výpočetně jednodušší. Fuzzy regulátor se realizuje počítačovým programem.

- **Fuzzy PI regulátor**

Fuzzy PI regulátor je jednoduchý na zhotovení. I přes dostatečné napodobení chování PI regulátoru, stále je vhodné smyčku doplnit integrační složkou. Tento způsob využívá Mamdamiho defuzzifikaci. Protože výstup je značně ovlivněn derivací odchylky, je nutné důkladně vyfiltrovat signál vstupující do derivačního členu.

- **Dva fuzzy regulátory**

Regulace se dvěma fuzzy regulátory, jeden pro otáčky a druhý pro proud, je podobná regulaci pomocí klasických PID regulátorů. Tento způsob řeší udržení všech veličin v požadovaných úrovních. Při použití této regulace pro proměnný moment bylo největších odchylek dosaženo při proměnné zátěži, a to kolem 4 %, tedy podobně jako u PID regulace. Při konstantní zátěži největší odchylka byla 8,5 ot/min, a to je z požadovaných 500 ot/min 1,7 %.

- **PI regulátor s fuzzy regulátorem**

Výstup PI regulátoru je upraven pomocí fuzzy logiky, aby lépe reagoval na stavy systému. Regulace tedy závisí také na vlastním nastavení PI regulátoru. Při proměnném zatížení byla největší odchylka otáček 30 ot/min (6 %), ale zato při konstantní zátěži po rozjezdu na požadovaných 500 ot/min byla jejich největší odchylka 9 ot/min (1,8 %).

- **Fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru**

Fuzzy regulátor zpracovává absolutní hodnotu odchylku a změnu odchylky a vyhodnocuje konstanty pro PID regulátor. Regulační smyčka je jinak shodná s PID regulací. Pro každou z konstant zde musí být vlastní sada pravidel. Kvůli tomu je třeba provádět tři fuzzifikace a defuzzifikace. Proto je tento způsob regulace výpočetně náročnější. Při provozu bylo dosaženo největších odchylek kolem 8 ot/min (1,6%).

- **Samotný fuzzy regulátor**

Zde byla využita Sugenoova defuzzifikace a zhotovení pravidel a fuzzy množin pro regulátor pomocí shlukové analýzy. Simulace byla vytvořena pro dvoje velikosti dat, menší (napětové skoky po pětině) a větší (napětové skoky po dvacetině) při konstantním zátěžném momentu $10 \text{ N} \cdot \text{m}$. Rozdíl oproti ostatním regulacím je, že je přímo hledána velikost proudu pro žádané otáčky a ne pro velikost odchylky a její změně. Vzhledem k malému vzorku dat, bylo třeba velikosti složek (F a I) doladit. Pro provoz s méně daty byla největší odchylka otáček 70 ot/min (14%) a při podrobnější analýze odezvy pohonu byla 50 ot/min (10%).

Tabulka 7: Porovnání maximálních odchylek otáček jednotlivých typů regulací

Způsob regulace	Největší odchylka z požadovaných otáček (%)
PID regulace	4
2 fuzzy regulátory	4
Fuzzy + PI regulátor	6
Fuzzy proměnné konstanty PID regulátoru	1,6
Fuzzy regulátor s daty po $1/5 u_{dAV}$	14
Fuzzy regulátor s daty po $1/20 u_{dAV}$	10

6 Závěr

Tato práce se zabývá porovnáním PID regulace a regulace pomocí fuzzy logiky. V kapitole 1 jsou objasněny základy fuzzy logiky. Stejnoseměrným pohonem se zabývá kapitola 2, kde je popsán stejnoseměrný motor s cizím buzením (kapitola 2.2) a jeho napájení usměřňovačem (kapitola 2.4). Proces řízení je vysvětlen v kapitole 2.1. Model řízený PID regulací je popsán v kapitole 3. Modely motorů řízené fuzzy logikou jsou blíže popsány v kapitole 4.

Fuzzy logika je využita pro sestavení několika typů regulátorů. Každý regulátor ke své činnosti potřebuje sadu pravidel. Tuto sadu lze vytvořit buď samotným uživatelem, který intuitivně zná regulovaný systém, nebo pomocí shlukové analýzy. V obou způsobech je ale potřeba základní znalost regulovaného systému. Při sestavování fuzzy regulátoru uživatelem jsou jako vstupní veličiny použity odchylka a její změna. Při sestavování fuzzy regulátoru pomocí shlukové analýzy jsou pro pohon jako vstupní veličiny použity požadované otáčky a okamžitá hodnota kotevního proudu.

I přes veškerou jednoduchost fuzzy logiky oproti PID regulaci, správně nastavený PID regulátor může dosahovat lepších výsledků. Nicméně regulace pomocí fuzzy proměnných konstant PID regulátoru dosáhla lepších výsledků a ze všech testovaných regulací je nejpřesnější s maximální odchylkou 1,6 % (tabulka 7).

Shluková analýza je dobrým nástrojem pro sestavení fuzzy regulátoru. V tabulce 7 je patrné, že větší vzorek dosahoval lepších výsledků.

Fuzzy logika je proto vhodným doplňkem i alternativou k tradiční PID regulaci.

Bibliografie

- [1] M. Navara, P. Olšák, a České vysoké učení technické v Praze., *Základy fuzzy množin*, Vyd.2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2007.
- [2] L. Zadeh, „Fuzzy sets“, *Information and Control*, roč. 8, č. 3, s. 338–353, 1965, doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).
- [3] Ř. Martin, „Bayesovské sítě“. [Online]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/b202/_media/courses/a5m33izs/fuzzy.pdf
- [4] J. Kléma, „Shluková analýza – formalizace, základní algoritmy“. [Online]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a4m33sad/shlukovani.pdf
- [5] D. Perdukova, P. Fedor, a M. Lacko, „DC MOTOR FUZZY MODEL BASED OPTIMAL CONTROLLER“, *MM Science Journal*, 2011.
- [6] P. Kobrle a J. Pavelka, *Elektrické pohony a jejich řízení*, 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016.
- [7] J. Lettl, J. Pavelka, a J. Bauer, *Výkonová elektronika*, 4. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2019.
- [8] H. A. Yousef, „Fuzzy Logic Control of DC Motor Drives“, *IFAC Proceedings Volumes*, roč. 30, č. 6, s. 751–756, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)43455-0](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)43455-0).
- [9] V. Dutta, „PI-Fuzzy rule based controller for Analysis and performance evaluation of dc motor speed control“, 2014, s. . doi: 10.13140/2.1.3635.7922.
- [10] A. Shi, M. Yan, J. Li, W. Xu, a Y. Shi, „The research of fuzzy PID control application in DC motor of automatic doors“, in *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011, s. 1354–1358. doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057256.
- [11] N. Messaadi a A. Amroun, „Speed Control of DC Motor Using Fuzzy PID Controller“, 2021.