



# Analýza chování a měření lineárního motoru s dynamicky uloženou kmitající hmotou na pružinách

## Disertační práce

*Studijní program:*

P2612 Elektrotechnika a informatika

*Studijní obor:*

Technická kybernetika

*Autor práce:*

**Ing. Zdeněk Braier**

*Školitel práce:*

prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Ústav mechatroniky a technické informatiky



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS/STAG se shodují.

11. prosince 2019

Ing. Zdeněk Braier

## Poděkování

Děkuji vedoucímu práce prof. Ing. Aleši Richtrovi, CSc. a kolegům Ing. Petru Škopovi, CSc., doc. Ing. Pavlu Rydlovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Šidlofovi, CSc. za odborné konzultace, které mi poskytovali v průběhu řešení disertační práce.

Rovněž děkuji firmě VÚTS, a.s. za poskytnuté technické zázemí a podporu při realizaci disertační práce.

Dále bych rád poděkoval svým blízkým a rodině za poskytnuté zázemí a prostor při přípravě a tvorbě disertační práce.

## Abstrakt

### Analýza chování a měření lineárního motoru s dynamicky uloženou kmitající hmotou na pružinách

Disertační práce je zaměřena na analýzu chování a měření lineárního motoru s dynamicky (pružně) uloženou kmitající hmotou na plochých pružinách. Prvním cílem práce je teoretická analýza a simulace chování motoru spolu s návrhem zdvihových křivek. Velký důraz je kladen na zjištění možného kmitání dynamicky (pružně) uložené hmoty spolu s návrhem a užitím metodiky Input Shaping pro minimalizaci příp. odstranění tohoto kmitání. Druhým cílem je verifikace, měření a vyhodnocení odezvy systému na reálném laboratorním zkušebním zařízení. Součástí práce je i změření a určení odchylky, které je zařízení schopno dosáhnout pro různá až limitní nastavení systému. V práci je popsán ucelený postup verifikace a ověření použitelnosti systému pro určitá konkrétní nastavení.

*Klíčová slova – lineární motor, simulace a měření, regulace a optimalizace, dimenzování motoru, dynamicky uložená kmitající hmota, polohová odchylka*

## Abstract

### Behaviour analysis and measurement of linear motor with dynamically mounted oscillating mass on springs

The Ph.D. thesis is focused on behaviour analysis and measurement of linear motor with dynamically (flexibly) mounted oscillating mass on flat springs. The first goal of the thesis is a theoretical analysis and simulation of engine behaviour along with design of stroke curves. Great emphasis is placed on finding the possible oscillation of dynamically (elastically) mounted mass together with the design and use of the Input Shaping methodology to minimize or reduce the impact of this oscillation. The second goal is to verify, measure and evaluate the complete system response on the real laboratory testing device. The work also includes measurement and assessment of the positioning deviation that the device is able to achieve for various or/till limit system settings. The thesis describes a comprehensive process of verification and system usability for certain specific settings.

*Keywords – linear motor (slider), simulation and measurement, regulation and optimization, motor dimensioning, dynamically mounted oscillating mass, positioning deviation*

## Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam zkratk .....	14
Seznam znaků a symbolů .....	15
Úvod .....	18
1. Přehled stavu techniky .....	20
1.1. Vnější a vnitřní uspořádání lineárního motoru.....	21
2. Model lineárního motoru .....	23
2.1. D_Q model lineárního motoru .....	23
2.2. Zjednodušený (linearizovaný) model synchronního stroje .....	25
2.3. Mechanický model lineárního motoru .....	27
3. Model lineárního motoru ve statorových souřadnicích.....	30
4. Výpočet parametrů regulační struktury pohonu s jednohmotovou zátěží.....	34
4.1. Výpočet parametrů rychlostního regulátoru pomocí metody symetrického optima .....	34
5. Výpočet parametrů polohového regulátoru pomocí metody optimálního modulu (OM) .....	36
5.1. Zjednodušený simulační model regulační struktury pohonu s jednohmotovou zátěží.....	37
5.2. Simulační model regulační struktury pohonu s d-q modelem motoru a s jednohmotovou zátěží .....	38
6. Syntéza regulační struktury soustavy s dvojhmotovou zátěží .....	40
6.1. Výpočet parametrů rychlostního regulátoru pohonu s dvojhmotovou zátěží.....	40
6.2. Výpočet parametrů polohového regulátoru pohonu s dvojhmotovou zátěží.....	42
6.2.1. Zjednodušený simulační model regulační struktury pohonu s dvojhmotovou soustavou .....	43
7. Simulační model regulační struktury pohonu s d-q modelem motoru a s dvojhmotovou zátěží.....	47
8. Matematický model dvojhmotové zátěže s pružnou vazbou .....	49
9. Metody potlačení reziduálních kmitů mechanických soustav .....	52
10. Metoda dopředného řízení pomocí metody „Input Shaping“ .....	53
10.1. Tvarovače určené pro dvojhmotové systémy .....	54
10.2. ZVD Tvarovače (zero vibration and derivative shaper) .....	57
11. Mechanické kmitání .....	59
12. Reálné zkušební a testovací zařízení YASKAWA .....	62
12.1. Zdvihové křivky .....	68

12.2. Měření, vyhodnocení a porovnávání veličiny.....	72
12.2.1. Elektrické veličiny .....	74
12.2.2. Mechanické veličiny .....	76
12.2.3. Potlačení reziduálních kmitů .....	80
12.2.4. Ověření dynamické a statické chyby polohování .....	84
12.2.5. Ověření dynamické a statické chyby polohování při zvýšené dynamice .....	89
13. Reálné zkušební a testovací zařízení SIEMENS.....	94
13.1. Měření, vyhodnocení a porovnávání veličiny.....	96
Závěr.....	97
Použitá literatura.....	99
Přehled publikovaných prací – výzkumné zprávy .....	101
Přehled publikovaných prací – příspěvky konferencí, funkční vzorek, patenty.....	102
Seznam příloh.....	104
Příloha [A.1] – Přehled zdvihových křivek.....	105
Příloha [A.2] – Naměřené a vyhodnocené průběhy elektrických veličin .....	114
Příloha [A.3] – Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin.....	128
Příloha [A.4] – Tabulky maxim, minim a směrodatných odchylek zdvihu .....	137
Příloha [A.5] – Elektrické schéma připojení motoru SGT-C-F35A120 do rozvaděče „Stand Yaskawa v.2“ .....	140

## Seznam obrázků

Obr. 1-1 – Typy (konstrukce) lineárních motorů.....	21
Obr. 1-2 – Náhled SGT lineárního motoru (reálné zkušební zařízení bez přidané dynamické kmitající hmoty a bez snímačů).....	22
Obr. 1-3 – Vnitřní uspořádání SGT lineárního motoru.....	23
Obr. 2-1 – Blokové schéma modelu synchronního lineárního motoru s permanentními magnety .....	24
Obr. 2-2 – Zjednodušený simulační model synchronního lineárního motoru .....	26
Obr. 2-3 – Blokové zapojení mechanické části lineárního motoru .....	27
Obr. 2-4 – Viskózní, Stribeckův a Coulombův efekt modelu tření .....	28
Obr. 2-5 – Simulační model tření .....	29
Obr. 2-6 – Blokový diagram modelu zohledňující vliv tření, ozubení a koncového efektu .....	29
Obr. 3-1 – Schématické konstrukční uspořádání lineárního motoru.....	30
Obr. 3-2 – Blokové zapojení modelu lineárního motoru ve statorových souřadnicích .....	32
Obr. 3-3 – Blokové zapojení jedné fáze lineárního motoru .....	32
Obr. 4-1 – Použitá regulační struktura rychlostní a proudové smyčky .....	34
Obr. 4-2 – Blokové zapojení regulační struktury rychlostní smyčky .....	35
Obr. 4-3 – Zjednodušený model pohonu s lineárním motorem .....	36
Obr. 5-1 – Blokové zapojení regulační struktury polohové smyčky.....	36
Obr. 5-3 – Simulační model lineárního pohonu s jednohmotovou zátěží .....	37
Obr. 5-4 – Výsledky simulace, zdvihová křivka (vlevo), dynamická chyba (vpravo) .....	38
Obr. 5-5 – Výsledky simulace, průběh rychlosti (vlevo), průběh hnací síly (vpravo) .....	38
Obr. 5-6 – Simulační model pohonu s jednohmotovou zátěží.....	39
Obr. 5-7 – Výsledky simulace, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo) .....	39
Obr. 5-8 – Výsledky simulace, průběh dynamické chyby.....	39
Obr. 6-1 – Blokové schéma rychlostní smyčky.....	40
Obr. 6-2 – Geometrické místo kořenů (GMK) přenosu otevřené rychlostní regulační smyčky .....	41
Obr. 6-3 – Blokové zapojení polohové smyčky s přímým odměřováním.....	42
Obr. 6-4 – Průběh GMK otevřené polohové smyčky .....	43
Obr. 6-5 – Simulační schéma pohonu s dvojhmotovou soustavou.....	44
Obr. 6-6 – Výsledky simulace bez použití kompenzace parazitních kmitů, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo) .....	44
Obr. 6-7 – Výsledky simulace bez použití kompenzace parazitních kmitů, průběh zdvihu zátěže (vlevo), zvětšený detail průběhu zdvihu v ustáleném stavu (vpravo).....	45
Obr. 6-8 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, zdvihová křivka (vlevo), detail modifikované zdvihové křivky (vpravo) .....	45
Obr. 6-9 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, průběh zdvihu zátěže (vlevo), zvětšený detail průběhu zdvihu v ustáleném stavu (vpravo).....	46

Obr. 6-10 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, průběh rychlosti .....	46
Obr. 7-1 – Simulační schéma pohonu s dvojhmotovou zátěží.....	47
Obr. 7-2 Grafy průběhů veličin, výsledky simulace bez použití kompenzace, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo) .....	48
Obr. 7-3 Grafy průběhů veličin, výsledky simulace bez použití kompenzace, zdvih zátěže (vlevo), zvětšený průběh zdvihu na zátěži v ustáleném stavu (vpravo).....	48
Obr. 7-4 Výsledky simulace při použití kompenzace dvojhmotové zátěže, zdvihová křivka (vlevo), zdvihová křivka modifikovaná (vpravo) .....	48
Obr. 7-5 Výsledky simulace při použití kompenzace dvojhmotové zátěže, rychlost (vlevo), zvětšený průběh zdvihu na zátěži v ustáleném stavu (vpravo).....	49
Obr. 8-1 – Struktura dvojhmotové zátěže.....	49
Obr. 8-2 – Blokované zapojení dvojhmotové zátěže .....	50
Obr. 8-3 – Upravené blokované zapojení dvojhmotové zátěže.....	50
Obr. 8-4 – Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu $\frac{v_2(s)}{v_1(s)}$ .....	51
Obr. 8-5 – Upravené blokované zapojení dvojhmotové zátěže.....	51
Obr. 8-6 – Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu $\frac{a_1(s)}{F_H(s)}$ .....	52
Obr. 10-1 – Základní princip metody „Input Shaping“ .....	53
Obr. 10-2 – Odezva systému na pulsy.....	54
Obr. 10-3 – Odezva systému se ZV tvarovačem, který obsahuje dva impulsy .....	56
Obr. 10-4 – Odezva systému se ZV tvarovačem obsahujícím tři impulsy .....	56
Obr. 10-5 – Amplitudové frekvenční charakteristiky tvarovačů .....	58
Obr. 11-1 – Pružně uložená setrvačná hmota s párem plochých pružin, průřez pružin.....	59
Obr. 11-2 – Model nosníku s tuhou setrvačnou hmotou na konci, pouze příčné posuvy bez natočení.....	60
Obr. 11-3 – Ekvivalentní model s jedním stupněm volnosti .....	60
Obr. 12-1 – Schématické blokované zapojení reálného zkušebního zařízení lineárního motoru s rozvaděčem, počítačem PC-NTB, snímači, měřicím analyzátor DEWE-5000 a dalšími komponentami.....	63
Obr. 12-2 – Náhledy 3D CAD modelu (a, c) a fotky reálného zkušebního zařízení (b, d) s lineárními motory Yaskawa na monolitické betonové desce .....	65
Obr. 12-3 – Zapojení rozvaděče lineárních motorů (a) s detailem zapojení servopacku SGD V (b) a sondami pro měření napětí a proudů fází U, V, W.....	66
Obr. 12-4 – Terminály servopacku SGD V Yaskawa s detaily přípojných svorek pro měření elektrických veličin na vstupu do motoru a konektoru analogových signálů z měniče .....	67
Obr. 12-5 – Zdvihová křivka F1 (zdvih $y_0$ , rychlost $y_1$ a zrychlení $y_2$ ) s polynomickou, harmonickou a parabolickou částí, frekvence 25 CPM, maximální zdvih 500 mm .....	70
Obr. 12-6 – Zdvihová křivka F6 (zdvih $y_0$ , rychlost $y_1$ a zrychlení $y_2$ ) s největší dynamikou, frekvence 8 CPM, maximální zdvih 145.38 mm .....	71



Obr. 12-7 Grafy průběhů naměřených a vyhodnocených elektrických veličin, z klidové polohy po doběh prvního cyklu, měření Meas383_25C_F1, frekvence 25 CPM, zdvih 0 – 500 mm, zeleně naměřené průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů a zdvih přes 13 bodů.....	76
Obr. 12-8 – Střední statický průběh absolutně vzatých pasivních odporů při pohybu v kladném (zeleně) a záporném (červeně) směru jako funkce zdvihu. Síla je kreslena pro rozsah zdvihu od 18 do 483.3 mm (465.3 mm), celkový zdvih je 501.3 mm. Minimální, maximální a střední odpor v kladném směru je {16.5, 22.5, 20} [N], v záporném směru {15.1, 21.2, 18.2} [N] (měření Test_31, frekvence 25 CPM) .....	77
Obr. 12-9 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka F1 (měření Meas383_25C_F1, frekvence 25 CPM, časový interval z klidové polohy po rozběh druhého cyklu, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů) .....	79
Obr. 12-10 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka F1 (měření Meas383_25C_F1, frekvence 25 CPM, časový interval z klidové polohy na konci prvního cyklu po rozběh třetího cyklu, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů) .....	80
Obr. 12-11 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty <b>s použitím korekce</b> podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru je $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvihová křivka F9-1 (měření Meas160_8C_F9-1, frekvence 8 CPM, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů).....	81
Obr. 12-12 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty <b>s použitím korekce</b> podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru je $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvihová křivka F9-2 (měření Meas163_8C_F9-2, frekvence 8 CPM, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů).....	82
Obr. 12-13 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka <b>korigovaná</b> , zdvihová křivka F11-1 (měření Meas370_8C_F11-1, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů).....	83
Obr. 12-14 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F11-2 (měření Meas372_8C_F11-2, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů).....	84
Obr. 12-15 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F1 (měření Meas383_25C_F1, frekvence 25 CPM, 1. cyklus) .....	85
Obr. 12-16 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>korigovaná pomocí IS</b> , zdvihová křivka F11-1 (měření Meas370_8C_F11-1, frekvence 8 CPM, 1. cyklus).....	86

Obr. 12-17 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F11-2 (měření Meas372_8C_F11-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus) .....	86
Obr. 12-18 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), <b>s použitím korekce</b> podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvihová křivka F9-1 (měření Meas160_8C_F9-1, frekvence 8 CPM, 1. cyklus) .....	88
Obr. 12-19 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), <b>s použitím korekce</b> podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvihová křivka F9-2 (měření Meas163_8C_F9-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus) .....	88
Obr. 12-20 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F5-2 (měření Meas117_8C_F5-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus) .....	90
Obr. 12-21 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F6 (měření Meas178_8C_F6, frekvence 8 CPM, 1. cyklus).....	91
Obr. 12-22 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F1 (měření Meas384_30C_F1, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, frekvence 30 CPM, 1. cyklus).....	92
Obr. 12-23 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. <b>nekorigovaná</b> , zdvihová křivka F1 (měření Meas410_30C_F1, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, frekvence 30 CPM, 1. cyklus).....	93
Obr. 13-1 – Zkušební zařízení laboratorního stendu s lineárním motorem Siemens .....	95
Obr. 13-2 – Rozvaděč s jednotlivými elektrickými prvky a komponentami pro řízení motoru Siemens .....	95
Obr. A.1-1 – Zdvihová křivka F1 s polynomickou, harmonickou a parabolickou částí, výdrže v úvratích (zdvih 0 – 500 mm).....	105
Obr. A.1-2 – Zdvihová křivka F2 bez výdrží v úvratích (zdvih 0 – 500 mm).....	105
Obr. A.1-3 – Zdvihová křivka F3 (zdvih 0 – 500 mm) .....	106

Obr. A.1-4 – Zdvihová křivka F4 (zdvih 0 – 145 mm) .....	106
Obr. A.1-5 – Zdvihová křivka F5-1 (zdvih 0 – 145.38 mm) .....	107
Obr. A.1-6 – Zdvihová křivka F5-2 (zdvih 0 – 145.38 mm) .....	107
Obr. A.1-7 – Zdvihová křivka F6 (lineární průběh, zdvih 0 – 145.38 mm).....	108
Obr. A.1-8 – Zdvihová křivka F6-2 (zdvih 0 – 145.38 mm) .....	108
Obr. A.1-9 – Zdvihová křivka F6-7 (zdvih 0 – 145.38 mm) .....	109
Obr. A.1-10 – Zdvihová křivka F8-1 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, zdvih 0 – 44 mm) .....	109
Obr. A.1-11 – Zdvihová křivka F8-2 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh fce F6, zdvih 0 – 42 mm) .....	110
Obr. A.1-12 – Zdvihová křivka F8-4 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh fce F6, zdvih 0 – 145.38 mm) .....	110
Obr. A.1-13 – Zdvihová křivka F9-1 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, použitá přenosová funkce korekčního filtru je $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvih 0 – 140 mm) .....	111
Obr. A.1-14 – Zdvihová křivka F9-2 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, použitá přenosová funkce korekčního filtru je $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvih 0 – 140 mm).....	111
Obr. A.1-15 – Zdvihová křivka F10-1 (zdv. křivka pro lineární průběh, bez korekce IS, zdvih 0 – 140 mm) .....	112
Obr. A.1-16 – Zdvihová křivka F10-2 (zdv. křivka fce F6, bez korekce IS, zdvih 0 – 145 mm) .....	112
Obr. A.1-17 – Zdvihová křivka F11-1 (lineární zdv. křivka, korekce pomocí IS, $T_v = 0.0268s$ , zdv. křivka korigovaná $T_v = 2ms$ , zdvih 0 – 135 mm).....	113
Obr. A.1-18 – Zdvihová křivka F11-2 (lineární zdv. křivka, zdvihová křivka nekorigovaná $T_v = 2ms$ , zdvih 0 – 135 mm).....	113
Obr. A.2-1 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas384_30C_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	115
Obr. A.2-2 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas410_30C_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	116
Obr. A.2-3 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas360_25C_F3, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 25 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	118
Obr. A.2-4 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas117_8C_F5-2, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	119

Obr. A.2-5 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas178_8C_F6, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	121
Obr. A.2-6 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas363_8C_F6-7, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	122
Obr. A.2-7 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas378_8C_F8-4, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	124
Obr. A.2-8 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas160_8C_F9-1, zdvihová křivka <b>bez použití korekce</b> , rozsah zdvihu 0 – 140 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	125
Obr. A.2-9 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas370_8C_F11-1, zdvihová křivka <b>korigovaná</b> , rozsah zdvihu 0 – 135 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů .....	127
Obr. A.3-1 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas384_30C_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů.....	128
Obr. A.3-2 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas410_30C_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů.....	129
Obr. A.3-3 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas360_25C_F3, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 25 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů.....	130
Obr. A.3-4 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas117_8C_F5-2, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů .....	131
Obr. A.3-5 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas178_8C_F6, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů.....	132
Obr. A.3-6 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas363_8C_F6-7, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů .....	133
Obr. A.3-7 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas378_8C_F8-4, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů .....	134

Obr. A.3-8 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas229_8C_F10-1, zdvihová křivka <b>pro lineární průběh, bez korekce IS</b> , rozsah zdvihu 0 – 140 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů .....	135
Obr. A.3-9 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas232_8C_F10-2, zdvihová křivka <b>fce F6, bez korekce IS</b> , rozsah zdvihu 0 – 145 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů .....	136
Obr. A.5-1 – Elektrické schéma zapojení rozvaděče, převzatý obrázek z [33], zeleně zvýrazněné připojení motoru SGT-C-F35A120 do rozvaděče .....	140

## Seznam zkratek

<i>CPM</i>	jednotka rychlosti, počet cyklů za minutu (z angl. origin. Cycles Per Minute)
<i>GMK</i>	geometrické místo kořenů
<i>Hall</i>	signál Hallovy sondy
<i>KINz2</i>	nástroj (software) pro tvorbu zdvihových závislostí (křivek, VÚTS, a.s.)
<i>LM</i>	lineární motor
<i>Matlab Simulink</i>	matematický simulační a výpočetní program (MathWorks)
<i>OM</i>	metoda optimálního modulu
<i>PI</i>	regulátor s proporcionálně integrační složkou
<i>SO</i>	metoda symetrického optima
<i>Stdv</i>	směrodatná odchylka (z angl. originálu Standart deviation)
<i>WF Mathematica</i>	matematický výpočetní a zobrazovací program (Wolfram Research, Inc.)
<i>ZV, ZVD, ZVDD</i>	tvárovače metody <i>Input Shaping</i> (z angl. origin. Zero Vibration resp. Zero Vibration and Derivative Shaper)

## Seznam znaků a symbolů

$a_1$	zrychlení motoru	[m/s <sup>2</sup> ]
$A_j$	amplituda N-tého pulsu	[-]
$b, b_{kr}$	činitel tlumení	[N s/m]
$b_0, b_p$	šířka pružiny	[mm]
$B_j$	koeficient sinusového členu každého N-tého pulsu	[-]
$c$	konstanta tuhosti	[N/m]
$C_{fr}$	Coulombův koeficient	[N]
$E$	modul pružnosti	[Pa]
$F$	výsledná síla motoru	[N]
$F_{cogging}$	síla ozubení	[N]
$F_{disturb}$	další síly	[N]
$F_{end\_effect}$	síla způsobená konečnou délkou pohybu	[N]
$F_{friction}$	síla vyvozená vlivem tření	[N]
$F_{cH}$	celková třecí síla	[N]
$F_H$	hnací síla	[N]
$F_{max}$	výsledná síla (moment) motoru	[N]
$F_{peak}$	síla při krátkodobém zatížení	[N]
$F_{NC}$	trvale působící maximální síla celého motoru	[N]
$F_R$	přenosová funkce regulátoru	[-]
$F_S$	přenosová funkce regulované soustavy	[-]
$F_T$	síla	[N]
$F_Z$	síla vyvolaná přidanou zátěží	[N]
$F_W$	přenos uzavřené rychlostní smyčky	[-]
$F_0$	přenos otevřené smyčky	[-]
$F_1$	přenos proudové smyčky (přenosová fce proudového regulátoru)	[-]
$f_0$	vlastní netlumená frekvence	[Hz]
$h$	tloušťka pružiny	[mm]
$H$	přenosová funkce regulátoru	[-]
$Hall\_V$	signál Hallovy sondy	[-]
$i_A, i_B, i_C$	proudy v cívkách mezi svorkami A, B, C	[A]
$I_A, I_B, I_C$	proudy cívkami jednotlivých fází	[A]
$I_d, I_q$	proudy cívkami ve složkovém tvaru	[A]
$I_{NC}$	efektivní proud jednou fází motoru při $F_{NC}$	[A]
$I_{peak}$	efektivní proud jednou fází motoru při $F_{peak}$	[A]
$I_0$	elektrický proud	[A]
$\bar{I}_1$	elektrický proud	[A]

$J$	kvadratický moment průřezu	$[\text{mm}^4]$
$k$	Striebeckův faktor rychlosti	$[\text{s/m}]$
$k$	efektivní tuhost pružiny	$[\text{N m}^{-1}]$
$k_0$	tuhost pružiny	$[\text{N m}^{-1}]$
$k_d$	konstanta třecích sil pojezdu	$[\text{N s/m}]$
$k_E$	elektrická konstanta motoru	$[\text{V s/m}]$
$K_e$	elektrická konstanta motoru (jedné cívky)	$[\text{V s/m}]$
$K_{end}$	koeficient jevu konečné délky pohybu	$[-]$
$K_{Ep}$	přepočtená elektrická konstanta	$[\text{V s/m}]$
$k_F$	silová konstanta celého motoru	$[\text{N/A}]$
$K_F$	silová konstanta motoru (jedné cívky)	$[\text{N/A}]$
$K_{Fcelk}$	celková silová konstanta motoru	$[\text{N/A}]$
$K_{Fp}$	přepočtená silová konstanta	$[\text{N/A}]$
$K_M$	momentová konstanta	$[\text{N m/A}]$
$K_P$	rychlostní konstanta	$[-]$
$K_R$	celkové zesílení	$[-]$
$L$	indukčnost motoru (jedné cívky)	$[\text{H}]$
$L_p$	délka pružiny	$[\text{mm}]$
$L_d, L_q$	indukčnosti statorového vinutí v podélné d a příčné q ose	$[\text{mH}]$
$L_{U-V}$	indukčnost vinutí jedné fáze (mezi svorkami U a V)	$[\text{mH}]$
$M$	moment motoru	$[\text{N m}]$
$m_C$	celková hmotnost primární (pohyblivé) části motoru a dynam. uložené hmoty	$[\text{kg}]$
$m_p$	hmotnost pohyblivé primární části motoru	$[\text{kg}]$
$m_{p1}$	hmotnost pružiny	$[\text{kg}]$
$m_{PR}$	redukováná hmotnost pružiny	$[\text{kg}]$
$m_1$	hmotnost primární části motoru	$[\text{kg}]$
$m$	hmotnost dynamicky (pružně) uložené hmoty	$[\text{kg}]$
$\{mn\}$	množina minimálních hodnot z několika po sobě měřených cyklů	$[\text{mm}]$
$\{mx\}$	množina maximálních hodnot z několika po sobě měřených cyklů	$[\text{mm}]$
$p$	parametr přenosové rovnice	$[-]$
$p_p$	počet pólových dvojic	$[-]$
$p_1$	počet pólpárů vztažených na 1m	$[\text{1/m}]$
$R$	odpor motoru (jedné cívky)	$[\Omega]$
$R_1, R$	odpor cívky motoru	$[\Omega]$
$R_{U-V}$	odpor vinutí jedné fáze (mezi svorkami U a V)	$[\Omega]$
$S$	plocha průřezu pružiny	$[\text{mm}^2]$
$s$	Laplaceův parametr přenosové funkce	$[-]$



$S_{fr}$	Striebeckův koeficient	[N]
$t$	čas	[s]
$t_{END}$	čas konce N-tého pulsu	[s]
$t_j$	čas výskytu N-tého pulsu	[s]
$T_N, T_R, T_T, T_1$	časové konstanty tvarovačů	[s]
$T_V$	vzorkovací perioda tvarovače	[s]
$u_A, u_B, u_C$	napětí jednotlivých fází motoru	[V]
$U_d, U_q$	napětí ve složkovém tvaru v rotujících souřadnicích (v podélném d směru a příčném q směru)	[V]
$u_{EA}, u_{EB}, u_{EC}$	vnitřní indukovaná napětí cívek motoru	[V]
$u_{extA}, u_{extB}, u_{extC}$	externí napájecí napětí cívek motoru	[V]
$U_0$	napětí	[V]
$v, v_1$	rychlost pohybu (posuvu) primární části motoru	[m/s]
$v_2$	rychlost pohybu (posuvu) dynamicky (pružně) uložené hmoty	[m/s]
$V_{fr}$	viskózní koeficient	[N s/m]
$x, x_1$	poloha primární části motoru	[mm]
$x_2, y$	odezva (poloha dynamicky uložené hmoty)	[mm]
$X_{sk}$	skutečná poloha	[mm]
$X_z$	požadovaná poloha	[mm]
$\lambda$	kořen rovnice	[-]
$\xi$	očekávaný poměr tlumení (činitel tlumení)	[-]
$\rho$	hustota materiálu	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\tau$	malá časová konstanta soustavy	[s]
$\tau_p$	rozteč jednoho půlpáru (tj. rozteč dvojic magnetů nebo rozteč cívek) [m]	
$\tau_\sigma, \tau_0, \tau_1$	časové konstanty regulované soustavy	[s]
$\varphi$	elektrický úhel	[-]
$\psi$	posunutí (natočení) výsledného magnetického toku vůči perman. magnetům	[-]
$\psi_{pm}$	magnetický indukční tok	[Wb]
$\omega$	úhlová rychlost rotoru a souřadného systému	[rad/s]
$\omega_0$	vlastní kmitočet netlumených kmitů systému	[Hz]
$\Phi$	magnetický tok vzduchové mezery	[Wb]
$\Phi_B$	magnetický tok vyvolaný magnety	[Wb]
$\Psi_d, \Psi_q$	magnetické toky ve složkovém tvaru (v podélném d a příčném q směru)	[Wb]
$\bar{\Psi}_1^*$	komplexně sdružená hodnota spřaž. mag. toku statorovým vinutím	[Wb]
$\Omega_L$	vlastní kmitočet zátěže	[Hz]
$\Omega_{LM}$	vlastní kmitočet dvojhmotové soustavy	[Hz]

## Úvod

Disertační práce je zaměřena na komplexní posouzení chování lineárních motorů. V průmyslové praxi jsou lineární motory používány pro nejrůznější polohovací subsystémy příp. samostatné systémy, ať už součástí obráběcích strojů nebo manipulátorů nebo robotických ramen. Avšak v závislosti na předpokládané a navržené použití a požadované přesnosti s minimální chybou jsou vlastnosti lineárních motorů kolikrát přeceňovány příp. podceňovány. Výrobci a dodavatelé lineárních motorů poskytují technické informace v rámci zákaznické podpory a servisu, ale často v omezené míře nebo nedostatečně na základě univerzálního nastavení a použití. Pokud však má uživatel zájem se dozvědět s jakou přesností případně chybou je zařízení schopno pracovat, jaké jsou technické limitní stavy pro užití zařízení pro konkrétní průmyslovou aplikaci, potom tyto informace jsou výrobcem a dodavatelem schopni poskytnout buď v omezené míře, nebo vůbec. Pokud má lineární motor být součástí přesného výrobního stroje příp. manipulátoru nebo jiného polohovacího zařízení, jsou výše popsané otevřené dotazy důležité pro navrhovatele a konstruktéry strojů a průmyslových aplikací.

Disertační práce se zabývá lineárními motory z několika pohledů a je rozdělena do několika kapitol dle cílů. Prvním cílem je návrh a odvození matematického modelu pohonu s lineárním motorem. Součástí kapitol je pomocí matematického aparátu a modelů simulovat chování pohonu pro několik vybraných průběhů zdvihových křivek se zaměřením na předpokládané chování zařízení. Teoretické výpočty a simulace se zaměřují na simulování chování a limitní nastavení parametrů motoru spolu se vzájemným posouzením tohoto nastavení s důrazem na minimalizaci příp. odstranění nežádoucích účinků (kmity, nepřesnosti v polohování, minimální chyby, aj.). Při návrhu zdvihových křivek bylo použito několik různých teoretických postupů a metod (inverzní dynamika, Input Shaping, aj.) pro potlačení reziduálních kmitů. Popsané teoretické analýzy, výpočty a simulace jsou zaměřeny a rozděleny na kapitoly pro jednohmotové a dvojhmotové systémy s jedním pružným členem.

Druhým cílem práce je ověření teoreticky popsaného dynamického chování lineárního motoru. Jednotlivé kapitoly si kladou za cíl verifikace, měření a vyhodnocení chování výše popsaného modelu s užitím modifikovaného reálného zkušebního zařízení postaveného na platformě laboratorního stendu vyvinutého ve spol. VÚTS, a.s. tak, aby bylo možno realizovat měření pro verifikaci matematických modelů a ověřování limitních stavů analyzovaného lineárního pohonu. Zkušební zařízení bylo doplněno o strojní části, snímače a senzory pro precizní praktické změření a ověření výsledků. Elektrické signály z jednotlivých snímačů a zařízení byly synchronně zaznamenávány měřicím analyzátozem případně systémově uložené jako elektrické signály z měniče. Pro řízení zkušebního zařízení lineárního motoru a posouzení a porovnání výsledků a závěrů z výše popsaných teoretických výpočtů a simulací bylo užito několik vybraných průběhů zdvihových křivek. Naměřená data byla offline postprocesingem převedena, zpracována a vyhodnocena. Nemalým dílem práce je precizní měření, vyhodnocení a posouzení vlivů nastavení parametrů systému.

Třetím cílem je vypracování metodiky návrhu optimálního nastavení parametrů řídicího systému pohonu s lineárním motorem se zaměřením na předpokládané vlastnosti a konkrétní užití. Nemalou částí tohoto cíle je měřením zjistit statickou a dynamickou chybu (odchylku) polohování lineárního pohonu při optimálním nastavení parametrů a při zvoleném buzení pohonu vybranými zdvihovými křivkami.

Čtvrtým cílem práce je provedení analýzy metod použitelných pro potlačení reziduálních kmitů pohonu s lineárním motorem a navrženou metodu ověřit pomocí simulačních modelů a měření na laboratorním standu.

Souhrnným cílem disertační práce je s užitím jednotlivých dílčích cílů a kapitol seznámit čtenáře a uživatele s možnostmi až limitního nastavení lineárních motorů se zaměřením na analýzu požadovaného chování a měření ověřit odezvu zkušebního zařízení. A to jak z pohledu teoretických analýz (návrhů) zahrnující matematické modely, výpočty, simulace, aj. pro jednohrotové a dvojhrotové systémy s jedním pružným členem, tak i s ověřením popsaných postupů s užitím výsledků a vyhodnocení dat naměřených na reálném zkušebním zařízení laboratorního standu. Dále si práce klade za cíl přispět k dalšímu pokroku a poznání spolu se zvýšením povědomí o možném limitním nastavení lineárních motorů, které jsou stále častěji používány jako části přesných výrobních strojů a zařízení příp. pro různé velmi přesné polohovací systémy.

## 1. Přehled stavu techniky

Řada firem po celém světě nabízí zákazníkům lineární motory (systémy) různých provedení. Jako zástupce těchto firem vyrábějících a nabízejících lineární motory jmenujme, seřazené abecedně, firmy Bosch Rexroth, ETEL, FANUC, HIWIN, OMRON, SEW Eurodrive, Siemens, TG Drive, VUES, Yaskawa, aj. Na přehledu výrobního portfolia poslední jmenované fy YASKAWA [1], [2] je v následujícím textu a na obrázcích ukázáno, jaké různé základní typy lineárních motorů [3], vedle určitých speciálních a specifických konstrukcí a typů, jsou aktuálně na trhu dostupné.

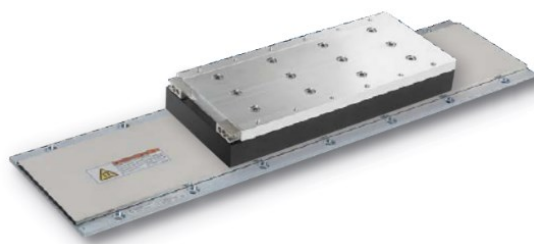
Prvním z konstrukčních uspořádání lineárního motoru je takové, kdy lineární posuv (pohyb) je realizován pomocí primárního posuvného členu (jezdce) cylindrického typu, jehož středem je vedena sekundární část (tyč s polem permanentních magnetů). Tento servomotor nese označení Sigma Stick. Zástupci tohoto uspořádání jsou na obr. 1-1a. U dalšího uspořádání tvoří pole magnetů (sekundární část) jakýsi polouzavřený profil U, do jehož středu je vloženo pole cívek jezdce (primární část) bez železa. Toto uspořádání nese označení SGL G, může být konstrukčně uchyceno jak ve vodorovné tak ve svislé rovině, jak je zobrazeno na obr. 1-1b. Na obr. 1-1c resp. 1-1d jsou zobrazeny lineární motory se železným jádrem s polem permanentních magnetů v horizontální rovině. U typu SGL F2 je sekundární pole magnetů kryto vrchním plechem oproti typu SGL F, kde je pole magnetů zvnějšku přístupné (nekrytované). U těchto typů je pole cívek konstrukčně schováno v pohyblivé primární části (pohyblivém jezdcí, skříni). Obr. 1-1e je obdobně jako předešlé dva typy SGL T typ se železným jádrem. Uspořádání sekundární části tvoří jakousi „polouzavřenou trasu tvaru U“, kdy pole magnetů je duální a je uspořádáno v bočních sešikmených stěnách nepohyblivé části. Této sešikmené konstrukci stěn je adekvátně tvarově přizpůsobena i primární pojízdná část s cívkami tak, aby vzduchová mezera mezi cívkami a magnety byla konstantní. Na obr. 1-1f je zobrazeno uspořádání nesoucí označení Sigma Trac  $\mu$ , vhodná pro vysoce přesná zařízení. Jak již sám název napovídá, u tohoto typu lineárního motoru je velice krátká sekundární část pro pojezd primární části, v řádech desítek milimetrů. Na posledním obrázku, obr. 1-1g, je zobrazeno uspořádání Sigma Lineárního Motoru s označením SGT, kde sekundární část (pole magnetů) je na dně statického profilu a primární část s cívkami je v pohyblivé části (jezdci) s upínací deskou.



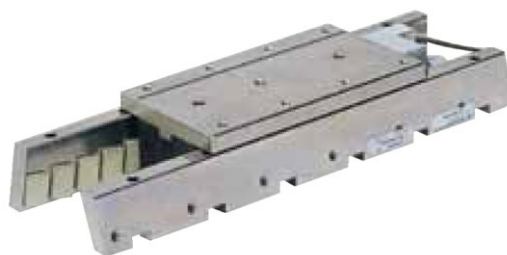
a) cylindrický typ Sigma Stick



b) SGL G - typ bez železného jádra



c) SGL F2 – typ se železným jádrem



e) SGL T – typ se železným jádrem



d) SGL F – typ se železným jádrem



f) SGT M – typ Sigma-Trac- $\mu$

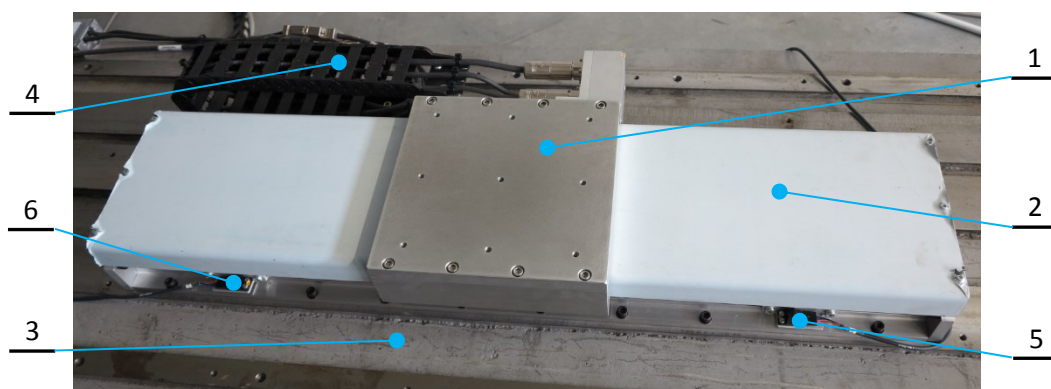


g) SGT Sigma-Trac typ

*Obr. 1-1 – Typy (konstrukce) lineárních motorů*

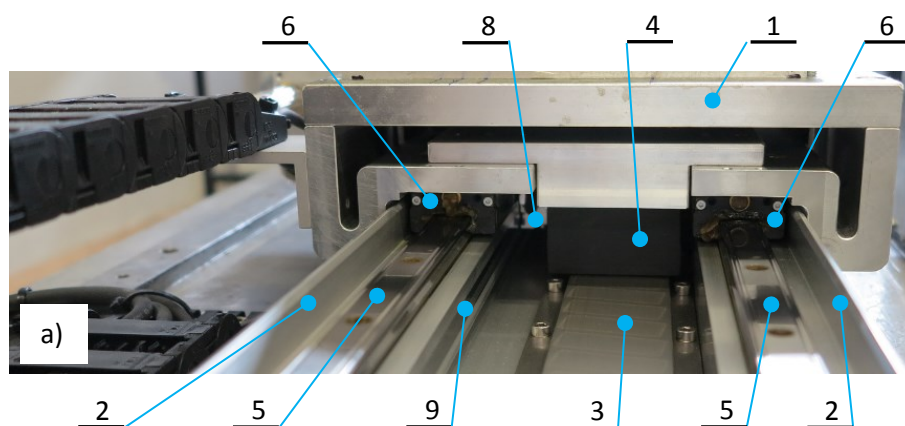
### 1.1. Vnější a vnitřní uspořádání lineárního motoru

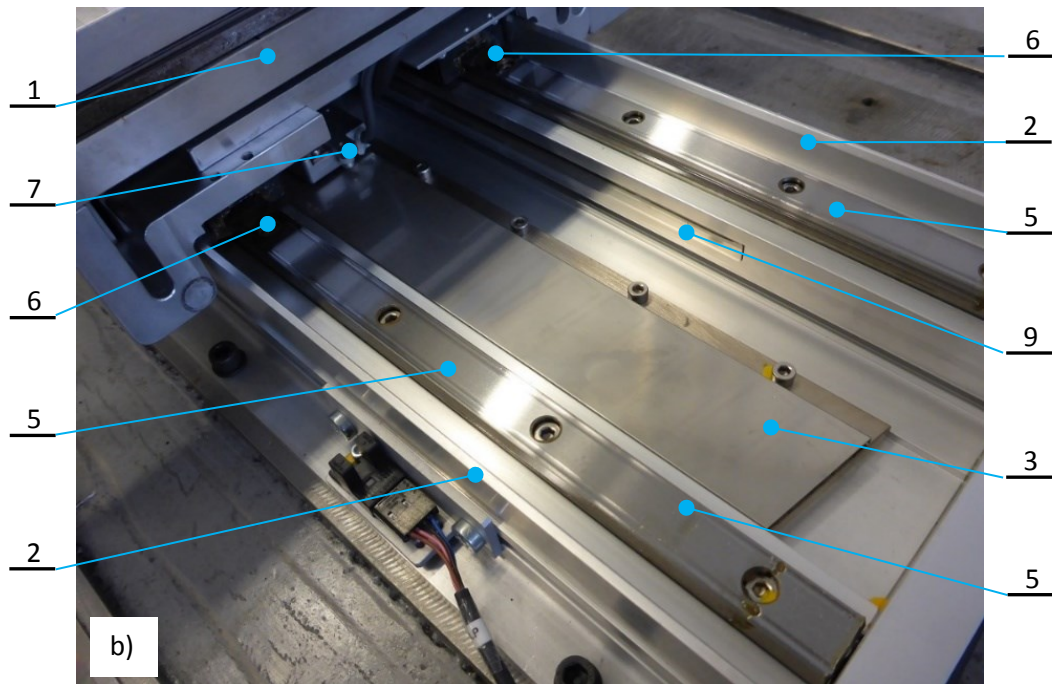
Na obr. 1-2 je pohled na reálné zkušební zařízení lineárního motoru SGT Sigma-Trac, na kterém byla provedena praktická měření a ověřeny a verifikovány teoretické výpočty a simulace. Poz. 1 je horní upínací deska primární pohyblivé části lineárního motoru, poz. 2 je horní kryt sekundární statické (pevné) části s polem magnetů a částečně chránící citlivé části primárního pohyblivého jezdce. Poz. 3 je monolitická betonová deska s ocelovými montážními výztužemi, na které je celé zkušební zařízení pevně přimontováno. Poz. 4 je energetický řetěz s přívodními kabely a konektory k jednotlivým částem zařízení. Poz. 5 a 6 jsou bezdotykové koncové spínače OMRON (pozitivní resp. negativní konec) vymežující rozsah dráhy pojezdu.



Obr. 1-2 – Náhled SGT lineárního motoru (reálné zkušební zařízení bez přidané dynamické kmitající hmoty a bez snímačů)

Na obr. 1-3 je zobrazeno vnitřní uspořádání lineárního motoru SGT Sigma-Trac v čelním a šikmém pohledu. Pro detailnější vyobrazení a náhled skutečného uspořádání je ze zařízení odmontován horní vnější kryt, který chrání jednotlivé citlivé komponenty primární a sekundární části před prachem, vnějšími vlivy a poškozením. Poz. 1 je čelo horní upínací desky primární pohyblivé části, poz. 2 jsou boční stěny profilu sekundární statické části. Poz. 3 je lineární pole permanentních magnetů přišroubované ke dnu profilu sekundární nepohyblivé (statické) části. Poz. 4 je skříň vinutí cívek jednotlivých fází přimontovaná zespoda k primární pohyblivé části (jezdci) motoru. Poz. 5 jsou kolejnice lineárního vedení pohyblivé části motoru, poz. 6 jsou skříňe jednotlivých předepjatých ložiskových kuličkových bloků. Poz. 7 je Hallova sonda. Poz. 8 je snímací (čtecí) hlavička a poz. 9 precísní pravítko integrovaného lineárního odměřovacího systému Renishaw.





Obr. 1-3 – Vnitřní uspořádání SGT lineárního motoru

## 2. Model lineárního motoru

### 2.1. D<sub>Q</sub> model lineárního motoru

Pro odvození lineárního motoru použijeme rovnice určené pro rotační synchronní motory s permanentními magnety. Převod na lineární motory je uveden na konci kapitoly. Napěťové rovnice ve složkovém tvaru v souřadnicích rotujících rychlostí  $\omega$  jsou podle literatury [4] následující:

$$U_d = R_1 I_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q = R_1 I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \quad (2.1)$$

$$U_q = R_1 I_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d = R_1 I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega (L_d I_d + \Phi_B) \quad (2.2)$$

$$\Psi_d = L_d I_d + \Phi_B \quad (2.3)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (2.4)$$

kde  $\Phi_B = konst$  (magnetický tok vyvolaný magnety),  
 $\omega$  je elektrická úhlová rychlost rotoru a rovněž souřadného systému,  
 $L_d, L_q$  jsou indukčnosti statorového vinutí v podélné a příčné ose.

Moment motoru je

$$M = \frac{3}{2} p_p I_m [\bar{\Psi}_1^* \bar{I}_1] = -\frac{3}{2} p_p (\Psi_q I_d - \Psi_d I_q) = \frac{3}{2} p_p [\Phi_B I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (2.5)$$

kde  $p_p$  je počet pólových dvojic synchronního motoru.

První součin v hranaté závorce představuje hlavní složku momentu. Druhý výraz je označován jako reluktanční moment a vyskytuje se pouze tehdy, má-li stroj vyniklé póly na rotoru ( $L_d \neq L_q$ ). Výše uvedené rovnice můžeme použít i pro lineární motory. Pro lineární motory zavedeme elektrický úhel  $\varphi$ , který se vypočte z polohy lineárního motoru pomocí vztahu

$$\varphi = x \frac{2\pi}{\tau_p} \quad (2.6)$$

kde  $x$  je poloha lineárního posuvu,  
 $\tau_p$  je rozteč jednoho pólpáru (tj. rozteč dvojic magnetů nebo rozteč cívek).

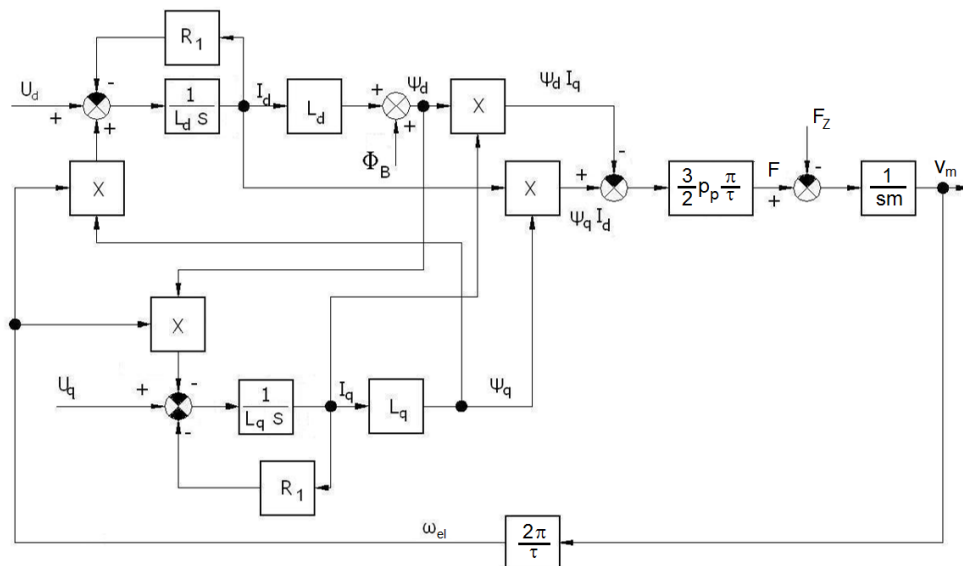
Obdobně zavedeme úhlovou rychlost  $\omega$ , kterou vypočteme pomocí vztahu

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = v \frac{2\pi}{\tau_p} \quad (2.7)$$

Pro lineární synchronní motor je možno odvodit výraz pro výpočet hnací síly, který je následující

$$F = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\Psi_{PM} + (L_d - L_q) I_d] I_q \quad (2.8)$$

Blokové schéma synchronního lineárního motoru s permanentními magnety sestaveného podle výše uvedených rovnic je na obr. 2-1.



