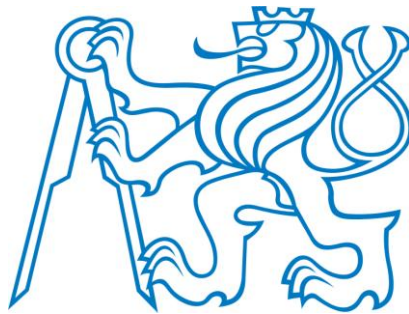


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Modelování vlastností elektromotoru pro
elektromobil a jeho řízení fuzzy regulátorem**

Modelling of properties of electro-engine for electromobile and
its control by fuzzy controller

Vysoká škola: ČVUT v Praze

Pracoviště: Ústav přístrojové a řídicí techniky

Fakulta: strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro:

Bc. Petra KRAMÁŘE

obor: Přístrojová a řídicí technika

Název tématu:

Modelování vlastností elektromotoru pro elektromobil a jeho řízení fuzzy regulátorem

Název anglicky:

Modelling of properties of electro-engine for electromobile and its control by fuzzy controller

Zásady pro zpracování

1. Prostudujte současný stav v modelování a řízení elektromobilů a jejich pohonů.
2. Sestavte analytický model vybraného elektromotoru.
3. Sestavte simulační model elektromotoru a prověřte jeho základní vlastnosti.
4. Navrhněte fuzzy regulátor pro řízení elektromotoru.
5. Odsimulujte vlastnosti řízení elektromotoru fuzzy regulátorem a porovnejte s řízením klasickým PI regulátorem.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího DP

Rozsah práce: min. 50 stran + přílohy

Seznam odborné literatury:

1. Ramesh, M.V., Amarnath, S., Kamakshaiah, S. and Rao, G.S., Speed control of brushless DC motor by using Fuzzy logic PI Controller, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 6., No.9., 2011, pp. 55-62.
2. Plomer, Jan: Hybridní pohon městského vozidla s inovativní akumulací energie. Disertační práce, Fakulta dopravní, ČVUT v Praze, 2014.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiří Bíla, DrSc.

Datum zadání diplomové práce: 12. 4. 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 15. 6. 2016

J. Chyský

doc. Ing. Jan Chyský, CSc.
vedoucí ústavu



M. Valášek

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan fakulty

V Praze dne: 5. 4. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Prof. Ing. Jiřího Bíly, DrSc., s použitím literatury, uvedené na konci této práce v seznamu použité literatury, s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Jiřímu Bilovi, DrSc. za poskytování cenných odborných rad a připomínek, přátelský přístup a vstřícnost při vedení této diplomové práce.

Mé poděkování patří také doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za cenné odborné rady, poskytnutí simulačního modelu, parametrů a naměřených dat k elektromotoru použitému v této práci a za umožnění pořízení fotografií elektromotoru.

Velice děkuji mé rodině, mé přítelkyni Mgr. Zdeňce Semiánové a její rodině za obrovskou podporu a pochopení při studiu a vypracování této diplomové práce.

Abstrakt

V této diplomové práci je řešena úloha řízení elektromotoru pro elektromobil pomocí fuzzy regulátoru. V první, teoretické části, je proveden rozbor současných trendů v pohonech hybridních vozidel (HEV) a elektrických vozidel (EV) a dále možnosti řízení synchronních motorů s permanentními magnety (PMSM). Následující části se věnují sestavení simulačního modelu regulované soustavy v softwaru MATLAB/Simulink. Regulovanou soustavu tvoří model PMSM a model jízdních odporů vozidla. Pro řízení této soustavy je navržen fuzzy PI regulátor a provedeny simulace. Výsledky simulací jsou porovnány s řízením totožné regulované soustavy klasickým PI regulátorem.

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to solve a problem of electric motor control for electric vehicle using a fuzzy logic controller. Firstly, in the theoretical part there are analysed current trends in hybrid electric vehicles (HEV) and electric vehicles (EV) and also control strategies of permanent magnet synchronous motor (PMSM). The following parts deal with compilation simulation model of a controlled system in MATLAB/Simulink. The controlled system consists of PMSM model and road resistances of vehicle model. The fuzzy PI controller is designed to control this system and simulations are performed. The simulation results are then compared with conventional PI controller on the same model.

Klíčová slova

Synchronní motor s permanentními magnety, fuzzy regulátor, elektromobil

Keywords

Permanent magnet synchronous motor, fuzzy logic controller, electric vehicle

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

abc	souřadný systém s osami a, b, c
back-EMF voltage	zpětné elektromotorické napětí
BLDC	stejnoseměrný elektromotor bez mechanického komutátoru
dq	souřadný systém s osami d, q
EV	elektrické vozidlo – elektromobil
FIS	fuzzy logic inference system
HEV	vozidlo/automobil s hybridním pohonem
IPM	interně/vnitřně umístěné permanentní magnety
IPM PMSM	synchronní motor s vnitřně umístěnými permanentními magnety
NM	negativní malá
NV	negativní velká
P	proporcionální
PD	proporcionálně derivační
PI	proporcionálně integrační
PID	proporcionálně integrační a derivační
PM	pozitivní malá
PV	pozitivní velká
PMSM	synchronní motor s permanentními magnety
R	radiální konstrukce pneumatiky
SPM PMSM	synchronní motor s povrchově umístěnými permanentními magnety
ZZ	nula
$\alpha\beta$	souřadný systém s osami α , β

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	zrychlení vozidla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
B	koeficient třecích ztrát [$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$]
b_p	šířka pneumatiky [mm]
B_{rk}	rozchod kol [m]
c_x	součinitel odporu vzduchu [-]
$\frac{de(t)}{dt}$	derivace v čase regulační odchylky [$\text{km}\cdot\text{hod}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]
d_k	průměr kola [m]
d_r	průměr ráfku [in]
$\frac{du(t)}{dt}$	derivace v čase akčního zásahu fuzzy regulátoru [$\text{A}\cdot\text{s}^{-1}$]
$e(t)$	regulační odchylka rychlosti vozidla [$\text{km}\cdot\text{hod}^{-1}$]
f	součinitel odporu valení [-]
F_H	hnací síla [N]
F_o	odporová síla jízdních odporů vozidla [N]
g	tíhové zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
G	tíhová síla vozidla [N]
h_p	profil pneumatiky [%]
I	integrační složka regulátoru [-]
i_c	celkový převodový poměr [-]
I_{am}, I_{bm}, I_{cm}	simulační data proudů I_a, I_b, I_c
$I_a, I_b, I_c, i_a, i_b, i_c$	hodnoty proudů ve fázích a, b, c [A]
I_d, I_q, i_d, i_q	hodnoty proudů v osách d, q [A]
I_n	jmenovitý proud [A]
i_r	převodový poměr rozvodovky [-]
I_q^*	žádaná hodnota proudu v ose q [A]
I_α, I_β	hodnoty proudů v ose α, β [A]
J, J_m	moment setrvačnosti elektromotoru [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
J_p	moment setrvačnosti převodovky [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
J_k	moment setrvačnosti kola [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
K_e	napěťová konstanta [$\text{V}/1000 \text{ min}^{-1}$]
K_m	momentová konstanta [$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$]
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	vlastní indukčnost vinutí a, b, c [H]

L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}	vzájemná indukčnost vinutí a, b, c [H]
L_d, L_q	indukčnost v ose d, q [H]
L_s	indukčnost statorového vinutí [H]
L_d, L_q	indukčnosti v osách d, q [H]
m	hmotnost vozidla [kg]
M_e	elektrický moment elektromotoru [N·m]
M_{mech}	mechanický moment elektromotoru [N·m]
M_n	jmenovitý moment [N·m]
M_r	moment rotačních setrvačných hmot [N·m]
M_z	zatěžovací moment [N·m]
n_n	jmenovité otáčky [min ⁻¹]
O_c	celkový jízdní odpor vozidla [N]
O_f	odpor valení [N]
O_p	odpor přípojného vozidla [N]
O_s	odpor stoupání [N]
O_x	odpor prostředí (vzduchu) [N]
O_z	odpor setrvačných hmot (zrychlení) [N]
O_{zp}	odpor posuvných setrvačných hmot [N]
O_{zr}	odpor rotačních setrvačných hmot [N]
P	proporcionální složka regulátoru [-]
P_σ	počet pravidel [-]
p_p	počet pólpárů [-]
R_a, R_b, R_c	odpor vinutí fází a, b, c [Ω]
r_k	poloměr kola [m]
R_s	odpor statorového vinutí [Ω]
S_x	čelní plocha vozidla [m ²]
$u(t)$	akční zásah regulátoru [A]
$U_a, U_b, U_c, u_a, u_b, u_c$	hodnoty napětí ve fázích a, b, c [V]
U_d, U_q, u_d, u_q	hodnoty napětí v osách d, q [V]
U_α, U_β	hodnoty napětí v ose α, β [A]
v	okamžitá rychlost vozidla [km·hod ⁻¹]
v^*	žádaná rychlost vozidla [km·hod ⁻¹]
v_{max}	maximální rychlost vozidla [km·hod ⁻¹]
v_r	relativní rychlost vozidla [km·hod ⁻¹]

v_z	rychlost protivětru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
$w(t)$	řídící veličina
$y(t)$	regulovaná veličina
α	úhel stoupání [$^\circ$]
η	účinnost převodového ústrojí [-]
θ	úhel natočení rotoru vůči statoru [rad]
θ_e	elektrický úhel natočení elektrického pole rotoru vůči statoru [rad]
ν	součinitel setrvačných hmot [-]
ρ	hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
σ_i	počet funkcí příslušnosti i-té vstupní proměnné [-]
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c	spřažený magnetický tok vinutí a, b, c [Wb]
Ψ_d, Ψ_q	magnetický tok v ose d, q [Wb]
$\Psi_{ma}, \Psi_{mb}, \Psi_{mc}$	magnetický tok působící od permanentního magnetu ve směru osy a, b, c [Wb]
Ψ_{pm}	magnetický tok permanentních magnetů [Wb]
ω_e	elektrická úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
ω_m	mechanická úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

OBSAH

1. ÚVOD	13
2. PRŮZKUM POUŽITÉ LITERATURY	15
2.1. Hybridní a čistě elektrické pohony silničních vozidel	15
2.2. Elektromotory používané v elektromobilech	16
2.3. Řízení elektromotorů s permanentními magnety	17
3. POUŽITÝ ELEKTROMOTOR	19
3.1. Matematický model PMSM elektromotoru.....	20
3.1.1. Transformace souřadnic $abc \rightarrow dq\Theta$ a naopak [2], [8], [10]	22
3.1.2. Obecný model PMSM v dq souřadnicích	26
3.2. Simulační model [2]	27
3.2.1. Výpočet magnetického toku Ψ_{pm}	27
3.2.2. Stanovení koeficientu třecích ztrát B [2].....	28
3.3. Ověření chování modelu elektromotoru simulací	29
4. JÍZDNÍ ODPORY VOZIDLA	31
4.1. Matematické vyjádření jízdních odporů.....	31
4.1.1. Odpor valení O_f	32
4.1.2. Odpor prostředí (vzduchu) O_x	32
4.1.3. Odpor stoupání O_s	33
4.1.4. Odpor setrvačných hmot (zrychlení) O_z	34
4.1.5. Odpor přípojného vozidla O_p	34
4.2. Volba parametrů vozidla	35
4.2.1. Hmotnost modelu vozidla	35
4.2.2. Součinitel odporu vzduchu modelu vozidla.....	36
4.2.3. Čelní plocha modelu vozidla.....	36
4.2.4. Rozměr kol a celkový převodový poměr modelu vozidla	36
4.3. Model jízdních odporů vozidla v Simulinku.....	37
5. FUZZY REGULÁTOR	39

5.1. Princip fuzzy regulátoru	39
5.1.1. Fuzzifikace	39
5.1.2. Inferenční mechanismus a báze pravidel	40
5.1.3. Defuzzifikace	40
5.1.4. Báze dat	41
5.2. Sestavení modelu fuzzy regulátoru	41
5.2.1. Návrh funkcí příslušnosti vstupních a výstupních veličin	42
6. SIMULAČNÍ OBVOD	47
6.1. Sestavení simulačního obvodu	47
6.1.1. Seřízení fuzzy PI regulátoru	51
6.1.2. Seřízení klasického PI regulátoru	51
7. NÁVRH A PROVEDENÍ SIMULACÍ	52
7.1. Simulace 1	52
7.1.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 1	53
7.2. Simulace 2	60
7.2.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 2	60
7.3. Simulace 3	67
7.3.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 3	67
7.4. Simulace 4	73
7.4.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 4	73
7.5. Diskuze k výsledkům simulací	82
8. ZÁVĚR	83
8.1. Zamyšlení nad možnými pokračováními v této práci	84
9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85
10. SEZNAM OBRÁZKŮ	87
11. SEZNAM PŘÍLOH	91

1. ÚVOD

Úvodem by bylo vhodné zmínit, že se v této práci snažím navázat na poznatky získané při předchozí tvorbě své bakalářské práce [1]. V ní jsem si ověřil syntézu řízení otáček elektromotoru, v současné době již zastaralého stejnosměrného elektromotoru s cizím buzením a mechanickým komutátorem, pomocí fuzzy PI regulátoru.

V druhé polovině 20. století došlo k nahrazování pohonů se stejnosměrnými elektromotory pohony s asynchronními motory. K tomuto počínu vedl zejména vývoj polovodičových součástek a výkonové elektroniky vedoucí k frekvenčním měničům. Řízení asynchronních motorů frekvenčními měniči vykazovalo podobné vlastnosti řízení jako stejnosměrné elektromotory. Zásadní výhodou asynchronních motorů oproti stejnosměrným byla jejich spolehlivost a vyšší výkonová hustota (vyšší výkon při stejné velikosti elektromotoru).

Dalším milníkem v oblasti elektrických pohonů je rozvoj pohonů se synchronními elektromotory s permanentními magnety (PMSM). Zejména díky materiálů ze vzácných zemin, použitých k výrobě permanentních magnetů, s vynikajícími magnetickými vlastnostmi. Rotory PMSM tak bývají malého průměru, což vede k nízkým hodnotám momentu setrvačnosti a malé mechanické časové konstantě elektromotoru. Kupříkladu lze vyrobit rotor s velkým poměrem délky k průměru.

Ve srovnání s asynchronními motory, mají synchronní motory s permanentními magnety větší výkonovou hustotu. Především díky této vlastnosti jsou využívány v oblastech, kde jsou požadovány co nejmenší rozměry a hmotnosti pohonu spolu s vysokým výkonem – zvláště v automobilovém průmyslu a v dalších mobilních zařízeních. A právě využitím PMSM v oblasti automobilového průmyslu se zabývá tato diplomová práce.

V automobilovém průmyslu nachází PMSM uplatnění jakožto doplňková pohonná jednotka vedle spalovacího motoru v hybridních automobilech (HEV), ale také zastává funkci primárního zdroje hnací síly v čistě elektricky poháněných automobilech – elektromobilech (EV). V první části této práce s použitím uvedené literatury (kapitola 9) budou prozkoumány typy PMSM s jejich základními charakteristickými vlastnostmi, metody řízení PMSM a možnosti uplatnění v HEV a EV.

Další část se zabývá matematickým modelem PMSM. K sestavenému matematickému modelu PMSM jsou přiřazeny parametry konkrétního elektromotoru,

který se nachází v laboratořích Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Následně je matematický model PMSM využit k sestavení simulačního modelu v softwaru MATLAB/Simulink. Pomocí simulačního modelu jsou prověřeny základní vlastnosti jeho chování a také porovnána výstupní simulační data se šítkovými parametry daného elektromotoru.

Ve třetí části této práce je sestaven matematický a simulační model vozidla (v softwaru MATLAB/Simulink) ve formě jízdních odporů. Tohoto simulačního modelu je využito jakožto zátěže modelu elektromotoru.

Pro řízení daného PMSM je následně navržen fuzzy regulátor. Ze sestavených modelů (PMSM, jízdní odpory vozidla, fuzzy regulátor) je vytvořen simulační obvod a provedena simulace navržených situací, pomocí kterých budou zkoumány vlastnosti řízení fuzzy regulátorem. Výsledky simulací jsou poté porovnány s řízením klasickým PI regulátorem téže regulované soustavy (PMSM s jízdními odpory).

2. PRŮZKUM POUŽITÉ LITERATURY

Stále se zvyšující požadavky na snižování emisí nejen silničních vozidel se spalovacími motory vedly k produkci vozidel s alternativními pohonnými jednotkami. V [3] lze nalézt výčet pohonných jednotek v dopravních prostředcích rozdělených podle druhu energií. Autor porovnává jednotlivé druhy pohonných jednotek podle počtu přeměn energií – od zdroje energie (například zásobník paliva) až po mechanickou práci. Zmiňuje se také o tom, že s rostoucím počtem přeměn, klesá celková účinnost pohonu. Na druhou stranu je třeba zohlednit další aspekty, než pouze počet přeměn, a také věnovat pozornost volbě správné koncepce pohonu či jeho vhodnosti pro daný účel.

2.1. Hybridní a čistě elektrické pohony silničních vozidel

Tzv. hybridní pohony jsou kombinací alespoň dvou druhů zdrojů energie pro pohon vozidla. Obecně je jako hybridní pohon vnímána kombinace spalovacího motoru a elektromotoru. Mezi hlavní výhody patří z hlediska celkové účinnosti těchto hybridních pohonů zejména provoz dílčích pohonných jednotek v optimálním režimu. Pramení to z rozdílných momentových charakteristik spalovacího motoru a elektromotoru. Provoz dílčích pohonných jednotek v optimálních režimech tedy vede ke snižování měrné spotřeby (především spalovacího motoru) a tím také snížení emisí.

Autor [3] se ve své práci zabývá koncepčním návrhem hybridního pohonu městského vozidla s inovativní akumulací energie, na který autor získal mezinárodní patent DE102011085149A1 2013.04.25. Autorův hybridní pohon se skládá z dvouválcového zážehového spalovacího motoru o zdvihovém objemu 0,8 litru a PMSM Dynastart od firmy ZF Friedrichshafen AG. Nejzajímavější však je zmíněná inovativní akumulace energie, která spočívá v akumulaci a rekuperaci energie v setrvačnickové baterii. Jako možné řešení setrvačnickové baterie, autor uvažuje využití rezervního kola automobilu.

Hlavní výhodou nulových emisí EV doprovází také jejich pravděpodobně největší nevýhoda – akumulátory elektrické energie. Ve srovnání z hlediska akumulace energie, mají současné akumulátory elektrické energie mnohem menší měrnou kapacitu energie oproti energii akumulované v benzínu nebo naftě. Nízká měrná kapacita má dopad na vyšší hmotnost akumulátorů. Jenže hmotnost akumulátorů lze zvyšovat pouze v rámci určitých mezí, s ohledem na požadavky celkové hmotnosti automobilu. Současnými

akumulátory elektrické energie nelze dosáhnout takového množství akumulované energie, jaké obsahuje nádrž benzínu či nafty v automobilu. Tato zmíněná nevýhoda má za důsledek nižší dojezdovou vzdálenost EV než vozidla se spalovacími motory. Ačkoli jsou elektromotory používané v EV schopny pracovat také jako generátory elektrické energie – rekuperace při brzdění. Každopádně technický vývoj jde rychle kupředu, a kdo ví, jaké komponenty nás (lidstvo) v budoucnu čekají.

2.2. Elektromotory používané v elektromobilech

PMSM patří podle [10] do skupiny tzv. elektromotorů s permanentními magnety nebo se tato skupina také označuje jako bezkomutátorové stejnosměrné elektromotory či elektronicky komutované elektromotory [1]. Stator se skládá z třífázového vinutí a hřídel s permanentními magnety tvoří rotor. Základním rozdělením těchto elektromotorů je skladba statorového vinutí. Na skladbě statorového vinutí (v [10] na straně 24) závisí tvar indukovaného napětí (back-EMF voltage – zpětné elektromotorické napětí), a to je buď lichoběžníkového tvaru anebo ve tvaru sinusovky. Elektromotory s permanentními magnety s lichoběžníkovým tvarem indukovaného napětí se nazývají bezkomutátorové stejnosměrné (BLDC – brushless direct current) motory. Elektromotory s permanentními magnety s indukovaným napětím ve tvaru sinusovky se nazývají právě PMSM. Oba zmiňované nemají mechanický komutátor a pracují podobně jako střídavé elektromotory.

Nejvíce rozšířenými elektromotory v hybridních a elektrických pohonech automobilů jsou právě, již výše zmíněné, synchronní motory s permanentními magnety. V článku [4] je provedeno srovnání vlastností několika druhů PMSM v závislosti na umístění permanentních magnetů v rotoru. Výsledky studie mají za cíl usnadnění výběru vhodného PMSM k použití do EV. Závěry porovnání vlastností zkoumaných PMSM jsou vepsány do přehledové tabulky. Mezi porovnávané vlastnosti patří maximální točivý moment a výkon, výkonová hustota, mapy účinností, schopnost odbuzování, přetížitelnost a míra zvlnění točivého momentu. Rotory PMSM se z hlediska umístění permanentních magnetů v rotoru především dělí na rotory s povrchově umístěnými permanentními magnety (SPM) a rotory s vnitřně umístěnými permanentními magnety (IPM). Další možnosti rozmístění permanentních magnetů na rotoru, v rámci zmíněného hlavního rozdělení, lze nalézt v článku [4] na první straně.

2.3. Řízení elektromotorů s permanentními magnety

Matematické modelování PMSM (podobně jako matematické modelování třífázového asynchronního motoru) využívá transformace souřadnic z třífázového do dvoufázového dq souřadného systému pomocí Clarkovy a Parkovy transformace. Sestavení matematického modelu PMSM lze najít v [2], [4], [6], [7], [8] a [10]. Tato transformace vede k vektorovému řízení.

S umístěním permanentních magnetů na rotoru souvisí podle [2], [4], [6], [7], [8] a [10] také „vznik“ točivého momentu elektromotoru. Zatímco u SPM PMSM se celkový točivý moment vyvozený elektromotorem skládá pouze z jeho tzv. momentotvorné složky, u IPM PMSM se celkový točivý moment vyvozený elektromotorem rovná součtu momentotvorné a reluktanční složky momentu. Přídavná reluktanční složka momentu je způsobena rozdílem indukčností $L_d - L_q$ v osách d a q .

Komutace probíhá elektronicky pomocí napěťových střídačů. Střídače obsahují výkonové tranzistory (dva pro každé statorové vinutí). Správným přepínáním (v závislosti na poloze rotoru vůči statoru) výkonových tranzistorů střídače dochází k vytvoření točivého elektromagnetického pole statoru a otáčení rotoru. Ke spínání výkonových tranzistorů je například využíváno mikroprocesoru a pulzně šířkové modulace.

S absencí mechanického komutátoru (oproti stejnosměrným elektromotorům) je nutné znát přesnou polohu rotoru vůči statoru a s tím také potřebu přítomnosti snímače polohy rotoru. Existují však způsoby, které umožňují řízení PMSM bezsensorově, zejména v případech malých elektromotorů, kde by cena snímače (poměrově k ceně elektromotoru) značně ovlivnila celkovou cenu pohonu. Nicméně jsou vyvíjeny metody sofistikovaného bezsensorového řízení, například v [2] je řešeno bezsensorové řízení vysokootáčkového PMSM pomocí programovatelného hradlového pole. Pro řízení PMSM se snímačem polohy rotoru se využívá vektorového řízení, podobně jako u třífázových asynchronních motorů.

PMSM lze provozovat v pásmu konstantního momentu, tj. v pásmu otáček menším nebo rovném otáčkám jmenovitým, anebo v pásmu konstantního výkonu, tj. v pásmu otáček nad jmenovitými otáčkami. První varianty se dosáhne udržováním nulové hodnoty proudu v přímé ose d . Provozování PMSM v oblasti konstantního výkonu se provádí odbuzováním – snižování magnetického toku statoru záporným proudem I_d v ose d . Vlivem regulace PMSM dochází k vzájemnému ovlivňování proudů

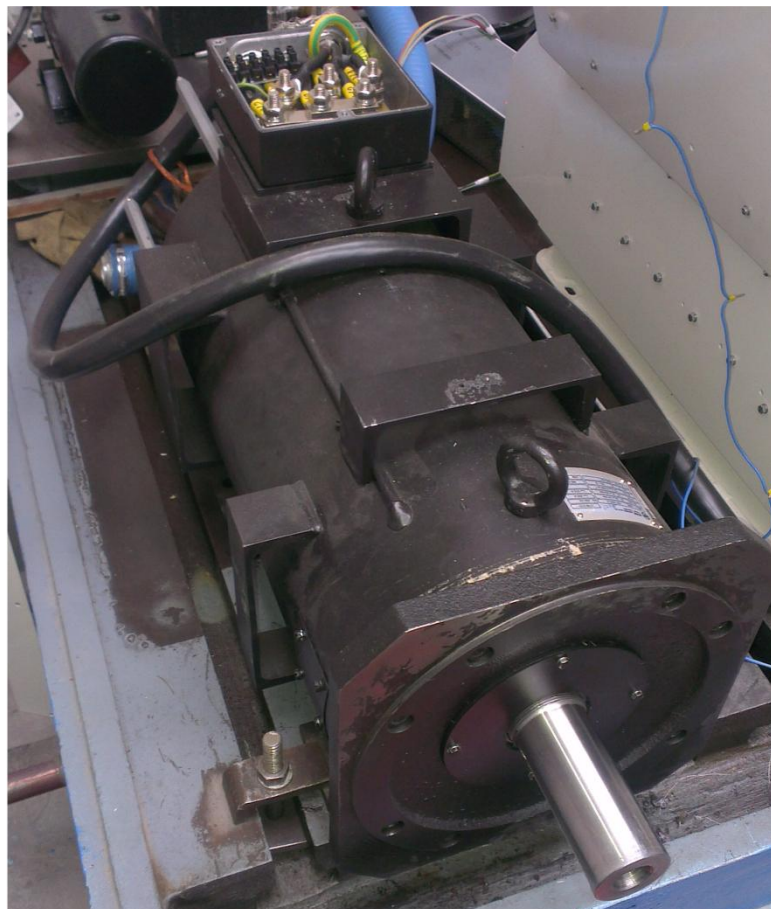
I_d a I_q . Aby mohla být zajištěna autonomní regulace proudů v osách d a q , je nutné opatřit regulátory těchto proudů rozvazbujícím obvodem, jako uvádí [8].

Autorka [7] ve své práci řeší řízení PMSM metodou přímého řízení momentu. Tato metoda se obejde bez regulátorů statorových proudů a pulzně šířkového modulátoru. Využívá přímého výběru optimálního vektoru výstupního napětí střídače k přímému řízení magnetického toku statoru a tím i točivého momentu elektromotoru. Autorka [7] také uvádí, že metoda přímého řízení momentu dosahuje podobných výsledků jako metoda vektorového řízení.

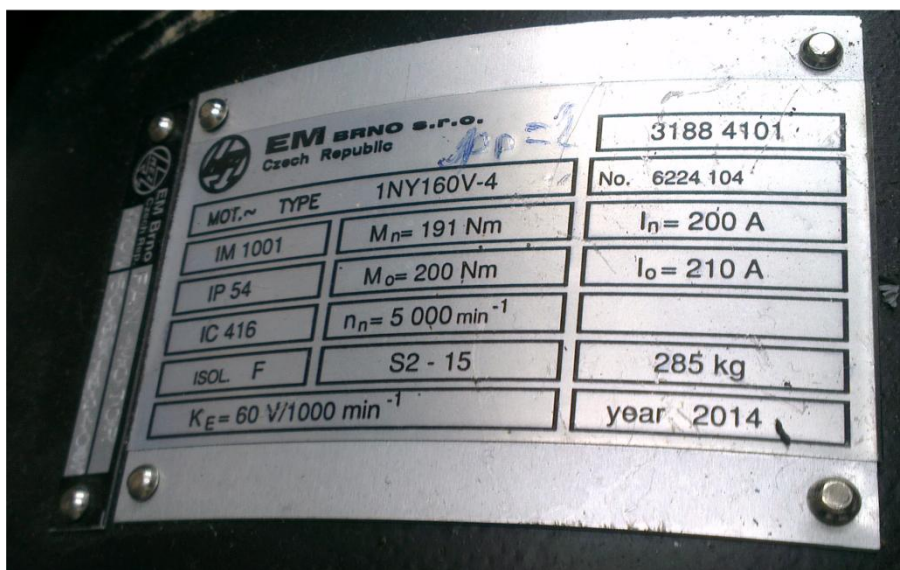
Článek [5] obsahuje zajímavé řešení řízení otáček BLDC elektromotoru pomocí kombinace fuzzy regulátorů a klasických PI regulátorů. Byl zde rozdělen interval otáček daného elektromotoru od 0 do 3000 min^{-1} do tří segmentů a každému z nich je přiřazen jeden fuzzy P regulátor a jeden klasický PI regulátor. Fuzzy regulátory se starají o úpravu měřítka regulační odchylky otáček. Vstupy klasických PI regulátorů jsou regulační odchylky otáček elektromotoru s upravenými měřítky fuzzy regulátorů. Akční zásahy klasických PI regulátorů jsou požadované hodnoty proudů v jednotlivých fázích statoru a zároveň vstupy proporcionálních regulátorů fázových proudů statoru. Závěrem autoři uvádějí, že zvlnění otáček klesá se stoupajícím zatěžovacím momentem.

3. POUŽITÝ ELEKTROMOTOR

Pro účely této práce byl k dispozici synchronní elektromotor s permanentními magnety od firmy EM Brno s. r. o. (*Obr. 3.1*) nacházející se v laboratořích Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Kromě jeho parametrů na výrobním štítku (*Obr. 3.2*), jsem obdržel od doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. také další údaje potřebné k modelování a především simulacím v MATLAB/Simulniku. Veškeré parametry jsou přepsány v (*Tab. 3.1*) na následující straně.



Obr. 3.1 – Elektromotor. Foto Autor



Obr. 3.2 – Výrobní štítek elektromotoru. Foto Autor

Tab. 3.1 – Parametry elektromotoru

Parametry elektromotoru			
značka	hodnota	jednotka	veličina
I_n	200	[A]	Jmenovitý proud
M_n	191	[N·m]	Jmenovitý moment
n_n	5000	[min ⁻¹]	Jmenovité otáčky
K_e	60	[V/1000 min ⁻¹]	Konstanta zpětného elektromotorického napětí
R_s	6,6	[mΩ]	Odpor statorového vinutí
L_s	230	[μH]	Indukčnost statorového vinutí
K_m	0,955	[N·m·A ⁻¹]	Momentová konstanta
J_m	0,27	[kg·m ²]	Moment setrvačnosti
p_p	2	[-]	Počet pólů

3.1. Matematický model PMSM elektromotoru

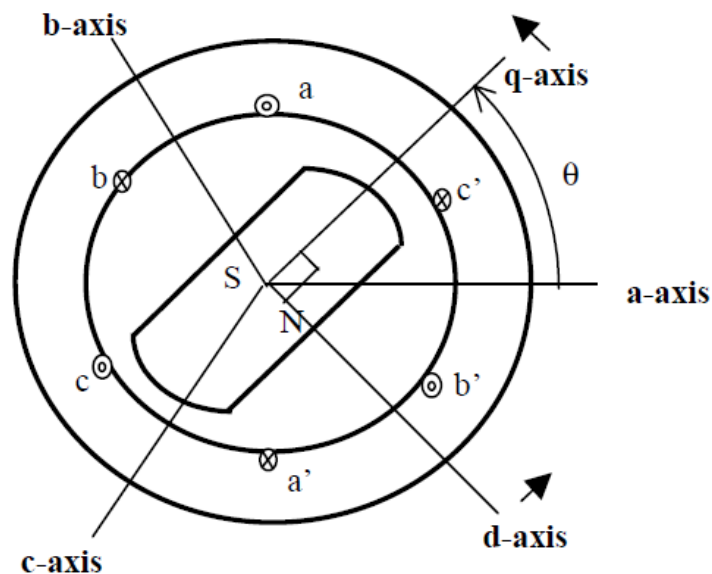
V obecné rovině návrhu řízení pro danou soustavu – objekt řízení – je sestavení matematického modelu velmi žádoucí. Ať již pro účely simulací chování, návrhu řídicího algoritmu, optimalizace řízení atd.

Matematický model elektromotoru byl sestaven na základě informací obsažených v [2], [6], [7], [8], [9] a [10].

V první řadě je třeba zmínit několik předpokladů podle [2] a [6] uvedených níže, které následující tvorba modelu PMSM zahrnuje:

- třífázový stroj je symetrický,
- z hlediska ztrát jsou uvažovány pouze třecí ztráty rotoru,
- předpoklad lineárního magnetického obvodu, magnetický obvod není nasycen, hystereze a vířivé proudy nejsou uvažovány,
- konstantní vlastní indukčnosti a odpory vinutí,
- vzájemné indukčnosti mezi vinutími jsou konstantní,
- magnetický tok rotoru je konstantní,
- indukovaná napětí ve všech třech fázích mají stejný průběh.

Další důležitá věc spočívá v tom, že indukovaná napětí a proudy výše uvedeného elektromotoru mají sinusový průběh. Synchronní elektromotor s permanentními magnety si lze názorně představit podle (Obr. 3.3 – bude detailněji popsán později) a model vychází z napěťových rovnic (2.4), (2.5) a (2.6). Stator se skládá ze tří vinutí (statorová vinutí) navzájem od sebe fázově posunutých o 120° . Jedná se tedy o třífázové statorové vinutí s fázemi a , b , c . Postupným přepínáním (komutací) těchto fází se vytváří točivé magnetické pole. Komutace je realizována elektronicky v závislosti na poloze rotoru. Poloha natočení rotoru vůči statoru je dána úhlem θ . Výsledný model je však řešen nikoli jako třífázový, ale jako ekvivalentní dvoufázový. Dvoufázová soustava souřadnic se získá Clarkovou a Parkovou transformací.



Obr. 3.3 – Synchronní elektromotor s permanentním magnetem [2]

Pro symetrii fází podle 1. Kirchhoffova zákona platí:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.1)$$

kde i_a , i_b a i_c jsou proudy v jednotlivých fázích. Dále platí pro vlastní indukčnosti L_a , L_b , L_c a odpory jednotlivých fází R_a , R_b , R_c :

$$R_s = R_a = R_b = R_c \quad (3.2)$$

$$L_s = L_a = L_b = L_c \quad (3.3)$$

kde R_s a L_s je odpor resp. indukčnost statorového vinutí. Napěťové rovnice PMSM:

$$u_a(t) = R_s \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_b(t) = R_s \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \quad (3.5)$$

$$u_c(t) = R_s \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \quad (3.6)$$

kde u_a , u_b , u_c jsou napětí ve fázích statoru a Ψ_a , Ψ_b , Ψ_c spřažené magnetické toky, pro něž za předpokladu (3.7) platí:

$$L_{ab} = L_{ba}, L_{ac} = L_{ca}, L_{bc} = L_{cb} \quad (3.7)$$

$$\Psi_a = L_{aa} \cdot i_a + L_{ab} \cdot i_b + L_{ac} \cdot i_c + \Psi_{ma} \quad (3.8)$$

$$\Psi_b = L_{ab} \cdot i_a + L_{bb} \cdot i_b + L_{bc} \cdot i_c + \Psi_{mb} \quad (3.9)$$

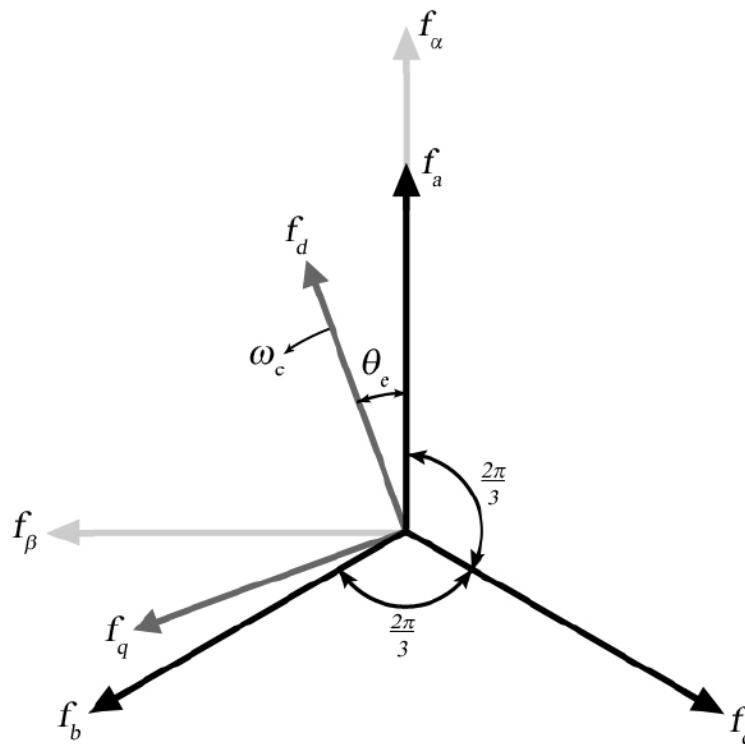
$$\Psi_c = L_{ac} \cdot i_a + L_{bc} \cdot i_b + L_{cc} \cdot i_c + \Psi_{mc} \quad (3.10)$$

kde L_{ab} , L_{ac} , L_{bc} jsou vzájemné indukčnosti mezi fázemi ab resp. ac resp. bc a magnetické toky Ψ_{ma} , Ψ_{mb} , Ψ_{mc} od permanentních magnetů rotoru působící na statorové fázové vinutí a resp. b resp. c .

3.1.1. Transformace souřadnic $abc \rightarrow dq\Theta$ a naopak

Rovnice z kapitoly 3.1 je třeba podle [2], [8], [9] a [10] transformovat do dvoufázového souřadného systému pomocí Clarkovy a Parkovy transformace. Grafické znázornění transformace zobrazuje (Obr. 3.4), kde f jsou vektory ve směrech os souřadných systémů abc , $\alpha\beta$ a dq s příslušnými indexy, úhlem natočení elektrického

pole rotoru vůči statoru θ_e (dále elektrickým úhlem) a úhlovou rychlostí točivého elektrického pole ω_e . (dále elektrická úhlová rychlost).



Obr. 3.4 – Grafické znázornění souřadných systému $abc, \alpha\beta, dq$ [10]

Clarkova transformace ($abc \rightarrow \alpha\beta$) poskytuje převedení souměrné třífázové soustavy s osami po 120° (abc) do dvoufázové soustavy s osami na sebe kolnými. Tento dvoufázový souřadný systém zachovává stacionární vlastnost třífázového. Koeficienty diferenciálních rovnic (v abc a $\alpha\beta$) popisující děje v elektromotoru závisí na čase a rychlosti, kromě případu stojícího rotoru. Početně to vypadá takto:

$$I_\alpha = \frac{3}{2} \cdot I_a - \frac{1}{3} \cdot (I_b - I_c) \quad (3.11)$$

$$I_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot (I_b - I_c) \quad (3.12)$$

Za předpokladu platnosti rovnice (3.1) s použitím superpozice lze podle [9] dojít ke vztahům:

$$I_\alpha = I_a \dots\dots\text{slovně} - I(\text{alfa}) = I(a) \quad (3.13)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_a + 2 \cdot I_b) \quad (3.14)$$

Inverzní (zpětná) Clarkova transformace $\alpha\beta \rightarrow abc$ souřadnicového systému

$$U_a = U_\alpha \dots\dots\text{slovně} - U(a) = U(\text{alfa}) \quad (3.15)$$

$$U_b = -\frac{U_\alpha + \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2} \quad (3.16)$$

$$U_c = -\frac{U_\alpha - \sqrt{3} \cdot U_\beta}{2} \quad (3.17)$$

Parkova transformace ($\alpha\beta \rightarrow dq$) slouží k převodu z dvoufázového stacionárního souřadnicového systému $\alpha\beta$ do dvoufázového rotujícího souřadnicového systému dq . Tento souřadnicový systém má také osy vzájemně kolmé, avšak jeho rotující poloha je dána úhlem Θ (v závislosti na čase) vůči souřadnicovému systému $\alpha\beta$ (resp. osa d vůči ose α – *alfa* – resp. ose a), viz (*Obr. 3.4*). Definice úhlu natočení rotoru Θ spočívá v úhlu natočení osy d vůči poloze osy „ a “ statorového vinutí [10].

Osa d leží ve směru magnetického toku od permanentních magnetů rotoru, od anglického „direct axis“ – přímá osa. Parkova transformace početně:

$$I_d = I_\alpha \cdot \cos(\Theta) + I_\beta \cdot \sin(\Theta) \quad (3.18)$$

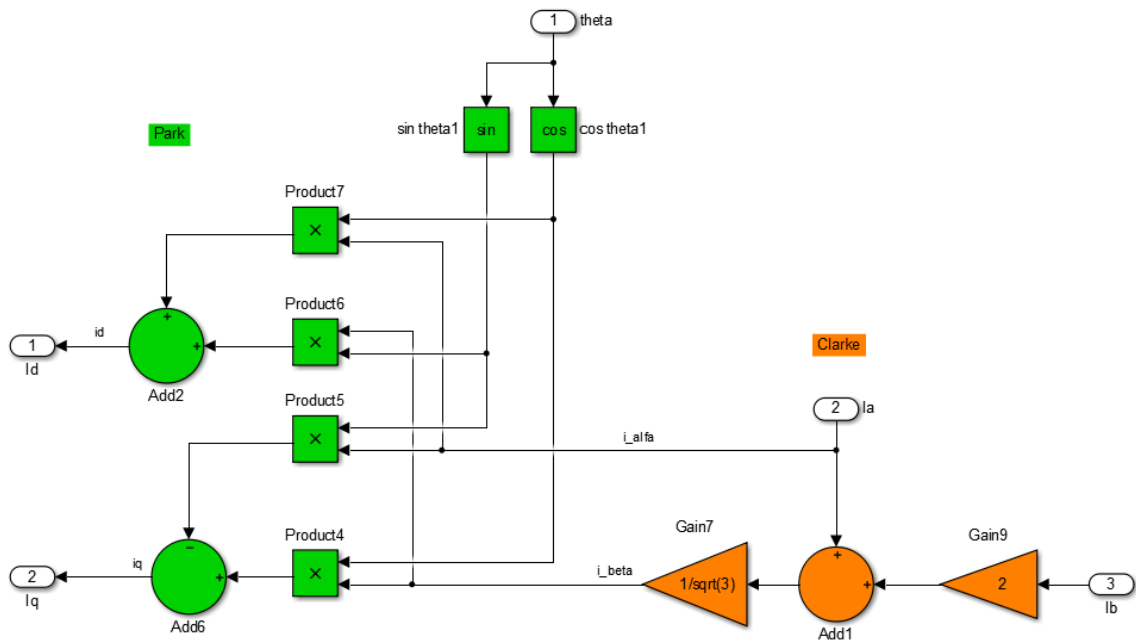
$$I_q = I_\beta \cdot \cos(\Theta) - I_\alpha \cdot \sin(\Theta) \quad (3.19)$$

Inverzní Parkova transformace $dq \rightarrow \alpha\beta$ souřadnicového systému

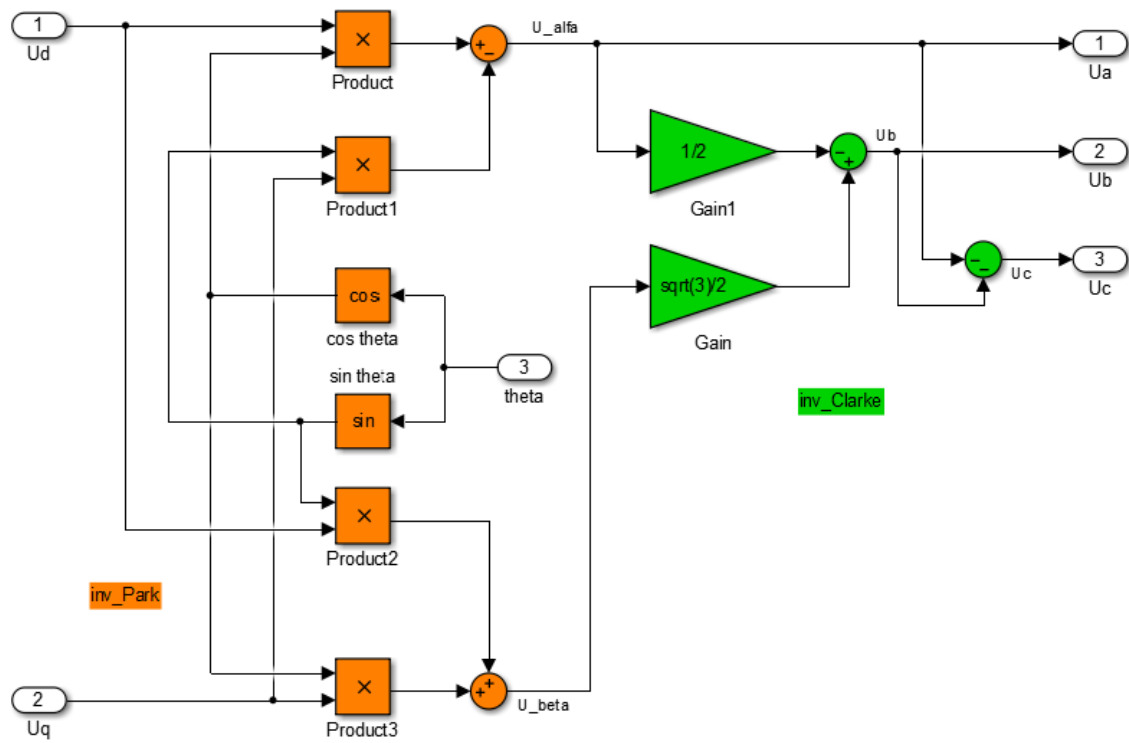
$$U_\alpha = U_d \cdot \cos(\Theta) - U_q \cdot \sin(\Theta) \quad (3.20)$$

$$U_\beta = U_q \cdot \cos(\Theta) + U_d \cdot \sin(\Theta) \quad (3.21)$$

Na (*Obr. 3.5*) se nachází Clarkova (zelené bloky) a Parkova (oranžové bloky) transformace, resp. jejich inverze na (*Obr. 3.6*), vytvořená v MATLAB/Simulink. Jak uvádí [2], lze transformaci provést taktéž maticově.



Obr. 3.5 – Clarkova a Parkova transformace v Simulinku [2]



Obr. 3.6 – Inverzní Clarkova a Parkova transformace v Simulinku [2]

3.1.2. Obecný model PMSM v dq souřadnicích

Rovnice (3.4), (3.5) a (3.6) po transformaci do dq souřadného systému získají následující tvar:

$$u_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \cdot \Psi_q \quad (3.22)$$

$$u_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega_e \cdot \Psi_d \quad (3.23)$$

Pro magnetické toky v dq souřadném systému platí:

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + \Psi_{pm} \quad (3.24)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad (3.25)$$

Dosazením za magnetické toky do (3.22) a (3.23) jsou získány tyto vztahy:

$$u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (3.26)$$

$$u_q = R_s \cdot i_q + L_d \cdot \frac{di_q}{dt} - \omega_e \cdot (L_d \cdot i_d + \Psi_{pm}) \quad (3.27)$$

Elektrická rovnice mechanického momentu vyvozeného elektromotorem je dána vztahem:

$$M_{mech} = \frac{3}{2} \cdot p_p \cdot [\Psi_{pm} \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (3.28)$$

kde M_{mech} je mechanický moment a p_p počet pólpárů. Součet součinitelů v závorce momentové rovnice (3.28) udává, že výsledný moment elektromotoru se skládá ze dvou složek. První složka momentu je přímo úměrná počtu pólpárů, magnetickému toku od permanentních magnetů a proudu v ose q . Těto složce se říká „magnetický moment“ [6] nebo také momentotvorná složka. Druhá složka, tzv. reluktanční moment, závisí na rozdílu indukčností v osách d , q a proudech i_d a i_q . Reluktanční moment se prakticky vyskytuje především u PMSM s permanentními magnety umístěnými uvnitř rotoru, nazývají se také „salient-pole PMSM“ – PMSM s významnými póly. Naopak elektromotory s povrchově umístěnými permanentními magnety reluktanční moment nevykazují (viz kapitola 2.3), protože indukčnosti L_d a L_q se považují za shodné [7].

Elektrickou momentovou rovnicí doplňuje mechanická momentová rovnice:

$$M_{mech} = M_z + \frac{J_m}{p_p} \cdot \frac{d\omega_e}{dt} + \frac{B}{p_p} \cdot \omega_e \quad (3.29)$$

kde M_z je zátěžový moment, J_m moment setrvačnosti, B konstanta třecích ztrát. Mechanická úhlová rychlost rotoru ω_m a úhel Θ se stanoví:

$$\omega_m = \frac{\omega_e}{p_p} \quad (3.30)$$

$$\Theta(t) = \int \omega_m dt \quad (3.31)$$

Rovnice (3.26), (3.27), (3.28) a (3.29) tvořící obecný matematický model PMSM lze přepsat do stavových rovnic [2]:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot i_q \cdot \omega_e + \frac{u_d}{L_d} \quad (3.32)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} \cdot i_q - \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega_e + \frac{u_q}{L_q} - \frac{\Psi_{pm}}{L_q} \cdot \omega_e \quad (3.33)$$

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_p^2}{J_m} \cdot \Psi_{pm} \cdot i_q + \frac{3}{2} \cdot \frac{p_p^2}{J_m} \cdot (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q - \frac{p_p}{J_m} \cdot B \cdot \omega_e - \frac{p_p}{J_m} \cdot M_z \quad (3.34)$$

3.2. Simulační model

Simulační model PMSM byl poskytnut doc. Ing. Martinem Novákem, Ph.D., z něhož jsem vycházel a který jsem upravil pro účely této diplomové práce. Na základě informací o parametrech elektromotoru získaných pro účely této práce, lze podle [2] stavové rovnice (3.32), (3.33) a (3.34) dále upravit a zjednodušit. Bude předpokládán rotor s povrchově umístěnými magnety. V tom případě platí $L_d = L_q = L_s$, tudíž moment generovaný elektromotorem bude pouze „magnetický moment“ (reluktanční složka momentu je rovna nule). Nicméně model zachovám v obecné formě, která umožní simulace jak s povrchově, tak s vnitřně umístěnými permanentními magnety.

Ve stavových rovnicích se rovněž vyskytují další veličiny, které je nutno určit. Mám na mysli magnetický tok od permanentních magnetů Ψ_{pm} a koeficient třecích ztrát B .

3.2.1. Výpočet magnetického toku Ψ_{pm}

Pro stanovení magnetického toku od permanentních magnetů Ψ_{pm} jsem pro tuto práci zvolil způsob výpočtu v MATLABu. Toolbox SimPowerSystems obsahuje

pomůcku pro výpočet chybějících parametrů PMSM, které například výrobní štítek elektromotoru neobsahuje. Po zadání známých veličin a následném výpočtu dostaneme: $\Psi_{pm} = 0,318333 \text{ Wb}$.

3.2.2. Stanovení koeficientu třecích ztrát B

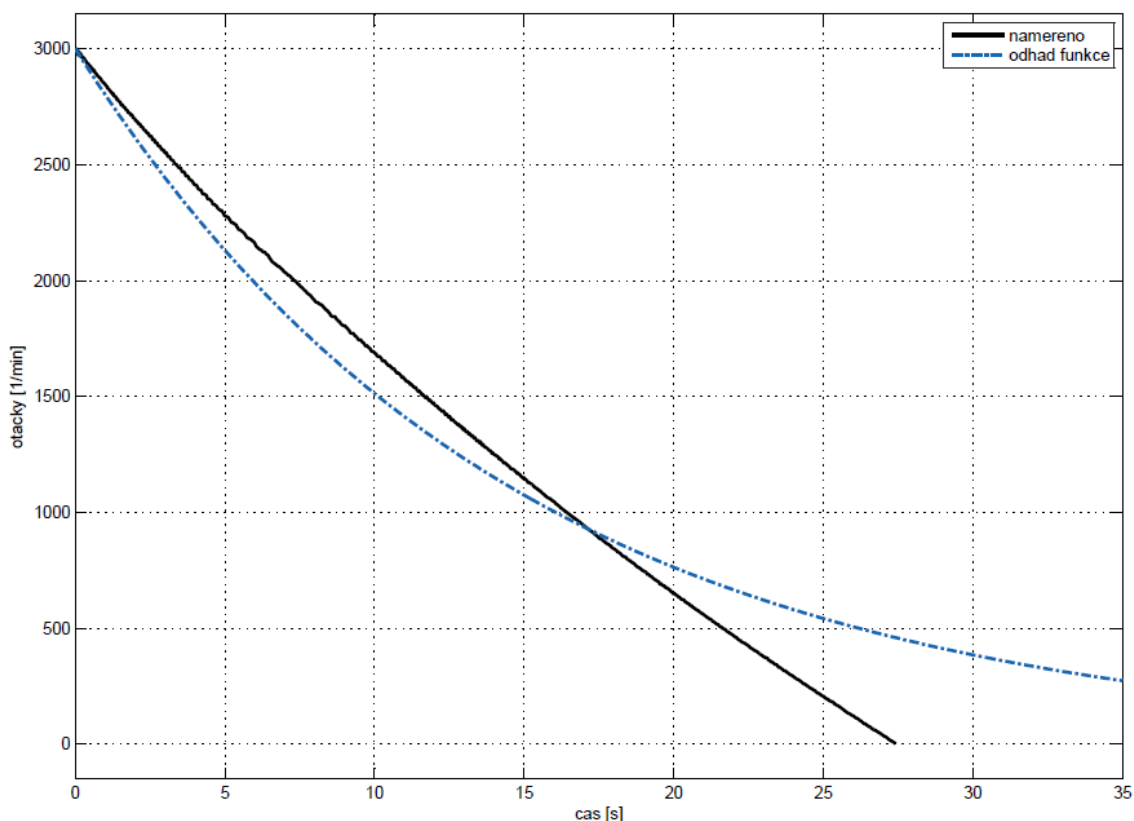
Řešení stanovení koeficientu třecích ztrát lze nalézt v [2]. Experimentálním měřením byla naměřena doběhová charakteristika. Data z tohoto měření jsem obdržel od doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. a jsou k nahlédnutí v příloze (soubor „Dobehova_charakteristika_PMSM.xls“ [2], PŘÍLOHA X.). Měření spočívá v rozběhnutí elektromotoru na konstantní otáčky (jmenovité) bez zátěže a po jejich ustálení, vypnout napájení elektromotoru. Toto lze vyvodit z třetí stavové rovnice (3.34), která za podmínek vypnutého napájení ($i_d = i_q = 0$) a bez zatížení ($M_z = 0$) přejde do tvaru:

$$\frac{d\omega_e}{dt} = -\frac{p_p}{J} \cdot B \cdot \omega_e \quad (3.35)$$

Elektromotor vlivem třecího momentu zpomaluje do úplného zastavení. Ve skutečnosti toto zpomalování není způsobeno pouze třecím momentem, ale dalšími vlivy, které jsou v této práci zanedbány (viz kapitola 3.1). Protože experimentálním měřením byla změřena závislost „mechanických“ otáček elektromotoru, musí se do rovnice (3.35) dosadit vztah pro mechanickou úhlovou rychlost (3.30). Řešením je potom exponenciální závislost:

$$\omega_m(t) = \omega_m(0) \cdot e^{-\frac{B \cdot t}{J}} \quad (3.36)$$

Pomocí Curve Fitting Toolboxu v MATLABu byl koeficient třecích ztrát stanoven na hodnotu $B = 0,01874 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$. (Obr. 3.7) na následující straně znázorňuje porovnání doběhové charakteristiky z naměřených dat a křivky s odhadnutým koeficientem třecích ztrát B podle rovnice (3.36).