Obr. 2-1 – Blokové schéma modelu synchronního lineárního motoru s permanentními magnety



## 2.2. Zjednodušený (linearizovaný) model synchronního stroje

V d-q modelu se vyskytují určité nelinearity. První nelinearita je typu nasycení. Další vyskytující se nelinearita je násobení dvou signálů, a to proudu  $i_q$  a  $i_d$ . Poslední nelinearitou je násobení rychlosti otáčení rotoru  $\omega$  a magnetických toků  $\Psi_d$  a  $\Psi_q$ . Pro linearizaci byl použit následující postup podle [5]. Předpokládáme, že pohon používá vektorové řízení. Regulátor proudu  $i_d$  má v tomto případě žádanou hodnotu  $i_d = 0$  A. To je platné v oblasti pod jmenovitými otáčkami. Jedná se o řízení při maximálním momentu a při konstantní velikosti budícího toku. Když tedy budeme uvažovat  $i_d = 0$  A, rovnice (2.1) až (2.5) se podstatně zjednoduší na tvar

$$u_d = 0 \quad (2.9)$$

$$u_q = R_1 i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} = R_1 i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega \Phi_B \quad (2.10)$$

$$\Psi_d = \Phi_B \quad (2.11)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (2.12)$$

$$M = \frac{3}{2} p_p \text{Im}[\bar{\Psi}_1^* \bar{I}_1] = \frac{3}{2} p_p \Psi_d i_q \quad (2.13)$$

Abychom obdrželi matematický model lineárního synchronního motoru, určíme nejprve výraz pro výkon motoru podle literatury [5]

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (2.14)$$

$$u_d i_d + u_q i_q = R i_d^2 + \frac{d\Psi_d}{dt} i_d + R i_q^2 + \frac{d\Psi_q}{dt} i_q + \omega (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (2.15)$$

$$P = \frac{3}{2} \omega (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{3}{2} \omega [\Psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2.16)$$

Hnací síla lineárního motoru je potom

$$F = \frac{3}{2} p_p \frac{\pi}{\tau} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = \frac{3}{2} p_p \frac{\pi}{\tau} [\Psi_{PM} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (2.17)$$

Magnetický tok  $\Psi_{PM}$  můžeme vypočítat na základě znalosti silové konstanty motoru  $K_F$  a při dodržení podmínky ( $I_d = 0$ ) takto

$$\Psi_{PM} = \frac{\tau}{\pi} \frac{2}{3 p_p} \frac{F}{i_q} = \frac{\tau}{\pi} \frac{2}{3 p_p} K_F \quad (2.18)$$

$$F = \frac{3}{2} K_F i_q = K_{F_{celk}} i_q \quad (2.19)$$

kde  $K_{F_{celk}}$  je silová konstanta přepočtená jako společné silové působení všech tří cívek.

Výše uvedené rovnice představují zjednodušený linearizovaný matematický model lineárního synchronního servomotoru s jednohmotovou zátěží. Hnací síla motoru bude tedy závislá pouze na takzvané momentotvorné složce proudu, tedy na proudu  $i_q$ . Zjednodušené rovnice popisující dynamické chování lineárního motoru použité pro sestavení simulačního modelu jsou potom následující

$$u_q = u_E + Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} \quad (2.20)$$

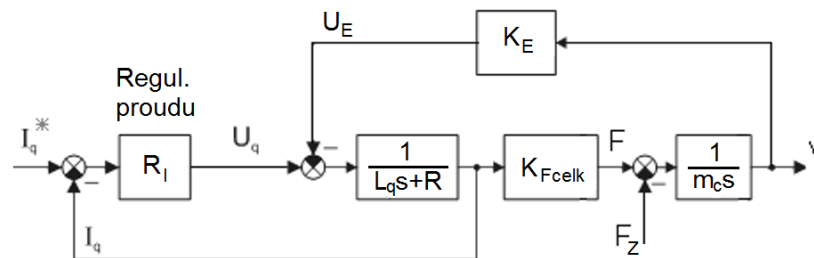
$$F = \frac{3}{2} K_F i_q = K_{F_{celk}} i_q \quad (2.21)$$

$$u_E = K_E v \quad (2.22)$$

kde  $K_E$  je napěťová konstanta motoru [Vs/m],

$K_F$  je silová konstanta motoru odpovídající síle jedné cívky [N/m].

Zjednodušené simulační schéma synchronního lineárního motoru je uvedeno na obr. 2-2.



Obr. 2-2 – Zjednodušený simulační model synchronního lineárního motoru

V této části práce si dovoluji citovat odstavec a některé pasáže z [6]: Neustálým přizpůsobováním úhlu  $\psi$  k okamžité poloze motoru  $\varphi$  tak, aby bylo  $\psi = \varphi - \frac{\pi}{2}$ , je dosaženo stejného efektu, jaký má u stejnosměrných motorů komutátor s kartáči. Výsledkem je maximální silový účinek pole permanentních magnetů na vinutí. Poznamenejme, že výsledná síla motoru je 1,5krát větší, než největší možné silové působení jediné cívky.

$$F_{max} = \frac{3UK_F}{2R} = \frac{3}{2} K_F I_q = K_{F_{celk}} I_q \quad (2.23)$$

$$K_{F_{celk}} = \frac{3}{2} K_F \quad (2.24)$$

V tab. 2-1 jsou uvedeny parametry lineárního motoru Yaskawa.

Tab. 2-1 Parametry motoru Yaskawa

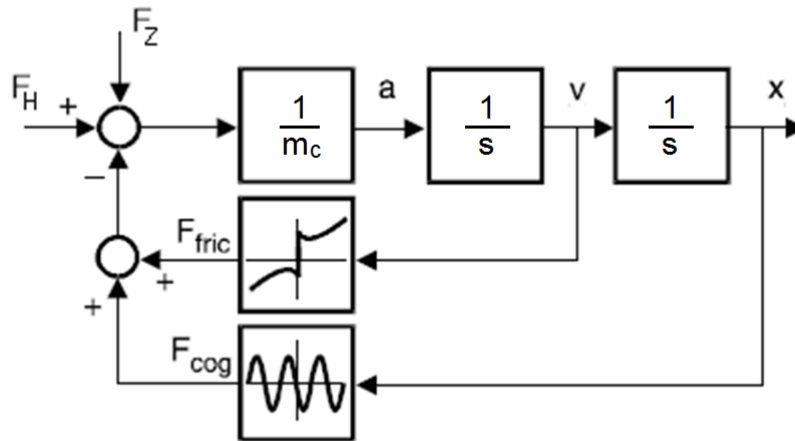
Symbol	Hodnota	Parametr
$R$	1.6 $\Omega$	odpor jedné cívky motoru
$L_d$	13 mH	indukčnost statorového vinutí v podélné ose (d-osa)
$L_q$	13 mH	indukčnost statorového vinutí v příčné ose (q-osa)
$p_p$	1	počet pólových dvojic
$\tau$	0.012 m	rozteč pólových dvojic
$K_F$	93 N/A	silová konstanta motoru
$\psi_{pm}$	0.237 Wb	PM magnetický indukční tok

### 2.3. Mechanický model lineárního motoru

U lineárního motoru je nutno kromě zatěžovací síly uvažovat i vliv tření ( $F_{friction}$ ) a dalších sil označených  $F_{disturb}$ . Postup výpočtu je podle literatury [5].

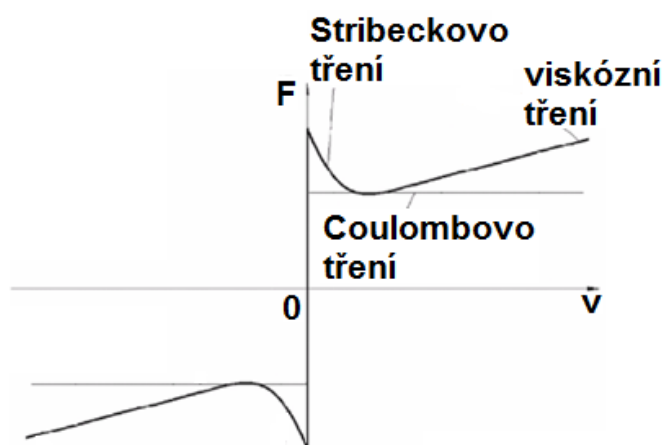
$$F_H(t) = m_c \frac{dv}{dt} + F_z(t) + F_{friction}(v) + F_{disturb}(x) \quad (2.25)$$

Blokové zapojení mechanické části lineárního motoru je uvedeno na obr. 2.3



Obr. 2-3 – Blokové zapojení mechanické části lineárního motoru

Pro modelování tření se používá celá řada modelů, které zohledňují viskózní, Stribeckův a Coulombův efekt. Třecí síla  $F_{friction}$  zohledňující výše uvedené efekty může být znázorněna pomocí obr. 2-4.



Obr. 2-4 – Viskózní, Stribeckův a Coulombův efekt modelu tření

Stribeckovo tření je znázorněno negativně skloněnou charakteristikou, která probíhá při nízkých rychlostech. Coulombovo tření respektuje konstantní sílu při jakékoliv rychlosti. Viskózní tření vyjadřuje odpor pohybu silou úměrnou rychlosti. Většinou se zanedbává aerodynamický odpor. Třecí síla v závislosti na rychlosti pohybu je potom

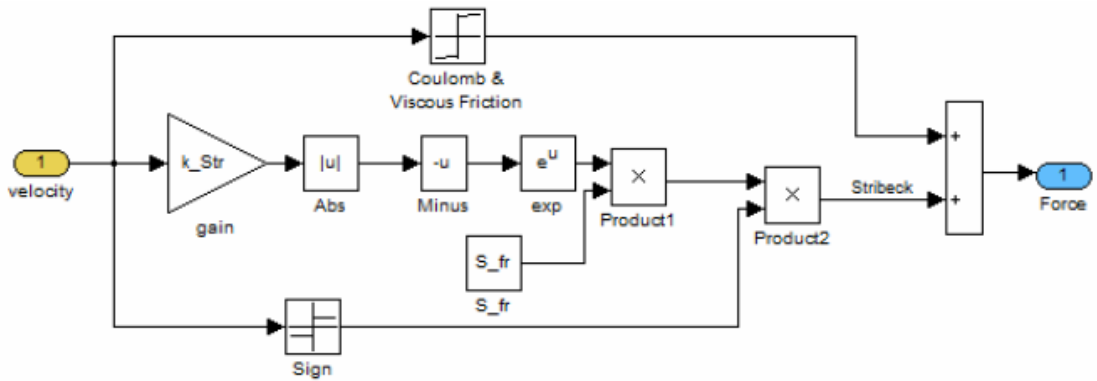
$$F_{friction}(v) = C_{fr} \text{sign}(v) + V_{fr} v + S_{fr} e^{-k|v|} \text{sign}(v) \quad (2.26)$$

Parametry modelu tření použité pro simulaci jsou uvedeny v tab. 2-2.

Tab. 2-2 Parametry modelu tření

Symbol	Hodnota	Parametr
$C_{fr}$	30 N	Coulombův koeficient
$V_{fr}$	3 N s/m	viskózní koeficient
$S_{fr}$	10 N	Stribeckův koeficient
$k$	10 s/m	Stribeckův faktor rychlosti

Simulační model tření, který reprezentuje vliv viskózního, Stribeckova a Coulombova tření je uveden na obr. 2-5



Obr. 2-5 – Simulační model tření

Síla  $F_{\text{disturb}}$  se skládá ze dvou složek:

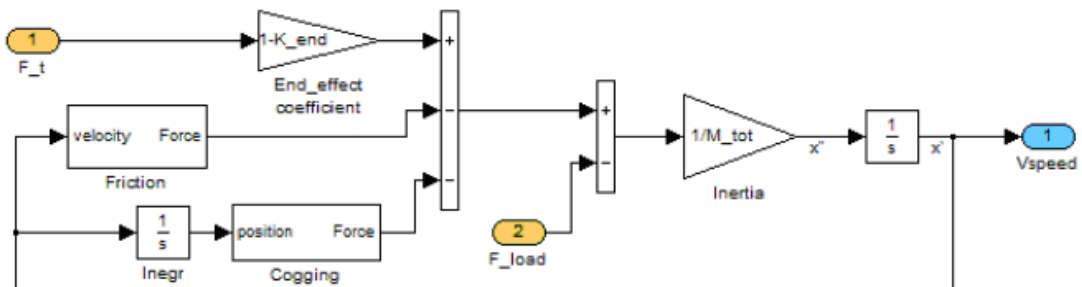
$$F_{\text{disturb}}(x) = F_{\text{cogging}}(x) + F_{\text{end\_effect}} \quad (2.27)$$

První složka ( $F_{\text{cogging}}(x)$ , síla ozubení) je způsobena interakcí mezi železnými štěrbinami stroje a permanentními magnety. Vzhledem k drážkové povaze primárního jádra je ozubená síla periodická. Tato síla závisí pouze na relativní poloze cívký motoru vzhledem k magnetům a je vždy přítomna, i když v motorových cívkách není proud. Druhá složka ( $F_{\text{end\_effect}}$ ) je zvláštní jev způsobený omezenou délkou pohybu. Obecně je obtížné popsat konečný efekt přesným matematickým modelem. Jednoduchý způsob popisu tohoto jevu je pomocí koeficientu  $K_{\text{end}}$ .

$$F_{\text{end\_effect}} = K_{\text{end}}F_T \quad (2.28)$$

Používá se hodnota  $K_{\text{end}} = 0.01$ .

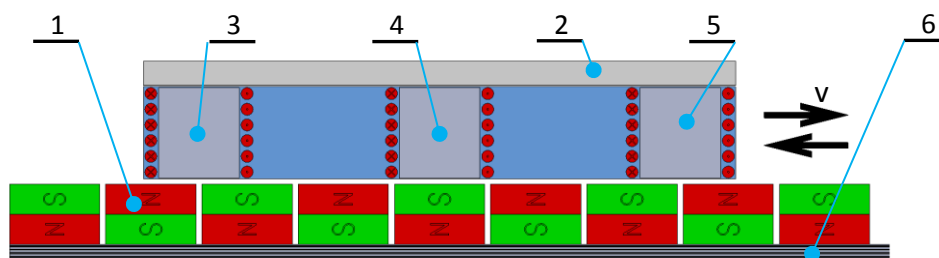
Blokový diagram dynamického modelu v Matlab Simulinku, zohledňující vliv tření, ozubení a koncového efektu je znázorněn na obr. 2-6.



Obr. 2-6 – Blokový diagram modelu zohledňující vliv tření, ozubení a koncového efektu

### 3. Model lineárního motoru ve statorových souřadnicích

Klasické konstrukční uspořádání lineárního motoru (LM) je uvedeno na obr. 3-1. Motor má pohyblivé vinutí se železem. Existují i motory s pohyblivou částí s vinutím bez železa, jak bylo popsáno v kap. 1. Pevná sekundární statická část obsahuje pole permanentních magnetů. Vzduchová mezera bývá 1 mm. Řídicí systém řídí amplitudu a kmitočet všech tří proudů pomocí PWM modulace napětí.



Obr. 3-1 – Schématické konstrukční uspořádání lineárního motoru

Legenda k obr. 3-1: 1 – Permanentní magnety (pole magnetů, sekundární statická část LM), 2 – Deska pohyblivého jezce (primární pohyblivá část LM), 3 – Vinutí fáze U, 4 – Vinutí fáze V, 5 – Vinutí fáze W, 6 – Pevná základna zkušebního zařízení (monolitická betonová deska)

Některé dále uvedené tabulky, rovnice, proměnné a bloková schémata jsou obecně platné a používané, jsou převzaté např. z [4], [7]. V tab. 3-1 je popis významu jednotlivých konstant lineárního motoru.

Tab. 3-1 Význam konstant lineárního motoru

Konstanta	Fyzikální rozměr	Popis
$K_F$	$\text{NA}^{-1}$	silová konstanta jedné cívky
$K_e$	$\text{V s/m}$	elektrická konstanta jedné cívky
$m_p$	kg	hmotnost pohyblivé primární části
$R$	$\Omega$	odpor jedné cívky motoru
$L$	H	indukčnost jedné cívky motoru

Cívky motoru jsou zapojeny do hvězdy a jsou napájeny třemi harmonickými napětími

$$u_{extA} = U_0 \cos(\psi) \quad (3.1)$$

$$u_{extB} = U_0 \cos\left(\psi + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3.2)$$

$$u_{extC} = U_0 \cos\left(\psi + \frac{4}{3}\pi\right) \quad (3.3)$$

kde  $\psi$  je posunutí výsledného magnetického toku vůči permanentním magnetům.

Napěťové rovnice na jednotlivých cívkách lineárního motoru jsou v tomto případě následující

$$u_A = u_{EA} + R i_A + L \frac{di_A}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_B = u_{EB} + R i_B + L \frac{di_B}{dt} \quad (3.5)$$

$$u_C = u_{EC} + R i_C + L \frac{di_C}{dt} \quad (3.6)$$

kde  $u_{EA}, u_{EB}, u_{EC}$  jsou vnitřní indukovaná napětí na cívkách,  
 $i_A, i_B, i_C$  jsou proudy v cívkách mezi svorkami A, B, C.

Poznamenejme, že při výpočtu nebudeme uvažovat vliv vzájemných indukčností. Toto zanedbání je oprávněné hlavně při malých rychlostech.

Pro vnitřní indukovaná napětí platí

$$u_{EA} = K_e v \sin(\varphi) \quad (3.7)$$

$$u_{EB} = K_e v \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3.8)$$

$$u_{EC} = K_e v \sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \quad (3.9)$$

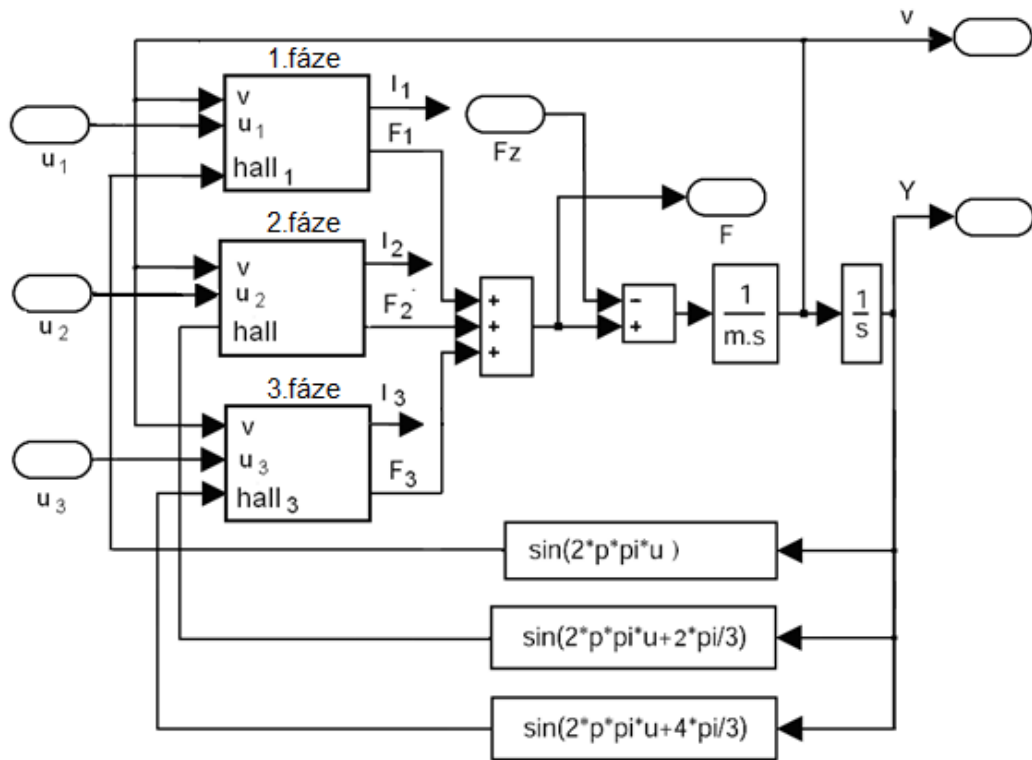
kde  $K_e$  je elektrická konstanta motoru,  
 $v$  je rychlost posuvu motoru,  
 $\varphi$  je elektrický úhel, který se vypočte pomocí vztahu (2.6) v odst. 2.1

Pro výslednou sílu motoru platí

$$F = K_F \left( I_A \sin(\varphi) + I_B \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) + I_C \sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) \right) \quad (3.10)$$

Elektrický úhel  $\varphi$  se měří u lineárních motorů pomocí komutačního snímače (Hallová sonda), který identifikuje polohu cívek vůči pólům permanentních magnetů.

Blokové zapojení modelu lineárního motoru ve statorových souřadnicích je uvedeno na obr. 3-2.

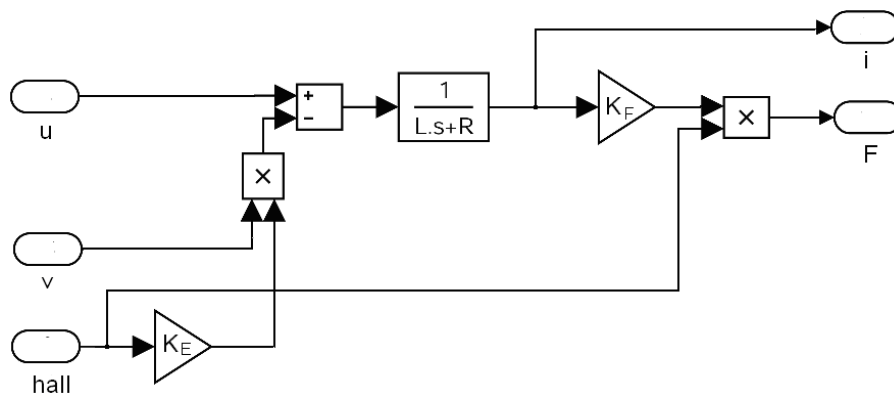


Obr. 3-2 – Blokové zapojení modelu lineárního motoru ve statorových souřadnicích

Blokové zapojení vinutí fáze U motoru je uvedeno na obr. 3-3. V blokovém zapojení vinutí fáze V je signál Hallovy sondy následující

$$Hall_V = \sin\left(2\pi p_1 u + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (3.11)$$

kde  $p_1$  je počet pólpárů vztažených na 1 m.



Obr. 3-3 – Blokové zapojení jedné fáze lineárního motoru



V následující tab. 3-2 jsou uvedeny katalogové hodnoty lineárního motoru fy VUES dostupné v [7] resp. [8].

Tab. 3-2 Katalogové a přepočtené hodnoty motoru VUES LNS100P-1214-FL

Parametr	Hodnota	Jednotka	Poznámka
$F_{peak}$	1280	N	síla, kterou motor dokáže vyvinout při krátkodobém zatížení do 1 s
$I_{peak}$	27,4	A	efektivní proud, který protéká jednou fází motoru při krátkodobě maximální síle $F_{peak}$
$F_1$	320	N	maximální síla celého motoru, kterou motor dokáže trvale působit
$I_1$	6.8	A	efektivní proud, který protéká jednou fází motoru při trvalé maximální síle $F_1$
$R_{U-V}$	4.298	$\Omega$	odpor vinutí mezi svorkami U a V, tedy odpor jedné fáze – dvou sad cívek
$L_{U-V}$	2.7	mH	indukčnost vinutí mezi svorkami U a V, tedy indukčnost jedné fáze – dvou sad cívek
$k_F$	46.8	$N A^{-1}$	silová konstanta celého motoru vztaženo na efektivní proud jedné fáze
$k_E$	27.0	$V s m^{-1}$	elektrická konstanta motoru vztažená na jednu fází v efektivní hodnotě generovaného napětí
$K_{Fp}$	22.06	$N A^{-1}$	přepočtená silová konstanta na jednu cívku pro amplitudový proud
$K_{Ep}$	25.46	$V s m^{-1}$	přepočtená elektrická konstanta na jednu cívku pro amplitudové napětí
$k_d$	56	$N s m^{-1}$	konstanta třecích sil pojezdu motoru

Přepočet silové konstanty  $K_{Fp}$  odpovídající síle jedné cívky při proudu 1A se provede podle vzorce

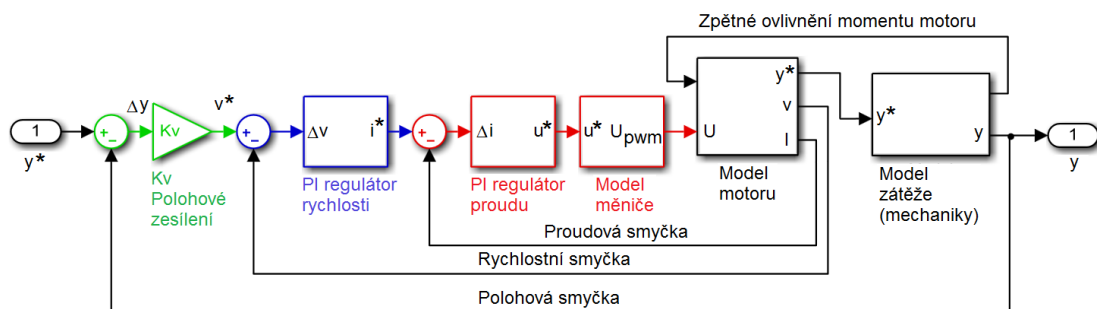
$$K_{Fp} = k_F \frac{2}{3\sqrt{2}} \quad (3.12)$$

Přepočet elektrické konstanty  $K_{Ep}$  odpovídající napětí generovanému jednou cívkou při jednotkové rychlosti posuvu motoru se provede podle vzorce

$$K_{Ep} = k_E \frac{2\sqrt{2}}{3} \quad (3.13)$$

## 4. Výpočet parametrů regulační struktury pohonu s jednohmotovou zátěží

Syntéza regulátoru spočívá v návrhu struktury regulátoru a stanovení optimálních parametrů jednotlivých regulátorů. K získání optimálního nastavení regulátorů je využívána řada postupů a metod. Mezi tyto techniky návrhu patří metoda geometrického místa kořenů (GMK), optimálního modulu (OM) nebo symetrického optima (SO). V současné době je většina řídicích systémů pohonů vybavena funkcí „autotuning“ a parametry nastavené pomocí této funkce v praxi většinou vyhovují. Použitá regulační struktura pohonu s lineárním motorem je uvedena například v [10] a je zobrazena na obr. 4-1



Obr. 4-1 – Použitá regulační struktura rychlostní a proudové smyčky

Zátěž je uvažována jednohmotová a dvojhmotová. V případě dvojhmotové zátěže dochází na výstupu mechanismu k parazitním kmitům. Podrobnější analýza je uvedena v kap. 6. Potlačení těchto kmitů je věnována kap. 9.

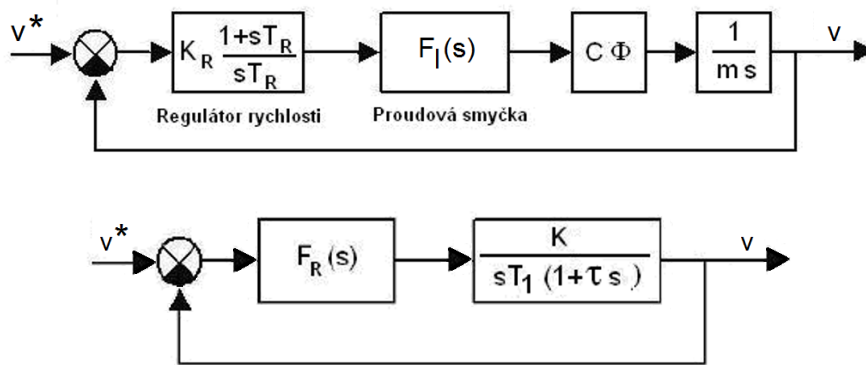
### 4.1. Výpočet parametrů rychlostního regulátoru pomocí metody symetrického optima

Blokové zapojení regulační struktury rychlostní smyčky je uvedeno na obr. 4.2. Pro stanovení optimálních parametrů bude použita metoda symetrického optima (SO). Postup výpočtu je proveden podle [9]. Tato metoda vychází z přenosu uzavřené smyčky třetího řádu. Standardní tvar přenosu otevřené smyčky podle metody symetrického optima je

$$F_0(s) = \frac{1+4s\tau_\sigma}{8s^2\tau_\sigma^2(1+s\tau_\sigma)} \quad (4.1)$$

Pro výpočet přenosové funkce regulátoru metodou SO tedy platí

$$F_R(s) = \frac{1}{F_0(s)} \frac{1+4s\tau_\sigma}{8s^2\tau_\sigma^2(1+s\tau_\sigma)} \quad (4.2)$$



Obr. 4-2 – Blokové zapojení regulační struktury rychlostní smyčky

Uvažujeme přenosovou funkci proudového regulátoru

$$F_i(s) = \frac{1}{1+0.00036s} = \frac{1}{1+\tau s} \quad (4.3)$$

Přenosová funkce regulované soustavy je potom

$$F_s(s) = \frac{K}{sT_1(1+s\tau)} \quad (4.4)$$

Pro výpočet budou použity parametry uvedené v kapitole 12

$$K = C\Phi = 2.33 \quad (4.5)$$

$$T_1 = m_1 = 1.55 \text{ kg} \quad (4.6)$$

$$\tau = 0.36 \text{ ms} \quad (4.7)$$

Jedná se o soustavu obsahující jednu malou časovou konstantu  $\tau$  a jeden integrátor. Poznamenejme, že metoda (SO) je vhodná pro soustavy, kde platí  $T_1 > 4\tau$  a kde  $\tau$  je malá časová konstanta soustavy.

Přenosová funkce vhodného regulátoru vypočtená pomocí metody SO je

$$F_R(s) = \frac{1}{F_s(s)} \frac{1+4s\tau_\sigma}{8s^2\tau_\sigma^2(1+s\tau_\sigma)} = \frac{T_1s(1+s4\tau_\sigma)}{8s\tau_\sigma^2K} = K_R \frac{1+sT_R}{sT_R} \quad (4.8)$$

Optimální regulátor podle KSO je regulátor PI, kde

$$K_R = \frac{T_1}{2K\tau_\sigma} \quad T_R = 4\tau_\sigma \quad (4.9, 4.10)$$

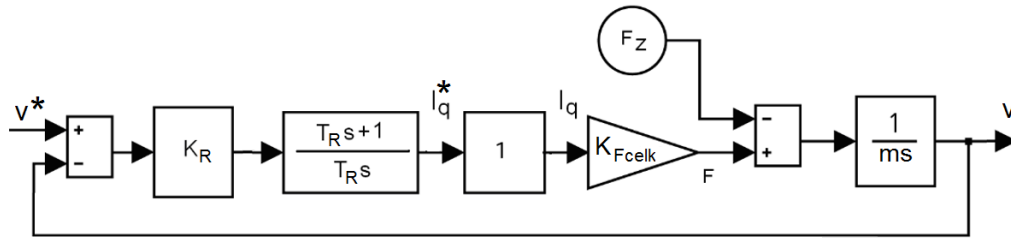
$$T_R = 4\tau_\sigma = 1.44 \text{ ms} \quad (4.11)$$

$$K_R = \frac{T_1}{2K\tau_\sigma} = 905 \quad (4.12)$$

Pro syntézu polohové smyčky potřebujeme přenos uzavřené rychlostní smyčky. Tento přenos po vhodném zjednodušení je následující

$$F_W(s) = \frac{1+4s\tau_\sigma}{1+4s\tau_\sigma+8s^2\tau_\sigma^2+8s^3\tau_\sigma^3} \approx \frac{1}{1+4\tau_\sigma s} = \frac{1}{1+0.0014s} \quad (4.13)$$

Zjednodušený model lineárního motoru s jednohmotovou zátěží a rychlostní smyčkou je uveden na obr. 4-3



Obr. 4-3 – Zjednodušený model pohonu s lineárním motorem

## 5. Výpočet parametrů polohového regulátoru pomocí metody optimálního modulu (OM)

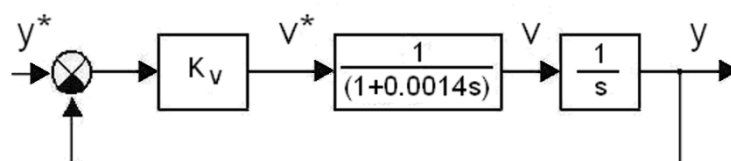
Pro stanovení optimálních parametrů bude použita metoda optimálního modulu (OM). Postup výpočtu je proveden opět podle [9]. Tato metoda vychází z požadavku, aby průběh modulu (absolutní hodnota přenosu) uzavřené smyčky byl v co největším pásmu kmitočtů roven jedné. Standardní tvar přenosu otevřené smyčky podle metody OM je

$$F_0(s) = \frac{1}{2\tau_\sigma s(1+\tau_\sigma s)} \quad (5.1)$$

Ze vztahu (5.1) je možné požadovaný přenos regulátoru  $F_R(s)$  odvodit následovně

$$F_R(s) = \frac{1}{F_S(s)} \frac{1}{2s\tau_\sigma(1+s\tau_\sigma)} \quad (5.2)$$

Na následujícím obrázku je znázorněno blokové zapojení regulační struktury polohové smyčky lineárního pohonu.



Obr. 5-1 – Blokové zapojení regulační struktury polohové smyčky

Přenosová funkce regulované soustavy je v našem případě

$$F_S(s) = \frac{1}{s(1+s\tau)} \quad (5.3)$$

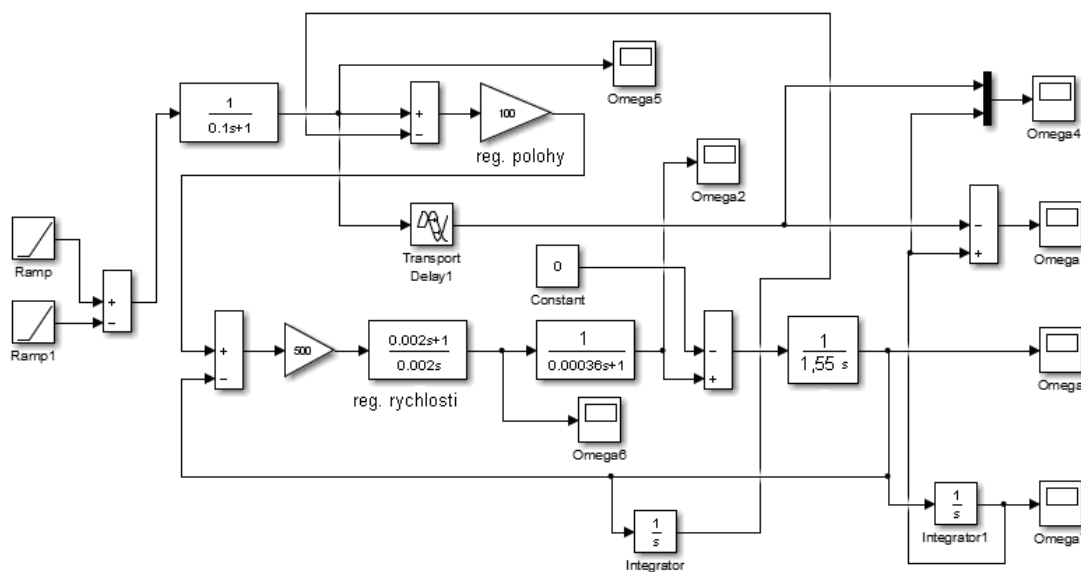
Jedná se o soustavu obsahující jednu malou časovou konstantu  $\tau$  a jeden integrátor. Přenosová funkce vhodného regulátoru vypočtená pomocí metody OM je

$$F_R(s) = \frac{1}{F_S(s)} \frac{1}{2s\tau_\sigma(1+s\tau_\sigma)} = \frac{1}{2\tau_\sigma} = \frac{1}{2 \cdot 0.0014} = 350 \quad (5.4)$$

V tomto případě se jedná o regulátor typu P. Optimální hodnota zesílení polohového regulátoru pro naši aplikaci je  $K_v = 350$ .

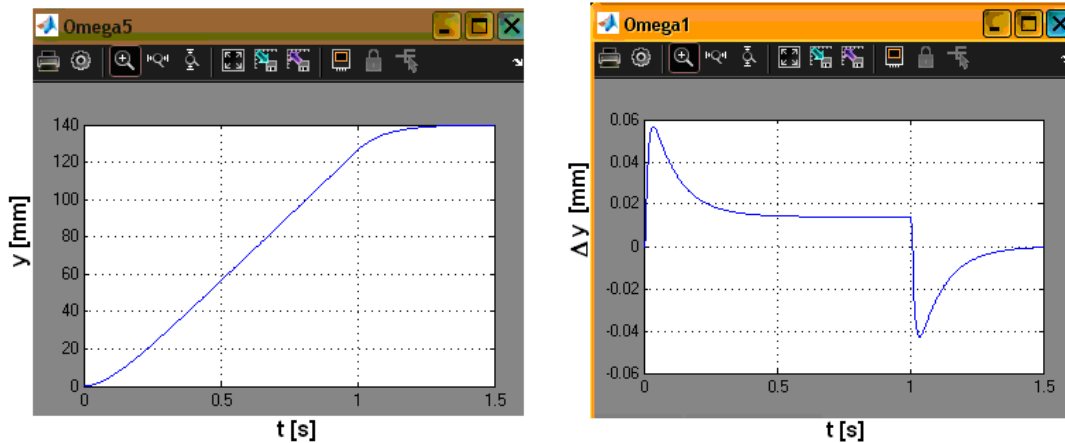
### 5.1. Zjednodušený simulační model regulační struktury pohonu s jednohmotovou zátěží

Na základě uvedeného zjednodušeného modelu lineárního pohonu byl navržen simulační model v prostředí Matlab Simulink. V modelu jsou použity parametry vypočtené v této kapitole. Simulační model pohonu s lineárním motorem a jednohmotovou zátěží je uveden na obr. 5-3.

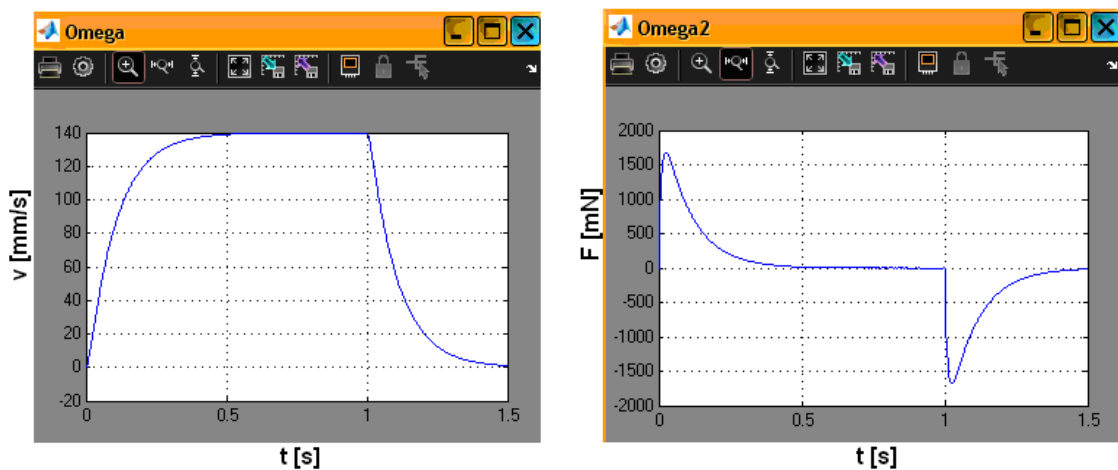


Obr. 5-3 – Simulační model lineárního pohonu s jednohmotovou zátěží

Výsledky simulací, zdvihová křivka a rychlosti spolu s průběhem dynamické chyby jsou uvedeny na obr. 5-4 a 5-5. Porovnání výsledků získaných simulací a měřením je uvedeno v kapitole 12.2.



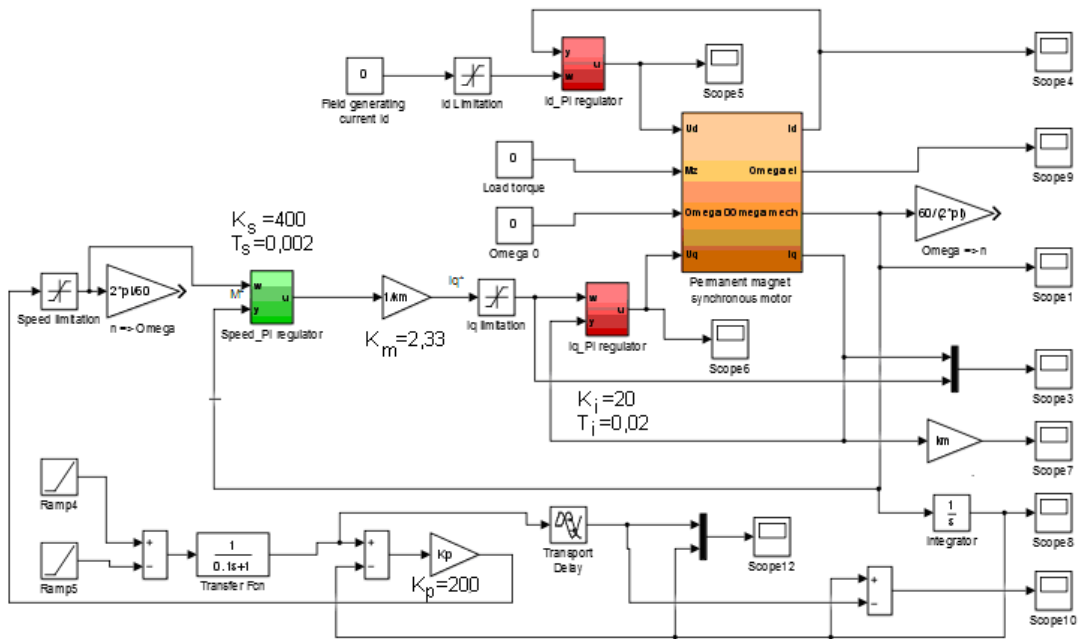
Obr. 5-4 – Výsledky simulace, zdvihová křivka (vlevo), dynamická chyba (vpravo)



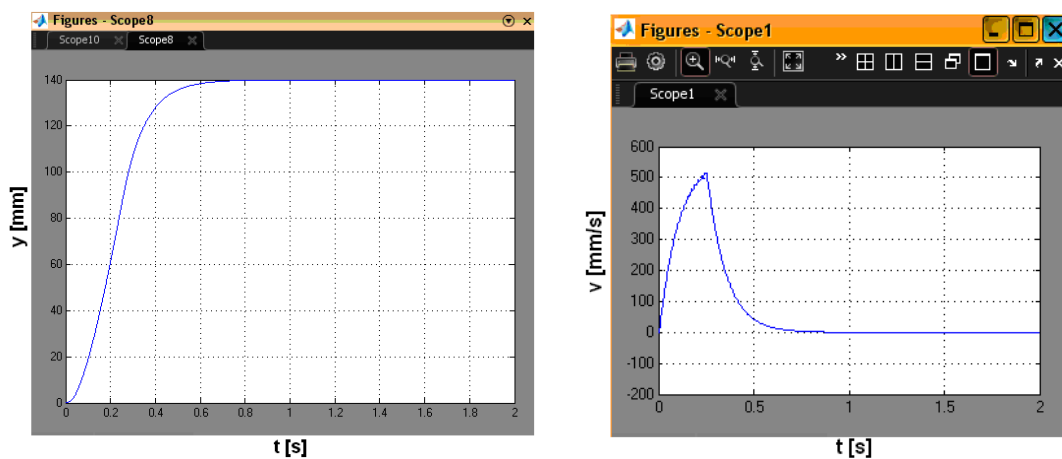
Obr. 5-5 – Výsledky simulace, průběh rychlosti (vlevo), průběh hnací síly (vpravo)

## 5.2. Simulační model regulační struktury pohonu s d-q modelem motoru a s jednodřmotovou zátěží

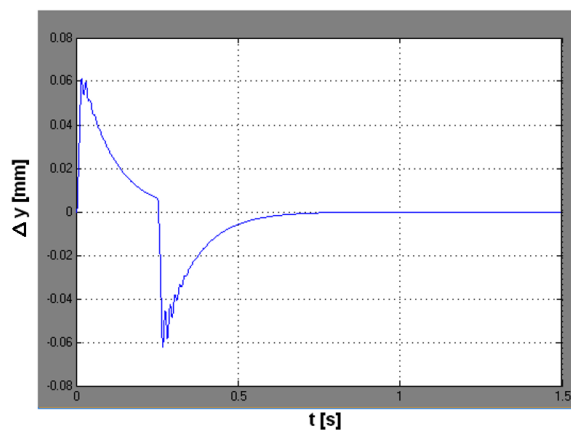
Na obr. 5-6 je simulační model pohonu s lineárním motorem v d-q souřadnicích včetně polohového, rychlostního a proudového regulátoru (červené a zelené bloky). Model pohonu zohledňuje vektorová řízení pohonu. Obr. 5-7 zobrazuje výsledky simulace, a sice zdvihovou křivku spolu s rychlostí. Na obr. 5-8 jsou výsledky simulace průběhu dynamické chyby.



Obr. 5-6 – Simulační model pohonu s jednohmotovou zátěží



Obr. 5-7 – Výsledky simulace, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo)



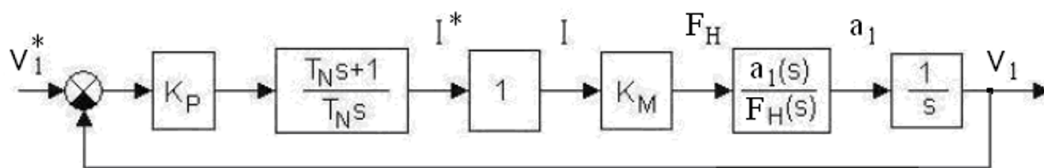
Obr. 5-8 – Výsledky simulace, průběh dynamické chyby

## 6. Syntéza regulační struktury soustavy s dvojhmotovou zátěží

U jednohmotové zátěže lze redukovat zátěž na pohyblivou část lineárního motoru. U dvojhmotové zátěže je situace složitější a s tím souvisí i složitější výpočet optimálních parametrů jednotlivých regulátorů. Pro stanovení těchto parametrů bude použita metoda geometrického místa kořenů. Poznamenejme, že v případě dvojhmotové zátěže dochází na koncovém členu mechanismu k parazitním kmitům. Podrobnější analýza je uvedena v kapitole 8.

### 6.1. Výpočet parametrů rychlostního regulátoru pohonu s dvojhmotovou zátěží

Přenos otevřené a uzavřené rychlostní smyčky určíme pomocí blokového zapojení uvedeného na obr. 6-1. Proudová smyčka je většinou rychlá a proto budeme její přenos považovat za dokonale proporcionální  $F_1(s) = 1$ . Pro syntézu bude použita metoda uvedená v literatuře [6].



Obr. 6-1 – Blokové schéma rychlostní smyčky

Zavedeme celkové zesílení

$$K_R = \frac{K_P K_M}{T_N m_c} \quad (6.1)$$

Vlastní kmitočet zátěže  $\Omega_L$  a vlastní kmitočet celé dvojhmotové soustavy  $\Omega_{LM}$  jsou

$$\Omega_L = \sqrt{\frac{c}{m_2}}, \quad \Omega_{LM} = \sqrt{\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2}} \quad (6.2,6.3)$$

V kapitole 8 je odvozen přenos mezi zrychlením motoru a hnací silou

$$\frac{a_1}{F_H} = \frac{\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1}{m_c \left( \frac{s^2}{\Omega_{LM}^2} + 1 \right)} \quad (6.4)$$

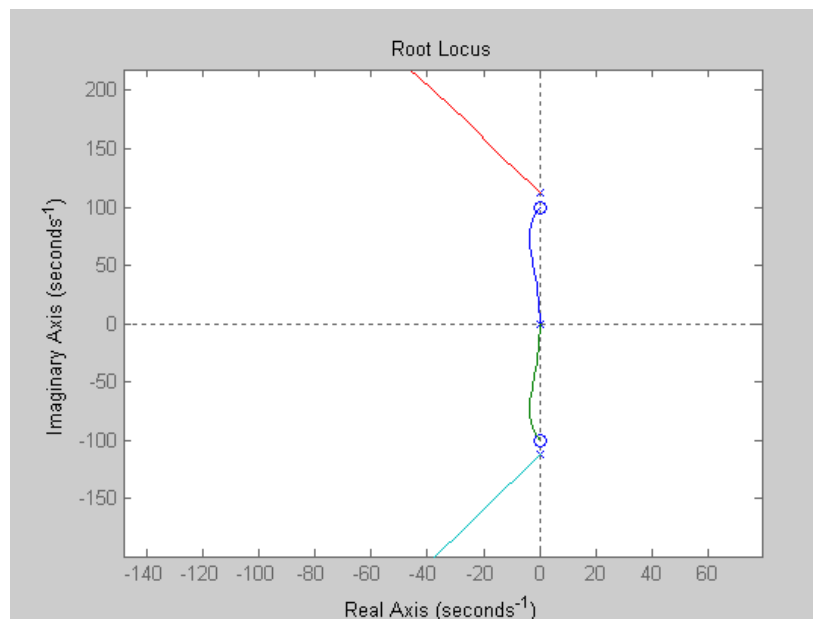


Přenosová funkce otevřené rychlostní regulační smyčky pro netlumený systém ( $b = 0$ ) je

$$\frac{\omega_1}{\omega_1^*} = \frac{K_P K_M (1+T_N s) \left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1\right)}{m_C T_N s^2 \left(\frac{s^2}{\Omega_{LM}^2} + 1\right)} \quad (6.5)$$

$$F_0 = \frac{K_P K_M (1+T_N s) \left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1\right)}{m_C T_N s^2 \left(\frac{s^2}{\Omega_{LM}^2} + 1\right)} \quad (6.6)$$

Otevřená rychlostní smyčka má v tomto případě 4 póly a 3 nuly. Průběh geometrického místa kořenů v závislosti na rychlostní konstantě ( $K_P$ ) je uveden na obr. 6-2.