Obr. 3.7 – Výstup z Curve Fitting Toolboxu - porovnání naměřené (černě, souvisle) a exponenciální funkce s odhadnutým koeficientem B (modře, čerchované)

3.3. Ověření chování modelu elektromotoru simulací

Na základě simulačního experimentu ověřím chování modelu elektromotoru. Způsob ověření volím rozběh elektromotoru na jmenovité otáčky $n_n = 5\,000 \text{ min}^{-1}$. Zatěžovací moment M_z bude přitom lineárně narůstat s otáčkami až do jmenovité hodnoty ($M_z = M_n = 191 \text{ N} \cdot \text{m}$) při jmenovitých otáčkách podle vztahu (3.37). K tomuto zatěžovacímu momentu se do výsledné hodnoty fázových proudů promítne také třecí moment způsobený třecími ztrátami dle koeficientu B (kapitola 3.2.2).

$$M_z(t) = \frac{n(t)}{n_n} = \frac{n(t)}{5000} \quad (3.37)$$

Z důvodu nutnosti použití regulátoru otáček, jsem ponechal klasický PI regulátor, kterým byl vybaven simulační obvod doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. Ovšem elektromotor, který mám k dispozici pro tuto práci, má naprosto odlišné parametry od elektromotoru, pro něž byl původní regulátor seřizen. Musím tedy PI regulátor k řízení otáček elektromotoru seřídít. Seřizování jsem provedl na základě získání co nejlepšího průběhu otáček při rozběhu. Je třeba zmínit, že jsem nikterak neomezoval akční zásahy

regulátorů proudů ani otáček. Seřízení regulátorů proudů I_d a I_q zůstalo zachováno na svých původních hodnotách a sice:

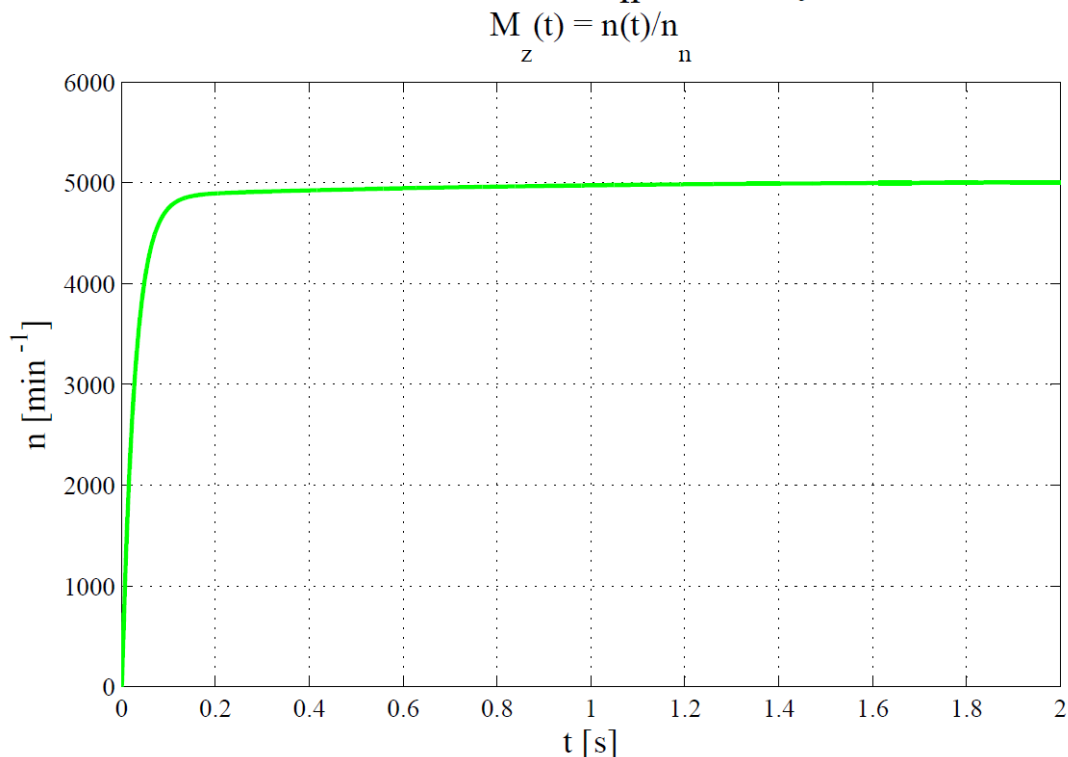
- hodnota proporcionální složky $P = 3$
- hodnota integrační složky $I = 1$

Po několika simulačních experimentech jsem dospěl k následujícímu seřízení regulátoru otáček:

- hodnota proporcionální složky $P = 10$
- hodnota integrační složky $I = 12$

Na (Obr. 3.8) lze pozorovat rozběh elektromotoru na jmenovité otáčky. K tomu průběh zatěžovacího momentu se nachází v příloze (Příloha I. – B), průběhy fázových proudů v (Příloha I. – C) a nakonec fázových napětí v (Příloha I. – D). K rozběhu elektromotoru na jmenovité otáčky dojde přibližně za 0,2 sekundy. Hodnoty fázových proudů odpovídají štítkovému údaji při jmenovitých otáčkách a jmenovitém zatížení elektromotoru. Model elektromotoru vykazuje přijatelné chování, zejména co se týče jmenovitých hodnot elektromotoru.

Rozběh elektromotoru na n_n - otáčky elektromotoru



Obr. 3.8 – Rozběh elektromotoru na jmenovité otáčky

4. JÍZDNÍ ODPORY VOZIDLA

Pro účely modelování vlastností řízení elektromotoru (pohonné jednotky elektromobilu) vytvořím zjednodušený model vozidla na základě informací obsažených v [11]. Tento model budou tvořit jízdní odpory jakožto zatěžovací momenty elektromotoru. Aby tento model mohl vzniknout, musím také zvolit a vypočítat několik nutných základních parametrů vozidla. Tyto parametry budou dále rozvinuty v následujících částech a jejich nutnost stanovení přímo vyplyne z matematických rovnic jízdních odporů (například hmotnost vozidla). Následně budou matematické rovnice jízdních odporů využity k modelování jízdních odporů v softwaru MATLAB/Simulink.

4.1. Matematické vyjádření jízdních odporů

Jízdními odpory se nazývají dynamické účinky působící na pohybující se vozidlo. V této práci se zaměřím pouze na síly, které působí na vozidlo v podélné ose, tzn. působení sil zpravidla proti směru jízdy nebo v některých případech naopak ve směru jízdy (např. klesání vozovky nebo tzv. „vítr v zádech“). Tyto jízdní odpory je nutné překonat hnací silou pohonné jednotky vozidla F_H , která vznikne přenosem točivého momentu z hnacího hřídele pohonné jednotky (motoru) přes převodové ústrojí až na poháněná kola. Působíště hnací síly se nachází ve styku hnaných kol s vozovkou. Protože moment je součin síly a ramene k ose působíště, rameno je zde reprezentováno dynamickým poloměrem kola. Více o dynamickém poloměru kola lze nalézt v [11]. Celkový jízdní odpor vozidla v podélném směru jízdy se stanoví součtem jednotlivých jeho složek:

$$O_C = O_f + O_x + O_s + O_z + O_p = F_H \quad (4.1)$$

kde:

- O_f odpor valení [N]
- O_x odpor prostředí (vzduchu) [N]
- O_s odpor stoupání [N]
- O_z odpor setrvačných hmot (zrychlení) [N]
- O_p odpor přípojného vozidla [N]
- F_H hnací síla [N]

4.1.1. Odpor valení O_f

Ke styku vozidla s vozovkou a přenosu sil z vozidla na vozovku a naopak dochází skrze pneumatiky. V důsledku účinku sil (tíha vozidla, hnací a brzdná síla, boční síly, atd.) přenášených pneumatikami dochází k jejich deformaci. Odpor valení O_f je způsoben právě vlivem této deformace a uvádí se vztahem:

$$O_f = f \cdot G \cdot \cos(\alpha) \quad (4.2)$$

kde:

- f součinitel odporu valení [-]
- G celková tíha vozidla [N]
- α úhel stoupání [°]

Podle [11] je součinitel odporu valení závislý na rychlosti vozidla. Do tzv. kritické rychlosti (u osobních automobilů přibližně $80 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$) jej lze nahradit konstantou, avšak při rychlostech vyšších, součinitel odporu valení stoupá (také v závislosti na typu pneumatiky). Úhel stoupání α je úhel mezi rovinou vozovky a vodorovnou rovinou. V případě jízdy vozidla do nebo z kopce, složka celkové tíhy vozidla kolmá k vozovce se sníží vlivem naklonění vozovky vůči vodorovné rovině. Tím se sníží i valivý odpor. Hodnotu součinitele odporu valení f volím konstantní a jeho hodnota pro suchý asfalt je podle [11] $f \cong 0,015$.

4.1.2. Odpor prostředí (vzduchu) O_x

Na pohybující se těleso v hmotném prostředí působí síly, které pohybu tělesa brání a způsobují tak třecí a tlakový odpor prostředí. V tomto případě je prostředím vzduch a tělesem vozidlo. Tento odpor závisí na velikosti čelní plochy vozidla S_x [m^2], na tvaru vozidla daným součinitelem odporu vzduchu c_x [-], hustoty prostředí (vzduchu) ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] a v neposlední řadě relativní rychlosti pohybu tělesa vůči prostředí v_r [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Vypočte se dle vztahu:

$$O_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_x \cdot c_x \cdot v_r^2 \quad (4.3)$$

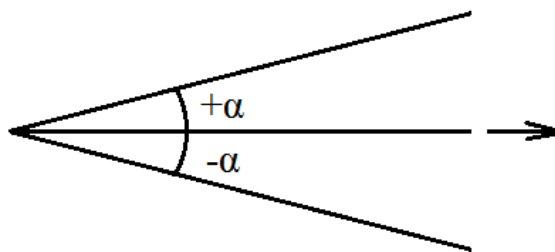
Součinitel odporu vzduchu c_x se určuje například experimentálně ve speciálních zkušebnách – aerodynamické tunely. Do těchto tunelů se umísťují ať už skutečná vozidla nebo jejich modely. Modely vozidel jsou tvarově shodná se skutečnými. Mohou

se však lišit velikostí, a to v určitém poměru k velikosti skutečného vozidla. Využití modelů nachází uplatnění hlavně při vývoji nových vozidel (z ekonomických důvodů).

Vozidlo podrobené této zkoušce stojí (vzhledem k okolí na místě) na zkušebních válciích, které simulují rychlost jízdy a otáčí se s koly vozidla. Odvalování kol po válciích relativní rychlostí v_r umožní zahrnout také odpor vzduchu proudícího kolem otáčejících se kol vozidla. Kolem vozidla proudí relativní rychlostí v_r vzduch smíchaný s „kontrastní látkou“, která proudy vzduchu „zviditelní“. Výsledkem zviditelnění je odhalení míst, kde dochází k turbulencím. Takto odhalená místa je poté možné tvarově optimalizovat a turbulence odstranit. Součinitel odporu vzduchu c_x se stanoví z naměřených hodnot silových účinků vyvolaných proudícím vzduchem kolem vozidla. Účelem těchto měření je optimalizace tvaru vozidla vedoucí ke snižování hodnoty c_x .

4.1.3. Odpor stoupání O_s

Odpor stoupání vzniká pohybem vozidla po nakloněné rovině ve směru jízdy. Jedná se o sinovou složku tíhové síly vozidla G (cosinová složka působí kolmo k vozovce). Při jízdě vozidla do kopce je tato složka odporem – působí proti směru jízdy. V případě jízdy z kopce naopak působí ve směru jízdy vozidla a kladně přispívá k hnací síle F_H . O kladném či záporném účinku rozhoduje úhel stoupání α . Na (Obr. 4.1) je znázorněn kladný a záporný úhel stoupání α vzhledem k vodorovné rovině, šipka označuje směr jízdy.



Obr. 4.1 – Úhel stoupání

Výpočet odporu stoupání:

$$O_s = G \cdot \sin(\pm\alpha) \quad (4.4)$$

4.1.4. Odpor setrvačných hmot (zrychlení) O_z

Odpor setrvačných hmot vychází z prvního Newtonova zákona o setrvačnosti tělesa. Vlivem setrvačných hmot má vozidlo tendenci udržovat ustálený pohyb, tedy rychlosti, včetně nulové (stojící vozidlo). Pokud chceme rychlost vozidla měnit (změna rychlosti je zrychlení, případně zpomalení), musí být odpor setrvačných hmot, neboli odpor zrychlení, překonán. Skládá se ze složek odporu od posuvných hmot O_{zp} a rotačních hmot O_{zr} danými rovnicí:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \quad (4.5)$$

Odpor zrychlení posuvných hmot je součinem hmotnosti m [kg] a zrychlení vozidla a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]. Odpor zrychlení rotačních hmot se vypočte dle (4.6) jako podíl setrvačného momentu rotačních částí M_r [$\text{N}\cdot\text{m}$] ku poloměru kola r_k [m]:

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_k} \quad (4.6)$$

V [11] je po dosazení za M_r odvozena výsledná rovnice (4.7) odporu zrychlení:

$$O_z = \left[1 + \frac{(J_m \cdot i_c^2 + J_p \cdot i_r^2) \cdot \eta + \sum_i J_{ki}}{m \cdot r_k^2} \right] \cdot m \cdot a = v \cdot m \cdot a \quad (4.7)$$

kde:

- J_m moment setrvačnosti motoru [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- i_c celkový převodový poměr od hřídele motoru k hnaným kolům [-]
- J_p moment setrvačnosti převodovky [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- i_r převodový poměr rozvodovky [-]
- η mechanická účinnost převodů [-]
- J_k moment setrvačnosti hnaného kola [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
- v součinitel setrvačných hmot [-]

V simulaci zanedbám moment setrvačnosti rozvodovky, protože převodový poměr je volen jednostupňový.

4.1.5. Odpor přípojného vozidla O_p

V souvislosti s odporem přípojného vozidla, pro tento odstavec nazvu vozidlo, pro které byly stanoveny jízdní odpory výše, vozidlem taženým. V rámci jízdní soupravy, tzn. připojením přípojného vozidla k taženému vozidlu (zpravidla motorového), vznikají

jízdní odpory také u přípojného vozidla. Postup určení těchto odporů je možné provést shodně s postupem provedeným u tažného vozidla. Výjimku tvoří odpor prostředí O_x , který se nestanovuje pro každé vozidlo zvlášť, ale pro jízdní soupravu jako celek. Odpor přípojného vozidla se prakticky zahrnuje zejména u nákladních vozidel (tahač – návěs), pro tuto práci O_p nebudu uvažovat a zcela jej zanedbám.

Pro některé výpočty může být dostačující uvažovat přípojné vozidlo jako náklad vozidla tažného, nicméně musí se počítat omezeními, které z toho pramení. To znamená pouze přičíst hmotnost přípojného vozidla k hmotnosti tažného. Ve výsledku se tak odpory přípojného vozidla promítnou do odporu valení, stoupání a zrychlení, ale nikoli do odporu prostředí. Výhoda tohoto zjednodušení spočívá v tom, že se nemusí náročnými způsoby stanovovat součinitel odporu prostředí c_x přípojného vozidla. Omezeními pro toto zjednodušení budou, že čelní plocha přípojného vozidla musí být menší než čelní plocha tažného vozidla a také omezení platnosti tohoto zjednodušení pouze pro nízké rychlosti (protože O_x závisí na v_r^2).

4.2. Volba parametrů vozidla

„Model vozidla“, na kterém provedu simulace řízení elektromotoru, vytvořím pomocí odhadu parametrů na základě parametrů reálného vozidla – ŠKODA Fabia třetí generace. Z katalogu výrobce [12] určím hmotnost m , součinitel odporu vzduchu c_x , čelní plochu vozidla S_x , rozměry kol s pneumatikami a vypočtu celkový převodový poměr.

4.2.1. Hmotnost modelu vozidla

Co se týče hmotnosti, vycházím z pohotovostní hmotnosti včetně 75 kg řidiče základní verze ŠKODA Fabia třetí generace v karosářské verzi hatchback s motorem 1.0 MPI – 1055 kg. Tuto hmotnost ponížím o předpokládanou hmotnost motoru s převodovkou přibližně 105 kg, a plně nádrže paliva o hmotnosti přibližně 35 kg – ve výsledku se tedy jedná o snížení hmotnosti o 140 kg. K této hmotnosti ($1055 \text{ kg} - 140 \text{ kg} = 915 \text{ kg}$) přičtu hmotnost elektromotoru ze štítku (Obr. 3.2) 285 kg, čímž se dosavadní hmotnost včetně 75 kg řidiče dostane na hodnotu 1200 kg. Dále musím započítat hmotnost baterií pro napájení elektromotoru a dalších elektrických obvodů. V neposlední řadě musím zahrnout pravděpodobný nárůst hmotnosti vlivem „zesílení“ karoserie z hlediska mechanické pevnosti, protože

elektrická pohonná jednotka, se všemi náležitostmi s tím spjatými, bude mít výrazně vyšší hmotnost než původní (se spalovacím motorem). Další nárůst hmotnosti odhaduji na 300 kg. Výslednou hmotností vozidla, kterou použiji v simulaci, bude tedy 1500 kg.

4.2.2. Součinitel odporu vzduchu modelu vozidla

Druhým parametrem vyčteným z katalogu výrobce [12] je součinitel odporu vzduchu c_x . Výrobce jej pro hatchback udává v rozmezí $c_x = 0,316$ až $0,325$ v závislosti na použitém typu motoru a s tím souvisejícím prouděním vzduchu kolem v motorovém prostoru. Předpokládám nejnižší variantu z tohoto rozmezí z důvodu lepšího proudění vzduchu pod pohonnou jednotkou a v „motorovém“ prostoru kolem pohonné jednotky.

4.2.3. Čelní plocha modelu vozidla

Následuje stanovení hodnoty čelní plochy vozidla S_x . Podle [11] lze čelní plochu vozidla stanovit z jeho vnějších rozměrů, konkrétně z rozchodu kol $B_{rk} = 1,463 \text{ m}$ a celkové výšky vozidla $H_v = 1,467 \text{ m}$. To vede ke vztahu:

$$S_x = B_{rk} \cdot H_v = 1,463 \cdot 1,467 \doteq 2,146 \text{ m}^2 \quad (4.8)$$

4.2.4. Rozměr kol a celkový převodový poměr modelu vozidla

Nakonec zbývá určit rozměry kol potřebných k výpočtu ramene hnací síly pohonné jednotky a celkového převodového poměru. Rozměr kol vyčtu podle rozměrů pneumatik z katalogu [12]. Asi nejběžnějším rozměrem jsou v tomto případě 15-ti palcové ráfky s pneumatikami 185/60 R15, přičemž značení pneumatik znamená:

- $b_p = 185 \text{ [mm]}$ šířka pneumatiky
- $h_p = 60 \text{ [%]}$poměrná výška (profil) pneumatiky vzhledem k šířce
- Rradiální konstrukce pneumatiky
- $d_r = 15 \text{ [in]}$průměr ráfku v palcích ($15 \text{ in} = 15 \cdot 25,4 \text{ mm}$)

Velikost ramene hnací síly vozidla se stanoví součtem průměru ráfku a dvojnásobku výšky pneumatiky (profilu) podle vztahu:

$$r_k = \frac{d_k}{2} = \frac{d_r \cdot 25,4 + \left(2 \cdot b_p \cdot \frac{h_p}{100}\right)}{2} = \frac{15 \cdot 25,4 + \left(2 \cdot 185 \cdot \frac{60}{100}\right)}{2} = 301,5 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Volba celkového převodového poměru závisí hlavně na momentové charakteristice pohonné jednotky vozidla. PMSM bude provozováno v oblasti konstantního točivého momentu, tudíž rozhodující pro volbu celkového převodového poměru jsou jmenovité otáčky PMSM. Předpokládám jednostupňový převod, který bude vozidlu zajišťovat maximální rychlost $v_{max} = 100 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ při jmenovitých otáčkách elektromotoru $n_n = 5000 \text{ min}^{-1}$. Celkový převodový poměr se vypočte podle vztahu (d_k dosazeno v metrech):

$$i_c = \frac{60 \cdot \pi \cdot d_k \cdot n_n}{1000 \cdot v_{max}} = \frac{60 \cdot \pi \cdot 0,603 \cdot 5000}{1000 \cdot 100} \doteq 5,68 \quad (4.10)$$

4.3. Model jízdních odporů vozidla v Simulinku

Z matematických rovnic jízdních odporů vozidla v kapitole 4.1 a parametrů vozidla z kapitoly 4.2 sestavím simulační model (blok „Subsystem“ – podsystém) v softwaru MATLAB/Simulink. Vstupní porty tohoto podsystému se budou skládat z okamžité rychlosti vozidla v a úhlu stoupání α . Rychlost vozidla je nutné přepočtem pomocí převodového poměru a rozměru (průměru) hnaných kol převést z otáček elektromotoru rovnicí:

$$v = \frac{60 \cdot \pi \cdot d_k \cdot n}{1000 \cdot i_c} \quad (4.11)$$

kde:

- d_kvnější průměr kola [m]
- notáčky elektromotoru [min^{-1}]
- vrychlost vozidla [$\text{km} \cdot \text{hod}^{-1}$]

Výstup bude tvořit síla rovnající se celkovému jízdnímu odporu vozidla. Tato odporová síla bude zpětně přepočítána na zatěžovací moment M_z dle rovnice (4.12). Zatěžovací moment je přiveden na vstup elektromotoru.

$$M_z = \frac{O_c \cdot r_k}{i_c} \quad (4.12)$$

Výpočty pomocných parametrů jsou uvedeny v MATLAB skriptu (Příloha I. – A) za účelem snížení počtu simulačních bloků v Simulinku a tím i snížení náročnosti simulace na hardware počítače. Simulační schéma jízdních odporů vozidla vykresluje (Obr. 4.2).

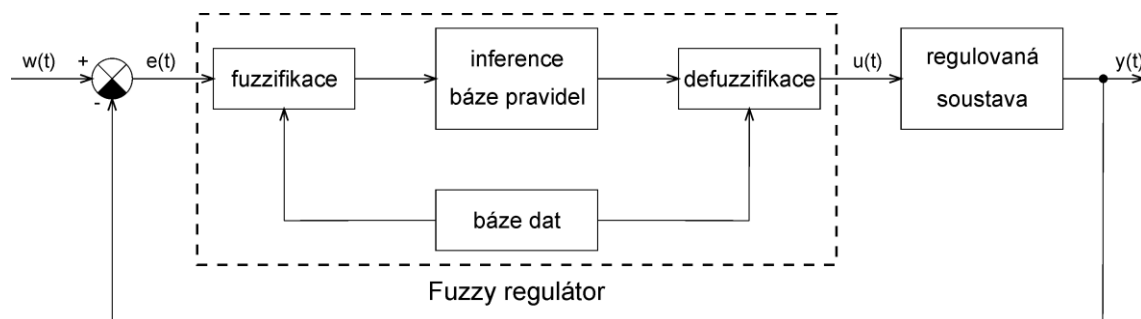
5. FUZZY REGULÁTOR

V této kapitole bude rozebrán podle [13] princip činnosti fuzzy regulátoru a jeho vnitřní uspořádání a mechanismy – vnitřní popis fuzzy regulátoru. Příklady k jeho rozboru uvedu v poslední části této kapitoly.

Model fuzzy regulátoru sestavím pomocí Fuzzy Logic Toolboxu v softwaru MATLAB. Export vytvořeného modelu do knihovny proměnných (MATLAB/Workspace) umožní, aby s ním mohlo být dále pracováno, konkrétně bude model fuzzy regulátoru načten do simulačního obvodu v Simulinku.

5.1. Princip fuzzy regulátoru

V této podkapitole nastíním fuzzy regulátor jakožto sestavu skládající se z jednotlivých součástí (bloků). Přes tyto bloky prochází vstupní data, která jsou v nich zpracována, následně vyhodnocena a přiřazena určitým výstupním hodnotám akčního zásahu do regulované soustavy. Schéma vnitřních bloků s návazností na regulovanou soustavu jsou na (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 – Obecné schéma regulačního obvodu s vnitřní strukturou fuzzy regulátoru

5.1.1. Fuzzifikace

Vstupní data (například regulační odchylka $e(t)$) směřující do fuzzy regulátoru jsou „předzpracována“ v bloku fuzzifikace. Fuzzifikace je proces, při němž dochází k převodu hodnot vstupních dat na fuzzy čísla pomocí funkcí příslušnosti daných univerz. To, jakým způsobem se vstupní data fuzzy číslům přiřadí, je dáno informacemi obsaženými v bázi dat, které jsou při fuzzifikaci využity.

Do procesu fuzzifikace může patřit i podproces zvaný normalizace. Proces normalizace spočívá ve změně měřítek vstupních dat na normalizované rozsahy univerz (například interval $\langle -1; 1 \rangle$ apod.).

5.1.2. Inferenční mechanismus a báze pravidel

Fuzzifikovaná vstupní data přecházejí do „jádra“ fuzzy regulátoru – proces inference a báze pravidel. Báze pravidel obsahuje nástroje (pravidla), které definují závislosti mezi vstupy a výstupy. Operace s fuzzy množinami a aplikace pravidel již probíhají s jazykovými proměnnými. Pravidla jsou vyjádřena ve formě výroků JESTLIŽE (výrok o stavu vstupů) PAK (výrok o důsledku – akční zásah, výstup). Stav vstupů může reprezentovat přímo některá ze vstupních proměnných nebo logickými operacemi (včetně jejich negovaných variant) konjunkce (AND) a disjunkce (OR) mezi vstupními proměnnými. Rovněž výstupní hodnota může mít negovanou hodnotu.

Dalším úkonem je inference. Na základě báze pravidel inferenční mechanismus z již zpracovaných fuzzy hodnot určí výstupní fuzzy množinu. To se děje s použitím určité inferenční metody. Typ použité inferenční metody rozhoduje také o typu fuzzy regulátoru. To znamená, že fuzzy regulátory se rozlišují nejen z hlediska vnější dynamiky (zda se jedná o P, PI, PD, PID regulátor) jako klasické regulátory, ale také z hlediska typu použité inferenční metody v inferenčním mechanismu.

V oblasti fuzzy regulátorů se nejčastěji používá Mamdaniho inference anebo Takagi-Sugenoova inference.

5.1.3. Defuzzifikace

Po aplikaci příslušné inferenční metody putují k dalšímu zpracování – blok defuzzifikace. Úkolem tohoto bloku je převést výsledné funkce příslušnosti po inferenci na akční zásah – výpočet výstupní hodnoty regulátoru. Proces defuzzifikace k tomu využívá vhodné defuzzifikační metody, které jsou dvojího typu. Buď z funkcí příslušnosti hledáme výsledek na základě nejvýznamnějšího maxima a jeho polohy v univerzu anebo na základě těžiště (těžiště maxim nebo těžiště ploch).

Pokud byla vstupní data na vstupu fuzzy regulátoru (blok fuzzifikace) normalizována, posledním krokem k definitivnímu určení výstupní hodnoty je denormalizace – přiřazení fyzikálního významu výsledku defuzzifikace.

5.1.4. Báze dat

Báze dat obsahuje zejména údaje o vstupních a výstupních proměnných, tzn. všechny fuzzy množiny a jejich funkce příslušnosti, univerza funkcí příslušnosti, intervaly a měřítka, ve kterých se vstupní a výstupní veličiny pohybují, pro normalizaci a denormalizaci.

5.2. Sestavení modelu fuzzy regulátoru

Vnější popis fuzzy regulátoru se přeneseně z problematiky klasických regulátorů týká dynamiky. Pro danou aplikaci se jeví jako nejvhodnější fuzzy PI regulátor. V případě fuzzy PI regulátoru jsou vstupy a výstupy reprezentovány dvěma vstupními a jednou výstupní veličinou. Skladba vstupních veličin:

- regulační odchylka $e(t)$,
- změna (derivace v čase) regulační odchylky $\frac{de(t)}{dt}$.

Výstupní veličina fuzzy PI regulátoru:

- derivace v čase akčního zásahu $\frac{du(t)}{dt}$ regulátoru do regulované soustavy.

Výstupní veličinu $\frac{du(t)}{dt}$ fuzzy PI regulátoru je nutno integrovat, aby bylo dosaženo akčního zásahu. Pokud by výstup z regulátoru zůstal neintegrován, jednalo by se o fuzzy PD regulátor. Ladění regulátoru probíhá pomocí zesílení vstupních a výstupních veličin.

Návrh fuzzy regulátoru volím Mamdaniho typu a bude sloužit k regulaci rychlosti vozidla. Vozidlo představuje model jízdních odporů z kapitoly 4.3 jakožto zatěžovací moment pohonné jednotky vozidla. Pohonnou jednotkou tohoto vozidla je PMSM, jehož matematický model byl sestaven v kapitole 3. Vstupní veličiny fuzzy regulátoru tvoří regulační odchylka rychlosti vozidla a její derivace v čase. Akční zásah regulátoru bude požadovanou hodnotou veličiny proudu v ose q PMSM a zároveň vstupem klasického PI regulátoru proudu osy d elektromotoru. Schéma celého simulačního obvodu bude uvedeno v následující kapitole.

5.2.1. Návrh funkcí příslušnosti vstupních a výstupních veličin

Matematické operace probíhající ve fuzzy regulátoru jsou složitější a časově náročnější oproti klasickým regulátorům. Proto je žádoucí, aby navržený regulátor byl co „nejméně komplikovaný“. To znamená vytvořit jen tolik funkcí příslušnosti, kolik je nutných. S počtem funkcí příslušnosti vstupních veličin úzce souvisí i počet pravidel. Jestliže uvažujeme pravidla jako kombinace jednotlivých vstupních funkcí příslušnosti, počet pravidel se bude rovnat:

$$P_{\sigma} = \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \dots \cdot \sigma_n \quad (5.1)$$

kde:

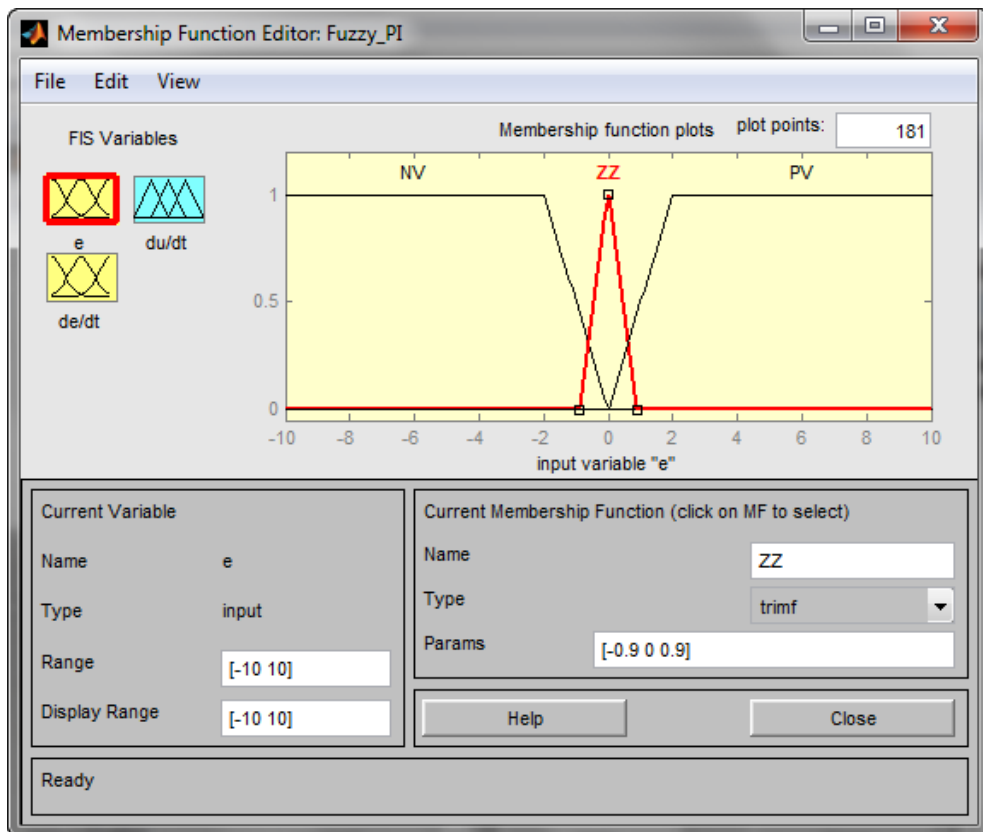
- P_{σ} počet pravidel
- σ_1 počet funkcí příslušnosti vstupní proměnné 1
- σ_2 počet funkcí příslušnosti vstupní proměnné 2
- σ_n počet funkcí příslušnosti vstupní proměnné n

Platí, že čím více funkcí příslušnosti, tím více pravidel a tím větší časová náročnost na zpracování. Můžou však nastat situace, kdy se počet pravidel zredukuje a to tím, že některé kombinace funkcí příslušnosti například z podstaty regulované soustavy (a zároveň vstupních a výstupních veličin regulátoru) nemohou fyzikálně nastat. Dále jsou to situace, kdy se pravidla opakují – duplicitní pravidla.

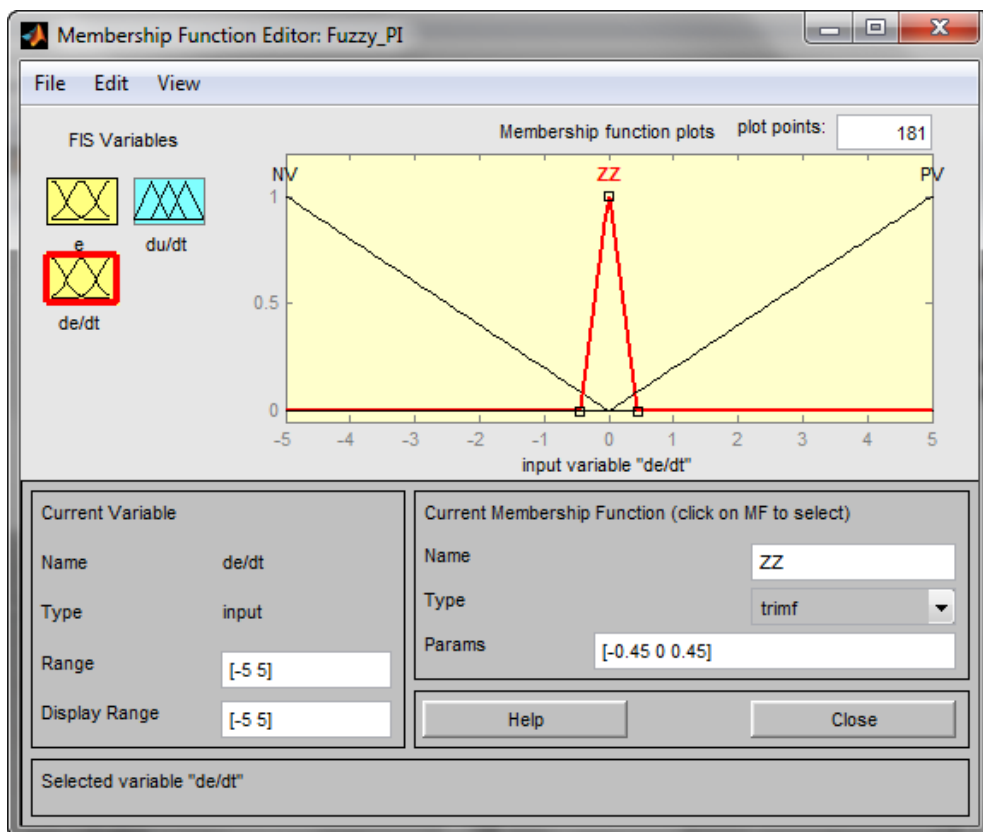
Výpočetní náročnost ovlivňuje také tvar funkcí příslušnosti. Přehled tvarů lze vyčíst například z FIS (Fuzzy logic Inference System) editoru v MATLABu nebo je uvádí autor v [12]. Doporučuje se volit spíše jednodušší tvary funkcí příslušnosti (trapézový nebo trojúhelníkový), které také v návrhu fuzzy regulátoru použijí.

Nejprve navrhnu rozsahy univerz a funkce příslušnosti pro vstupní veličiny, tzn. regulační odchylku rychlosti vozidla $e_{(t)}$ a její změnu v čase (derivaci podle času) $\frac{de_{(t)}}{dt}$. Pro $e_{(t)}$ volím rozsah univerza v intervalu $\langle -10; 10 \rangle$ a tři funkce příslušnosti (jedna trojúhelníková a dvě lichoběžníkové), které vyobrazuje (Obr. 5.2), lingvistická aproximace funkcí příslušnosti bude zmíněna na straně 44.

Pro $\frac{de_{(t)}}{dt}$ volím poloviční univerzum v intervalu $\langle -5; 5 \rangle$ a tři funkce příslušnosti trojúhelníkových tvarů (Obr. 5.3).



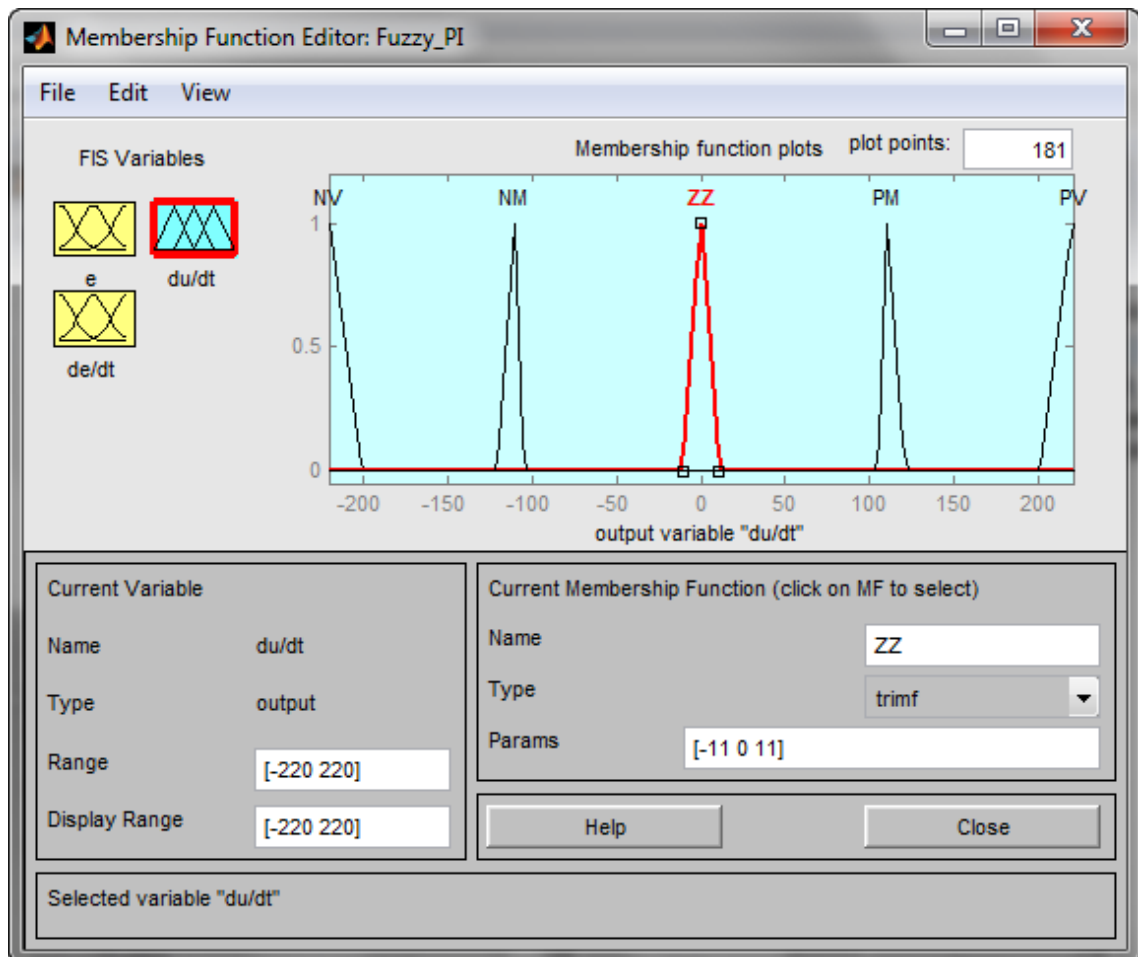
Obr. 5.2 – Univerzum a funkce příslušnosti pro regulační odchylku $e_{(t)}$



Obr. 5.3 – Univerzum a funkce příslušnosti pro derivaci regulační odchylky $\frac{de_{(t)}}{dt}$

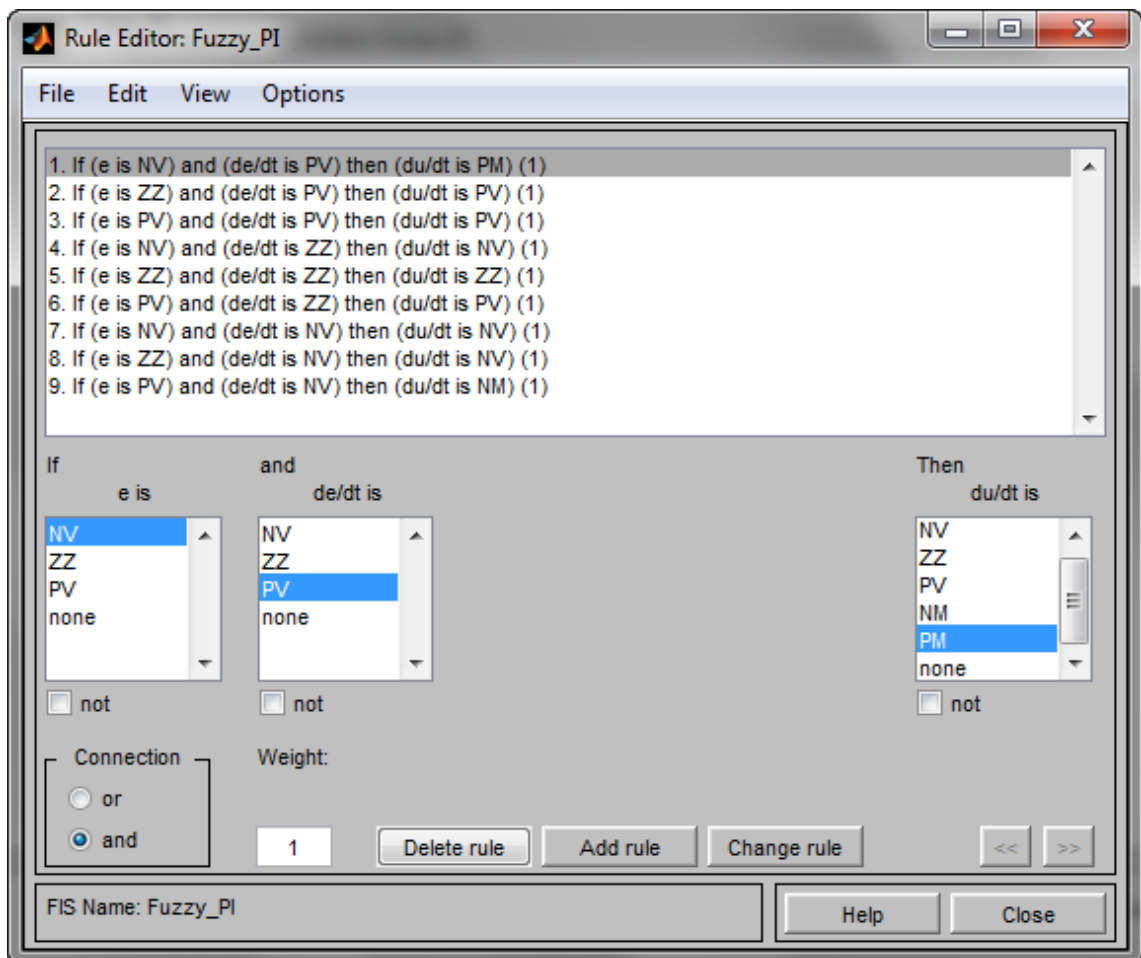
K určení univerza výstupní proměnné $\frac{du(t)}{dt}$ využiji hodnotu maximálního fázového proudu ze štítku elektromotoru (Obr. 3.2), která čítá 210 A. Navrhuji tedy univerzum s intervalem $\langle -220; 220 \rangle$, což se jedná o přibližně 4,7 % „snesitelného“ proudového přetížení. Počet funkcí příslušnosti pro $\frac{du(t)}{dt}$ volím v tomto případě pět (Obr. 5.4), vedlo mě k tomu dosažení lepších výsledků při simulacích. Jazykové proměnné po lingvistické aproximaci:

- NV negativní velká
- NM negativní malá
- ZZ nula
- PM pozitivní malá
- PV pozitivní velká

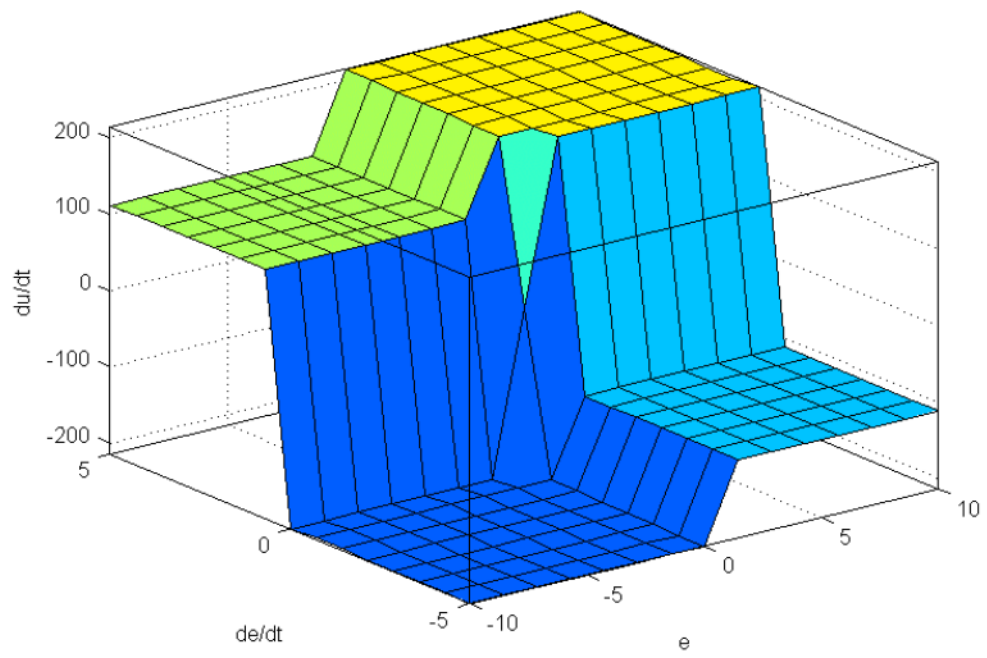


Obr. 5.4 – Univerzum a funkce příslušnosti pro derivaci akční veličiny $\frac{du(t)}{dt}$

Po návrhu univerz a funkcí příslušnosti vstupních a výstupních veličin zbývá ještě vytvořit pravidla v bázi pravidel, podle kterých inferenční mechanismus fuzzy regulátoru stanoví fuzzy množinu připravenou k následné Mamdaniho inferenční metodě („výpočtu výsledné hodnoty“). Z celkem šesti funkcí příslušnosti vstupních proměnných vyplývá devět pravidel potřebných k vytvoření báze pravidel. K jejich kombinacím bude přiřazeno pět funkcí příslušnosti výstupní proměnné. Pravidla lze vidět na následující straně v textové podobě na (Obr. 5.5) anebo v grafické variantě v podobě povrchu na (Obr. 5.6).



Obr. 5.5 – Textové zobrazení pravidel



Obr. 5.6 – Grafické zobrazení pravidel

6. SIMULAČNÍ OBVOD

V této kapitole sestavím simulační obvod za účelem vyšetření vlastností řízení elektromotoru fuzzy PI regulátorem Mamdaniho typu a následným srovnáním s klasickým PI regulátorem. Simulační obvod (*Obr. 6.1*) se bude skládat z dílčích modelů („Subsystem“ – „podsystem“) sestavených v předešlých kapitolách. Ve výčtu položek (kurzívou v závorkách se nachází název, jak je mám označené v simulačním obvodu v Simulinku) v pořadí zleva doprava dle umístění v simulačním obvodu (*Obr. 6.1*) se jedná o:

- model fuzzy PI regulátoru Mamdaniho typu z kapitoly 5.2 (*Fuzzy Controller*)
- model synchronního elektromotoru s permanentními magnety spolu s modely Clarkovy a Parkovy transformace z kapitoly 3.2 (podsystemy *PMSM Model*, *abc→dq transform* a *dq→abc transform*),
- model jízdních odporů vozidla (*Jízdní odpory*) z kapitoly 4.3.

Vedle simulačního obvodu s fuzzy PI regulátorem sestavím pro porovnání vlastností řízení tentýž simulační obvod s klasickým PI regulátorem.

6.1. Sestavení simulačního obvodu

Do podsystemu *Fuzzy Controller* jsem zavedl jistá omezení způsobená jednak jmenovitými hodnotami proudů statorového vinutí elektromotoru, ale také vlivem zajištění správného fungování regulátoru. Akční veličinou regulátoru je žádaná hodnota proudu I_q^* . Přestože je její maximální hodnota ± 220 A omezena rozsahem univerza akčního zásahu ve vlastním fuzzy regulátoru, vlivem nastavení zesílení derivace akčního zásahu hrozí překročení této hodnoty. Překročení této hodnoty není přípustné s ohledem na zajištění nespálení statorového vinutí. Proto jsem integrátor výstupní veličiny fuzzy PI regulátoru opatřil omezujícím blokem „Saturation“ s omezením na propustnost „signálů“ v intervalu $\langle -220; 220 \rangle$. Stejným způsobem omezují vstupní veličiny fuzzy PI regulátoru. V případě vstupních veličin je to z důvodu, aby hodnoty vstupních veličin nepřesahovaly rozsahy univerz vstupních veličin fuzzy PI regulátoru.

Na podsystem *Fuzzy Controller* navazuje podsystem s klasickými PI regulátory proudu I_d a I_q . Tyto proudy se navzájem ovlivňují, mají mezi sebou vazby. Proto jsem k regulátorům proudů přidal obvod (*Rozvazbení proudu dq*), který slouží k „rozvazbení“

regulace proudů I_d a I_q podle [8]. Tento obvod by měl zajišťovat vzájemně nezávislou regulaci těchto proudů. Aby rozvazující obvod přinesl plný účinek svého účelu, bylo by nutné udělat nastavení koeficientů proporcionální a integrační složky PI regulátorů proudu odpovídající dané situaci (parametry elektromotoru nebo dalších obvodů, například střídače), ale toto nastavení by bylo nad rámec této práce. Nastavením regulátorů se tedy nebudu zabývat a použiji nastavení, které se zdálo býti přijatelné a které bylo použito v simulačním obvodu doc. Ing. Martinem Novákem, Ph.D., tedy:

- hodnota proporcionální složky $P = 3$
- hodnota integrační složky $I = 1$

Další podsystémy v pořadí ($dq \rightarrow abc$ transform a *PMSM Model*) není třeba dále rozvádět. Na podsystém *PMSM Model*, respektive jeho výstup ve formě otáček rotoru, navazuje přepočítání z radiánů za sekundu (zelený blok – zesílení) na otáčky rotoru za minutu a dále s pomocí navržených parametrů vozidla z kapitoly 4.2 přepočítán podle rovnice (4.11) na rychlost vozidla v kilometrech za hodinu. „Signál“ rychlosti vozidla putuje do podsystému *Jízdní odpory*. Výstup podsystému *Jízdní odpory* prochází ve formě odporové síly F_o přes přepočítání na zatěžovací moment do vstupního portu podsystému *PMSM Model*. Celý simulační obvod lze vidět na (*Obr. 6.1*).

Simulační situace navrhu s ohledem na možnosti vzniku reálných situací v důsledku jízdy vozidla. Tím mám na mysli zejména požadovanou hodnotu rychlosti vozidla v souvislosti s jeho zrychlením. Dosažení požadované hodnoty rychlosti vozidla budu uvažovat jednak za minimální možný časový úsek (maximální zrychlení), ale také za „běžný“ časový úsek. Za běžný časový úsek dosažení požadované hodnoty rychlosti považuji takový, který jsem sám změřil. Jedná se tedy o můj vlastní subjektivní pohled a záleží na konkrétní osobě, zejména stylu jízdy jednotlivých lidí, který se samozřejmě u každého řidiče liší návyky a požadavky na z toho plynoucí komfort.

Zmíněný běžný časový úsek jsem naměřil se svým vozidlem při rozjezdu z nulové počáteční rychlosti a pomocí stopky jsem zaznamenával mezičasy při dosažení hodnot rychlosti vozidla $50 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$, $80 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ a $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$. Výsledky tohoto měření jsou vyneseny v (*Tab. 7.1*) na straně 60. Měření bylo provedeno na podélně vodorovné vozovce – tzn. s nulovým stoupáním.

Maximální zrychlení vozidla s navrženými parametry a použitým elektromotorem, které je schopné vyvinout, je přibližně $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Obecně sledovaný časový údaj zrychlení

Ohledně nastavení simulačních parametrů řešitele v Simulinku jsem dbal na cenné rady od doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. a také podle [6]. Bylo mi doporučeno použít řešitele pro tzv. „stiff“ systémy. Pojmem „stiff“ (obtěžně řešitelné) systémy se označují takové modely, jejichž póly mají velmi rozdílné moduly. Velmi rozdílnými moduly je myšlen podíl pólu s maximálním modulem ku pólu s minimálním modulem. Za „stiff“ systémy se považují takové modely, u kterých se tento podíl rovná hodnotě větší než 100. Celé nastavení řešitele („Solveru“) lze vidět na (Obr. 6.2).

Obr. 6.2 – Nastavení simulačního řešitele v Simulinku

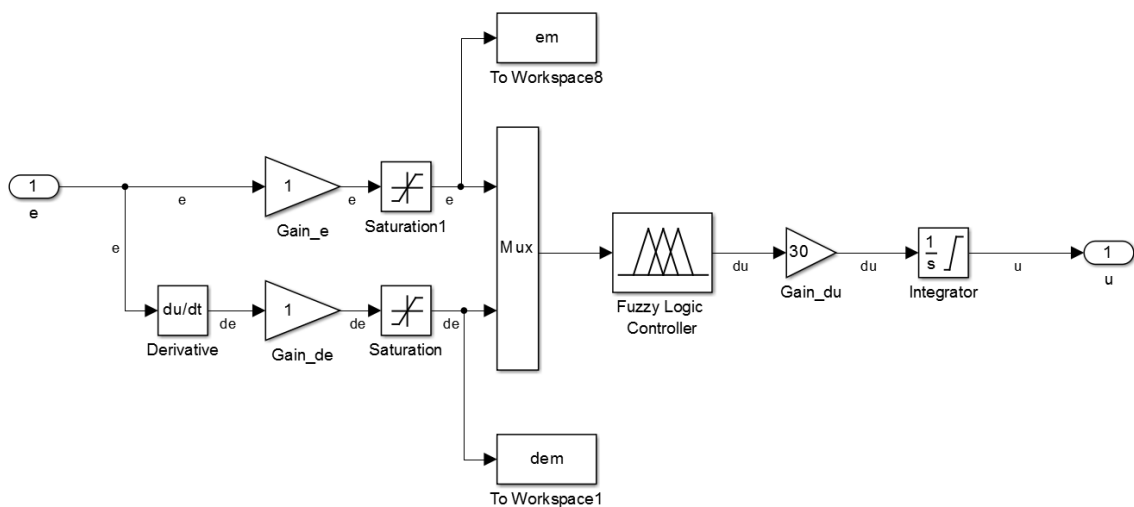
Sběr dat veličin ze simulací jsem provedl dvěma možnostmi. První variantu s průběžným vykreslováním do bloků „Scope“ považuji spíše za informativní. Druhou variantu ve formě uložení dat do pracovního prostoru MATLAB/Workspace považuji za sofistikovanější metodu k vyhodnocení výsledků a jejich formální úpravy. Veličiny jsou ukládány v podobách sloupcových vektorů. Odlišil jsem tyto exportované veličiny indexem (nebo spíše dodatkem k označení veličin) „m“ – měřené (např. I_{am} – sloupcový vektor naměřených dat proudu ve fázi a).

Zpracování simulačních dat zpracovává skript na přiloženém CD (soubory s názvy typu „Simulace(číslo simulace)_(typ regulátoru)_Plot_data.m“ ve složce „Skripty“), který zajišťuje vykreslení hodnot veličin v závislosti na simulačním čase do grafů a také patričné formální úpravy. Z formálních náležitostí bych zmínil údaj pod hlavním názvem grafu, který ve stručnosti popisuje nastavené podmínky simulací (například

požadovaný průběh rychlosti vozidla, stoupání vozovky, přítomnost protivětru). Pro každé nastavení parametrů simulace je vytvořen samostatný skript.

6.1.1. Seřízení fuzzy PI regulátoru

Po sestavení simulačního obvodu je ještě třeba nastavit parametry zesílení vstupních a výstupních veličin fuzzy PI regulátoru – seřízení. Vycházel jsem z hodnot zesílení jedna. Z několika zkušebních simulací jsem dospěl k seřízení, které vedlo k dosažení co nejlepšího průběhu regulační odchylky. Výsledné seřízení i se simulačním schématem fuzzy PI regulátoru se nachází na (Obr. 6.3).



Obr. 6.3 – Simulační schéma a seřízení fuzzy PI regulátoru

6.1.2. Seřízení klasického PI regulátoru

Simulační obvod s klasickým PI regulátorem bude tentýž jako na (Obr. 6.1), pouze nahradím blok *Fuzzy Controller* blokem klasického PI regulátoru. Seřízení tohoto regulátoru provedu taktéž na základě provedení několika zkušebních simulací. Nejlepšího průběhu regulační odchylky a regulačních vlastností jsem dosáhl se seřízením:

- $P = 38$ hodnota proporcionální složka klasického PI regulátoru
- $I = 1$ hodnota integrační složka klasického PI regulátoru

7. NÁVRH A PROVEDENÍ SIMULACÍ

Jak jsem již zmínil v předchozí části (kap. 6.1), budu při návrhu simulačních situací vycházet z vlastních naměřených časových údajů „klidného“ rozjezdu a z navržených modelových situací. Tyto modelové situace by měly zajistit dostatečné zkoumání vlastností řízení otáček, respektive rychlosti vozidla, použitého elektromotoru fuzzy regulátorem v nasazení pro pohon sestaveného modelu vozidla. Vlastnosti řízení budou vyhodnoceny a následně srovnány s řízením shodné soustavy klasickým PI regulátorem.

Provedu celkem čtyři simulační situace, vždy s výchozím stavem nulové počáteční rychlosti vozidla. Výčet a popis simulačních situací obsahují následující odstavce. Grafy průběhů jednotlivých veličin bude pod názvy grafů obsahovat stručný popis simulačních parametrů. Sledované veličiny v simulacích:

- regulační odchylka $e(t)$ rychlosti vozidla
- derivace podle času regulační odchylky $\frac{de(t)}{dt}$ (pouze u fuzzy PI regulátoru)
- akční zásah regulátoru $u(t) = I_q^*$
- průběh fázových proudů statoru elektromotoru I_a, I_b, I_c
- jízdní odpory vozidla O_f, O_x, O_z, O_s
- zatěžovací moment elektromotoru M_z
- průběh zpětných elektromotorických napětí ve fázích U_a, U_b, U_c
- otáčky elektromotoru ω
- požadovaná rychlost vozidla v^* , skutečná rychlost vozidla v

Do této kapitoly hlavní části práce uvedu průběhy s požadovanou v^* a skutečnou rychlostí vozidla v . Pro lepší pozorování průběhů sledované rychlosti vozidla doplním tyto (celkové) grafy o detailnější pohledy. Tyto detailnější pohledy budou zobrazovat oblasti, kde dojde ke změnám průběhů požadované rychlosti vozidla anebo okolností, které mají za následek změny hodnot jízdních odporů (například změna podélného sklonu vozovky nebo působení proudění protivětru).

7.1. Simulace 1

První simulace znázorňuje situaci zrychlení vozidla o hodnotě $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ z nulové počáteční rychlosti vozidla na $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ (trvání přibližně 12,5 sekundy)

a v simulačním čase 20 sekund následnému zpomalení vozidla o hodnotě $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ z 90-ti na $50 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ (trvání přibližně 5,5 sekundy). Vozovka je považována za podélně vodorovnou, tzn. nulové stoupání. Rychlost větru (proti nebo ve směru jízdy) se také rovná nule.

Průběhy simulace 1 s fuzzy PI regulátorem požadované v^* a skutečné rychlosti vozidla v lze pozorovat na (Obr. 7.1). Detailní pohledy jsou na (Obr. 7.2) a (Obr. 7.3). Odpovídající průběhy pro klasický PI regulátor jsou k vidění na (Obr. 7.4) a detaily rychlosti na (Obr. 7.5) a (Obr. 7.6). Výsledky ostatních sledovaných veličin simulace 1 se nacházejí v (Příloha II.) pro fuzzy PI regulátor a ke klasickému PI regulátoru náleží průběhy ostatních sledovaných veličin simulace 1 (Příloha III.).

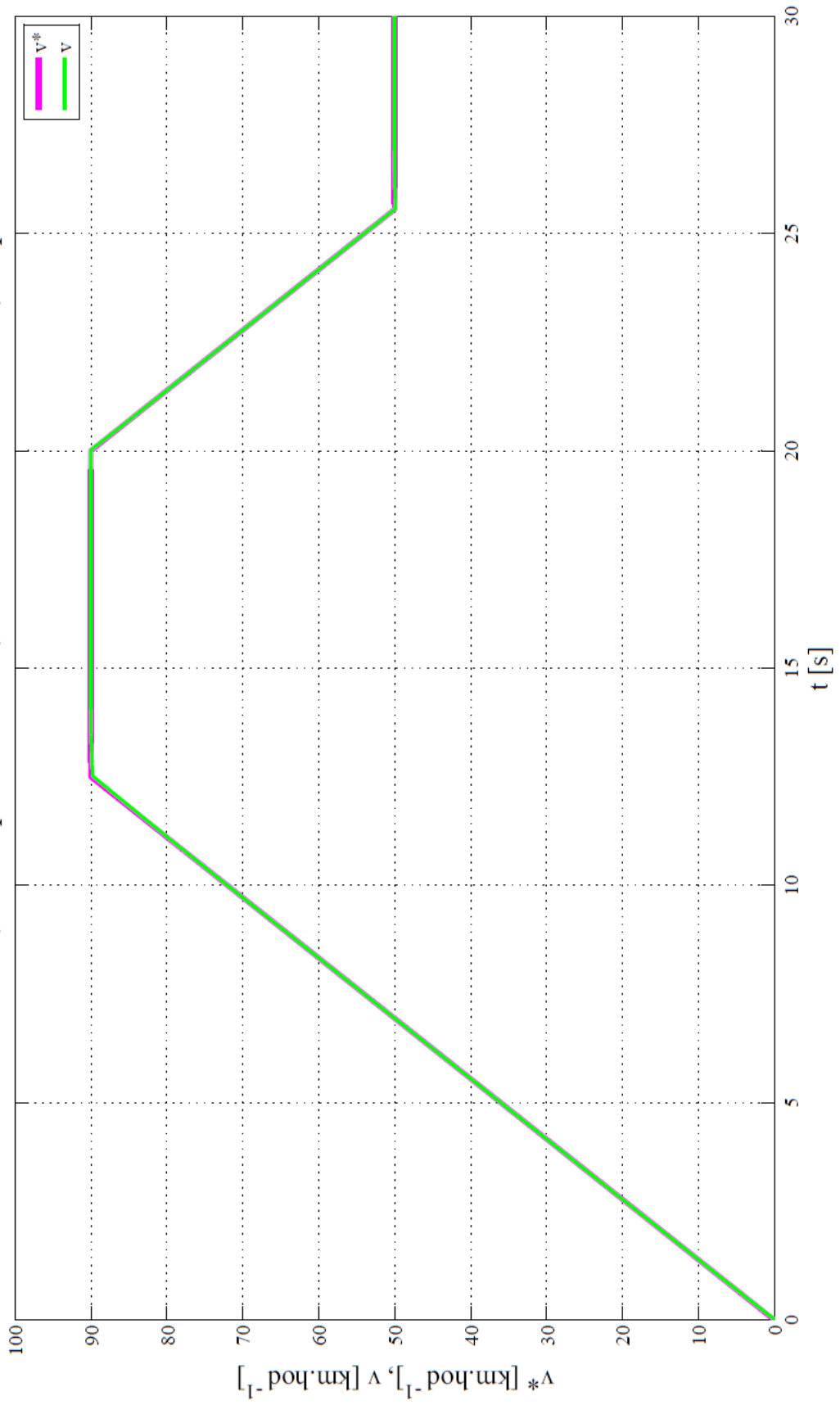
7.1.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 1

Fuzzy PI regulátor vykazuje velmi dobrý aperiodický průběh rychlosti vozidla akčního zásahu regulátoru i regulační odchylky. Při rozjezdu vozidla z 0 na $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ reaguje prakticky okamžitě a dosahuje zanedbatelné až nulové regulační odchylky od požadovaného průběhu rychlosti vozidla v^* . V okamžiku „zlomu“ (12,5 sekundy simulačního času), kdy požadovaná rychlost vozidla v^* dosahuje svého maxima $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$, dojde k poklesu akčního zásahu fuzzy PI regulátoru (Příloha II. – B). V průběhu regulační odchylky (Příloha II. – A) lze pozorovat její „nárůst“ na 0,4 %. Po uplynutí přibližně tří sekund je regulační odchylka pozvolna vyregulována. Nedojde k překmitu požadované hodnoty rychlosti vozidla v^* . Na požadované zpomalení vozidla z 90-ti na $50 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ ve 20 sekundách simulačního času reaguje fuzzy PI regulátor opět okamžitě. Ovšem tentokrát překmitne v^* přibližně o $-0,12 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$. Ustálení s nulovou regulační odchylkou proběhne opět za 3 sekundy.

V případě řízení klasickým PI regulátorem je při rozjezdu vozidla pozorovatelná doba průtahu přibližně 0,7 sekund. To se promítne i při dalších změnách v^* . Průběh rychlosti, akčního zásahu regulátoru i regulační odchylky mají též nekmitavý průběh. Regulační odchylka dosahuje při konstantní v^* zanedbatelnou hodnotu, nikoli však nulovou. Doba potřebná k vyregulování regulační odchylky je delší než 10 sekund. Celkový průběh sledovaných veličin při řízení klasickým PI regulátorem je hladší, plynulejší (oproti fuzzy PI regulátoru).

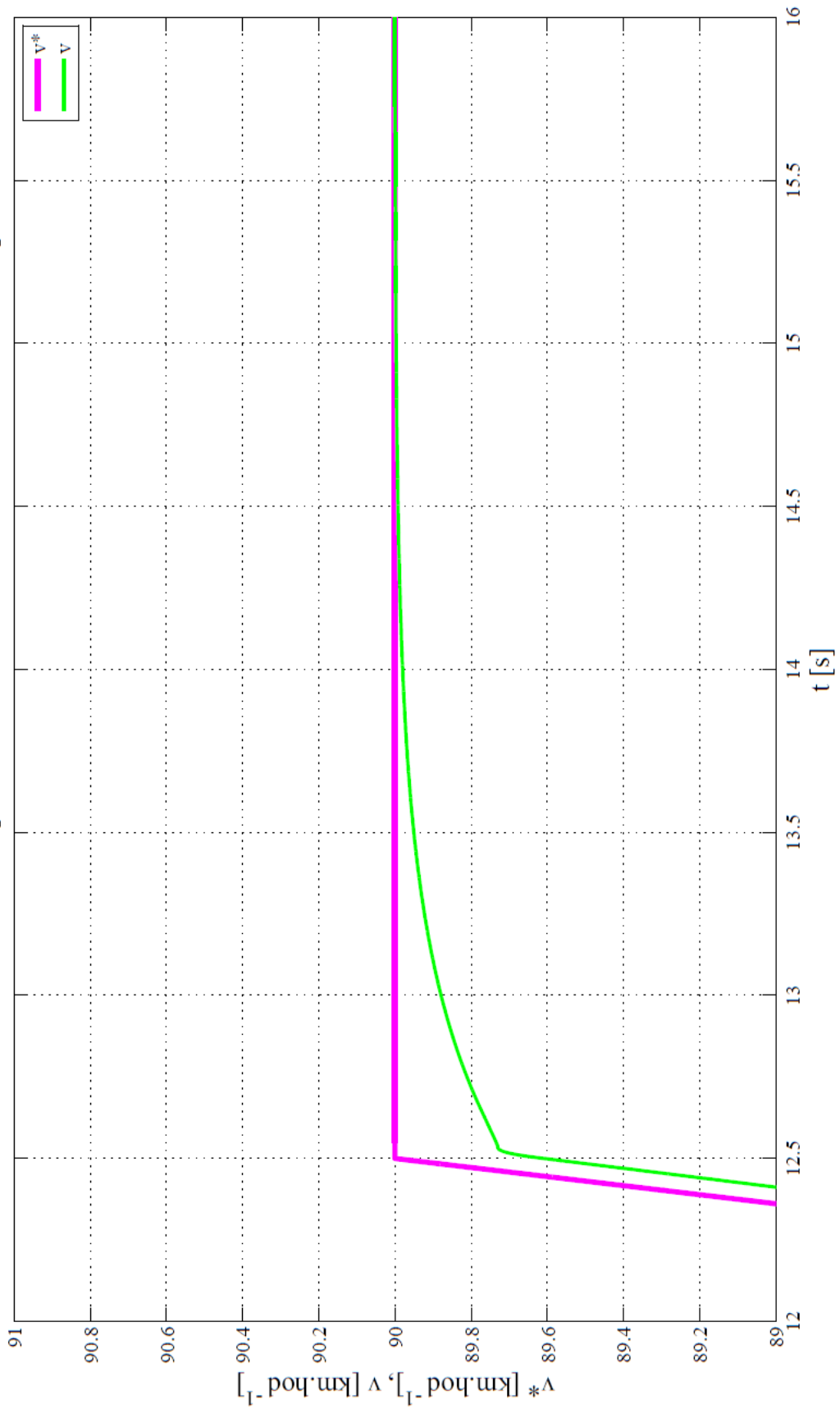
Simulace 1 s fuzzy PI reg. – Rychlost vozidla

2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; ustálení při 90 km.hod^{-1} ; 20 s -2 m.s^{-2} 90-50 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.1 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla

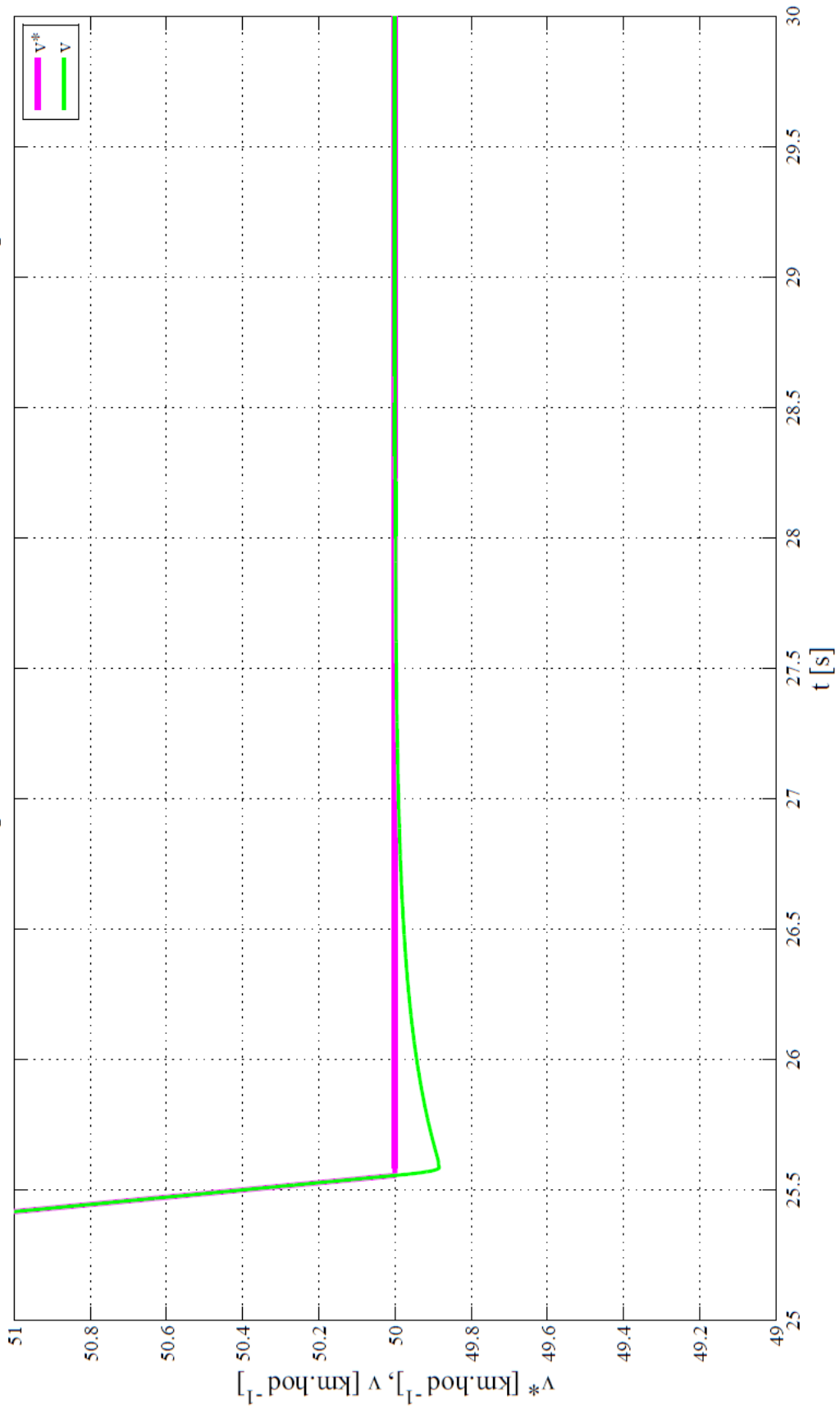
Simulace 1 s fuzzy PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla
 2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; ustálení při 90 km.hod^{-1} ; 20 s -2 m.s^{-2} 90-50 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.2 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 1 s fuzzy PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla

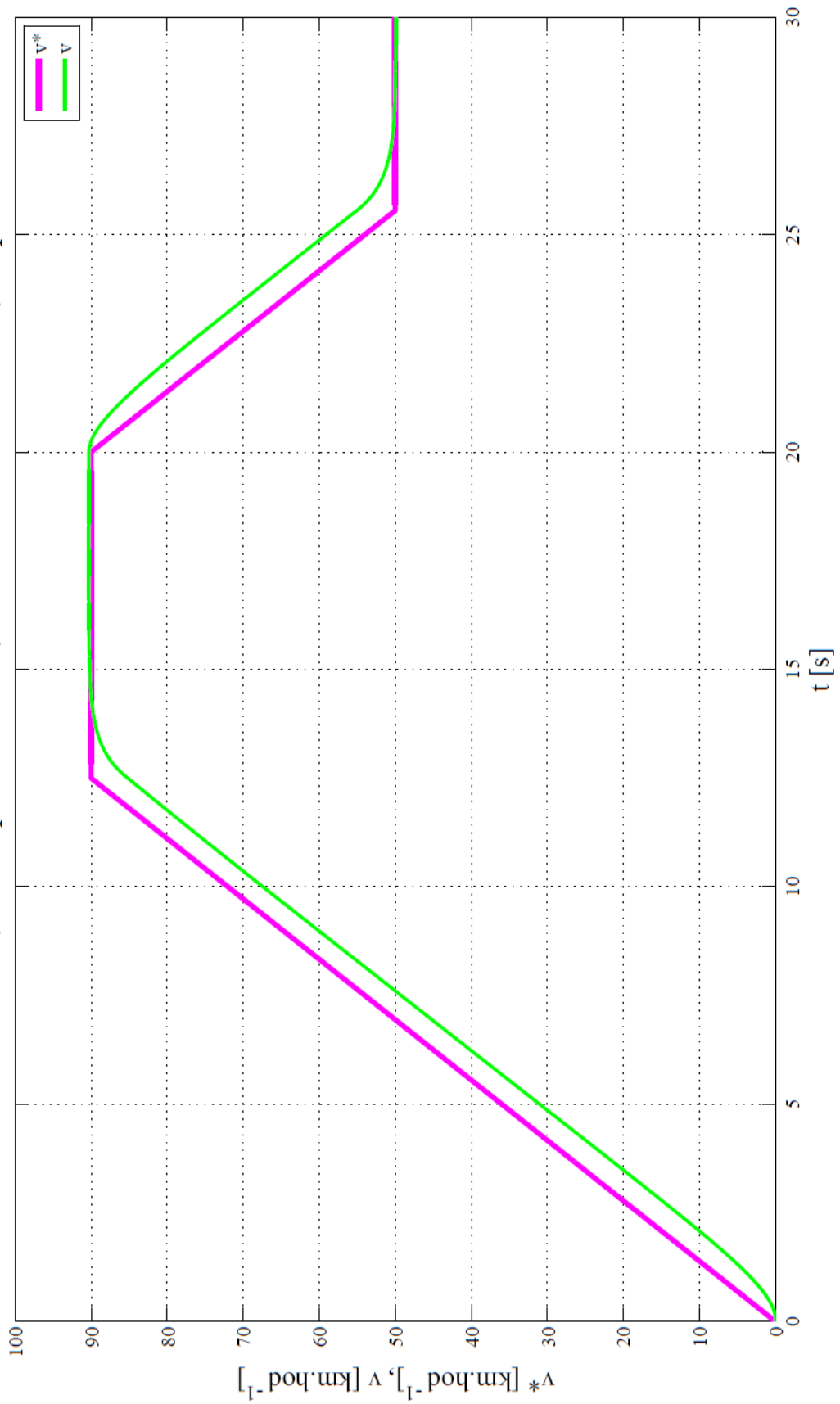
2 m.s^{-2} $0-90 \text{ km.hod}^{-1}$; $ustálení \text{ při } 90 \text{ km.hod}^{-1}$; $20 \text{ s } -2 \text{ m.s}^{-2}$ $90-50 \text{ km.hod}^{-1}$; $stoupání = 0$



Obr. 7.3 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

Simulace 1 s klasickým PI reg. – Rychlost vozidla

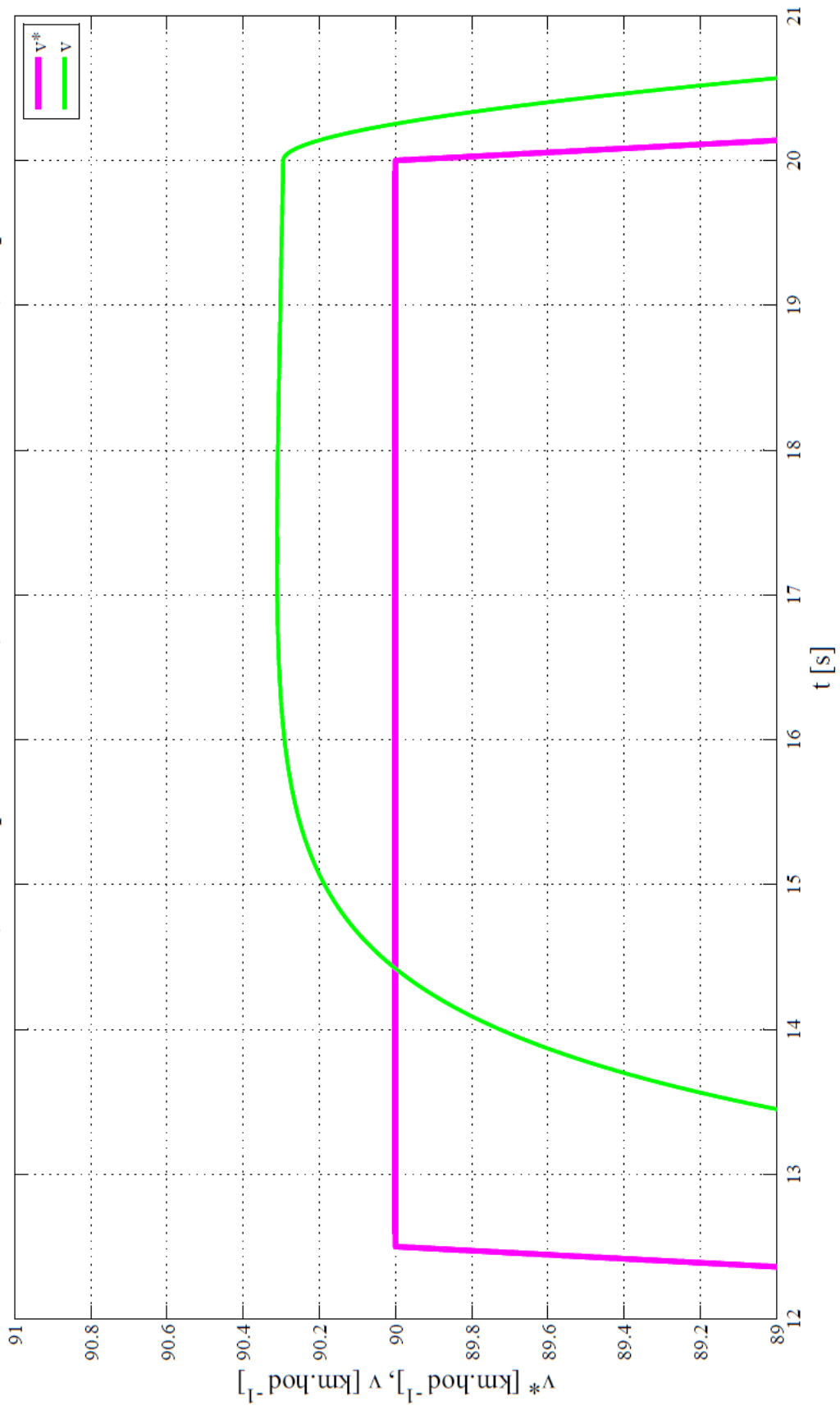
2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; ustálení při 90 km.hod^{-1} ; 20 s -2 m.s^{-2} 90-50 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.4 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 1 s klasickým PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla

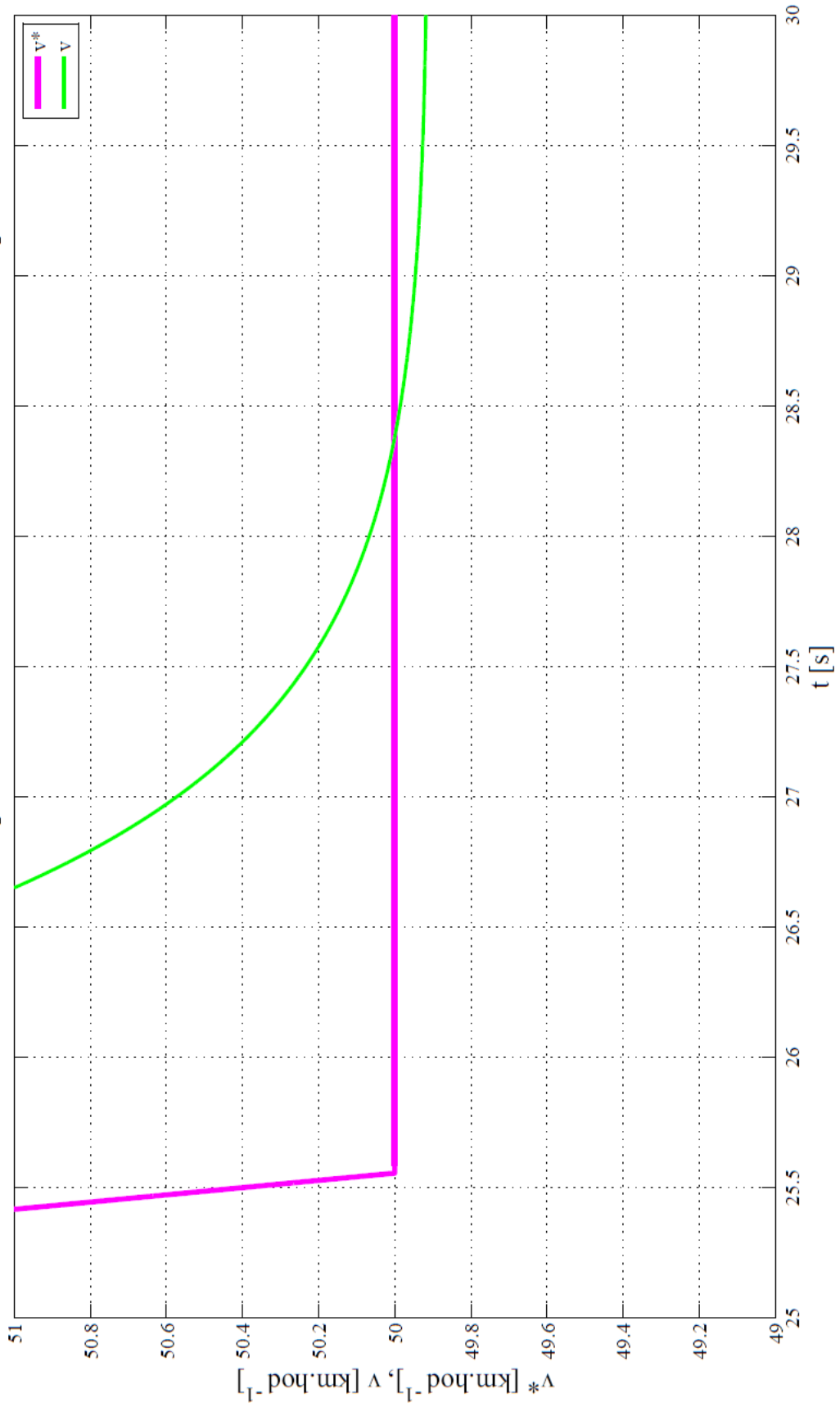
2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; ustálení při 90 km.hod^{-1} ; 20 s 2 m.s^{-2} 90-50 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.5 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 1 s klasickým PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla

2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; ustálení při 90 km.hod^{-1} ; 20 s -2 m.s^{-2} 90-50 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.6 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

7.2. Simulace 2

V pořadí druhá simulace se vztahuje k mému vlastnímu měření mezičasů při dosažení rychlostí vozidla 50, 80 a 90 km·hod⁻¹ v rámci subjektivně klidném rozjezdu vozidla z nulové počáteční rychlosti. Mezičasy a odpovídající zrychlení vozidla v jednotlivých úsecích měření se nachází v (Tab. 7.1).

Tab. 7.1 – Naměřené časy zrychlení vozidla při subjektivně klidném rozjezdu

Počáteční rychlost [km·hod ⁻¹]	Konečná rychlost [km·hod ⁻¹]	Naměřený čas [s]	Odpovídající zrychlení [m·s ⁻²]
0	50	10,9	1,27
50	80	12,7	0,66
80	90	5	0,56

Simulování tohoto průběhu požadované rychlosti vozidla je provedeno s nulovým stoupáním a nulovou rychlostí větru (proti nebo ve směru jízdy).

(Obr. 7.7) vykresluje průběh požadované v^* a skutečné rychlosti vozidla v v rámci simulace 2 s fuzzy PI regulátorem. Detailní pohledy jsou na (Obr. 7.8), (Obr. 7.9) a (Obr. 7.10). Průběhy příslušné klasickému PI regulátoru jsou k vidění na (Obr. 7.11) a detail na (Obr. 7.12). Příloha IV. obsahuje výsledky ostatních sledovaných veličin simulace 2 pro fuzzy PI regulátor a příloha Příloha V. obsahuje průběhy ostatních sledovaných veličin simulace 2 s klasickým PI regulátorem.

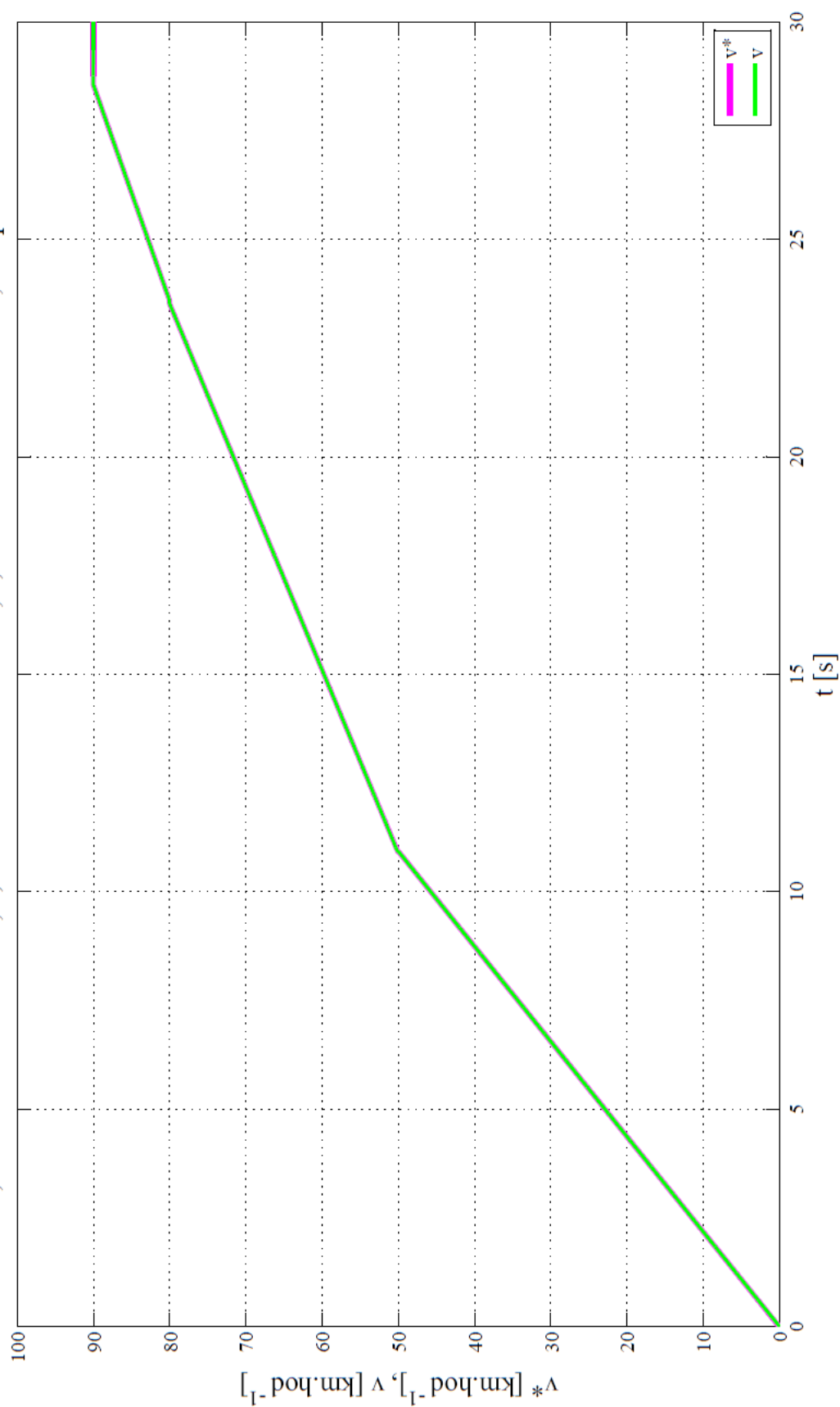
7.2.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 2

V této simulaci podle průběhu rozjezdu vozidla, který jsem stanovil na základě vlastního měření, řízení regulované soustavy fuzzy PI regulátorem vykazuje prakticky nulovou regulační odchylku v celém průběhu simulace 2. Zanedbatelný je i mírný překmit ve zlomových oblastech v^* .

U řízení klasickým PI regulátorem dochází k obdobným vlastnostem regulace jako při simulaci 1. Myslím tím dobu průtahu přibližně 0,7 sekund, průběh regulační odchylky a jejímu ustalování, a zanedbatelný 0,5% překmit při zlomu na 90 km·hod⁻¹. Opět zde můžeme pozorovat hladší průběh sledovaných veličin než u simulace 2 s fuzzy PI regulátorem.

Simulace 2 s fuzzy PI reg. – Rychlost vozidla

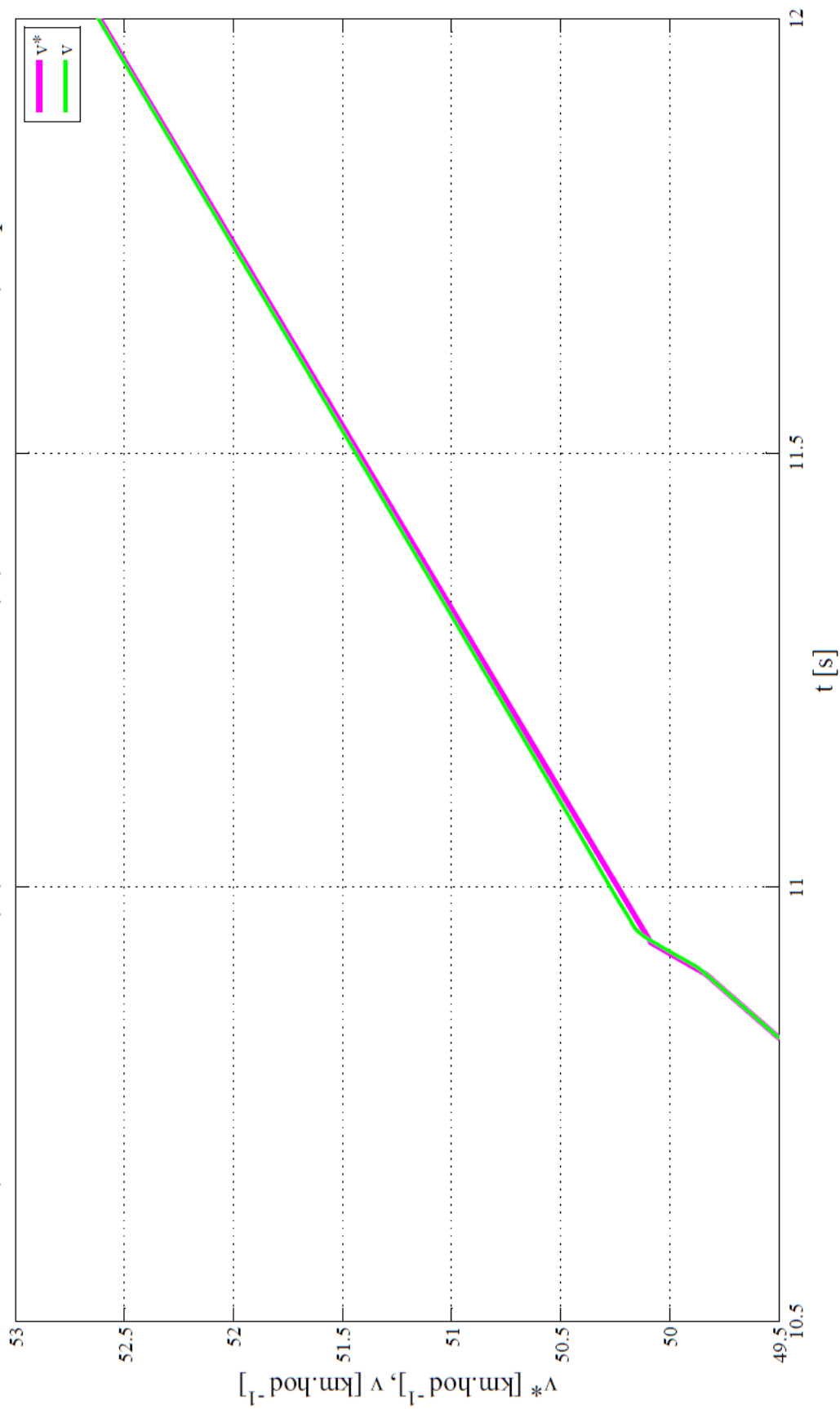
$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ 0-50 km.hod^{-1} ; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ 50-80 km.hod^{-1} ; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ 80-90 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.7 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 2 s fuzzy PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla

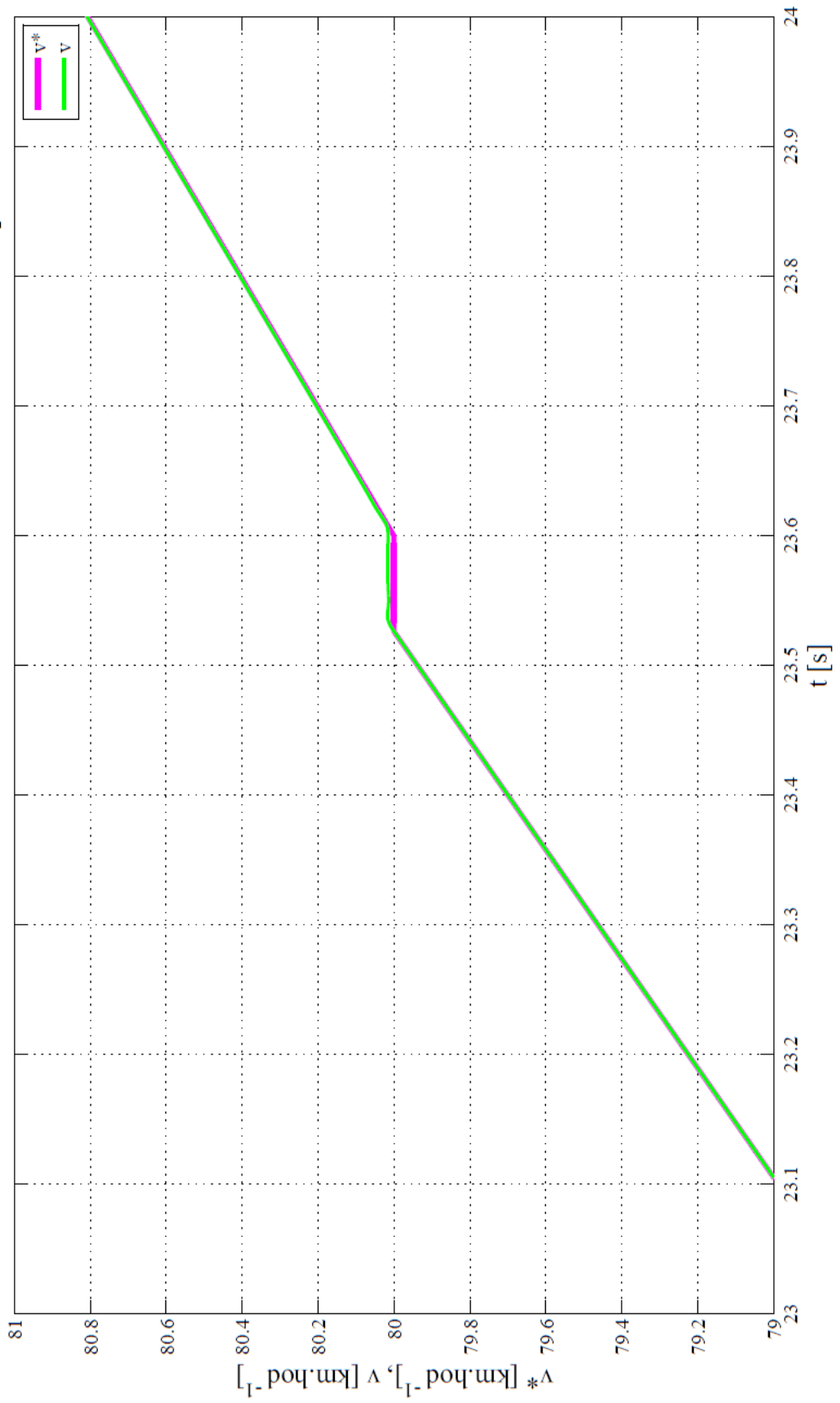
$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ 0-50 km.hod $^{-1}$; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ 50-80 km.hod $^{-1}$; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ 80-90 km.hod $^{-1}$; stoupání = 0



Obr. 7.8 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 2 s fuzzy PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla

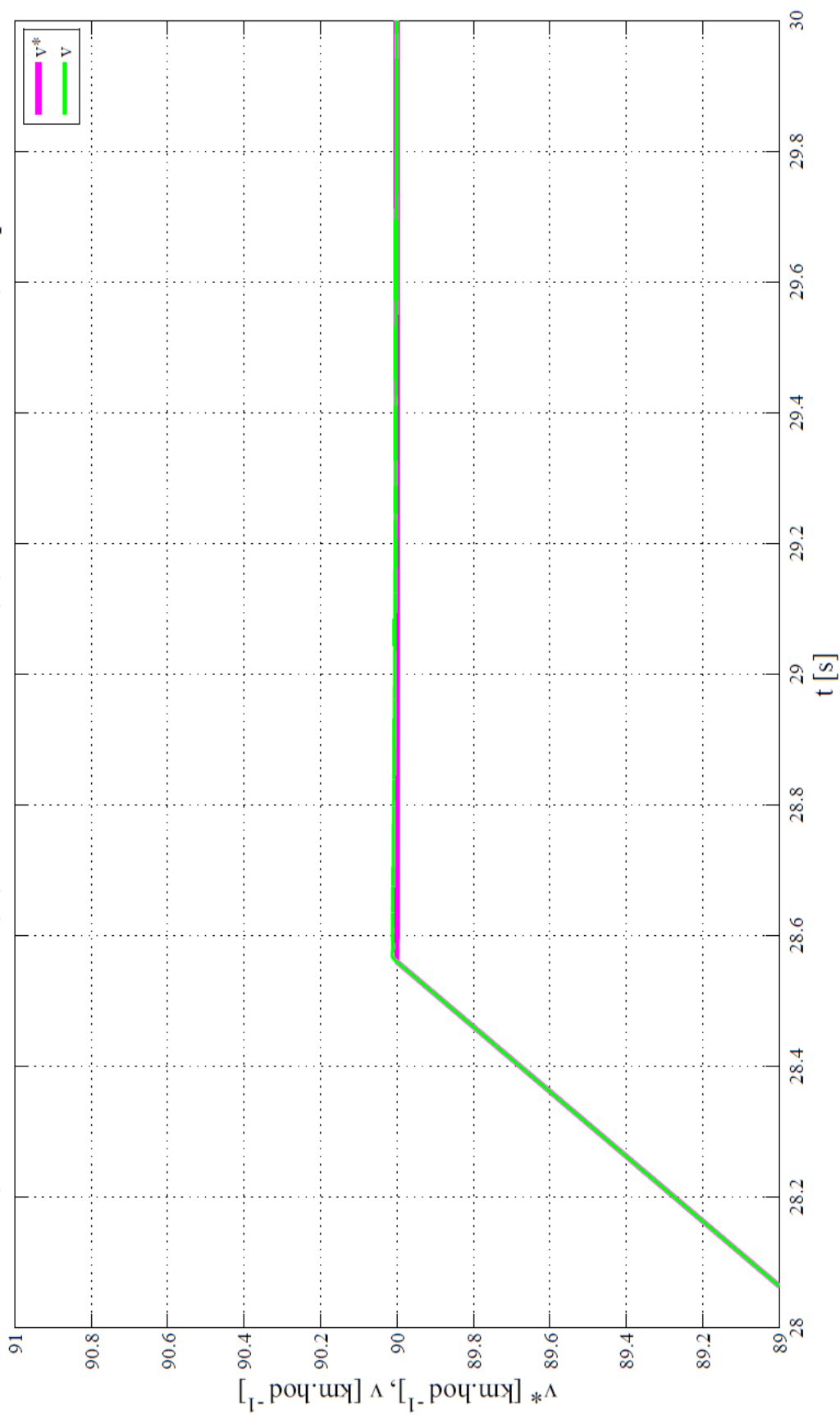
$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ 0-50 km.hod^{-1} ; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ 50-80 km.hod^{-1} ; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ 80-90 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.9 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

Simulace 2 s fuzzy PI reg. – Detail 3 rychlosti vozidla

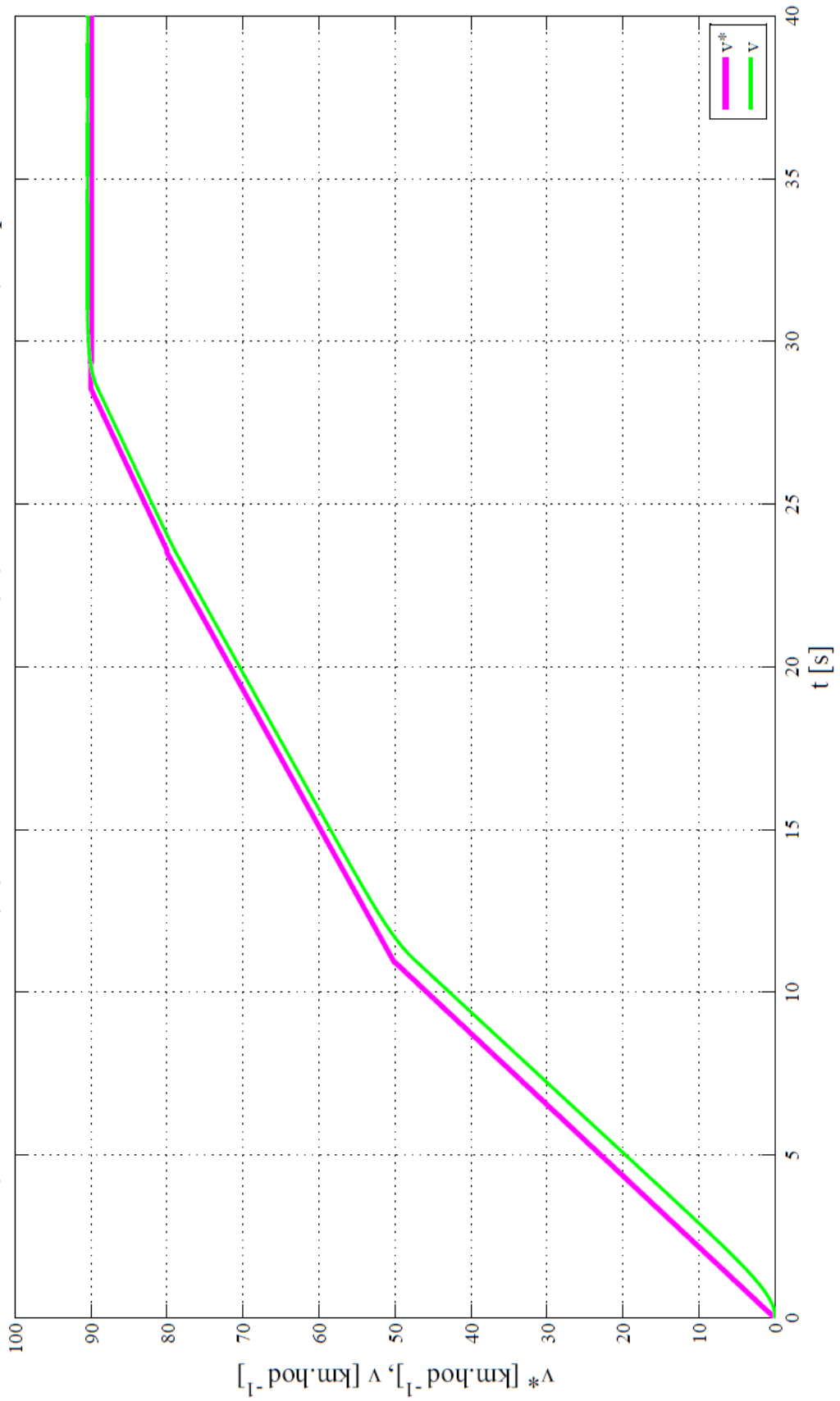
$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ $0-50 \text{ km.hod}^{-1}$; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ $50-80 \text{ km.hod}^{-1}$; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ $80-90 \text{ km.hod}^{-1}$; stoupání = 0



Obr. 7.10 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 3 rychlosti vozidla

Simulace 2 s klasickým PI reg. – Rychlost vozidla

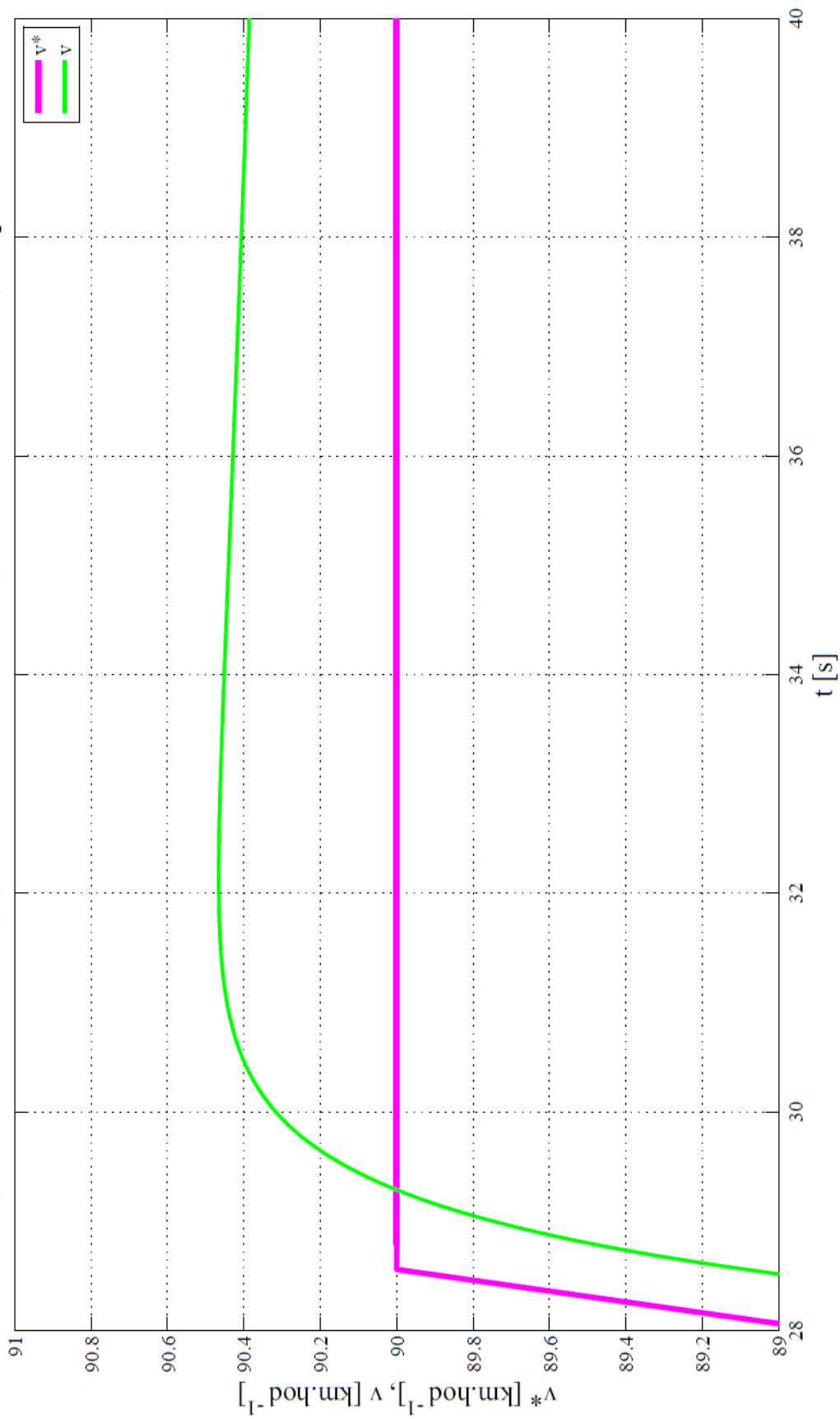
$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ 0-50 km.hod⁻¹ ; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ 50-80 km.hod⁻¹ ; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ 80-90 km.hod⁻¹ ; stoupání = 0



Obr. 7.11 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 2 s klasickým PI reg. – Detail rychlosti vozidla

$1,27 \text{ m.s}^{-2}$ 0-50 km.hod^{-1} ; $0,66 \text{ m.s}^{-2}$ 50-80 km.hod^{-1} ; $0,56 \text{ m.s}^{-2}$ 80-90 km.hod^{-1} ; stoupání = 0



Obr. 7.12 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – detail rychlosti vozidla

7.3. Simulace 3

V této simulaci budu zkoumat vliv jízdy do kopce při 12% stoupání (což odpovídá úhlu podélnému sklonu vozovky $\alpha = 6,84^\circ$) na vlastnosti řízení elektromotoru. Z nulové počáteční rychlosti vozidlo zrychlí na $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ zrychlením o hodnotě $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (časový úsek přibližně 12,5 sekundy).

V 15-ti sekundách simulačního času dojde k narůstání podélného stoupání vozovky (vozidlo jede do kopce). Nárůst stoupání zde simuluji pomocí rampové funkce. Nárůst z nulového na 12% stoupání rampovou funkcí proběhne během jedné sekundy. Následuje jízda při 12% stoupání po časový úsek 6 sekund.

V simulačním čase 22 sekund začne 12% stoupání odeznívat rampovou funkcí se sklonem o stejné, ale záporné, hodnotě sklonu jako při stoupání. Od simulačního času 23 sekund až do konce simulace probíhá jízda vozidla s nulovým stoupáním vozovky.

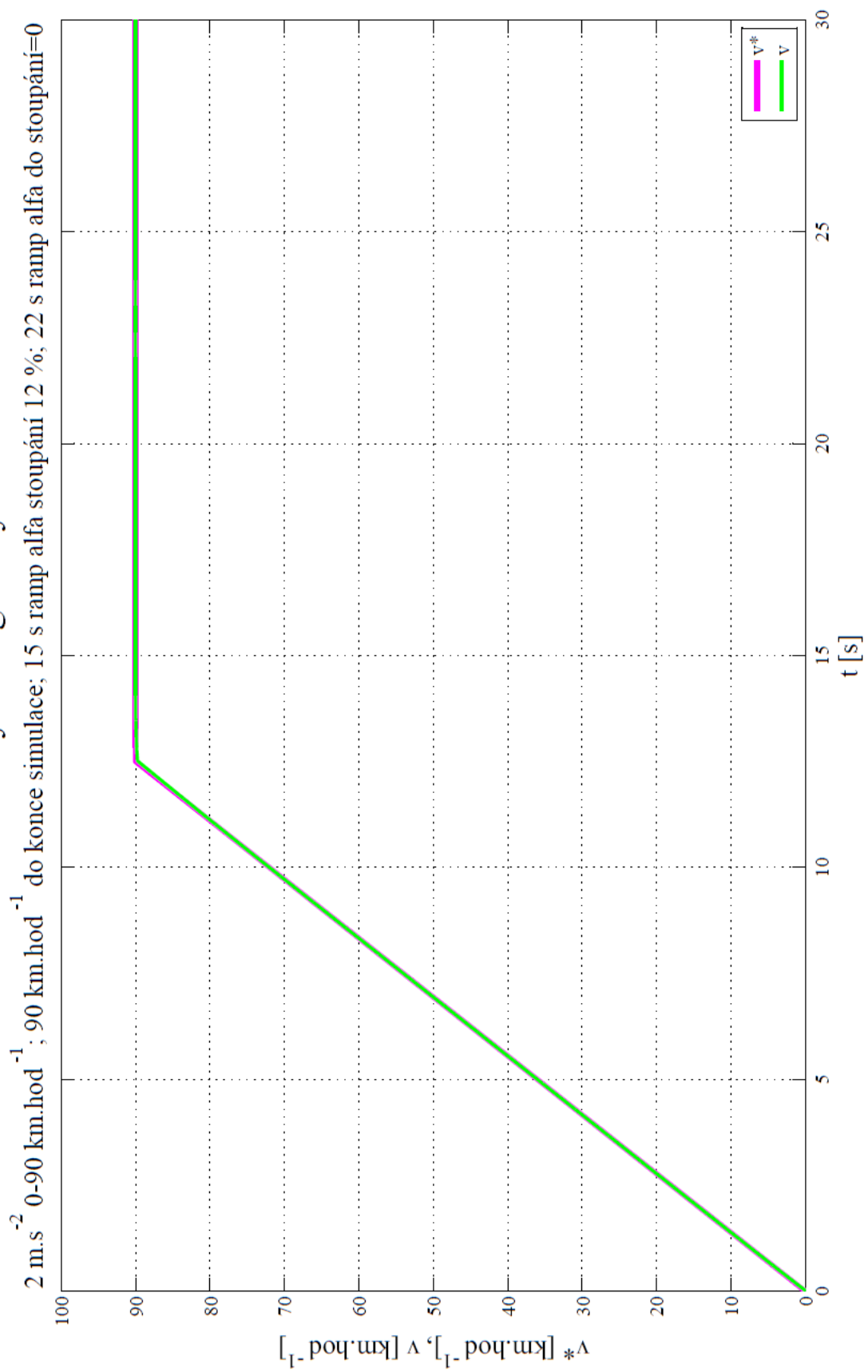
7.3.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 3

Hlavním motivem provedení této simulace bylo zkoumání vlastností řízení při ovlivnění regulované veličiny poruchou – vliv jízdy vozidla do kopce na udržení požadované rychlosti v^* . Průběhy týkající se rychlosti vozidla se nacházejí na (*Obr. 7.13*) až (*Obr. 7.15*) pro řízení s fuzzy PI regulátorem, (*Obr. 7.16*) a (*Obr. 7.17*) pro řízení s klasickým PI regulátorem. Ostatní sledované veličiny s řízením fuzzy PI regulátorem obsahuje Příloha VI. a pro případ řízení klasickým PI regulátorem je to Příloha VII.