Obr. 6-2 – Geometrické místo kořenů (GMK) přenosu otevřené rychlostní regulační smyčky

Poloha nul a pólů uzavřené rychlostní smyčky určuje průběh přechodových dějů v regulačním obvodu a rozhoduje o stabilitě navržené regulační struktury. Optimální parametry rychlostní smyčky určené pomocí GMK mají takovou hodnotu, při které budou dominantní póly uzavřené rychlostní smyčky maximálně vzdálené od imaginární osy. Optimální parametry získané pomocí GMK jsou následující:

$$K_R = 10000, T_N = 0.002 \text{ s}, m_C = 2 \text{ kg}$$

$$K_P = \frac{K_R T_N m_C}{K_M} = \frac{10000 \cdot 0.002 \cdot 2}{2.8} = 14.2 \quad (6.7)$$

Přenosová funkce uzavřené rychlostní regulační smyčky je

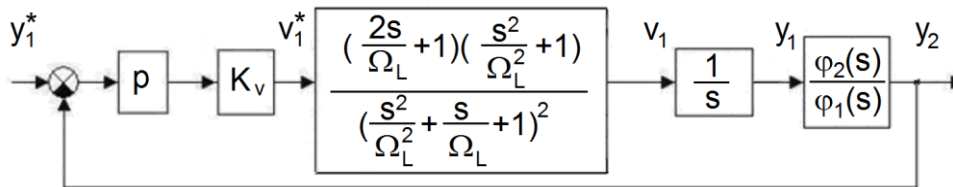
$$\frac{v_1(s)}{v_1^*(s)} = \frac{1}{1 + \frac{m_C}{K_P K_M} \frac{T_N s^2}{T_N s + 1} \frac{1 + \frac{s^2}{\Omega_{LM}^2}}{1 + \frac{s^2}{\Omega_L^2}}} \quad (6.8)$$

Přenosovou funkci uzavřené rychlostní smyčky můžeme zjednodušit pomocí postupu uvedeného v [6] a dostáváme

$$\frac{v_1}{v_1^*} = \frac{\left(\frac{2s}{\Omega_L} + 1\right) \left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1\right)}{\left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + \frac{s}{\Omega_L} + 1\right)^2} \quad (6.9)$$

## 6.2. Výpočet parametrů polohového regulátoru pohonu s dvojhmotovou zátěží

V našem případě je lineární pohon vybaven snímačem polohy. Jedná se tedy o polohovou smyčku s přímým odměřováním. Blokové zapojení je uvedeno na obr. 6-3.



Obr. 6-3 – Blokové zapojení polohové smyčky s přímým odměřováním

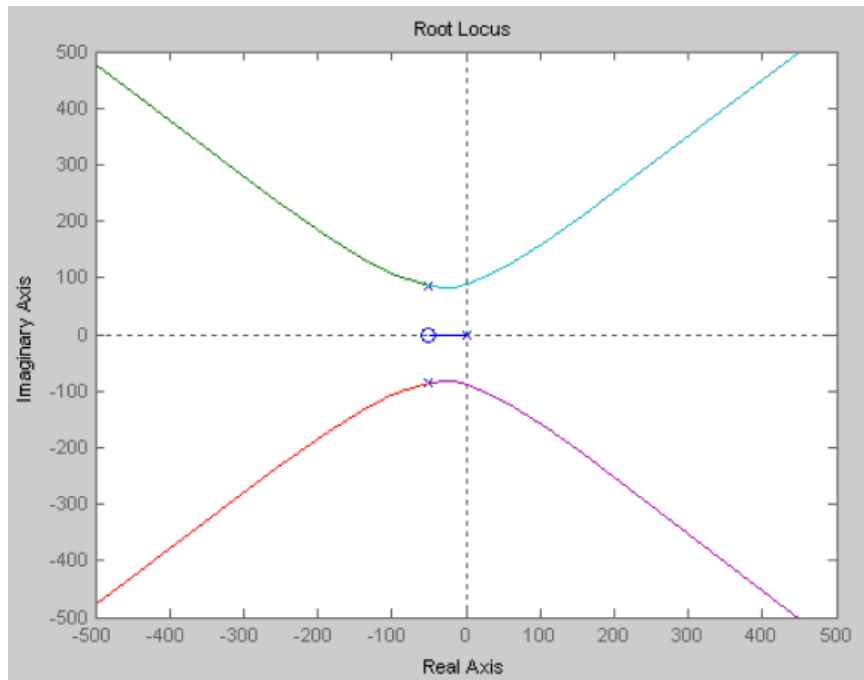
V kapitole 8 je odvozen přenos  $\frac{y_2(s)}{y_1(s)}$

$$\frac{y_2(s)}{y_1(s)} = \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1\right)} \quad (6.10)$$

Přenosová funkce otevřené polohové smyčky pro netlumený systém je potom

$$F_0(s) = K_V \frac{\frac{2s}{\Omega_L} + 1}{s \left(\frac{s^2}{\Omega_L^2} + \frac{s}{\Omega_L} + 1\right)^2} \quad (6.11)$$

Přenosová funkce má 5 pólů a 1 nulu. Průběh GMK v závislosti na konstantě  $K_V$  je uveden na obr. 6-4.

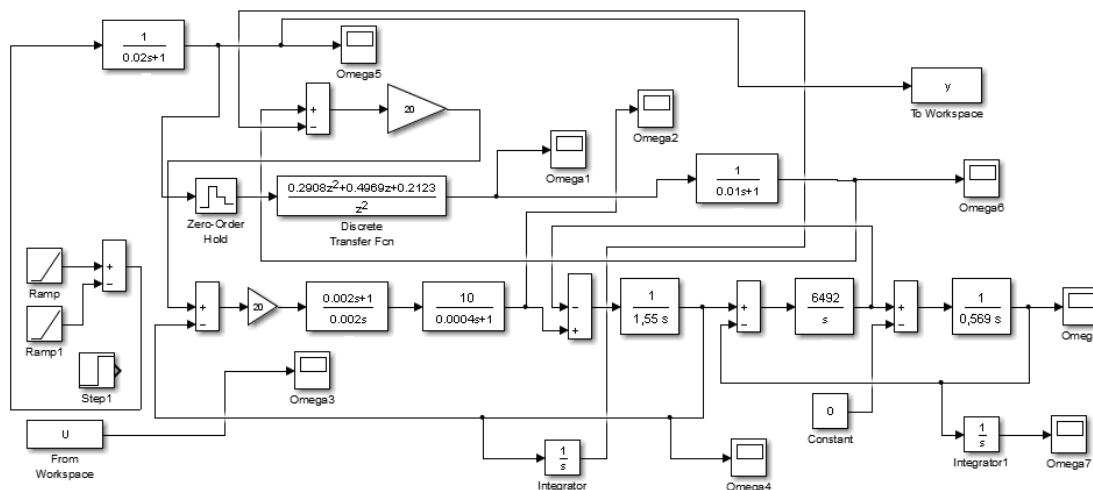


Obr. 6-4 – Průběh GMK otevřené polohové smyčky

Optimální nastavení je pro takovou hodnotu  $K_V$ , při které budou dominantní póly uzavřené polohové smyčky maximálně vzdálené od imaginární osy. Optimální hodnota zesílení polohového regulátoru je v našem případě  $K_V = 10$ .

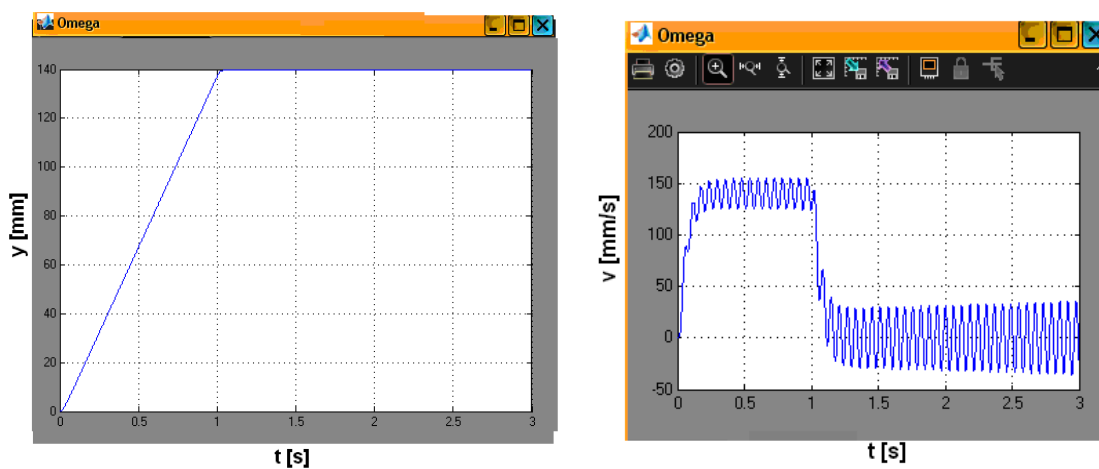
#### 6.2.1. Zjednodušený simulační model regulační struktury pohonu s dvojhmotovou soustavou

Zjednodušený simulační model regulační struktury s dvojhmotovou zátěží v prostředí Matlab Simulink je uveden na obr. 6-5. Pro simulační model je použit zjednodušený model lineárního motoru. Zdvihová křivka má v tomto případě lineární průběh.

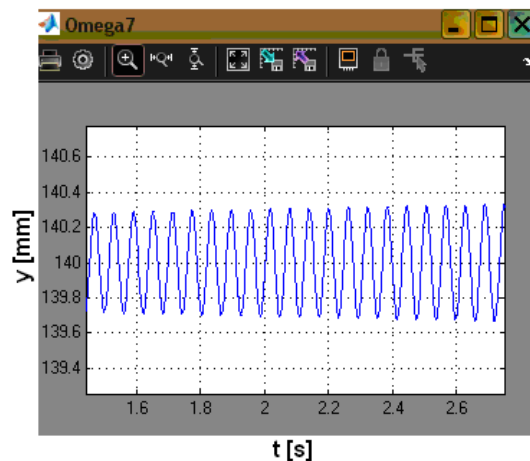
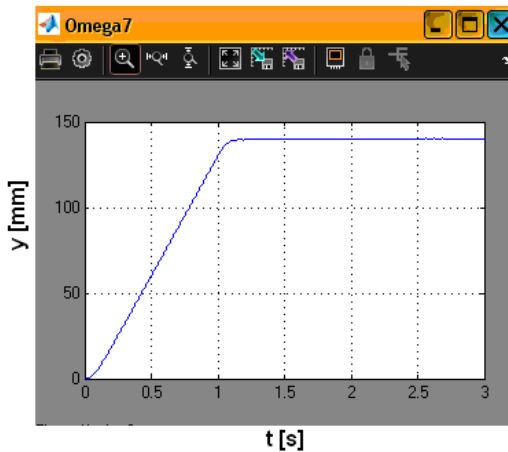


Obr. 6-5 – Simulační schéma pohonu s dvojhmotovou soustavou

Výsledky simulace bez použití kompenzace parazitních kmitů jsou uvedeny na obr. 6-6 a 6-7. Porovnání výsledků získaných simulací a měření je uvedeno v kapitole 12.



Obr. 6-6 – Výsledky simulace bez použití kompenzace parazitních kmitů, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo)



Obr. 6-7 – Výsledky simulace bez použití kompenzace parazitních kmitů, průběh zdvihu zátěže (vlevo), zvětšený detail průběhu zdvihu v ustáleném stavu (vpravo)

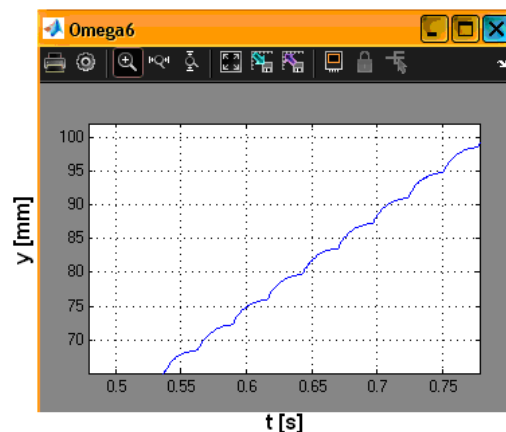
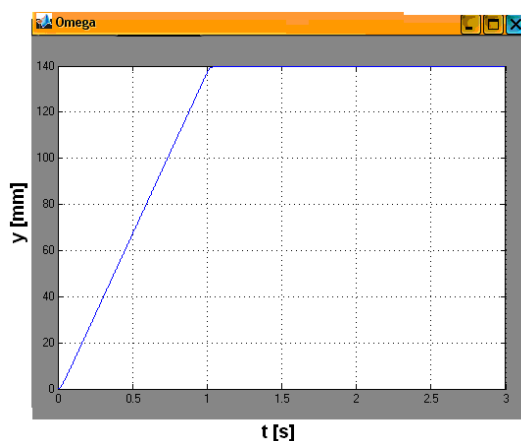
Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů pomocí metody „Input Shaping“ jsou uvedeny na obr. 6-8, 6-9 a 6-10. Při kompenzaci je použit číslicový filtr

$$H(z) = \frac{0.2908z^2 + 0.4969z + 0.2123}{z^2} \quad (6.12)$$

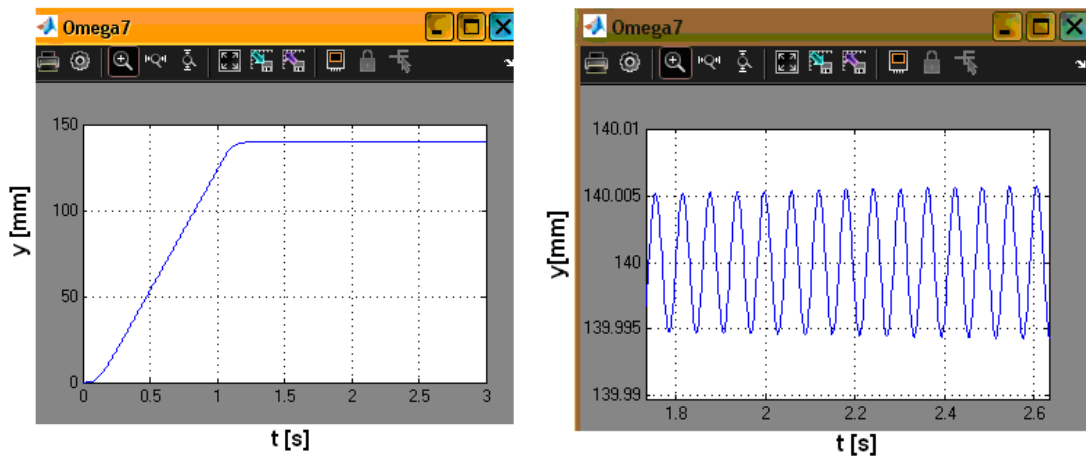
Protože systém YASKAWA je citlivý na rychlé změny zrychlení, ke kterým dochází při použití klasické metody „Input Shaping“, byla v rámci disertační práce navržena modifikace metody „Input Shaping“ spočívající v použití dodatečné úpravy průběhu zdvihové křivky. Je použit korekční filtr s přenosovou funkcí realizující integrační člen se zpožděním 1. řádu, který upravuje průběh zrychlení tak, aby se řídicí systém YASKAWA nedostával do chybového stavu. Použitá přenosová funkce tohoto korekčního filtru je

$$F(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (6.13)$$

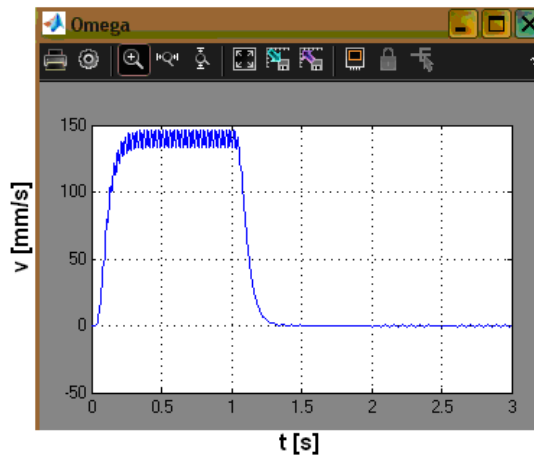
Časová konstanta (koeficient  $\tau$ ) je volena podle přípustného zrychlení pohonu (systému YASKAWA). V našem případě byla zvolena hodnota  $\tau = 0.01$  s. Z obrázků je patrné podstatné snížení parazitních kmitů.



Obr. 6-8 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, zdvihová křivka (vlevo), detail modifikované zdvihové křivky (vpravo)



Obr. 6-9 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, průběh zdvihu zátěže (vlevo), zvětšený detail průběhu zdvihu v ustáleném stavu (vpravo)



Obr. 6-10 – Výsledky simulace při použití kompenzace parazitních kmitů, průběh rychlosti

Z průběhu relativního zdvihu odpružené hmoty (obr. 6-7) bez použití kompenzace parazitních kmitů je možno odečíst amplitudu reziduálních kmitů v ustáleném stavu ( $\approx 0.3$  mm). Z průběhu relativního zdvihu odpružené hmoty (obr. 6-9) při použití kompenzace metodou „Input Shaping“ je možno odečíst amplitudu kmitů v ustáleném stavu ( $\approx 0.005$  mm). Amplitudu reziduálních kmitů je tedy možno pomocí navržené metody snížit cca o dva řády.

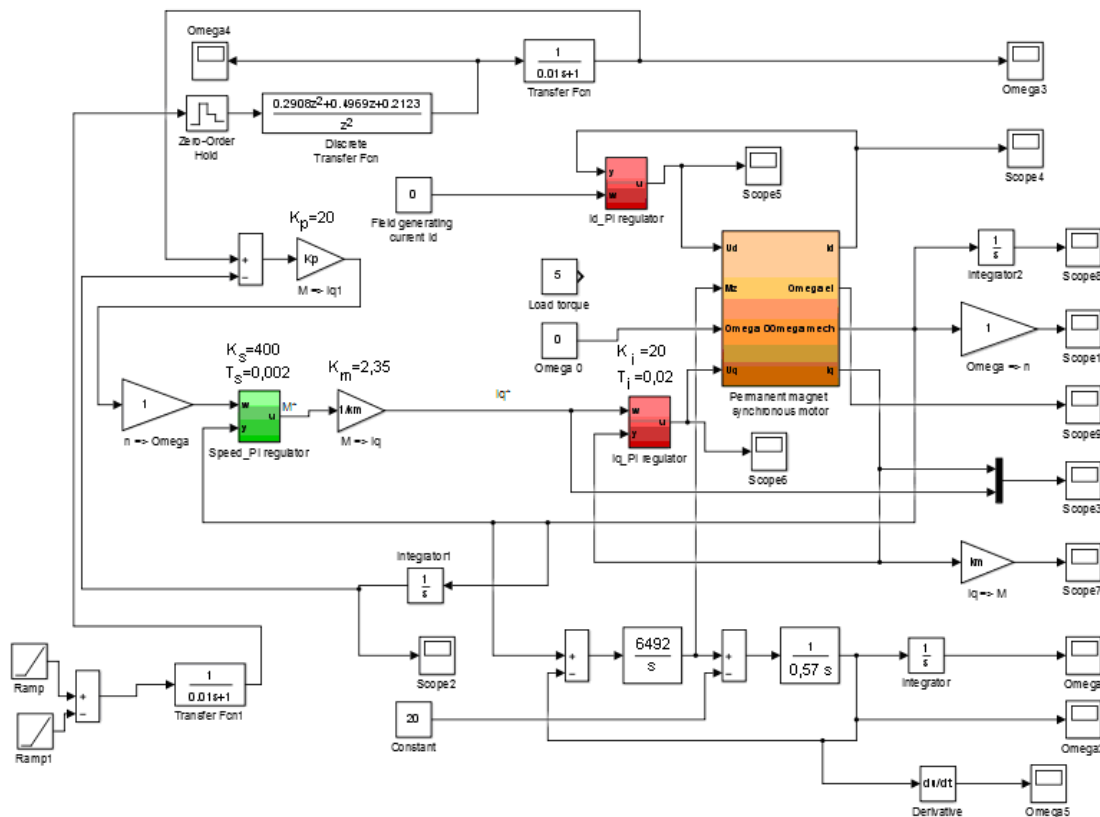
## 7. Simulační model regulační struktury pohonu s d-q modelem motoru a s dvojhmotovou zátěží

Na obr. 7-1 je simulační schéma pohonu s lineárním motorem a s dvojhmotovou zátěží v programu Matlab Simulink. Pro simulační model je použit d-q model lineárního motoru. Model pohonu i v tomto případě zohledňuje vektorové řízení pohonu. Zdvihová křivka má v tomto případě opět lineární průběh. Pro kompenzaci je použit číslicový filtr se vzorkovací periodou  $T_V = 0.025$  s.

$$H(z) = \frac{z^2 + 2Kz + K^2}{z^2(1 + 2K + K^2)} = \frac{0.2908z^2 + 0.4969z + 0.2123}{z^2} \quad (7.1)$$

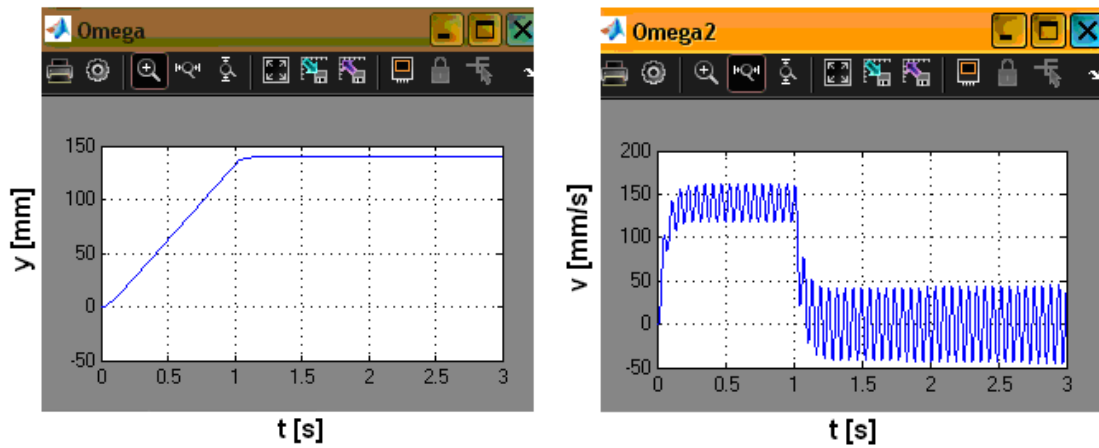
Dodatečný analogový tvarovací filtr má přenosovou funkci

$$F(s) = \frac{1}{1 + 0.01s} \quad (7.2)$$

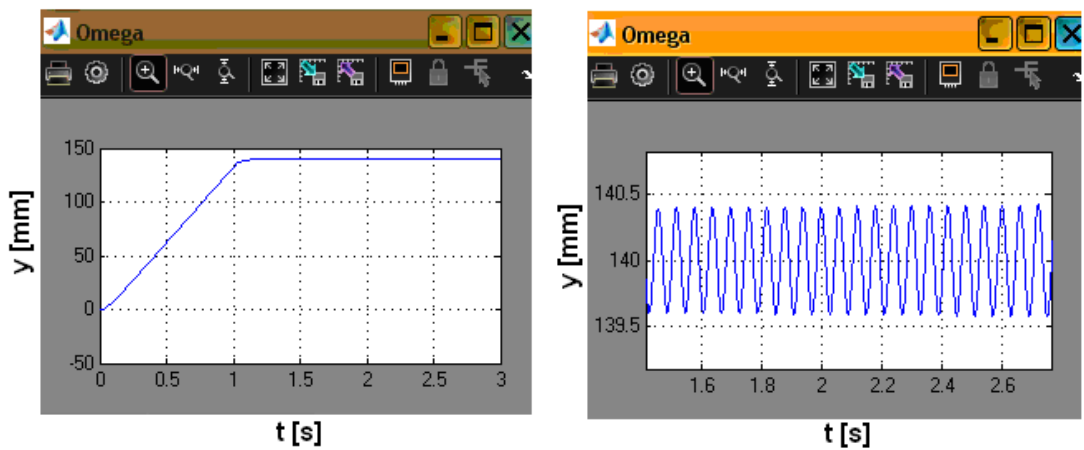


Obr. 7-1 – Simulační schéma pohonu s dvojhmotovou zátěží

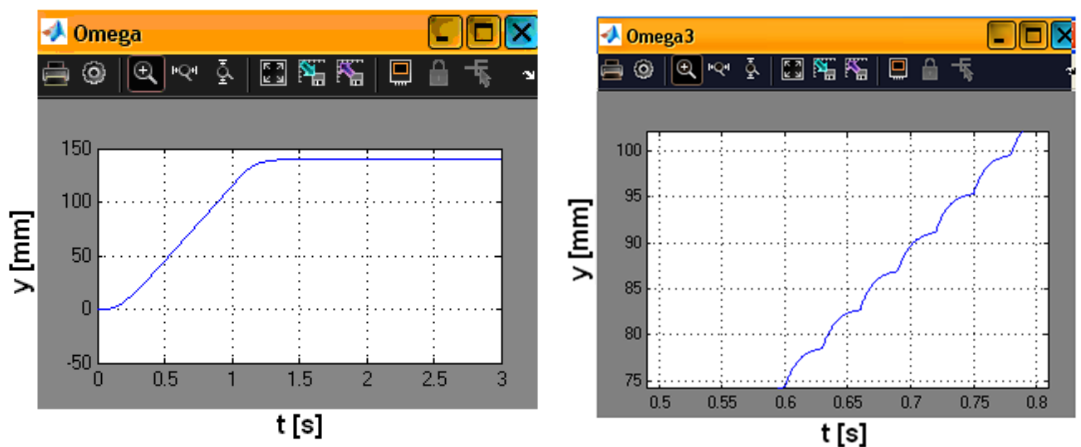
Výsledky simulačního ověření je uvedeno na grafech (obr. 7-2 až 7-5).



Obr. 7-2 Grafy průběhů veličin, výsledky simulace bez použití kompenzace, zdvihová křivka (vlevo), rychlost (vpravo)

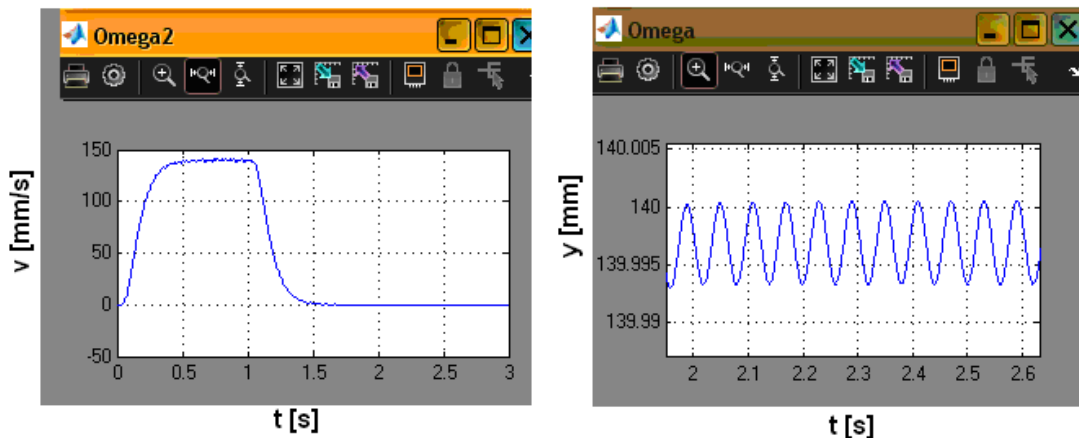


Obr. 7-3 Grafy průběhů veličin, výsledky simulace bez použití kompenzace, zdvih zátěže (vlevo), zvětšený průběh zdvihu na zátěži v ustáleném stavu (vpravo)



Obr. 7-4 Výsledky simulace při použití kompenzace dvojhmotové zátěže, zdvihová křivka (vlevo), zdvihová křivka modifikovaná (vpravo)





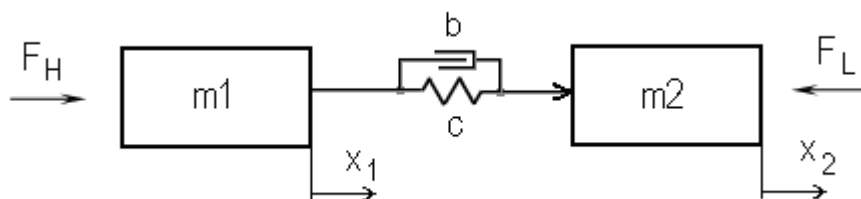
Obr. 7-5 Výsledky simulace při použití kompenzace dvojhmotové zátěže, rychlost (vlevo), zvětšený průběh zdvihu na zátěži v ustáleném stavu (vpravo)

Na grafech (obr. 7-2 a 7-3) jsou průběhy získané simulací bez použití korekce. Na zvětšenině grafu (obr. 7-3 vpravo) je možno odečíst amplitudu reziduálních kmitů, která je cca  $\pm 0.4$  mm.

Na obr. 7-4 a 7-5 jsou výsledky simulace s použitím kompenzace pomocí metody „Input Shaping“. Na obr. 7-5 vpravo je možno odečíst amplitudu reziduálních kmitů při použití kompenzace  $\pm 0.005$  mm. Při porovnání jednotlivých průběhů a zhodnocení výsledků simulace bez použití korekce a s použitím korekce „Input Shaping“ vyplývá závěr, že použitím metody „Input Shaping“ je možno potlačit amplitudu vibrací na koncovém členu dvojhmotové soustavy až cca 100x.

## 8. Matematický model dvojhmotové zátěže s pružnou vazbou

Na obr. 8-1 je uvedena struktura dvojhmotové zátěže s pružnou vazbou.



Obr. 8-1 – Struktura dvojhmotové zátěže

Diferenciální rovnice popisující dynamické chování dvojhmotové zátěže jsou následující

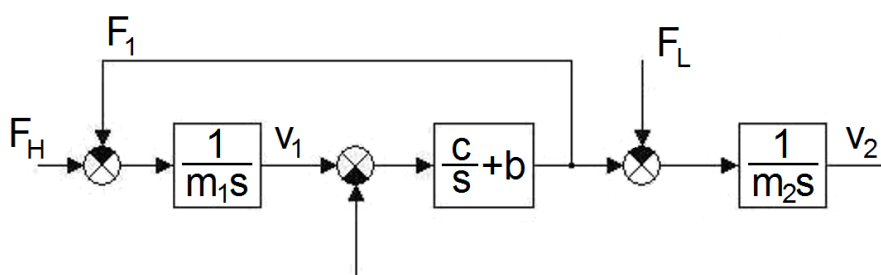
$$F_H = m_1 \frac{dv_1}{dt} + F_1 \quad (8.1)$$

$$F_1 = c(x_1 - x_2) + k(v_1 - v_2) \quad (8.2)$$

$$F_1 = m_2 \frac{dv_2}{dt} + F_L \quad (8.3)$$

kde  $c$  je konstanta tuhosti [N/m],  
 $b$  je činitel tlumení (bývá malý a většinou se zanedbává) [N s/m],  
 $x$  je posuv hmoty [m],  
 $v$  je rychlost pohybu [m/s],

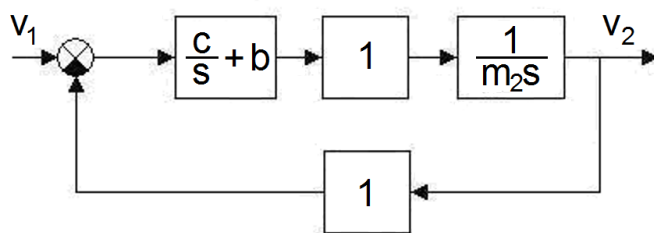
V našem případě je:  $m_1 = 1.55$  kg,  $m_2 = 0.569$  kg,  $c = 6492$  N/m,  $b = 0$



Obr. 8-2 – Blokové zapojení dvojhmotové zátěže

Vlastní kmitočet zátěže je počítán podle vztahu (8.6) a vlastní kmitočet celé dvojhmotové soustavy podle (8.9). Přenos mezi zrychlením motoru a hnací silou je určen podle (8.8).

Přenos mezi rychlostí hřídele motoru a zátěží je možno určit z upraveného blokového zapojení pružného spojení uvedeného na obr. 8-3.



Obr. 8-3 – Upravené blokové zapojení dvojhmotové zátěže

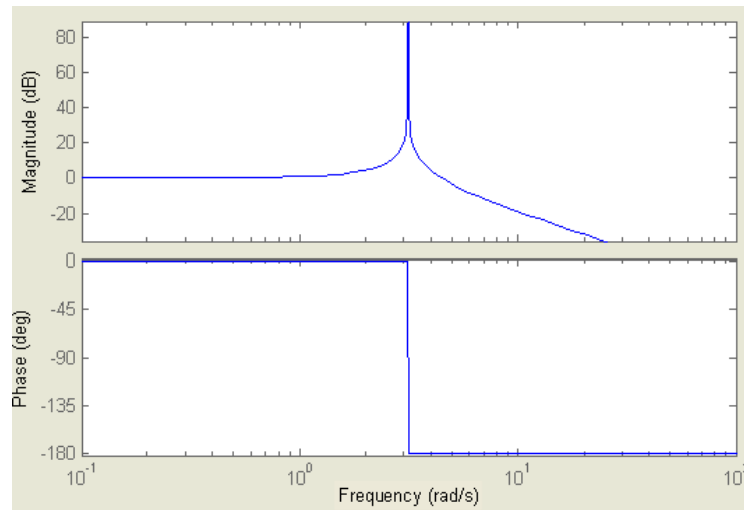
Přenos uzavřené smyčky (pro  $F_L = 0$ ) je

$$\frac{v_2(s)}{v_1(s)} = \frac{\frac{bs+c}{s} \frac{1}{m_2s}}{1 + \frac{bs+c}{s} \frac{1}{m_2s}} = \frac{bs+c}{bs+c+s^2m_2} \quad (8.4)$$

Přenos  $\frac{v_2(s)}{v_1(s)}$  (pro  $b = 0$ ) je  $\frac{v_2(s)}{v_1(s)} = \frac{1}{\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1}$  (8.5)

kde  $\Omega_L = \sqrt{\frac{c}{m_2}}$  je vlastní kmitočet zátěže při zablokované hřídeli motoru. (8.6)

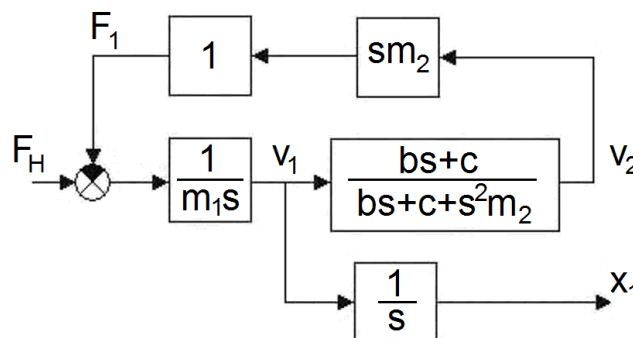
Poznamenejme, že konstanty  $c, b$  jsou definované na zátěži. Na obr. 8-4 je uvedena amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu  $\frac{v_2(s)}{v_1(s)}$ .



Obr. 8-4 – Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu  $\frac{v_2(s)}{v_1(s)}$

Pro  $\omega < \Omega_L$  probíhá pohyb motoru a zátěže synchronně bez fázového posuvu. Maximální poměr amplitud je pro  $\omega = \Omega_L$  (fázový posuv je  $-90^\circ$ ). Pro  $\omega > \Omega_L$  podíl předané energie do zátěže rychle klesá a její pohyb se výrazně utlumuje (zátěž a motor kmitají v protifázi).

Přenos mezi polohou pohyblivé části motoru  $x_1$  a hnací silou  $F_H$  určíme z upraveného blokového zapojení pružného spojení uvedeného na obr. 8-5 a rovnice (8.7)



Obr. 8-5 – Upravené blokové zapojení dvojhmotové zátěže

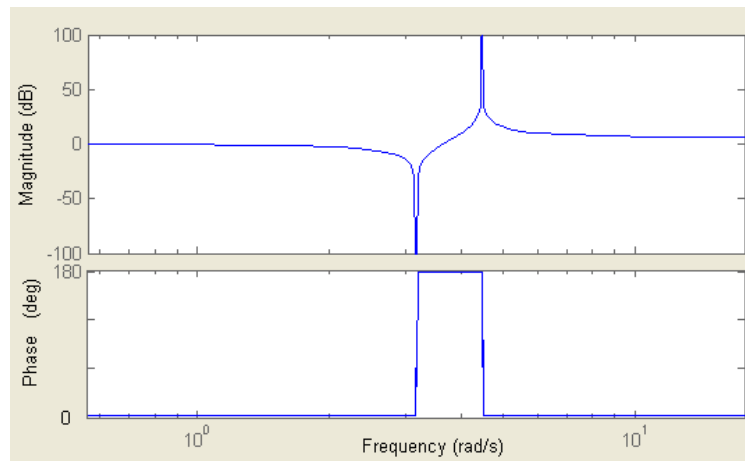
$$\frac{x_1(s)}{F_H(s)} = \frac{\frac{1}{m_1 s^2}}{\frac{1}{m_1 s} \frac{(bs+c)}{(bs+c+m_2 s^2)} m_2 s + 1} \quad (8.7)$$

Přenos mezi zrychlením pohyblivé části motoru a hnací silou dvojhmotového systému s nulovým tlumením (pro  $b = 0, F_L = 0$ ) získáme úpravou rovnice (8.7)

$$\frac{a_1(s)}{F_H(s)} = \frac{\frac{s^2}{\Omega_L^2} + 1}{m_C \left( \frac{s^2}{\Omega_{LM}^2} + 1 \right)} \quad (8.8)$$

kde  $\Omega_{LM} = \sqrt{\frac{c}{p^2 J_1} + \frac{c}{J_2}}$  je vlastní kmitočet celé dvojhmotové soustavy. (8.9)

Na obr. 8-6 je uvedena amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu  $\frac{a_1(s)}{F_H(s)}$ .



Obr. 8-6 – Amplitudová a fázová frekvenční charakteristika přenosu  $\frac{a_1(s)}{F_H(s)}$

Pro  $\omega < \Omega_L$  probíhá pohyb motoru a zátěže synchronně bez fázového posuvu. Při antirezonanční frekvenci  $\omega = \omega_{AR}$  je pohyb motoru minimální, většina energie je předávána do zátěže (zátěž a motor kmitají v protifázi). Při rezonanční frekvenci  $\omega = \omega_R$  dochází i pro malé hodnoty budící síly k výraznému pohybu hmoty na pohyblivé části motoru (pohyb zátěže je utlumován).

## 9. Metody potlačení reziduálních kmitů mechanických soustav

Řada pohonů výrobních strojů nemá pouze jednohmotovou zátěž. Pružné členy mezi hmotami vícehmotové zátěže (mechanických částí) způsobují nežádoucí tzv. reziduální kmitání na straně zátěže. Z tohoto důvodu byl v této práci podrobně analyzován lineární pohon s dvojhmotovou zátěží.

Toto nežádoucí tzv. reziduální kmitání lze jen a pouze omezeně redukovat vhodnou konstrukcí stroje (zvýšenou tuhostí mechanických částí a vysokou rezervou ve výkonu pohonu). Další možností redukce reziduálního kmitání je použití aktivního řízení.

Použití aktivního řízení je možno rozdělit:

- použití dopředné vazby,
- použití zpětnovazebního řízení,
- speciální metody využívající Kalmanovy filtry.

**Použití dopředné vazby** znamená vhodně upravit řídicí signál tak, aby bylo potlačeno parazitní kmitání (aby nebyly vybuzeny rezonanční módy stroje). Používá se:

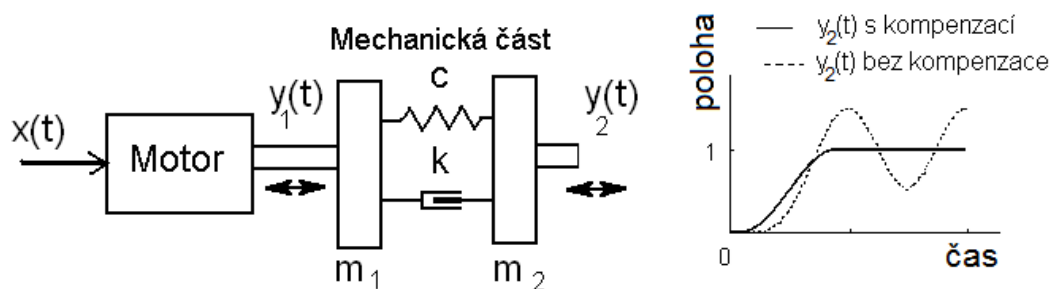
- aktivní tlumení na základě modelu inverzní dynamiky,
- tvarování průběhu řídicího signálu konvolucí s posloupností impulsů (metoda Input Shaping).

**Zpětnovazební metody** řízení určené pro potlačení vibrací umožňují na základě podrobné znalosti modelu řízené soustavy generovat kompenzační signál umožňující potlačit parazitní reziduální kmity.

**Speciální metody** využívající Kalmanovy filtry umožňují na základě znalosti průběhu statorových proudů a napětí estimovat průběh otáček na hřídeli motoru a na výstupu mechanického členu a průběh momentu na zátěži. Pomocí těchto estimovaných veličin je možno pomocí zpětné vazby velice efektivně kompenzovat parazitní kmity mechanického členu.

## 10. Metoda dopředného řízení pomocí metody „Input Shaping“

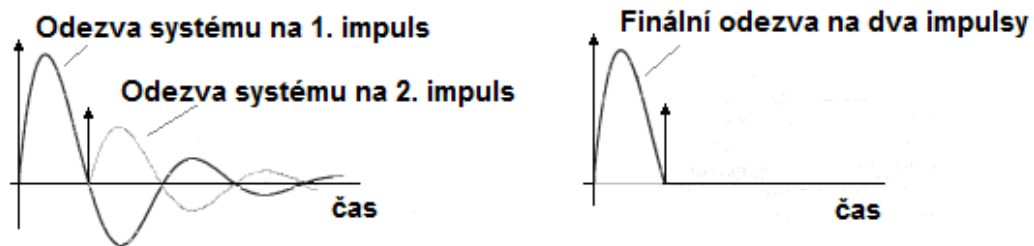
Metoda „Input Shaping“ je speciální varianta dopředného řízení, která umožňuje výrazně potlačit parazitní reziduální kmity. Metoda je založena na konvoluci posloupnosti tvarovacích impulsů s požadovaným řídicím signálem  $x(t)$ . Základní princip metody je uveden v [11]. Signál získaný konvolucí je tvarovaný řídicí signál  $y(t)$ , který je následně využíván pro řízení pohybu. Základní princip metody je názorně zobrazen na obr. 10-1.



Obr. 10-1 – Základní princip metody „Input Shaping“

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (10.1)$$

$$Y(s) = X(s)H(s) \quad (10.2)$$



Obr. 10-2 – Odezva systému na pulsy

### 10.1. Tvarovače určené pro dvojhmotové systémy

#### a) ZV tvarovač obsahující pouze dva impulsy (zero vibration shaper)

Tento tvarovač obsahuje pouze dva impulsy. Pomocí tohoto typu tvarovače je teoreticky možno dosáhnout nulovou amplitudu vibrací na vlastním kmitočtu systému. Výpočet parametrů tohoto tvarovače je proveden pomocí postupu uvedeného v [13] a [14]. Lineární systém popsaný přenosovou funkcí  $G(s)$  je charakterizován jedním vlastním kmitočtem netlumených kmitů systému  $\omega_0$  a činitelem tlumení  $\xi$ .

$$G(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (10.3)$$

kde  $\omega_0$  je vlastní kmitočet netlumených kmitů systému,  
 $\xi$  je činitel tlumení.

Posloupnost impulsů na vstupu systému je

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - t_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10.4)$$

Odezva systému druhého řádu na jeden Diracův impuls (amplituda impulsu je  $A_i$ , čas výskytu impulsu je  $t_i$ ) je možné určit pomocí inverzní Laplaceovy transformace

$$y_i(t) = L^{-1} \left\{ A_i \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \right\} = \frac{A_i \omega_0}{\sqrt{(1-\xi^2)}} e^{-\xi\omega_0(t-t_i)} \sin\left\{ (t-t_i)\omega_0\sqrt{(1-\xi^2)} \right\} \quad (10.5)$$

kde  $y_i(t)$  je průběh výstupního signálu systému,  
 $A_i$  je amplituda impulsu,  
 $t_i$  je čas výskytu impulsu.

Amplituda kmitů odezvy systému na N impulsů je následující

$$y_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{A_i \omega_0}{\sqrt{(1-\xi^2)}} e^{-\xi \omega_0 (t-t_0)} \right] \sin[\omega_D (t-t_i)] \quad (10.6)$$

kde  $\omega_D = \omega_0 \sqrt{(1-\xi^2)}$ ,  $t_i = \frac{T_0}{2} i$

Působením těchto impulsů můžeme realizovat potlačení kmitů v čase výskytu posledního impulsu ( $t = t_{END}$ ). Pro výpočet požadovaných amplitud těchto impulsů můžeme použít postup podle [11]. Pro úpravu rovnice (10.6) můžeme použít následující trigonometrické vztahy

$$B_1 \sin(\alpha t + \Phi_1) + B_2 \sin(\alpha t + \Phi_2) = A_{amp} \sin(\alpha t + \psi) \quad (10.7)$$

kde  $A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2)^2 + (B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2)^2}$

$$\psi = \arctg \left( \frac{B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2}{B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2} \right)$$

$$B_j = \frac{A_j \omega}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega (t_{END}-t_j)}, \quad \Phi_j = t_j \omega \sqrt{1-\xi^2}$$

Aby došlo k eliminaci vibrací v čase posledního impulsu ( $t = t_{END}$ ) je nutno, aby  $A_{amp} = 0$ . Můžeme tedy definovat podmínky, za kterých dojde k eliminaci vibrací.

$$B_1 \cos \Phi_1 + B_2 \cos \Phi_2 = 0 \quad (10.8)$$

$$B_1 \sin \Phi_1 + B_2 \sin \Phi_2 = 0 \quad (10.9)$$

Po vhodných úpravách obdržíme výsledné dvě rovnice určující podmínky, za kterých dojde k eliminaci vibrací.

$$V_1 = \sum_{j=0}^N A_j e^{-\xi \omega (t_{END}-t_j)} \sin(t_j \omega \sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (10.10)$$

$$V_2 = \sum_{j=0}^N A_j e^{-\xi \omega (t_{END}-t_j)} \cos(t_j \omega \sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (10.11)$$

kde N je počet impulsů tvarovače (pro ZV tvarovače je N=2)

Pro výpočet parametrů tvarovače platí ještě tyto následující vztahy

$$t_1 = 0 \quad (10.12)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i = 1 \quad (10.13)$$

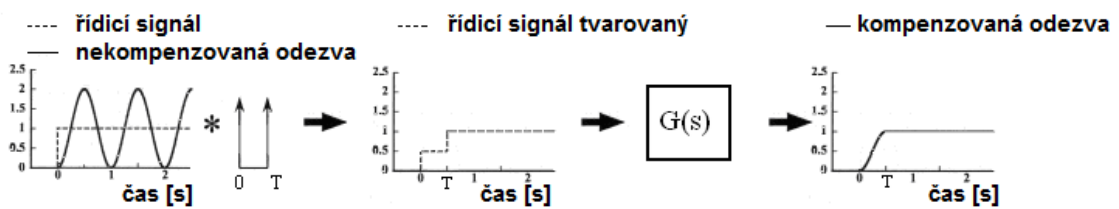
$$A_i > 0 \quad (10.14)$$

Řešením soustavy výše uvedených 5 rovnic můžeme určit parametry  $A_i$  a  $t_i$  tvarovače. Poznamenejme, že tvarovač v tomto případě obsahuje pouze 2 impulsy. První impuls je v čase  $t_1 = 0$  a druhý v čase  $t_2 = \frac{T_0}{2}$  ( $T_0$  je perioda tlumených vlastních kmitů). Parametry tvarovače potom vypočteme pomocí následujících vztahů

$$A_1 = \frac{1}{1+K} \quad , \quad A_2 = \frac{K}{1+K} \quad (10.15)$$

$$K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad , \quad t_2 = \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \quad , \quad t_1 = 0 \quad (10.16)$$

**Příklad ZV tvarovače se dvěma impulsy (Zero Vibration Shaper):**



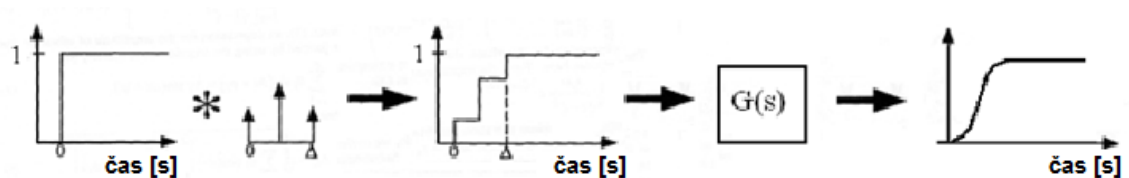
Obr. 10-3 – Odezva systému se ZV tvarovačem, který obsahuje dva impulsy

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+K} & \frac{K}{1+K} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \end{bmatrix} \quad , \quad K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad , \quad T = \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \quad (10.17)$$

Analogový tvarovací filtr (dva pozitivní impulsy):  $H(s) = \frac{1}{1+K} + \frac{Ke^{-sT}}{1+K} \quad (10.18)$

Digitální tvarovací filtr:  $H(z) = \frac{1+Kz^{-1}}{1+K} = \frac{z+K}{z(1+K)} \quad (10.19)$

b) ZV tvarovač obsahující tři kladné impulsy (Zero Vibration Shaper)



Obr. 10-4 – Odezva systému se ZV tvarovačem obsahujícím tři impulsy



$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+2K+K^2} & \frac{K}{1+2K+K^2} & \frac{K^2}{1+2K+K^2} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} & \frac{2\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}} \end{bmatrix} \quad (10.20)$$

$$\text{Digitální tvarovací filtr: } H(z) = \frac{z^2 + 2Kz + K^2}{z^2(1+2K+K^2)} \quad (10.21)$$

## 10.2. ZVD Tvarovače (zero vibration and derivative shaper)

Tento typ tvarovače umožňuje zvýšit robustnost metody. Toho je dosaženo přidáním podmínky, že derivace vibrace je rovna nule.