V případě řízení fuzzy PI regulátorem lze podle (*Obr. 7.14*) konstatovat, že 12% stoupání, s nárůstem za časový úsek jedné sekundy, v simulačním čase 15 sekund prakticky neovlivnil (pokles rychlosti vozidla o přibližně $0,16 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$) rychlost vozidla. O přibližně stejnou hodnotu, rychlost vozidla nepatrně vzrostla při odeznění vlivu stoupání vozovky v simulačním čase 22 sekund.

Klasický PI regulátor si v této simulaci vedl o něco hůře. Jeho (v předchozích dvou simulacích) zmiňovaná pomalejší reakce se tentokrát projevila více než předtím. V simulačním čase přibližně 18 sekund, tj. 2 sekundy po dosažení plné hodnoty 12% stoupání, klesla rychlost vozidla o $2 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ (2,2 %).

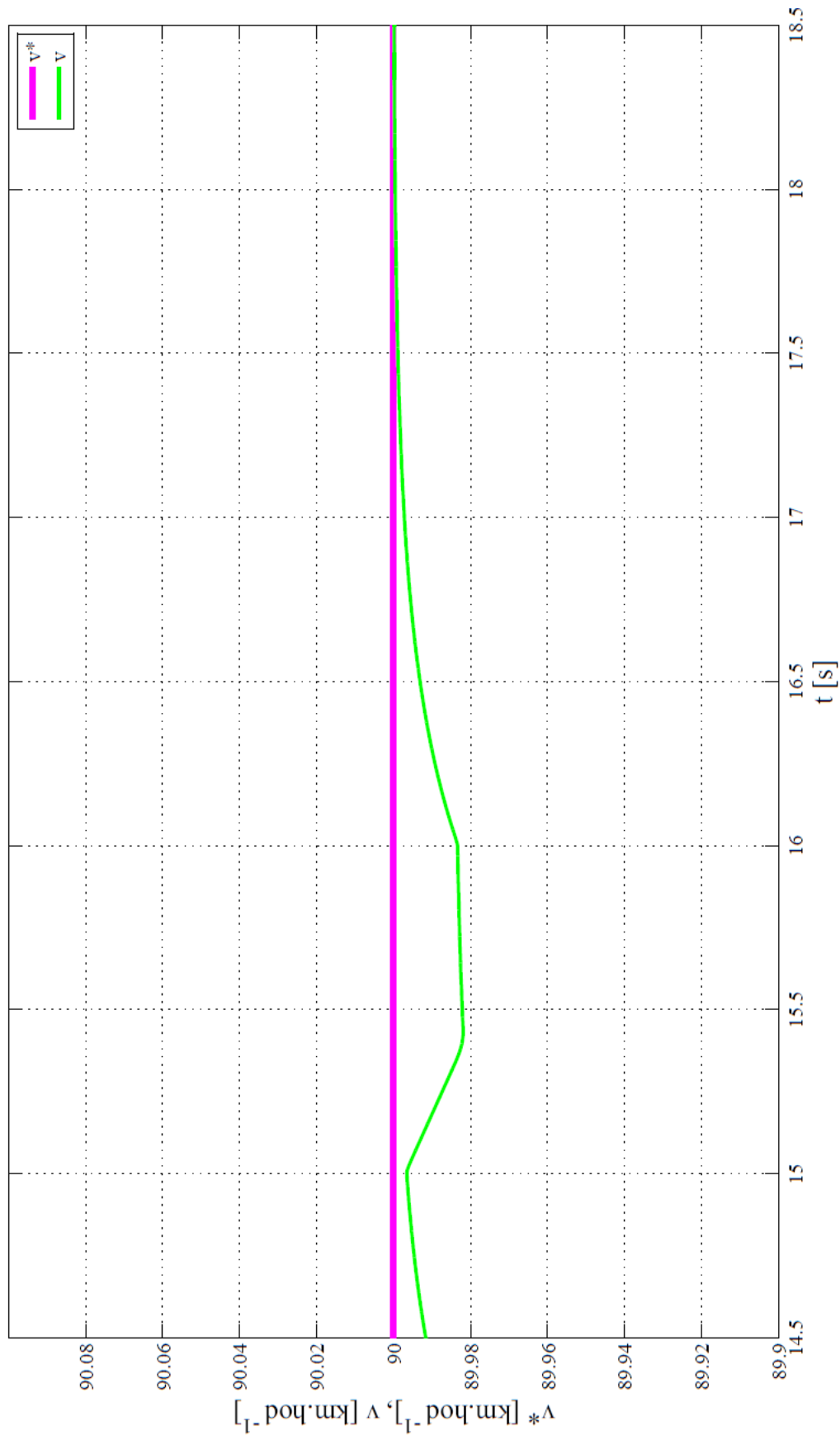
Simulace 3 s fuzzy PI reg. – Rychlost vozidla



Obr. 7.13 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla

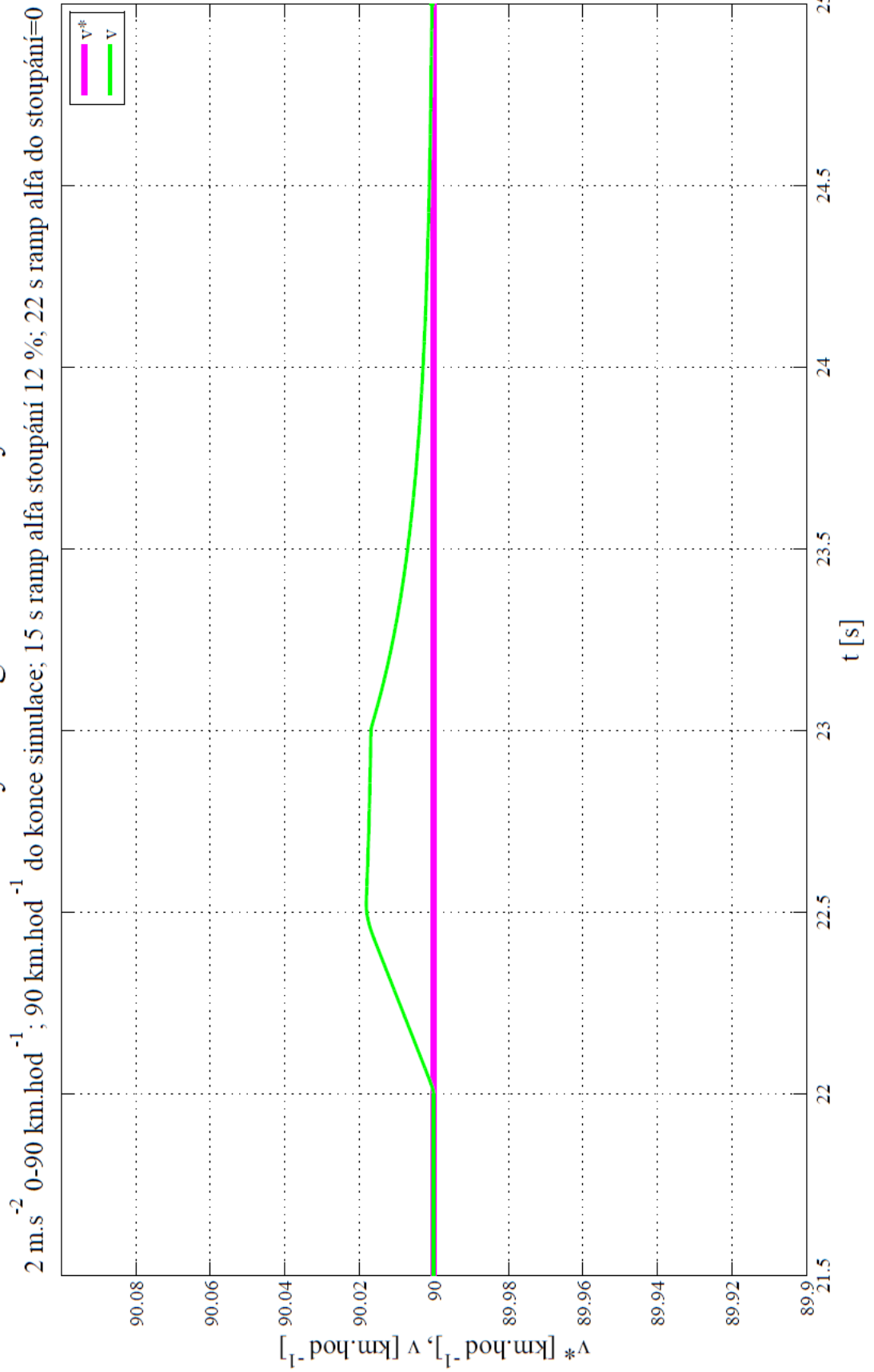
Simulace 3 s fuzzy PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla

2 m.s^{-2} 0-90 km.hod^{-1} ; 90 km.hod^{-1} do konce simulace; 15 s ramp alfa stoupání 12 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



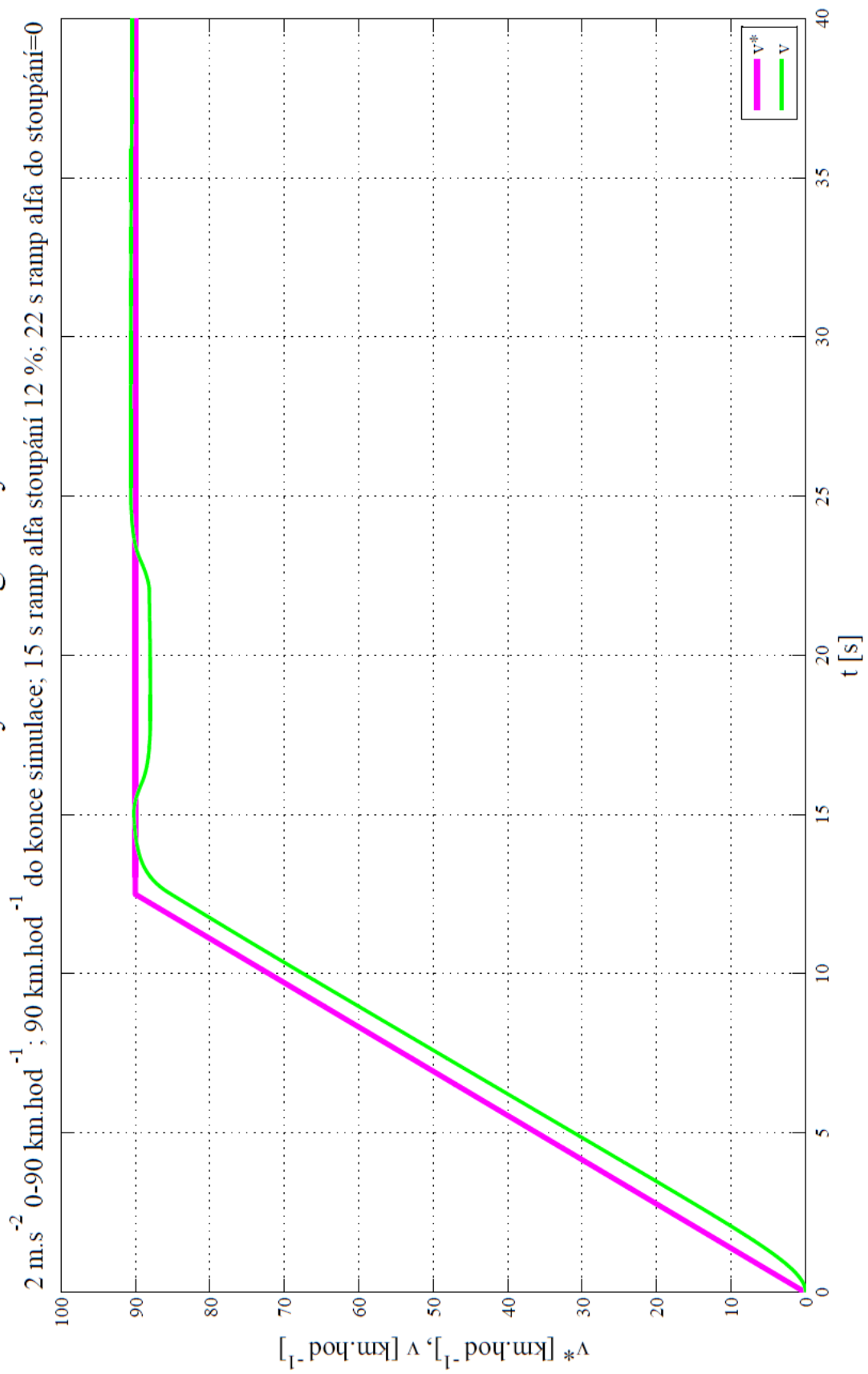
Obr. 7.14 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 3 s fuzzy PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla



Obr. 7.15 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

Simulace 3 s klasickým PI reg. – Rychlost vozidla



Obr. 7.16 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 3 s klasickým PI reg. – Detail rychlosti vozidla



Obr. 7.17 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – detail rychlosti vozidla

7.4. Simulace 4

Tato simulace zahrnuje působení kombinace odporu stoupání a zvětšení odporu vzduchu působením větru proti směru jízdy vozidla. Výchozím stavem simulace 4 je opět vozidlo s nulovou počáteční rychlostí. Následuje zrychlení o hodnotě $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ na rychlost $50 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ (přibližně 7 sekund) a jízda touto rychlostí po časový úsek 3 sekundy.

V simulačním čase 10 sekund dojde k nárůstu působení protivětru pomocí rampové funkce. Rampová funkce nabude své maximální hodnoty $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ rychlosti proudění protivětru za časový úsek jedné sekundy. Tato hodnota proudění protivětru zůstane konstantní do konce simulace. Zároveň v simulačním čase 10 sekund vozidlo zrychluje z rychlosti $50 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ na $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ zrychlením $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Než však vozidlo dosáhne rychlosti $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$, v simulačním čase 15 sekund začne vozidlo stoupat do kopce s 8% stoupáním (tomu odpovídá úhel sklonu vozovky $\alpha = 4,57^\circ$). Nárůst stoupání proběhne rampovou funkcí, která dosáhne své maximální hodnoty během jedné sekundy.

Dosažení rychlosti vozidla $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ je požadováno přibližně v simulačním čase 21 sekund. K počátku odeznívání stoupání vozovky dojde v simulačním čase 22 sekund. Odeznění stoupání vozovky zajišťuje opět rampová funkce se sklonem o stejné, nicméně záporné hodnotě jako proběhlo narůstání stoupání vozovky. Následuje jízda po vozovce s nulovým stoupáním až do konce simulace.

V simulačním čase 20 sekund je požadováno zpomalení o hodnotě $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ z rychlosti $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ na $70 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$. Požadavek dosažení rychlosti $70 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ je stanoven přibližně v 35,5 sekundách simulačního času.

7.4.1. Vyhodnocení a porovnání výsledků simulace 4

Účelem simulace 4 mělo být zkoumání vlastností řízení při nárůstech působení jízdních odporů vlivem protivětru, stoupání a zrychlení. V počátku požadovaného zrychlení vozidla z 50-ti na $90 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$ (simulační čas 10 sekund) dojde k nárůstu působení protivětru o maximální rychlosti proudění $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($= 36 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$). V simulačním čase 15 sekund, kdy vozidlo ještě zrychluje (působí odpor zrychlení o hodnotě přibližně 1700 N), začne působit odpor stoupání vlivem jízdy vozidla do kopce se stoupáním 8 %.

Vzhledem k průběhu regulační odchylky (Příloha VIII. – A) fuzzy PI regulátoru nebylo nutné vytvářet detail oblasti v intervalu od 10-ti do 20-ti sekund. Tedy právě té oblasti, která měla nejvíce prověřit vlastnosti řízení regulované soustavy. Fuzzy PI regulátor reagoval velmi rychlým akčním zásahem a prakticky se „skutečná“ rychlost vozidla ztotožňovala s požadovanou trajektorií rychlosti.

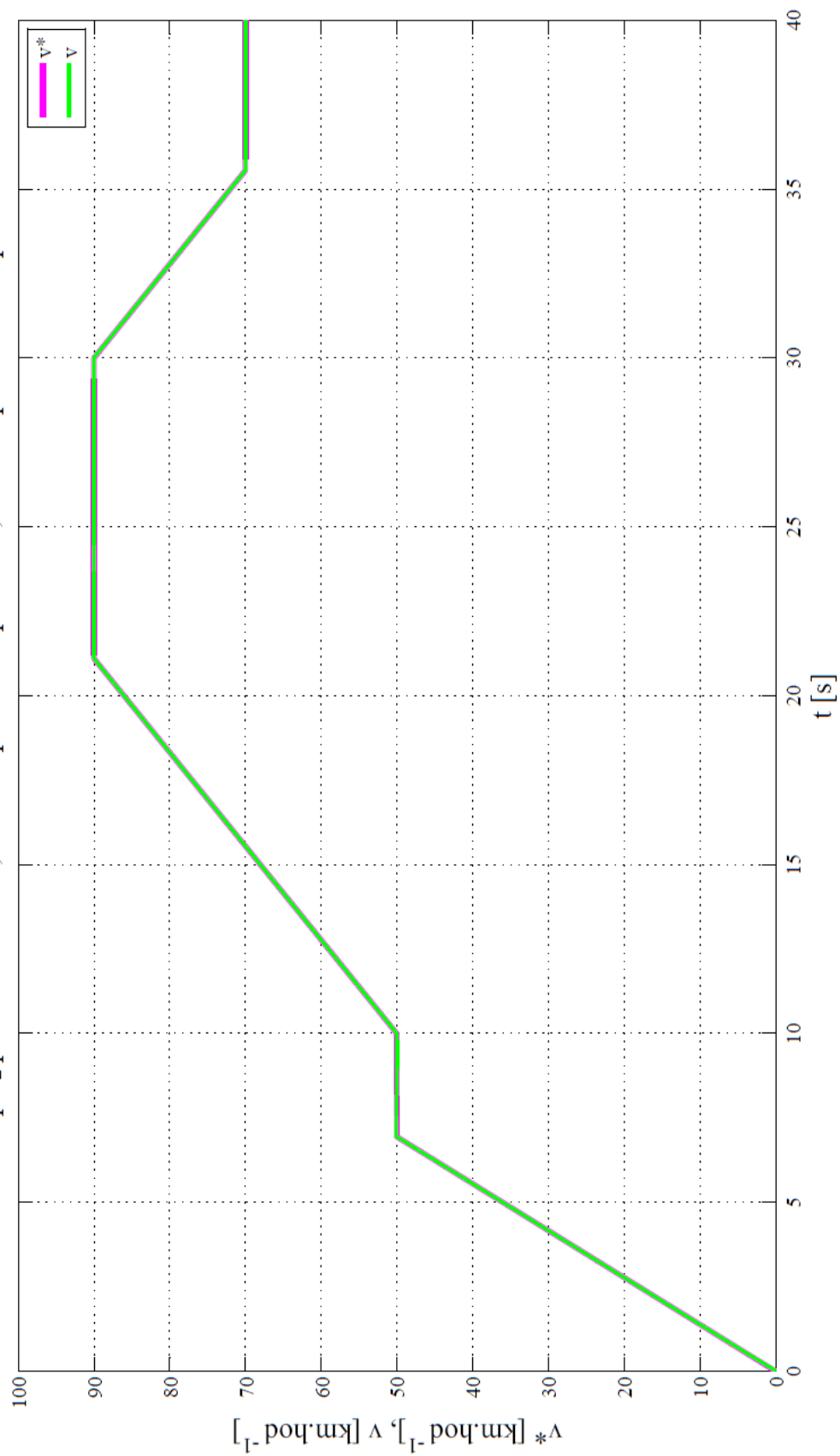
Vliv nárůstu protivětru $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ téměř neovlivnil regulaci s klasickým PI regulátorem. Naopak opět byl zde viditelný pokles růstu rychlosti vozidla při nárůstu stoupání. Regulační odchylka tímto vzrostla přibližně o 60 % (z $2,35$ na $3,85 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$).

Výsledné grafy simulace 4 s fuzzy PI regulátorem lze vidět na (*Obr. 7.18*), (*Obr. 7.19*) a (*Obr. 7.20*) pro průběhy rychlosti, ostatní sledované veličiny v Příloha VIII. Pro průběhy rychlostí simulace 4 s klasickým regulátorem zobrazuje (*Obr. 7.21*), (*Obr. 7.22*), (*Obr. 7.23*) a (*Obr. 7.24*), ostatní sledované veličiny se nachází v Příloha IX.

Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Rychlost vozidla

2 m.s^{-2} 0-50 km.hod^{-1} ; 10 s 1 m.s^{-2} 50-90 km.hod^{-1} ; 30 s 1 m.s^{-2} 90-70 km.hod^{-1}

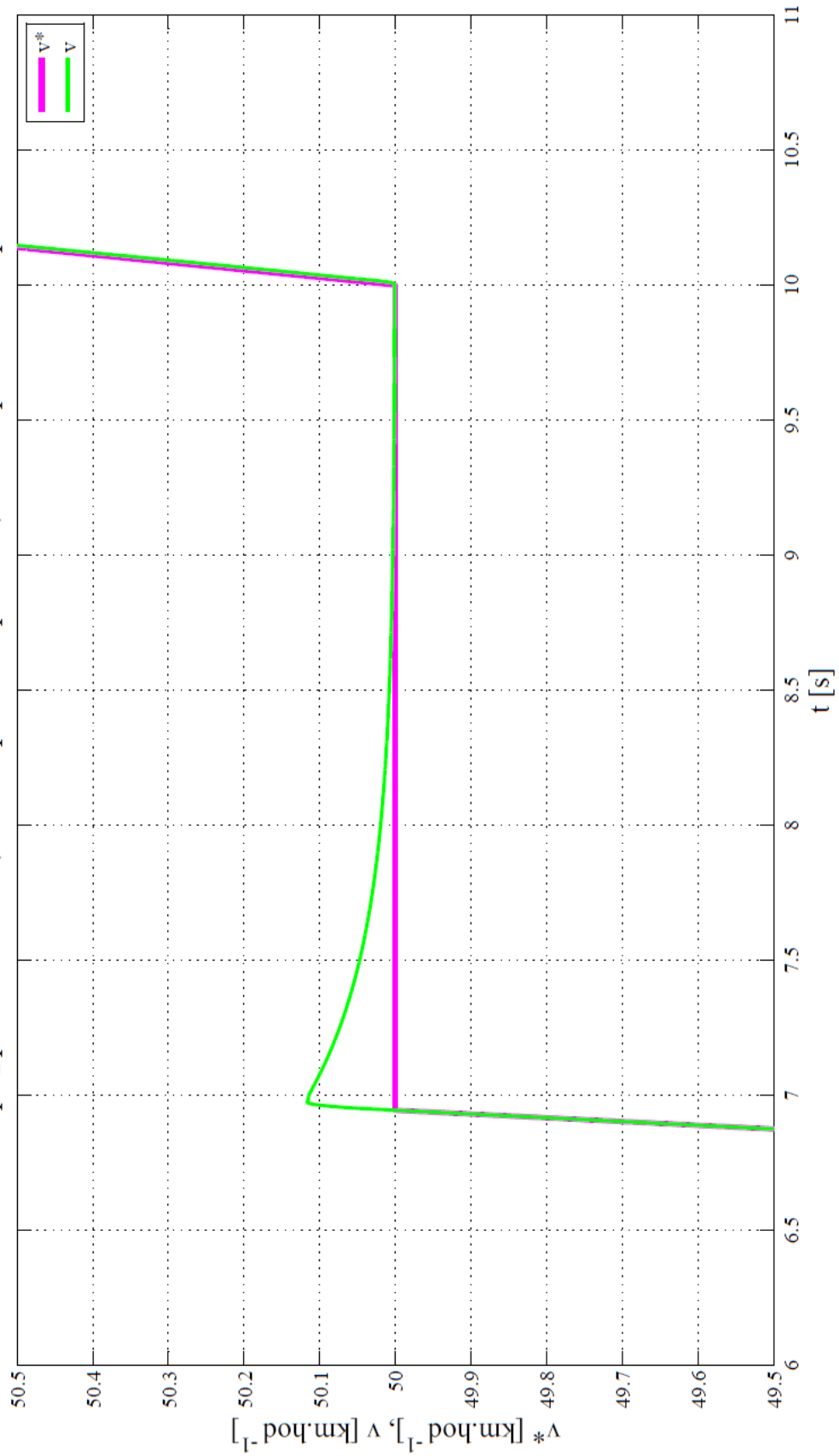
10 s ramp v_z protivítr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 7.18 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla

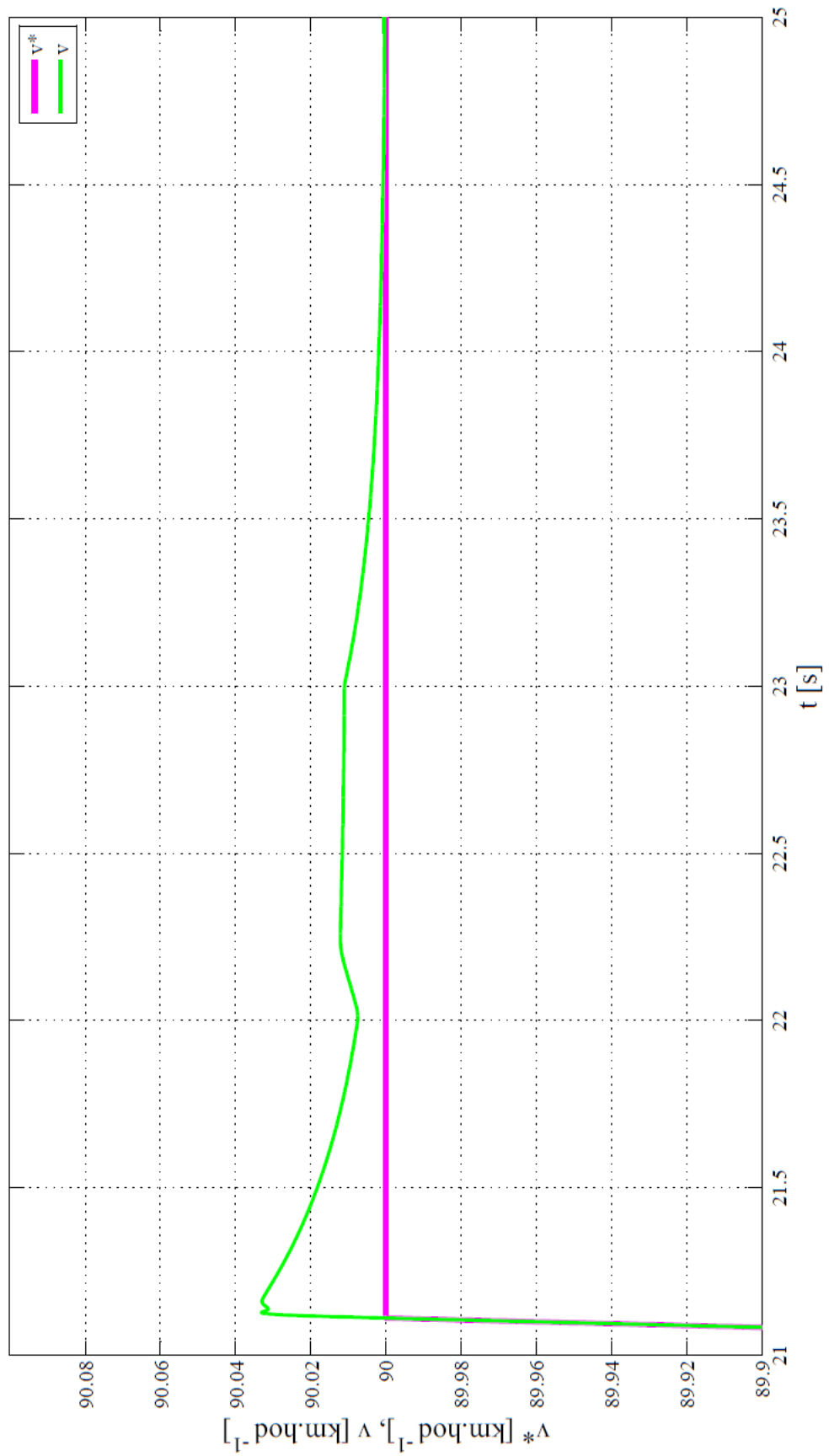
2 m.s^{-2} 0-50 km.hod^{-1} ; 10 s 1 m.s^{-2} 50-90 km.hod^{-1} ; 30 s 1 m.s^{-2} 90-70 km.hod^{-1}
 10 s ramp v_z protivitr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 7.19 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla

2 m.s^{-2} 0-50 km.hod^{-1} ; 10 s 1 m.s^{-2} 50-90 km.hod^{-1} ; 30 s 1 m.s^{-2} 90-70 km.hod^{-1}
 10 s ramp v_z protivitr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8%; 22 s ramp alfa do stoupání=0

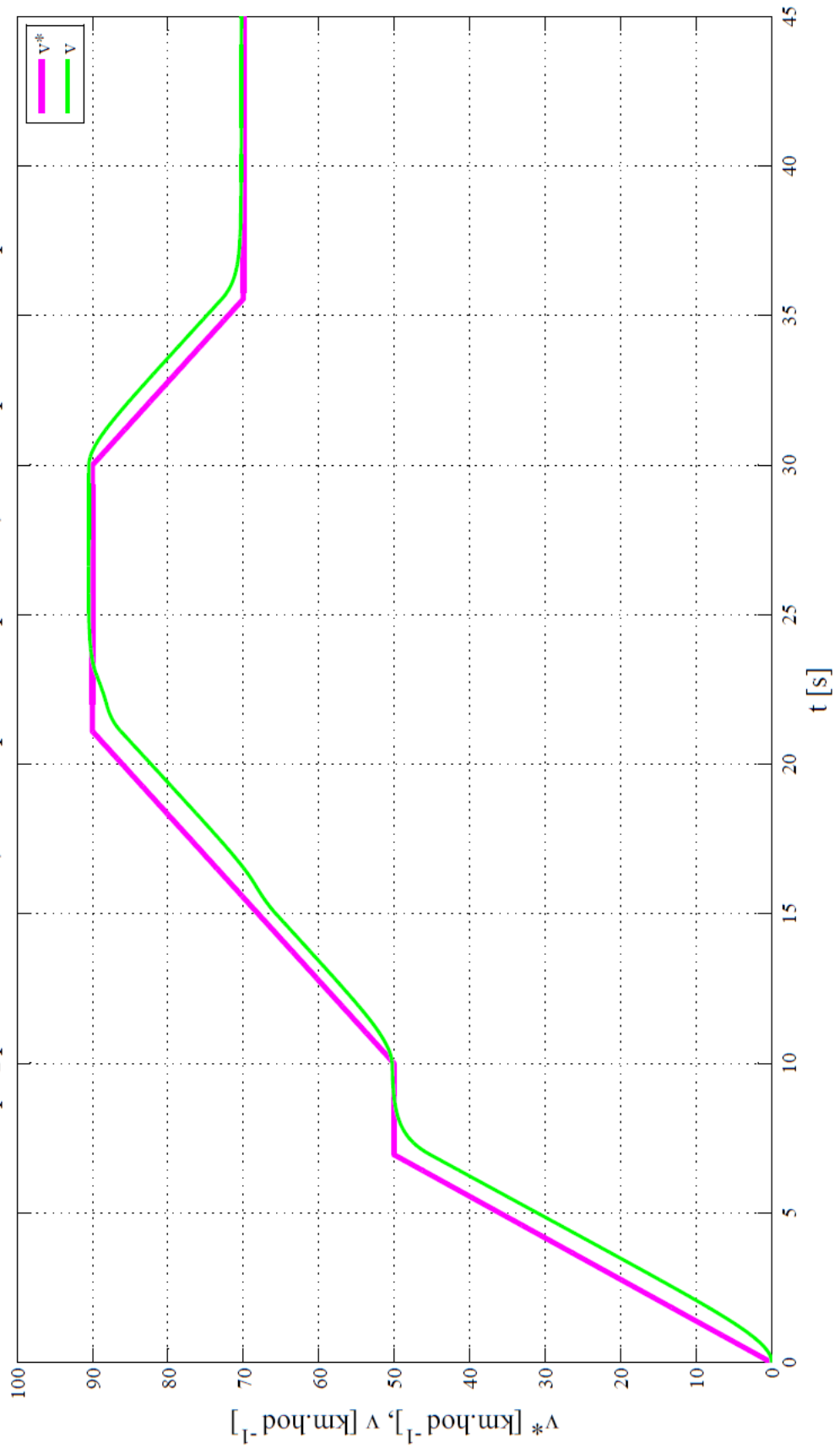


Obr. 7.20 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

Simulace 4 s klasickým PI reg. – Rychlost vozidla

2 m.s^{-2} 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s^{-2} 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s^{-2} 90-70 km.hod⁻¹

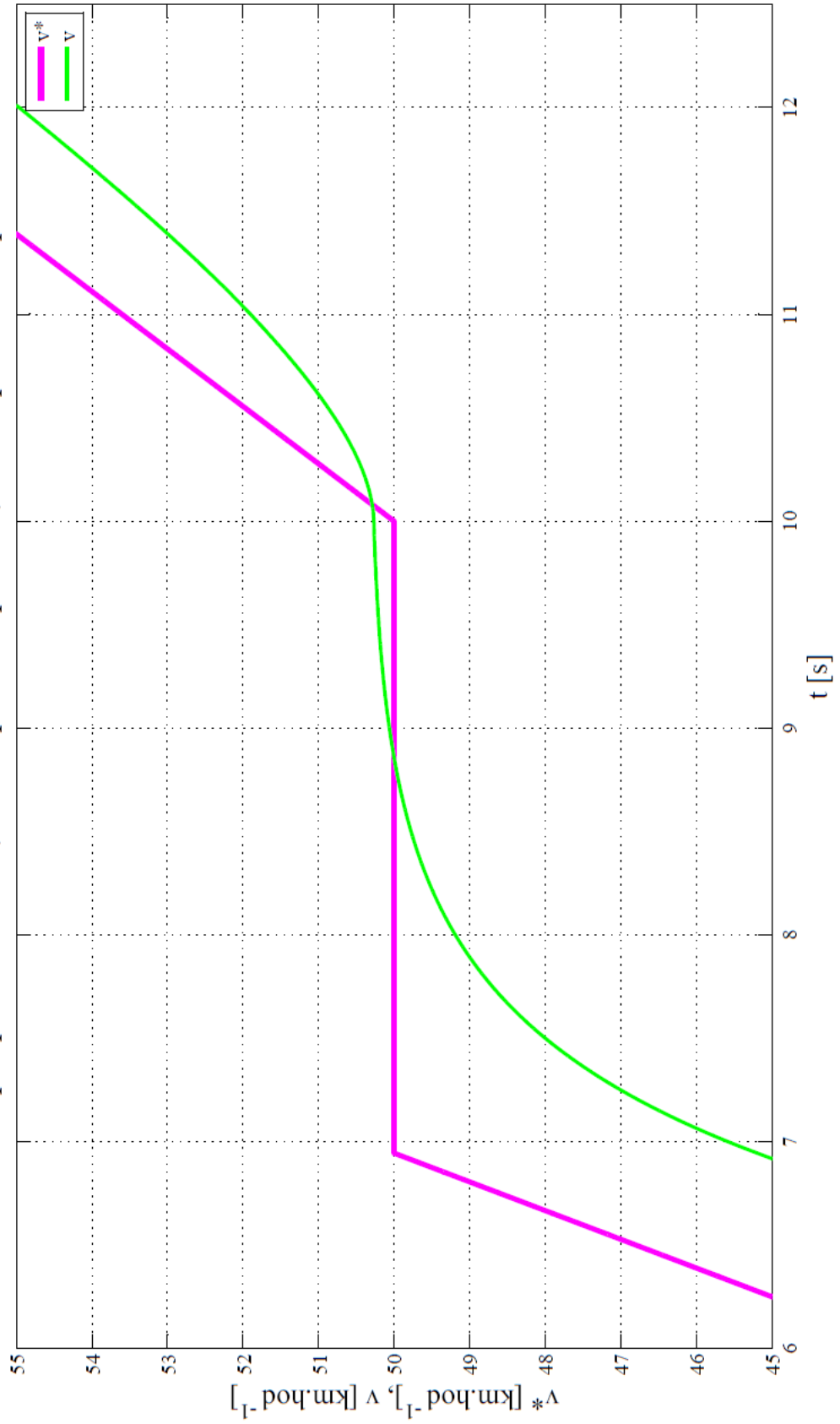
10 s ramp v_z protivítr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 7.21 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla

Simulace 4 s klasickým PI reg. – Detail 1 rychlosti vozidla

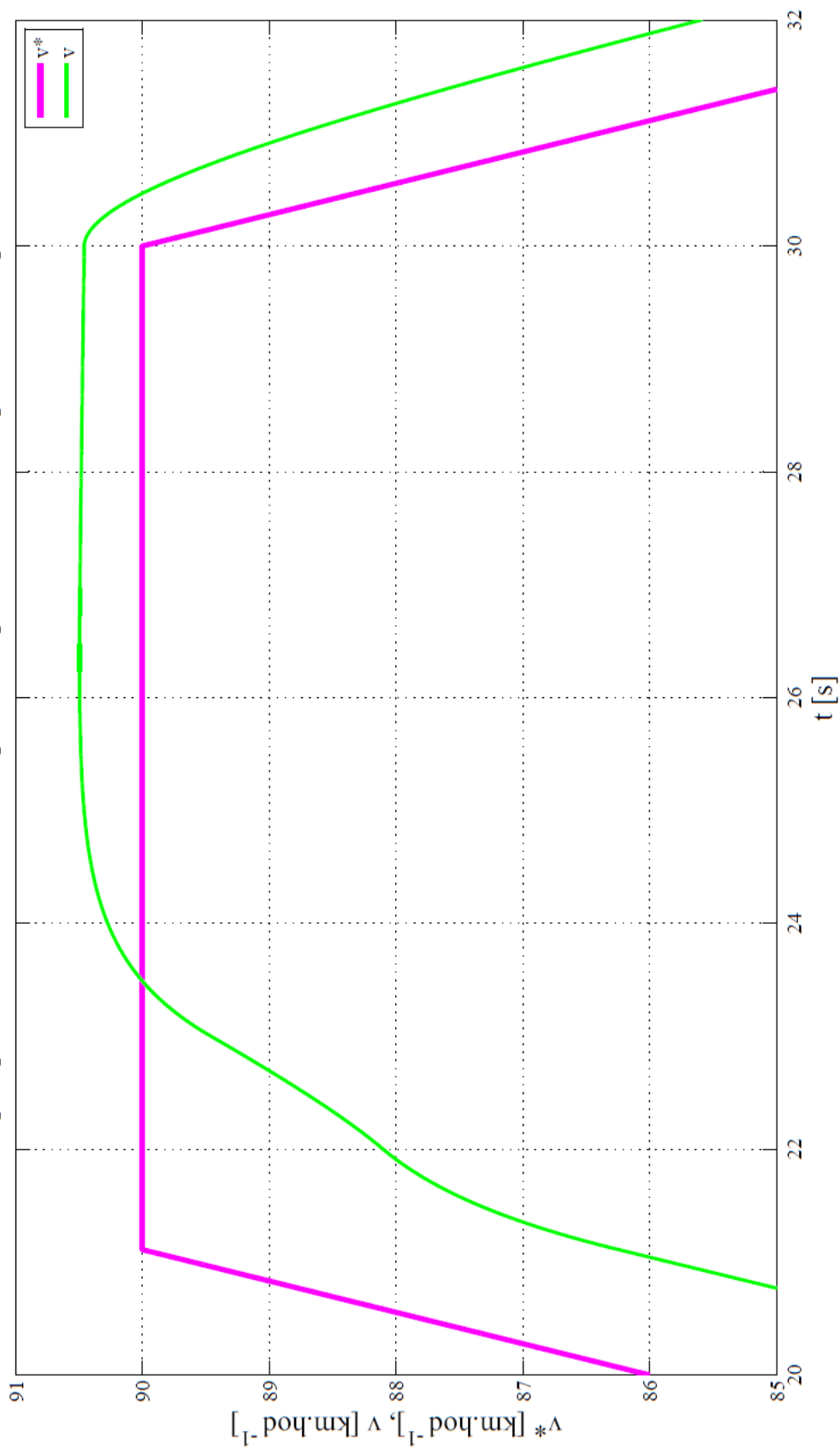
2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp v_Z protivítr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 7.22 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla

Simulace 4 s klasickým PI reg. – Detail 2 rychlosti vozidla

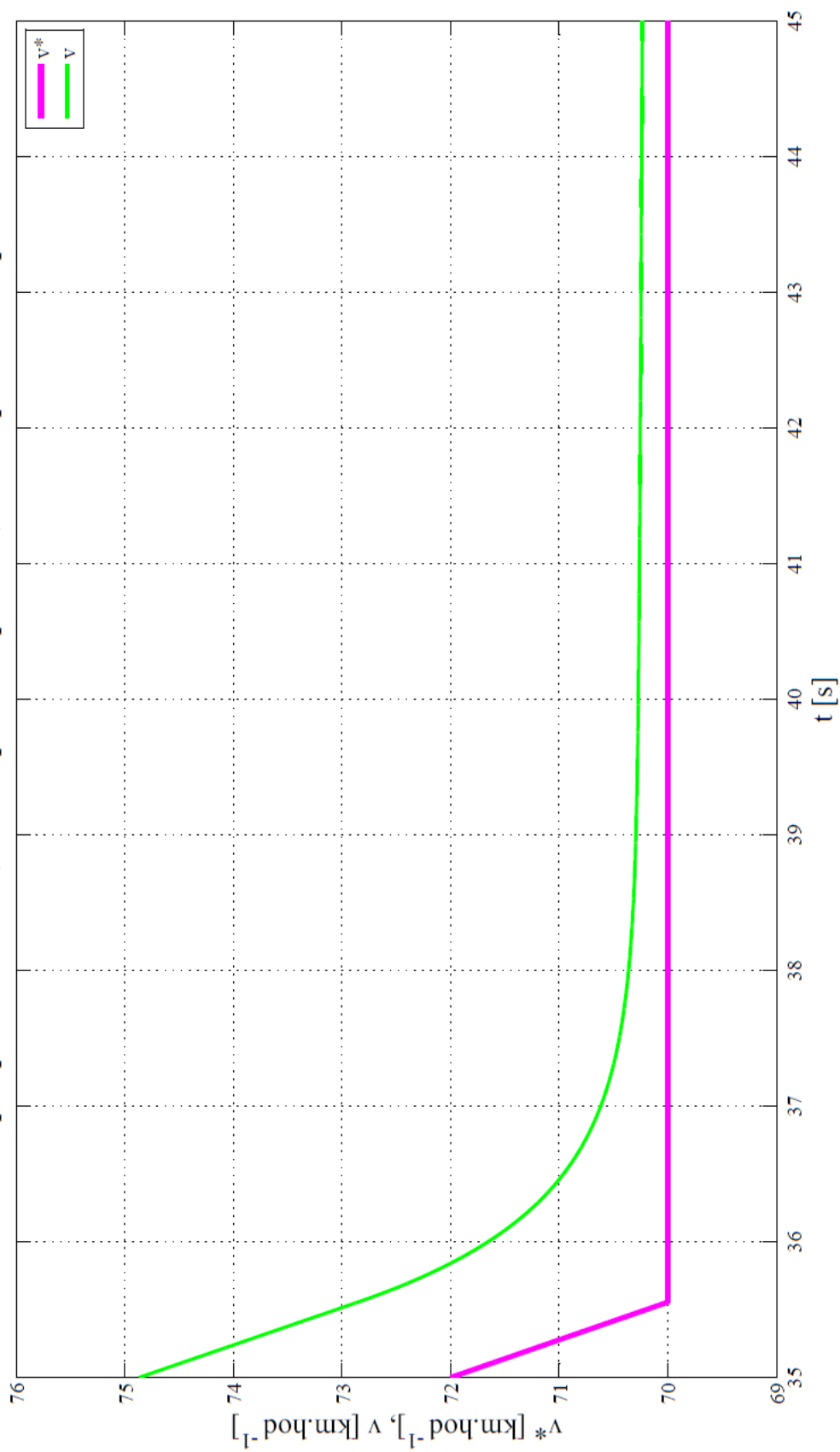
2 m.s^{-2} $0-50 \text{ km.hod}^{-1}$; 10 s 1 m.s^{-2} $50-90 \text{ km.hod}^{-1}$; 30 s 1 m.s^{-2} $90-70 \text{ km.hod}^{-1}$
 10 s ramp v_z protivítr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8% ; 22 s ramp alfa do stoupání $=0$



Obr. 7.23 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla

Simulace 4 s klasickým PI reg. – Detail 3 rychlosti vozidla

2 m.s^{-2} 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s^{-2} 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s^{-2} 90-70 km.hod⁻¹
10 s ramp v_z protivítr 10 m.s^{-1} ; 15 s ramp alfa stoupání 8%; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 7.24 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 3 rychlosti vozidla

7.5. Diskuze k výsledkům simulací

V případě srovnání vlastností řízení modelu vozidla s modelem pohonné jednotky ve formě modelu synchronního elektromotoru s permanentními magnety, musím vyzdvihnout kvalitu řízení se sestaveným fuzzy PI regulátorem. Fuzzy PI regulátor vykazoval velmi rychlé akční zásahy pro kompenzaci jízdních odporů modelu vozidla ve všech provedených simulacích. Průběh řízení rychlosti modelu vozidla je prakticky totožný s požadovanou trajektorií, pominu-li zanedbatelné překmity. Z výsledků simulací můžu tedy v této práci navržený fuzzy PI regulátor k řízení sestavené regulované soustavy doporučit.

Ačkoli na základě provedených simulací řízení s fuzzy PI regulátorem vykazovalo lepší regulaci, přednost řízení s klasickým PI regulátorem spočívala především v hladkých průbězích sledovaných veličin (zejména rychlost modelu vozidla). Tyto hladké průběhy by mohly totiž mít za následek větší „komfort“ pro posádku. Změny požadované rychlosti vozidla by nebyly doprovázeny tzv. „cukáním“. V porovnání s fuzzy PI regulátorem tedy vykazoval pomalejších reakcí akčních zásahů.

Pomalejší akční zásahy s nastavením (kapitola 6.1.2) klasického PI regulátoru mohou být důsledkem poměrně velkých setrvačných hmot vozidla. S tím je spojené také dopravní zpoždění, které obecně velmi komplikuje řízení regulovaných soustav. Fuzzy regulátory se vyznačují především schopnostmi regulace složitých, nelineárních anebo obtížně matematicky popsatečných regulovaných soustav. A to může být důvod, proč řízení s fuzzy PI regulátorem simulačního obvodu v této práci vykazovalo lepší regulační vlastnosti.

8. ZÁVĚR

V první části bylo nastíněno použití synchronních motorů s permanentními magnety v pohonech v automobilovém průmyslu. Dále bylo provedeno základní rozdělení těchto elektromotorů s odkazem (na použitou literaturu) na jejich vlastnosti z hlediska použití v elektrických pohonech automobilů. Také byly zmíněny některé metody řízení těchto elektromotorů.

Pro účely modelování elektromotoru použitelného pro pohon elektromobilu jsem získal od doc. Ing. Martina Nováka, Ph.D. parametry o elektromotoru z laboratoří Ústavu přístrojové a řídicí techniky fakulty strojní ČVUT v Praze. Jedná se o synchronní elektromotor s permanentními magnety. S využitím těchto parametrů jsem v kapitole 3.1 sestavil matematické rovnice popisující model synchronního s permanentními magnety.

Tyto matematické rovnice vedly k sestavení simulačního modelu v kapitole 3.2. Se sestavením simulačního modelu mi značně pomohl doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. Mohl jsem tak využít jím sestavený simulační model zmíněného elektromotoru, který jsem dále upravil. Chybějící parametry (koeficient třecích ztrát a magnetický tok od permanentních magnetů elektromotoru) nutné k simulování daného modelu elektromotoru jsem vypočítal s využitím softwaru MATLAB.

Ověřil jsem výpočty chybějících parametrů elektromotoru pomocí simulace rozběhu na jmenovité otáčky v kapitole 3.3. K simulaci byl využit simulační model elektromotoru. V rámci této simulace jsem prověřil jeho základní vlastnosti. Porovnal jsem sledované veličiny ze simulace se štítkovými hodnotami elektromotoru.

V kapitole 4 jsem se věnoval zjednodušeným modelem vozidla ve formě jízdních odporů. Sestavil jsem matematické rovnice jízdních odporů a z nich model jízdních odporů v Simulinku. Výsledná síla jízdních odporů byla pomocí převodového poměru přepočítána na odporový moment, který tvořil zatěžovací moment elektromotoru. V rámci této části práce jsem uvažoval menší vozidlo a jeho modelu přirovnal upravené parametry původem z třetí generace ŠKODA Fabia.

Další část (kapitola 5) jsem věnoval návrhu fuzzy PI regulátoru. Navržený regulátor jsem použil k řízení rychlosti modelu vozidla prostřednictvím otáček elektromotoru. Společně s modelem elektromotoru a jízdních odporů vozidla jsem v kapitole 6 sestavil zjednodušený simulační obvod pohonu elektromobilu. V této části byl také sestaven

simulační obvod s klasickým PI regulátorem pro řízení rychlosti modelu vozidla, respektive otáček elektromotoru.

Kapitola 7 obsahovala návrh simulačních situací a vlastní simulace sestaveného simulačního obvodu z předchozích kapitol. Po provedení navržených simulací jsem v kapitole 7.5 vyhodnotil výsledky řízení s fuzzy PI a klasickým PI regulátorem. Vyhodnocení výsledků provedených simulací také zahrnovalo porovnání vlastností řízení obou regulátorů.

8.1. Zamyšlení nad možnými pokračováními v této práci

Jelikož matematické operace ve fuzzy regulátoru vyžadují složitější výpočetní algoritmy než klasické regulátory, vyvstává na povrch otázka. Ta otázka zní, zda by zpracování těchto složitých operací bylo dostatečně rychlé, aby realizovaný fuzzy regulátor byl schopný elektromotor v elektromobilu (v této práci) řídit. Vzhledem k pomalejším změnám provozních podmínek vlivem setrvačných hmot vozidla se však domnívám, že by řízení fuzzy regulátorem, i přes úskalí složitých matematických operací, toho schopný byl. Musím ale zdůraznit, že se jedná pouze o moji subjektivní domněnku a nemám ji žádným způsobem ověřenou. Účelem této domněnky je pouze podnět k dalšímu směřování případného výzkumu. Například implementace fuzzy regulátoru s využitím programovatelného hradlového pole, tedy podobným směrem, kterým je veden výzkum v [2].

V této práci bylo použito pro zjednodušení provedení simulací jednostupňového převodu mezi elektromotorem a hnanými koly modelu vozidla. Nicméně přesto bylo možné prověřit vlastnosti řízení dané regulované soustavy v této práci navrženým fuzzy PI regulátorem. V reálném nasazení by však bylo pravděpodobně vhodnější použít vícestupňový převod, a to z důvodu lepší využitelnosti dostupného výkonu elektromotoru. Na druhou stranu i jednostupňový převod by mohl postačovat, zejména v případě využití přetížitelnosti elektromotoru (dosažení vyššího točivého momentu spolu s výkonem) a odbuzování (dosažení vyšších otáček než jmenovitých).

9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KRAMÁŘ, Petr. *Řízení stejnosměrného elektromotoru fuzzy regulátorem*. Praha: ČVUT 2014. Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky.
- [2] NOVÁK, Martin. *Research setup for special purpose permanent magnet synchronous machines*. [PDF]. Praha: ČVUT 2012. Habilitační práce, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky.
- [3] PLOMER, Jan. *Hybridní pohon městského vozidla s inovativní akumulací energie*. Praha: ČVUT 2014. Disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav dopravních prostředků.
- [4] T. Finken, M. Hombitzer and K. Hameyer, "Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles," *Emobility - Electrical Power Train, 2010*, [online], Leipzig, 2010, pp. 1-7. Dostupné z doi: 10.1109/EMOBILITY.2010.5668074. [cit. 8. 6. 2016]. Dostupné též z:
<http://134.130.107.200/uploads/bibliotest/2010TFApplicability.pdf>
- [5] RAMESH, M. V., AMARNATH, J., KAMAKSHIAIAH, S., RAO, G. S., Speed control of brushless DC motor by using Fuzzy logic PI Controller, [online], ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 6., No. 9., September 2011, pp. 55-62. ISSN 1819-6608. [cit. 8. 6. 2016]. Dostupné z:
http://www.arpnjournals.com/jeas/research_papers/rp_2011/jeas_0911_555.pdf
- [6] CHI, Song. *Position Sensorless Control of PMSM Based on a Novel Sliding Mode Observer over Wide Speed Range*. [online]. Columbus: The Ohio State University 2007. Ph.D. Dissertation, The Ohio State University, Graduate Program in Electrical and Computer Engineering. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z:
https://etd.ohiolink.edu/rws_etd/document/get/osu1186974583/inline

- [7] MUŽÍKOVÁ, Vendula. *Přímé řízení momentu synchronního motoru s permanentními magnety – simulační studie*. [online]. Plzeň: ZČU 2012. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5050/DP_Vendula_Muzikova.pdf?sequence=1
- [8] PED4-1038C, Skupina. *Torque control in field weakening mode*. [online]. Aalborg: Aalborg University 2009. Master Thesis, Aalborg University, Institute of Energy Technology. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: http://projekter.aau.dk/projekter/files/17643253/PED4_1038C.pdf
- [9] *Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation. User Guide*. [online]. Microsemi Corporation, ©2013. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide
- [10] BURRESS, Timothy Adam. *Vector control and experimental evaluation of permanent magnet synchronous motors for HEVs*. [online]. Knoxville: University of Tennessee 2006. Master Theses, University of Tennessee, Graduate school. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: http://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2963&context=utk_gradthes
- [11] PRACHAŘ, Roman. *Jízdní odpory vozidel*. [online]. Brno: VUT 2010. Diplomová práce, VUT v Brně, Ústav soudního inženýrství. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33556
- [12] *Katalog ŠKODA Fabia, Fabia Combi*. [online]. ŠKODA Auto a. s. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/SiteCollectionDocuments/skoda-auto/ke-stazeni/fabia-katalog.pdf>
- [13] ŠTĚPÁNEK, Roman. *Návrh fuzzy regulátoru*. [online]. Brno: VUT 2007. Diplomová práce, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. [cit. 6. 6. 2016]. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2007/DP_Stepanek.pdf

10. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 – Elektromotor. Foto Autor	19
Obr. 3.2 – Výrobní štítek elektromotoru. Foto Autor	20
Obr. 3.3 – Synchronní elektromotor s permanentním magnetem [2]	21
Obr. 3.4 – Grafické znázornění souřadných systému abc, $\alpha\beta$, dq [10].....	23
Obr. 3.5 – Clarkova a Parkova transformace v Simulinku [2]	25
Obr. 3.6 – Inverzní Clarkova a Parkova transformace v Simulinku [2]	25
Obr. 3.7 – Výstup z Curve Fitting Toolboxu - porovnání naměřené (černě, souvisle) a exponenciální funkce s odhadnutým koeficientem B (modře, čerchovaně)	29
Obr. 3.8 – Rozběh elektromotoru na jmenovité otáčky	30
Obr. 4.1 – Úhel stoupání	33
Obr. 4.2 – Simulační schéma podsystemu „Jízdní odpory“	38
Obr. 5.1 – Obecné schéma regulačního obvodu s vnitřní strukturou fuzzy regulátoru ..	39
Obr. 5.2 – Univerzum a funkce příslušnosti pro regulační odchylku $e(t)$	43
Obr. 5.3 – Univerzum a funkce příslušnosti pro derivaci regulační odchylky $de(t)dt$	43
Obr. 5.4 – Univerzum a funkce příslušnosti pro derivaci akční veličiny $du(t)dt$	44
Obr. 5.5 – Textové zobrazení pravidel	45
Obr. 5.6 – Grafické zobrazení pravidel.....	46
Obr. 6.1 – Simulační obvod s fuzzy PI regulátorem.....	49
Obr. 6.2 – Nastavení simulačního řešitele v Simulinku	50
Obr. 6.3 – Simulační schéma a seřízení fuzzy PI regulátoru	51
Obr. 7.1 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla	54
Obr. 7.2 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla	55
Obr. 7.3 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla	56
Obr. 7.4 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla.....	57
Obr. 7.5 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla.....	58
Obr. 7.6 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla.....	59
Obr. 7.7 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla	61
Obr. 7.8 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla	62
Obr. 7.9 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla	63

Obr. 7.10 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – detail 3 rychlosti vozidla	64
Obr. 7.11 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla.....	65
Obr. 7.12 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – detail rychlosti vozidla.....	66
Obr. 7.13 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla	68
Obr. 7.14 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla	69
Obr. 7.15 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla	70
Obr. 7.16 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla.....	71
Obr. 7.17 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – detail rychlosti vozidla.....	72
Obr. 7.18 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – rychlost vozidla	75
Obr. 7.19 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla	76
Obr. 7.20 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla	77
Obr. 7.21 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – rychlost vozidla.....	78
Obr. 7.22 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 1 rychlosti vozidla.....	79
Obr. 7.23 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 2 rychlosti vozidla.....	80
Obr. 7.24 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – detail 3 rychlosti vozidla.....	81
Obr. 11.1 – Rozběh elektromotoru – průběh zatěžovacího momentu	95
Obr. 11.2 – Rozběh elektromotoru – průběhy fázových proudů	95
Obr. 11.3 – Rozběh elektromotoru – průběhy fázových napětí.....	96
Obr. 11.4 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace	97
Obr. 11.5 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru	98
Obr. 11.6 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	99
Obr. 11.7 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	100
Obr. 11.8 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru .	101
Obr. 11.9 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru.....	102
Obr. 11.10 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru.....	103
Obr. 11.11 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka.....	104
Obr. 11.12 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru	105
Obr. 11.13 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	106
Obr. 11.14 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	107
Obr. 11.15 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	108
Obr. 11.16 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru .	109
Obr. 11.17 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru	110

Obr. 11.18 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace	111
Obr. 11.19 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru	112
Obr. 11.20 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	113
Obr. 11.21 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	114
Obr. 11.22 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	115
Obr. 11.23 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru.....	116
Obr. 11.24 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru.....	117
Obr. 11.25 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka	118
Obr. 11.26 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru	119
Obr. 11.27 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	120
Obr. 11.28 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	121
Obr. 11.29 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	122
Obr. 11.30 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru .	123
Obr. 11.31 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru	124
Obr. 11.32 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace	125
Obr. 11.33 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru	126
Obr. 11.34 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	127
Obr. 11.35 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	128
Obr. 11.36 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	129
Obr. 11.37 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru.....	130
Obr. 11.38 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru.....	131
Obr. 11.39 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka.....	132
Obr. 11.40 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru	133
Obr. 11.41 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	134
Obr. 11.42 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	135
Obr. 11.43 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	136
Obr. 11.44 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru .	137
Obr. 11.45 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru	138

Obr. 11.46 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace	139
Obr. 11.47 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru	140
Obr. 11.48 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	141
Obr. 11.49 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	142
Obr. 11.50 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	143
Obr. 11.51 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru.....	144
Obr. 11.52 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru.....	145
Obr. 11.53 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka	146
Obr. 11.54 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru	147
Obr. 11.55 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru	148
Obr. 11.56 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla.....	149
Obr. 11.57 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru	150
Obr. 11.58 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru .	151
Obr. 11.59 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru	152

11. SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA I.

Příloha I. – A	Výpočetní skript (program).....	94
Příloha I. – B	Rozběh PMSM - zatěžovací moment (graf).....	95
Příloha I. – C	Rozběh PMSM - fázové proudy (graf).....	95
Příloha I. – D	Rozběh PMSM - fázová napětí (graf)	96

PŘÍLOHA II.

Příloha II. – A	Simulace 1 s fuzzy PI reg - regulační odchylka (graf).....	97
Příloha II. – B	Simulace 1 s fuzzy PI reg - akční zásah (graf).....	98
Příloha II. – C	Simulace 1 s fuzzy PI reg - fázové proudy (graf).....	99
Příloha II. – D	Simulace 1 s fuzzy PI reg - jízdní odpory (graf).....	100
Příloha II. – E	Simulace 1 s fuzzy PI reg - zatěžovací moment (graf).....	101
Příloha II. – F	Simulace 1 s fuzzy PI reg - fázová napětí (graf)	102
Příloha II. – G	Simulace 1 s fuzzy PI reg - otáčky elektromotoru (graf)	103

PŘÍLOHA III.

Příloha III. – A	Simulace 1 s klasickým PI reg - regulační odchylka (graf)	104
Příloha III. – B	Simulace 1 s klasickým PI reg - akční zásah (graf)	105
Příloha III. – C	Simulace 1 s klasickým PI reg - fázové proudy (graf).....	106
Příloha III. – D	Simulace 1 s klasickým PI reg - jízdní odpory (graf).....	107
Příloha III. – E	Simulace 1 s klasickým PI reg - zatěžovací moment (graf).....	108
Příloha III. – F	Simulace 1 s klasickým PI reg - fázová napětí (graf).....	109
Příloha III. – G	Simulace 1 s klasickým PI reg - otáčky elektromotoru (graf)...	110

PŘÍLOHA IV.

Příloha IV. – A	Simulace 2 s fuzzy PI reg - reg.odchylka (graf).....	111
Příloha IV. – B	Simulace 2 s fuzzy PI reg - akční zásah (graf).....	112
Příloha IV. – C	Simulace 2 s fuzzy PI reg - fázové proudy (graf).....	113
Příloha IV. – D	Simulace 2 s fuzzy PI reg - jízdní odpory (graf).....	114
Příloha IV. – E	Simulace 2 s fuzzy PI reg - zatěžovací moment (graf).....	115
Příloha IV. – F	Simulace 2 s fuzzy PI reg - fázová napětí (graf).....	116
Příloha IV. – G	Simulace 2 s fuzzy PI reg - otáčky elektromotoru (graf)	117

PŘÍLOHA V.

Příloha V. – A	Simulace 2 s klasickým PI reg - regulační odchylka (graf)	118
Příloha V. – B	Simulace 2 s klasickým PI reg - akční zásah (graf)	119
Příloha V. – C	Simulace 2 s klasickým PI reg - fázové proudy (graf)	120
Příloha V. – D	Simulace 2 s klasickým PI reg - jízdní odpory (graf).....	121
Příloha V. – E	Simulace 2 s klasickým PI reg - zatěžovací moment (graf)	122
Příloha V. – F	Simulace 2 s klasickým PI reg - fázová napětí (graf).....	123
Příloha V. – G	Simulace 2 s klasickým PI reg - otáčky elektromotoru (graf)...	124

PŘÍLOHA VI.

Příloha VI. – A	Simulace 3 s fuzzy PI reg - regulační odchylka (graf)	125
Příloha VI. – B	Simulace 3 s fuzzy PI reg - akční zásah (graf)	126
Příloha VI. – C	Simulace 3 s fuzzy PI reg - fázové proudy (graf).....	127
Příloha VI. – D	Simulace 3 s fuzzy PI reg - jízdní odpory (graf)	128
Příloha VI. – E	Simulace 3 s fuzzy PI reg - zatěžovací moment (graf).....	129
Příloha VI. – F	Simulace 3 s fuzzy PI reg - fázová napětí (graf)	130
Příloha VI. – G	Simulace 3 s fuzzy PI reg - otáčky elektromotoru (graf)	131

PŘÍLOHA VII.

Příloha VII. – A	Simulace 3 s klasickým PI reg - regulační odchylka (graf)	132
Příloha VII. – B	Simulace 3 s klasickým PI reg - akční zásah (graf)	133
Příloha VII. – C	Simulace 3 s klasickým PI reg - fázové proudy (graf)	134
Příloha VII. – D	Simulace 3 s klasickým PI reg - jízdní odpory (graf).....	135
Příloha VII. – E	Simulace 3 s klasickým PI reg - zatěžovací moment (graf)	136
Příloha VII. – F	Simulace 3 s klasickým PI reg - fázová napětí (graf).....	137
Příloha VII. – G	Simulace 3 s klasickým PI reg - otáčky elektromotoru (graf)...	138

PŘÍLOHA VIII.

Příloha VIII. – A	Simulace 4 s fuzzy PI reg - regulační odchylka (graf)	139
Příloha VIII. – B	Simulace 4 s fuzzy PI reg - akční zásah (graf)	140
Příloha VIII. – C	Simulace 4 s fuzzy PI reg - fázové proudy (graf).....	141
Příloha VIII. – D	Simulace 4 s fuzzy PI reg - jízdní odpory (graf)	142
Příloha VIII. – E	Simulace 4 s fuzzy PI reg - zatěžovací moment (graf).....	143
Příloha VIII. – F	Simulace 4 s fuzzy PI reg - fázová napětí (graf)	144
Příloha VIII. – G	Simulace 4 s fuzzy PI reg - otáčky elektromotoru (graf)	145

PŘÍLOHA IX.

Příloha IX. – A	Simulace 4 s klasickým PI reg - regulační odchylka (graf)	146
Příloha IX. – B	Simulace 4 s klasickým PI reg - akční zásah (graf)	147
Příloha IX. – C	Simulace 4 s klasickým PI reg - fázové proudy (graf)	148
Příloha IX. – D	Simulace 4 s klasickým PI reg - jízdní odpory (graf).....	149
Příloha IX. – E	Simulace 4 s klasickým PI reg - zatěžovací moment (graf)	150
Příloha IX. – F	Simulace 4 s klasickým PI reg - fázová napětí (graf).....	151
Příloha IX. – G	Simulace 4 s klasickým PI reg - otáčky elektromotor (graf).....	152

PŘÍLOHA X. – obálka s CD

Příloha X. – A	Soubory obsahující simulační modely v Simulinku (program) Složka – "Simulacni_obvody"	
Příloha X. – B	Soubory obsahující výpočetní skript a vykreslení průběhů simulačních dat v MATLABu (program) Složka – "Skripty"	
Příloha X. – C	Soubor s doběhovou charakteristikou PMSM [2] (MS Excel) Soubor – "Dobehova_charakteristika_PMSM.xls"	

```

% Elektromotor data
R = 6.6*(10^-3); % [Ohm]    odpor vinuti
L = 230*(10^-6); % [H]    indukcnost vinuti
Ld = L; % [H]    indukcnost v ose d
Lq = L; % [H]    indukcnost v ose q
psi_pm = 0.318333; % [Wb]    magneticky tok permanentnich
    magnetu
Jm = 0.27; % [kg.m^2]    moment setrvacnosti elektromotoru
B = 0.01874; % [N.m.s.rad^-1]    koeficient trecich ztrat
pp = 2; % [-]    pocet polparu
Mn = 191; % [N.m]    jmenovity moment

% pneumatiky 185/60 r15
sirka = 0.185; % [m]    sirka pneumatiky
profil = 0.6; % [-]    vyska pneumatiky
prumer = 15*0.0254; % [m]    prumer rafku
dk = prumer+(2*sirka*profil); % [m]    prumer kola
rk = dk/2; % [m]    polomer kola
Jk = 16*(rk^2); % [kg.m^2]    moment setrvacnosti kol

% parametry elektromobilu
m = 1500; % [kg]    hmotnost vozidla
g = 9.81; % [m.s^-2]    gravitacni zrychleni
G = m*g; % [N]    tiha vozidla
ic = 5.79; % [-]    celkovy prevod

% Odpor valeni Of
f = 0.015; % [-]    soucinitel odporu valeni pro suchy
    asfalt

% Odpor vzduchu Ox
Cx = 0.316; % [-]    soucinitel odporu vzduchu
Sx = 1.463*1.467; % [m^2]    celni plocha vozidla
Ro = 1.25; % [kg.m^-3]    hustota vzduchu
Ox = 0.5*Ro*Sx*Cx; % [N]    odpor vzduchu
v_z = 10; % [m.s^1]    rychlost protivetru

% Odpor zrychleni Oz
eta = 0.98; % [-]    ucinnost prevodu
ny = 1+(((Jm*(ic^2))+4*Jk)*eta)/(m*(rk^2)); % [-]
    souc. odporu zrychl.

% Odpor stoupani Os
alfa = atan(0.12); % [rad]    uhel stoupani - stoupani 12 %

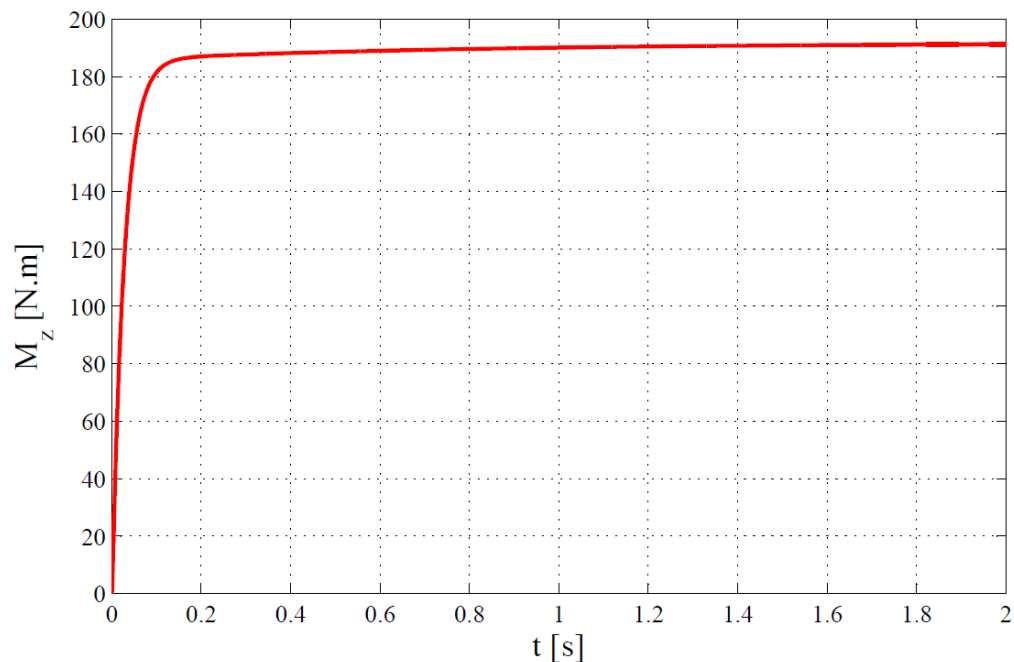
% Prepocet otacek elektromotoru na rychlost vozidla
n_v = (60*pi*dk)/(ic*1000); % prepocet z [ot.min^-1] na
    [km.hod^-1]

```

Příloha I. – B

Rozběh elektromotoru na n_n – Zatěžovací moment

$$M_z(t) = n(t)/n_n$$

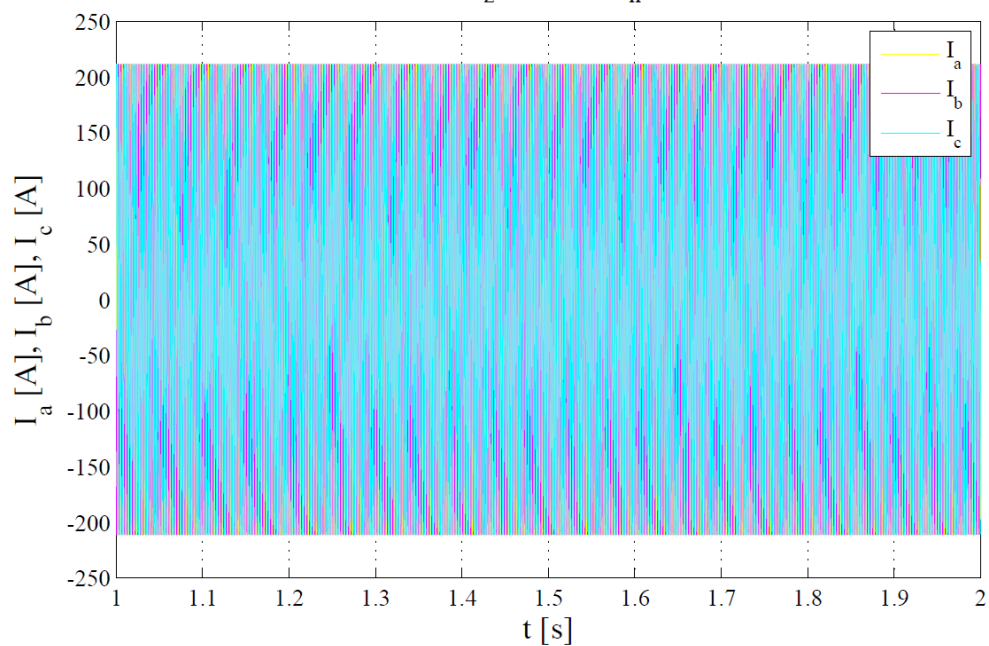


Obr. 11.1 – Rozběh elektromotoru – průběh zatěžovacího momentu

Příloha I. – C

Rozběh elektromotoru na n_n - Fázové proudy I_a, I_b, I_c

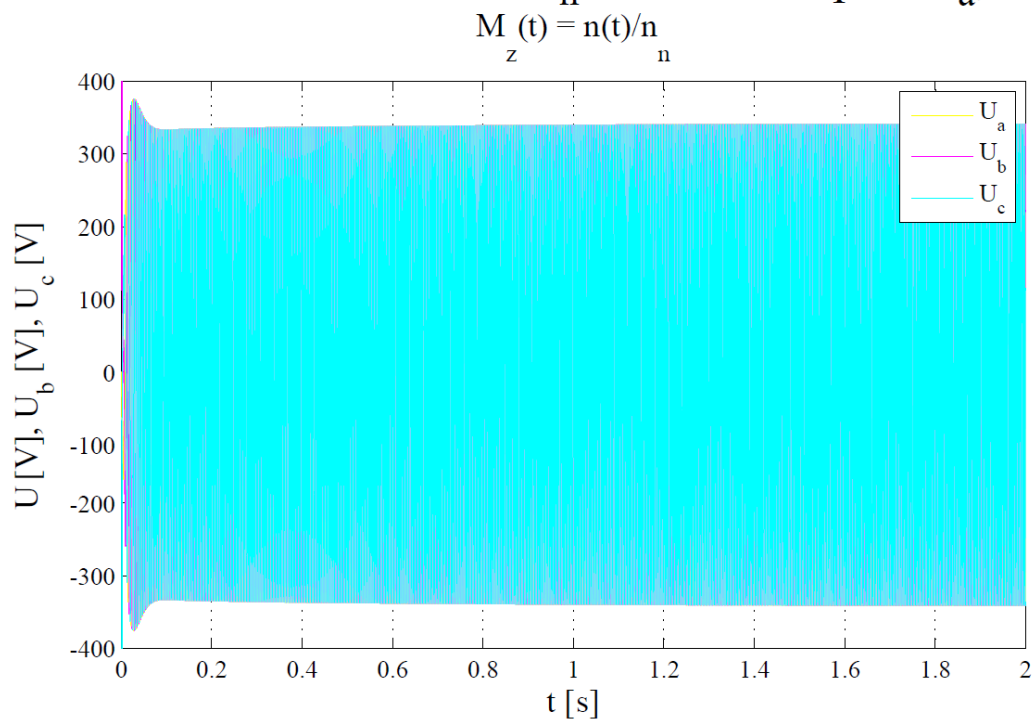
$$M_z(t) = n(t)/n_n$$



Obr. 11.2 – Rozběh elektromotoru – průběhy fázových proudů

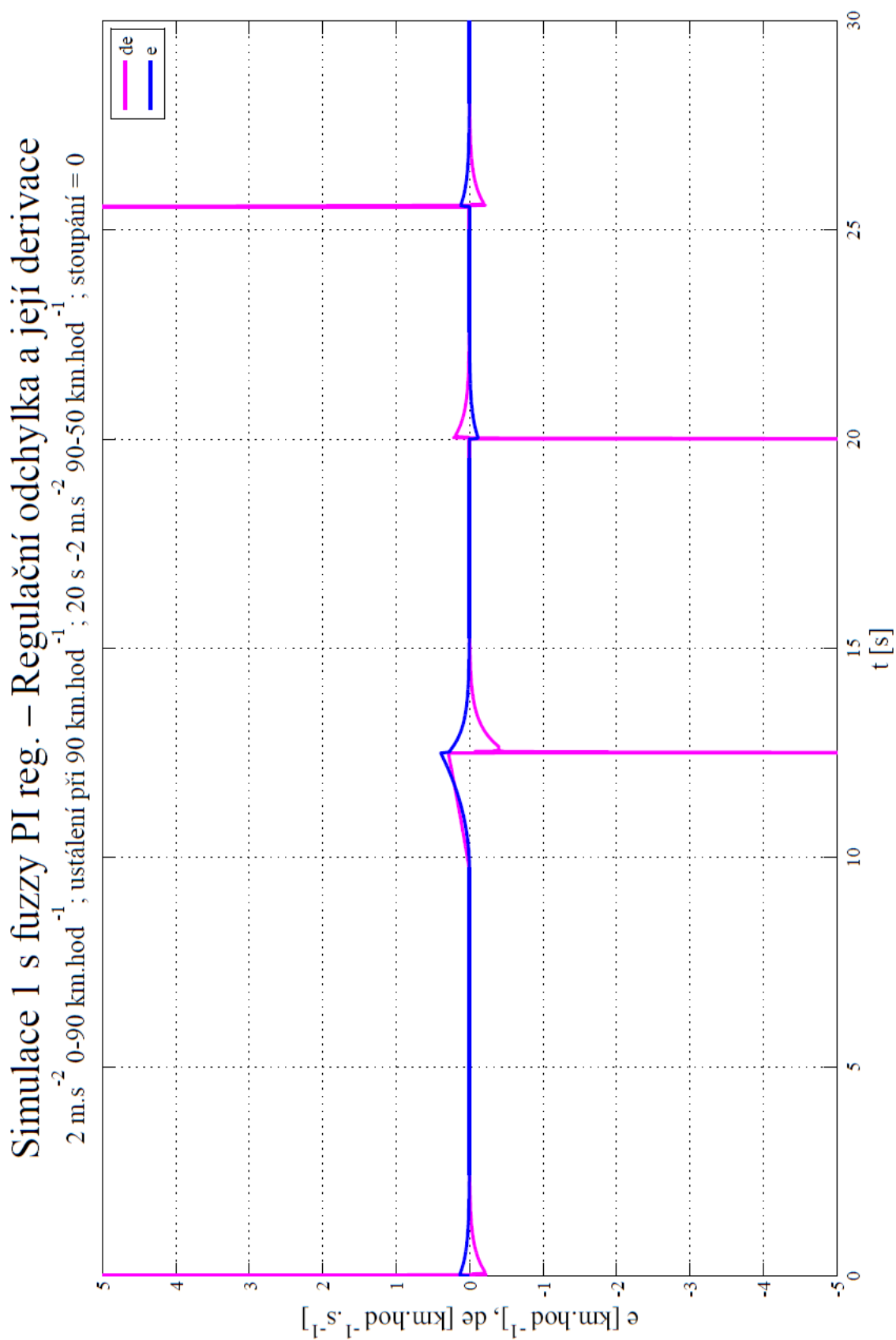
Příloha I. – D

Rozběh elektromotoru na n_n – Fázová napětí U_a, U_b, U_c



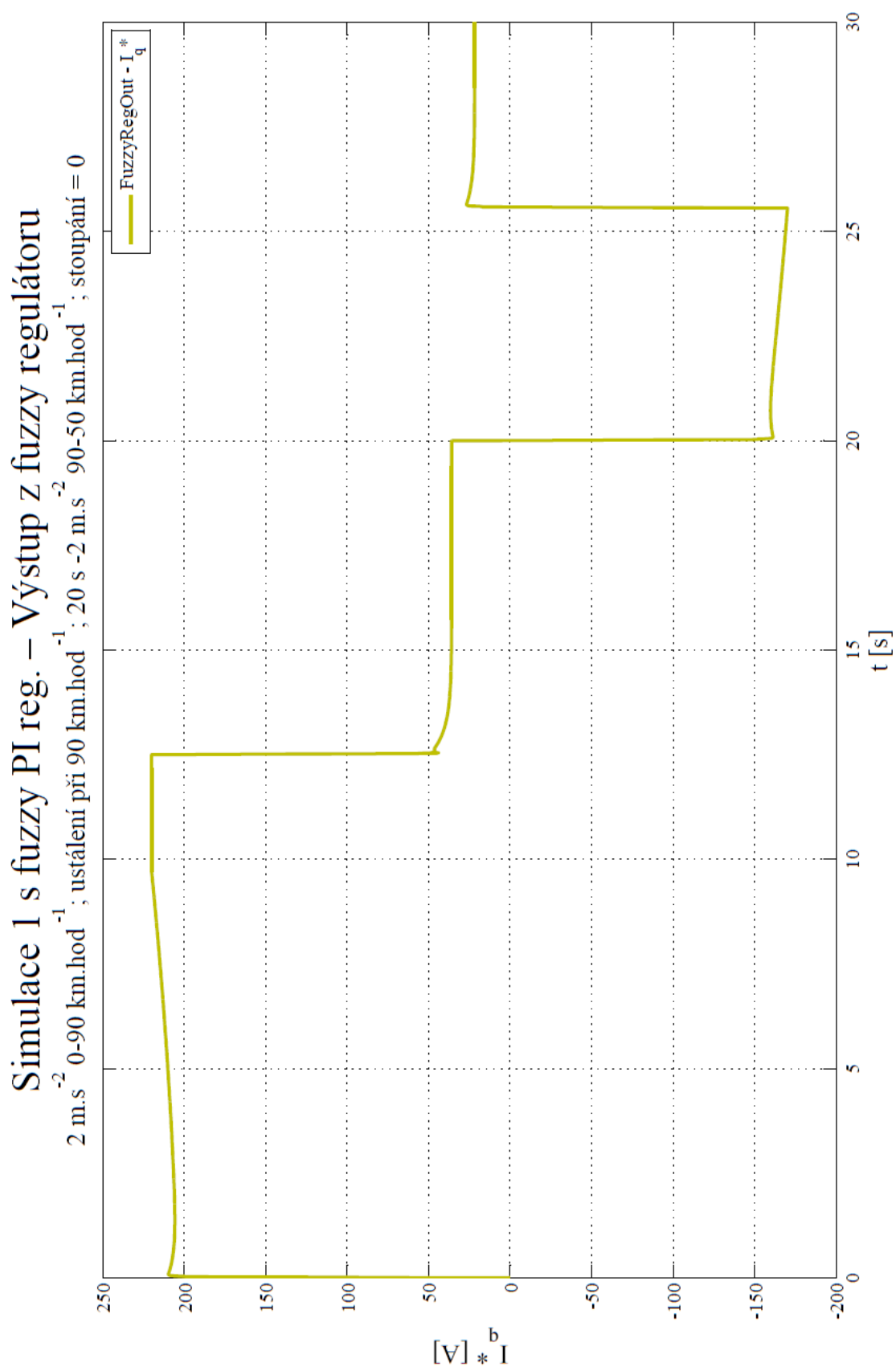
Obr. 11.3 – Rozběh elektromotoru – průběhy fázových napětí

Příloha II. – A



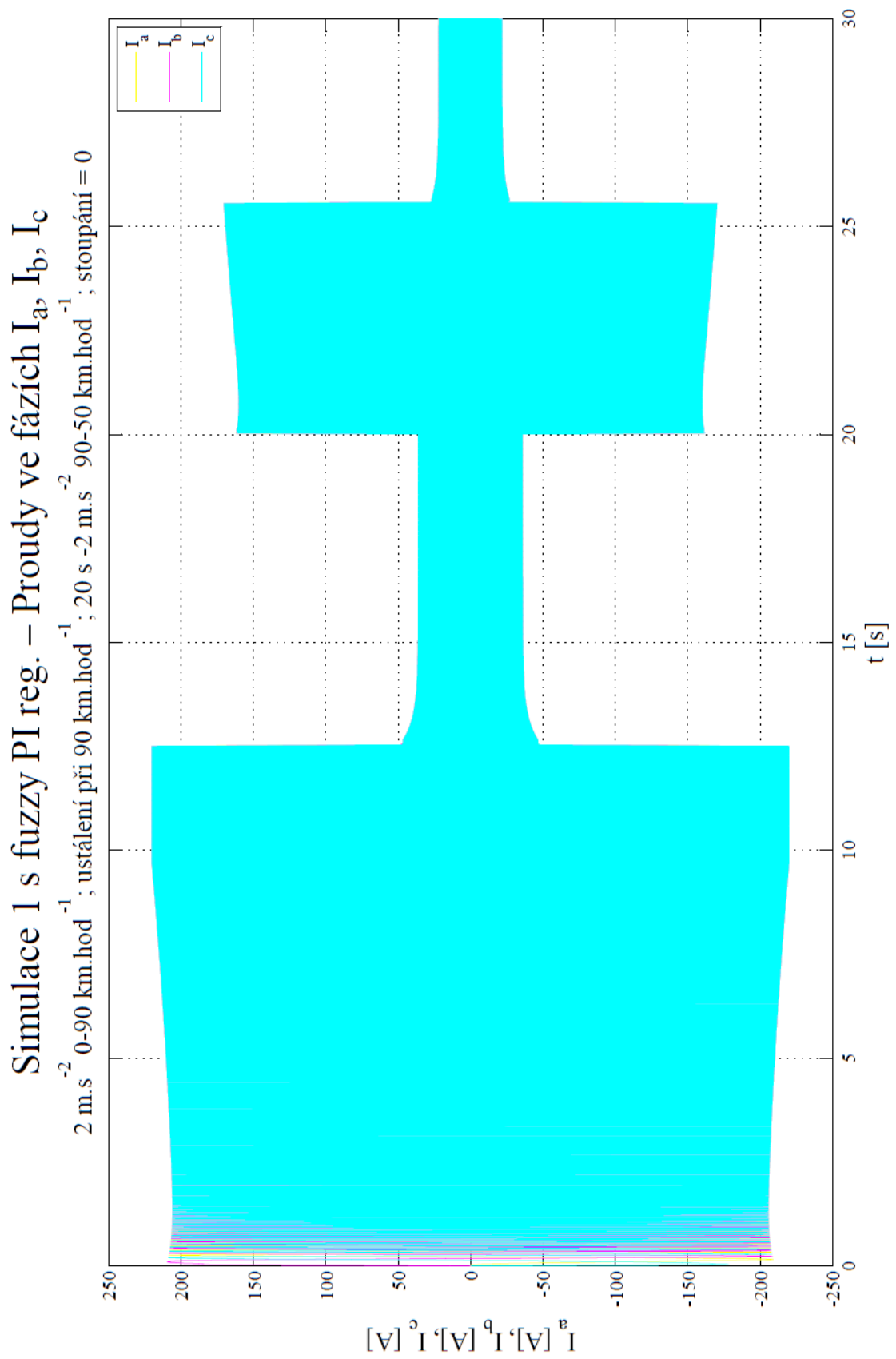
Obr. 11.4 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace

Příloha II. – B



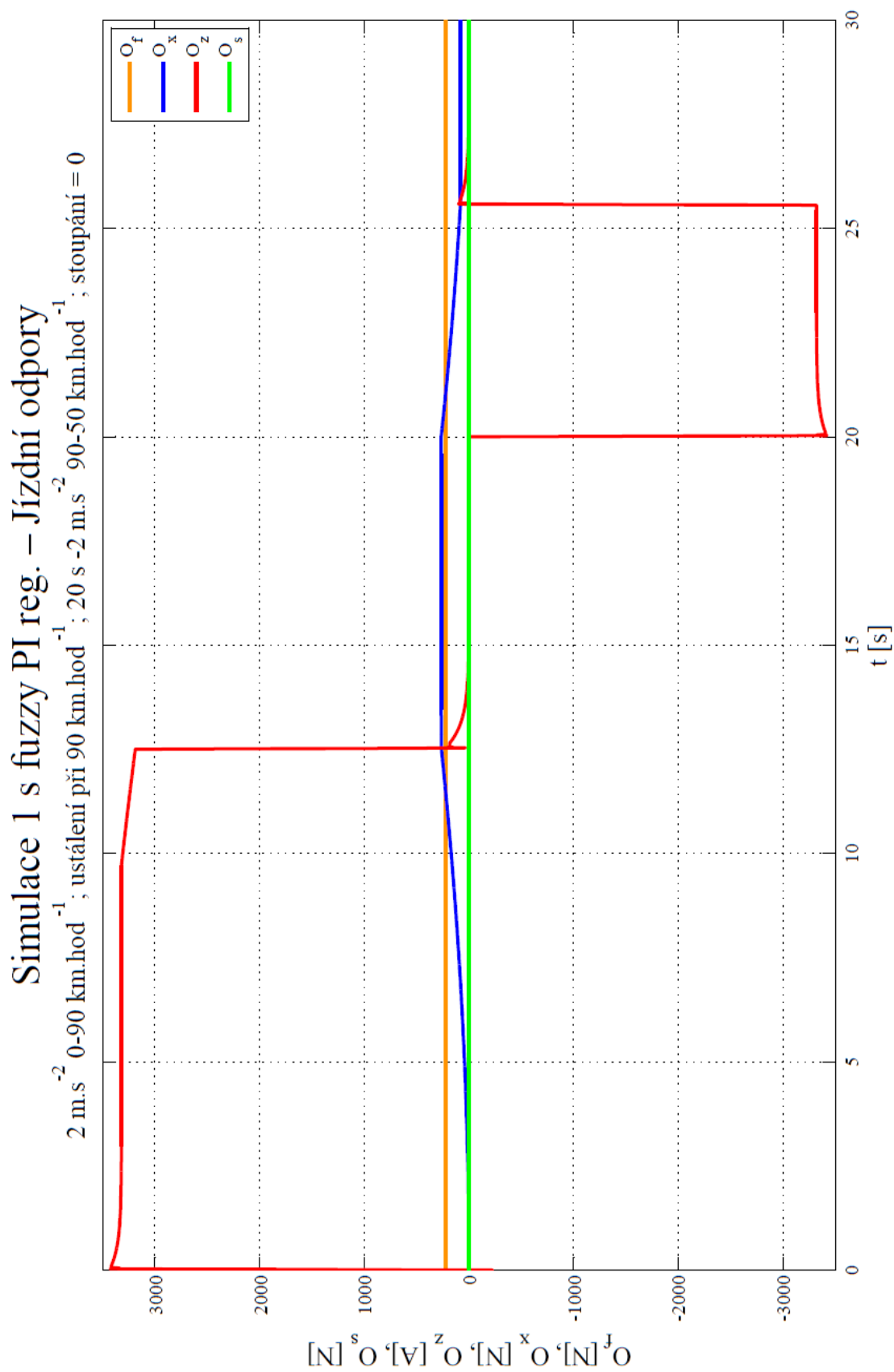
Obr. 11.5 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha II. – C



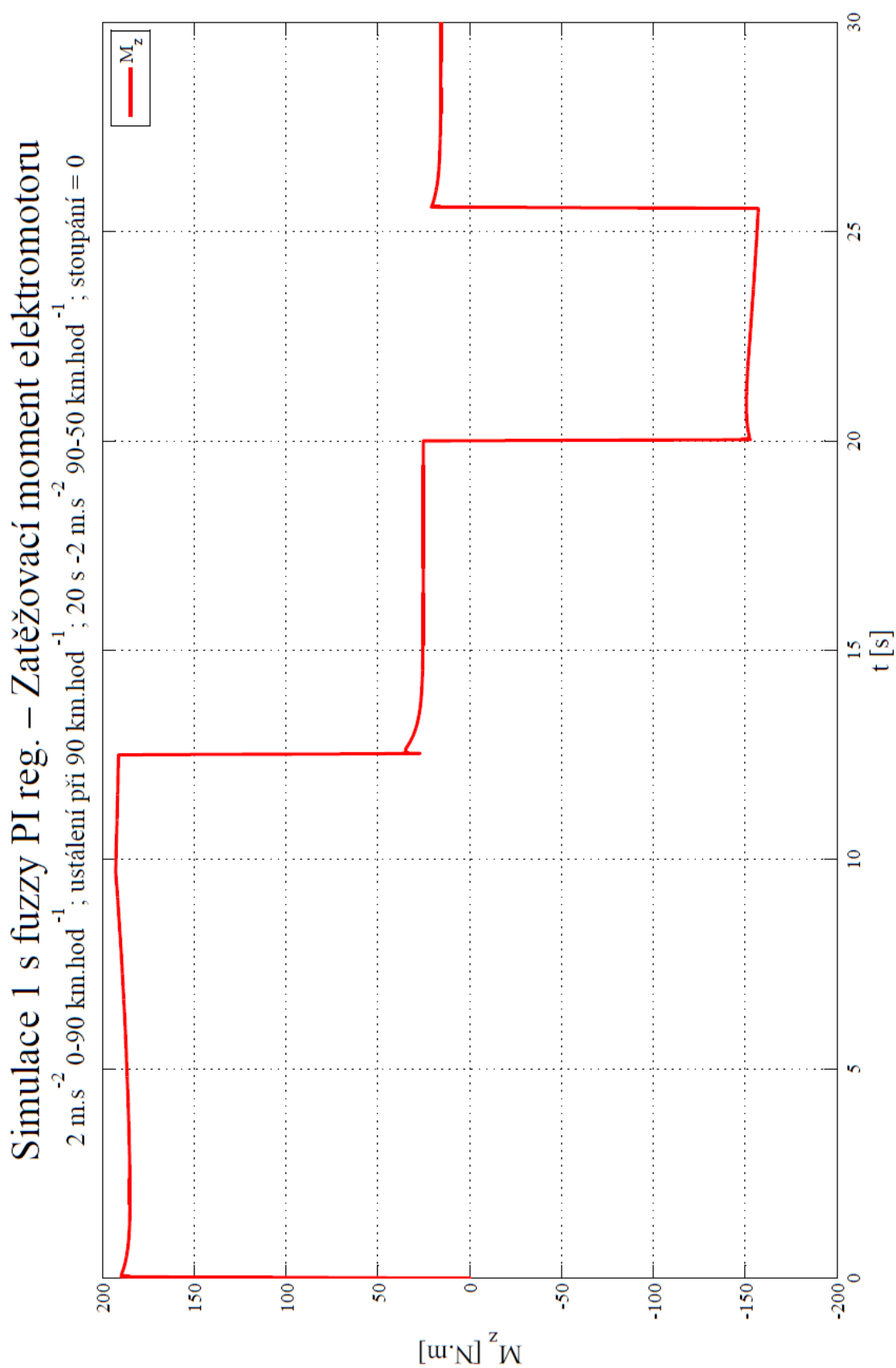
Obr. 11.6 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha II. – D



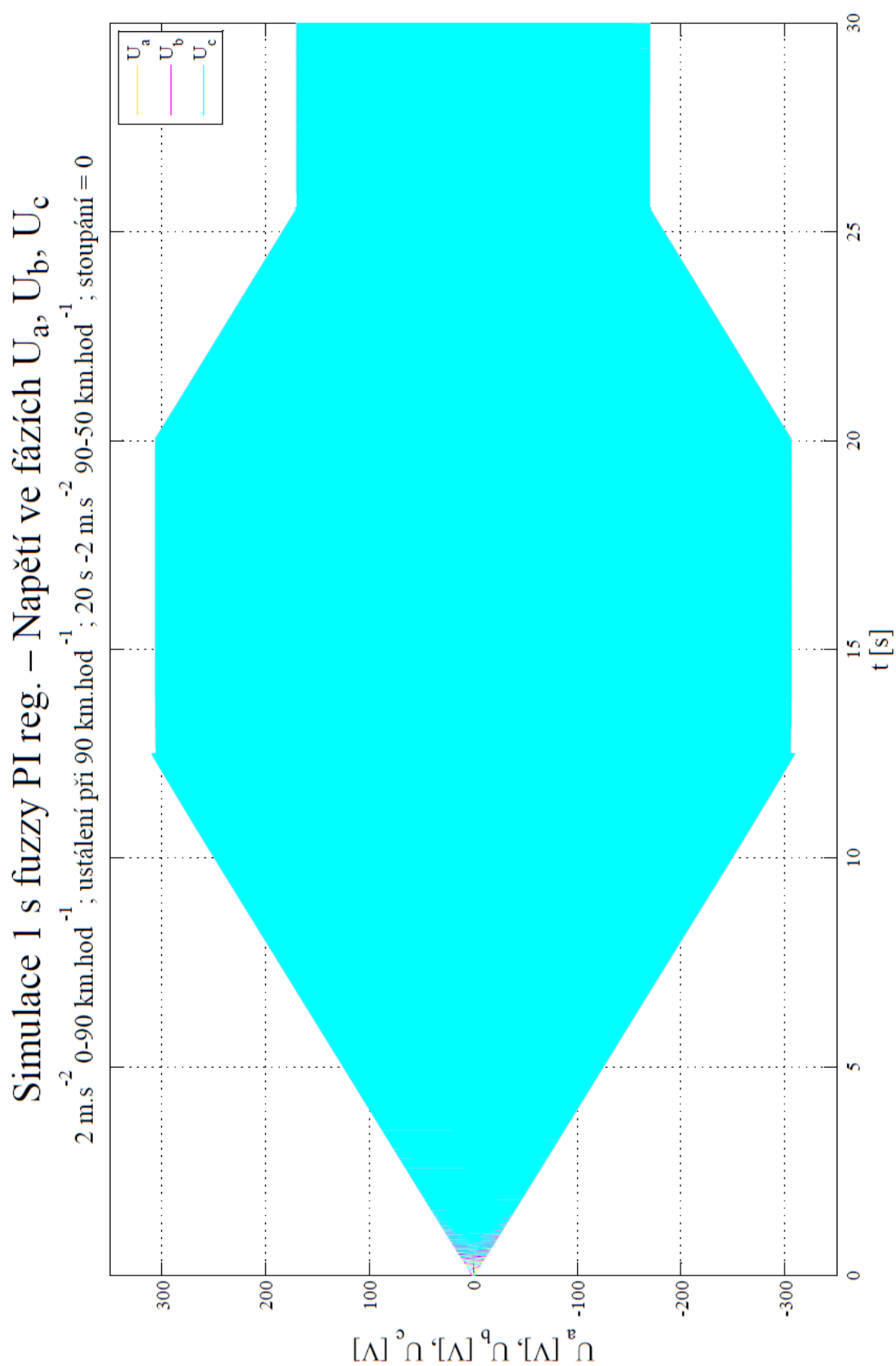
Obr. 11.7 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha II. – E



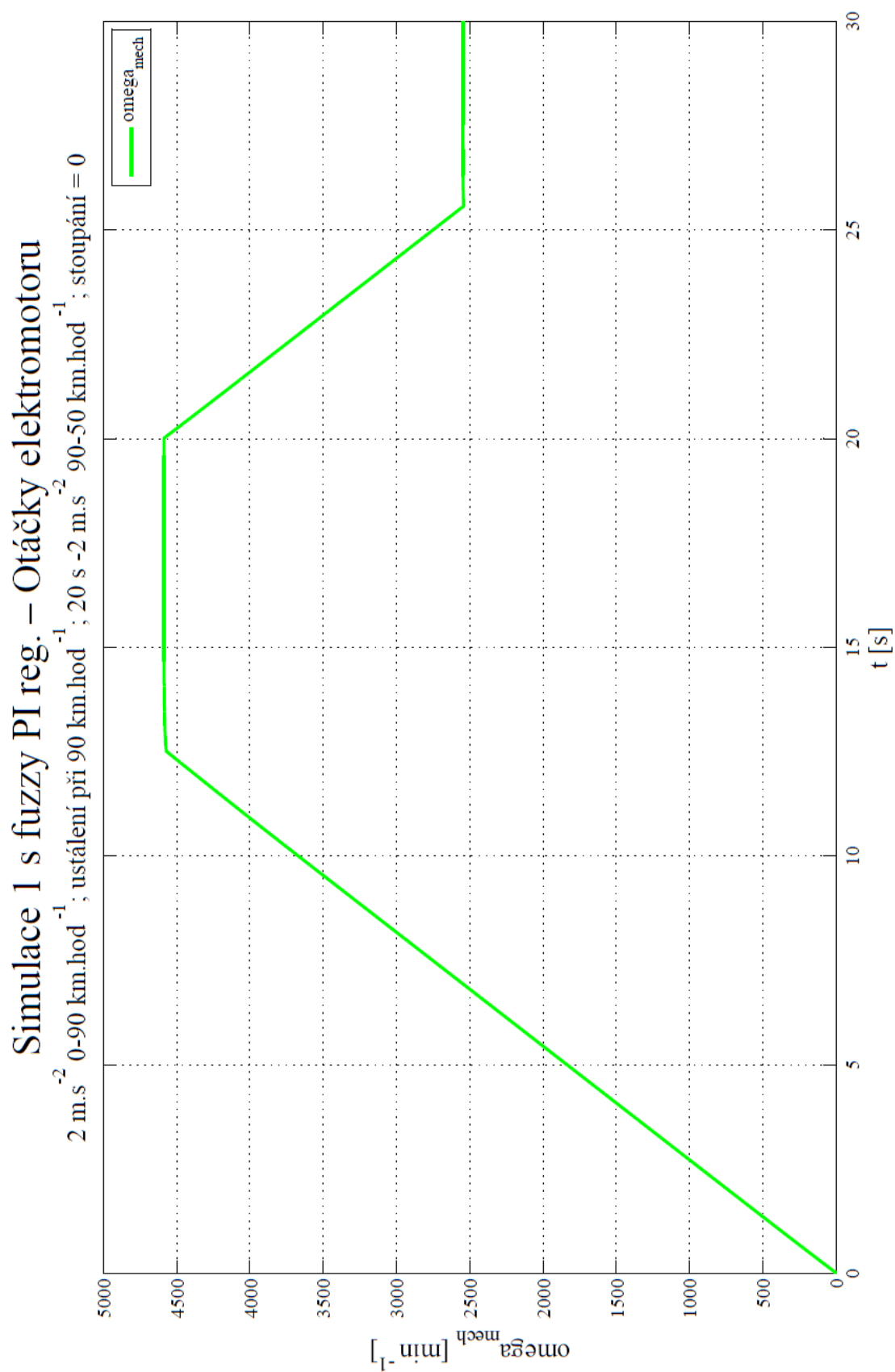
Obr. 11.8 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha II. – F



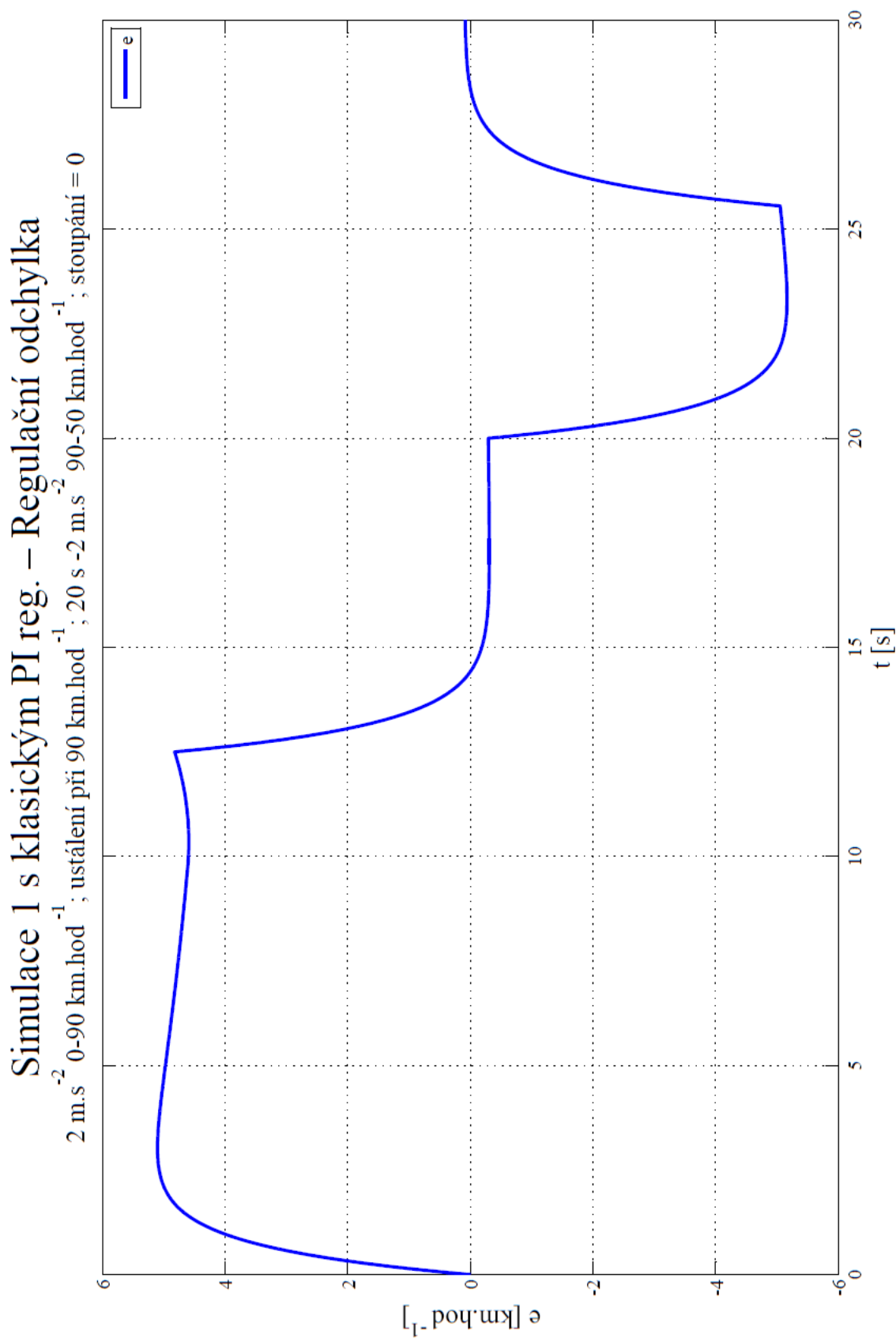
Obr. 11.9 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha II. – G



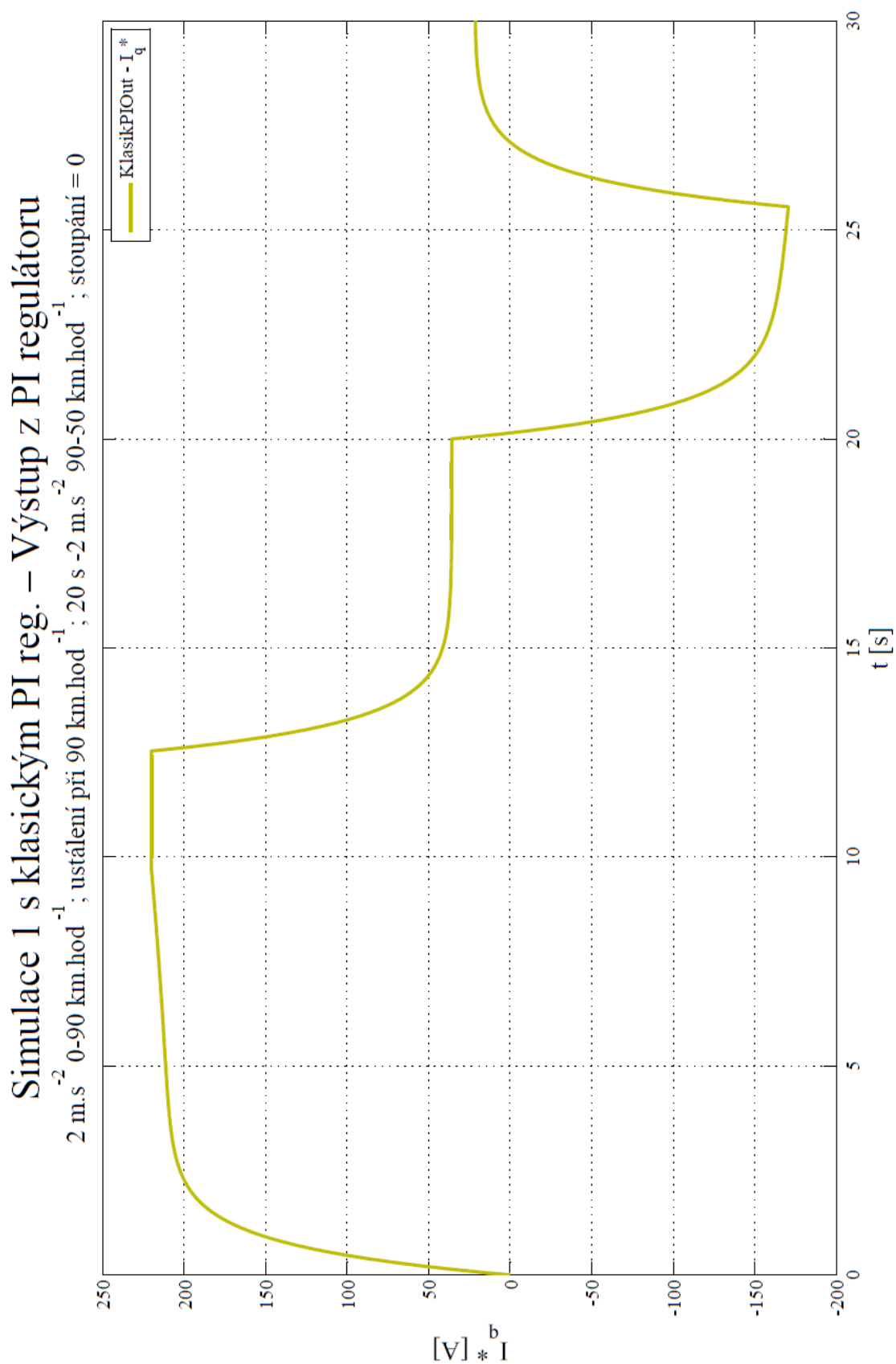
Obr. 11.10 – Simulace 1 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru

Příloha III. – A



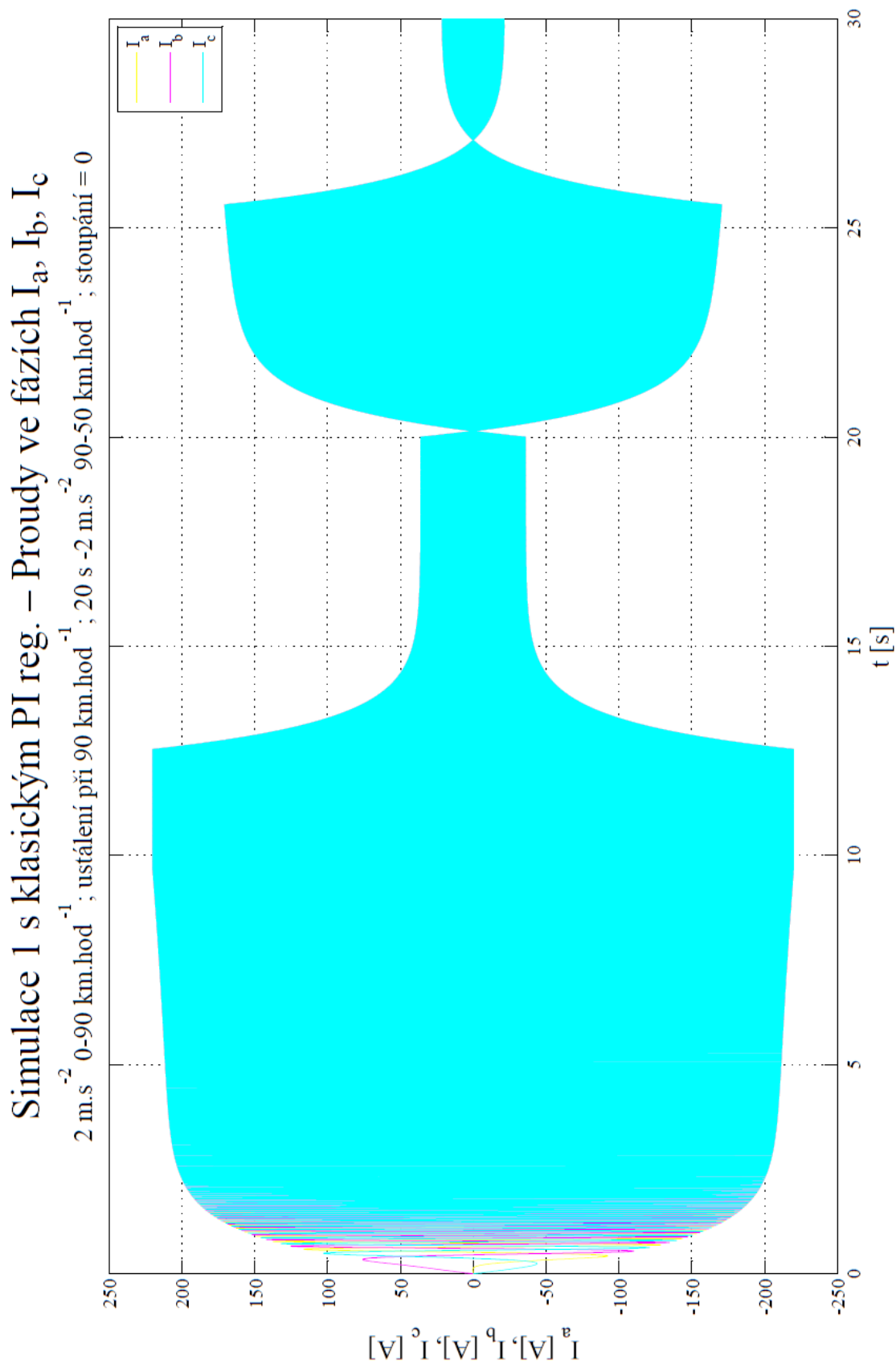
Obr. 11.11 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka

Příloha III. – B



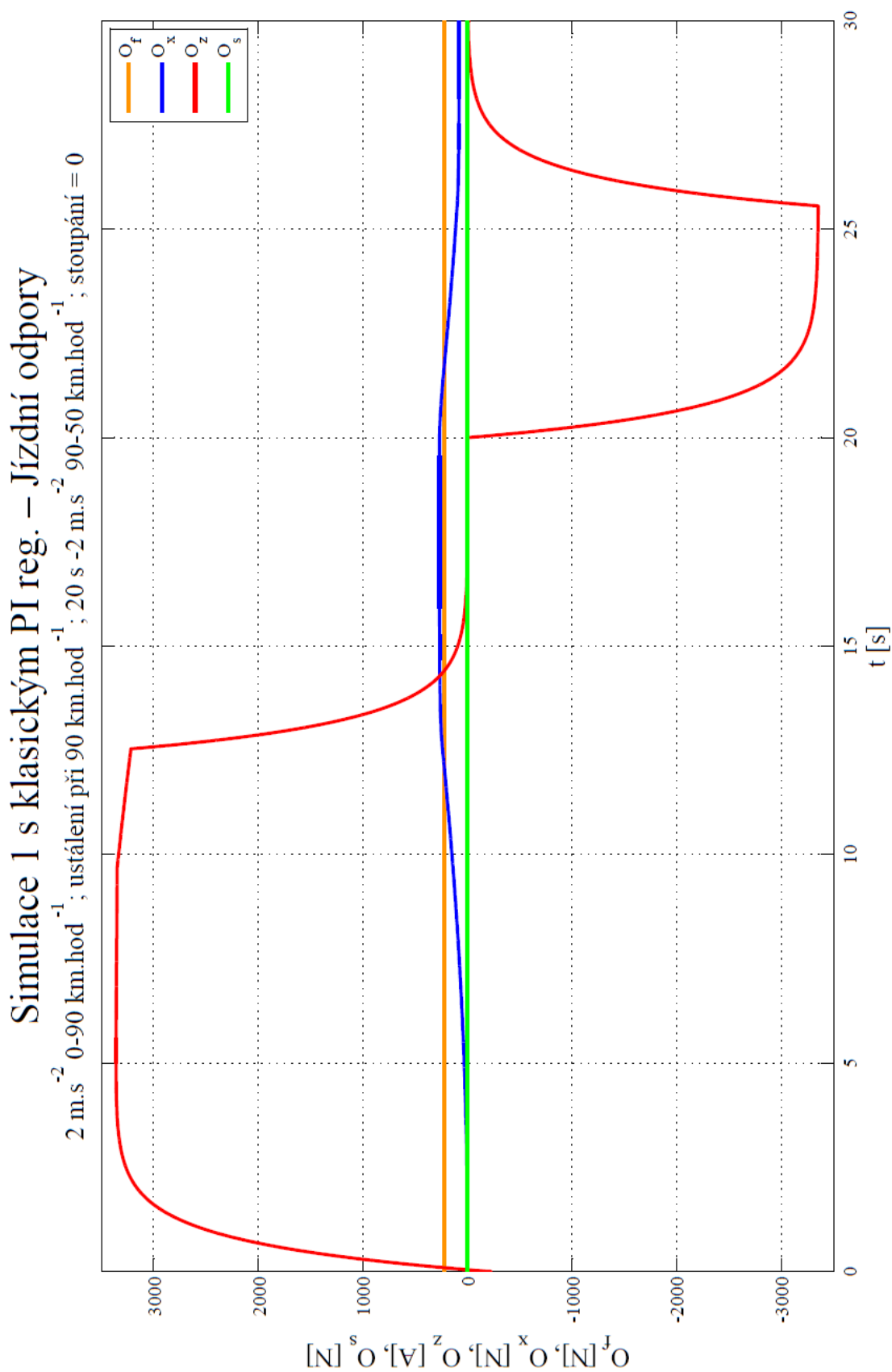
Obr. 11.12 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha III. – C



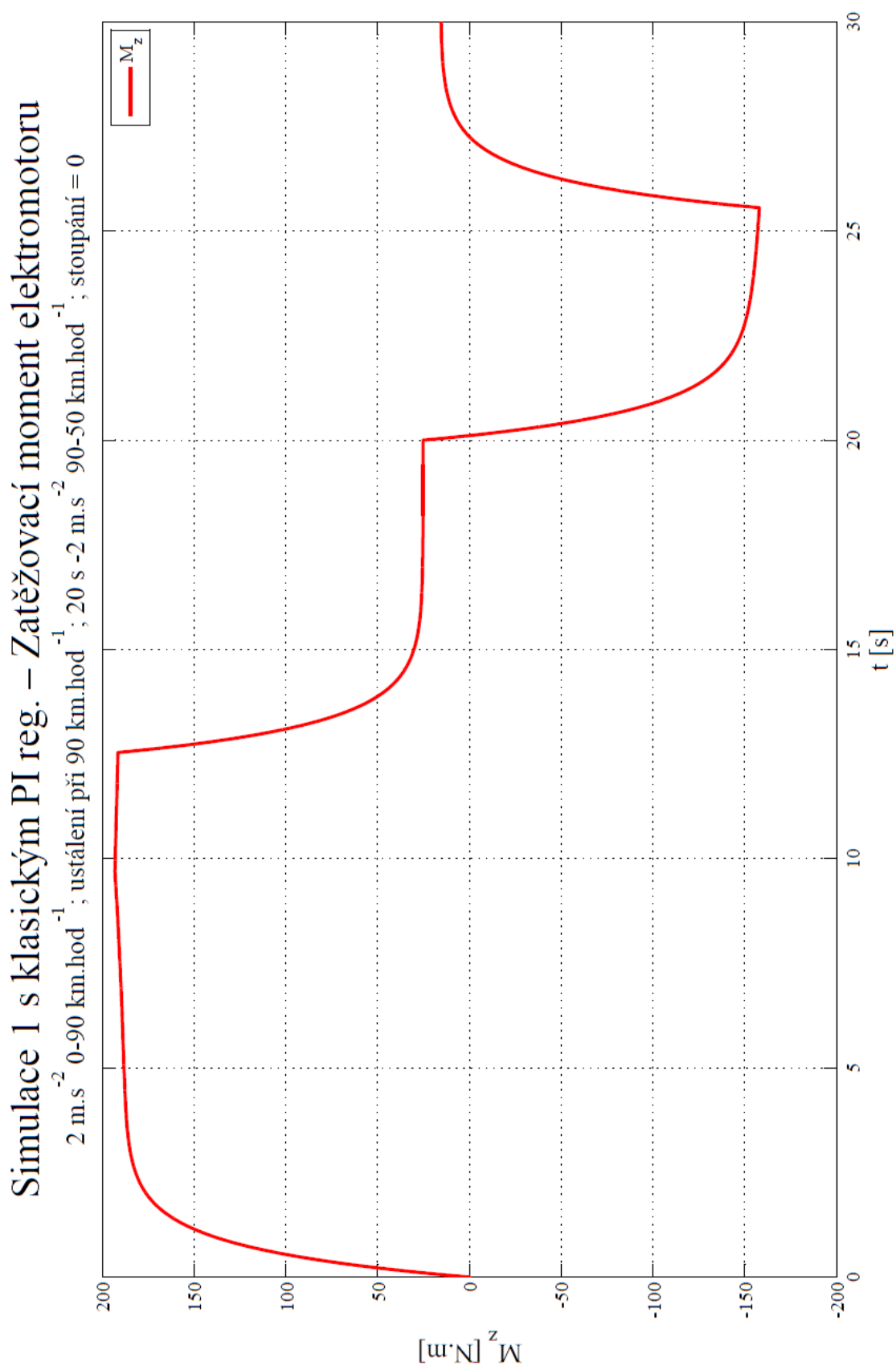
Obr. 11.13 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha III. – D



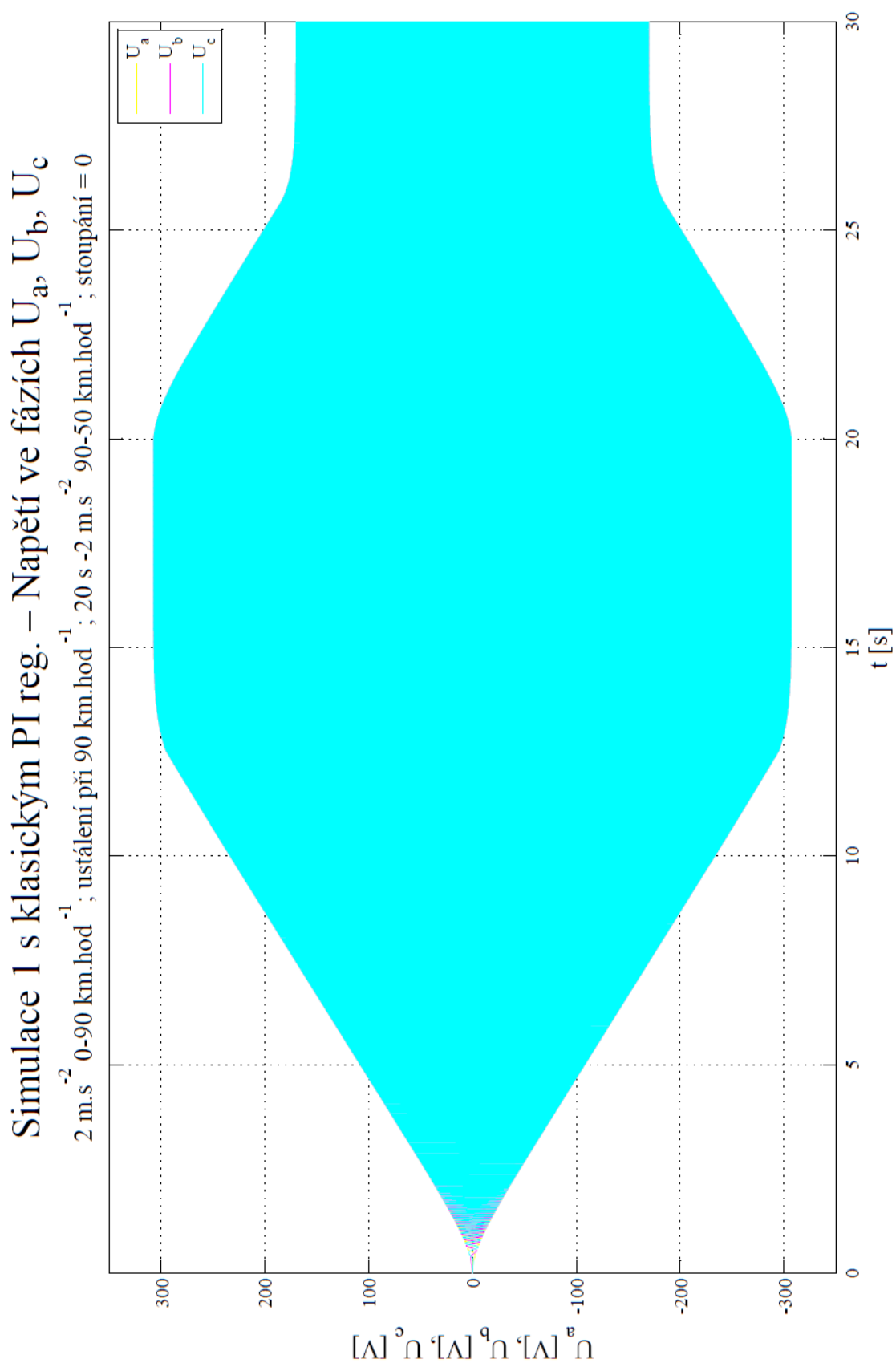
Obr. 11.14 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha III. – E



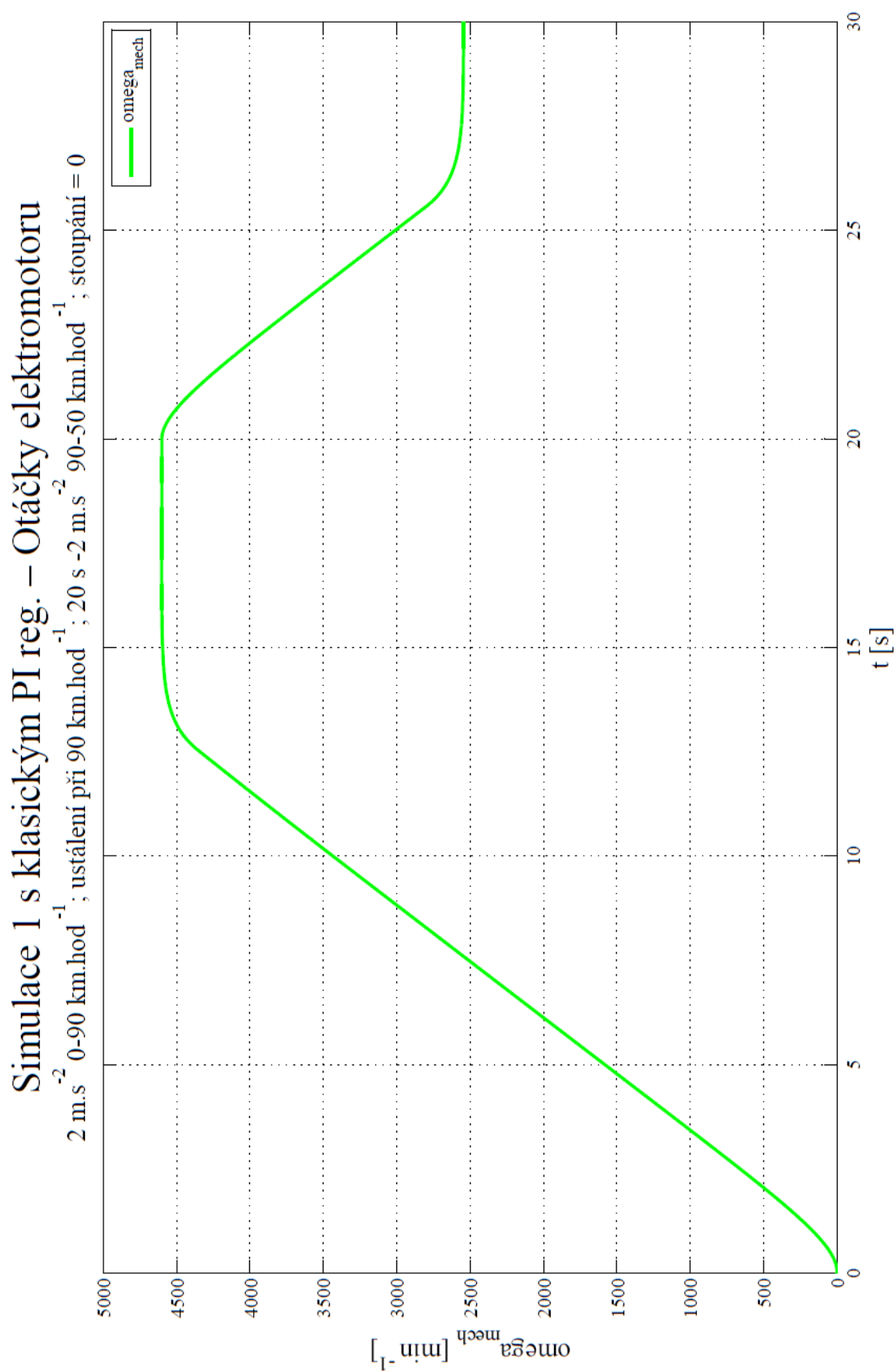
Obr. 11.15 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha III. – F



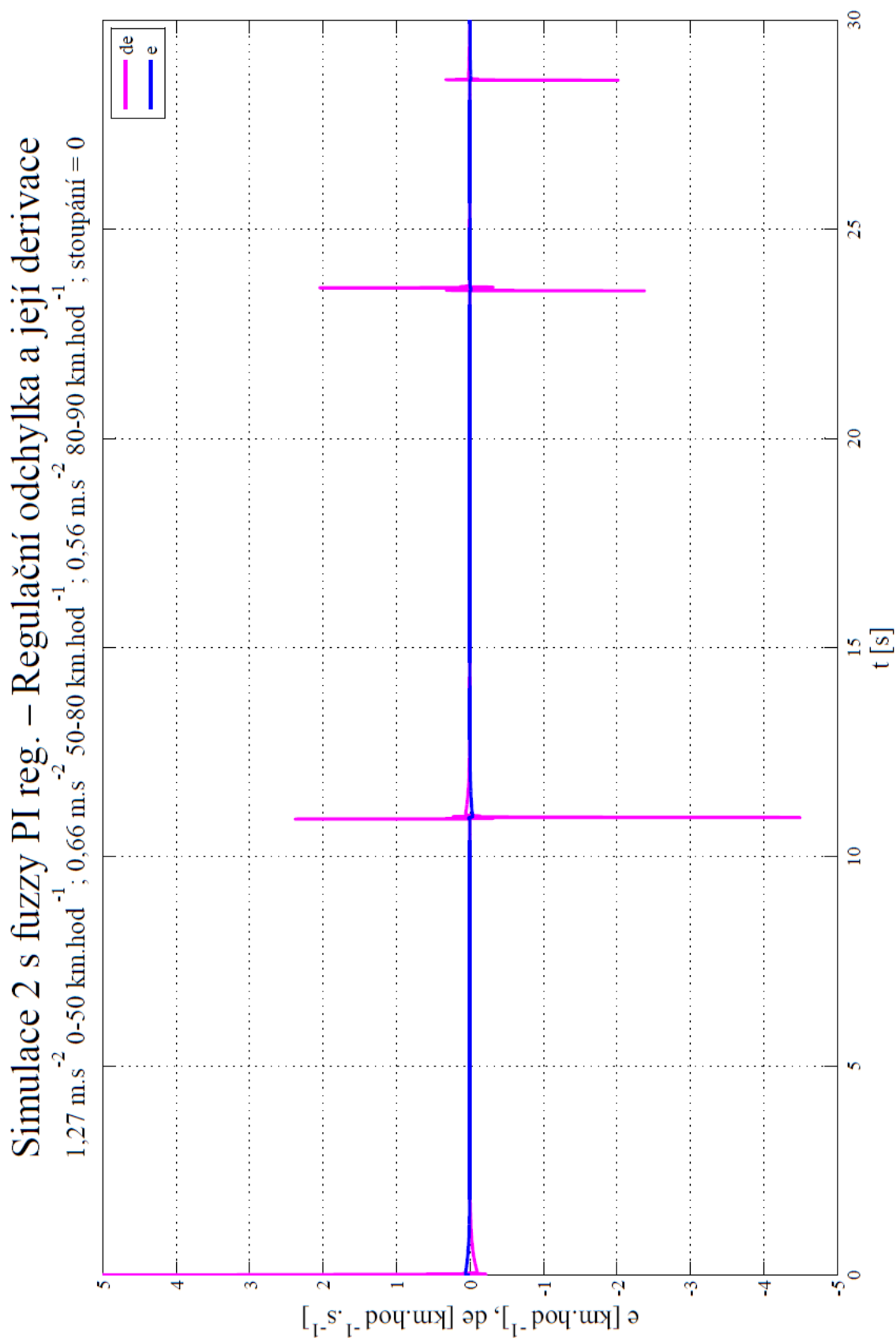
Obr. 11.16 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha III. – G



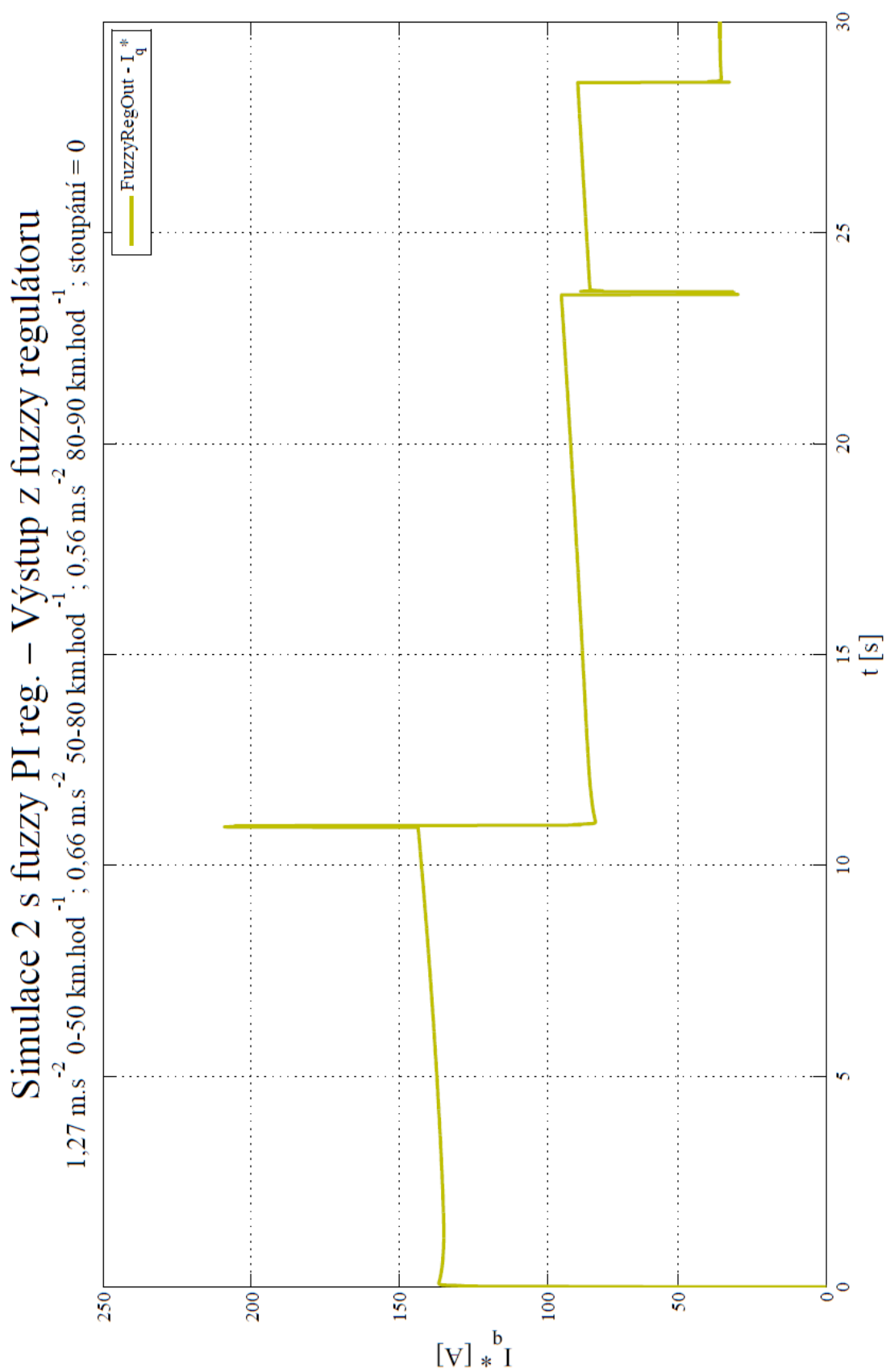
Obr. 11.17 – Simulace 1 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru

Příloha IV. – A



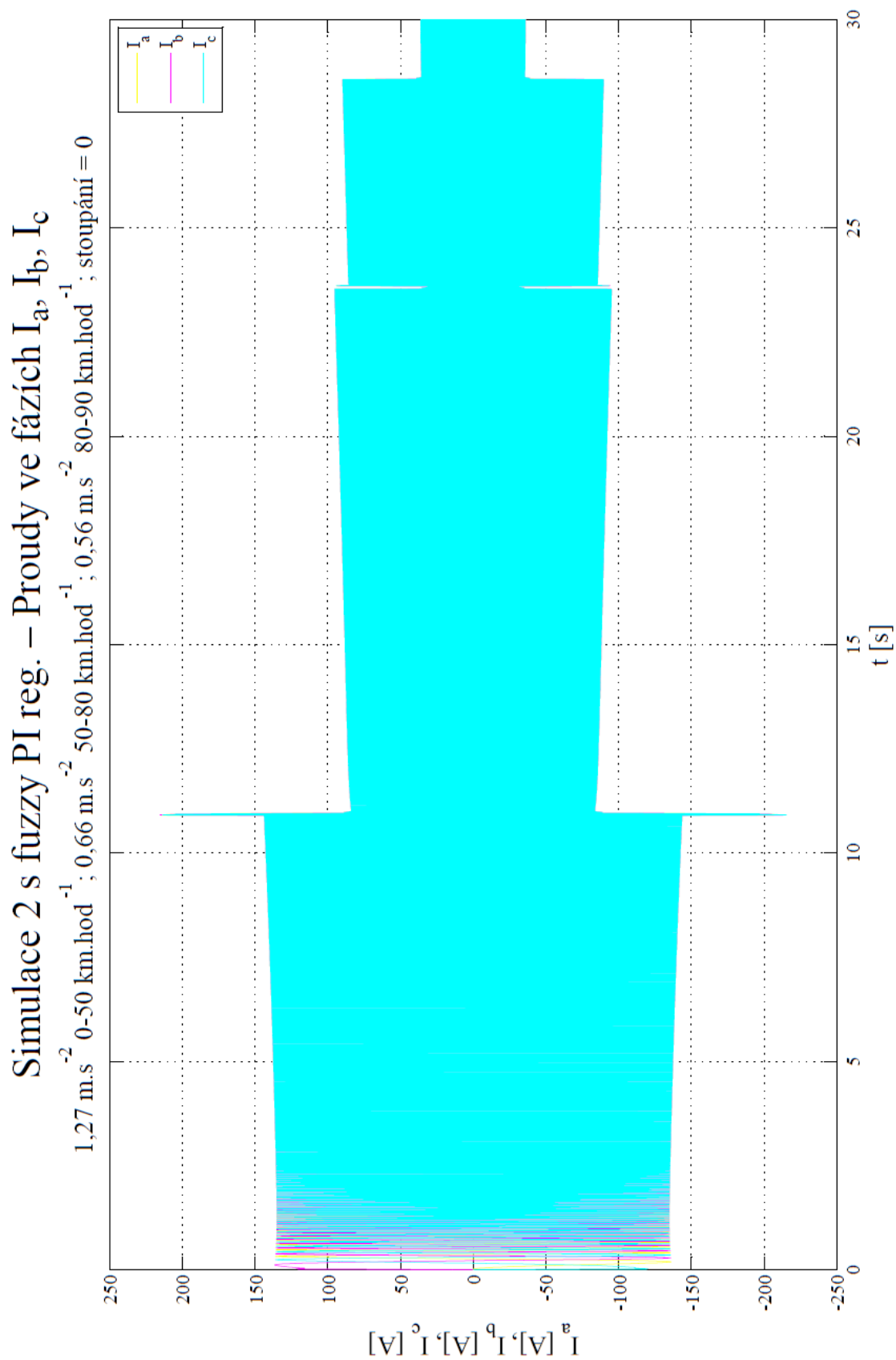
Obr. 11.18 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace

Příloha IV. – B



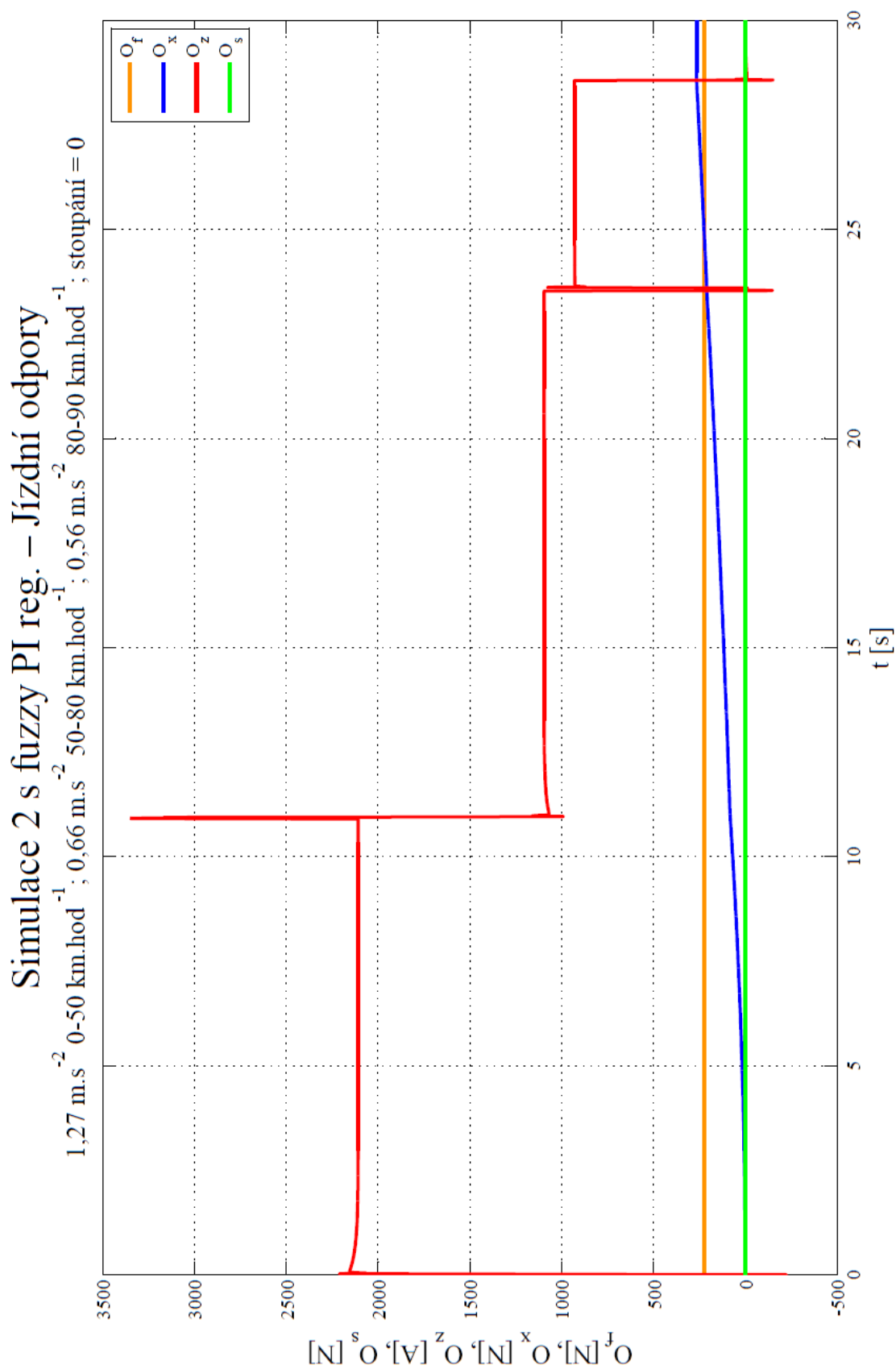
Obr. 11.19 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha IV. – C



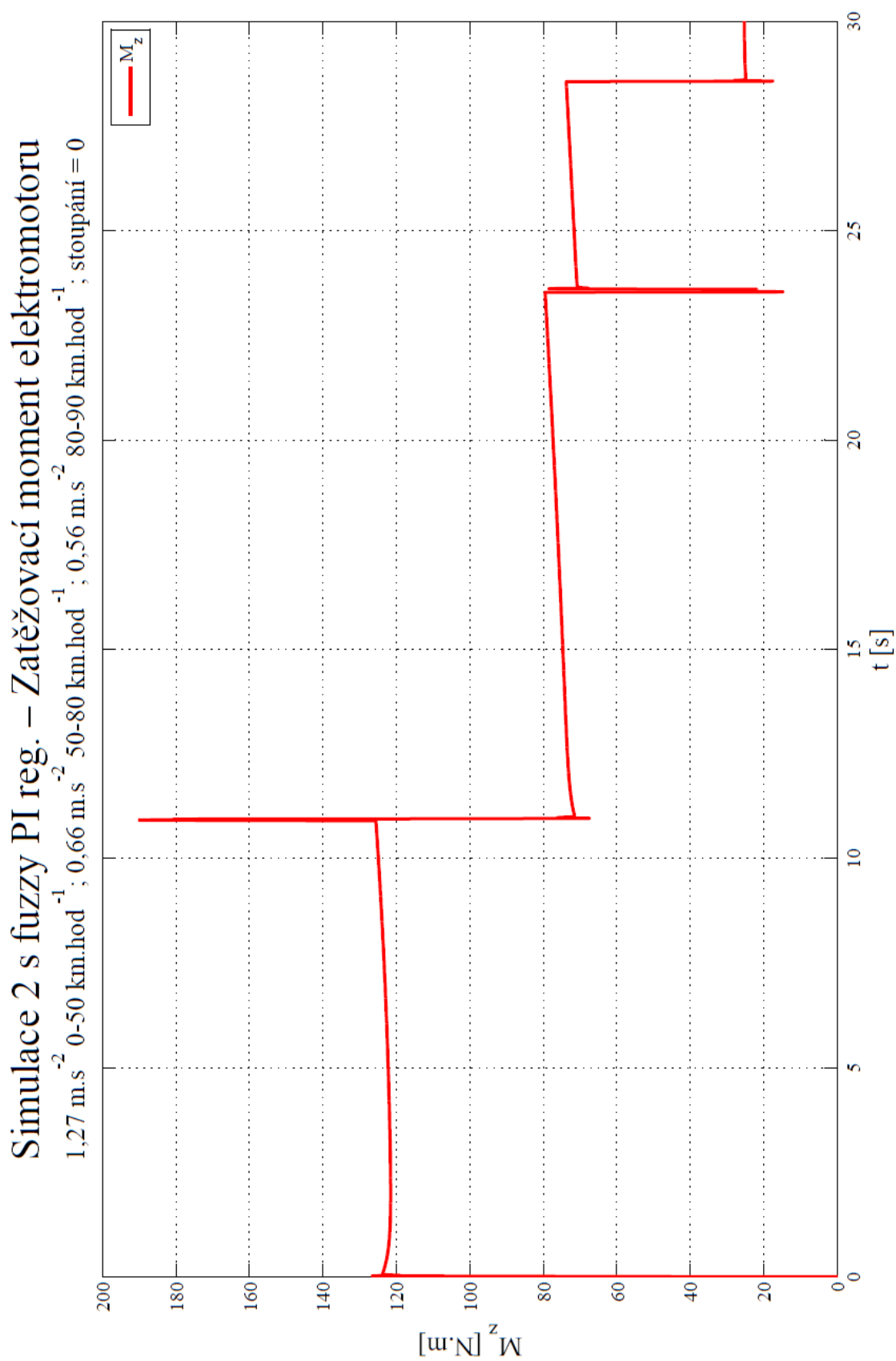
Obr. 11.20 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha IV. – D



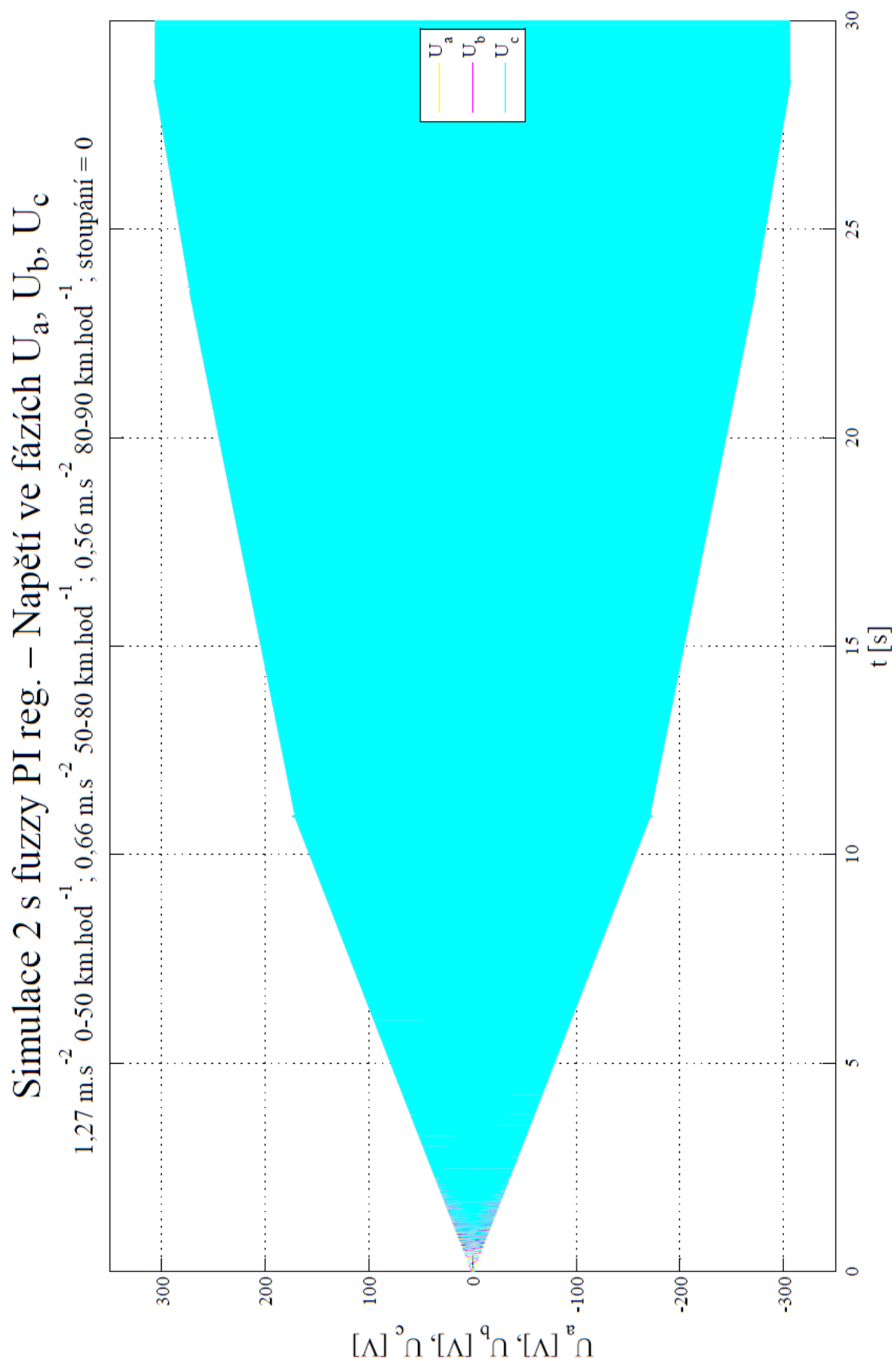
Obr. 11.21 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha IV. – E



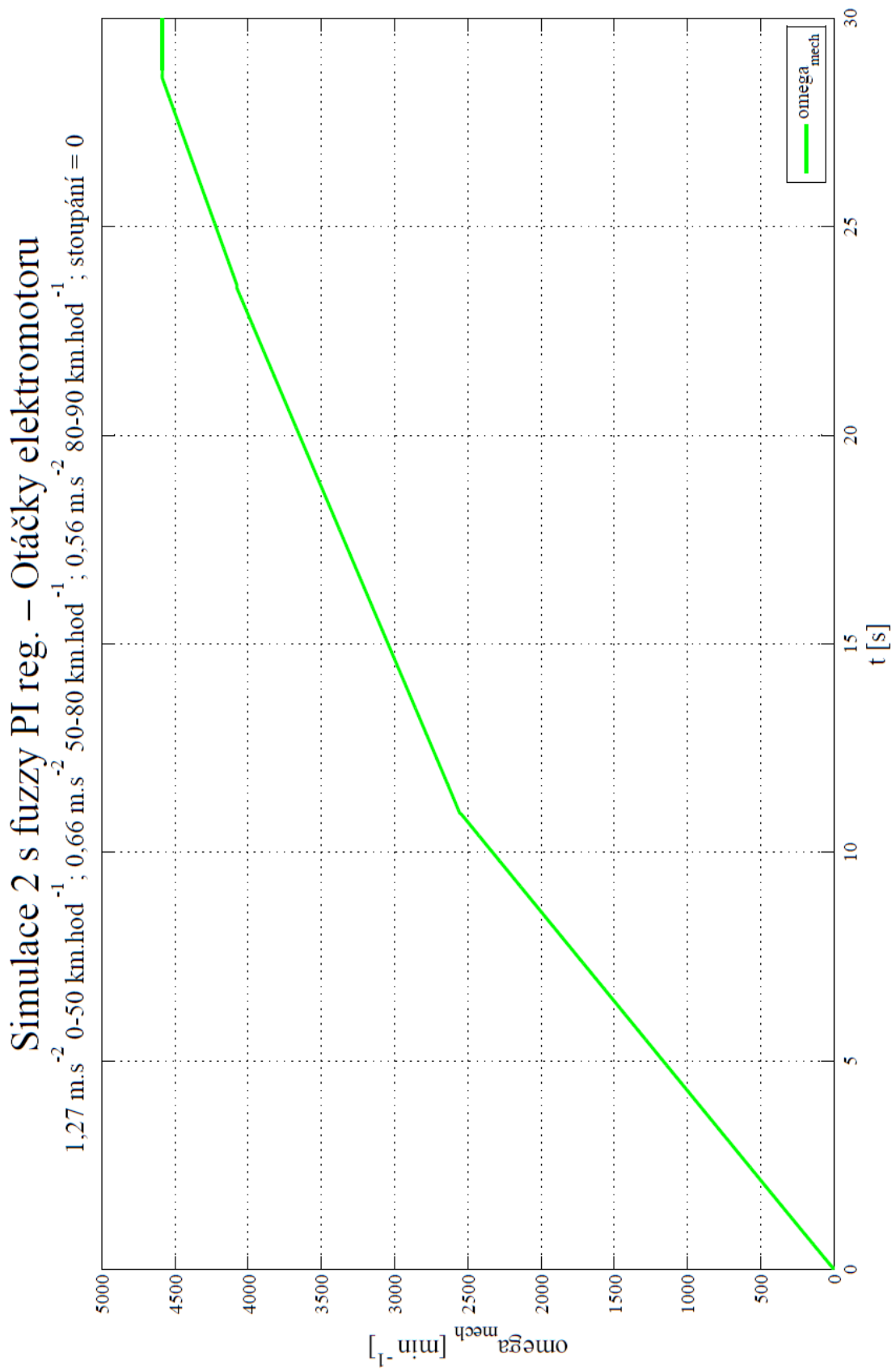
Obr. 11.22 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha IV. – F



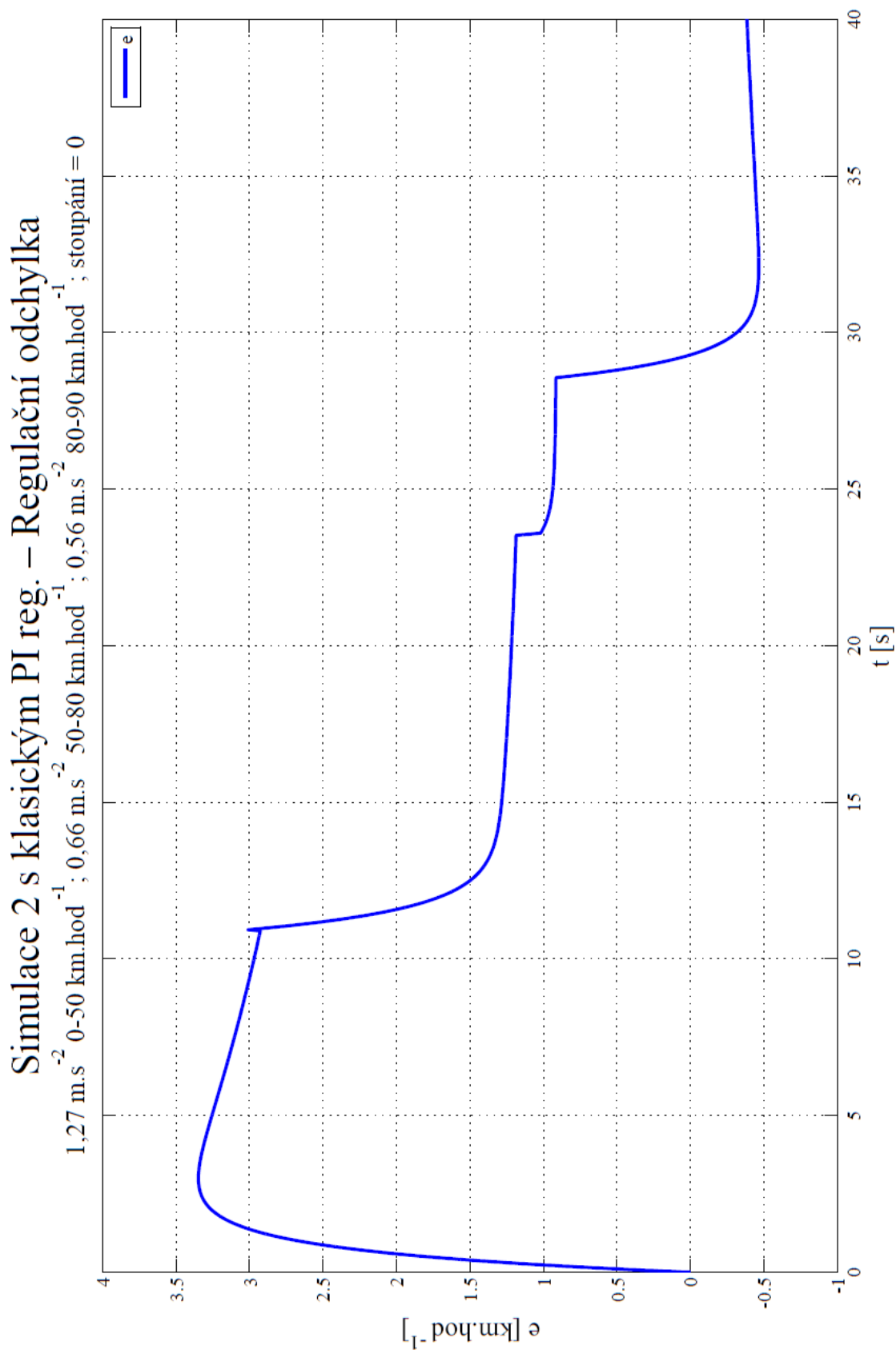
Obr. 11.23 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha IV. – G



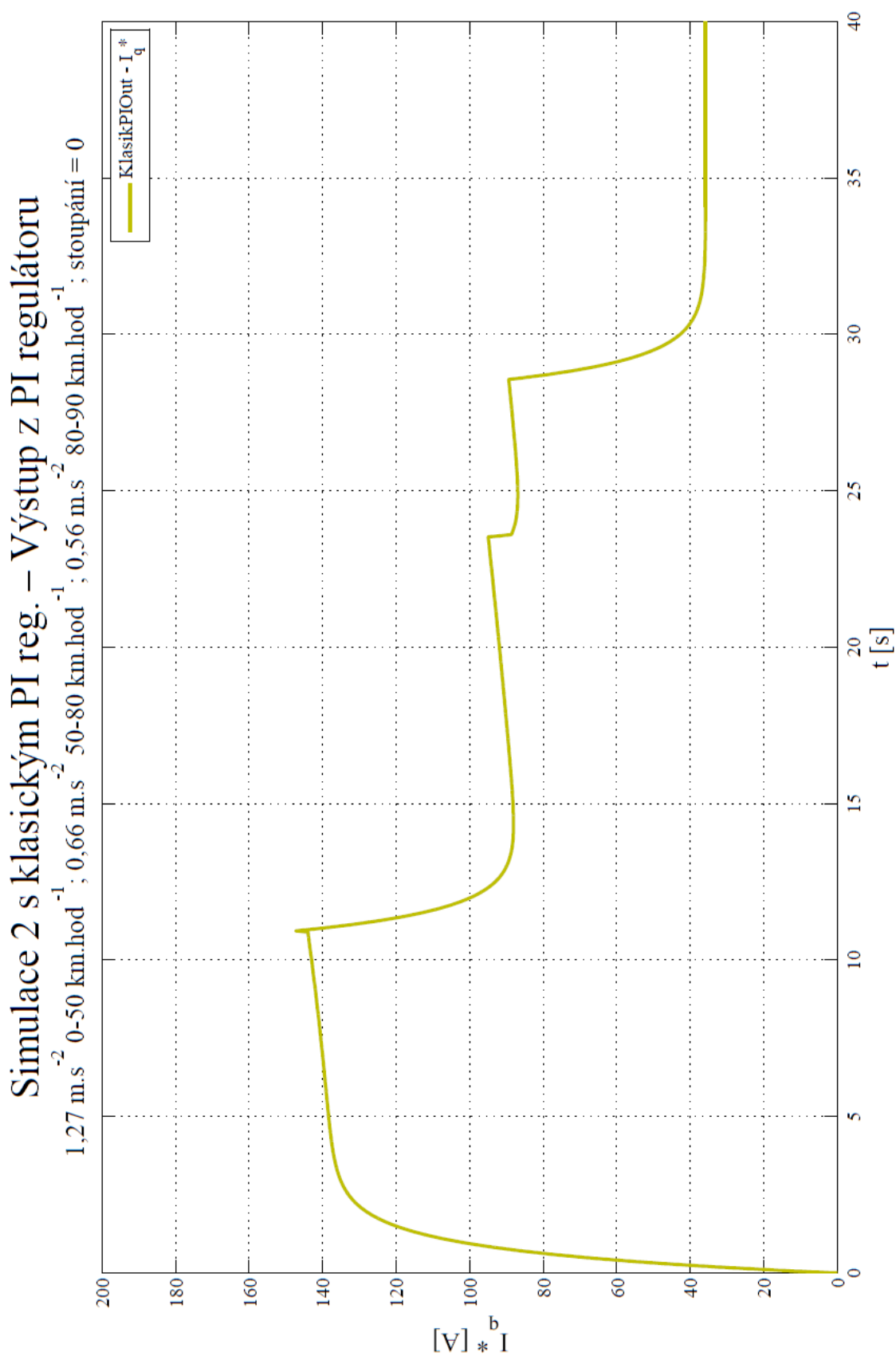
Obr. 11.24 – Simulace 2 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru

Příloha V. – A



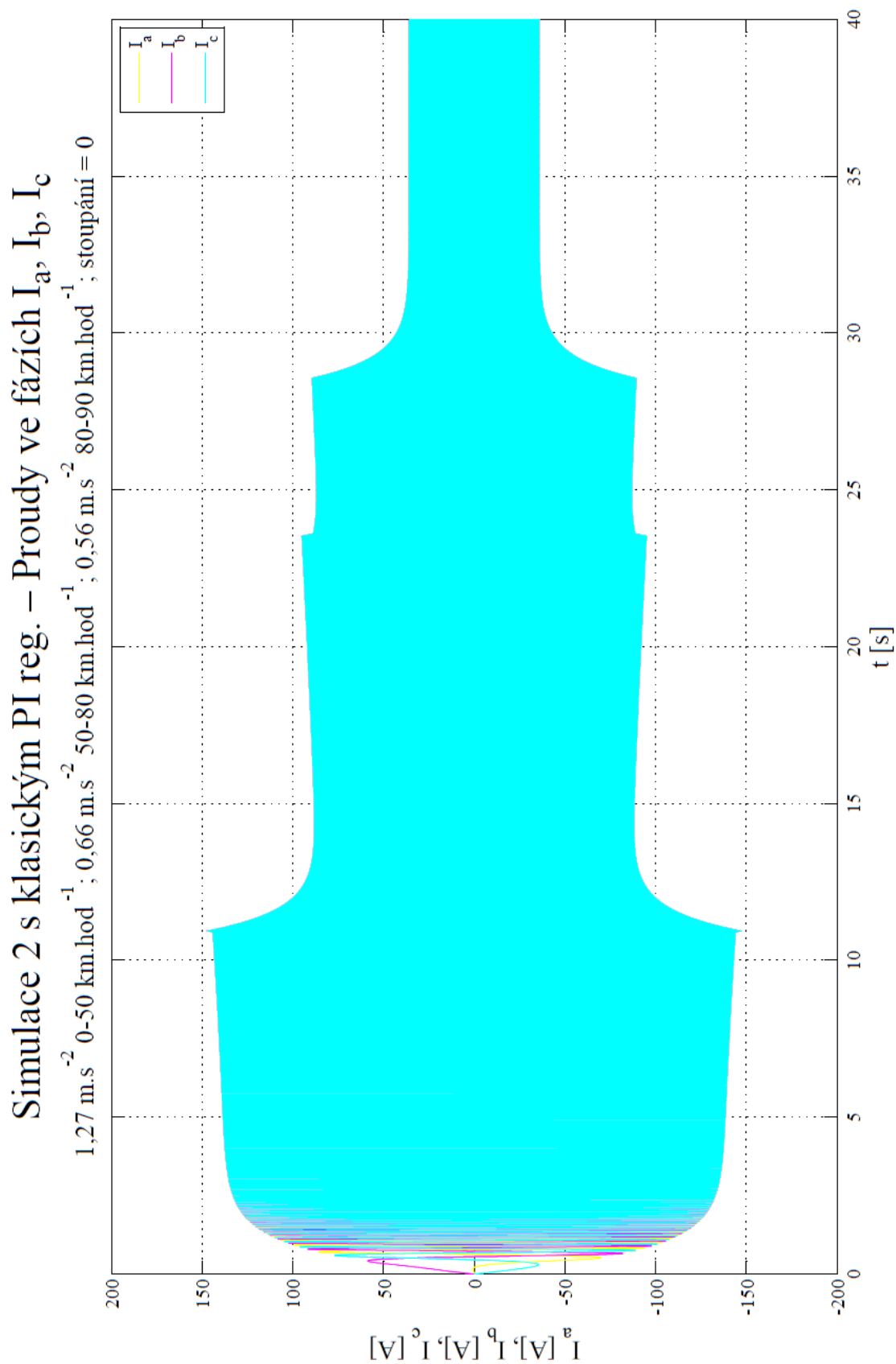
Obr. 11.25 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – regulační odchyłka

Příloha V. – B



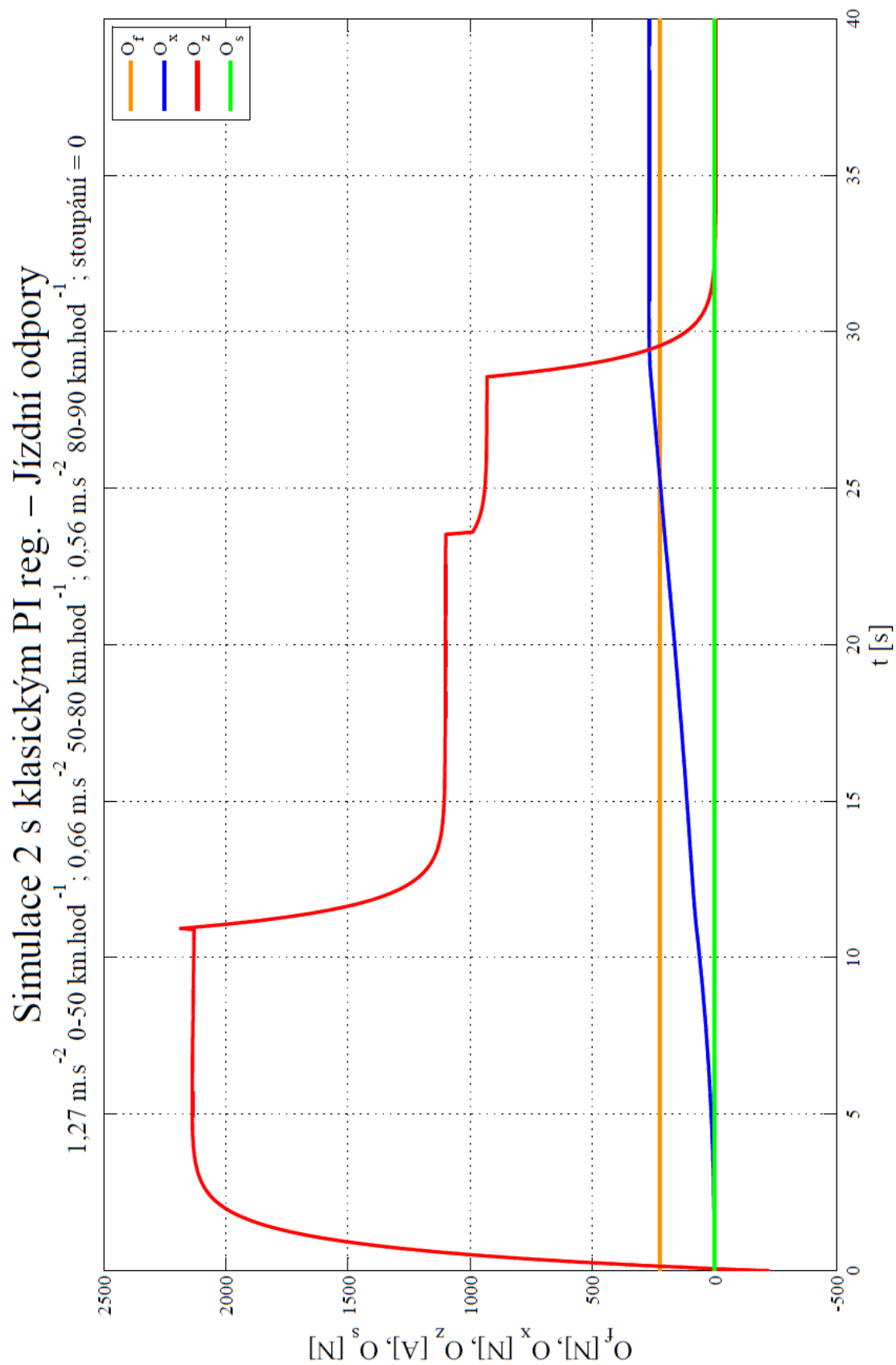
Obr. 11.26 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha V. – C