### c) ZVD tvarovač obsahující tři impulzy

V tomto případě je požadováno nulové potlačení vibrací na vlastním kmitočtu a také nulová hodnota derivace na tomto kmitočtu. Výpočet parametrů tohoto tvarovače je uveden v [15].

$$\frac{dV_1(\omega, \xi)}{d\omega} = 0, \quad \frac{dV_2(\omega, \xi)}{d\omega} = 0 \quad (10.22)$$

Po výpočtu derivací a po vhodných úpravách obdržíme podmínky pro určení parametrů ZVD tvarovače, které jsou následující:

$$\sum_{j=0}^N A_j t_j e^{-\xi\omega(t_{END}-t_j)} \sin(t_j\omega\sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (10.23)$$

$$\sum_{j=0}^N A_j t_j e^{-\xi\omega(t_{END}-t_j)} \cos(t_j\omega\sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (10.24)$$

Pro ZVD tvarovače musí být  $N = 3$ . Z výše uvedených rovnic je možno určit parametry tvarovacího filtru.

$$K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}, \quad L = 1 + 2K + K^2 \quad (10.25)$$

### Příklad ZVD tvarovače obsahujícího 3 impulzy

Jedná se o ZVD tvarovač určený pro systémy druhého řádu s vlastním kmitočtem 1 Hz. ZVD tvarovač v tomto případě obsahuje tři kladné impulzy.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{2K}{L} & \frac{K^2}{L} \\ 0 & T & 2T \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.26)$$

$$L = 1 + 2K + K^2 \quad (10.27)$$

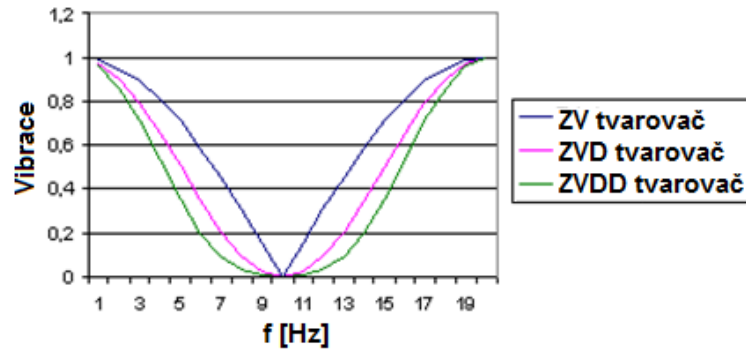
Poznamenejme, že při použití metody ZVD dojde k potlačení vibrací v čase

$$t_2 = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} \quad (10.28)$$

Při použití metody ZV dojde k potlačení vibrací v polovičním čase

$$t_1 = \frac{\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} \quad (10.29)$$

Potlačení vibrací jednotlivých typů tvarovačů je možno určit z amplitudové frekvenční charakteristiky uvedené na obr. 10-5.



Obr. 10-5 – Amplitudové frekvenční charakteristiky tvarovačů

### Výpočet přenosové funkce ZVD tvarovače pro simulační model

Pro ověření funkce „Input Shaping“ je použit ZVD tvarovač, který obsahuje tři impulsy. Tvarovač je určen pro systémy druhého řádu s vlastním kmitočtem  $f_0$  a tlumením  $\xi$ . Tvarovač v tomto případě obsahuje tři kladné impulsy.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2K & K^2 \\ L & L & L \\ 0 & T & 2T \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (10.30)$$

$$L = 1 + 2K + K^2 \quad (10.31)$$

V našem případě byl vlastní kmitočet dvojhmotové soustavy změřen a vypočítán z dokmitání hmoty po zastavení. Jeho hodnota je  $f_0 = 20$  Hz. Použitím výše uvedených rovnic dostaneme přenosovou funkci tvarovače v z-transformaci

$$H(z) = \frac{z^2 + 2Kz + K^2}{z^2(1 + 2K + K^2)} = \frac{0.2908z^2 + 0.4969z + 0.2123}{z^2} \quad (10.32)$$

$$T_V = t_1 = \frac{\pi}{\omega\sqrt{1-\xi^2}} = 0.025, \quad K = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = 0.8545 \quad (10.33)$$

Vzorkovací perioda je pro tento tvarovač  $T_V = 0.025$ s.

Jak je popsáno v kap. 6.2.1 ohledně citlivosti systému YASKAWA na rychlé změny zrychlení, ke kterým dochází při použití klasické metody Input Shaping, byla v rámci disertační práce navržena a v této kapitole popsána modifikace metody Input Shaping spočívající v použití dodatečné úpravy průběhu zdvihové křivky. Je použit korekční filtr s přenosovou funkcí realizující integrační člen 1. řádu, který upravuje průběh zrychlení tak, aby se řídicí systém YASKAWA nedostával do chybového stavu. Použitá přenosová funkce tohoto korekčního filtru je popsána rovnicí (6.13) se zvolenou hodnotou časové konstanty  $\tau = 0.01$ s.

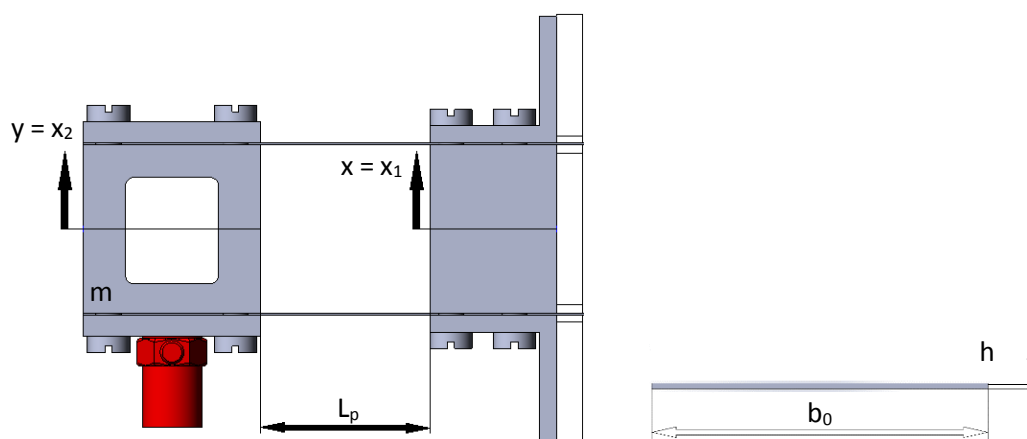
## 11. Mechanické kmitání

V kapitole jsou popsány použité metody a postupy pro výpočet a určení mechanického kmitání pružně uložené setrvačné kmitající hmoty. Na obr. 11-1 je zobrazen náhled shora na dynamicky uloženou kmitající setrvačnou hmotu s párem plochých pružin. Značení  $x = x_1$  odpovídá kinematickému buzení tj. poloze části „pevného“ ukotvení přimontovaného k desce pohyblivé primární části lineárního motoru. Značení  $y = x_2$  odpovídá odezvě tj. poloze dynamicky uložené kmitající hmoty o známé hmotnosti  $m$  ve známé vzdálenosti  $L_p$  od ukotvení. Červeně je na obrázku znázorněn snímač zrychlení. Detailní popis spolu s obrázkem a náhledy uspořádání zkušebního zařízení lineárního motoru Yaskawa s dynamicky uloženou kmitající hmotou na pružinách bude uveden v kap. 12.

### Základní parametry:

Hmota o hmotnosti  $m$ , paralelní ploché pružiny o rozměrech  $b_0 * h$ , délka pružin  $L$

Kinematické buzení  $x = x_1$ , odezva  $y = x_2$



Obr. 11-1 – Pružně uložená setrvačná hmota s párem plochých pružin, průřez pružin

### Model:

Pár paralelně uložených plochých pružin je nahrazen jednou pružinou s dvojnásobnou šířkou, jak je zobrazeno na obr. 11-2

$$b_p = 2b_0 \quad (11.1)$$

Plocha průřezu pružiny

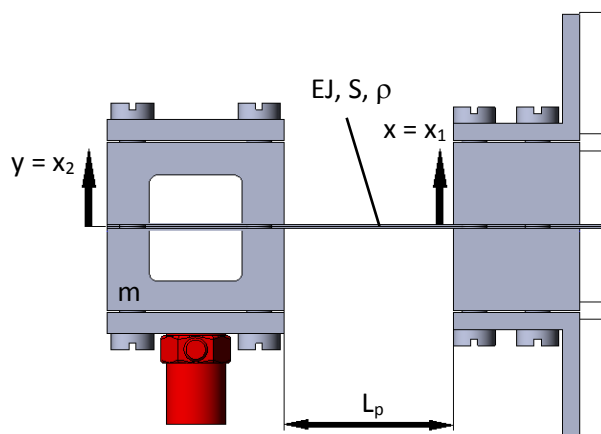
$$S = b_p h = 2b_0 h \quad (11.2)$$

Kvadratický moment průřezu

$$J = \frac{b_p h^3}{12} \quad (11.3)$$

Hmotnost pružiny

$$m_{p1} = \rho b_p h L_p \quad (11.4)$$



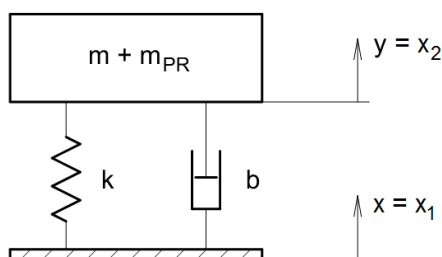
Obr. 11-2 – Model nosníku s tuhou setrvačnou hmotou na konci, pouze příčné posuvy bez natočení

Metoda přenosových matic, frekvenční (charakteristická) rovnice je popsána v [26]

$$1 - \cosh \lambda \cos \lambda - \frac{1}{\lambda} \frac{m_{p1}}{m} (\cosh \lambda \sin \lambda + \sinh \lambda \cos \lambda) = 0 \quad (11.5)$$

Vlastní frekvence,  $\lambda$  je kořen rovnice (11.5)  $f = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\lambda}{L_p} \right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}} \quad (11.6)$

**Ekvivalentní model s jedním stupněm volnosti, viz. [27]:**



Obr. 11-3 – Ekvivalentní model s jedním stupněm volnosti

Redukovaná hmota pružiny  $m_{PR} = \frac{13}{35} m_{p1} \quad (11.7)$

Tuhost pružiny  $k_0 = \frac{12EJ}{L_p^3} \quad (11.8)$

Vlastní netlumená frekvence  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_0}{m+m_{PR}}} \quad (11.9)$

Korekce na nižší tuhost uložení, efektivní tuhost  $k_1 = k_0 \left( \frac{f_{mer}}{f_0} \right)^2 \quad (11.10)$

Tlumení  $b_{kr} = 2\sqrt{k(m+m_{PR})}, b = \xi b_{kr} \quad (11.11)$

Pro konkrétní měřený případ a konkrétní konstrukční uspořádání reálného zkušebního zařízení lineárního motoru s dynamicky (pružně) uloženou hmotou jsou jednotlivé vypočtené a změřené parametry a hodnoty následující:

Šířka pružinového pásu byla měřena mikrometrem na osmi místech po celé délce pásu, přičemž hodnota  $h$  byla zaokrouhlena na desetiny mm  $h = 0.4 \text{ mm}$

Výška pružinového pásu  $b_0 = 25 \text{ mm}$

Délka pružiny (vetknutí)  $L_p = 40 \text{ mm}$

Plocha průřezu pružiny  $S = b_p h = 2b_0 h = 20 \text{ mm}^2$

Hustota materiálu pružin  $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Modul pružnosti  $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Kvadratický moment průřezu  $J = 0.2667 \text{ mm}^4$

Celková hmotnost zátěže přidaná na primární pohyblivou část lineárního motoru

$$m_c = 1.55 \text{ kg}$$

Hmotnost částí vetknutí a držáků  $m_v = 0.533 \text{ kg}$

Hmotnost závaží (pružně uložená hmota) a pružin  $m_z = 0.569 \text{ kg}$

Frekvence kmitů závaží pro konkrétní případ měření je

$$f = 17 \text{ Hz}$$

Konstanta tuhosti pružiny  $k$  je pak počítána ze vztahu

$$\Omega_L = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m_z}} \quad (11.12)$$

$$\rightarrow k = \Omega_L^2 m_z = (2\pi f)^2 m_z = 6491.871 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Pružiny jsou dvě, potom konstanta tuhosti je  $\frac{k}{2} = 3245.936 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

## 12. Reálné zkušební a testovací zařízení YASKAWA

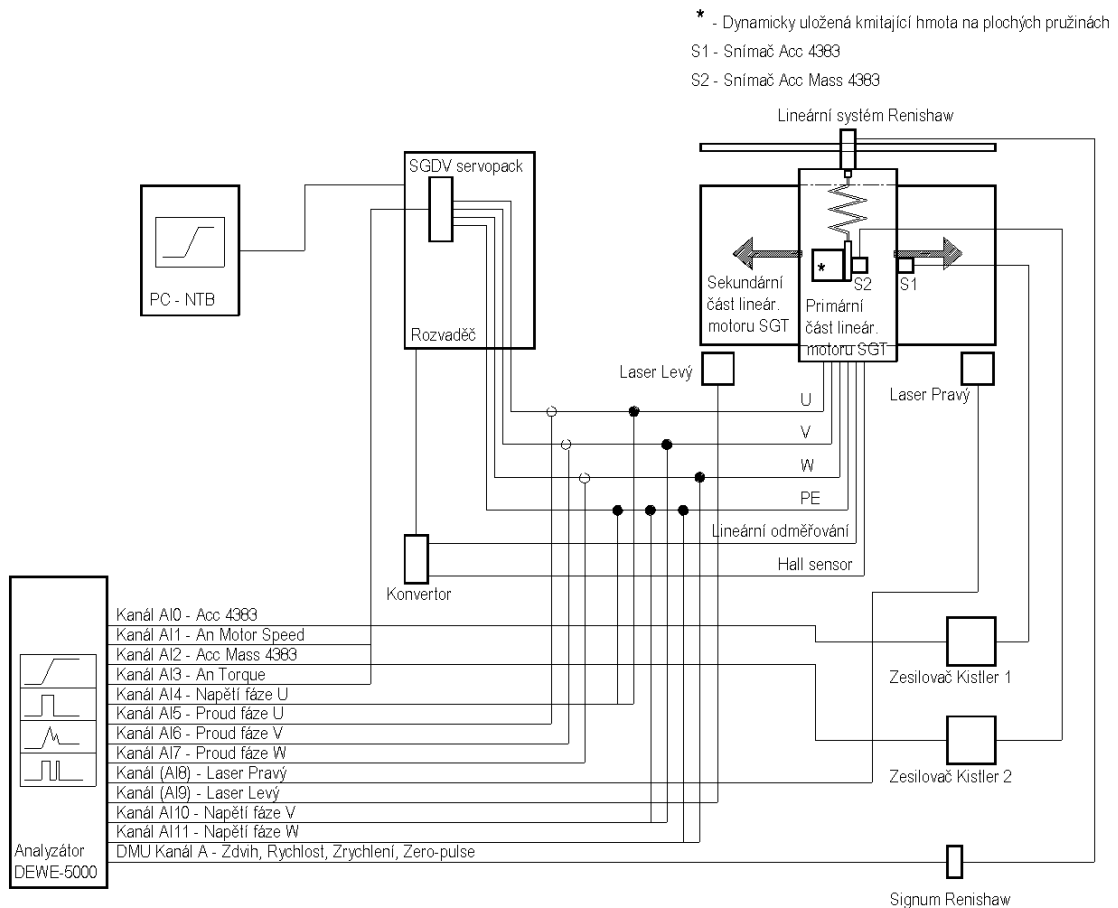
Výše popsané teoretické podklady, výstupy a závěry byly v další praktické části disertační práce ověřovány a zkoušeny s užitím testů a měření na reálném zkušebním zařízení na platformě laboratorního stendu s užitím lineárního motoru Yaskawa. Na obr. 12-1 je schématické blokové zapojení reálného zkušebního zařízení s jednotlivými prvky a subsystémy celkového YASKAWA měřeného systému (lineárního motoru).

Testování a ověřování výsledků a výstupů bylo připraveno a provedeno na zkušebním a testovacím laboratorním stendu se dvěma paralelně uloženými lineárními pohony Yaskawa na pevné základní monolitické betonové desce na stavitelných nohách, viz obr. 12-2. Delší lineární pohon Yaskawa má označení SGT-C-F50D380-1294-NA0020-EC, s/n: 4512-6761, o/n: 2126761. Měření a praktické zkoušky byly prováděny na kratším pohonu s označením SGT-C-F35A120-0535-NA0020-EC, s/n: 4512-6762, o/n: 2126762, přičemž vysvětlení jednotlivých znaků kódu je převzato z datasheetu výrobce [2] a rozepsáno v tab. 12-1. Některé výsledky, vyhodnocení a závěry z měření byly prezentovány na mezinárodních konferencích [56].

Původní uspořádání lineárního motoru bylo za účelem precizního proměření doplněno o přesné měřicí snímače a senzory a další mechanické komponenty spolu s dynamickou hmotou o známé hmotnosti na plochých pružinách. 3D CAD model celého zkušebního zařízení je na obr. 12-2a, na obr. 12-2b je detail primární pohyblivé části lineárního motoru se snímači zrychlení, polohy a pružně uloženou hmotou. Na obrázcích obr. 12-2c jsou fotografie reálného zkušebního zařízení spolu s detailním záběrem pružně uložené hmoty na obr. 12-2d. Hmoty spolu s plochými pružinami byla uložena horizontálně (rovnoběžně) s deskou primární pohyblivé části ve výšce 6 mm nad horizontální plochou upevněním. Toto horizontální uspořádání pružně uložené hmoty vůči primární části stendu bylo zvoleno z důvodu, aby nebyl měněn moment zátěže a byl odstraněn případný nežádoucí klopný efekt nepříznivě ovlivňující zatížení primární části motoru v případě požadavku (volbě) změny frekvence kmitů v závislosti na vzdálenosti pružné hmoty od ukotvení (uložení) hmoty ve vertikálním (kolmém) směru. Pro minimalizaci vlivu tepelného driftu a nežádoucího chlazení snímačů vlivem okolního proudění vzduchu způsobených různými podmínkami měření (frekvence, tepelná stabilita, odstranění nerovnoměrného chlazení, aj.) a pro zachování co možná nejstabilnější a nejrovnoměrnější podmínky měření byly snímače izolovány od okolního prostředí vrstvou polystyrenu.

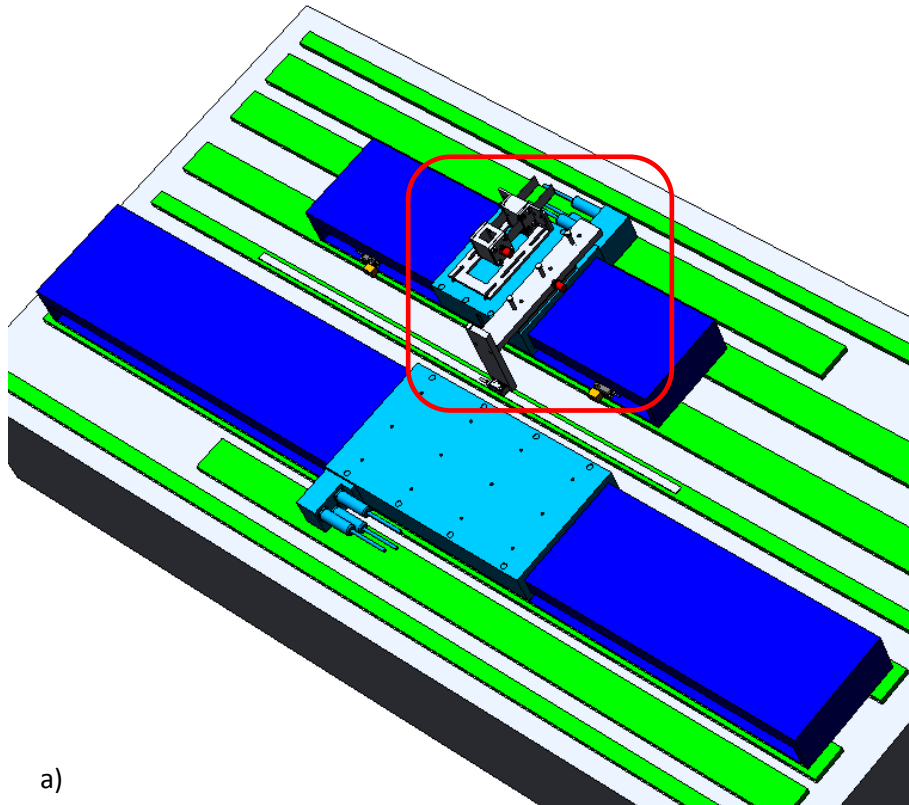
Tab. 12-1 Význam kódu a značení lineárního motoru

Kód	Jednotky	Popis
SGT	-	Sigma Lineární Motor
C	-	parametr není specifikován
F	-	typ železného jádra
35	mm	výška magnetů
A	VAC	napájecí napětí 230
120	mm	délka sestavy cívek
0535	mm	délka zdvihu
N	-	výrobce (číslíkového) enkodéru
A	-	typ inkrementálního enkodéru
0020	μm	rozteč enkodéru
E	-	parametr není specifikován (možnosti nastavení senzoru)
C	-	PNP výstupní limitní spínač

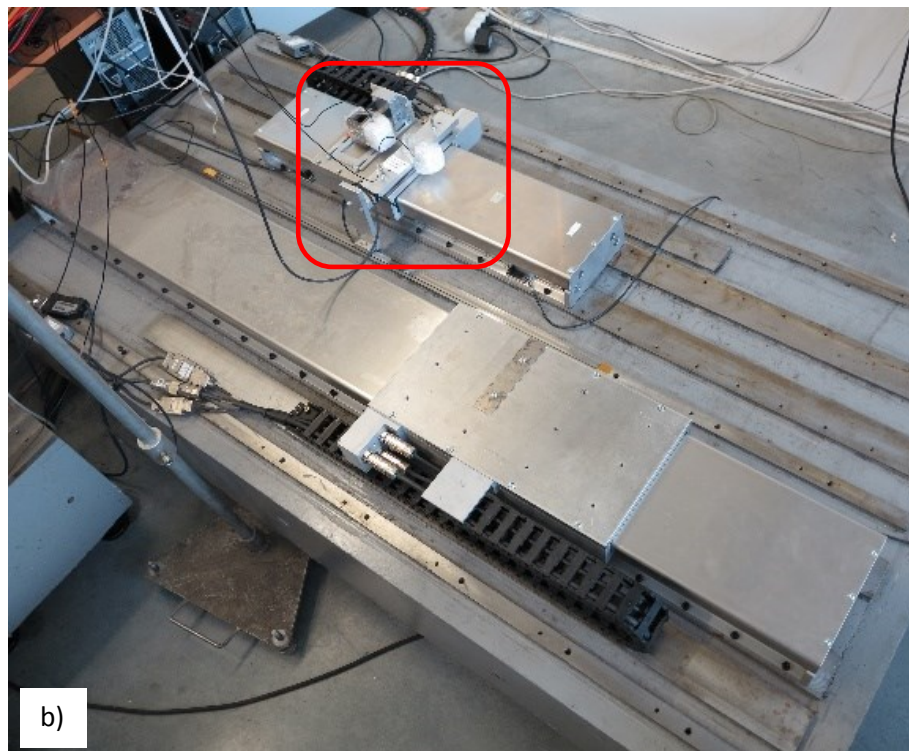


Obr. 12-1 – Schématické blokové zapojení reálného zkušebního zařízení lineárního motoru s rozvaděčem, počítačem PC-NTB, snímači, měřicím analyzátor DEWE-5000 a dalšími komponentami

Přenos a zadávání zdvihových křivek je realizováno obousměrnou datovou komunikací mezi PC-NTB a rozvaděčem pomocí ethernetového připojení (ethernetový kabel). Komunikace mezi jednotlivými prvky a obvody rozvaděče je zprostředkována systémem komunikační sběrnice Mechatrolink-III.

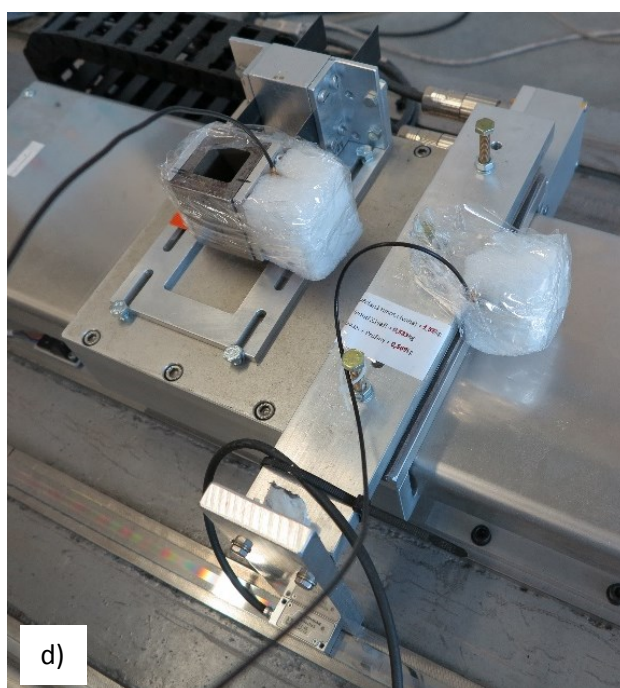
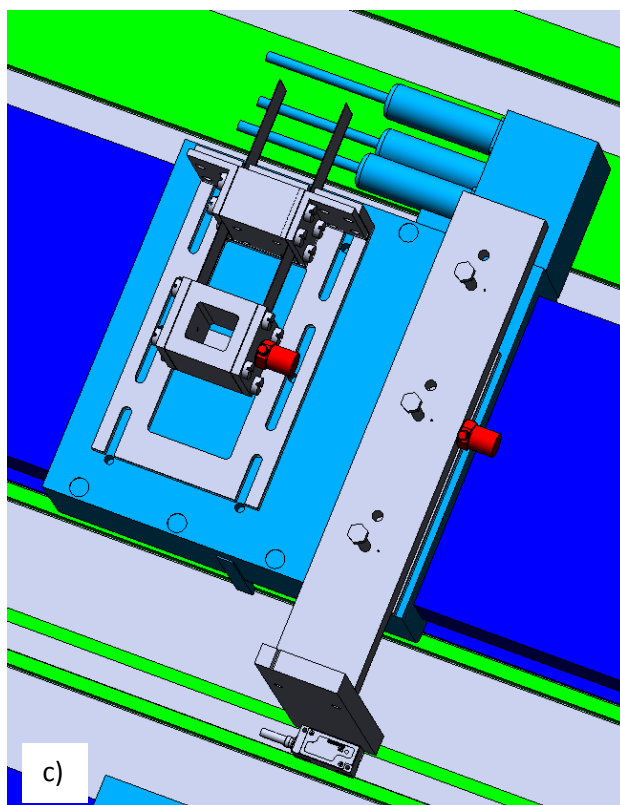


a)



b)

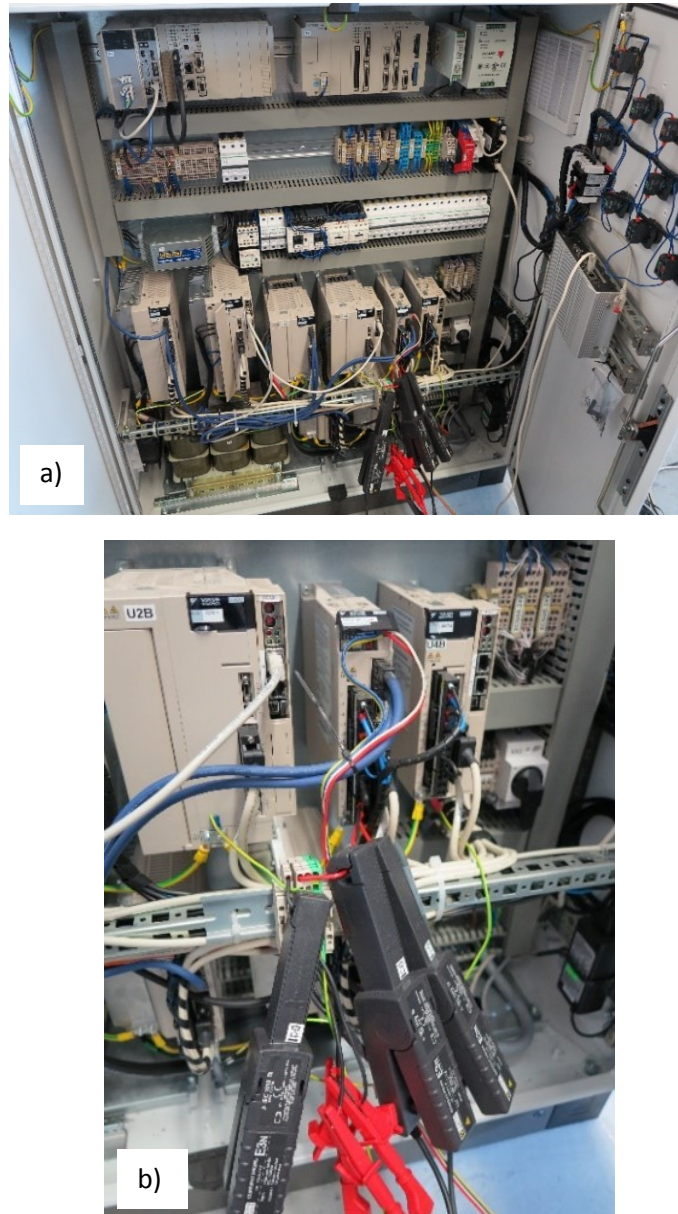




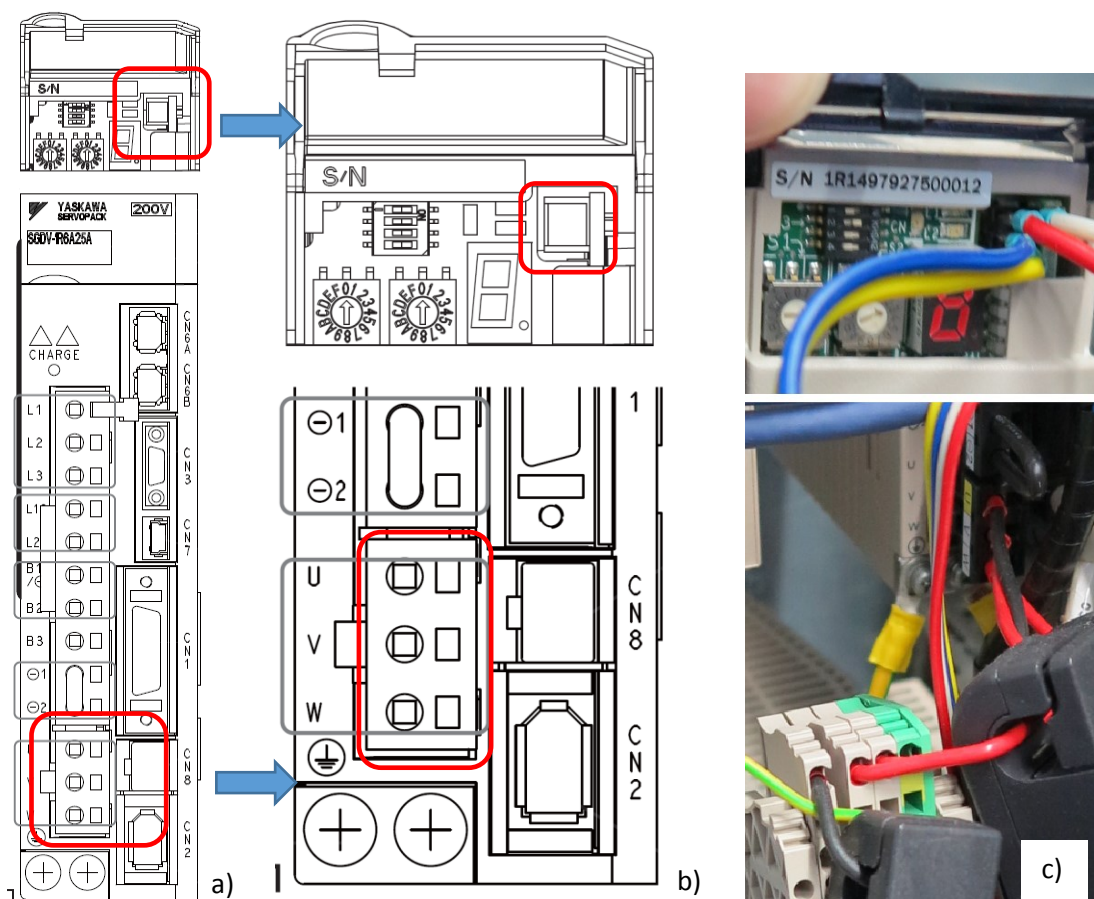
Obr. 12-2 – Náhledy 3D CAD modelu (a, c) a fotky reálného zkušebního zařízení (b, d) s lineárními motory Yaskawa na monolitické betonové desce

Spolu s mechanickými veličinami měřenými přímo namontovanými precizními snímači na primární část motoru a dynamicky (pružně) uloženou kmitající hmotu na plochých pružinách byly měřeny a vyhodnoceny elektrické veličiny. Do rozvaděčové skříně na přívodní kabely mezi terminálem a motorem, viz obr. 12-3a elektrického zapojení rozvaděče spolu s detailem zapojení servopacku SGD V, byly namontovány sondy pro měření napětí a proudů jednotlivých

fází U, V, W. Na detailu obr. 12-3b jsou pro potřeby měření elektrických veličin zobrazeny svorky snímačů napětí a klešťové proudové sondy připojené na jednotlivé kabely vystupující z terminálu a vstupující do motoru. Na obr. 12-4, který je převzat z [28], je schematický náhled čela skříně terminálu servopacku SGDV a fotky s detailem a vyznačením jednotlivých konektorů napětí a analogový monitorovací konektor pro signály analogové rychlosti a momentu. Tyto elektrické analogové signály měřené na pinech konektoru terminálu servopacku SGDV-2R8A25A, obr. 12-4c nahoře, jsou signál rychlosti (kanál AI 1, červená – GND, modrá – analogový signál) a momentu (kanál AI 3, bílá – GND, žlutá – analogový signál).



*Obr. 12-3 – Zapojení rozvaděče lineárních motorů (a) s detailem zapojení servopacku SGDV (b) a sondami pro měření napětí a proudů fází U, V, W*



Obr. 12-4 – Terminály servopacku SGD-V Yaskawa s detaily přípojných svorek pro měření elektrických veličin na vstupu do motoru a konektoru analogových signálů z měniče

V ovládacím a řídicím softwaru pro lineární systém Yaskawa je možné provádět určitá omezená nastavení konkrétních parametrů, jak je definováno a popsáno v [28]. Všechna měření a vyhodnocení uvedená v práci jsou provedena pro jedno nastavení parametrů. V tab. 12-5 je popis a přehled nastavení těchto parametrů systému Yaskawa. Pouze určitá vybraná měření a porovnání byla provedena i pro jiná nastavení parametrů, ale z kapacitních důvodů rozsahu práce nejsou vyhodnocení pro tato nastavení parametrů v práci popsána a uvedena.

Tab. 12-5 Přehled nastavení parametrů systému Yaskawa

Označení	Parametr	Hodnota	Jednotka
Pn100	Přírůstek rychlostní smyčky	830	[0.1 Hz]
Pn101	Integrální časová konstanta rychlostní smyčky	819	[0.01 ms]
Pn102	Přírůstek polohové smyčky	1300	[0.1 s <sup>-1</sup> ]
Pn401	Časová konstanta referenčního silového filtru	41	[0.01 ms]

## 12.1. Zdvihové křivky

Pro řízení pohonu a vlastní měření odezvy lineárního motoru s dynamickou pružně uloženou kmitající hmotou bylo připraveno a naprogramováno několik zdvihových křivek. Na obr. 12-5 je zobrazen průběh zdvihu ( $y_0$ ), rychlosti ( $y_1$ ) a zrychlení ( $y_2$ ) pro zdvihovou křivku s označením F1. Tato zdvihová křivka je složena ze třech částí: polynomické, harmonické a parabolické. Zvolenou základní frekvencí pro ověření a měření chování systému, kdy je systém ještě schopen provozu bez omezení, je pro zdvihovou křivku F1 frekvence 25 cyklů/min s maximálním možným zdvihem 500 mm.

Zdvihové křivky F1, F2 a F3 s krokem  $0.1^\circ$  byly připraveny a naprogramovány na základě dlouholetých zkušeností a výzkumu spojeného s vývojem v oblasti rotačních motorů a návrhu vaček ve společnosti VÚTS, a.s. Zdvihové křivky F4 až F11 byly postupně programovány a navrhovány na základě vědecko-výzkumných teoretických aktivit, simulací a analýz a výstupů z teoretické části a praktických měření na reálném zkušebním zařízení v průběhu dílčích aktivit přípravy disertační práce.

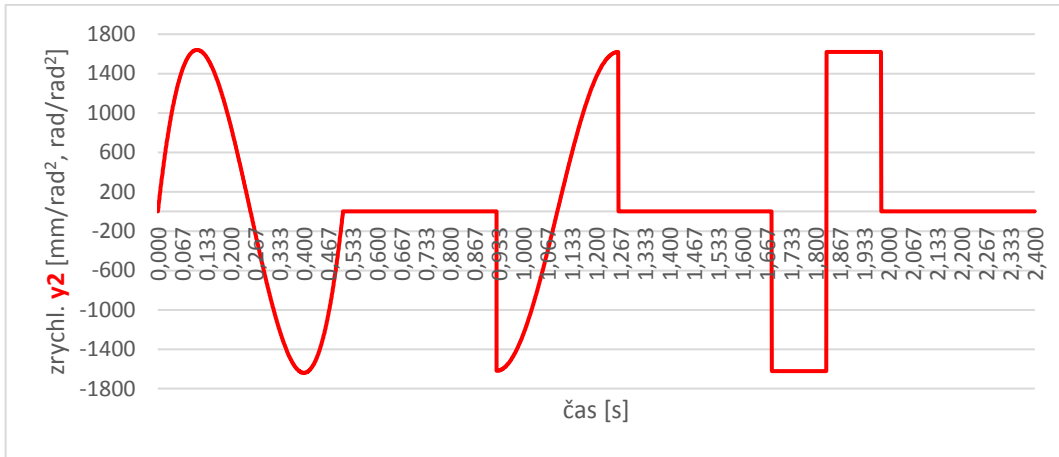
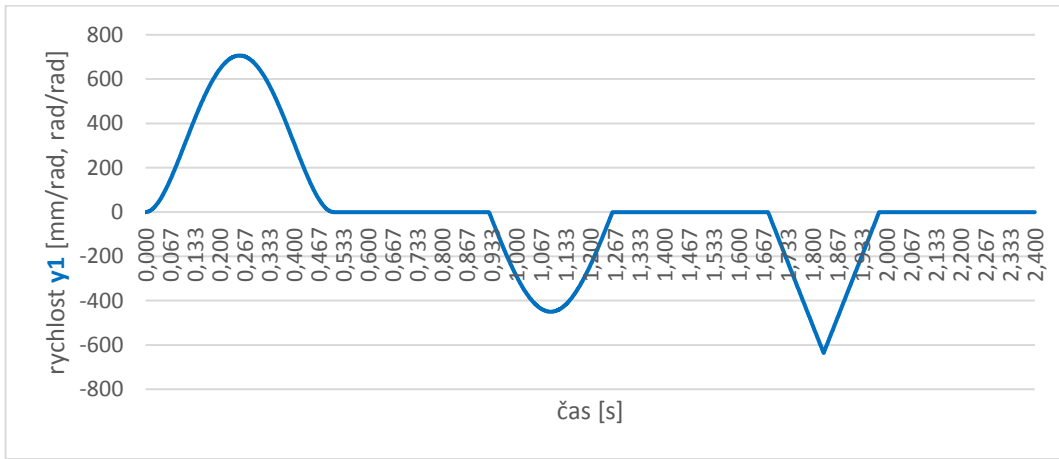
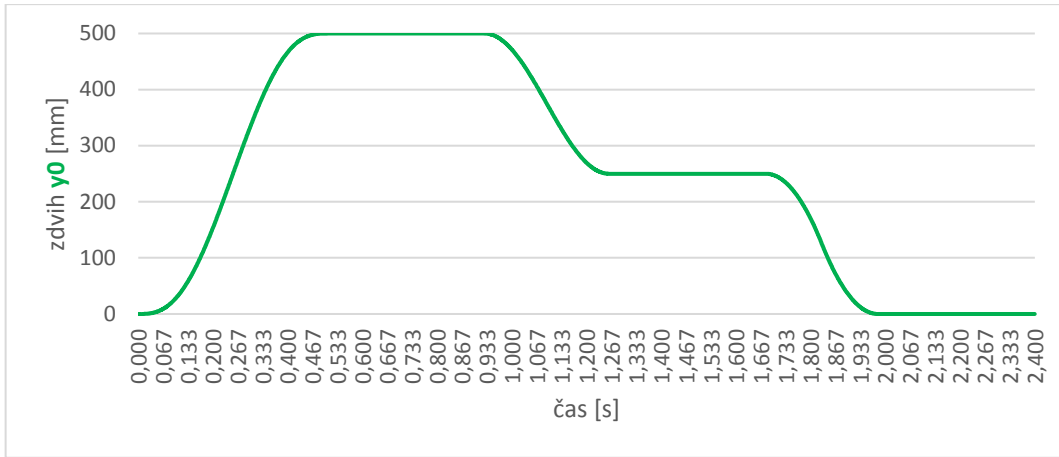
V tab. 12-2 je přehled jednotlivých zdvihových křivek spolu s měřenými frekvencemi, maximálním zdvihem a poznámkami k měření. Průběhy všech zdvihových křivek, které byly připraveny na základě simulací uvedených v předešlých kapitolách (teoretických částech práce) a jsou použity pro testování a ověřování závěrů a měření na reálném lineárním motoru je uveden v příloze A.1. Jak je popsáno v předešlém odstavci, z důvodu, že příprava a návrh zdvihových křivek pro lineární stand navazuje na aktivity spojené s návrhem křivek pro rotační motory a elektronické vačky, a jsou pro ně používány i adekvátní univerzální softwarové nástroje (např. KINz2) vyvinuté a dlouhodobě používané ve spol. VÚTS, a.s., jsou na vodorovných osách X jednotlivých průběhů křivek, včetně zdvihových křivek F1 a F6 v příloze A.1, uvedeny úhly v jednotkách  $^\circ$  natočení virtuální master osy stroje. Tyto závislosti byly pro jednotlivé konkrétní případy simulací a porovnávání měření a na základě požadavku zvolené frekvence pohybu primární části motoru s dynamicky uloženou kmitající hmotou vzorkovány a přepočítávány na závislosti v časové oblasti.

Tab. 12-2 Přehled zdvihových křivek, frekvencí a maximálních zdvihů

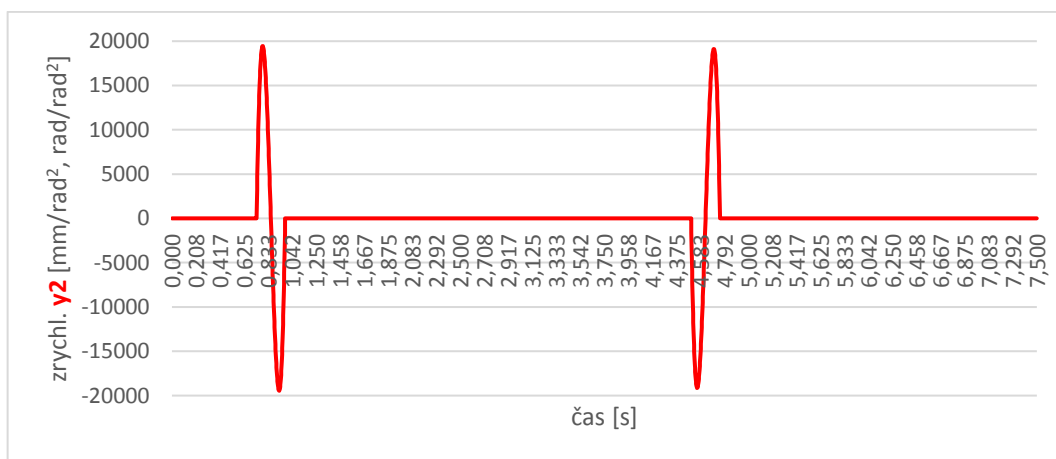
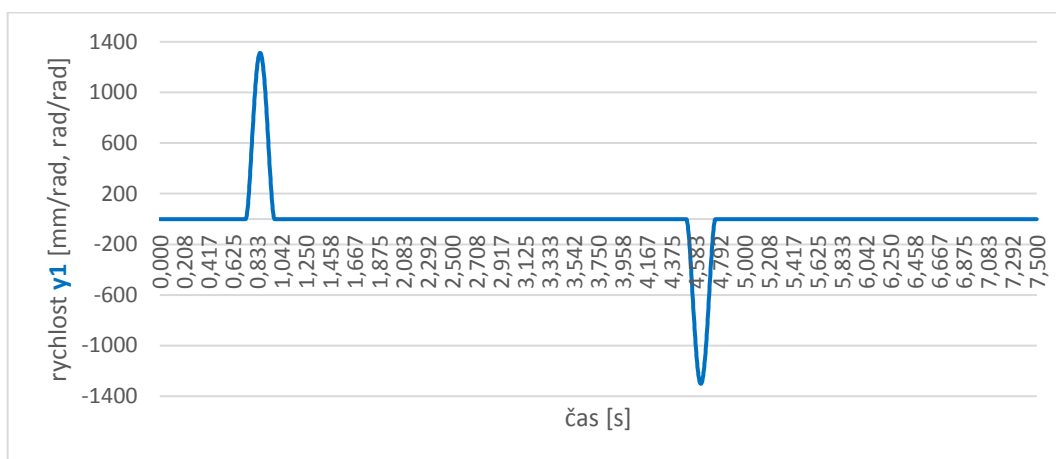
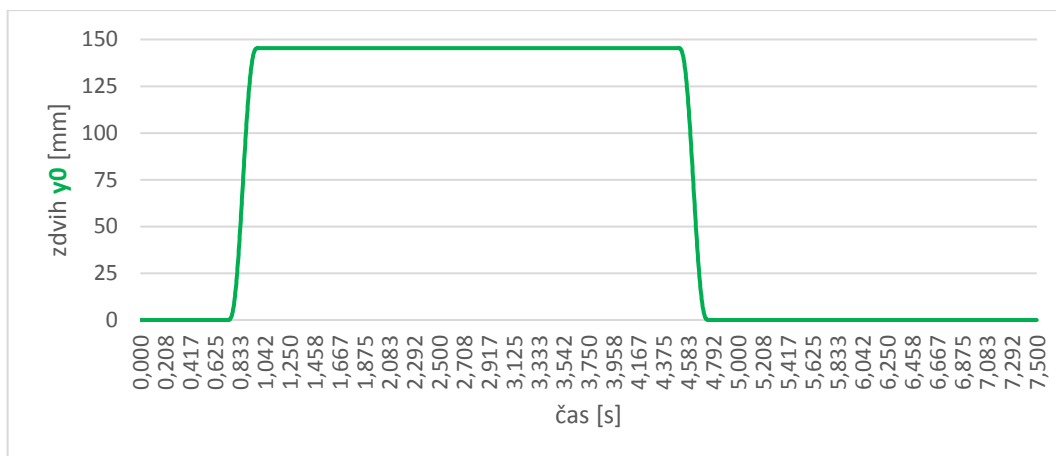
Označení	Frekvence [CPM]					Zdvih [mm]	Pozn.
	10	15	20	25	30		
F1	10	15	20	25	30	500	- s kmitající zátěží a bez zátěže - s kmitající a upevněnou zátěží
F2	10	15	20	25	30	500	
F3	10	15	20	25	30	500	- s kmitající zátěží a bez zátěže
	35	36	40	45			
F4	6	7	8			145	
F5-1	6	7	8			145.38	
F5-2	6	7	8			145.38	
F5-3	- zdv. křivka pouze pro simulace a teoretické testy, odezva reálného systému nebyla měřena						
F6	6	7	8	10		145.38	

F6-2	6	8	10			145.38	
F6-3 F6-4 F6-5 F6-6	- zdv. křivky pouze pro simulace a teoretické testy, odezva reálného systému nebyla měřena						
F6-7	6	8	10			145.38	- s kmitající a upevněnou zátěží
F7-1 F7-2 F7-3	- zdv. křivky pouze pro simulace a teoretické testy, odezva reálného systému nebyla měřena						
F8-1	6	8	10			44	
F8-2	6	8	10			42	
F8-3	- zdv. křivka pouze pro simulace a teoretické testy, odezva reálného systému nebyla měřena						
F8-4	6	8	10	15	20	145.38	- s kmitající a upevněnou zátěží
F9-1	6	8	10			140	
F9-2	6	8	10			140	
F10-1	6	8	10			140	- se zapnutou a vypnutou vazbou
F10-2	6	8	10			145	- se zapnutou a vypnutou vazbou
F11-1	6	8	10			135	- s kmitající a upevněnou zátěží
F11-2	6	8	10			135	- s kmitající a upevněnou zátěží

Na následujících obr. 12-5 a 12-6 jsou uvedeny grafy zdvihu, rychlosti a zrychlení pro dvě vybrané zdvihové křivky, které mají největší dynamické účinky. A sice základní zdvihová křivka F1 se zdvihem 500 mm a se třemi částmi, popsány výše. Změna polohy z jedné krajní úvratě do druhé krajní úvratě je pro zdv. křivku F1 a frekvenci 25 CPM provedena během časového intervalu 0,4 s. Druhou vybranou zdv. křivkou je F6 se zdvihem 145.38 mm, u které ke změně polohy z jedné krajní úvratě do druhé pro frekvenci 8 CPM dochází během 0.2 s. Grafy a průběhy naměřených a vypočtených jednotlivých elektrických a mechanických veličin jsou zaznamenány a zobrazeny v závislosti na čase (v sekundách).