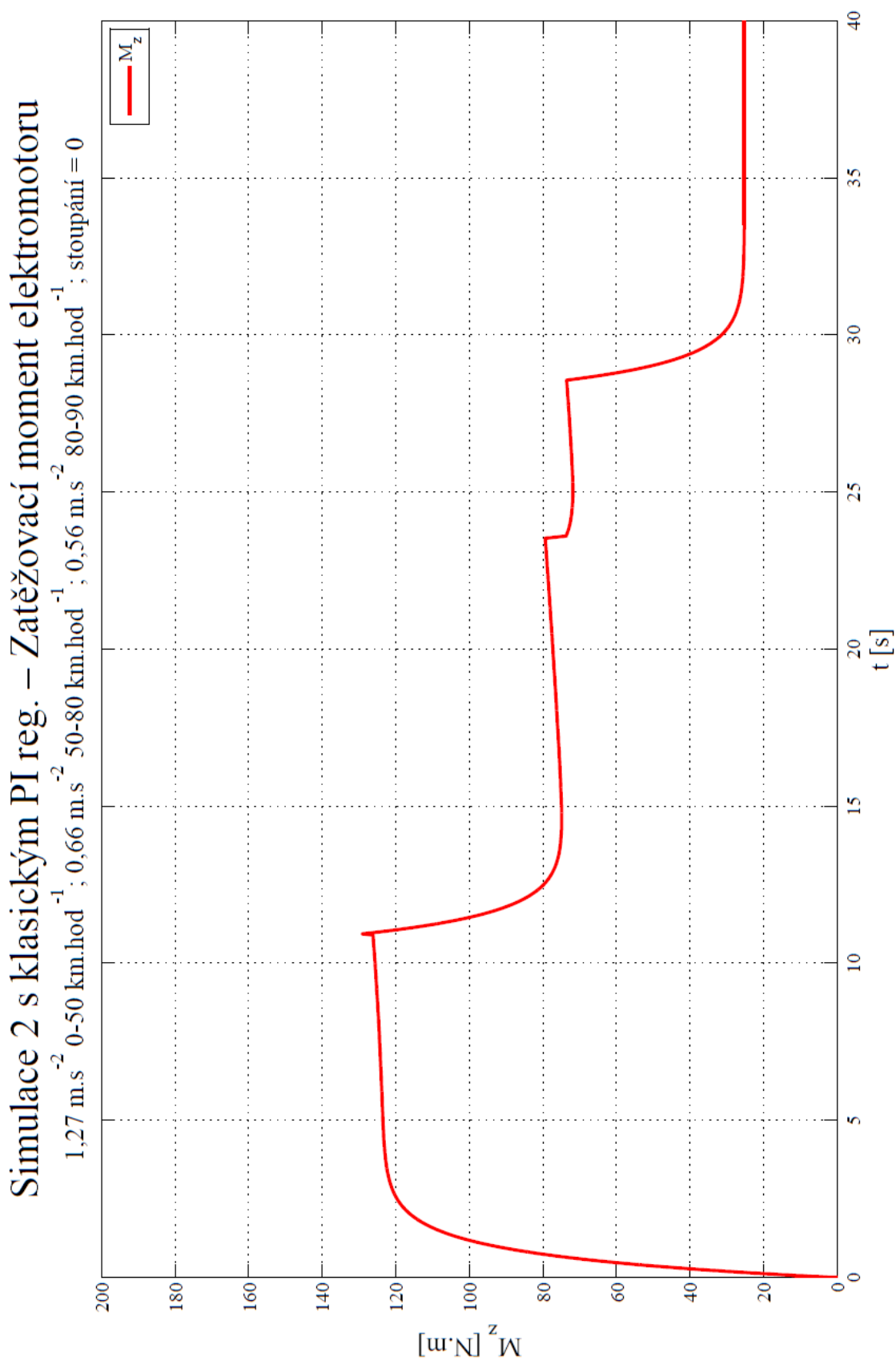
Obr. 11.27 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha V. – D



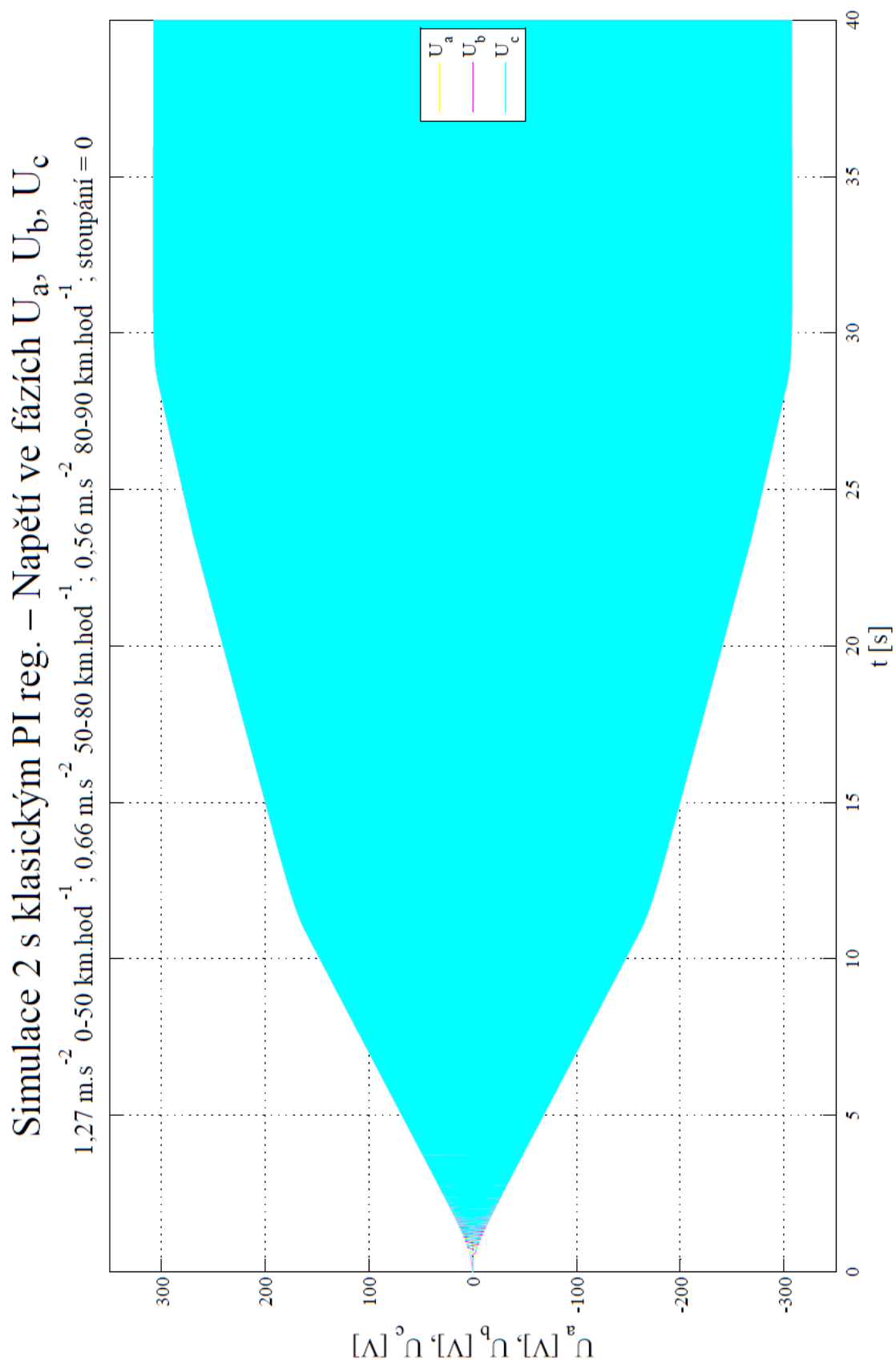
Obr. 11.28 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha V. – E



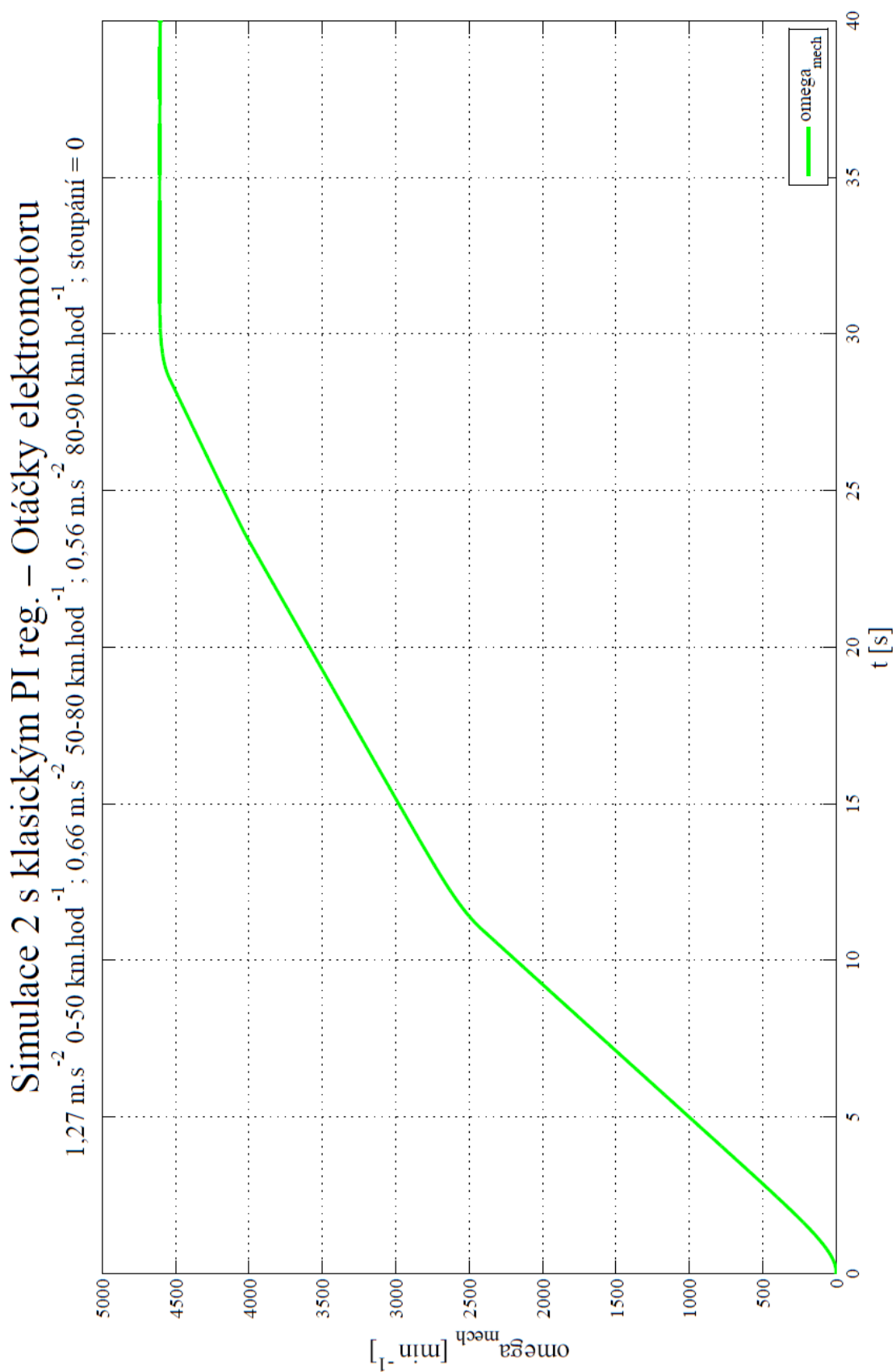
Obr. 11.29 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha V. – F



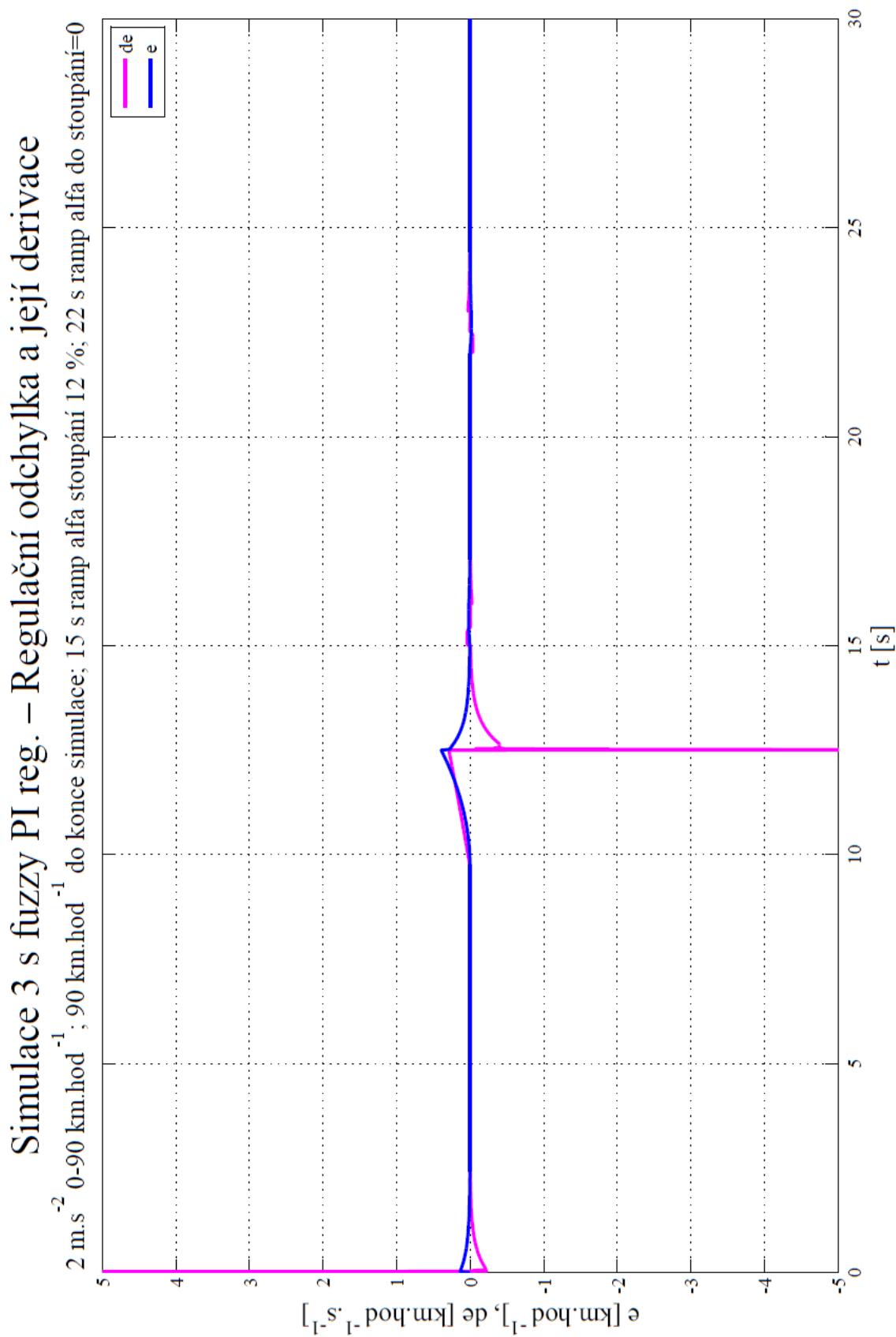
Obr. 11.30 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha V. – G



Obr. 11.31 – Simulace 2 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru

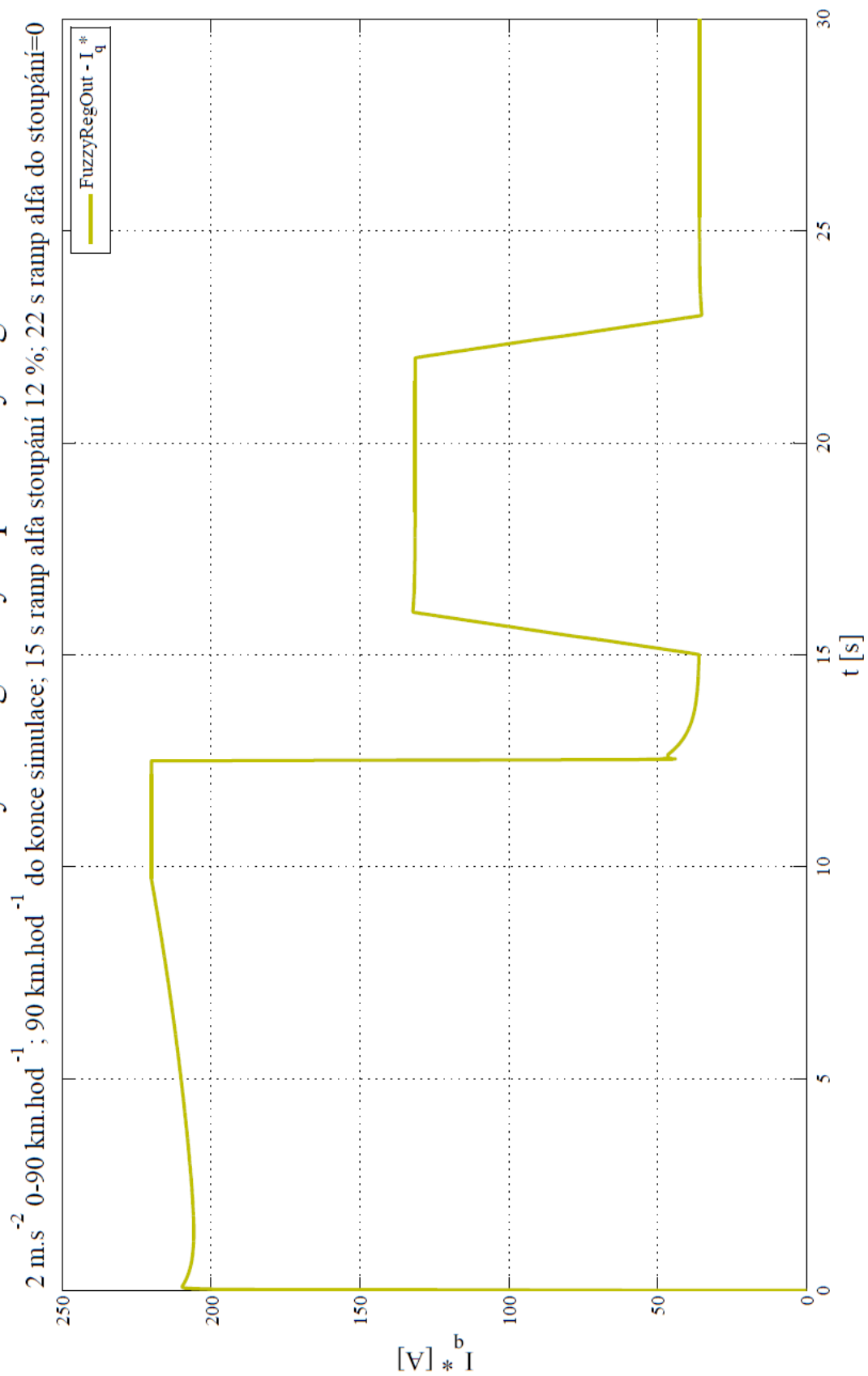
Příloha VI. – A



Obr. 11.32 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace

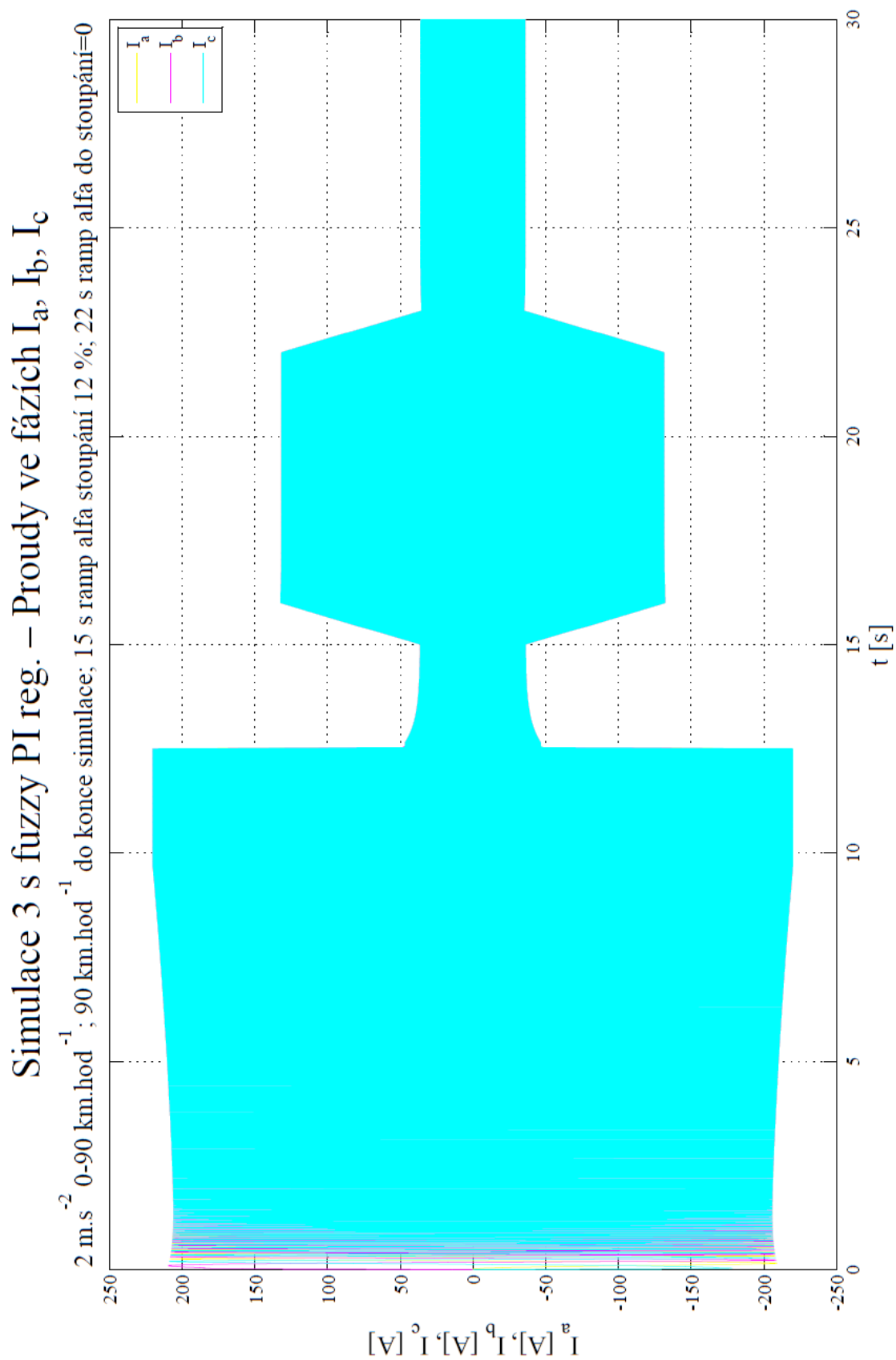
Příloha VI. – B

Simulace 3 s fuzzy PI reg. – Výstup z fuzzy regulátoru



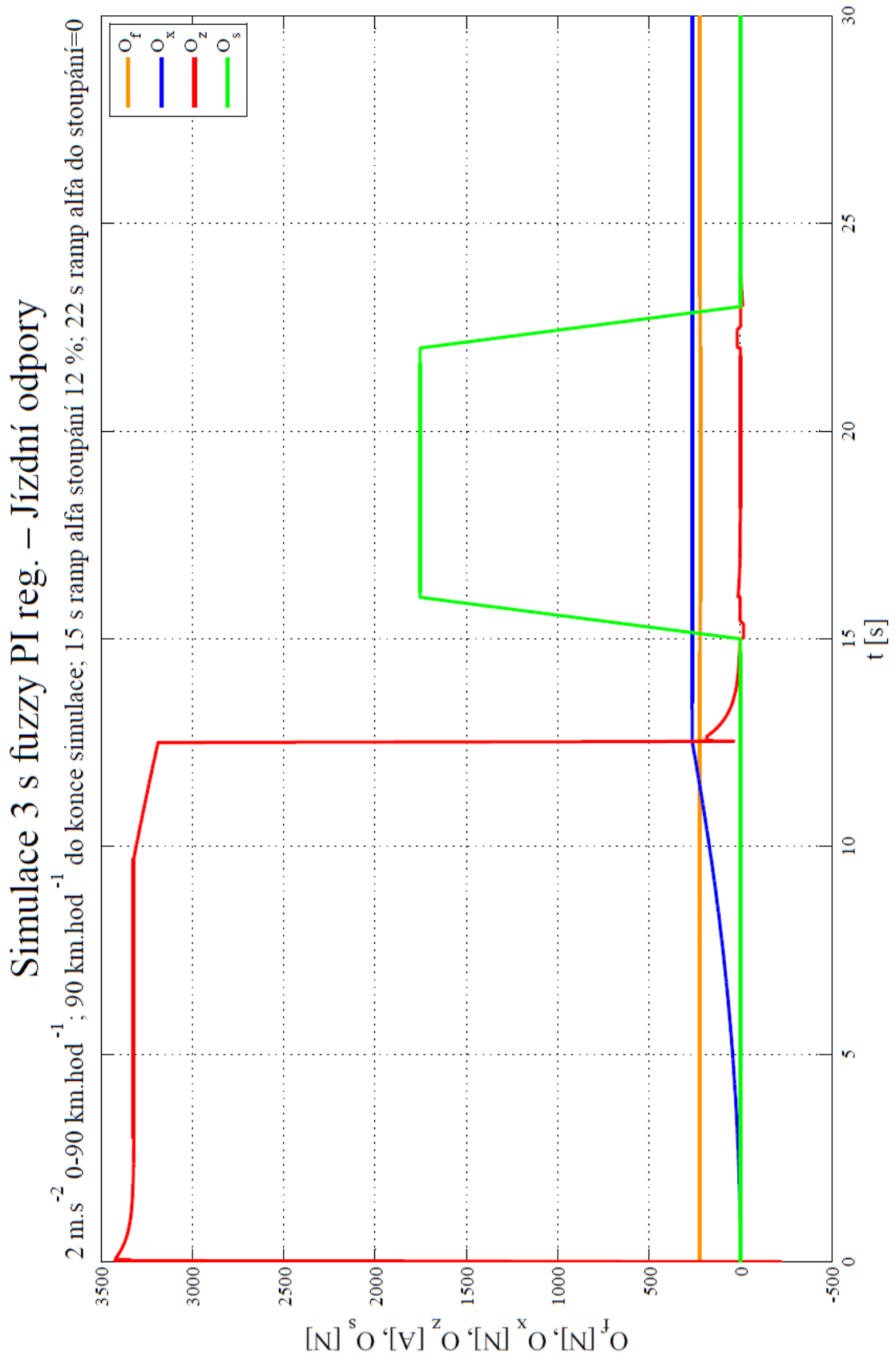
Obr. 11.33 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha VI. – C



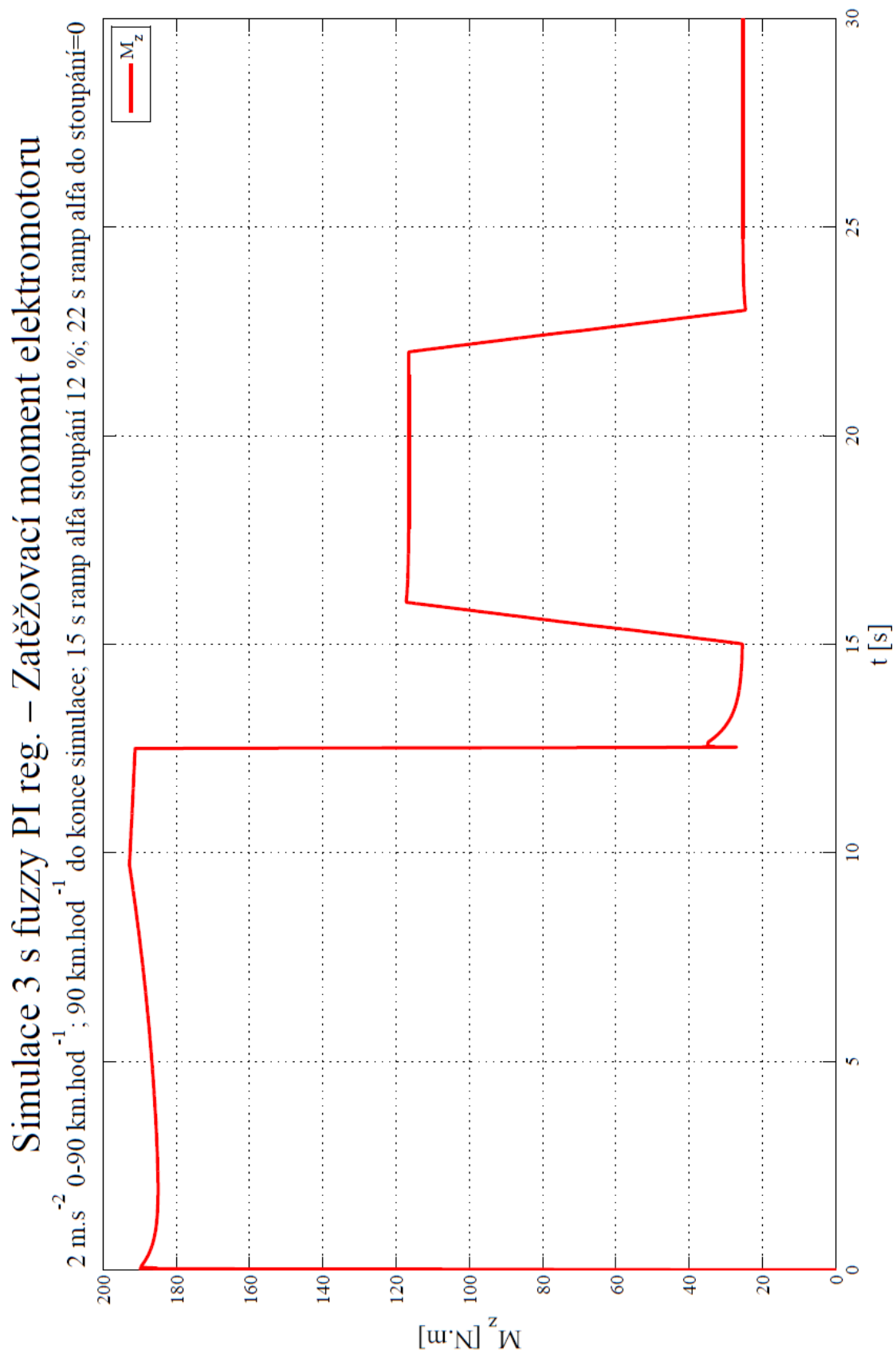
Obr. 11.34 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha VI. – D



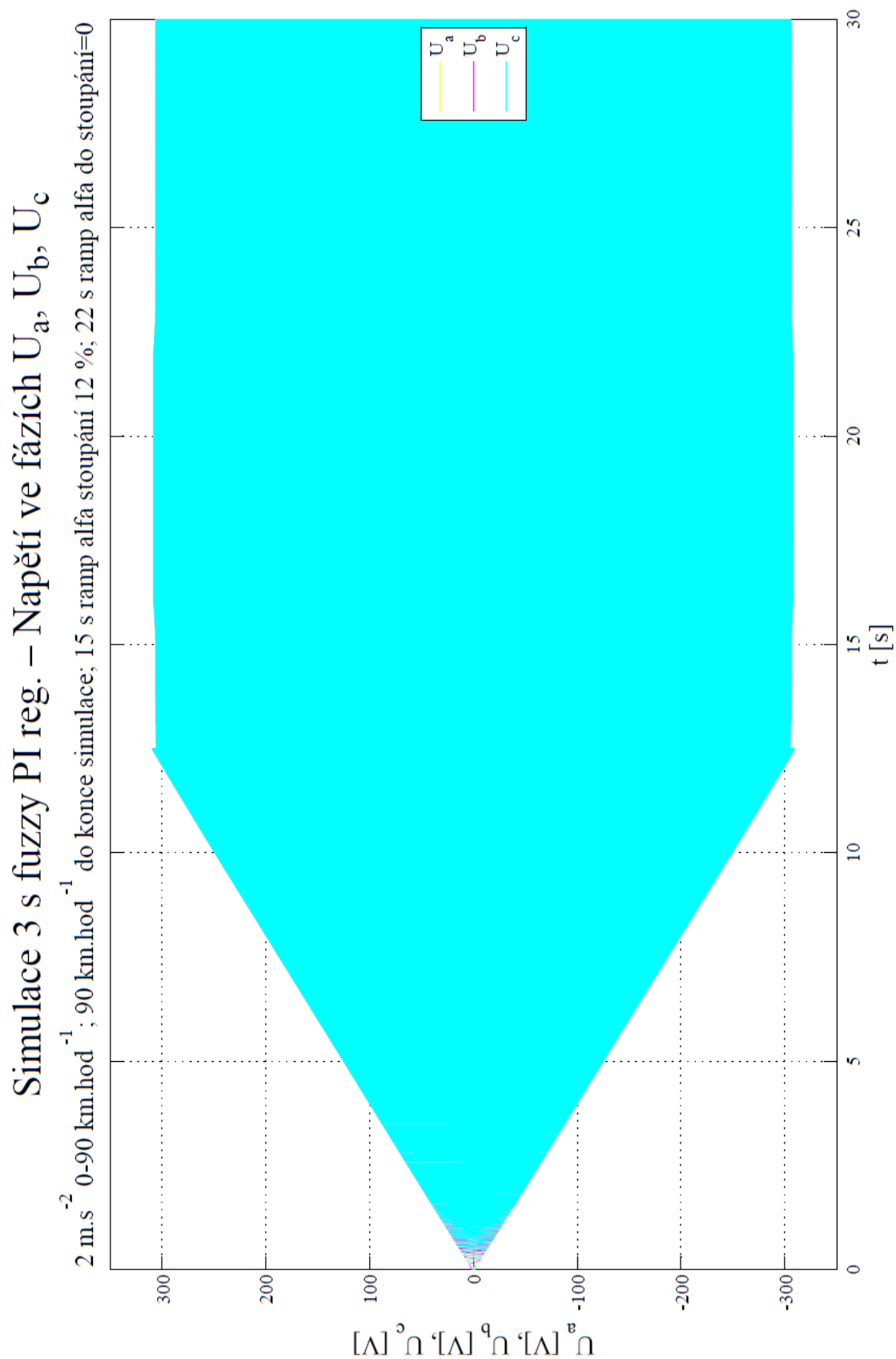
Obr. 11.35 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha VI. – E



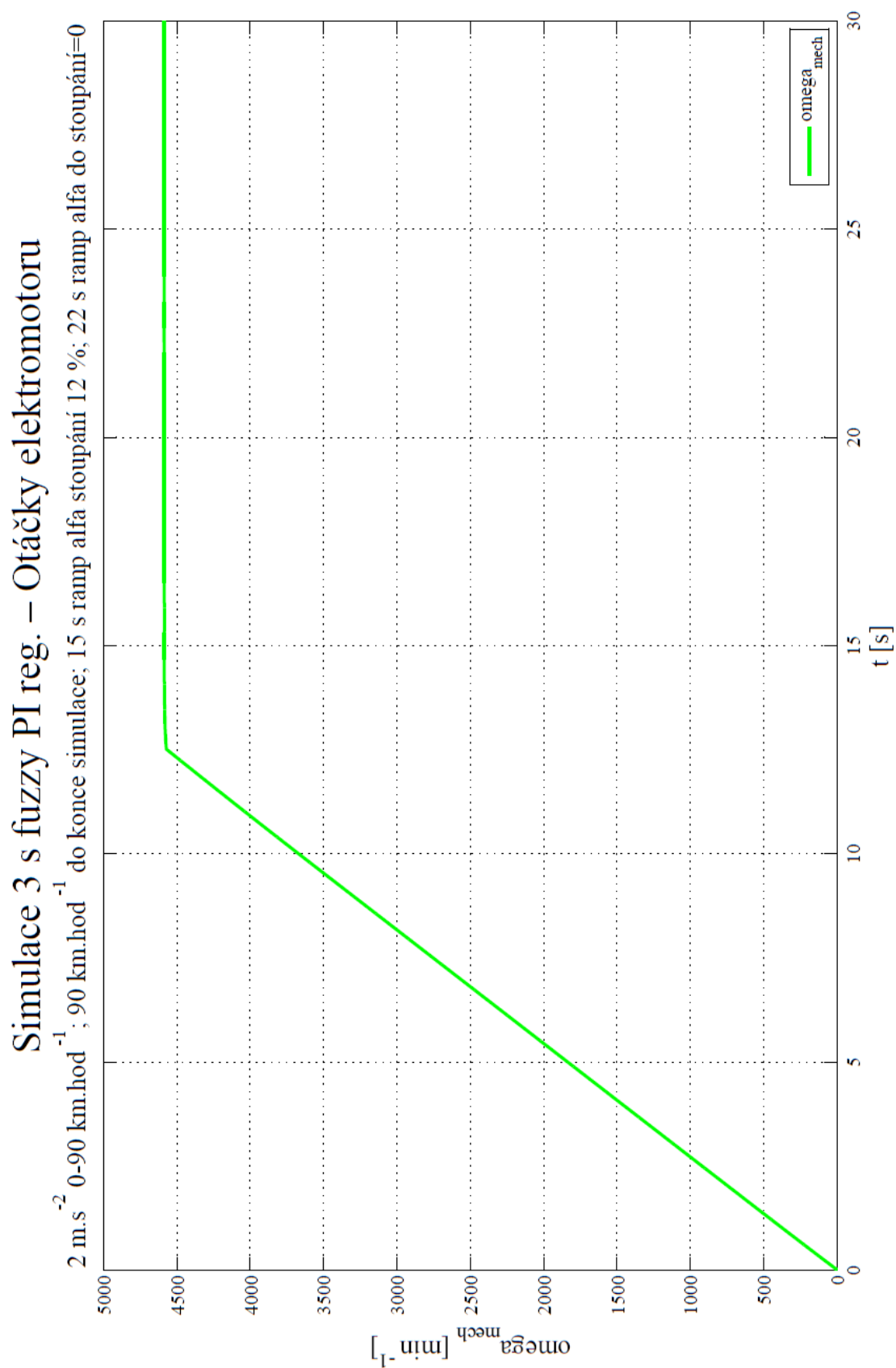
Obr. 11.36 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha VI. – F



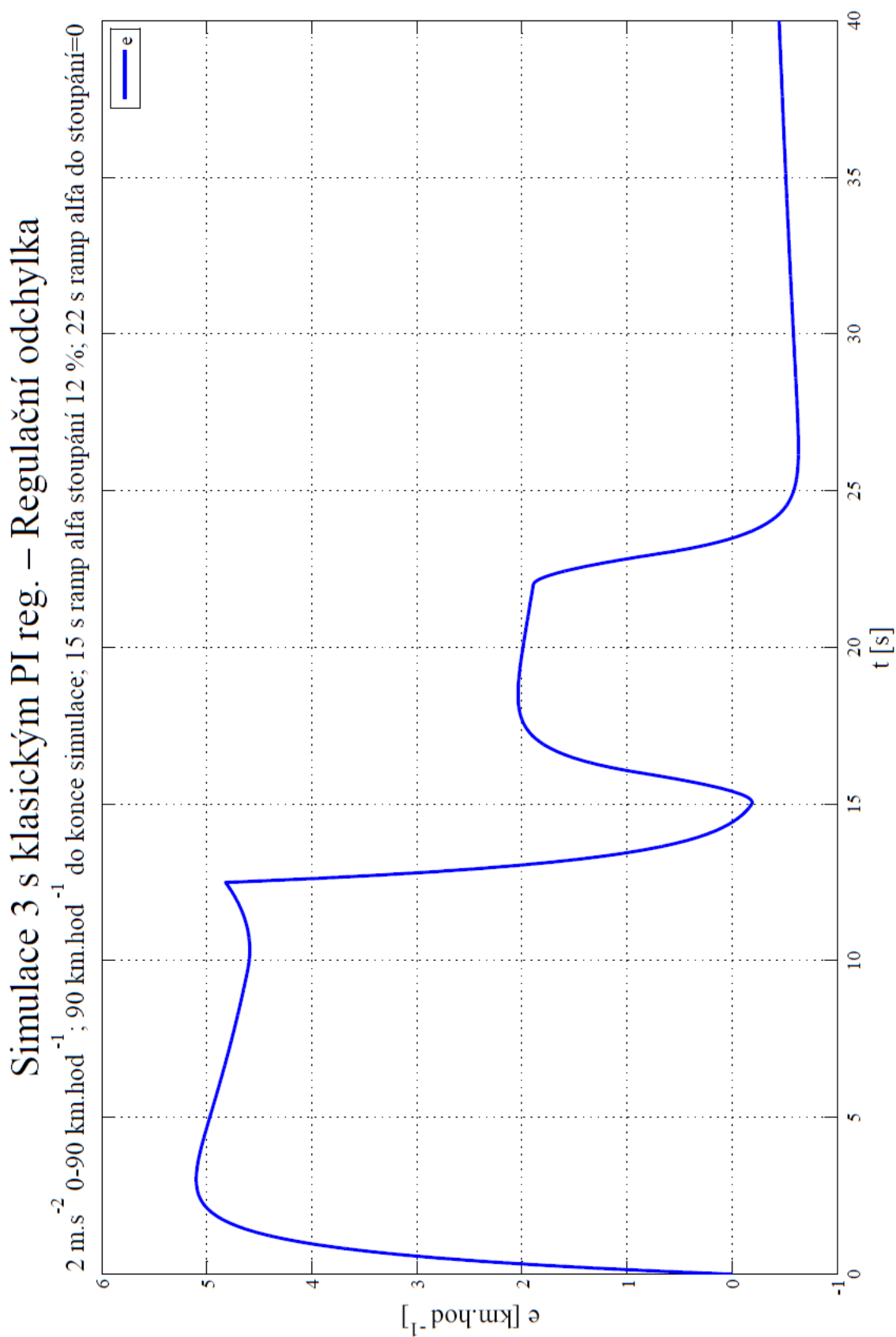
Obr. 11.37 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha VI. – G



Obr. 11.38 – Simulace 3 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru

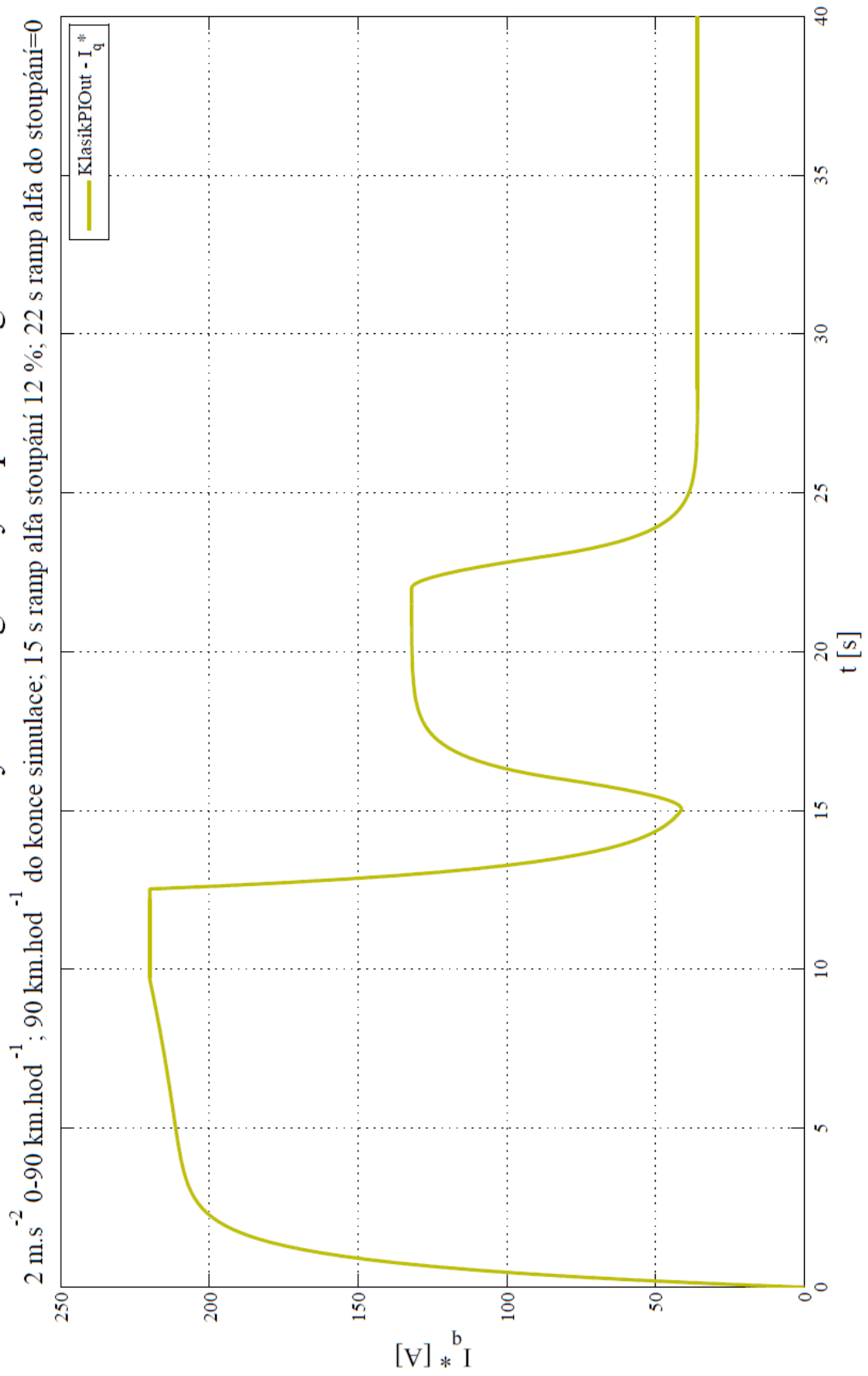
Příloha VII. – A



Obr. 11.39 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka

Příloha VII. – B

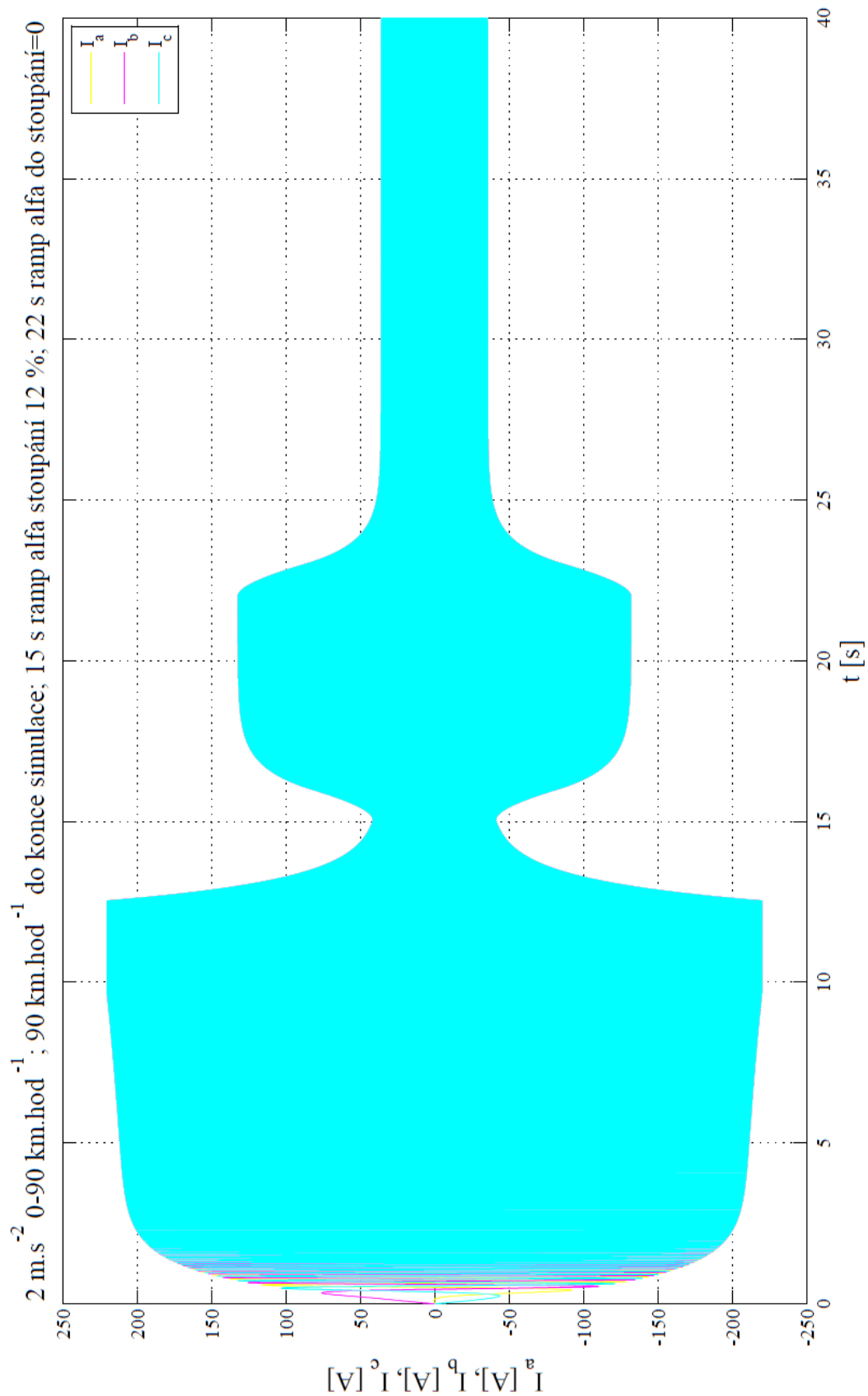
Simulace 3 s klasickým PI reg. – Výstup z PI regulátoru



Obr. 11.40 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – akční zásah regulátoru

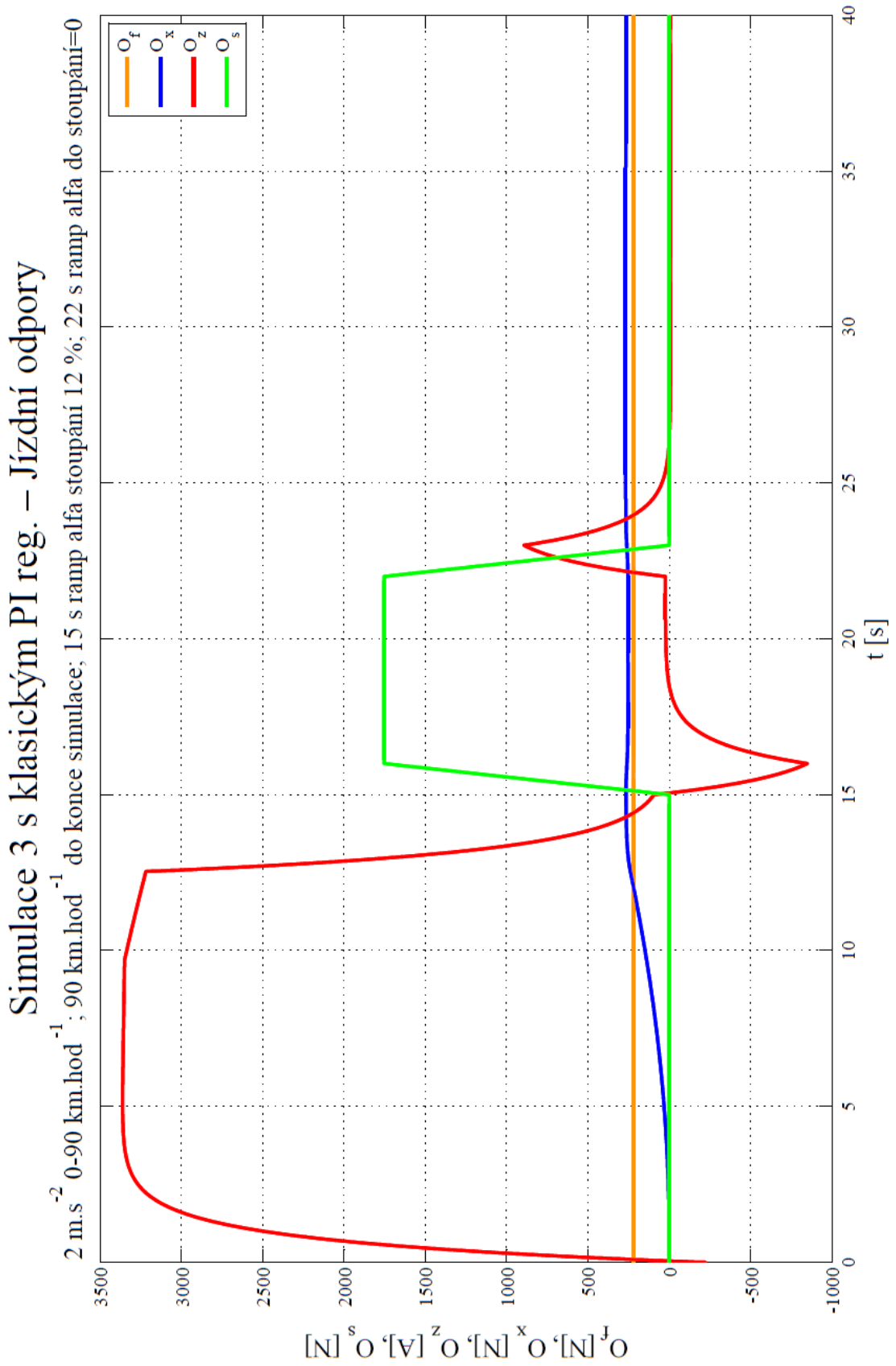
Příloha VII. – C

Simulace 3 s klasickým PI reg. – Proudý ve fázích I_a , I_b , I_c



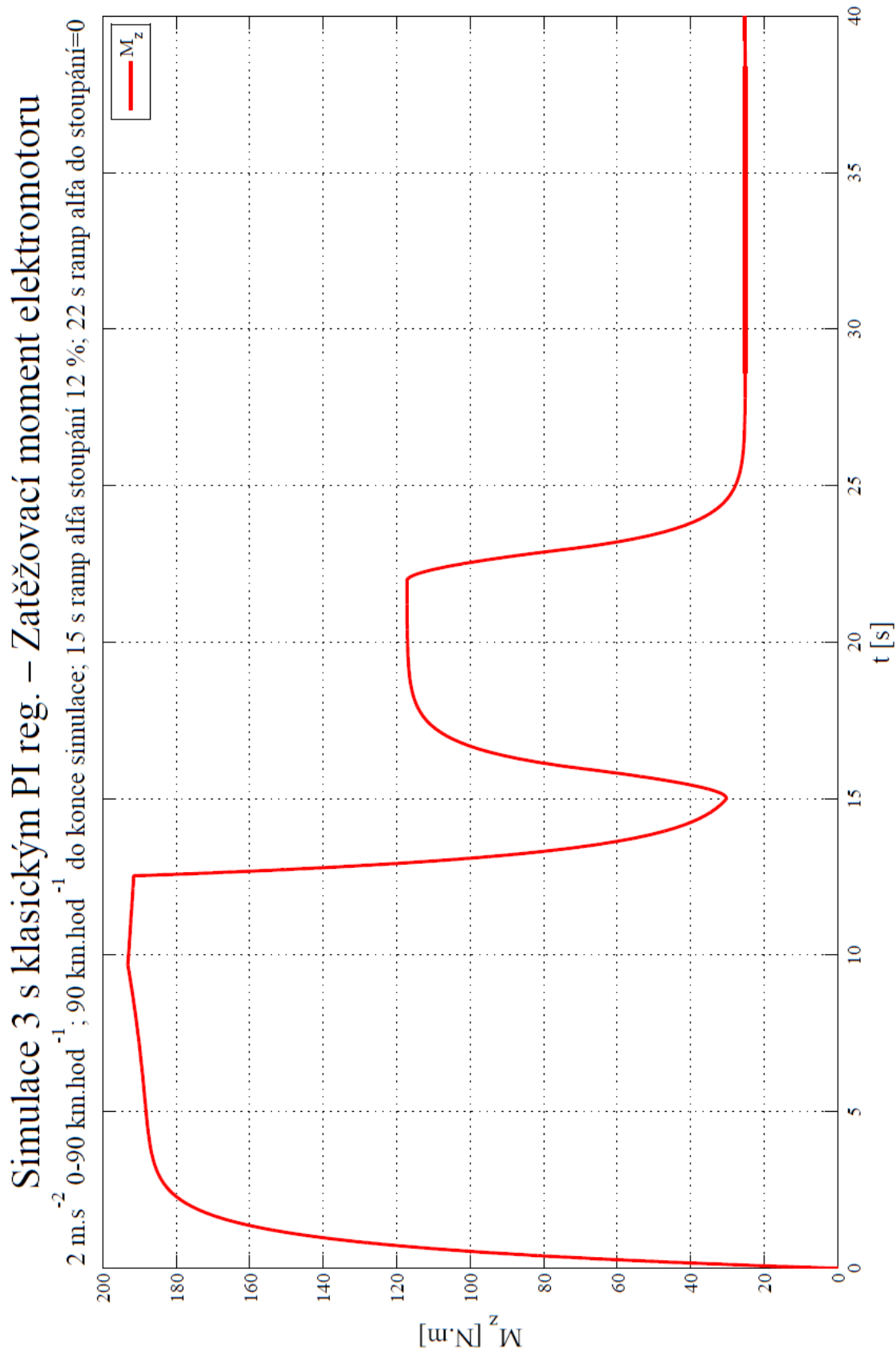
Obr. 11.41 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha VII. – D



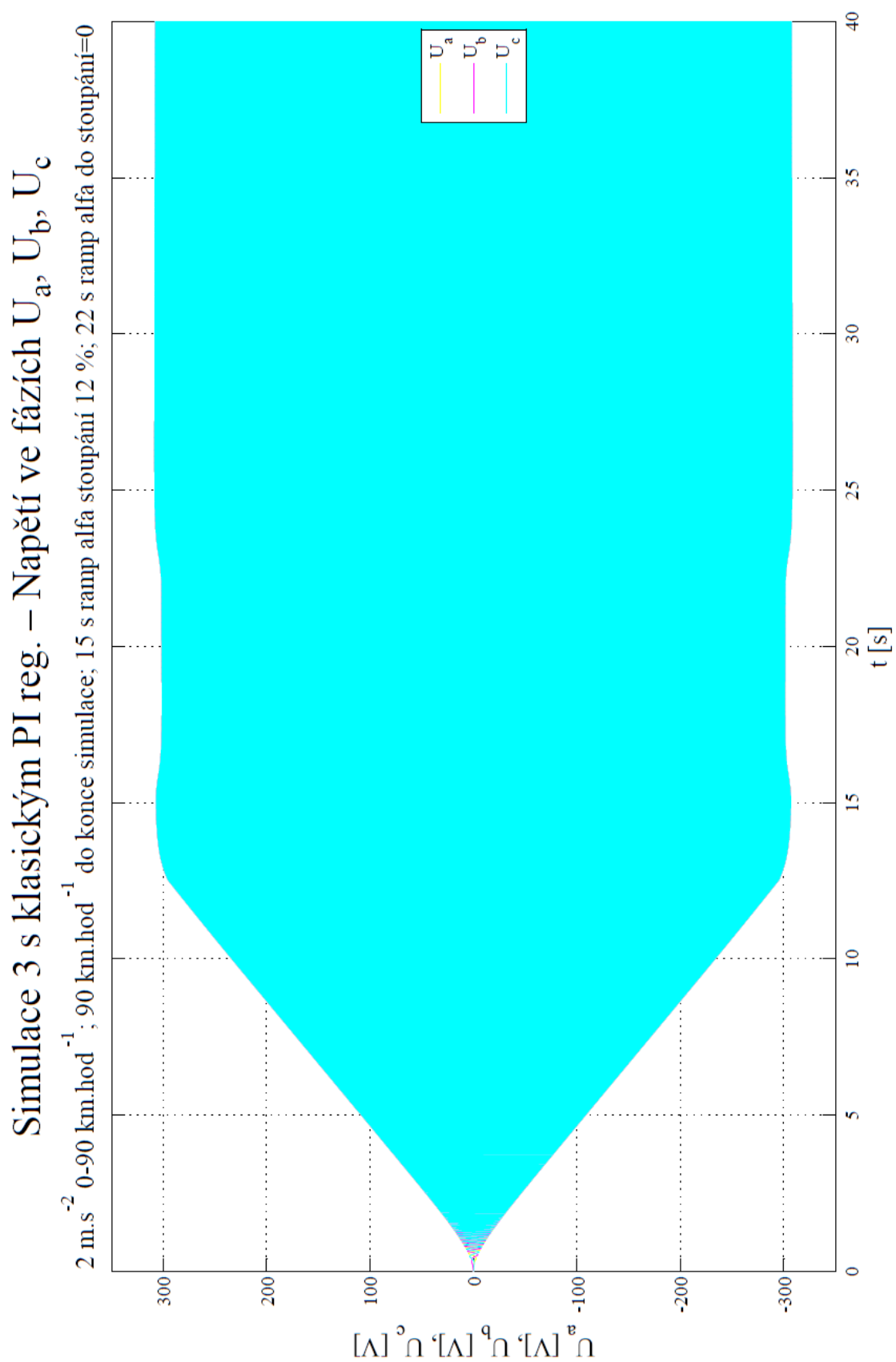
Obr. 11.42 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha VII. – E



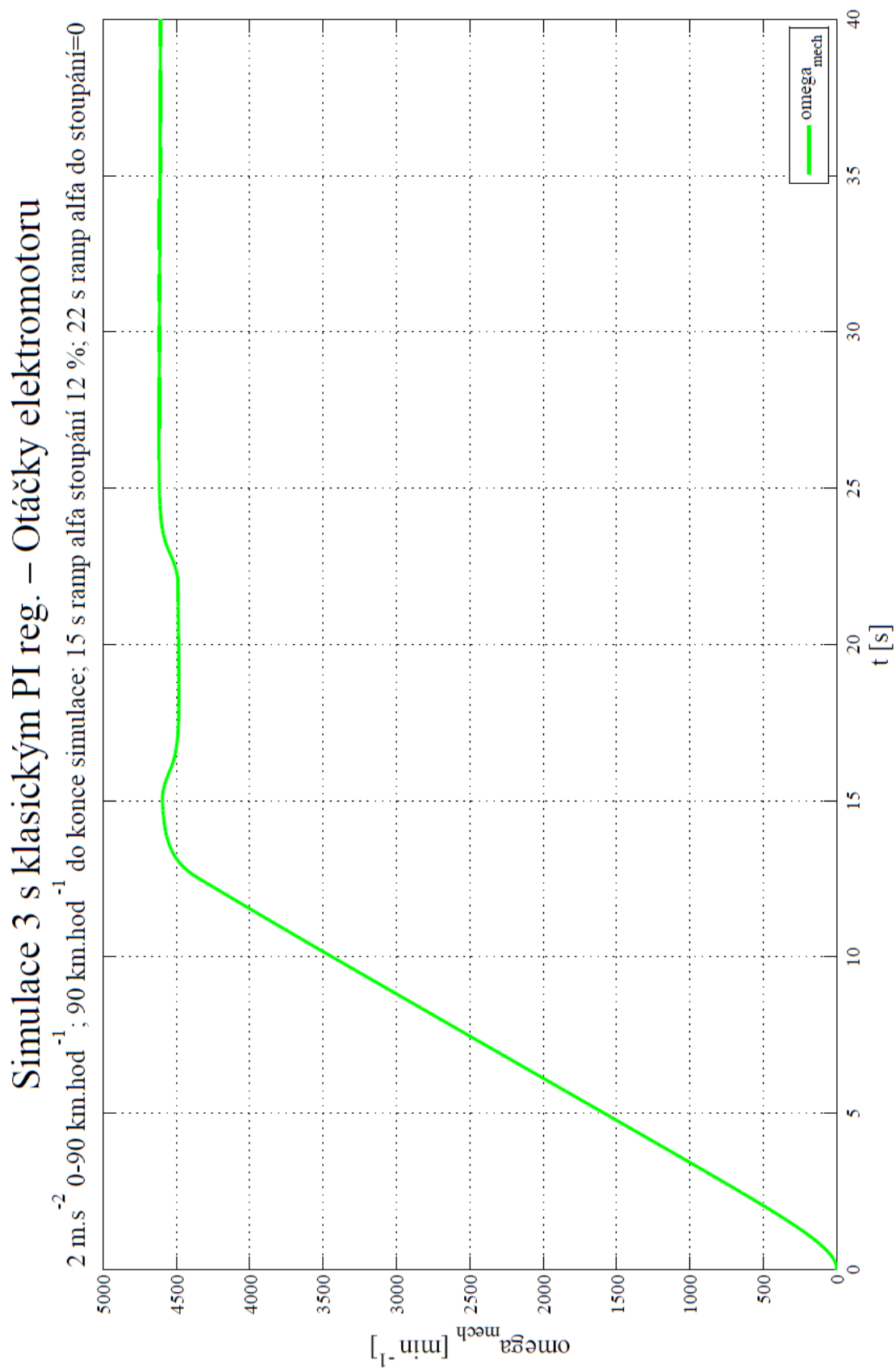
Obr. 11.43 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha VII. – F



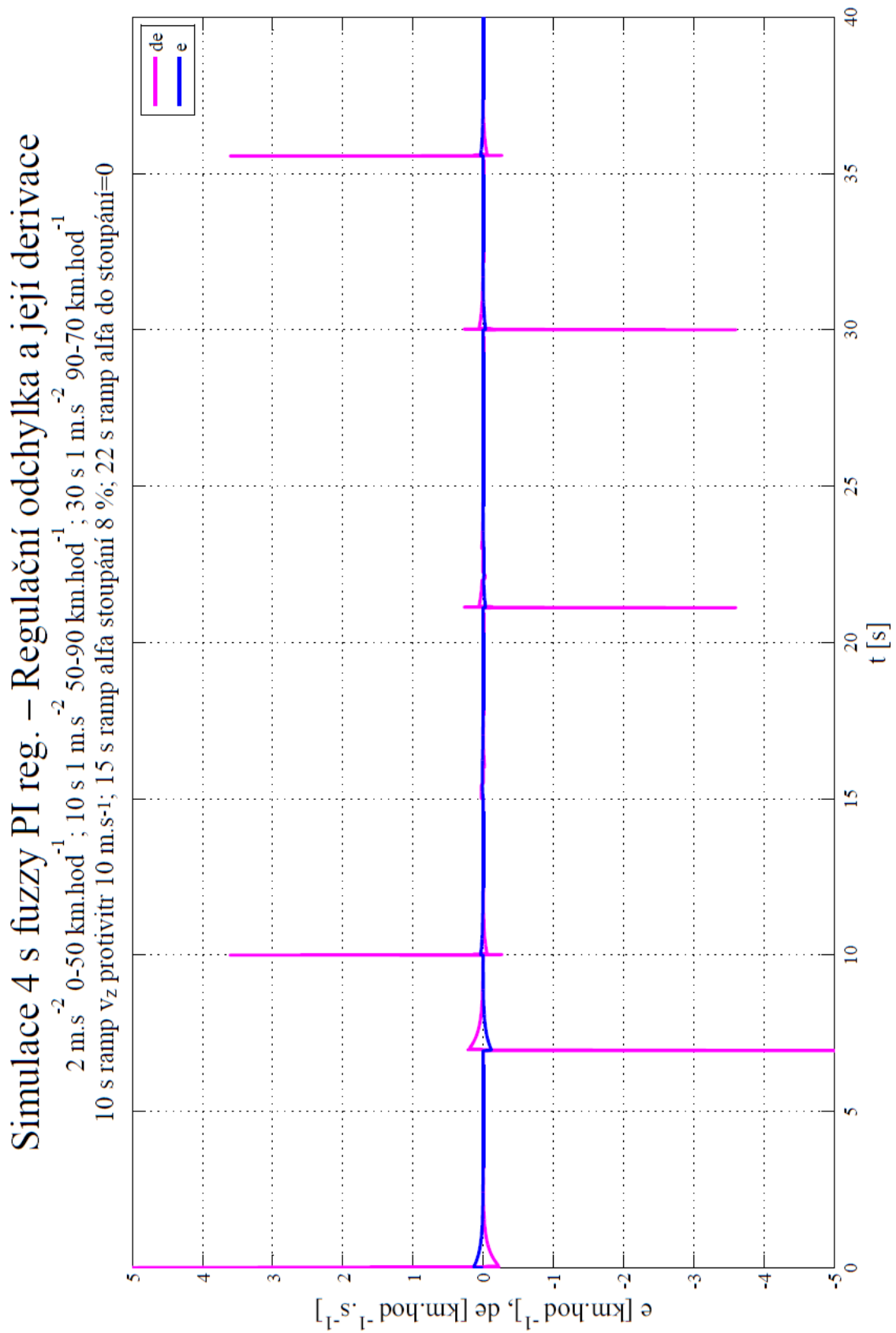
Obr. 11.44 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha VII. – G



Obr. 11.45 – Simulace 3 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru

Příloha VIII. – A

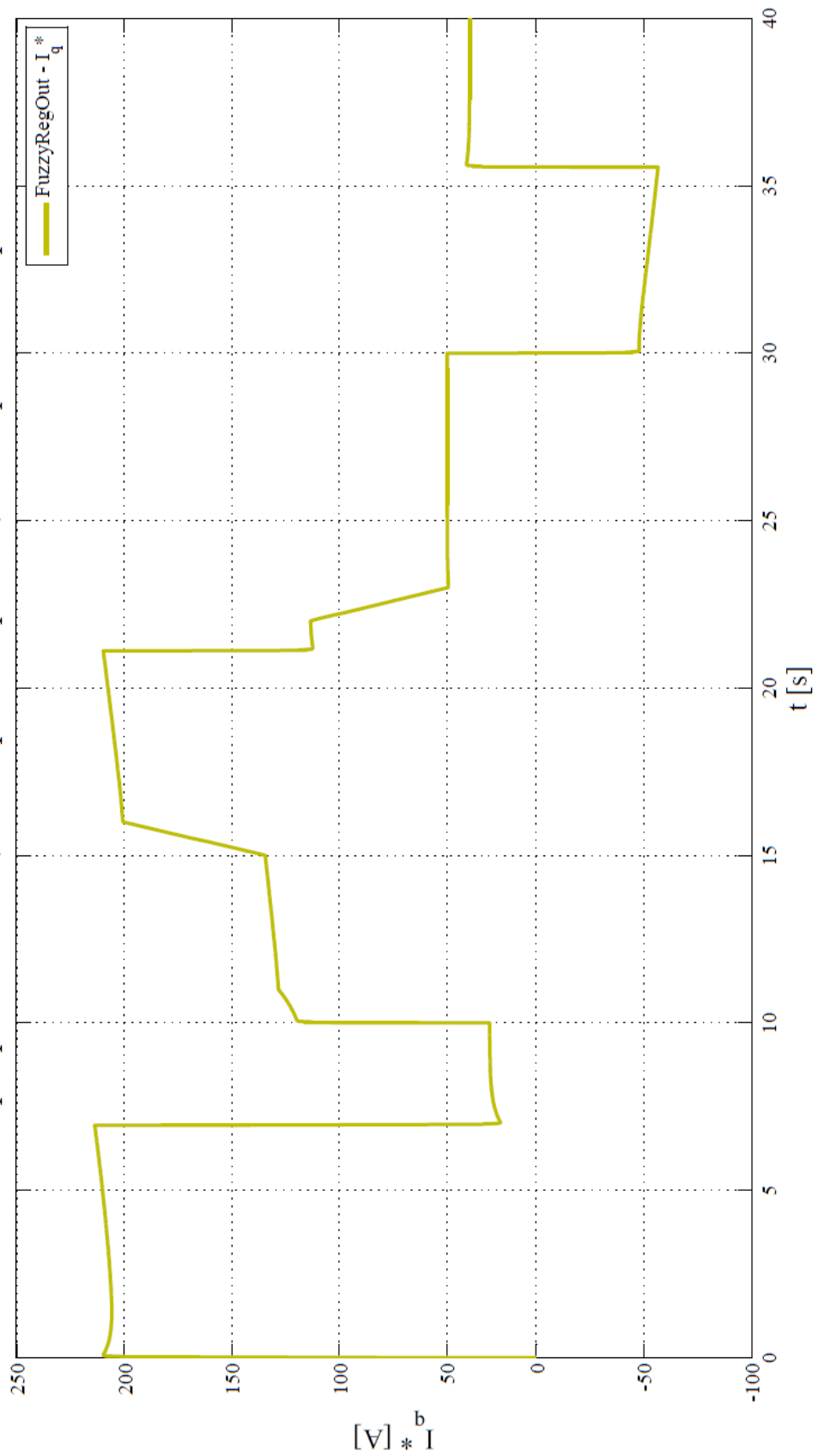


Obr. 11.46 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – regulační odchylka a její derivace

Příloha VIII. – B

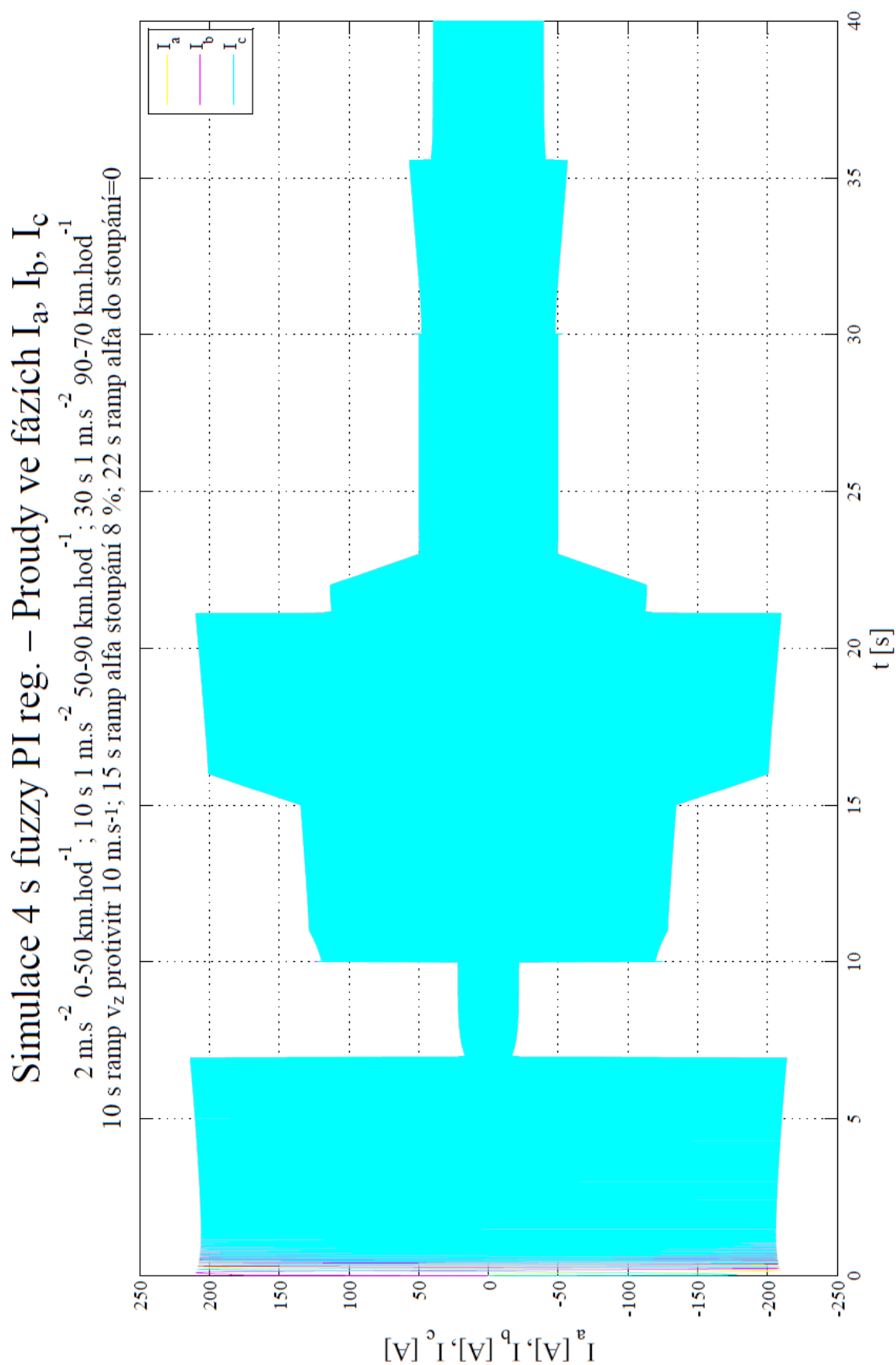
Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Výstup z fuzzy regulátoru

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp v_z protivítr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 11.47 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – akční zásah regulátoru

Příloha VIII. – C

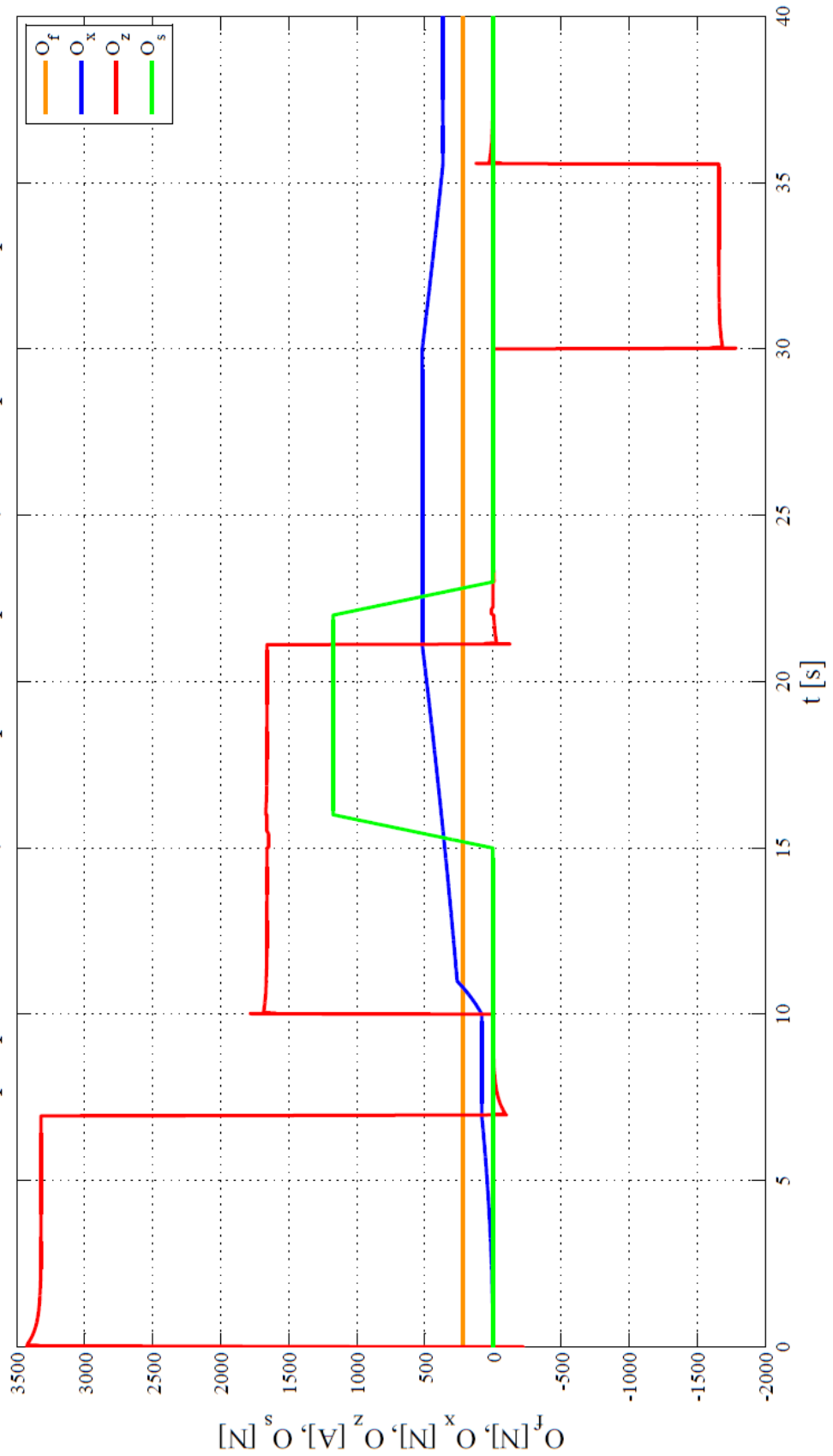


Obr. 11.48 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha VIII. – D

Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Jízdní odpory

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp v_z protivítr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0

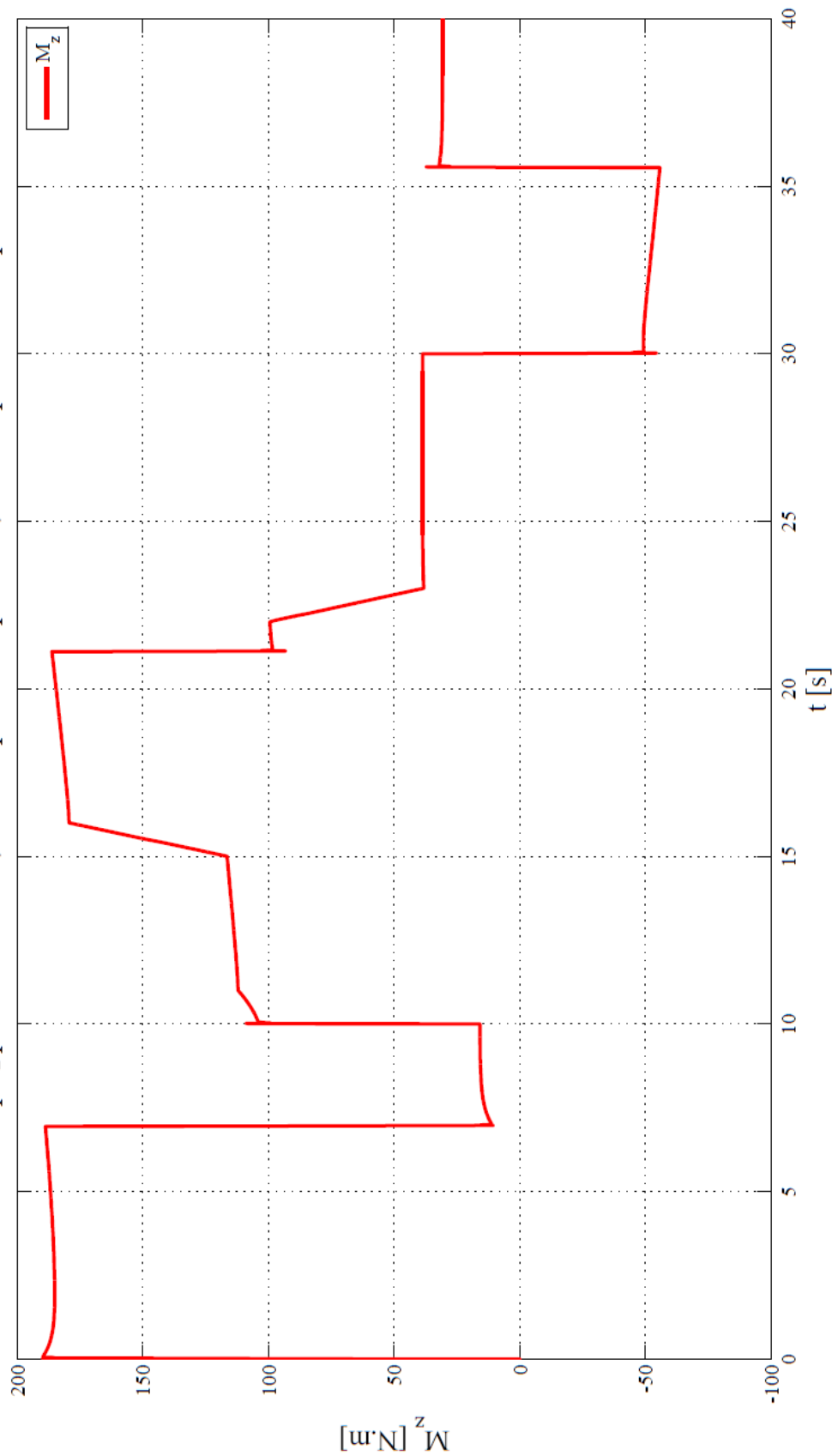


Obr. 11.49 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha VIII. – E

Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Zatěžovací moment elektromotoru

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp v_z protivítr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0

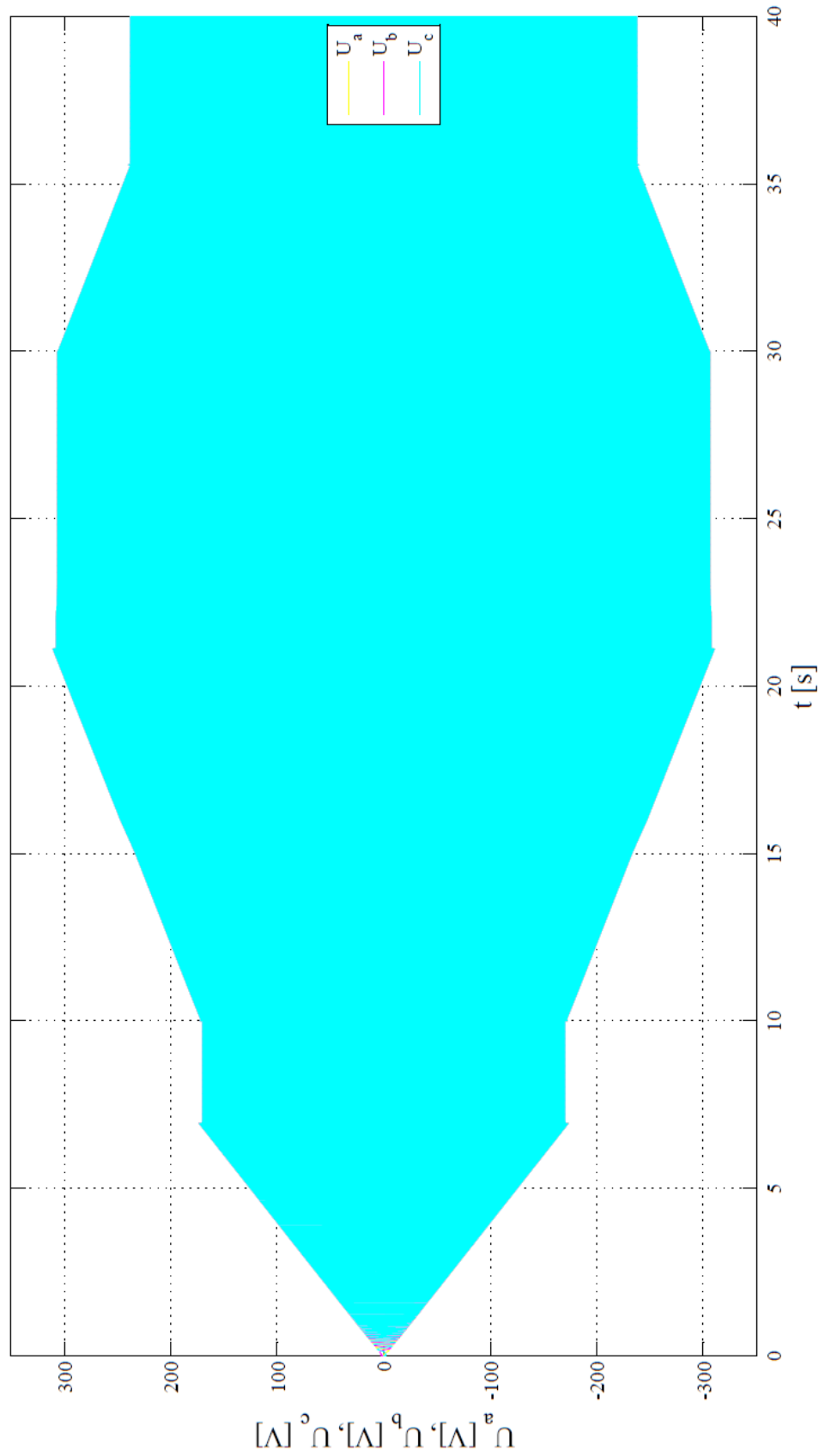


Obr. 11.50 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha VIII. – F

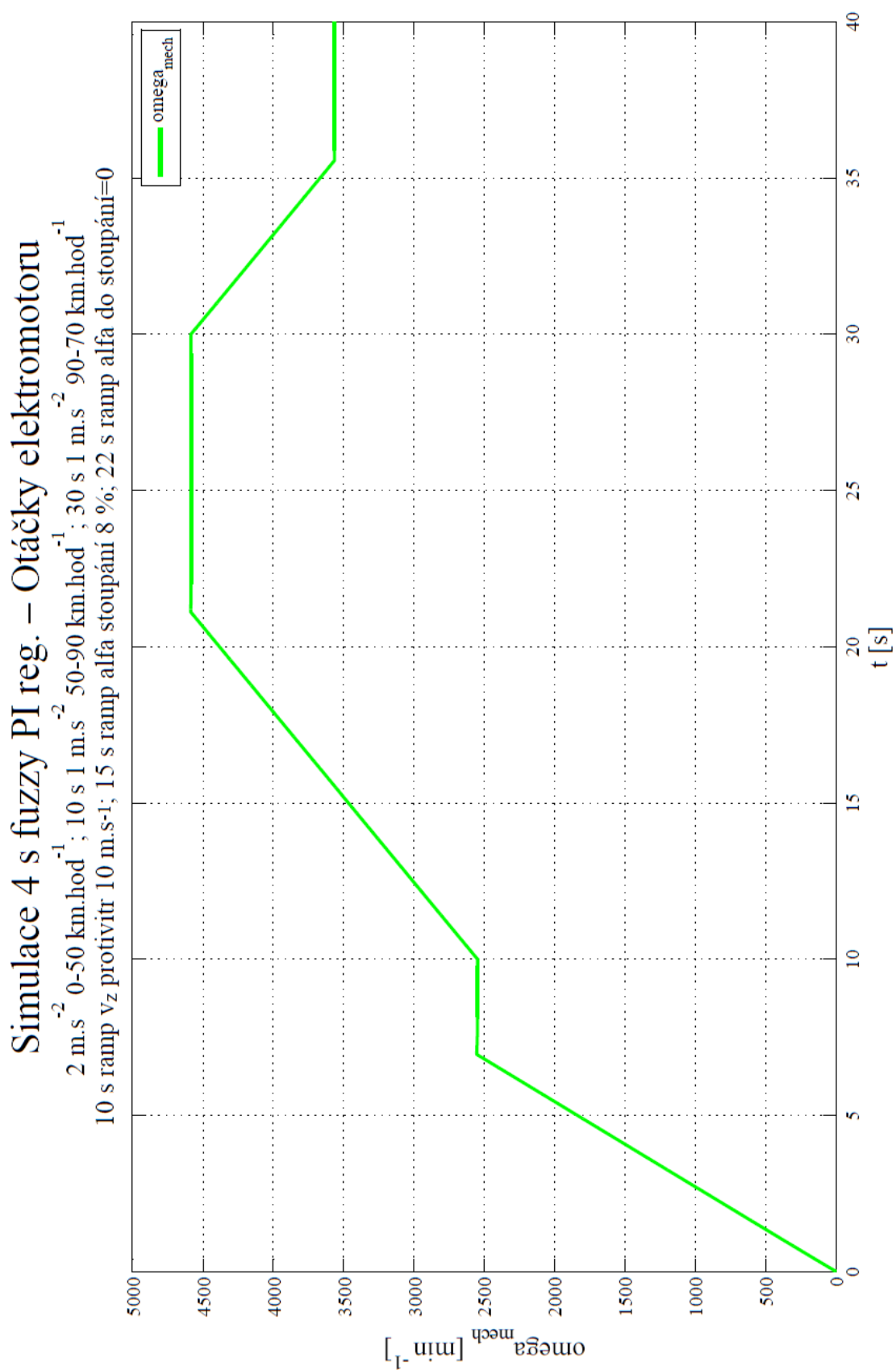
Simulace 4 s fuzzy PI reg. – Napětí ve fázích U_a , U_b , U_c

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp vz protivitr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 11.51 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

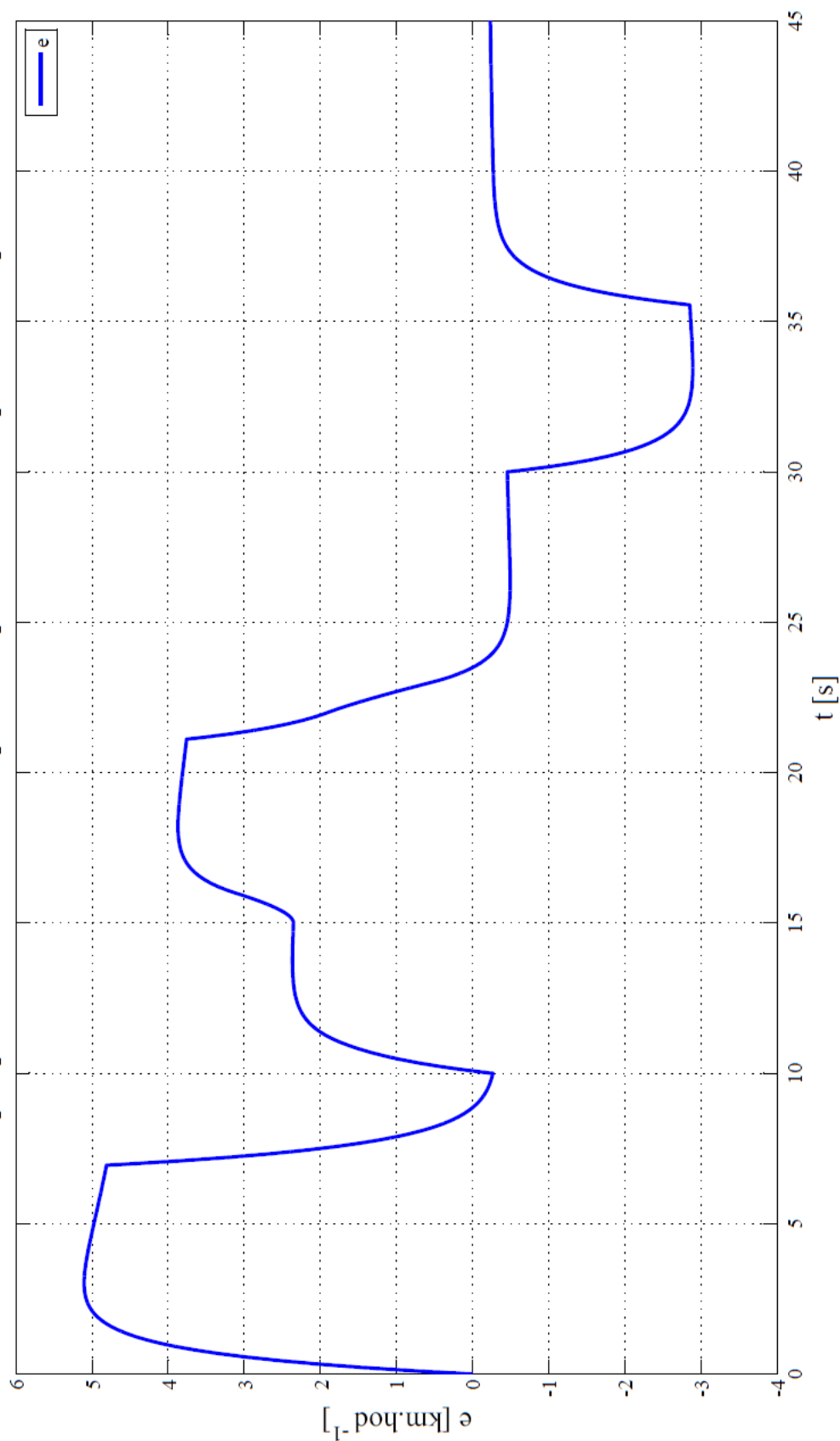
Příloha VIII. – G



Obr. 11.52 – Simulace 4 s fuzzy PI regulátorem – otáčky elektromotoru

Příloha IX. – A

Simulace 4 s klasickým PI reg. – Regulační odchylka
2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
10 s ramp vz protivitr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0

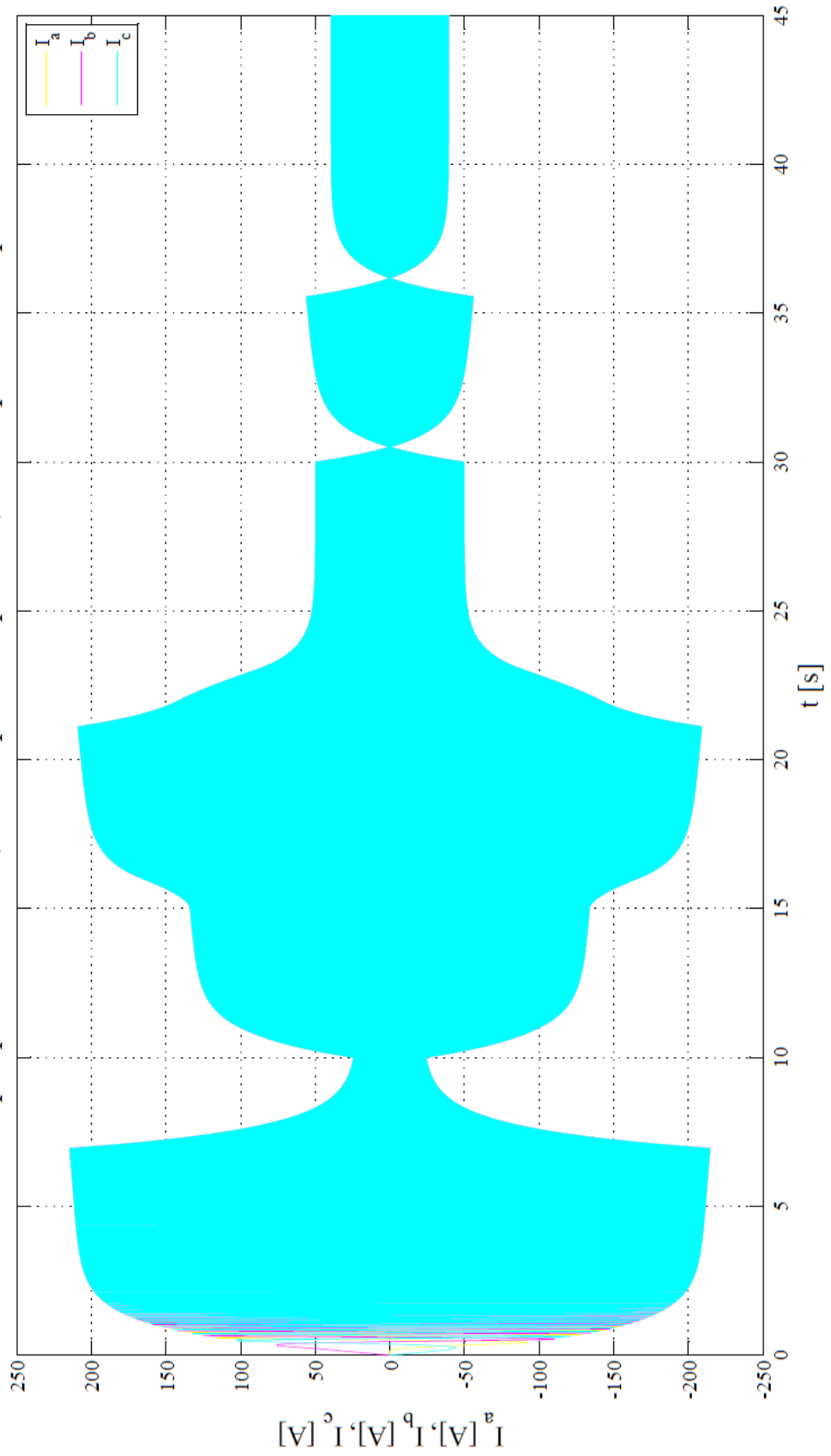


Obr. 11.53 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – regulační odchylka

Příloha IX. – C

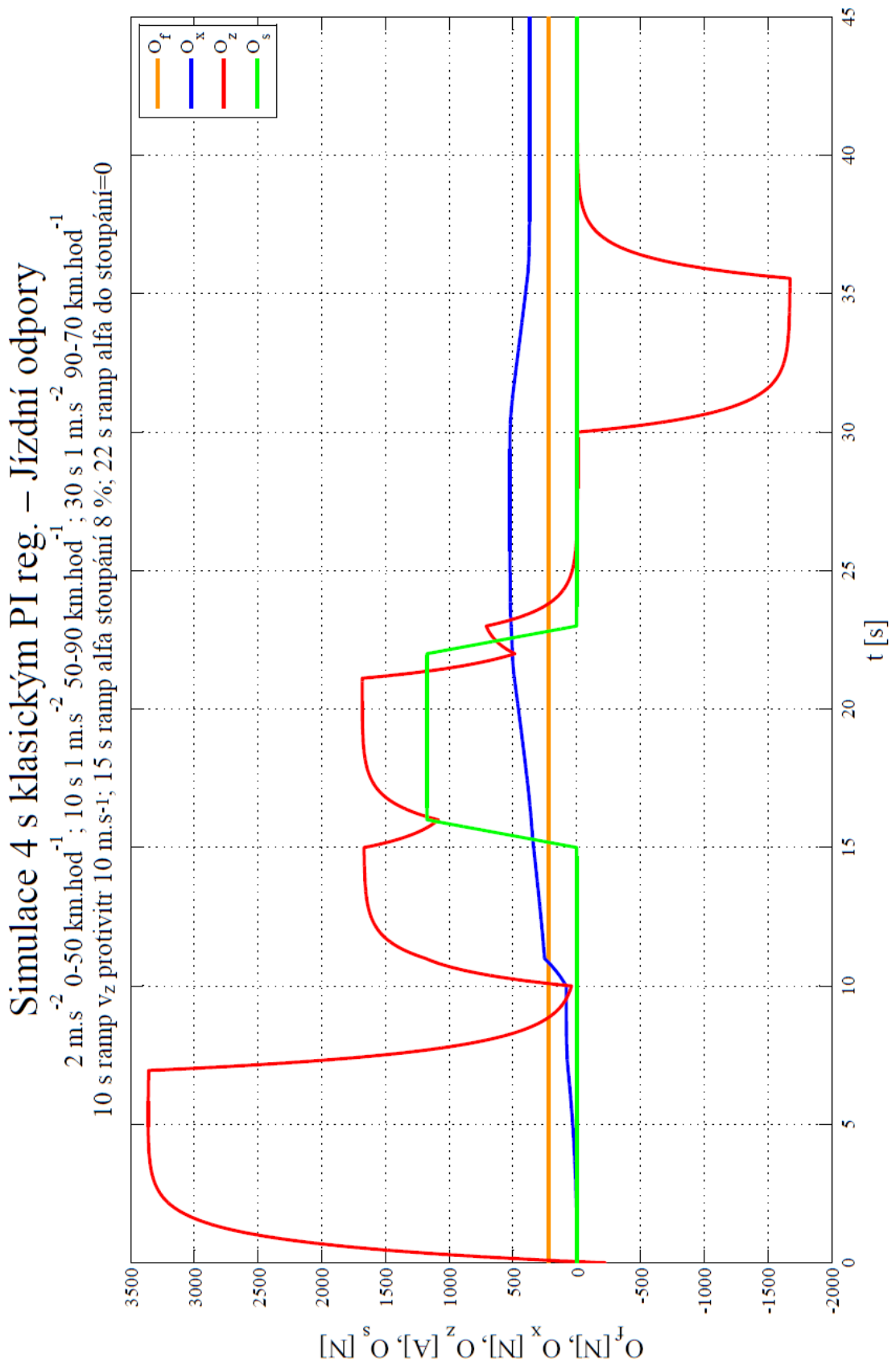
Simulace 4 s klasickým PI reg. – Proudů ve fázích I_a , I_b , I_c

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp v_z protivír 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



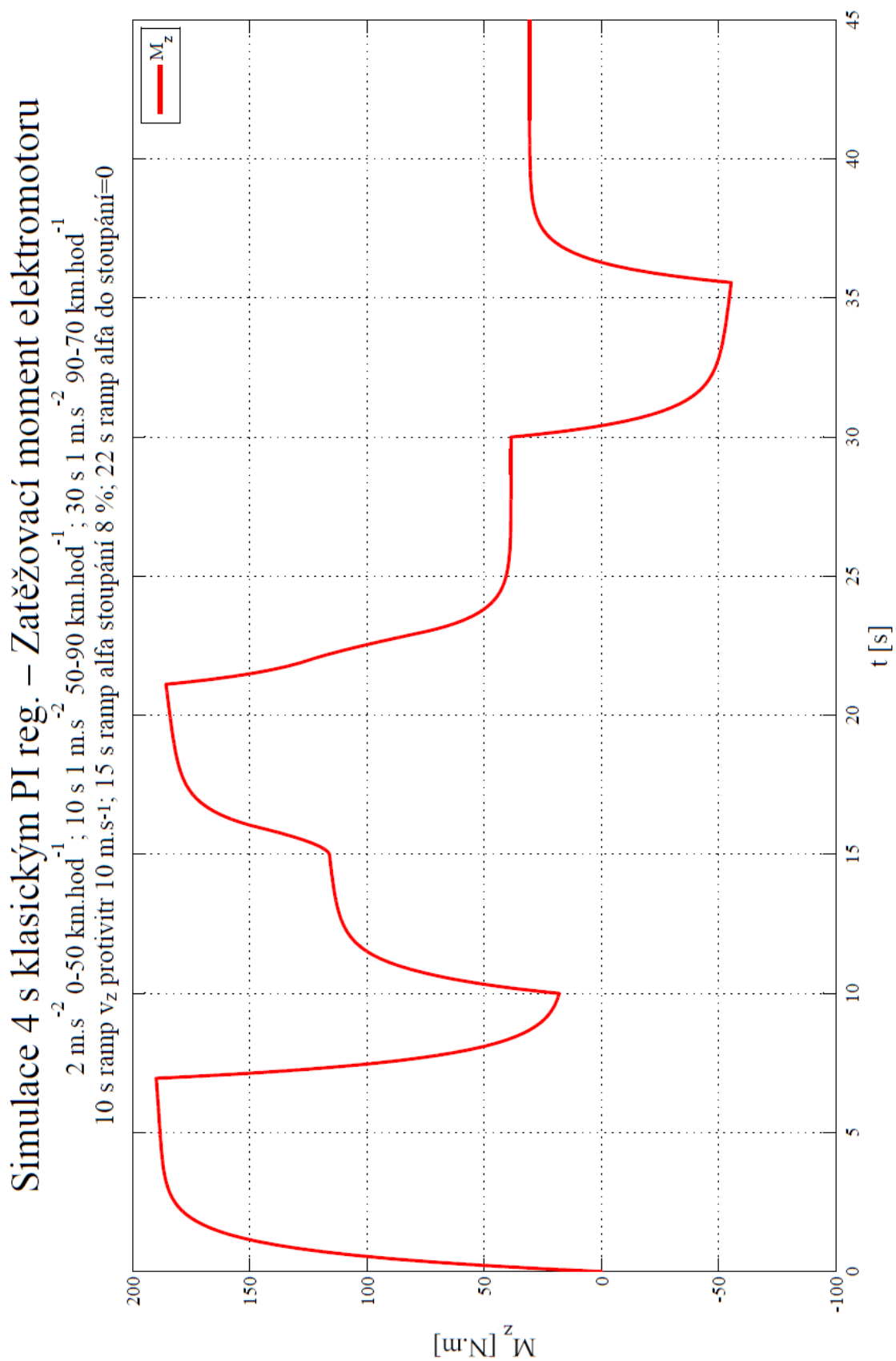
Obr. 11.55 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – fázové proudy elektromotoru

Příloha IX. – D



Obr. 11.56 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – jízdní odpory modelu vozidla

Příloha IX. – E

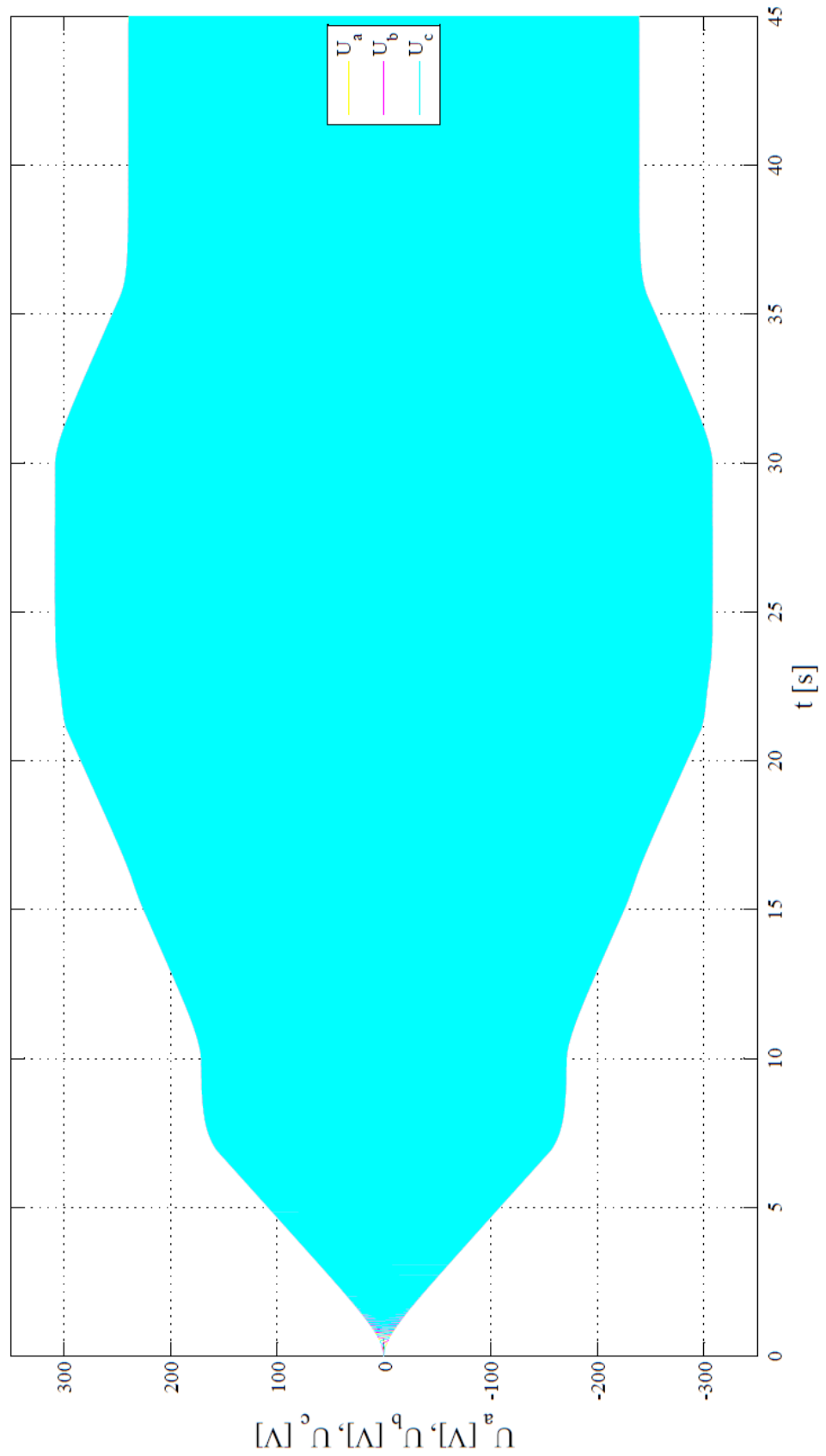


Obr. 11.57 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – zatěžovací moment elektromotoru

Příloha IX. – F

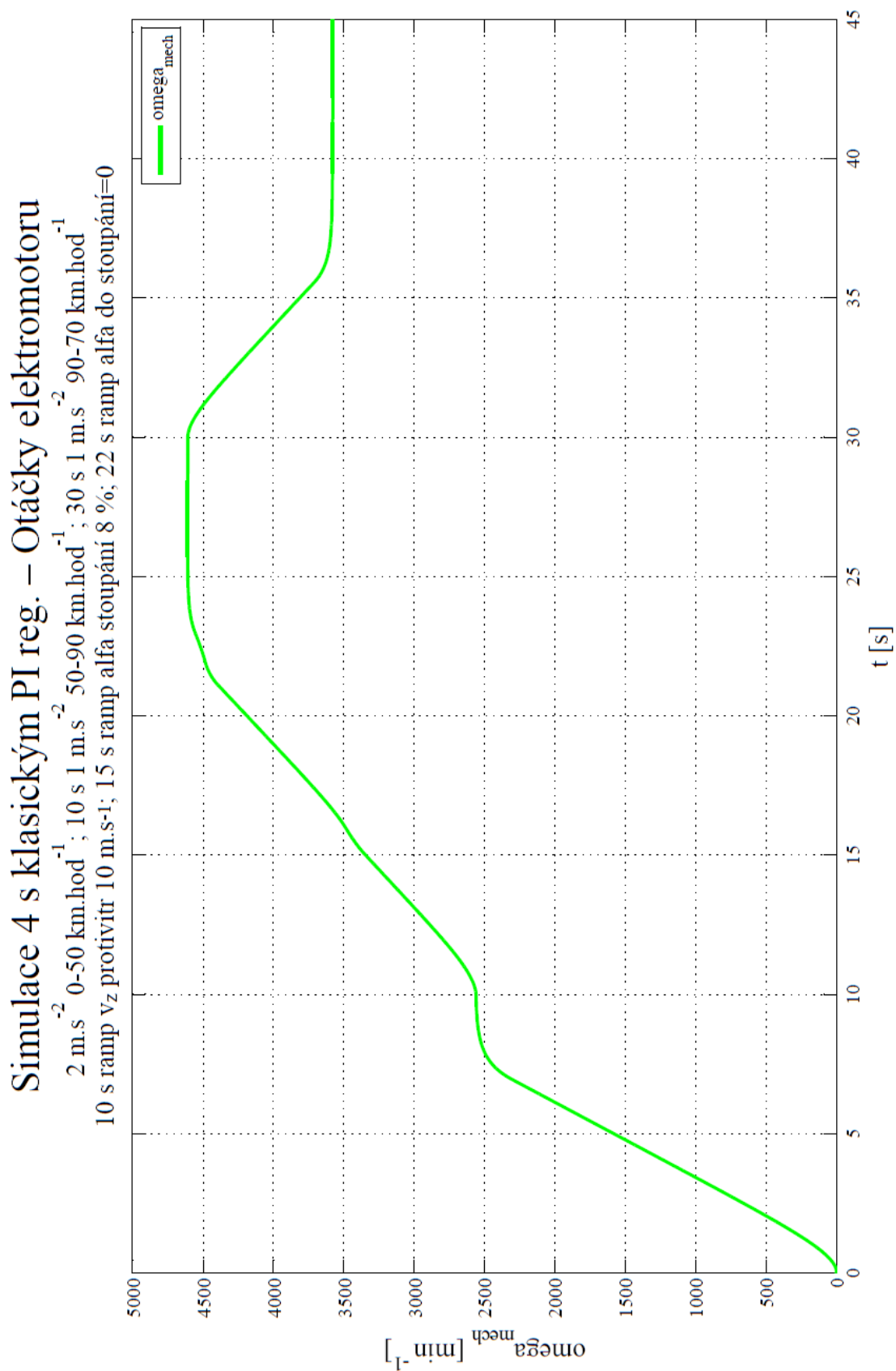
Simulace 4 s klasickým PI reg. – Napětí ve fázích U_a , U_b , U_c

2 m.s⁻² 0-50 km.hod⁻¹; 10 s 1 m.s⁻² 50-90 km.hod⁻¹; 30 s 1 m.s⁻² 90-70 km.hod⁻¹
 10 s ramp vz protivr 10 m.s⁻¹; 15 s ramp alfa stoupání 8 %; 22 s ramp alfa do stoupání=0



Obr. 11.58 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – fázová napětí elektromotoru

Příloha IX. – G



Obr. 11.59 – Simulace 4 s klasickým PI regulátorem – otáčky elektromotoru