Obr. 12-5 – Zdvihová křivka F1 (zdvih  $y_0$ , rychlost  $y_1$  a zrychlení  $y_2$ ) s polynomicou, harmonickou a parabolickou částí, frekvence 25 CPM, maximální zdvih 500 mm



Obr. 12-6 – Zdvihová křivka F6 (zdvih y0, rychlost y1 a zrychlení y2) s největší dynamikou, frekvence 8 CPM, maximální zdvih 145.38 mm

Se čtenářovým svolením si dovoluji poznamenat, že detailní rozbor a popis všech výše popsaných vlivů a provedených měření a vyhodnocení by až příliš přesáhl rozsah této disertační práce. Z tohoto důvodu nejsou některé závěry a výstupy z měření v práci uvedené a jsou použity pro další výzkum a vývoj ve formě kapitol v knihách příp. monografiích nebo příspěvků odborných článků příp. konferencí.

## 12.2. Měřené, vyhodnocené a porovnávané veličiny

V kapitole je popsáno, které veličiny a jakým způsobem byly na výše popsaném zkušebním zařízení měřeny a verifikovány a následně vyhodnoceny a porovnány. Kapitola je rozdělena do podkapitol na elektrické a mechanické měřené veličiny. Všechny veličiny byly měřeny a zaznamenávány synchronně jednotlivými moduly modulárního měřicího analyzátoru DEWETRON DEWE-5000, v. č. 706030221, inv. č. 99415 [36]. Spínací frekvence napětí měniče byla 10,668 kHz, vzorkovací frekvence měření byla 200 kHz. Pro ušetření výpočetního času procesoru počítače a zrychlení práce a manipulace s daty byla naměřená data po prvotních výpočtech a vykreslení elektrických veličin redukována 40x, tj. na frekvenci 5 kHz. Výpočty, vyhodnocení a porovnávání byla provedena pomocí softwaru Wolfram Mathematica.

V tab. 12-3 je uveden přehled všech měřených veličin, které byly při jednotlivých testech a měření prováděných na zkušebním zařízení synchronně zaznamenávány analyzátozem DEWETRON a následně vyhodnoceny. Veličiny Laser Pravý (kanál AI 8) a Laser Levý (kanál AI 9) byly měřeny, zaznamenávány a vyhodnoceny pouze pro některá určitá konkrétní měření.

Tab. 12-3 Přehled všech měřených veličin (označení kanálů analyzátoru DEWETRON)

Kanál	Veličina	Kanál	Veličina
	Časová základna	(AI 8)	Laser Pravý
AI 0	Zrychlení motoru (Acc 4383)	(AI 9)	Laser Levý
AI 1	Analog. Motor Speed (měnič)	AI 10	Napětí V
AI 2	Zrychlení odpruž. hmoty (Acc Mass 4383)	AI 11	Napětí W
AI 3	Analog. Torque (měnič)	0	Zdvih (DMU)
AI 4	Napětí U	1	Rychlost (DMU)
AI 5	Proud U	2	Zrychlení (DMU)
AI 6	Proud V	3	K-pulsy
AI 7	Proud W		

Pro potřeby výpočtů, vyhodnocení a porovnání naměřených dat byla tabulka měřených veličin upravena, jednotlivá data přeuspořádána a doplněna o další veličiny, jak je popsáno a ukázáno v následující tab. 12-4. Protože však pro některá měření, jak je popsáno v předešlém odstavci a tabulce, byly kanály rozšířeny a tím měřicí místa doplněna o dva laserové snímače zdvihu v úvratích, byla čísla kanálů adekvátně doplněna a posunuta (platí pro originální kanály 16 – 31).

Tab. 12-4 Přehled všech vyhodnocených a porovnávaných veličin (označení kanálů v softwaru Wolfram Mathematica)

Kanál	Veličina	Jednotka	Pozn.
1	Časová základna	[s]	
2	Zdvih motoru (DMU)	[mm]	Kanál 0
3	Rychlost motoru (DMU)	[m/s]	Kanál 1
4	Zrychlení motoru (DMU)	[m/s <sup>2</sup> ]	Kanál 2
5	Zrychlení motoru	[m/s <sup>2</sup> ]	Kanál AI 0



6	Zrychlení odpr. hmoty	[m/s <sup>2</sup> ]	Kanál AI 2
7	K-pulsy	[-]	Kanál 3
8	Napětí U	[V]	Kanál AI 4
9	Napětí V	[V]	Kanál AI 10
10	Napětí W	[V]	Kanál AI 11
11	Proud U	[A]	Kanál AI 5
12	Proud V	[A]	Kanál AI 6
13	Proud W	[A]	Kanál AI 7
14	Analog Motor Speed (měnič)	[m/s]	Kanál AI 1
15	Analog Torque (měnič)	[V/100%]	Kanál AI 3
(16)	Laser Pravý	[mm]	Kanál (AI 8)
(17)	Laser Levý	[mm]	Kanál (AI 9)
16 (18)	Rychlost motoru	[m/s]	Počítáno z dat AI 0
17 (19)	Zdvih motoru	[mm]	Počítáno z dat AI 0
18 (20)	Rychlost odpr. hmoty	[m/s]	Počítáno z dat AI 2
19 (21)	Zdvih odpr. hmoty	[mm]	Počítáno z dat AI 2
20 (22)	Relat. zrychl. odpr. hmoty	[m/s <sup>2</sup> ]	Počítáno z dat AI 0 a AI 2
21 (23)	Relat. rychl. odpr. hmoty	[m/s]	Počítáno z dat AI 0 a AI 2
22 (24)	Relat. zdvih odpr. hmoty	[mm]	Počítáno z dat AI 0 a AI 2
23 (25)	Příkon U	[W]	Počítáno z dat AI 4 a AI 5
24 (26)	Příkon V	[W]	Počítáno z dat AI 10 a AI 6
25 (27)	Příkon W	[W]	Počítáno z dat AI 11 a AI 7
26 (28)	Celkový příkon	[W]	Počítáno z dat 23, 24, 25
27 (29)	Časová základna itC	[s]	Počítaný interval max počtu celých cyklů s počátkem v nule časové základny
28 (30)	Vypočtený zdvih odpr. hmoty	[mm]	Teoretický výpočet ze známých parametrů
29 (31)	Vypočtená rychl. odpr. hmoty	[m/s]	Teoretický výpočet ze známých parametrů
30 (32)	Vypočtené zrychl. odpr. hmoty	[m/s <sup>2</sup> ]	Teoretický výpočet ze známých parametrů

V následujících jednotlivých podkapitolách hlavní části práce a na obrázcích jsou zobrazeny naměřené a vyhodnocené průběhy elektrických a mechanických veličin pro zdvihovou křivku F1. Odchylky zdvihu jsou zobrazeny pro některé vybrané zdvihové křivky. Grafy průběhů elektrických a mechanických veličin pro další zdvihové křivky jsou uvedeny v příloze A.2 resp. A.3.

### 12.2.1. Elektrické veličiny

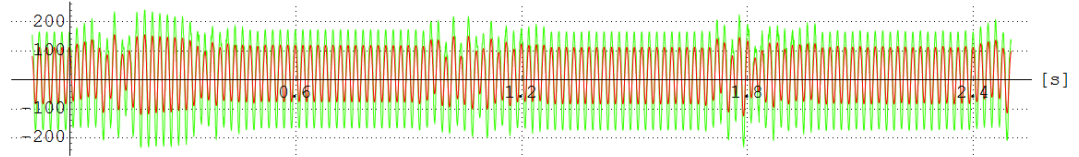
Měřenými, vyhodnocenými a porovnávanými elektrickými veličinami jsou:

- Napětí fáze U
  - přímo měřeno na výstupu z terminálu vysokonapěťovým modulem DAQP-HV 0 ..  $\pm 1400\text{V}$ , DEWETRON kanál AI 4,
- Napětí fáze V
  - přímo měřeno na výstupu z terminálu vysokonapěťovým modulem DAQP-HV 0 ..  $\pm 1400\text{V}$ , DEWETRON kanál AI 10,
- Napětí fáze W
  - přímo měřeno na výstupu z terminálu vysokonapěťovým modulem DAQP-HV 0 ..  $\pm 1400\text{V}$ , DEWETRON kanál AI 11,
- Proud fáze U
  - měřeno na výstupu z terminálu klešťovou proudovou sondou Chauvin Arnoux E3N připojenou na modul DAQP-STG 0.1 .. 1000 mV/V, DEWETRON kanál AI 5,
- Proud fáze V
  - měřeno na výstupu z terminálu klešťovou proudovou sondou Chauvin Arnoux E3N připojenou na modul DAQP-STG 0.1 .. 1000 mV/V, DEWETRON kanál AI 6,
- Proud fáze W
  - měřeno na výstupu z terminálu klešťovou proudovou sondou Chauvin Arnoux E3N připojenou na modul DAQP-STG 0.1 .. 1000 mV/V, DEWETRON kanál AI 7

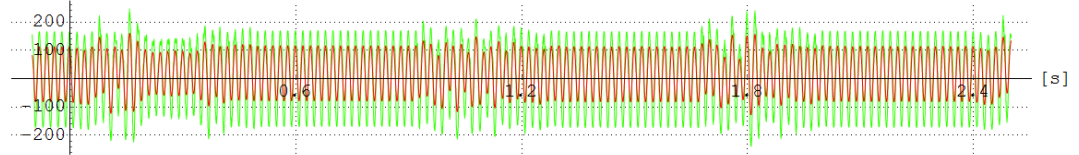
Z měřených a vyhodnocovaných průběhů elektrických veličin byly postprocesingem počítány příkony jednotlivých fází a celkový příkon motoru.

Na grafech průběhů naměřených a vyhodnocených napětí fází U, V, W na obr. 12-7 je možné si všimnout, že průběh napětí je trvale, tzn. v časových úsecích změny polohy i v úsecích klidu primární části motoru, sinusový a ve vazbě pro držení požadované polohy. Pouze v době změny polohy z jedné úvratě do druhé, je na původní sinusový průběh namodulován další průběh, odpovídající průběhům vyvolaným změnami polohy. Z porovnání průběhů a výsledků měření je patrné, že tento „trvalý“ sinusový charakter průběhů napětí je stálý pro jakékoli měření, tzn. pro měření podle všech zdvihových křivek, viz obrázky a vyhodnocení v příloze A.2. Na grafech průběhů proudů jednotlivých fází U, V, W pro zdvihovou křivku F1 je možné rozpoznat, jak jsou proudy ovlivněny v době změny polohy. A to konkrétně v průběhu „rozběhu“ primární části lineárního motoru z počáteční klidové polohy odpovídající levé úvratě (časový interval zhruba od 0 do 0.3 s) resp. reversaci tohoto průběhu v době brždění („doběhu“) do koncové klidové polohy odpovídající pravé úvratě (časový interval zhruba od 0.3 do 0.5 s).

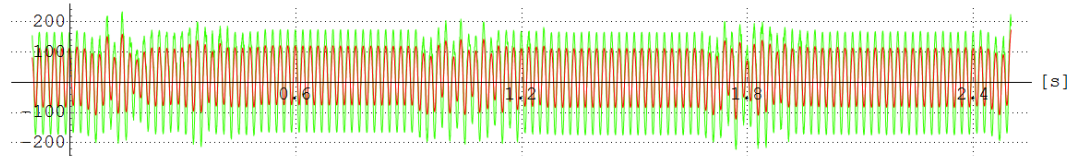
8-Napětí U [V] - Meas383\_25C\_F1



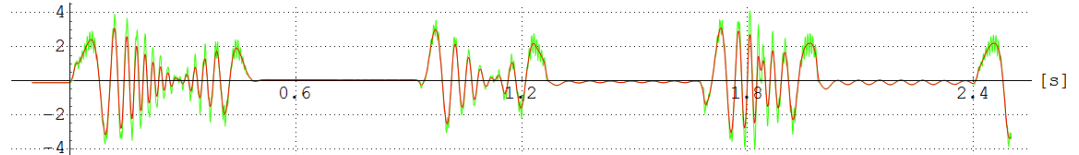
9-Napětí V [V] - Meas383\_25C\_F1



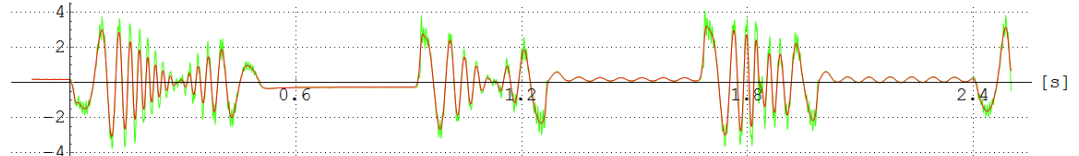
10-Napětí W [V] - Meas383\_25C\_F1



11-Proud U [A] - Meas383\_25C\_F1



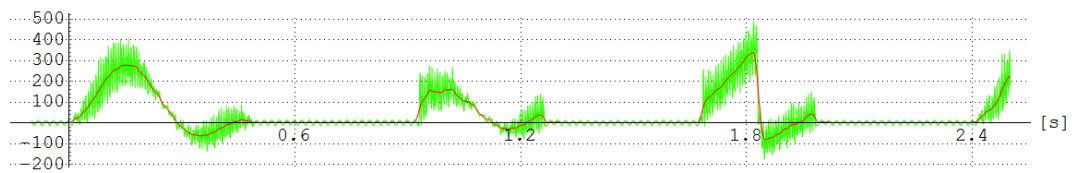
12-Proud V [A] - Meas383\_25C\_F1



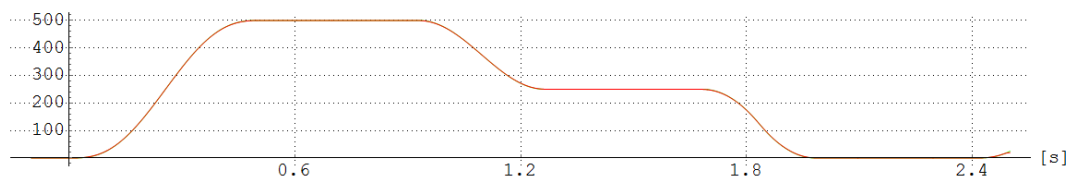
13-Proud W [A] - Meas383\_25C\_F1



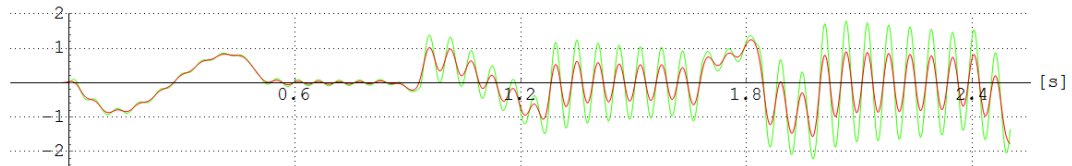
28-celkový příkon [W] - Meas383\_25C\_F1



19-zdvih motoru [mm] - Meas383\_25C\_F1



24-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas383\_25C\_F1



Obr. 12-7 Grafy průběhů naměřených a vyhodnocených elektrických veličin, z klidové polohy po doběh prvního cyklu, měření Meas383\_25C\_F1, frekvence 25 CPM, zdvih 0 – 500 mm, zeleně naměřené průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů a zdvih přes 13 bodů

## 12.2.2. Mechanické veličiny

Měřenými, vyhodnocenými a porovnávanými mechanickými veličinami jsou:

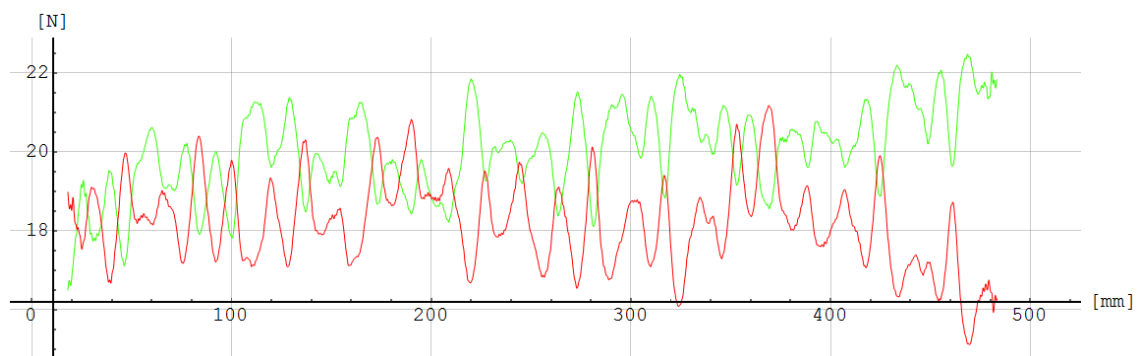
- Zrychlení dynamicky (pružně) uložené (kmitající) hmoty na plochých pružinách
  - snímač zrychlení Brüel&Kjaer 4383, s. č. 1300717, citlivost  $3.18 \text{ pC/m.s}^{-2}$ ,
  - zesilovač Kistler Typ 5015 (2Y), s. č. 1611517,
  - měřeno modulem DAQP-V-B 0 ..  $\pm 50\text{V}$ , DEWETRON kanál AI 2,
- Zrychlení primární části motoru
  - snímač zrychlení Brüel&Kjaer 4383, s. č. 11933, citlivost  $3.101 \text{ pC/m.s}^{-2}$ ,
  - zesilovač Kistler Typ 5018 (3X), s. č. 4207131,
  - měřeno modulem DAQP-V-B, DEWETRON kanál AI 0,
- Poloha a rychlost primární části motoru
  - lineární pravítko Renishaw RSLM-SS-20U3A-1030-A, [34], č. A-9682-1030, s. č. 73A943, délka 1030mm, tepelná roztažnost  $10.8 \pm 0.2 \mu\text{m/m/}^\circ\text{C}$ , stupeň přesnosti  $\pm 2.2 \mu\text{m}$ , rozpětí chyb  $\pm 1.16 \mu\text{m}$ ,
  - snímací (čtecí) hlavička Renishaw Signum SR030A, s. č. 9K7141,
  - systém Renishaw Signum encoder Si-NN-0020-40-0-FN-403-003-3, [35], č. A-9572-1102-05, s. č. 58U906, DEWETRON DMU kanál A,
- Analogový signál rychlosti z měniče Yaskawa
  - přímo měřeno na konektoru terminálu servopacku SGDv modulem DAQP-V-B 0 ..  $\pm 50\text{V}$ , DEWETRON kanál AI 1,

- Analogový signál momentu z měniče Yaskawa
  - přímo měřeno na konektoru terminálu servopacku SGDV modulem DAQP-V-B 0 ..  $\pm 50V$ , DEWETRON kanál AI 3,
- Nulové pulsy (K-pulsy) z lineárního pravítka Renishaw
- Laser Pravý (pravá krajní úvrať)
  - laserový snímač zdvihu Micro-Epsilon optoNCDT ILD2220-20, ser. č. 0512535
  - měřeno modulem DAQP-STG 0.1 .. 1000 mV/V, DEWETRON kanál AI 8,
- Laser Levý (levá krajní úvrať)
  - laserový snímač zdvihu Micro-Epsilon optoNCDT ILD2220-20, ser. č. 0512534
  - měřeno modulem DAQP-STG 0.1 .. 1000 mV/V, DEWETRON kanál AI 9

Ze změřených zrychlení byly výpočetními operacemi (dvojitou integrací s korekcemi) určeny rychlost a zdvih primární pohyblivé části a dynamické kmitající hmoty na pružinách spolu s odečtením jejich relativních průběhů pro vzájemné posouzení a porovnání.

Na základě známých rozměrů a přesně zvážených hmotností jednotlivých částí systému (dynamické hmoty, pružin, držáků, aj.), jak je uvedeno v kap. 11, byly počítány teoretické průběhy veličin.

Na obr. 12-8 je graf středního statického průběhu absolutně vzatých odporů při pohybu v kladném (zeleně) a záporném (červeně) směru jako funkce zdvihu. Síla je kreslena pro rozsah zdvihu od 18 do 483.3 mm (465.3 mm), celkový zdvih je 501.3 mm, v popisu obrázku jsou vypsány minimální, maximální a střední odpor v kladném a záporném směru. Z vyobrazeného grafu je patrné, že hlavní kmity korigované síly jsou při opačném běhu v protifázi. Z toho lze usuzovat, že jsou způsobeny ve stejných místech působícími pasivními odpory vedení lineárního motoru.



*Obr. 12-8 – Střední statický průběh absolutně vzatých pasivních odporů při pohybu v kladném (zeleně) a záporném (červeně) směru jako funkce zdvihu. Síla je kreslena pro rozsah zdvihu od 18 do 483.3 mm (465.3 mm), celkový zdvih je 501.3 mm. Minimální, maximální a střední odpor v kladném směru je {16.5, 22.5, 20} [N], v záporném směru {15.1, 21.2, 18.2} [N] (měření Test\_31, frekvence 25 CPM)*

Pro orientační určení a změření pasivních odporů (sil) lineárního vedení mezi primární a sekundární částí zkušebního zařízení bylo provedeno měření s použitím ručního digitálního siloměru. Při tomto měření byl posuv primární pohyblivé části bez zátěže a bez přidaných držáků, snímačů a senzorů po celé délce zdvihu vyvolán tlakem na desku pohyblivé části, přičemž

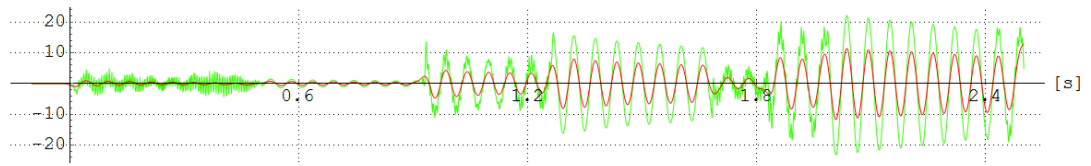
byla zaznamenávána maximální hodnota síly po celé délce zdvihu. Toto měření bylo provedeno pro oba lineární motory při vypnutém měniči a pro varianty s připojeným a odpojeným konektorem konvertoru, hodnoty jsou uvedeny v tab. 12-5. Z přehledu výsledků jsou patrné vyšší hodnoty těchto odporů při měření s připojeným konektorem konvertoru. Pravděpodobným důvodem těchto vyšších naměřených hodnot je vliv indukovaného napětí v připojeném stavu konektoru konvertoru.

Tab. 12-5 Výsledky orientačního měření pasivních odporů (síla F [N])  
ručním digitálním siloměrem Sauter FK100, výr. č. ISWD1402313

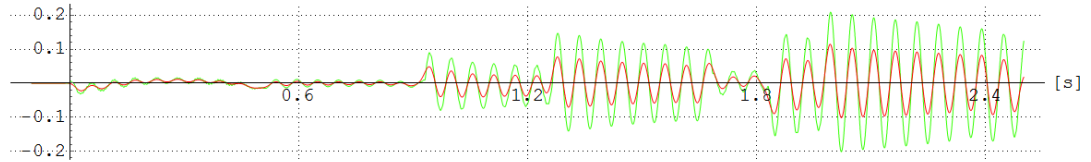
Měření samostatně	SGT-C-F35A120-...		SGT-C-F50D380-...	
	F [N]		F [N]	
	s připojeným konektorem konvertoru	s odpojeným konektorem konvertoru	s připojeným konektorem konvertoru	s odpojeným konektorem konvertoru
Měření 1	31,9	23,9	48,05	27,65
Měření 2	31,2	20,15	63,55	34,1
Měření 3	29,4	20,35	58,45	36,6
Měření 4	29	20,15	65,2	29,95
Měření 5	32,1	19,65	64,1	28,95
MAX	32,1	23,9	65,2	36,6
MIN	29	19,65	48,05	27,65
PRŮMĚR	30,72	20,84	59,87	31,45

Na obr. 12-9 jsou grafy průběhů naměřených a vyhodnocených mechanických veličin pro zdvihovou křivku F1, frekvenci 25 cyklů/min s maximálním možným zdvihem 500 mm pro časový interval před rozběhem prvního cyklu po část úseku (rozběh) druhého cyklu. Na tomto obrázku je možné si všimnout, jak dynamická hmota vlivem setrvačnosti v klidové poloze má sinusový průběh s drobnými namodulovanými kmity oproti průběhům dalších zdvihů. Na obr. 12-10 jsou pro stejné měření ozn. Meas383\_25C\_F1 vyobrazeny grafy naměřených a vyhodnocených veličin pro časový interval před koncem (doběhem) prvního cyklu po část úseku (rozběh) třetího cyklu. Při porovnání průběhů na těchto obrázcích je patrné, jak na průběhy veličin pro druhý a další cyklus jsou již namodulované kmity dynamické kmitající hmoty z předešlého cyklu, které mají vliv na chování systému a vlastní polohu a chování dynamicky (pružně) uložené kmitající hmoty.

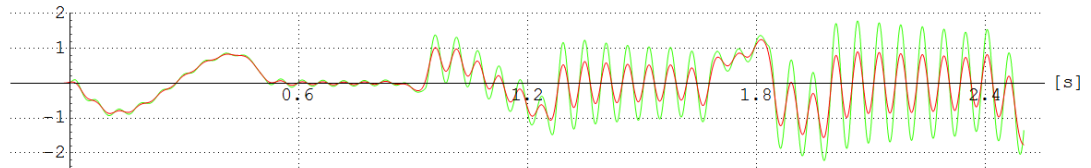
22-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas383\_25C\_F1



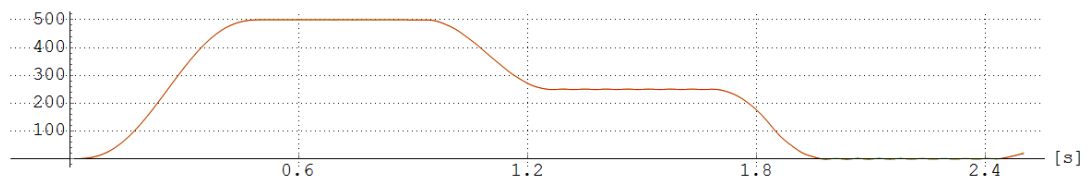
23-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas383\_25C\_F1



24-rel.zdvih.odpruž.hmoty [mm] - Meas383\_25C\_F1

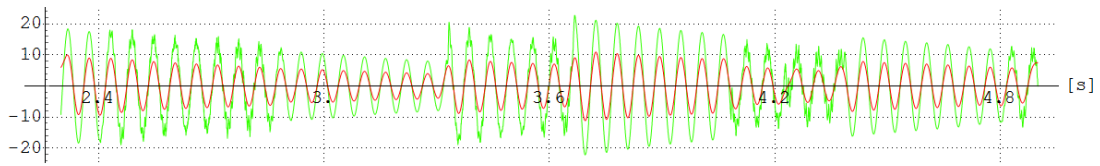


21-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas383\_25C\_F1

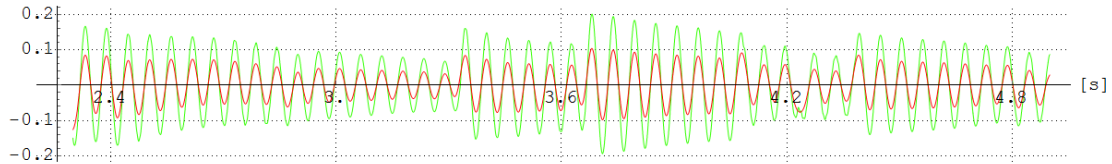


Obr. 12-9 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihové křivky F1 (měření Meas383\_25C\_F1, frekvence 25 CPM, časový interval z klidové polohy po rozběh druhého cyklu, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

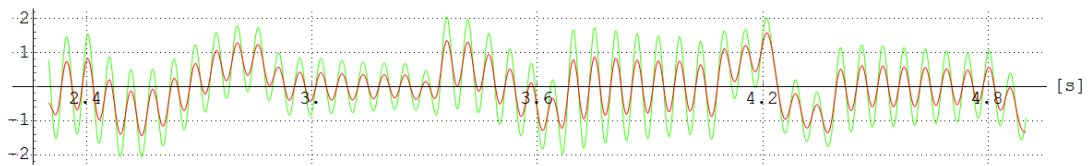
22-rel. zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas383\_25C\_F1



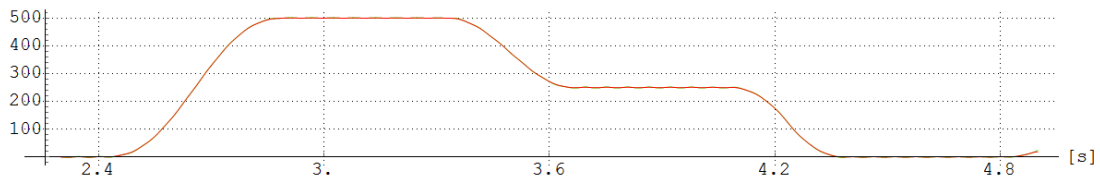
23-rel. rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas383\_25C\_F1



24-rel. zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas383\_25C\_F1



21-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas383\_25C\_F1



**Obr. 12-10** Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka F1 (měření Meas383\_25C\_F1, frekvence 25 CPM, časový interval z klidové polohy na konci prvního cyklu po rozběh třetího cyklu, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

### 12.2.3. Potlačení reziduálních kmitů

Součástí disertační práce je i praktické ověření dynamického chování pohonu s dvojhmotovou zátěží. Obsahuje-li zátěž pružné členy, vyskytnou se na zátěži parazitní kmity. Teoretický rozbor chování tohoto pohonu je uveden v kapitole 7. Pro toto ověřování byl pružný člen (dynamická kmitající hmota) vybaven snímačem zrychlení, aby bylo možno ověřit funkčnost navržené metody potlačení reziduálního kmitání. Popis pružného členu je uveden v kapitole 11. Pro potlačení reziduálních kmitů byla použita metoda „Input Shaping“.

Při praktických ověřováních metody „Input Shaping“ bylo zjištěno, že systém Yaskawa je citlivý na rychlé změny zrychlení. Bylo proto nutno metodu „Input Shaping“ modifikovat tak, aby se systém Yaskawa nedostával do chybového stavu. Tvarovaná zdvihová křivka byla proto dodatečně upravena pomocí integračního členu se zpožděním 1. řádu.

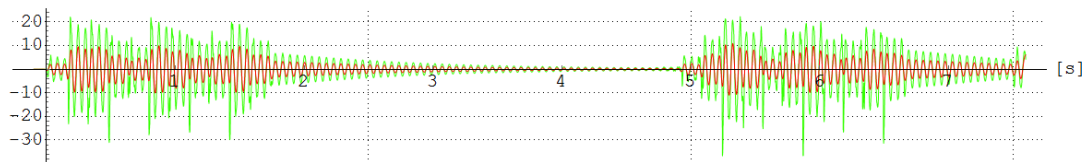
$$F(s) = \frac{1}{1+\tau s} \quad (12.1)$$



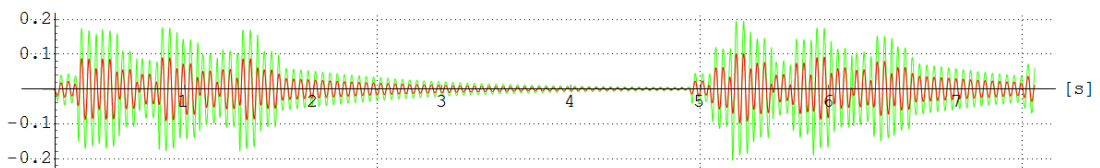
Poznamenejme, že konstantu  $\tau$  je nutno volit podle maximální hodnoty přípustného zrychlení systému.

Na obr. 12-11 a 12-12 jsou výsledky měření a vyhodnocení veličin relativního zrychlení, rychlosti a zdvihu odpružené hmoty spolu se zdvihem odpružené hmoty na lineárním motoru Yaskawa s užitím zdvihových křivek F9-1 a F9-2. Jejich simulované průběhy spolu s detailem měřených frekvencí křivek a dalšími informacemi jsou popsány v předešlých kapitolách resp. podkapitolách. Na obr. 12-11 je možné na průběhu 19-zdvih odpruž. hmoty [mm] si všimnout, že naměřený a vyhodnocený zdvih odpružené hmoty má nehladký („kotrbatý“) průběh v úsecích dynamické změny polohy z jedné úvratě do druhé. Takto zkreslený průběh je možné vysvětlit setrvačností odpružené hmoty v určité poloze, kdy odpružená hmota kmitá s definovaným zpožděním oproti budicímu pohybu primární části motoru.

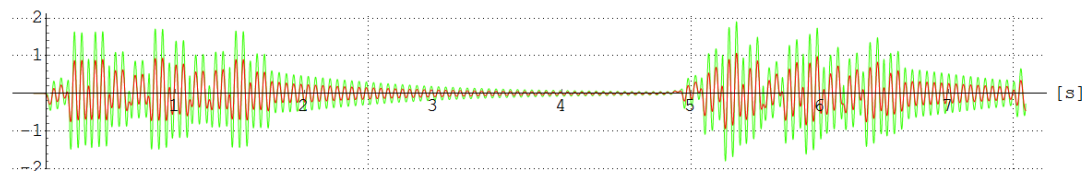
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s^2] - Meas160\_8C\_F9-1



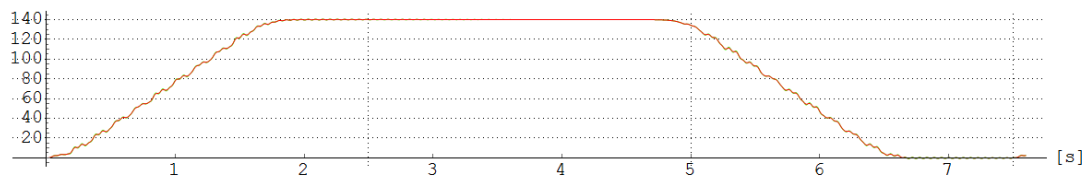
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas160\_8C\_F9-1



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas160\_8C\_F9-1

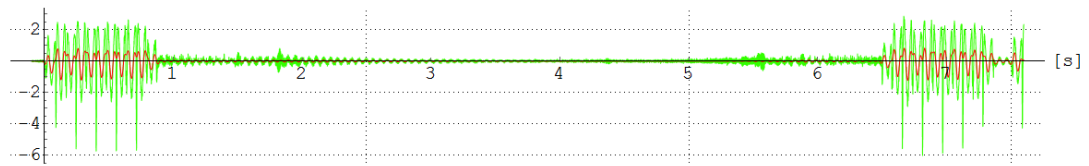


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas160\_8C\_F9-1

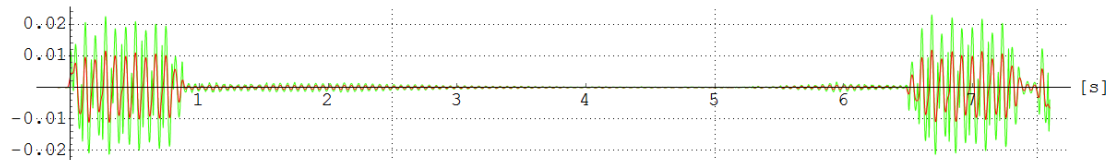


Obr. 12-11 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty **s použitím korekce** podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru je  $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvihová křivka F9-1 (měření Meas160\_8C\_F9-1, frekvence 8 CPM, zeleně redukována naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

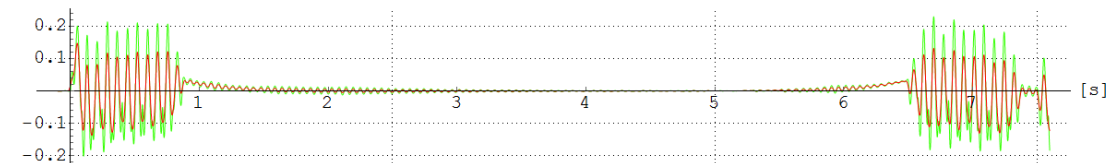
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas163\_8C\_F9-2



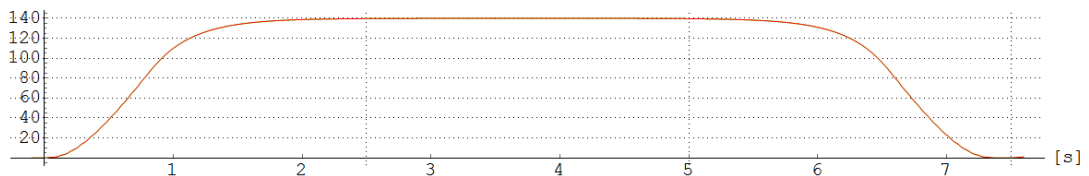
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas163\_8C\_F9-2



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas163\_8C\_F9-2



19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas163\_8C\_F9-2



Obr. 12-12 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty **s použitím korekce** podle Input Shaping, použitá přenosová funkce korekčního filtru je  $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvihová křivka F9-2 (měření Meas163\_8C\_F9-2, frekvence 8 CPM, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

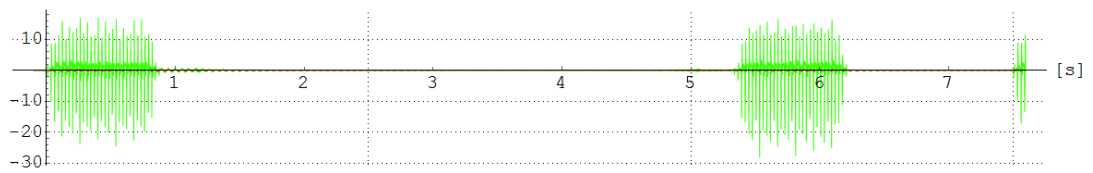
Pomocí simulačních modelů uvedených v kapitole 5 a 7 a praktických měření bylo zjištěno, že je možno amplitudu reziduálních kmitů snížit až o dva řády.

Z průběhu relativního zdvihu odpružené hmoty (obr. 12-11) je možno odečíst amplitudu reziduálních kmitů v ustáleném stavu (0.5 mm). Z průběhu relativního zdvihu odpružené hmoty (obr. 12-12) je možno odečíst amplitudu reziduálních kmitů v ustáleném stavu při použití kompenzace metodou „Input Shaping“ (< 0.01 mm).

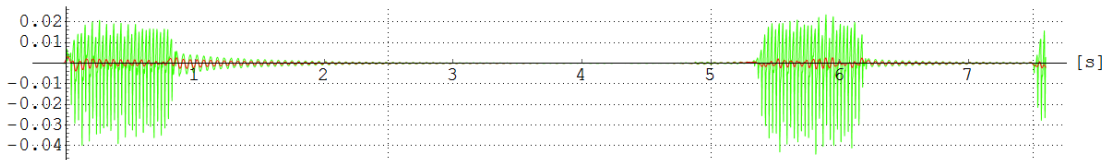
Dále je možno konstatovat dobrou shodu simulačních a praktických měření. Poznamenejme, že při simulačních ověřováních nebyla uvažována konstanta tlumení.

Z porovnání obr. 12-13 (zdvihový křivka F11-1) a obr. 12-14 (zdvihová křivka F11-2) je opět možno posoudit použití metody „Input Shaping“ na potlačení reziduálních kmitů odpružené hmoty.

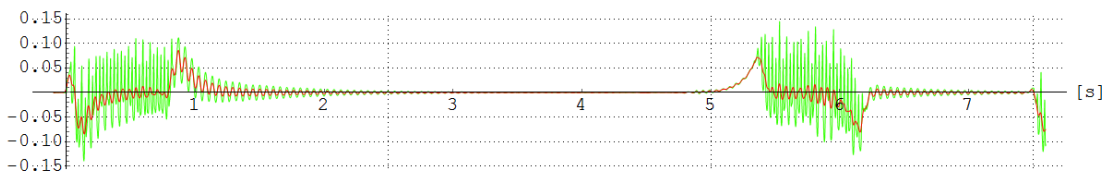
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas370\_8C\_F11-1



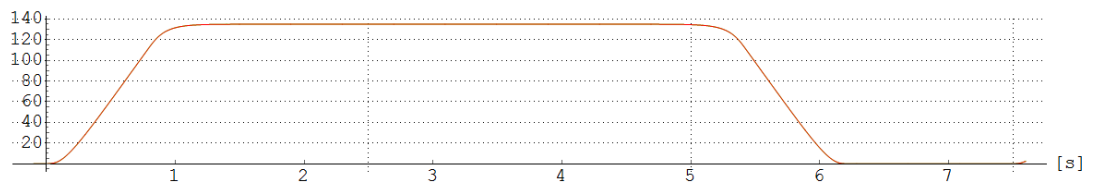
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas370\_8C\_F11-1



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas370\_8C\_F11-1

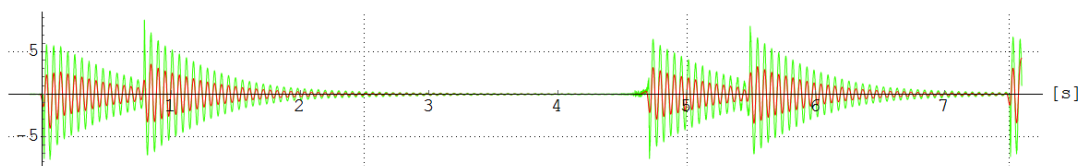


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas370\_8C\_F11-1

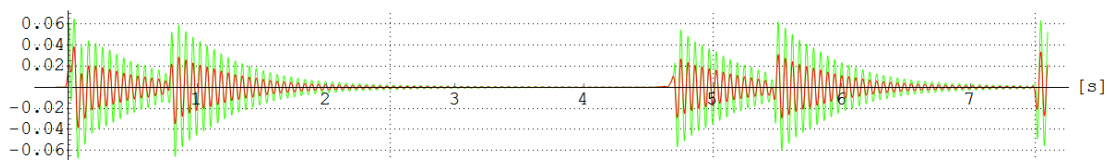


Obr. 12-13 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka **korigovaná**, zdvihová křivka F11-1 (měření Meas370\_8C\_F11-1, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

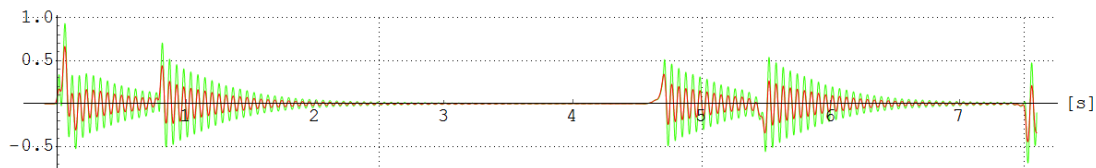
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas372\_8C\_F11-2



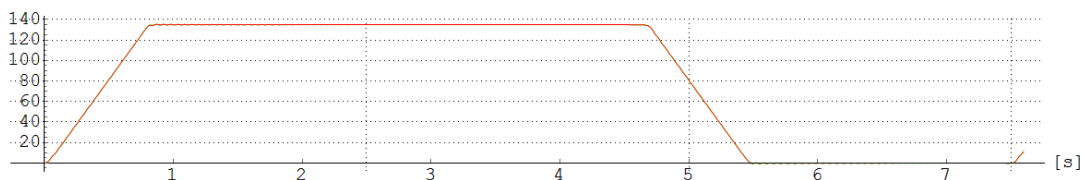
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas372\_8C\_F11-2



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas372\_8C\_F11-2



19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas372\_8C\_F11-2



Obr. 12-14 Grafy průběhů veličin relativního zrychlení, relativní rychlosti, relativního zdvihu odpružené hmoty a zdvihu odpružené hmoty, zdvihová křivka **nekorigovaná**, zdvihová křivka F11-2 (měření Meas372\_8C\_F11-2, zeleně redukovaná naměřená data, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů)

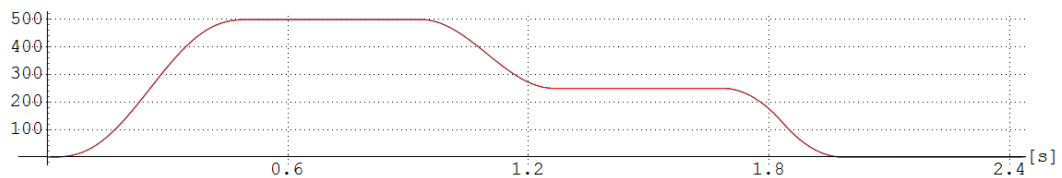
#### 12.2.4. Ověření dynamické a statické chyby polohování

Důležitým parametrem chování lineárního pohonu je dynamická a statická chyba polohování. V rámci disertační práce bylo provedeno měření s různými zdvihovými křivkami a na základě těchto měření stanovena závislost těchto chyb na volbě zdvihové křivky a použití metody „Input shaping“. Pro účely měření bylo zkušební zařízení laboratorního stendu doplněno o dva snímače zrychlení (viz obr. 12-2c). První snímač měřil zrychlení primární (pohyblivé) části lineárního motoru, druhý byl namontován a měřil zrychlení dynamicky (pružně) uložené kmitající hmoty na plochých pružinách. V této a následující kapitole bude popsáno měření na primární části motoru spolu s rozбором dynamické a statické chyby polohování (odchylka 1 a odchylka 2) primární (pohyblivé) části motoru. Poznamenejme, že na pohyblivé části lineárního motoru je pružná hmota, která ovlivňuje chování i primární části motoru.

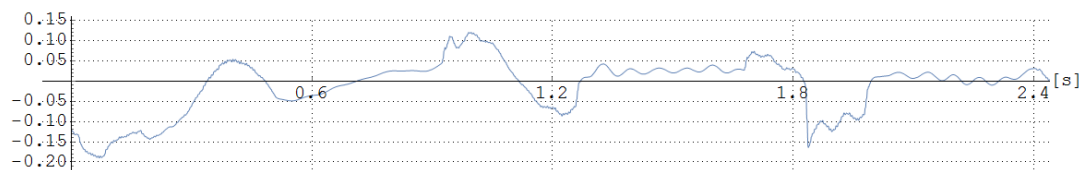
Na obr. 12-15 jsou pro měření s označením Meas383\_25C\_F1 v horní části grafu přes sebe vykreslené tři průběhy zdvihu. A sice upravený vypočtený zdvih primární části motoru spolu s vypočteným zdvihem z rychlosti motoru a dále teoretická zdvihová křivka, která byla použita jako budící zdvihová závislost na vstupu do měniče. V prostřední části je zobrazena odchylka 1 vypočtená jako rozdíl mezi upraveným vypočteným zdvihem motoru a teoretickou zdvihovou

křivkou. V dolní části je průběh odchyly 2, která byla měřena a získána přímo jako výstup (signál) z měniče. Hodnoty veličin získané z měniče nejsou zaznamenávané synchronně s ostatními měřenými veličinami, ale se známou vzorkovací periodou 1 ms jsou systémově uloženy a je možné je dodatečně vyhodnotit a porovnat při postprocessingovém zpracování dat. Při porovnání grafu je patrná téměř shodná tendence průběhu vypočtené odchyly 1 a naměřené odchyly 2. Odchyly 1 je počítána dvojitou integrací signálu zrychlení naměřené snímačem na primární pohyblivé části motoru, a je pravděpodobné, že v měřeném signálu jsou namodulované i kmity dynamicky (pružně) uložené hmoty na pružinách, jejíž uložení je popsáno v úvodu kapitoly 12. Z toho důvodu je možno předpokládat, že reálná chyba bude ve skutečnosti nižší pro zařízení bez dynamické hmoty. V Tab. 12-6 jsou uvedeny statické chyby polohování v časových intervalech jednotlivých „klidových“ stavů resp. úvratí, které byly naměřeny a vypočteny z průběhů odchyly 1 resp. odchyly 2.

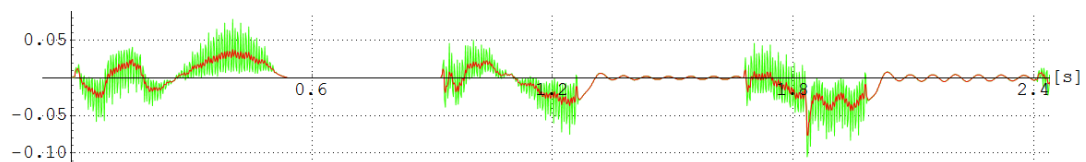
$Zdvih [mm] = (19\text{-zdvih motoru}) \& (zdvih\ ze\ 3\text{-rychlost motoru}) \& (teoretická\ zdvih.\ křivka); \{Meas383\_25C\_F1\}$



$Odchyly\ 1 [mm] = (19\text{-zdvih motoru}) - (teoretická\ zdvih.\ křivka); \{Meas383\_25C\_F1\}$



$Odchyly\ 2 [mm] = (rozdiel\ zdvihu\ motoru\ z\ měniče,\ L1.Position.Monitor.PERR); \{Meas383\_25C\_F1\}$

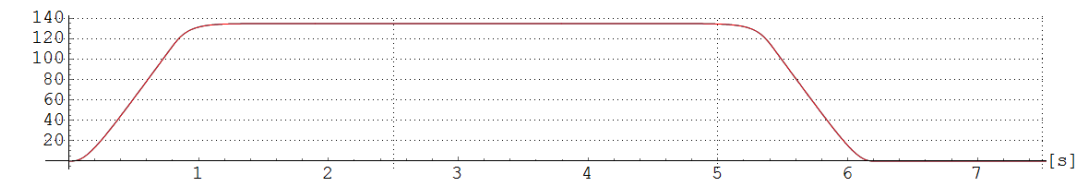


Obr. 12-15 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchyly z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F1 (měření Meas383\_25C\_F1, frekvence 25 CPM, 1. cyklus)

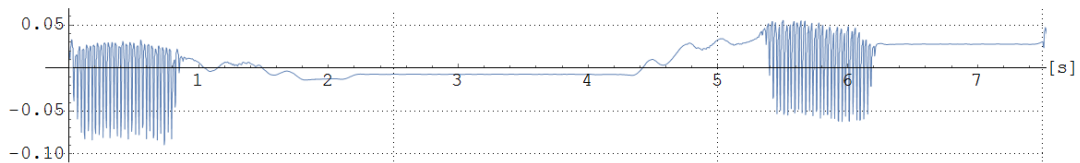
Tab. 12-6 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování (Chyba [mm], měření Meas383\_25C\_F1)

	Časový interval		
	0.52 – 0.92 [s]	1.3 – 1.6 [s]	2.05 – 2.4 [s]
Chyba [mm] (Odchyly 1)	- 0.00312	0.02645	0.00883
Chyba [mm] (Odchyly 2)	0.0009	0.00031	0.00006

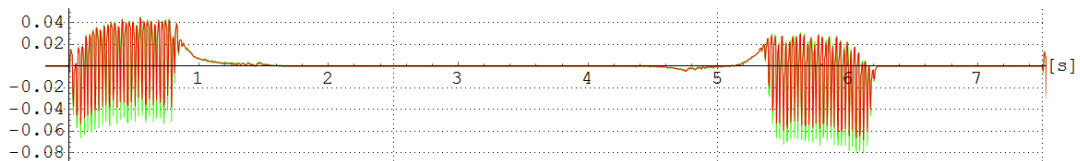
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas370\_8C\_F11-1}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas370\_8C\_F11-1}

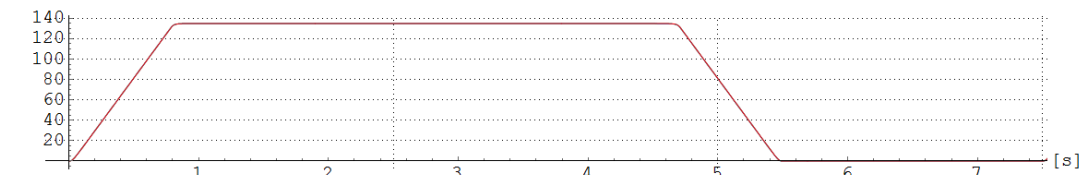


Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR); {Meas370\_8C\_F11-1}

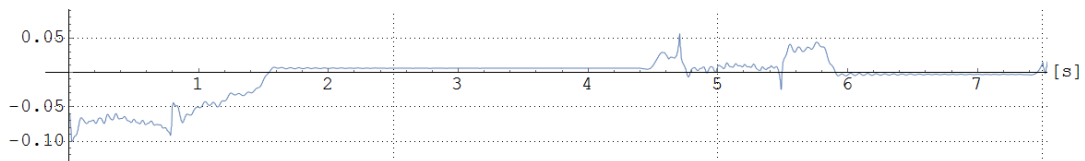


Obr. 12-16 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **korigovaná pomocí IS**, zdvihová křivka F11-1 (měření Meas370\_8C\_F11-1, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)

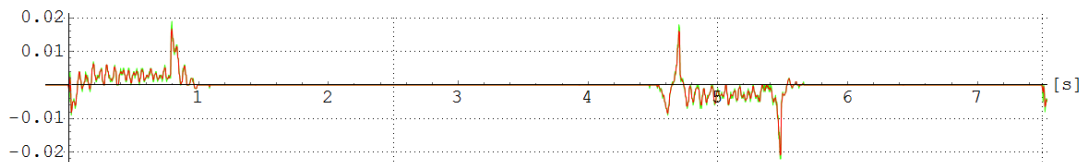
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas372\_8C\_F11-2}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas372\_8C\_F11-2}



Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR); {Meas372\_8C\_F11-2}



Obr. 12-17 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F11-2 (měření Meas372\_8C\_F11-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)

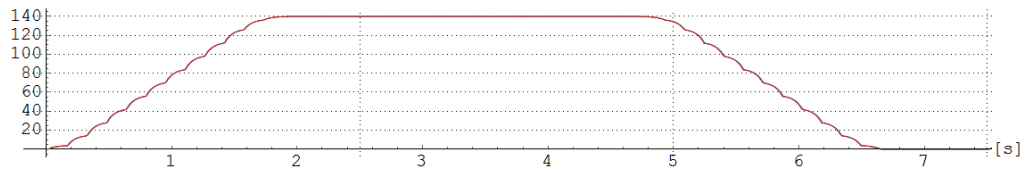
Tab. 12-7 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování  
(Chyba [mm], měření Meas370\_8C\_F11-1, Meas372\_8C\_F11-2)

	Meas370_8C_F11-1		Meas372_8C_F11-2	
	Časový interval			
	1.2 – 5.0 [s]	6.2 – 7.5 [s]	0.98 – 4.55 [s]	5.53 – 7.5 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	- 0.00309	0.02773	- 0.00005	0.00378
Chyba [mm] (Odchylka 2)	- 8.48 x 10 <sup>-6</sup>	- 0.00009	- 4.79 x 10 <sup>-6</sup>	0.00002

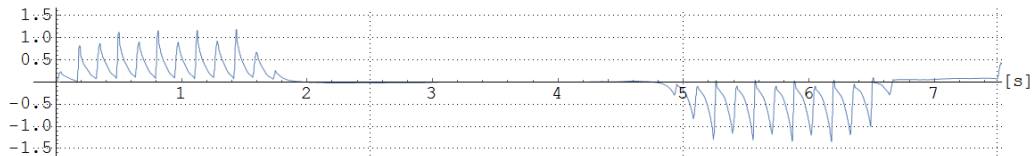
Z průběhu polohové odchylky mezi průběhem zdvihové křivky F11-2 a měřeným průběhem polohy (obr. 12-17) je možno odečíst velikost dynamické chyby (0.005 mm) a statické chyby ( $5 \times 10^{-6}$  mm). Poznamenejme, že v případě použití lineární zdvihové křivky se může dynamická chyba zvětšit až na hodnotu 0.02 mm vlivem nespojitosti zdvihové křivky.

Na obr. 12-18 je obdobně jako v předešlém textu zobrazen průběh zdvihu, odchylky 1 a odchylky 2 pro zdvihovou křivku F9-1 a na obr. 12-19 pro zdvihovou křivku F9-2. Při porovnání těchto grafů a průběhů je možné odečíst, jakým způsobem se změní průběh vypočtené a změřené odchylky pro zdvihovou křivku s použitím korekce podle „Input Shaping“ se dvěma rozdílnými přenosovými funkcemi korekčního filtru. V případě zdvihové křivky F9-1 je velikost dynamické chyby (1.0 mm) a statické chyby (0.004 mm). V případě zdvihové křivky F9-2 je velikost dynamické chyby (0.2 mm) a statické chyby (0.0004 mm). U zdvihové křivky F9-2 s použitím přenosové funkce korekčního filtru  $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$  dynamická chyba klesla 5x, statická chyba klesla 10x oproti zdvihové křivce F9-1 s použitím přenosové funkce korekčního filtru  $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ .

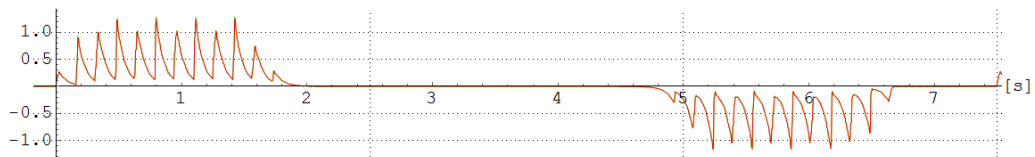
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas160\_8C\_F9-1}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas160\_8C\_F9-1}



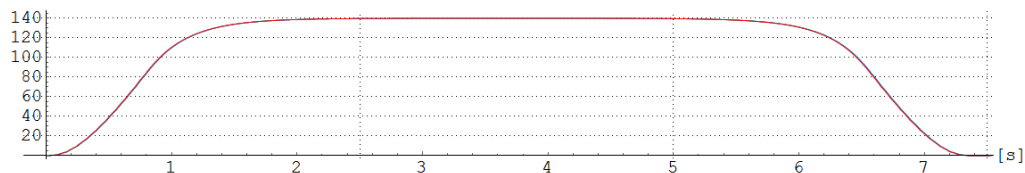
Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR [mm]); {Meas160\_8C\_F9-1}



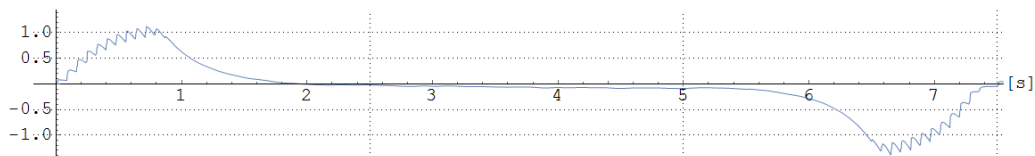
Obr. 12-18 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), s použitím korekce podle Input Shaping, použitá

přenosová funkce korekčního filtru  $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvihová křivka F9-1 (měření Meas160\_8C\_F9-1, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)

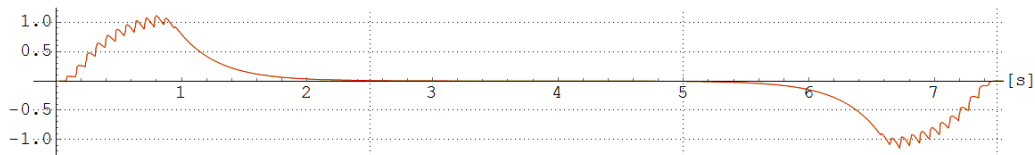
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas163\_8C\_F9-2}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas163\_8C\_F9-2}



Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR [mm]); {Meas163\_8C\_F9-2}



Obr. 12-19 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), s použitím korekce podle Input Shaping, použitá

přenosová funkce korekčního filtru  $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvihová křivka F9-2 (měření Meas163\_8C\_F9-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)



Tab. 12-8 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování  
(Chyba [mm], měření Meas160\_8C\_F9-1, Meas163\_8C\_F9-2)

	Meas160_8C_F9-1		Meas163_8C_F9-2
	Časový interval		
	2.0 – 4.7 [s]	6.74 – 7.5 [s]	1.9 – 5.6 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	- 0.0033	0.06997	- 0.05924
Chyba [mm] (Odchylka 2)	- 0.0002	0.00006	- 0.00038

Z výše uvedených naměřených a vypočtených výsledků je možné odečíst rozdíly a dynamické a statické chyby polohování pro zdvihové křivky s použitím korekce pomocí „Input Shaping“ a pro dvě rozdílné přenosové funkce korekčního filtru, a to  $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$  pro zdv. křivku F9-1 resp.  $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$  pro zdv. křivku F9-2.

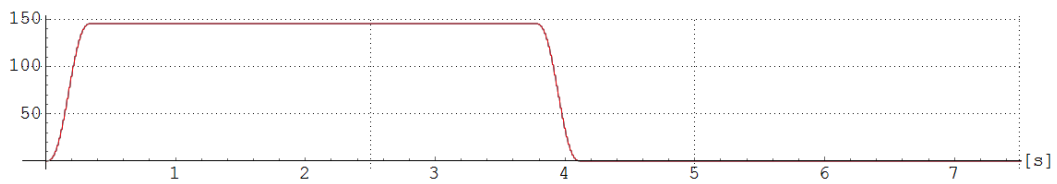
V případě použití zdvihové křivky v průmyslové aplikaci pro různé přesné manipulační příp. polohovací stroje a zařízení (manipulátory, robotické ruce, aj.), je důležité, aby požadované přesné polohy s minimální polohovou chybou v koncovém bodě bylo dosaženo v co možná nejkratším čase. U takové aplikace však nemusí být kladen takový důraz na velikost amplitudy kmitů koncového členu (hmoty na pružinách) v průběhu dynamického děje, tj. při pohybu (změně polohy) z jedné krajní úvratě (poloha A) do druhé (poloha B).

V jiném případě, kdy je zdvihová křivka použita pro různé polohování obrobku příp. řezného nástroje při obrábění, je důležité, aby amplituda kmitů koncového členu (hmoty na pružinách  $\approx$  řezný nástroj  $\approx$  obrobek upnutý na desce stroje) v celém časovém intervalu změny polohy byla minimální. Tím by bylo dosaženo příznivého ovlivnění kvality povrchu finálního obrobku bez případných defektů. V takovém případě je volena zdvihová křivka s minimální amplitudou kmitů v průběhu celého cyklu (změny polohy z jedné úvratě do druhé) v kombinaci s minimálními polohovými chybami v úvratích.

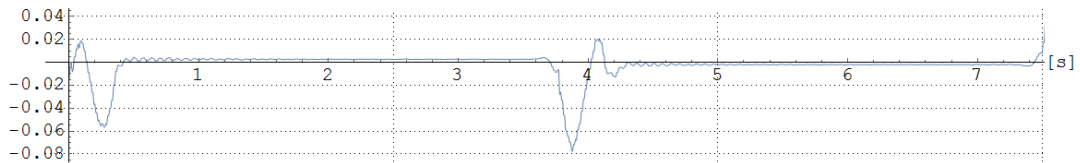
#### 12.2.5. Ověření dynamické a statické chyby polohování při zvýšené dynamice

Dynamické chování pohonu s lineárním motorem při zvýšené dynamice je možno posoudit na základě výsledků měření a vypočtených odchylek 1 a 2 uvedené na obr. 12-20 pro zdvihovou křivku F5-2. V tab. 12-9 jsou uvedeny hodnoty naměřené a vypočtené statické chyby polohování pro křivku F5-2.

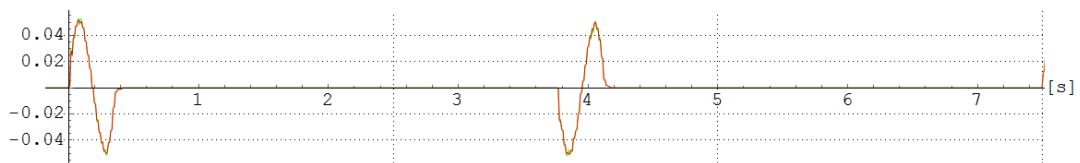
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas117\_8C\_F5-2}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas117\_8C\_F5-2}



Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR [mm]); {Meas117\_8C\_F5-2}



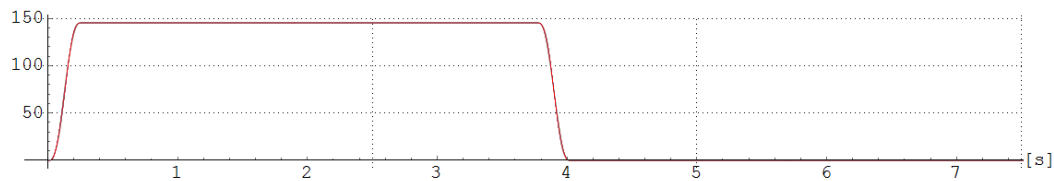
Obr. 12-20 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F5-2 (měření Meas117\_8C\_F5-2, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)

Tab. 12-9 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování (Chyba [mm], měření Meas117\_8C\_F5-2)

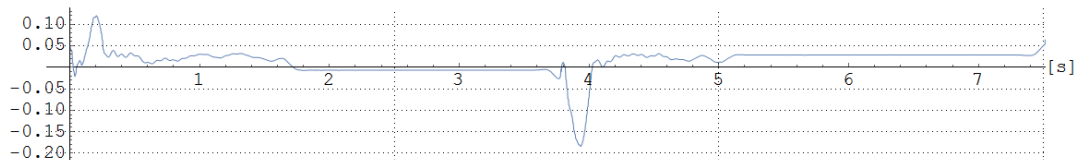
	Časový interval	
	0.38 – 3.75 [s]	4.15 – 7.5 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	0.0025	- 0.00217
Chyba [mm] (Odchylka 2)	- 8.01 x 10 <sup>-6</sup>	8.36 x 10 <sup>-6</sup>

Pro další zdvihovou křivku, a sice F6, je možné dynamické chování pohonu s lineárním motorem posoudit na základě výsledků měření uvedeném na obr. 12-21. Na obr. 12-22 jsou zobrazeny průběhy pro zdvihovou křivku F6-7, na obr. 12-23 jsou zobrazeny průběhy pro zdvihovou křivku F8-4.

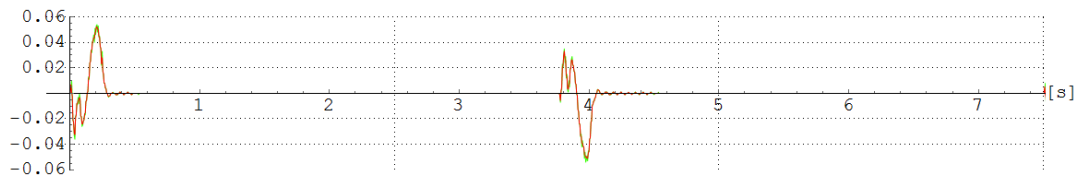
Zdvih [mm] = (17-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas178\_8C\_F6}



Odchylka 1 [mm] = (17-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas178\_8C\_F6}



Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR); {Meas178\_8C\_F6}



Obr. 12-21 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F6 (měření Meas178\_8C\_F6, frekvence 8 CPM, 1. cyklus)

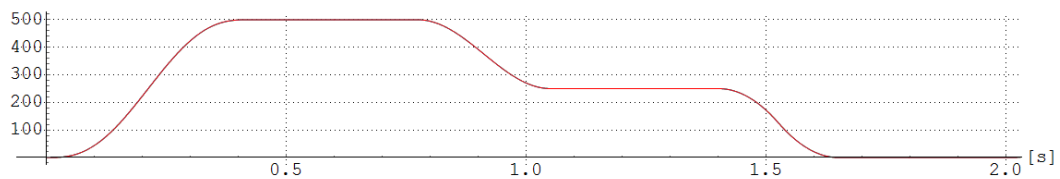
V tab. 12-10 jsou uvedeny hodnoty naměřených a vypočtených statických chyb polohování. Z grafu je možné odečíst velikost dynamické chyby (cca 0.05 mm) a statické chyby ( - 0.00002 resp.  $2.65 \times 10^{-6}$  mm) v pravé resp. levé úvrati. Jak je popsáno výše, rozdíly naměřených a vypočtených velikostí dynamických a statických chyb polohování jsou pravděpodobně způsobené rozdílnými výpočetními postupy. A dále pravděpodobně tím, že na průběh Odchylky 1 vypočtené ze snímače zrychlení na primární pohyblivé části motoru jsou namodulované kmity dynamicky (pružně) uložené hmoty. Oproti tomu Odchylka 2 je měřena a počítána ze signálu z měniče, kde se namodulované kmity z hmoty neprojeví.

Tab. 12-10 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování (Chyba [mm], měření Meas178\_8C\_F6)

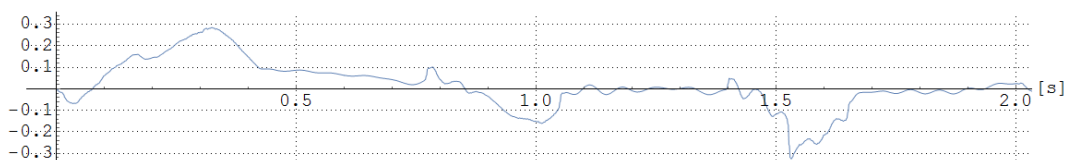
	Časový interval	
	0.28 – 3.78 [s]	4.1 – 7.5 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	0.00504	0.02676
Chyba [mm] (Odchylka 2)	- 0.00002	$2.65 \times 10^{-6}$

Při přípravě a samotném měření odezvy a analýze chování systému pro jednotlivé průběhy na reálném zkušebním zařízení laboratorního stendu bylo zjištěno, že pro zdvihovou křivku F1 s jejími jednotlivými částmi (polynomickou, harmonickou a parabolickou) a zdvih 500 mm je frekvence 30 CPM maximální možnou frekvencí, kdy je systém ještě schopen odezvy bez omezení příp. automatického vypnutí z důvodu sledovaných parametrů rychlosti či momentu. Z tohoto důvodu byla frekvence 30 CPM pro zdvihovou křivku F1 a zdvih 500 mm stanovena jako maximální limitní hodnota. Pro takto určené hodnoty byla provedena měření s dynamicky uloženou kmitající hmotou na pružinách (měření Meas384\_30C\_F1) a s pevně namontovanou hmotou na primární části motoru (měření Meas410\_30C\_F1) pro možnost zjištění a porovnání rozdílů chování systému. Vyhodnocení průběhů zdvihu, odchylky 1 a odchylky 2 primární části motoru je znázorněno na obr. 12-22 resp. 12-23, hodnoty statické chyby polohování jsou pro jednotlivé klidové polohy a úvratě v tab. 12-11 resp. 12-12. Z porovnání průběhů Odchylky 2, změřené a vypočtené jako rozdíl zdvihu motoru z měniče, v časovém intervalu střední klidové polohy (zdvih 250 mm, časový interval 1.1 – 1.4 s) a levé úvratě (zdvih 0 mm, časový interval 1.7 – 2.0 s) je možné si všimnout, jakým způsobem je průběh ovlivněn dynamickou kmitající hmotou na pružinách. Poznamenejme, že Odchylka 1 je počítána a vyhodnocena ze signálu změřeného snímačem zrychlení na primární části motoru, proto její zobrazené průběhy v obou případech měření v popisovaných časových intervalech vykazují drobné kmity.

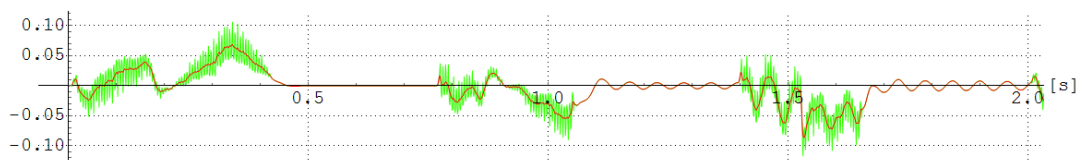
$Zdvih [mm] = (19\text{-zdvih motoru}) \& (zdvih\ ze\ 3\text{-rychlost motoru}) \& (teoretická\ zdvih.\ křivka); \{Meas384\_30C\_F1\}$



$Odchylka\ 1 [mm] = (19\text{-zdvih motoru}) - (teoretická\ zdvih.\ křivka); \{Meas384\_30C\_F1\}$



$Odchylka\ 2 [mm] = (rozdíl\ zdvihu\ motoru\ z\ měniče,\ L1.Position.Monitor.PERR); \{Meas384\_30C\_F1\}$

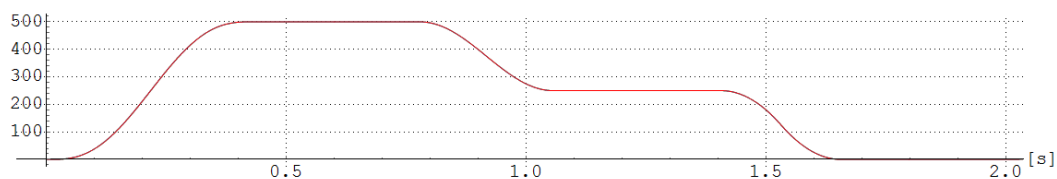


Obr. 12-22 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F1 (měření Meas384\_30C\_F1, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, frekvence 30 CPM, 1. cyklus)

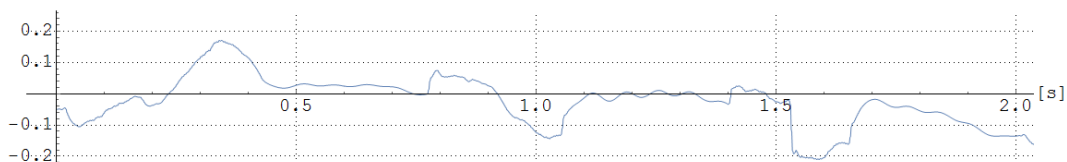
Tab. 12-11 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování  
(Chyba [mm], měření Meas384\_30C\_F1)

	Časový interval		
	0.45 – 0.75 [s]	1.1 – 1.4 [s]	1.7 – 2.0 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	0.0628	- 0.00396	- 0.00453
Chyba [mm] (Odchylka 2)	- 0.00005	0.00083	- 0.00017

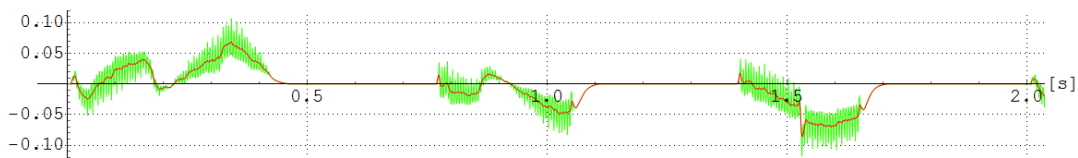
Zdvih [mm] = (19-zdvih motoru) & (zdvih ze 3-rychlost motoru) & (teoretická zdvih. křivka); {Meas410\_30C\_F1}



Odchylka 1 [mm] = (19-zdvih motoru) - (teoretická zdvih. křivka); {Meas410\_30C\_F1}



Odchylka 2 [mm] = (rozdíl zdvihu motoru z měniče, L1.Position.Monitor.PERR); {Meas410\_30C\_F1}



Obr. 12-23 Grafy průběhů veličin upraveného změřeného zdvihu, vypočteného zdvihu ze změřené rychlosti motoru a z teoretické simulační zdvihové závislosti (nahore), rozdíl upraveného změřeného a teoretického zdvihu (uprostřed), odchylka zdvihu z měniče (dole, červeně vyhlazená data přes 3 body), zdv. kř. **nekorigovaná**, zdvihová křivka F1 (měření Meas410\_30C\_F1, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, frekvence 30 CPM, 1. cyklus)

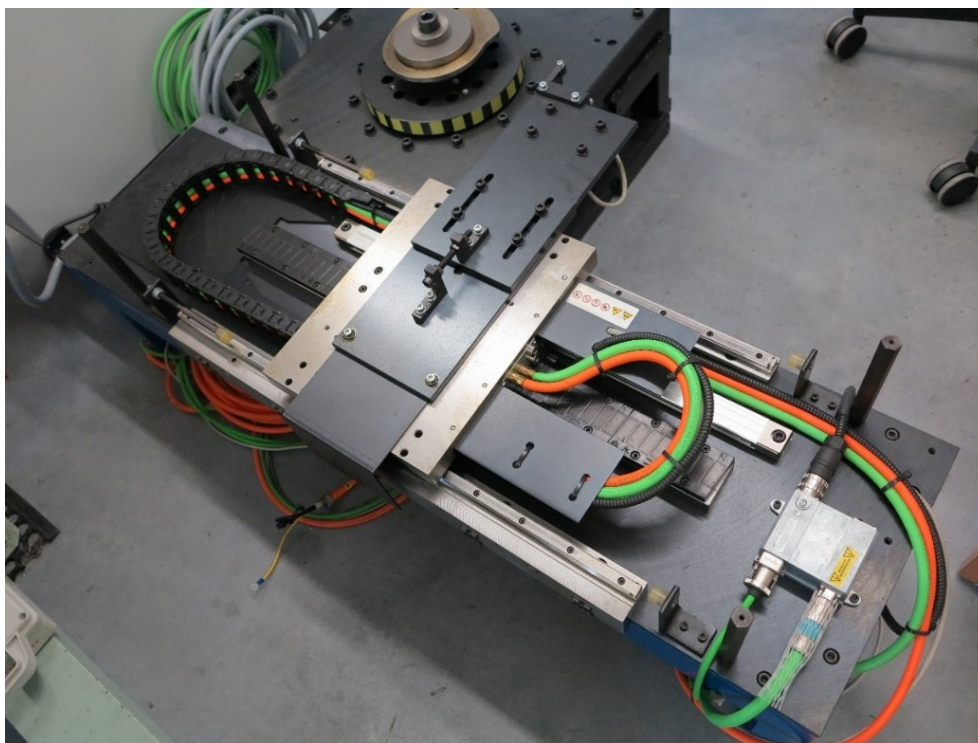
Tab. 12-12 Naměřená a vypočtená statická chyba polohování  
(Chyba [mm], měření Meas410\_30C\_F1)

	Časový interval		
	0.45 – 0.75 [s]	1.1 – 1.4 [s]	1.7 – 2.0 [s]
Chyba [mm] (Odchylka 1)	0.02286	- 0.00737	- 0.07799
Chyba [mm] (Odchylka 2)	0.00003	0.00011	- 0.00001

V kapitole jsou popsány a zobrazeny průběhy a hodnoty odchylek měřené na primární (pohyblivé) části motoru při zvýšené dynamice. Jak je uvedeno na konci kap. 12.2.4., vhodnost zvolené zdvihové křivky a tím i odezvy systému pro konkrétní průmyslovou aplikaci lze rozdělit na tři základní skupiny. První skupinou je ta, při které je kladen důraz na rychlost změny polohy z jedné krajní úvratě do druhé spolu s požadovanou minimální velikostí chyby polohování v konečné fázi (úvrati) zdvihu. Jako příklad rychlého dynamického děje s minimální amplitudou kmitů a chybou polohování v úvratích je možno uvést různé manipulátory, robotické ruce a jiná přesná polohovací zařízení. Oproti tomu pro druhou skupinu průmyslových aplikací není až takový důraz kladen na rychlost dynamického děje, ale hlavním požadavkem je docílení minimálních amplitud kmitů a minimálních chyb polohování spolu s vysoce přesným polohováním v průběhu celého procesu změny polohy (dynamického děje). Tento pohled přesného polohování v průběhu celého dynamického děje je požadován např. při upnutí a pohybu obrobku příp. řezného nástroje při procesu obrábění. Třetí skupinou je kombinace dvou výše uvedených skupin, kdy je pro průmyslovou aplikaci požadována velká dynamika a zároveň minimální dynamická resp. statická chyba polohování, jak v průběhu celého děje, tak i v úvratích. Jako příklad průmyslové aplikace této skupiny bychom mohli uvažovat kolaborativní roboty, které v provozu úzce spolupracují s operátorem. U této skupiny je však třeba zvážit limitní nastavení celého systému lineárního motoru s dynamicky (pružně) uloženou hmotou.

### 13. Reálné zkušební a testovací zařízení SIEMENS

Pro posouzení a porovnání výsledků a výstupů ze simulací a analýz spolu s měřením a posuzováním výsledků reálného zkušebního zařízení Yaskawa popsaného v kap. 12, je ve spol. VÚTS, a.s., postaven druhý laboratorní stend s lineárním motorem od výrobce Siemens s označením JFM CN060645 (primární část má ozn. 1FN3050-2WC00-0FA1, sekundární část ozn. 1FN3050-4SA00-0AA0), na kterém je možné provést zkušební měření pro vybrané zdvihové závislosti. Na obr. 13-1 je fotka reálného zkušebního zařízení Siemens bez přidané zátěže a snímačů (senzorů). Tento laboratorní stend by bylo možné doplnit o strojní části pro upnutí dynamické kmitající hmoty na pružinách a snímačů. Pro systém Siemens je připraven rozvaděč viz obr. 13-2, ze kterého by bylo možné po ověření zapojení kabelů v jednotlivých obvodech rozvodů, získat a synchronně zaznamenávat elektrické signály. Měření polohy primární části motoru je provedeno s užitím externího přesního lineárního měřicího systému Heidenhain.



*Obr. 13-1 – Zkušební zařízení laboratorního stendu s lineárním motorem Siemens*



*Obr. 13-2 – Rozvaděč s jednotlivými elektrickými prvky a komponentami pro řízení motoru Siemens*

### 13.1. Měření, vyhodnocení a porovnávání veličiny

Jak je popsáno na začátku odstavce, obdobně jako v kap. 12 popsané měření na lineárním motoru Yaskawa, bylo by i pro zkušební zařízení systému Siemens možno použít stejné měřicí zařízení a snímače. Mezi měřené a vyhodnocené signály by bylo možné měřit:

Měřené, vyhodnocené a porovnávání elektrické veličiny:

- Napětí fáze U
- Napětí fáze V
- Napětí fáze W
- Proud fáze U
- Proud fáze V
- Proud fáze W
- Analogový signál rychlosti z měniče Siemens
- Analogový signál momentu z měniče Siemens

Měřenými, vyhodnocenými a porovnávanými mechanickými veličinami jsou:

- Zrychlení dynamicky (pružně) uložené hmoty na plochých pružinách
- Zrychlení primární části motoru
- Poloha a rychlost primární části motoru
- Nulové pulsy (K-pulsy) z lineárního pravítka Renishaw



## Závěr

Disertační práce je zaměřena na komplexní posouzení dynamického chování lineárních pohonů. Práce je dělena na několik kapitol sledujících jednotlivé cíle popsané v úvodu práce a rozebrané v následujících odstavcích.

V úvodu je odvozen matematický model pohonu s lineárním motorem. Součástí práce je i vypracování metodiky návrhu optimálního nastavení parametrů jednotlivých regulátorů řídicího systému. Pro návrh parametrů byly použity klasické postupy (OM, SO). Pomocí simulačních modelů bylo nejprve ověřeno chování pohonu s jednohmotovou zátěží. Pro simulační ověření byly použity vhodné vybrané zdvihové křivky (lineární, polynomická, harmonická, parabolická, aj.).

Další část práce je věnována metodám umožňujícím potlačit reziduální kmity, obsahuje-li zátěž pružné členy. Zvolena byla metoda „Input Shaping“. Nejprve byla metoda ověřena pomocí simulačních modelů. Zátěž lineárního motoru byla dvojhmotová s jedním pružným členem. Přínosem práce je návrh modifikace metody „Input Shaping“, určené pro systémy s omezenou dynamikou. Tato metoda spočívá v použití dodatečné úpravy průběhu zdvihové křivky. Byl použit filtr s přenosovou funkcí obsahující integrační člen se zpožděním 1. řádu, který upravuje průběh zrychlení tak, aby řídicí systém YASKAWA se nedostával do chybového stavu.

Druhá část práce je věnována ověření dynamického chování lineárního pohonu na reálném zkušebním zařízení. Pro tento účel byl ve VÚTS, a.s. navržen a realizován laboratorní „stend“ doplněný o strojní části (dynamická kmitající hmota na pružinách, nosníky, aj.). Dále byl „stend“ vybaven snímači a senzory pro precizní proměření a praktické ověření a změření vybraných parametrů pohonu. V hlavní části textu práce je zdokumentována jen část výsledků a výstupů. Další grafy, výsledky a výstupy jsou v jednotlivých přílohách na konci práce.

Praktická měření byla rozdělena na dvě části:

- ověření dynamického chování lineárního pohonu s jednohmotovou zátěží. Cílem bylo zjistit polohovou přesnost v přechodových i ustálených stavech. Pozornost byla věnována i ověření polohové přesnosti v limitních stavech.
- ověření dynamického chování pohonu s dvojhmotovou zátěží. Pro ověřování byl pružný člen vybaven snímači zrychlení, aby bylo možno ověřit funkčnost navržené metody potlačení reziduálního kmitání pružného členu. Pro potlačení reziduálních kmitů byla použita metoda „Input Shaping“. Pomocí simulačních modelů a praktických měření bylo zjištěno, že je možno amplitudu reziduálních kmitů snížit až o dva řády.

Významným přínosem práce je i vypracování metod přesného měření vybraných parametrů pohonu a způsob vyhodnocení naměřených hodnot. Většina měřených závislostí byla v práci porovnána s průběhy získanými ze simulačních modelů.

V průběhu řešení tématiky je oblast vědy a výzkumu věnována a koncentrována na lineární motor od výrobce Yaskawa a navržené zdvihové křivky. Práce přináší poznatky a závěry z určité konkrétní části oboru lineárních motorů. Avšak možnosti nastavení parametrů pohonu a dalšího výzkumu jsou široké jak z pohledu teoretického, tak z pohledu praktického. Pro pokračování popsané vědecko-výzkumné oblasti lineárního motoru by bylo možné simulovat, analyzovat a změřit chování jiného lineárního motoru, např. od firmy Siemens, jak je uvedeno v kap. 13, příp. analyzovaný lineární motor doplnit o jinou dynamickou zátěž příp. navrhnout jinou zdvihovou

křivku (požadovanou charakteristiku, aj.). Další oblastí, kde je možné pokračovat ve výzkumu lineárního motoru, je doplnění technického řešení pohonu o součásti pro ovlivnění (zlepšení) dynamického chování zátěže v úvratích, např. doplněním o Halbachovo pole magnetů na sekundární část motoru, čímž by podle prvotních odhadů mohlo dojít k určitým ekonomickým úsporám ve formě snížení spotřeby energií při změně (reversaci) pohybu v úvratích. Další oblastí, kde je možné provést další kroky a pokračovat ve výzkumu, je doplnění stávajícího zařízení s dynamicky uloženou hmotou na pružinách o tlumiče, ať již kapalinové ve formě ponoření zátěže (dynamicky uložené kmitající hmoty) do lázně, příp. jiné, které v kombinaci s párem plochých pružin by nežádoucí kmity dynamicky uložené hmoty nejen v úvratích, ale po celou dobu dynamického děje příznivě ovlivňovali (tlumili).

## Použitá literatura

- [1] Info (přehled) lineárních motorů a produktů spol. Yaskawa, dostupné z webu:  
< <https://www.yaskawa.com/products/motion/sigma-5-servo-products/linear-slides/sgt-sigma-trac> >
- [2] Datasheet lineárního motoru Yaskawa, dostupné z webu:  
< [https://www.swissdrives.ch/view/data/4486/PDF/Servo/Englisch/YEU\\_Linear\\_Slider\\_EN\\_v4\\_1013\\_web.pdf](https://www.swissdrives.ch/view/data/4486/PDF/Servo/Englisch/YEU_Linear_Slider_EN_v4_1013_web.pdf) >
- [3] Info (uspořádání) lineárních motorů, dostupné z webu:  
< <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/806> >
- [4] Rydlo P.: *Řízení elektrických střídavých pohonů*, skripta TUL, Liberec, 2007
- [5] Ponomarev P.: *Control of permanent magnet linear synchronous motor in motion control application*, Master's thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, May 2009
- [6] Souček P.: *Servomechanismy ve výrobních strojích*, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004
- [7] Ron M.: *Řízení polohového servomechanismu s ohledem na dynamickou tuhost výstupu*, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra řídicí techniky, 2012
- [8] Datasheet lineárního motoru VUES, dostupné z webu:  
< [http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz\\_Ins\\_170124.pdf](http://www.moogbrno.cz/mt-content/uploads/2017/09/cz_Ins_170124.pdf) >
- [9] Skalický J.: *Teorie řízení*, skripta VUT Brno, 2002
- [10] Lachman M., Mendřický R.: *Zásady regulace – proudová, rychlostní, polohová smyčka*, Katedra výrobních systémů a automatizace, Fakulta strojní, TUL, 23.4.2014, dostupné z webu:  
< <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:3430> >
- [11] Singer N. C., Seering W. P.: *Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines*, disertační práce, Massachusetts Institute of Technology, 1988
- [12] Singer N. C., Seering W. P.: *Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration*, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1990, pp. 76-82
- [13] Singhose W., Crain E., Seering W.: *Convolved and simultaneous two-mode input shapers*, IEEE Proceedings Control Theory Appl., vol. 144, No. 6, November, 1997
- [14] Singhose W., Mills B., Seering W.: *Vibration reduction with specified swing input shapers*, Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, Kohala, Coast Island of Hawaii, Hawaii, USA, August 12-27, 1999
- [15] Tuttle T., Seering W.: *A Zero-placement Technique for Designing Shaped Inputs to Suppress Multiple mode Vibration*, Proc. of the American Control Conference, Baltimore, Maryland, June, 1994
- [16] Hongxa J., Wanli L., Singhose W.: *Using two mode input shaping to suppress the residual vibration of cherry pickers*, Third international conference on measuring technology and mechatronics automation, 2011

- [17] Rattan K. S., Feliu V.: *Feedforward Control of Flexible Manipulators*, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 1992
- [18] Wang X., Shao M.: *Design of input shapers for suppressing vibration in the Z-plane*, Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada, August 28-31, 2005
- [19] Peng Z., Yuanchun Li: *Vibration control of flexible structure with multiple modes using input shaping*, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, August 9-12, 2009
- [20] Singer N. C., Lucy Y. P., Singhose W., Seering W.: *An efficient algorithm for the generation of multiple mode input shaping sequences*, Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, Dearborn, MI, September 15-18, 1996
- [21] Robertson M., Kozak K., Singhose W.: *Computational framework for digital input shapers using linear optimization*, IEEE Proceedings Control Theory Appl., Vol. 153, No. 3 May, 2006
- [22] Hyde J. M., Seering W. P.: *Using input command pre-shaping to suppress multiple mode vibration*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, 1991
- [23] Rappole B. W., Singer N. C., Seering W. P.: *Input shaping with negative sequences for reducing vibration in flexible structures*, Proc. of the American Control Conference, San Francisco, California, June, 1993
- [24] Craig F., Lucy Z.: *An analysis of frequency domain input shaping for three mode flexible system*, Proc. of the American Control Conference, San Diego, California, June, 1999
- [25] Seth N., Rattan K.: *Vibration control of flexible manipulators*, Publication Wright state university, Dayton, OH, 1992
- [26] Juliš K., Brepta R.: *Mechanika II. díl. Dynamika*, Technický průvodce 66. SNTL, Praha 1987.
- [27] Brepta R., Půst L., Turek F.: *Mechanické kmitání*. Technický průvodce, sv. 71. Sobotáles, Praha 1994.
- [28] User's Manual ( $\Sigma$ -V Series Datasheet), Design and Maintenance Linear Motor Yaskawa: *Yaskawa\_Linear\_Motor\_MECHATROLINK-III\_Communications\_Reference\_6.pdf*, Manual no. SIEP S800000 65E, Yaskawa Electric Corporation, publikováno v Japonsku, June 2012 09-4
- [29] Hrabovcová V., Rafajdus P. a Makyš P.: *Analýza elektrických strojov*, Žilinská univerzita v Žiline, EDIS-vydavateľ'ské centrum ŽU, ISBN 978-80-554-1323-5, 2017
- [30] Lindr D.: *Řízení servopohonů v dynamicky náročných aplikacích*, Ph.D. Thesis, Technická univerzita v Libereci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Česká Republika, 2011
- [31] Lindr D., Rydlo P.: *Two-mass model based vibration suppression feedback control method applied to standard servo control system*, ElectroScope 2010, 1, pp. 1-6.

- [32] Jirásko P. a kolektiv autorů: *Mechatronika pohonů pracovních členů mechanismů*, VÚTS, a.s., Liberec, Czech Republic, ISBN 978-80-87184-63-9, 2015
- [33] Crhák V.: *Stand Yaskawa v.2 - Manuál k rozvaděči ER1*, VÚTS, a.s., datum vydání 7.9.2015
- [34] Renishaw RSLM high accuracy stainless steel scale, datasheet L-9517-9305-06-B, (Renishaw plc, 2007-2016, issued 1116)
- [35] Renishaw SIGNUM encoder system, datasheet L-9517-9155-05-A, (Renishaw plc, 2004-2011, issued 0711)
- [36] Datasheet DEWETRON modulárního analyzátoru, dostupné z webu:  
< <https://www.dewetron.com/products/chassis/all-in-one-chassis/dewe-5000/> >
- [37] Gärtner J.: *Návrh lineárního oscilačního pohonu s vnějším buzením*, Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, 2010

## Přehled publikovaných prací – výzkumné zprávy

- [38] Klouček P., Šidlof P., Braier Z.: *Rozběhové a doběhové charakteristiky hlavního pohonu šicího stroje GPS/F 1006 (úhel a úhlová rychlost hlavní hřídele)*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-05/2014 v rámci projektu TAČR Alfa TA02011116, VÚTS, a.s., vydaná duben 2014
- [39] Šidlof P., Klouček P., Braier Z.: *Měření a analýza kmitání základacího rámečku prototypu šicího stroje GPS 10060 (úhel a rychlost pohonu ve směru osy X a osy Y, zrychlení jehelní tyče, zrychlení na obou krajích a ve středu stacionárního ráhna, zrychlení přídržného rámečku)*, podíl na vypracování předběžné výzkumné zprávy č. MER-09/2014 v rámci projektu TAČR Alfa TA02011116, VÚTS, a.s., vydaná květen 2014
- [40] Klouček P., Braier Z.: *Měření stroje S6000*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-13/2014 v rámci projektu TIP FR-TI3/130, VÚTS, a.s., vydaná červen 2014
- [41] Klouček P., Bušek M., Antoš J., Braier Z.: *Systém hodnocení mechanismů se servopohony zahrnující vyhodnocení mechanických, elektrických a řídicích veličin (vyhodnocení úhlových a časových měření polynomické, harmonické a parabolické zdvihové závislosti systému motor – převodovka – torzní člen – setrvačnick, porovnání signálů řídicího systému a nezávisle měřených veličin)*, podíl na vypracování oponované výzkumné zprávy č. MER-23/2014 v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0096 OP VaVpl Centrum rozvoje strojírenského výzkumu Liberec (CRSV), VÚTS, a.s., vydaná listopad 2014
- [42] Šidlof P., Klouček P., Braier Z.: *Měření a analýza kmitání základacího rámečku funkčního modelu šicího stroje GPS 10060 (úhel a rychlost pohonu ve směru osy X a osy Y, zrychlení jehelní tyče, zrychlení na obou krajích a ve středu stacionárního ráhna, zrychlení přídržného rámečku)*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-30/2014 v rámci projektu TAČR Alfa TA02011116, VÚTS, a.s., vydaná listopad 2014
- [43] Pustka M., Klouček P., Braier Z.: *Analýza dynamické poddajnosti stroje MCV 7032*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-21/2015 v rámci projektu TH01030451 „Pokrokové obráběcí stroje s nízkou emisí hluku a vibrací“ programu TAČR Epsilon, VÚTS, a.s., vydaná listopad 2015

- [44] Šidlof P., Klouček P., Braier Z.: *Měření a analýza pohybu mechanismů knoflíkovacího stroje CBS 13 (pohyb horního a dolního hřídele, pohyb háčku, pohyb chapače, mechanismus jehelní tyče a rozpichu)*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-27/2015 v rámci projektu TIP FR-TI4/271, VÚTS, a.s., vydaná prosinec 2015
- [45] Šidlof P., Klouček P., Braier Z.: *Posouzení příčin hluku skříně pohonů stroje TMZ 642 CNC při změnách otáček*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-22/2017 v rámci projektu TH01030451 „Pokrokové obráběcí stroje s nízkou emisí hluku a vibrací“ programu TAČR Epsilon pro podnik Tajmac-ZPS, a.s. Zlín, vydaná prosinec 2017
- [46] Šidlof P., Braier Z., Klouček P., Bílek J.: *Měření a zmapování posuvu, rychlosti a zrychlení posuvné patky stroje PF-2201*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-07/2018 v rámci projektu TRIO FV20115, VÚTS, a.s., vydaná červen 2018
- [47] Šidlof P., Braier Z., Klouček P.: *Měření šicího stroje pro přišívání a obšívání v ose X-Y*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-18/2018 v rámci projektu TRIO II FV20115, VÚTS, a.s., vydaná prosinec 2018
- [48] Braier Z., Pustka M., Hochmann J.: *Metodika simulace, měření a porovnání dynamického chování a veličin zkušebního zařízení SGT lineárního pohonu (simulace, měření a porovnání polohy pružně uložené hmoty)*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-14/2018 v rámci projektu Institucionální Podpora VÚTS, a.s., vydaná prosinec 2018
- [49] Braier Z., Klouček P.: *Měření polohy jehelníku v X-Z rovině na tkacím stroji CamEl Adaptive*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-22/2019 v rámci projektu TRIO FV10215 programu TA ČR, VÚTS, a.s., vydaná květen 2019
- [50] Pustka M., Šidlof P., Braier Z.: *Měření útlumu tiskového papíru*, podíl na vypracování výzkumné zprávy č. MER-19/2019 v rámci projektu TN01000015 „Národní Centrum Kompetence Strojírenství“ programu TAČR NCK, VÚTS, a.s., vydaná říjen 2019

## Přehled publikovaných prací – příspěvky konferencí, funkční vzorek, patenty

- [51] Braier Z., Klouček P.: *System of measurement and evaluation of AC servo motor's mechanic, electric and control quantities*, příspěvek konference 12<sup>th</sup> Workshop IEEE ECMSM 2015, ISBN 978-1-4799-6972-2, TUL Liberec 2015, str. 120 – 124
- [52] Klouček P., Braier Z.: *Method of Indirect Measurement of Motor Output Torque*, příspěvek konference 10<sup>th</sup> International Conference on Measurement 2015, ISBN 978-80-969672-9-2, Smolenice, Slovakia 2015, str. 293 – 296
- [53] Šidlof P., Braier Z., Klouček P., Ondrášek J.: *Unexpected vibration of relatively simple cutting machine mechanism*, příspěvek konference XII International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, ISBN 978-3-319-44086-6, TUL Liberec 2016, str. 129 – 135

- [54] Braier Z., Šidlof P., Čejka V., Žďárek P.: *New method of contactless measurement and analysis of CNC machine spindle lopping*, příspěvek konference XII International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, ISBN 978-3-319-44086-6, TUL Liberec 2016, str. 365 – 370
- [55] Braier Z., Šidlof P., Klouček P.: *Usage of 3D CAD Software for Verification and Representation of Real Machine Measurement and Results*, příspěvek konference 55<sup>th</sup> International Scientific Conference, Experimental Stress Analysis EAN2017, ISBN 978-80-553-3166-9 (CD-ROM Full Text of Papers), Technical University of Košice – Faculty of Mechanical Engineering 2017, Nový Smokovec, Slovakia, str. 264 – 272
- [56] Braier Z., Šidlof P., Fišer P.: *Measurement, evaluation and comparison of positioning accuracy and other SGT linear motor quantities*, příspěvek konference 14<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM2018, ISBN 978-0-7354-1451-9, AIP Conference Proceedings, Volume no. 2029, Opole University of Technology – Faculty of Mechanical Engineering 2018, Zakopane, Poland, str. 020008-1 – 020008-8
- [57] Škop P., Braier Z., Svoboda M.: *Kapacitní snímač délkové hmotnosti vlákna*, spoluúčast na návrhu, konstrukci a výrobě funkčního vzorku v rámci projektu TRIO FV20122, VÚTS, a.s., vydaný září 2018
- [58] Šidlof P., Braier Z.: *Způsob a zařízení k dělení tyčovitého nebo trubkovitého předmětu vytvořeného z křehkého materiálu*, spoluúčast na vývoji, technickém řešení a přípravě patentu, Patentový spis CZ 307546 B6, uděleno 10. 10. 2018, oznámení o udělení ve Věstníku č. 47/2018, zveřejněný Úřadem průmyslového vlastnictví dne 21. 11. 2018
- [59] Šidlof P., Braier Z.: *Method and device for separating a rod-like or tubular object made of a brittle material*, spoluúčast na vývoji, technickém řešení a přípravě patentu, Patentový spis EP 3 480 173 B1, uděleno 31. 10. 2018, oznámení o udělení ve věstníku Bulletin 2019/49, zveřejněný European Patent Office dne 04. 12. 2019

## Seznam příloh

[A.1] Přehled zdvihových křivek

[A.2] Naměřené a vyhodnocené průběhy elektrických veličin

[A.3] Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin

[A.4] Tabulky maxim, minim a směrodatných odchylek

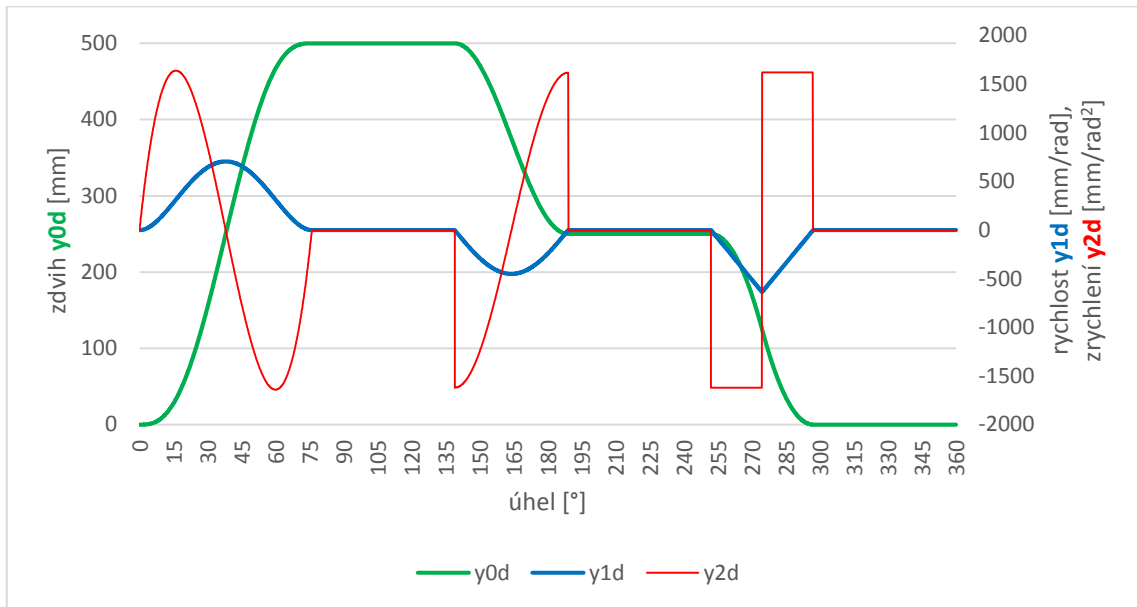
[A.5] Elektrické schéma připojení motoru SGT-C-F35A120 do rozvaděče „*Stand Yaskawa v.2*“

[A.6] - - - - -



## Příloha [A.1] – Přehled zdvihových křivek

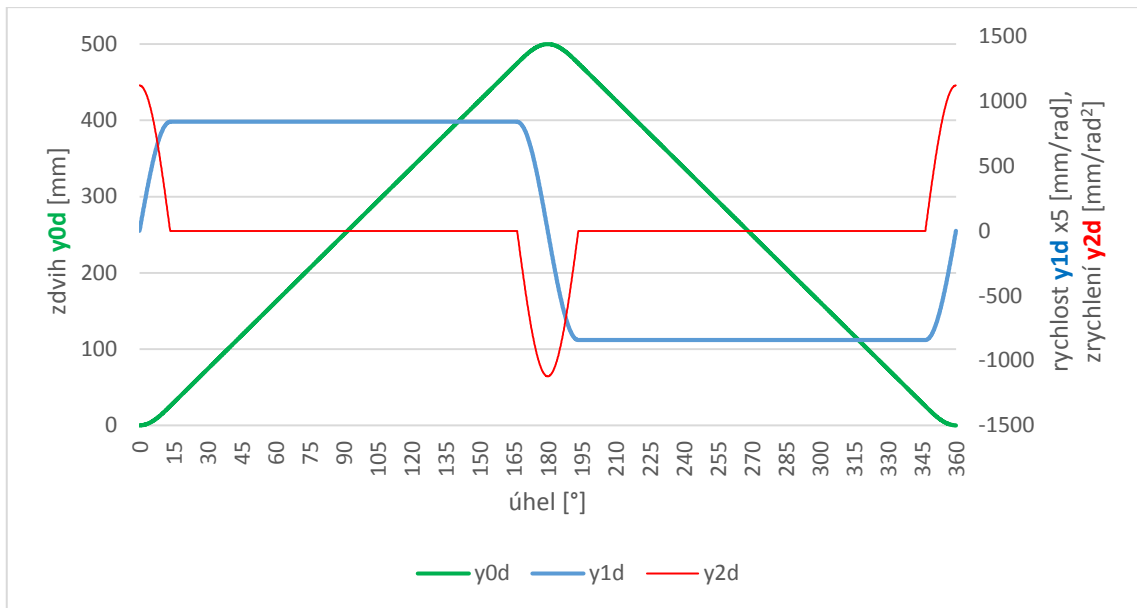
Legenda ke grafům: **y0d** – zdvih, **y1d** – rychlost, **y2d** – zrychlení



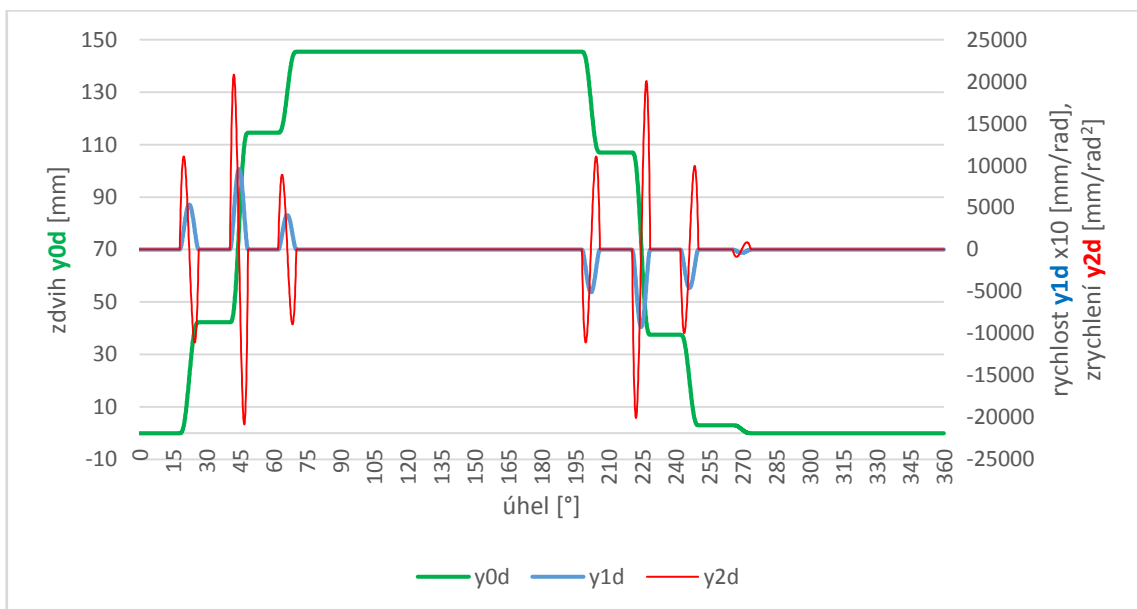
Obr. A.1-1 – Zdvihová křivka F1 s polynommickou, harmonickou a parabolickou částí, výdrže v úvratích (zdvih 0 – 500 mm)



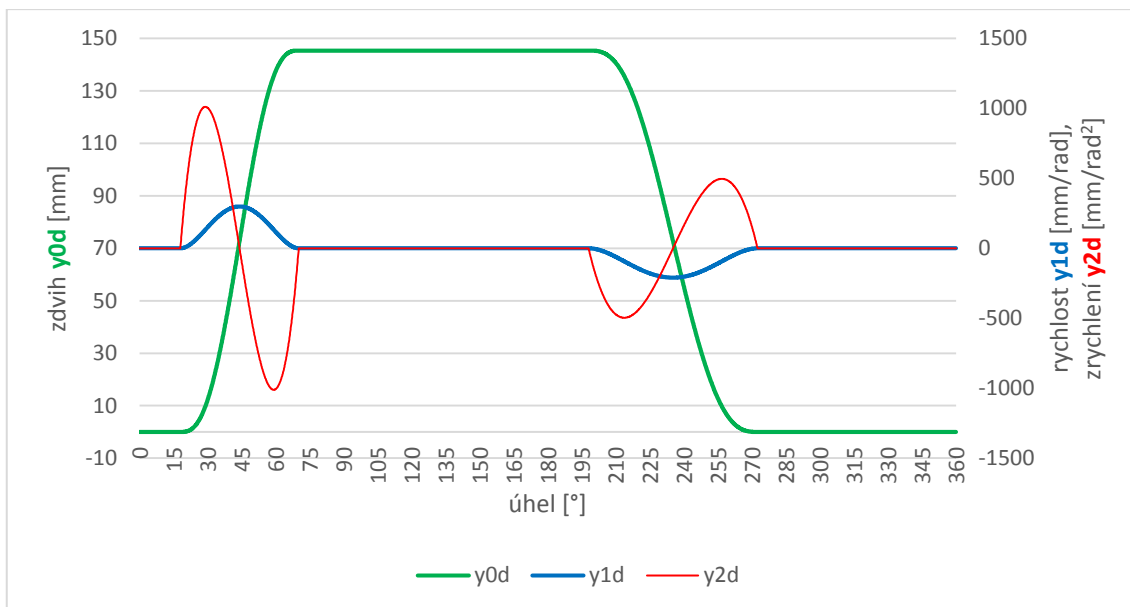
Obr. A.1-2 – Zdvihová křivka F2 bez výdrží v úvratích (zdvih 0 – 500 mm)



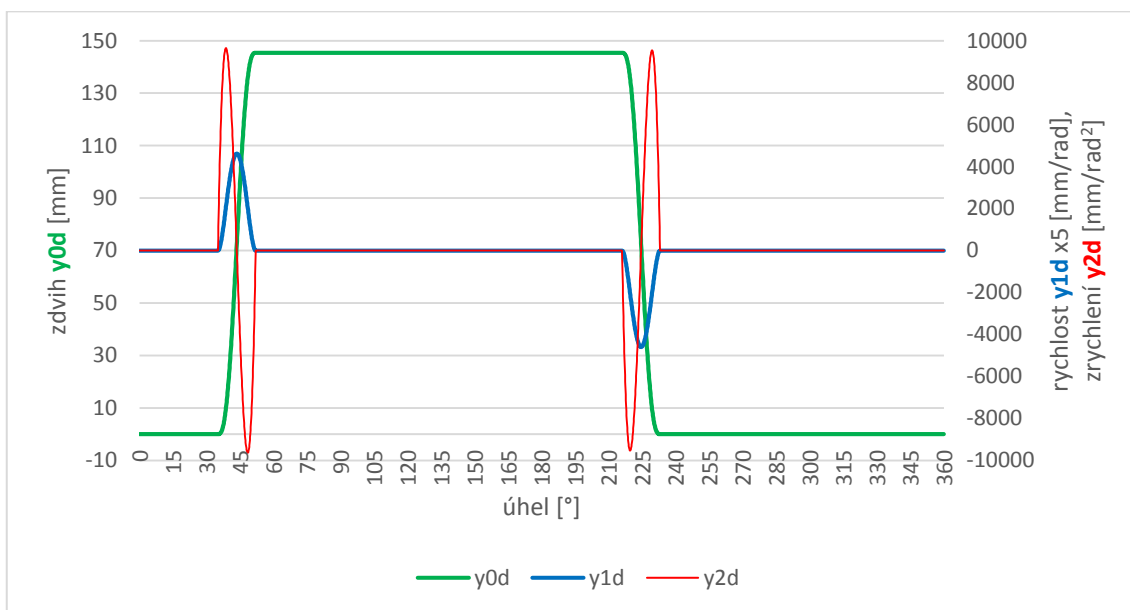
Obr. A.1-3 – Zdvihová křivka F3 (zdvih 0 – 500 mm)



Obr. A.1-4 – Zdvihová křivka F4 (zdvih 0 – 145 mm)

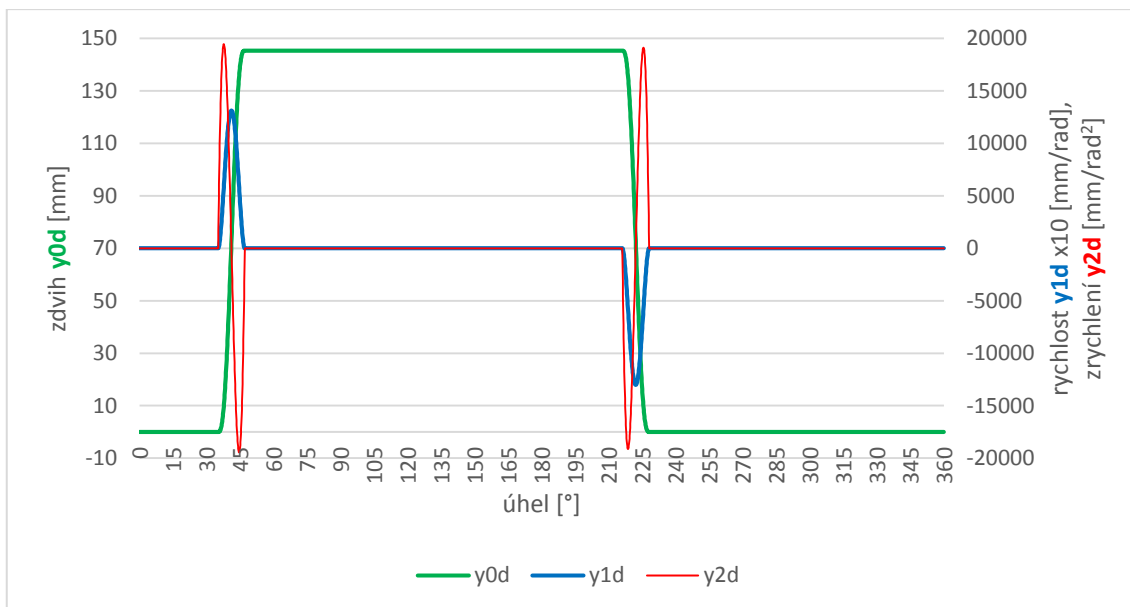


Obr. A.1-5 – Zdvihová křivka F5-1 (zdvih 0 – 145.38 mm)

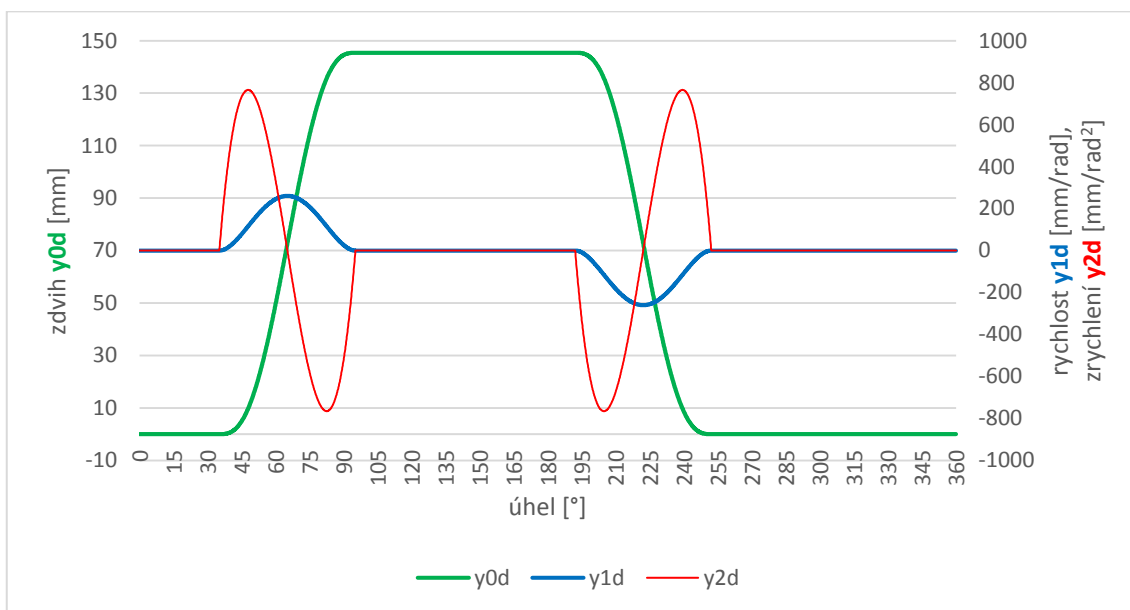


Obr. A.1-6 – Zdvihová křivka F5-2 (zdvih 0 – 145.38 mm)

Pozn.: Zdvihová křivka F5-3 byla pouze pro simulace a teoretické testování, odezva systému nebyla měřena.

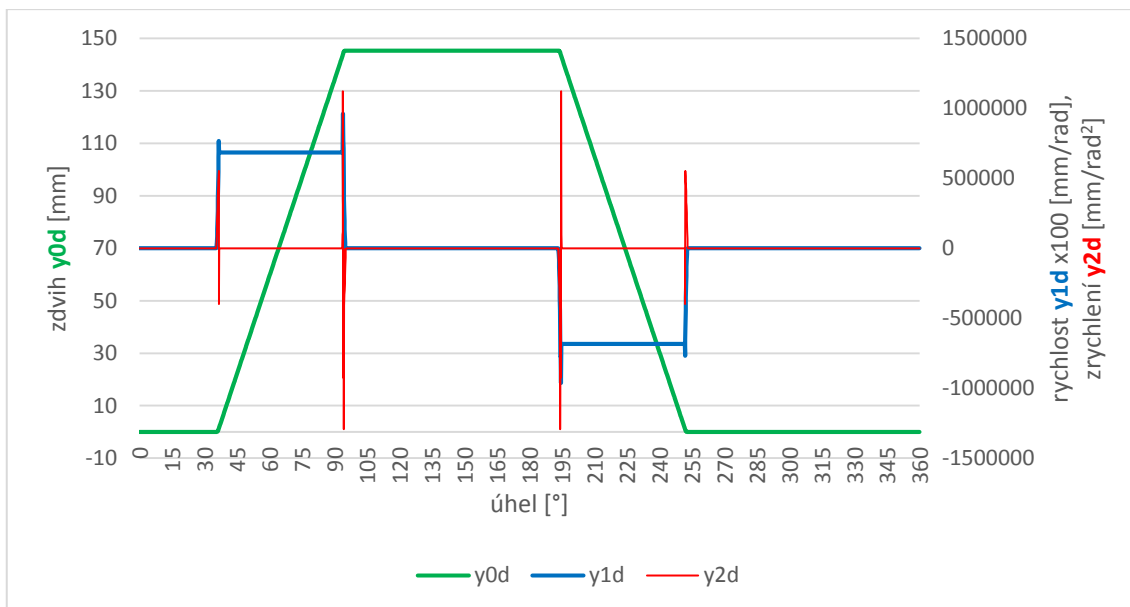


Obr. A.1-7 – Zdvihová křivka F6 (lineární průběh, zdvih 0 – 145.38 mm)

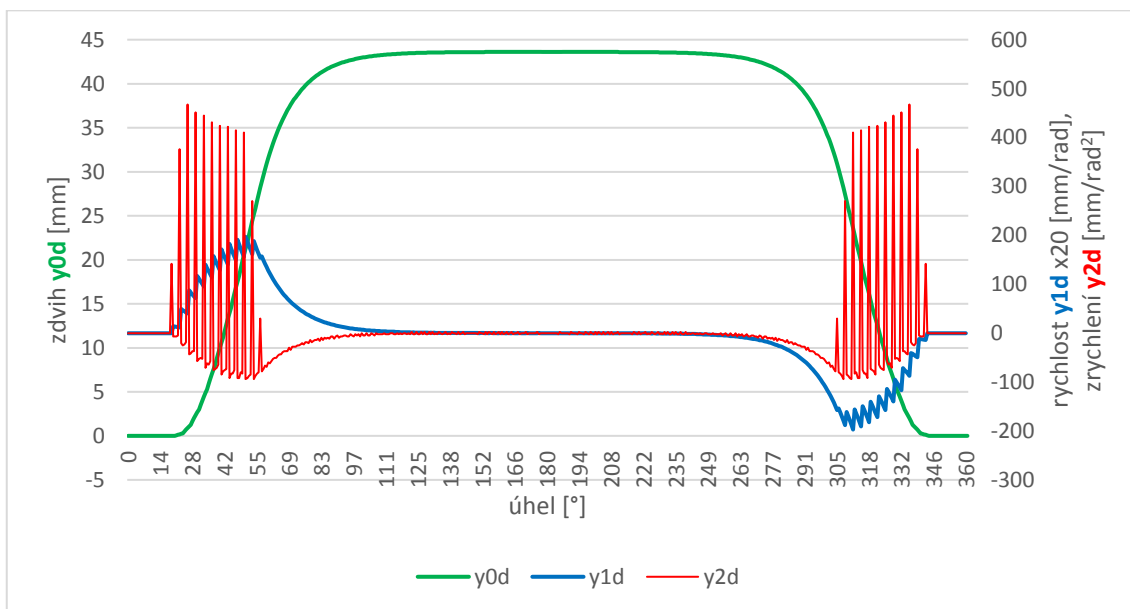


Obr. A.1-8 – Zdvihová křivka F6-2 (zdvih 0 – 145.38 mm)

Pozn.: Zdvihové křivky F6-3, F6-4, F6-5, F6-6 byly pouze pro simulace a teoretické testování, odezvy systému nebyly měřeny.

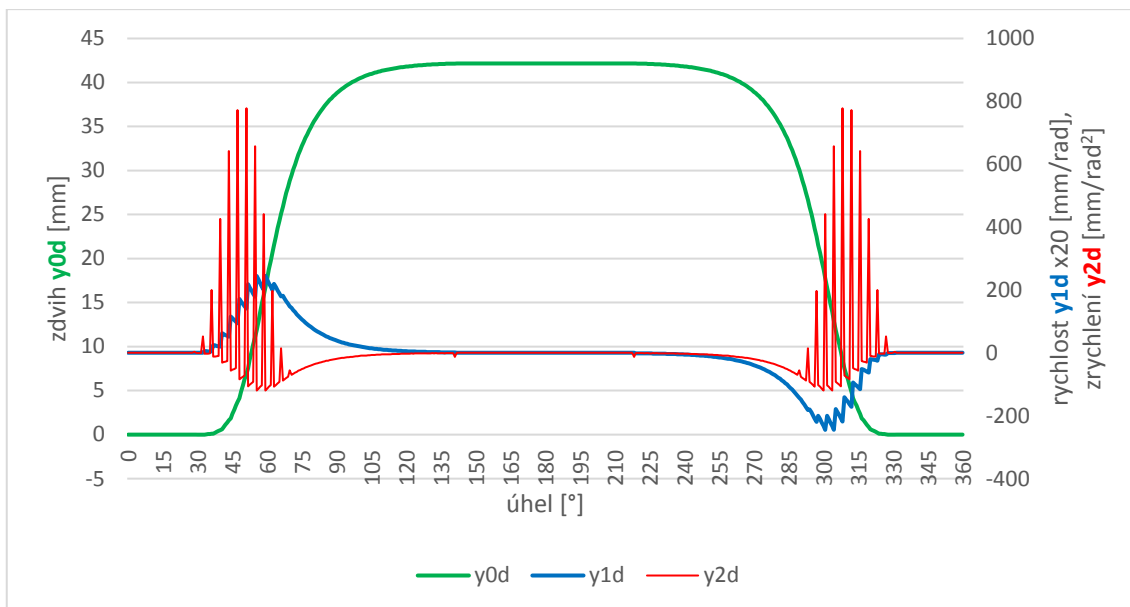


Obr. A.1-9 – Zdvihová křivka F6-7 (zdvih 0 – 145.38 mm)

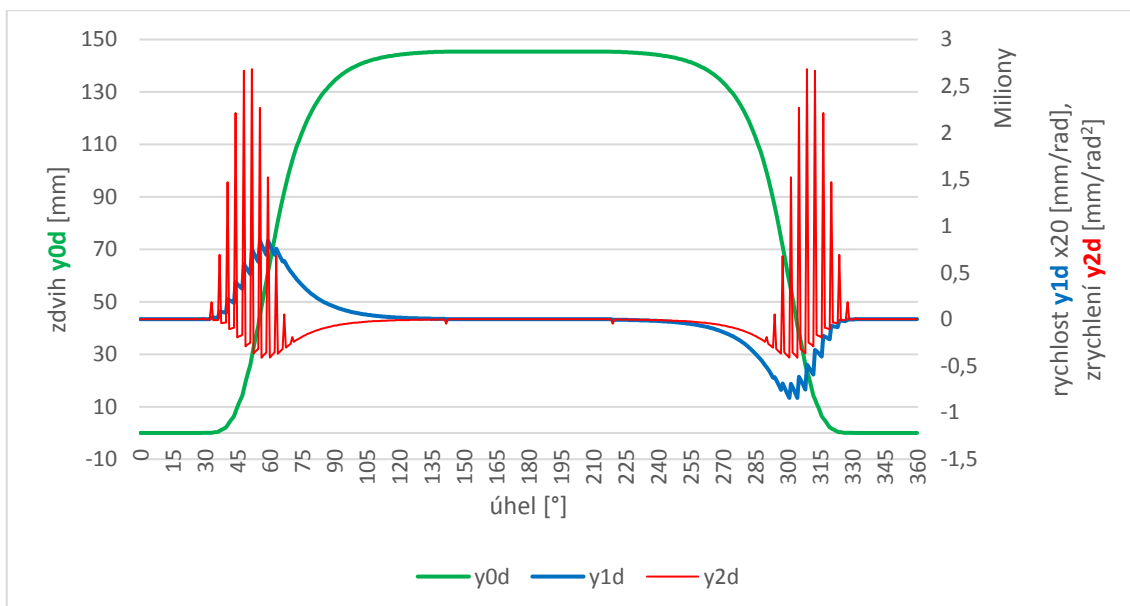


Obr. A.1-10 – Zdvihová křivka F8-1 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, zdvih 0 – 44 mm)

Pozn.: Zdvihové křivky F7-1, F7-2 a F7-3 byly pouze pro simulace a teoretické testování, odezvy systému nebyly měřeny.

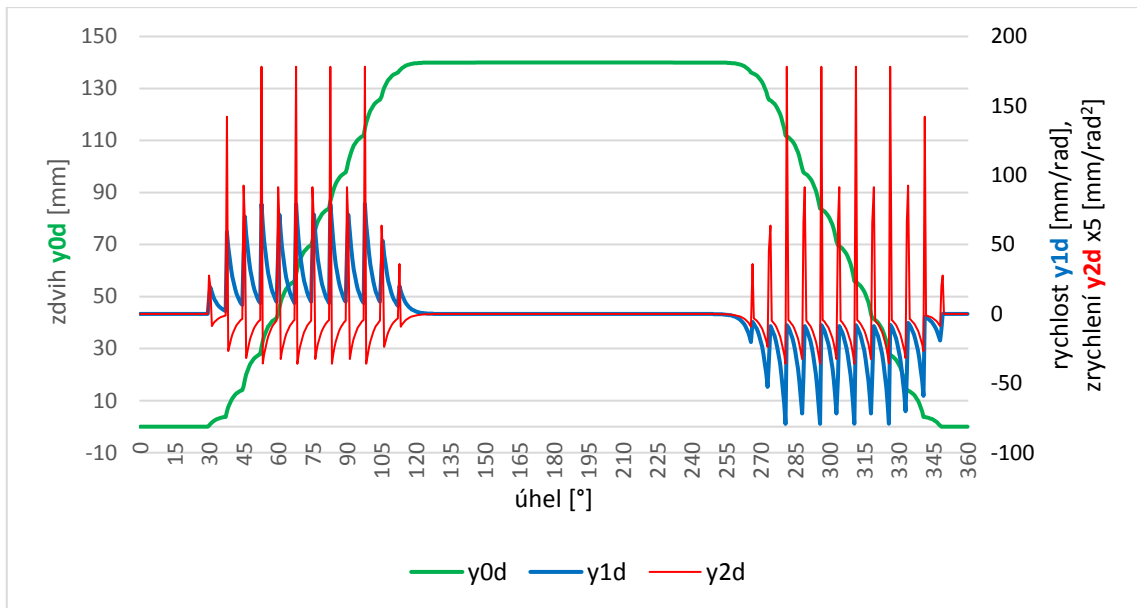


Obr. A.1-11 – Zdvihová křivka F8-2 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh fce F6, zdvih 0 – 42 mm)

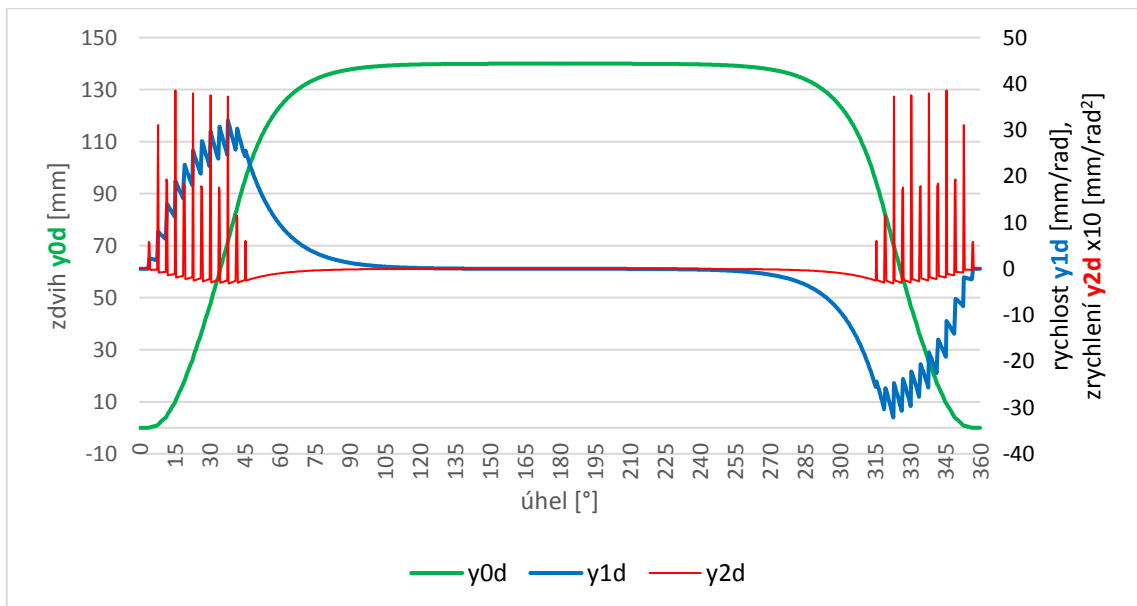


Obr. A.1-12 – Zdvihová křivka F8-4 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh fce F6, zdvih 0 – 145.38 mm)

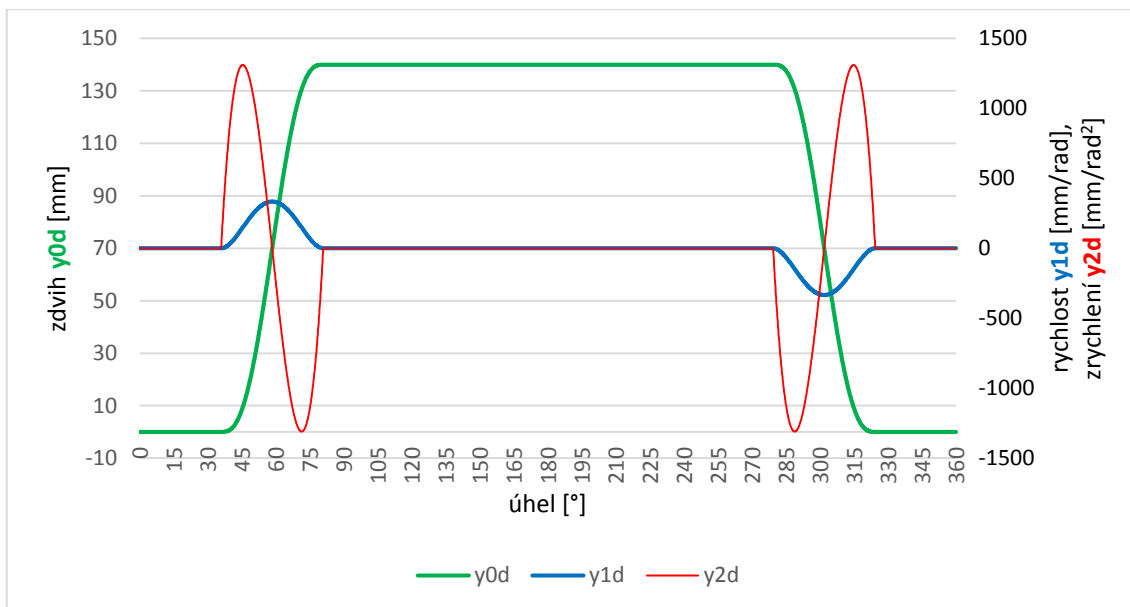
Pozn.: Zdvihová křivka F8-3 byla pouze pro simulace a teoretické testování, odezvy systému nebyly měřeny.



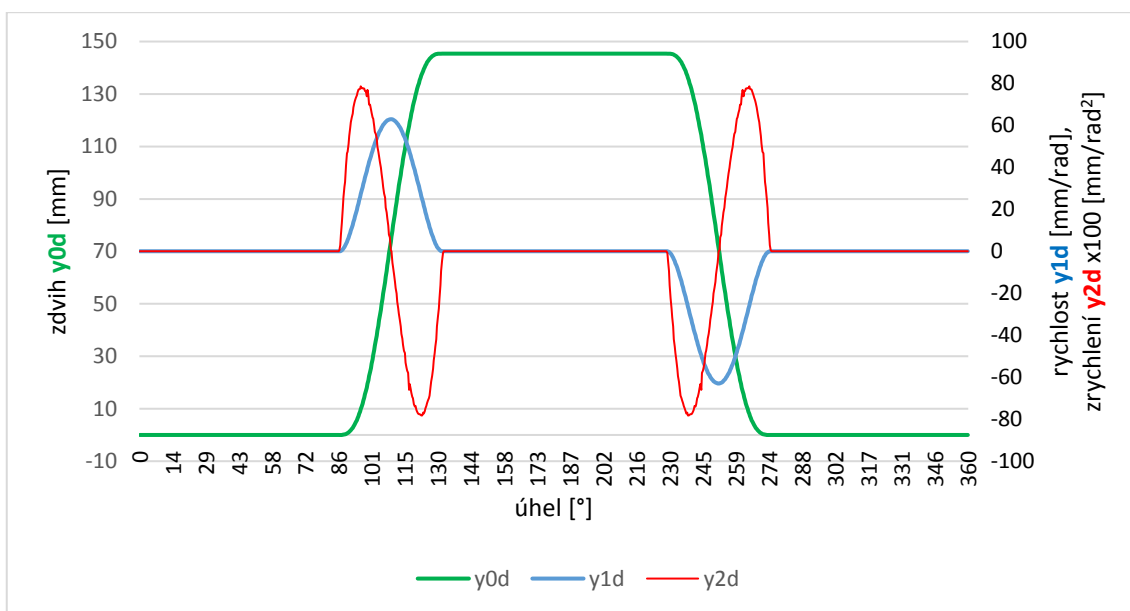
Obr. A.1-13 – Zdvihová křivka F9-1 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, použitá přenosová funkce korekčního filtru je  $F_1 = \frac{1}{1+0.01s}$ , zdvih 0 – 140 mm)



Obr. A.1-14 – Zdvihová křivka F9-2 (modifikovaná zdv. křivka pro lineární průběh, použitá přenosová funkce korekčního filtru je  $F_1 = \frac{1}{1+0.1s}$ , zdvih 0 – 140 mm)

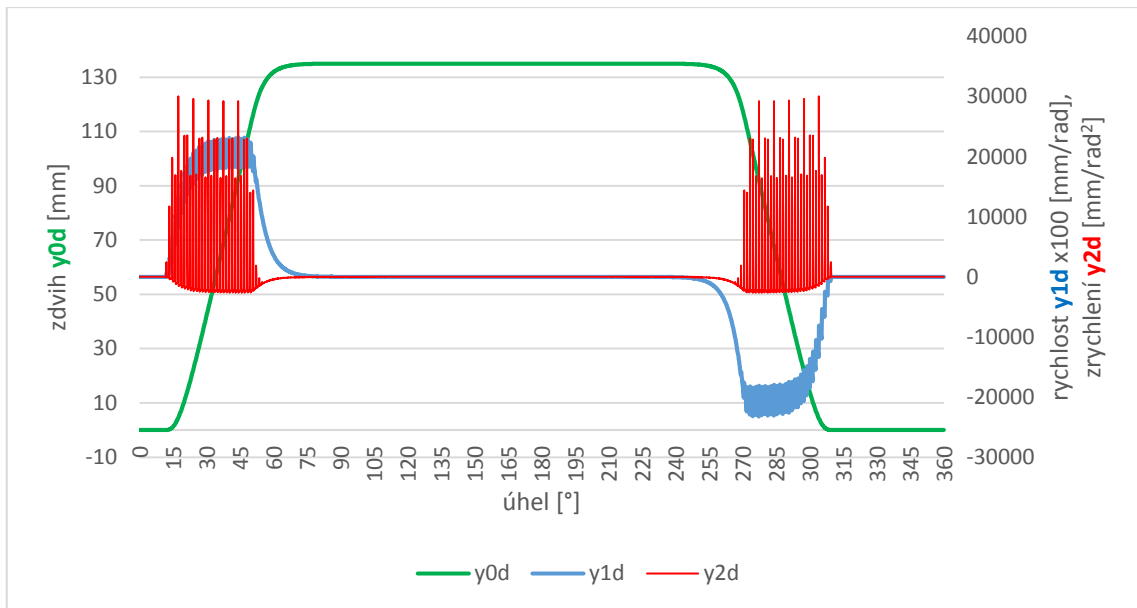


Obr. A.1-15 – Zdvihová křivka F10-1 (zdv. křivka pro lineární průběh, bez korekce IS, zdvih 0 – 140 mm)

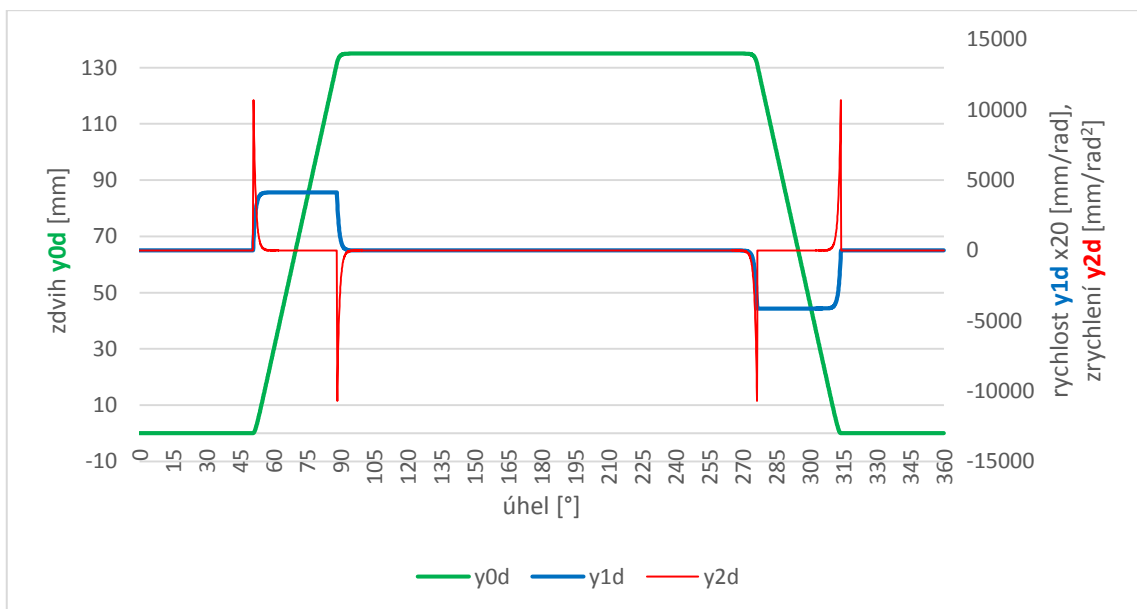


Obr. A.1-16 – Zdvihová křivka F10-2 (zdv. křivka fce F6, bez korekce IS, zdvih 0 – 145 mm)





Obr. A.1-17 – Zdvihová křivka F11-1 (lineární zdv. křivka, korekce pomocí IS,  $T_v=0.0268s$ , zdv. křivka korigovaná  $T_v=2ms$ , zdvih 0 – 135 mm)

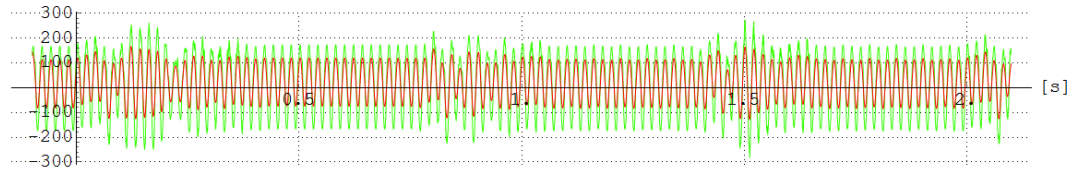


Obr. A.1-18 – Zdvihová křivka F11-2 (lineární zdv. křivka, zdvihová křivka nekorigovaná  $T_v=2ms$ , zdvih 0 – 135 mm)

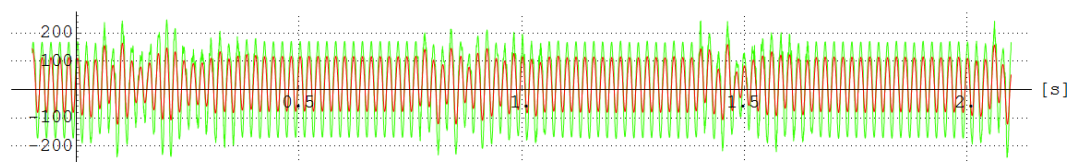
## Příloha [A.2] – Naměřené a vyhodnocené průběhy elektrických veličin

Naměřené a vyhodnocené průběhy elektrických veličin pro měření s označením Meas383\_25C\_F1 jsou uvedeny v kapitole 12.2.1.

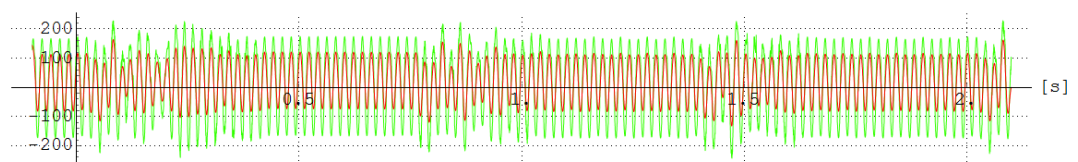
8-Napětí  $U$  [V] - Meas384\_30C\_F1



9-Napětí  $V$  [V] - Meas384\_30C\_F1



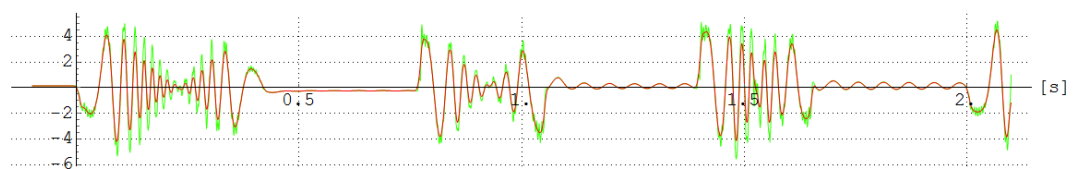
10-Napětí  $W$  [V] - Meas384\_30C\_F1



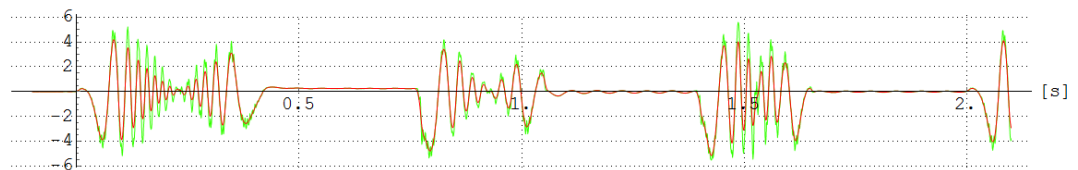
11-Proud  $U$  [A] - Meas384\_30C\_F1



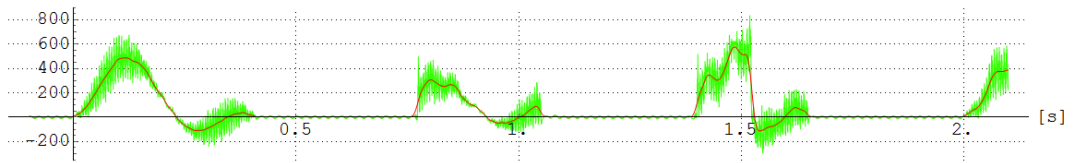
12-Proud  $V$  [A] - Meas384\_30C\_F1



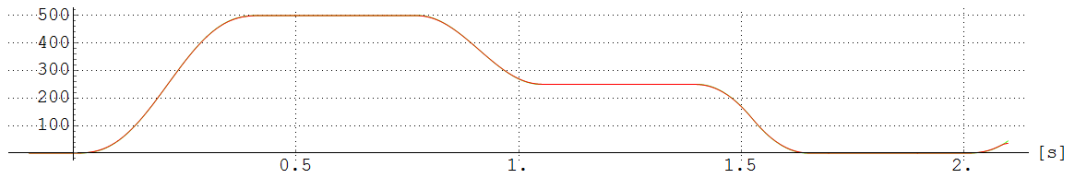
13-Proud  $W$  [A] - Meas384\_30C\_F1



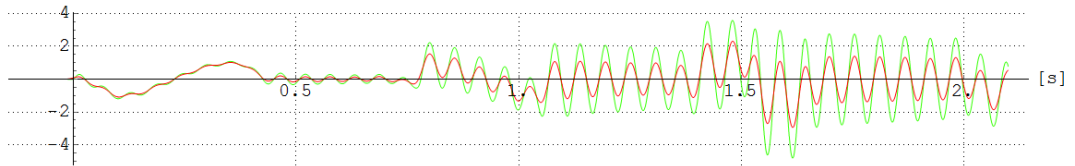
28-celkový příkon [W] - Meas384\_30C\_F1



19-zdvih motoru [mm] - Meas384\_30C\_F1

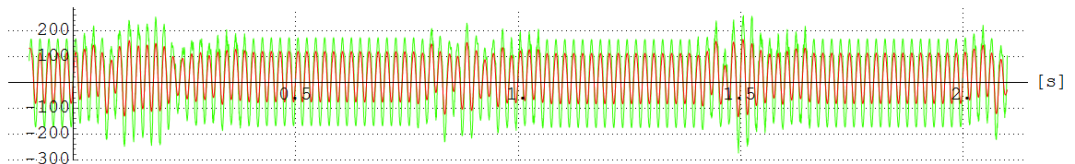


24-rel. zdvih odpruž. hmoty [mm] - Meas384\_30C\_F1

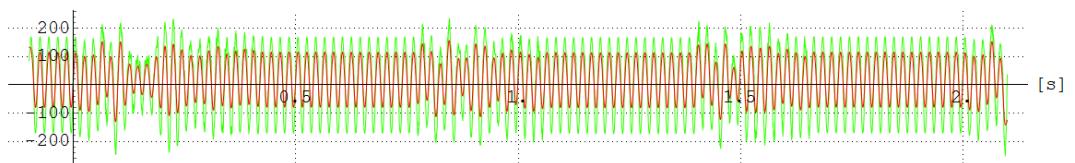


Obr. A.2-1 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas384\_30C\_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

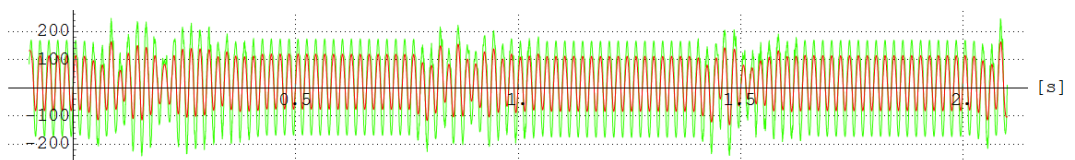
8-Napětí U [V] - Meas410\_30C\_F1



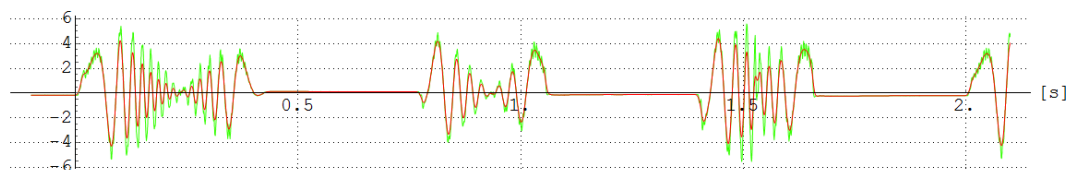
9-Napětí V [V] - Meas410\_30C\_F1



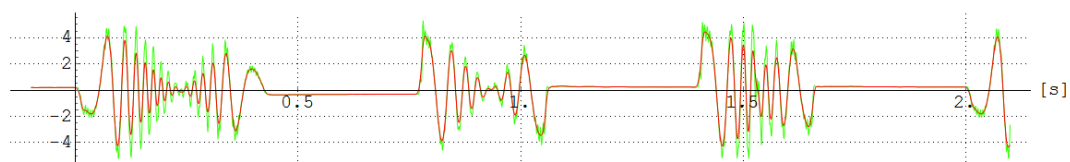
10-Napětí W [V] - Meas410\_30C\_F1



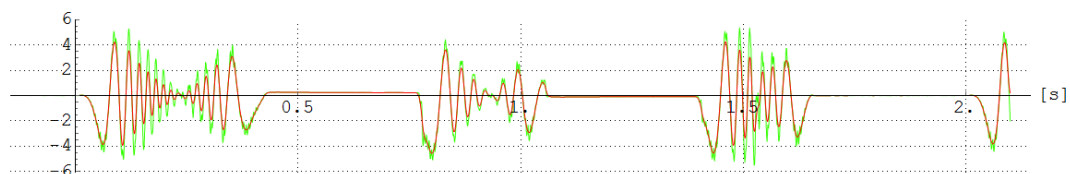
11-Proud U [A] - Meas410\_30C\_F1



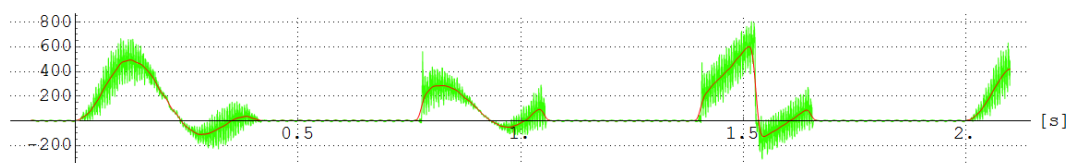
12-Proud V [A] - Meas410\_30C\_F1



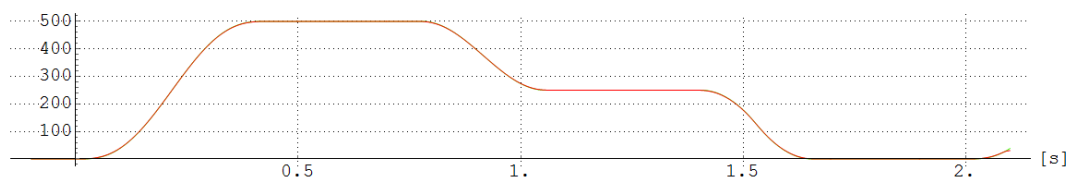
13-Proud W [A] - Meas410\_30C\_F1



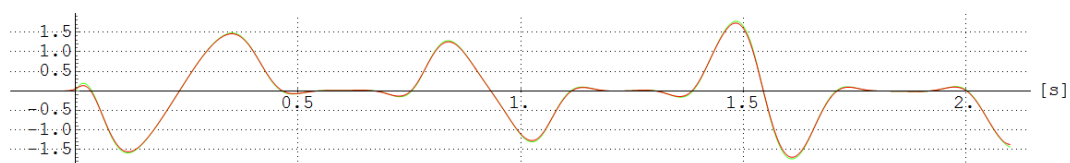
28-celkový příkon [W] - Meas410\_30C\_F1



19-zdvih motoru [mm] - Meas410\_30C\_F1

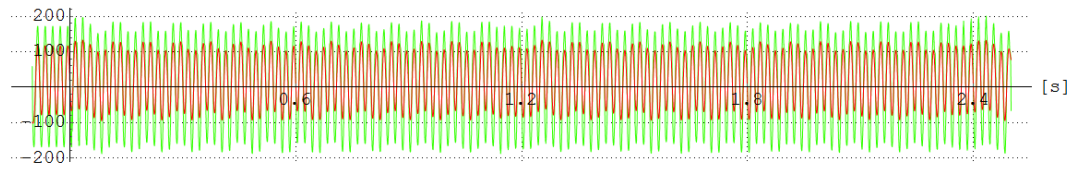


24-rel. zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas410\_30C\_F1

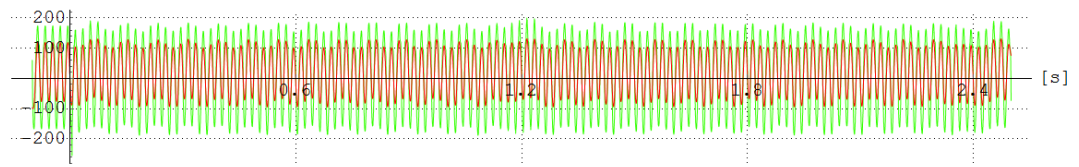


Obr. A.2-2 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas410\_30C\_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

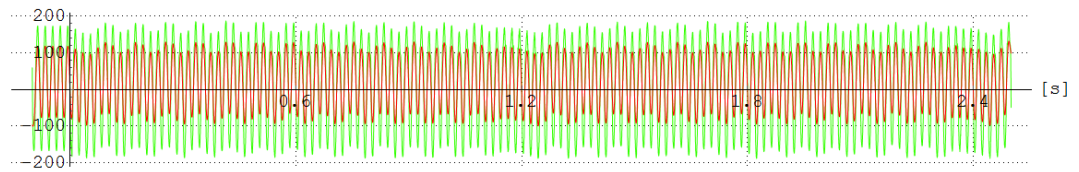
8-Napětí U [V] - Meas360\_25C\_F3



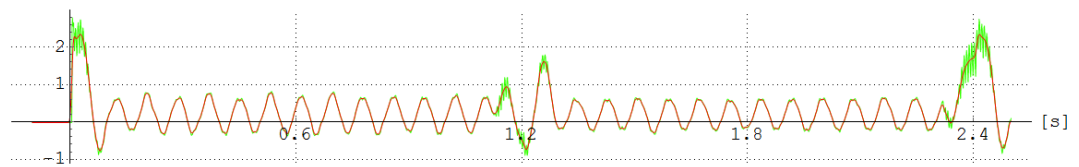
9-Napětí V [V] - Meas360\_25C\_F3



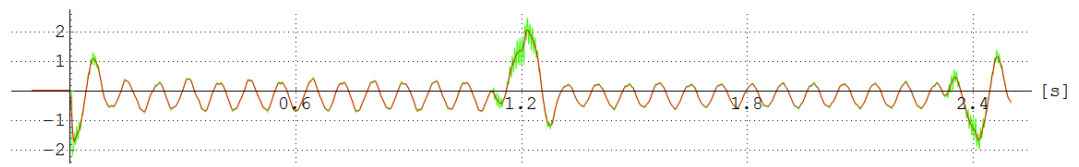
10-Napětí W [V] - Meas360\_25C\_F3



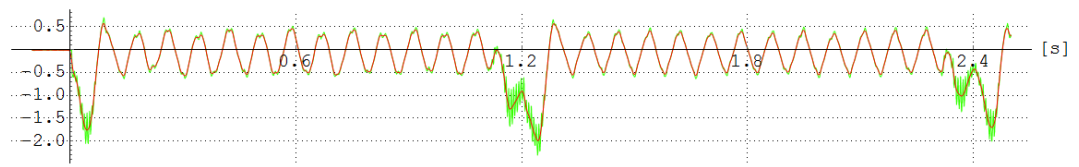
11-Proud U [A] - Meas360\_25C\_F3



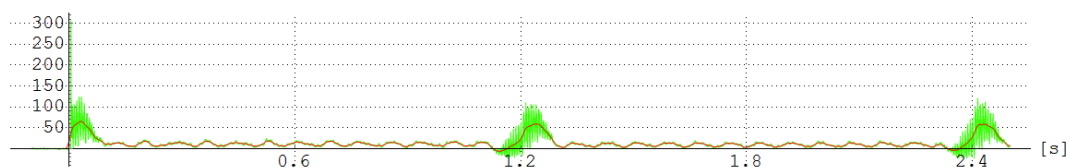
12-Proud V [A] - Meas360\_25C\_F3



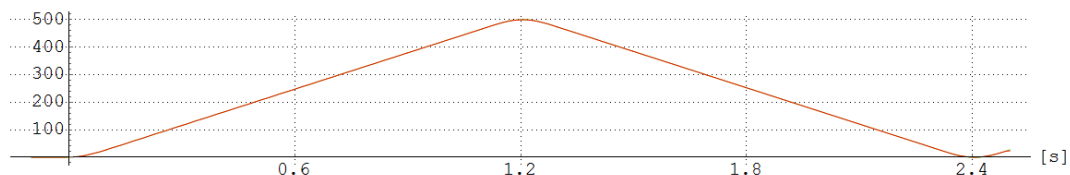
13-Proud W [A] - Meas360\_25C\_F3



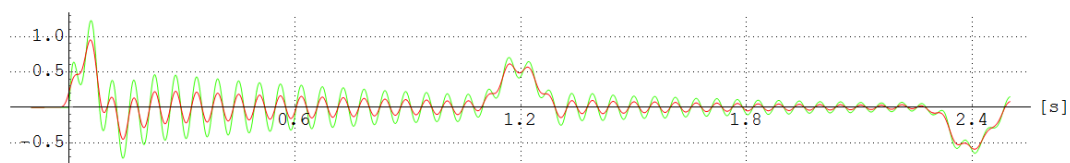
26-celkový příkon [W] - Meas360\_25C\_F3



19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas360\_25C\_F3

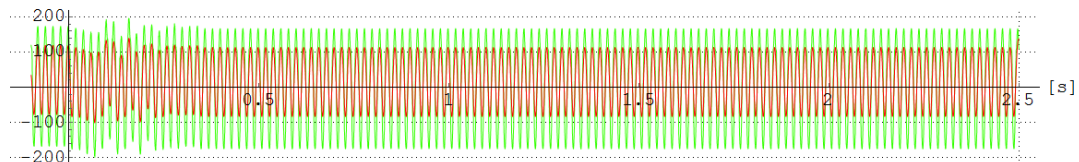


22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas360\_25C\_F3

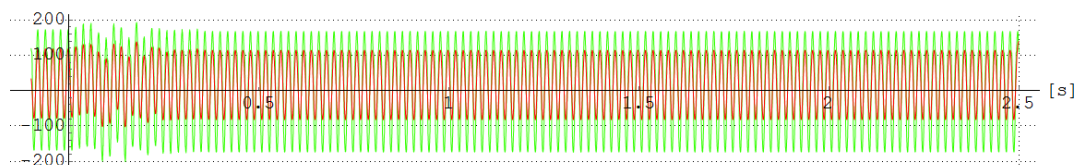


Obr. A.2-3 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas360\_25C\_F3, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 25 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

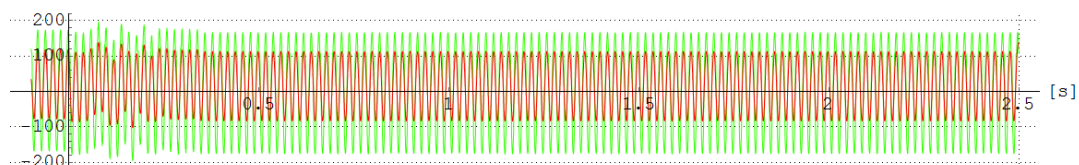
8-Napětí U [V] - Meas117\_8C\_F5-2



9-Napětí V [V] - Meas117\_8C\_F5-2



10-Napětí W [V] - Meas117\_8C\_F5-2



11-Proud U [A] - Meas117\_8C\_F5-2



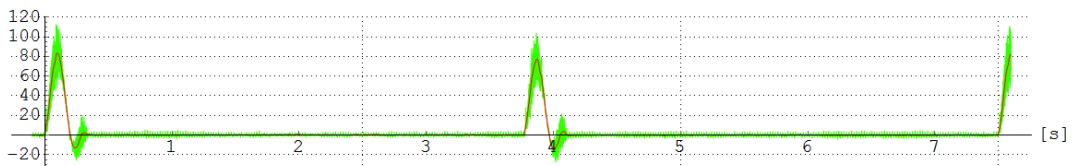
12-Proud V [A] - Meas117\_8C\_F5-2



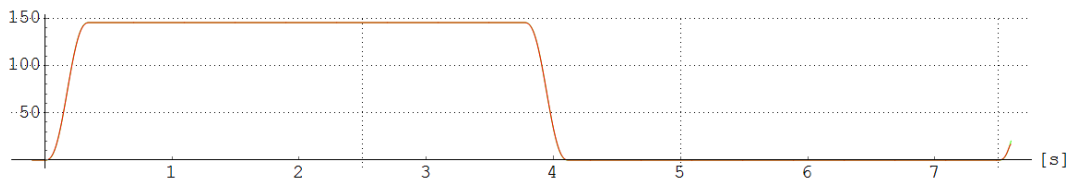
13-Proud W [A] - Meas117\_8C\_F5-2



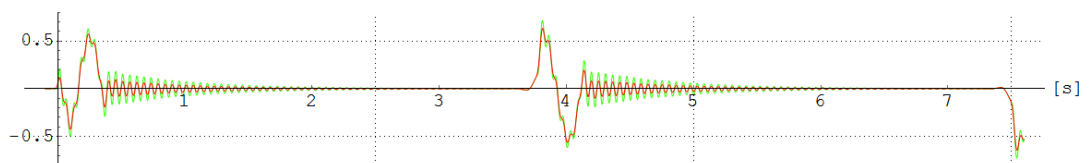
26-celkový příkon [W] - Meas117\_8C\_F5-2



17-zdvih motoru [mm] - Meas117\_8C\_F5-2

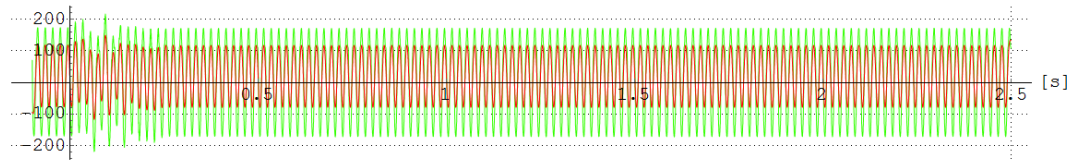


22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas117\_8C\_F5-2

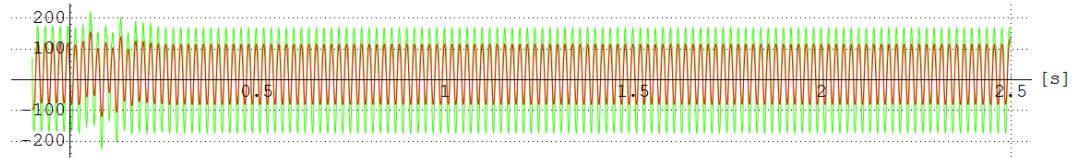


Obr. A.2-4 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas117\_8C\_F5-2, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

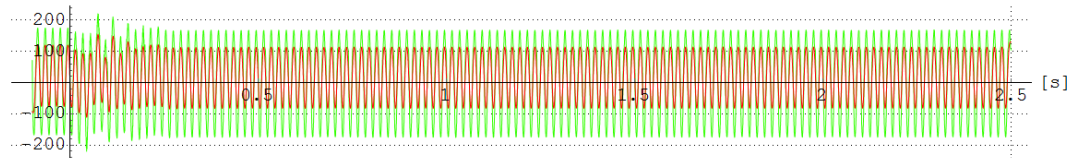
8-Napětí U [V] - Meas178\_8C\_F6



9-Napětí V [V] - Meas178\_8C\_F6



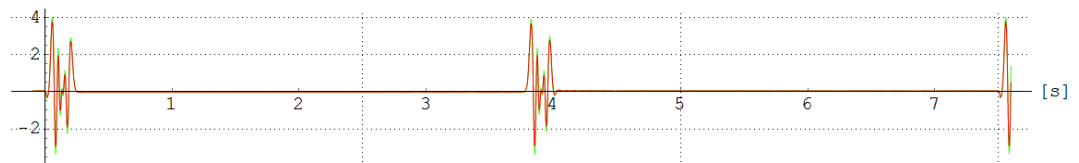
10-Napětí W [V] - Meas178\_8C\_F6



11-Proud U [A] - Meas178\_8C\_F6



12-Proud V [A] - Meas178\_8C\_F6

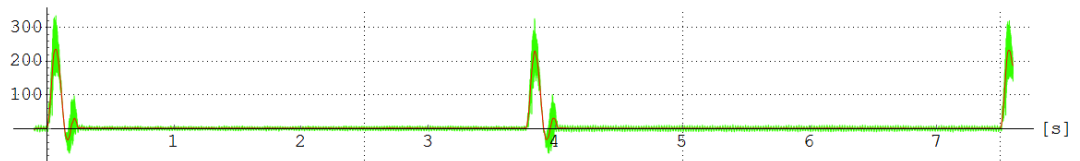


13-Proud W [A] - Meas178\_8C\_F6

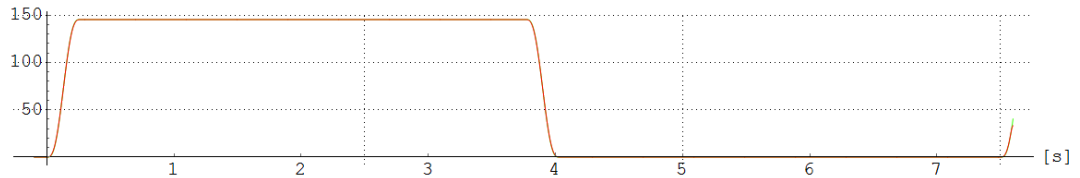




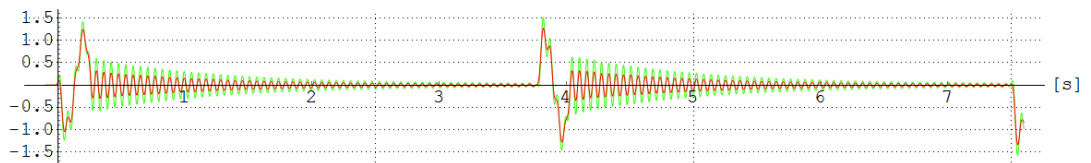
26-celkový příkon [W] - Meas178\_8C\_F6



17-zdvih motoru [mm] - Meas178\_8C\_F6

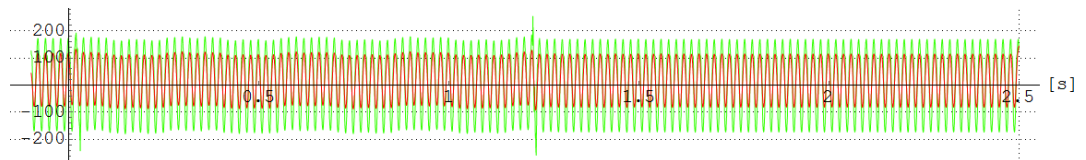


22-rel. zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas178\_8C\_F6

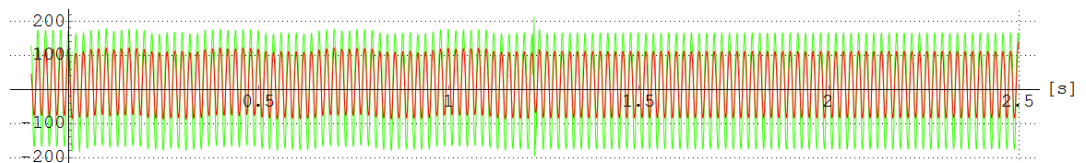


Obr. A.2-5 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas178\_8C\_F6, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

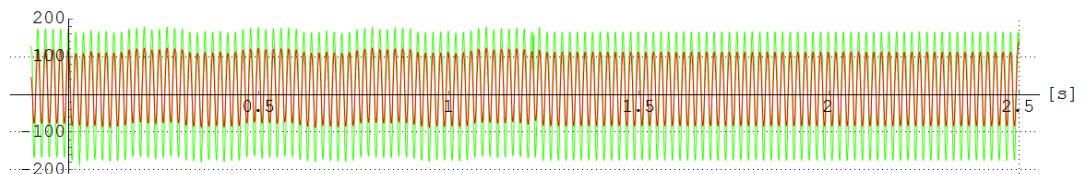
8-Napětí U [V] - Meas363\_8C\_F6-7



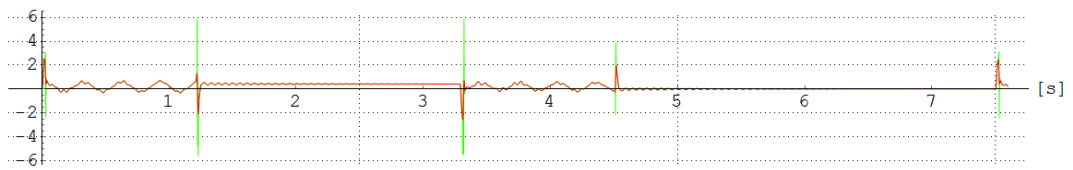
9-Napětí V [V] - Meas363\_8C\_F6-7



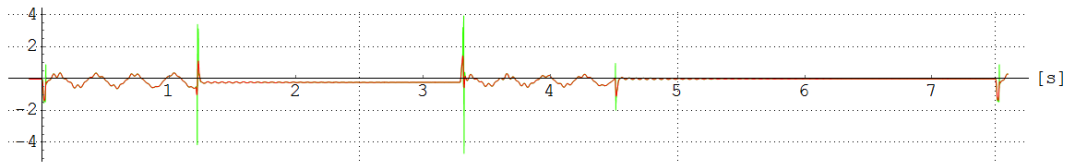
10-Napětí W [V] - Meas363\_8C\_F6-7



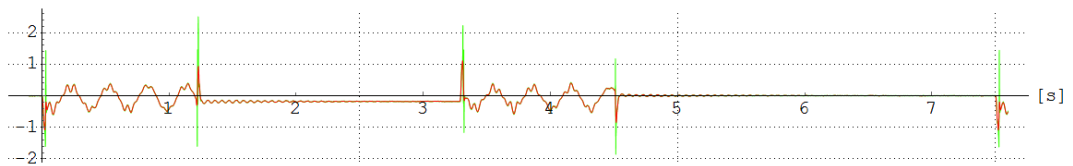
11-Proud U [A] - Meas363\_8C\_F6-7



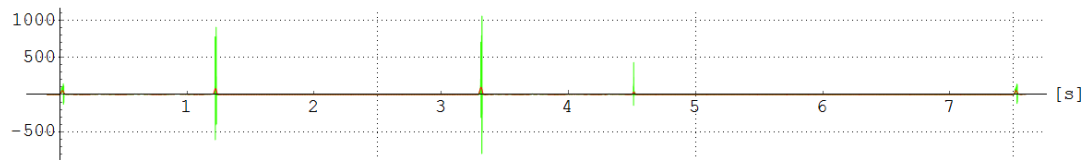
12-Proud V [A] - Meas363\_8C\_F6-7



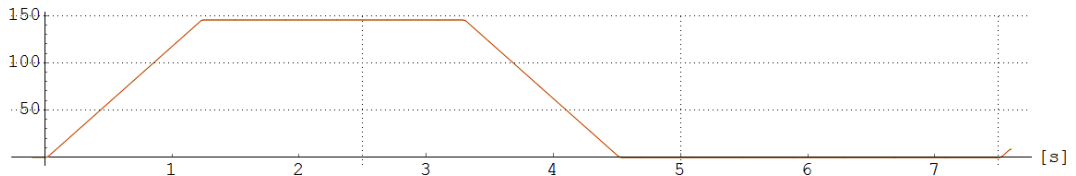
13-Proud W [A] - Meas363\_8C\_F6-7



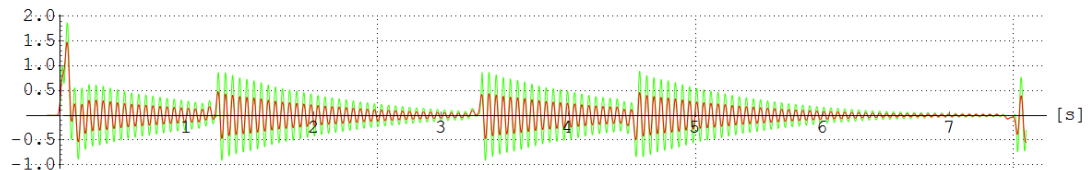
26-celkový příkon [W] - Meas363\_8C\_F6-7



17-zdvih motoru [mm] - Meas363\_8C\_F6-7

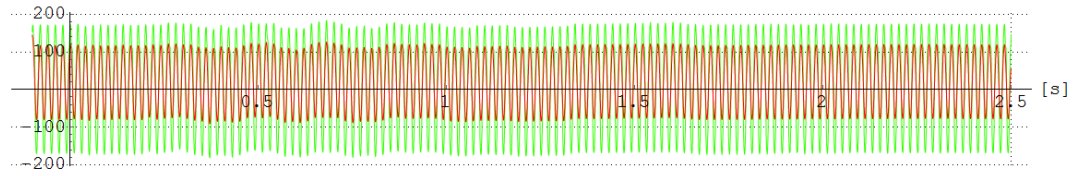


22-rel. zdvih odpruž. hmoty [mm] - Meas363\_8C\_F6-7

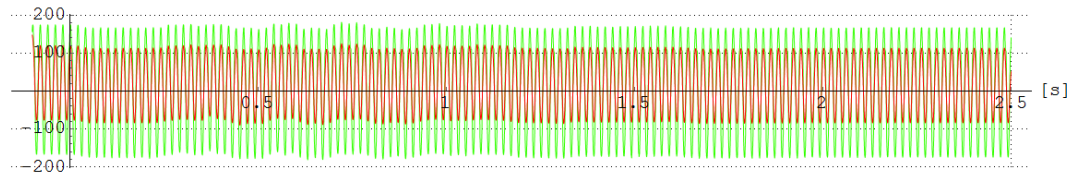


Obr. A.2-6 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas363\_8C\_F6-7, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

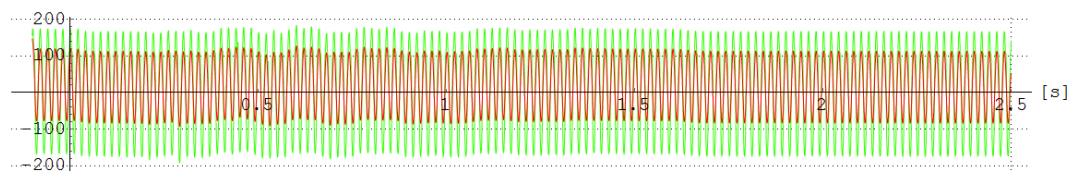
8-Napětí U [V] - Meas378\_8C\_F8-4



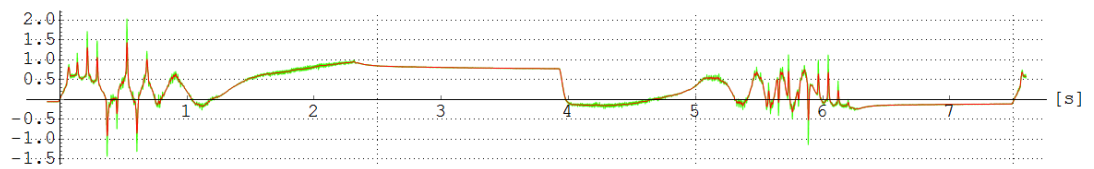
9-Napětí V [V] - Meas378\_8C\_F8-4



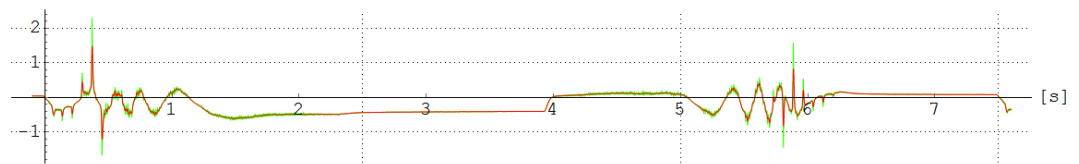
10-Napětí W [V] - Meas378\_8C\_F8-4



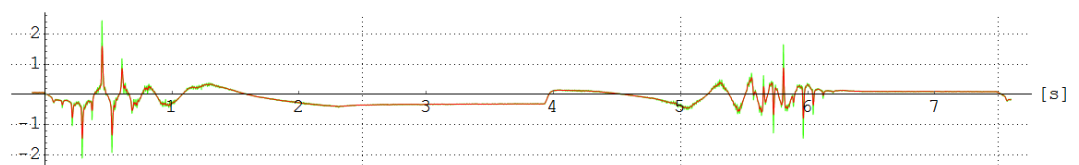
11-Proud U [A] - Meas378\_8C\_F8-4



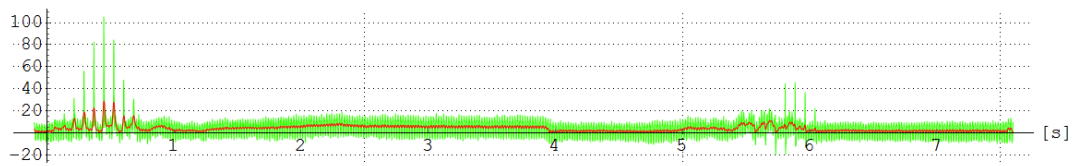
12-Proud V [A] - Meas378\_8C\_F8-4



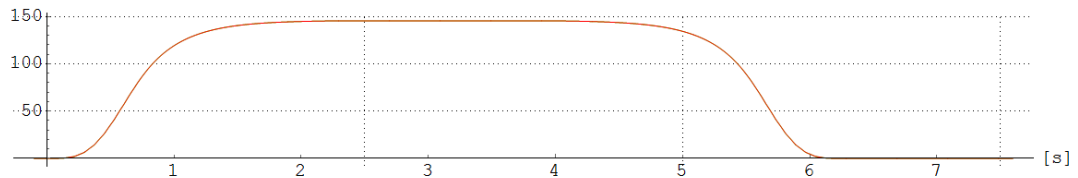
13-Proud W [A] - Meas378\_8C\_F8-4



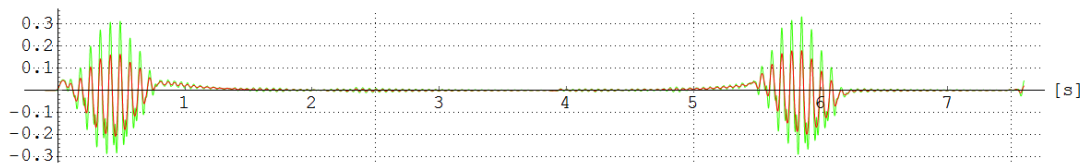
26-celkový příkon [W] - Meas378\_8C\_F8-4



17-zdvih motoru [mm] - Meas378\_8C\_F8-4

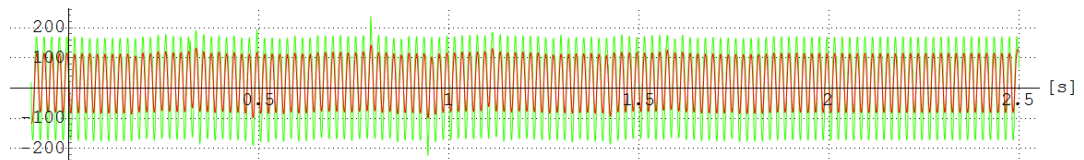


22-rel. zdvih odpruž. hmoty [mm] - Meas378\_8C\_F8-4

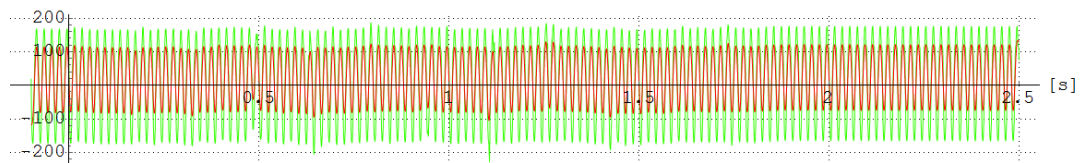


Obr. A.2-7 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas378\_8C\_F8-4, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

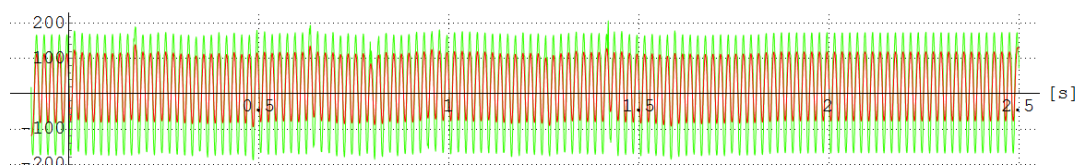
8-Napětí U [V] - Meas160\_8C\_F9-1



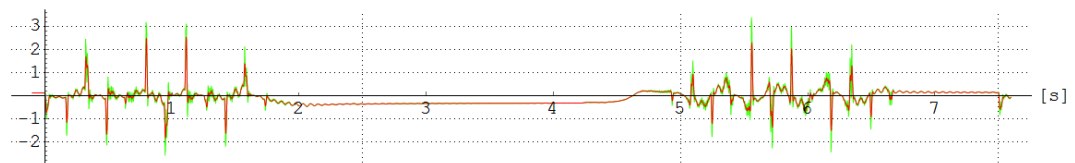
9-Napětí V [V] - Meas160\_8C\_F9-1



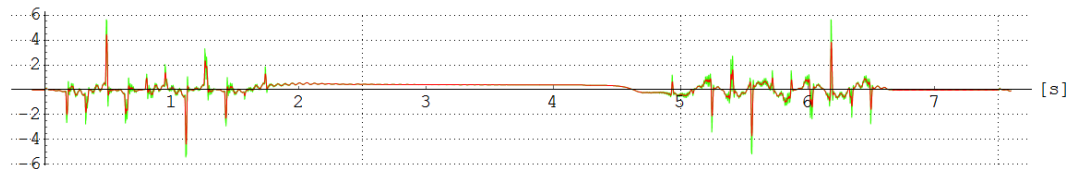
10-Napětí W [V] - Meas160\_8C\_F9-1



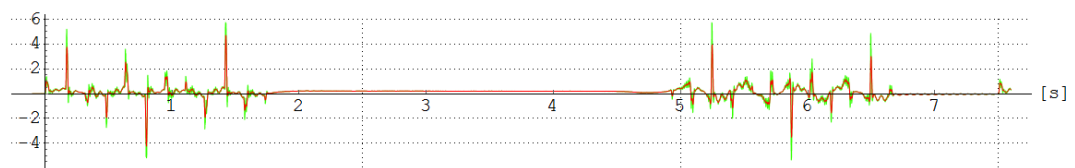
11-Proud U [A] - Meas160\_8C\_F9-1



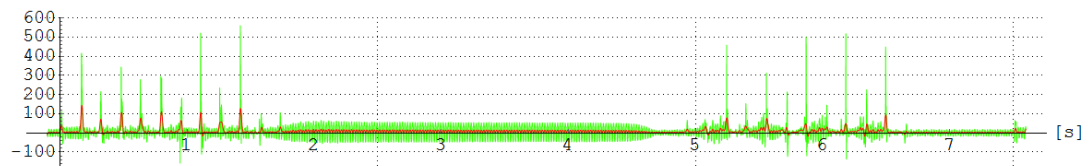
12-Proud V [A] - Meas160\_8C\_F9-1



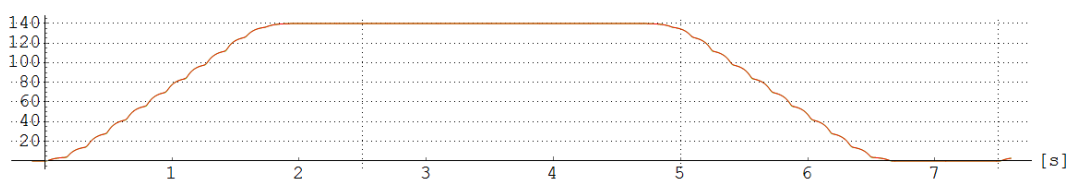
13-Proud W [A] - Meas160\_8C\_F9-1



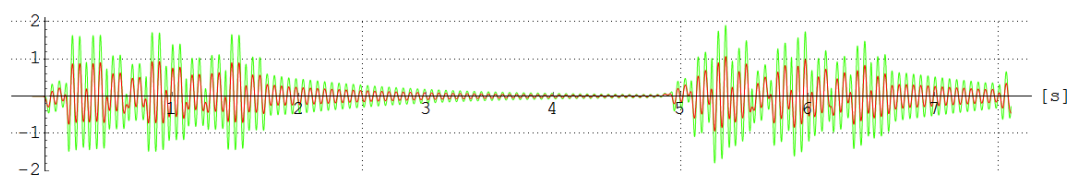
26-celkový příkon [W] - Meas160\_8C\_F9-1



17-zdvih motoru [mm] - Meas160\_8C\_F9-1

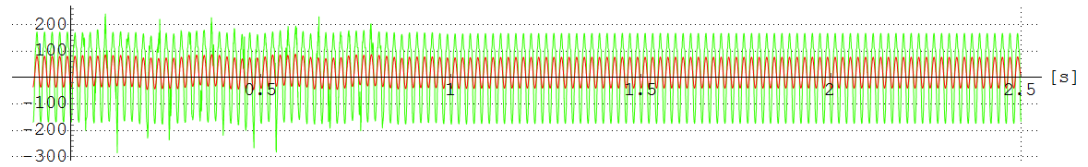


22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas160\_8C\_F9-1

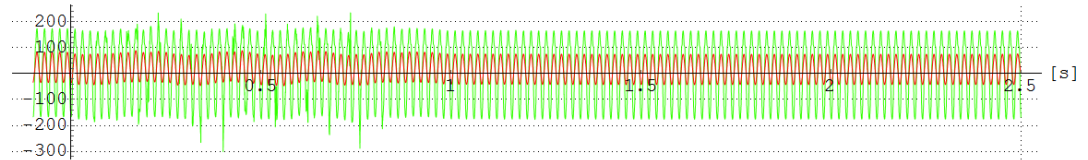


Obr. A.2-8 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas160\_8C\_F9-1, zdvihová křivka **bez použití korekce**, rozsah zdvihu 0 – 140 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

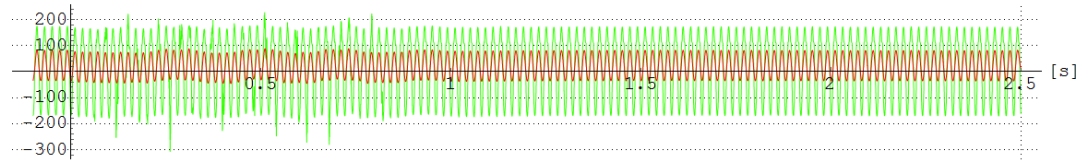
8-Napětí U [V] - Meas370\_8C\_F11-1



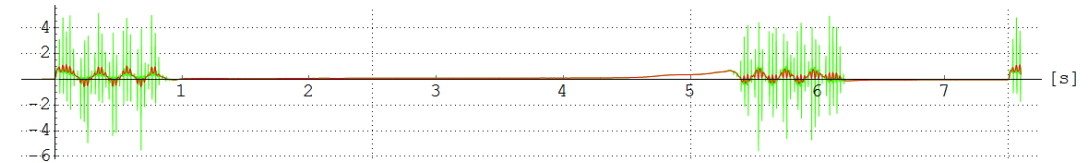
9-Napětí V [V] - Meas370\_8C\_F11-1



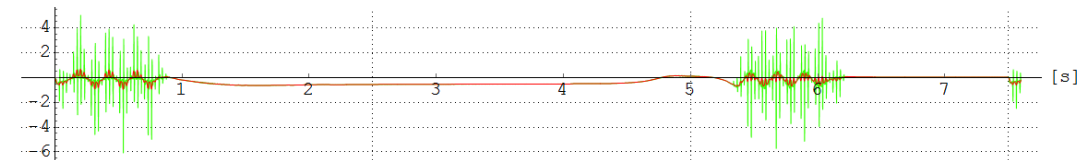
10-Napětí W [V] - Meas370\_8C\_F11-1



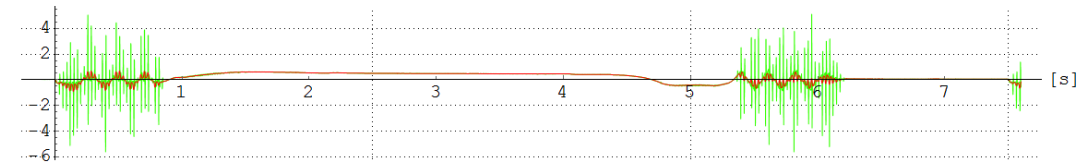
11-Proud U [A] - Meas370\_8C\_F11-1



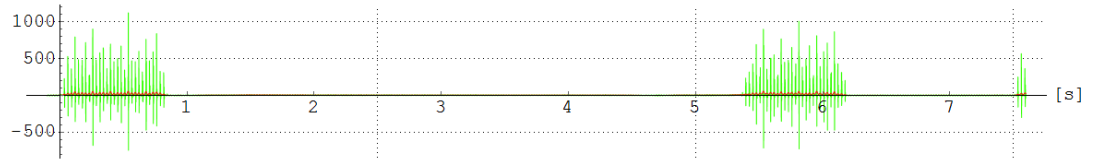
12-Proud V [A] - Meas370\_8C\_F11-1



13-Proud W [A] - Meas370\_8C\_F11-1



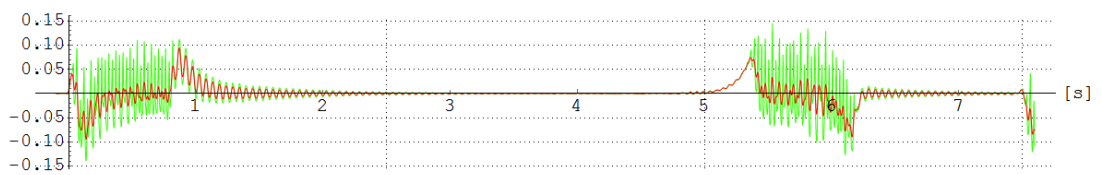
26-celkový příkon [W] - Meas370\_8C\_F11-1



17-zdvih motoru [mm] - Meas370\_8C\_F11-1



22-rel. zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas370\_8C\_F11-1

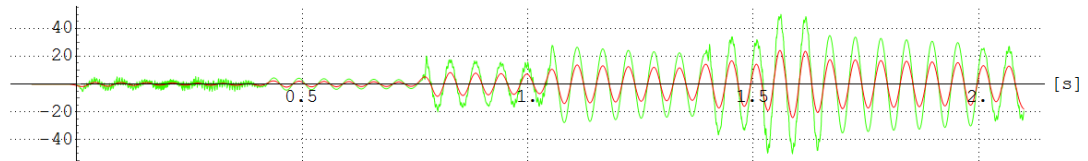


Obr. A.2-9 Průběh naměřených a vyhodnocených elektrických veličin a zdvihu, měření Meas370\_8C\_F11-1, zdvihová křivka **korigovaná**, rozsah zdvihu 0 – 135 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně napětí a proud vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 9 bodů, příkon přes 11 bodů, zdvih a rel. zdvih přes 13 bodů

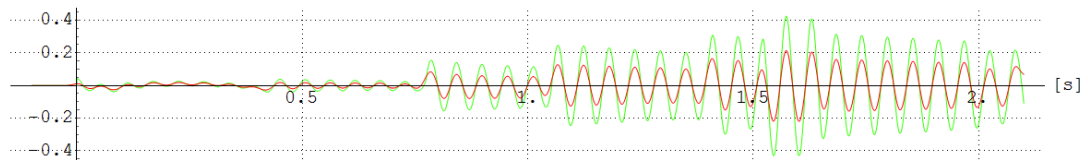
## Příloha [A.3] – Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin

Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin pro měření Meas383\_25C\_F1 jsou uvedeny v kapitole 12.2.2. v hlavní části textu. V této příloze jsou uvedeny grafy relativních mechanických veličin a zdvihu odpružené hmoty.

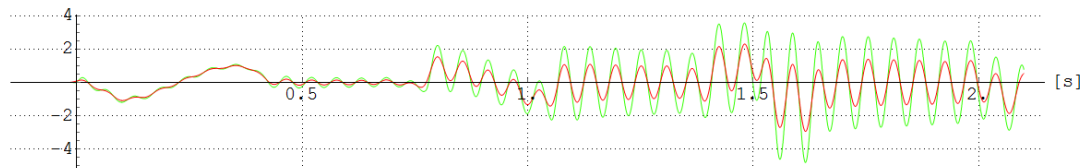
22-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas384\_30C\_F1



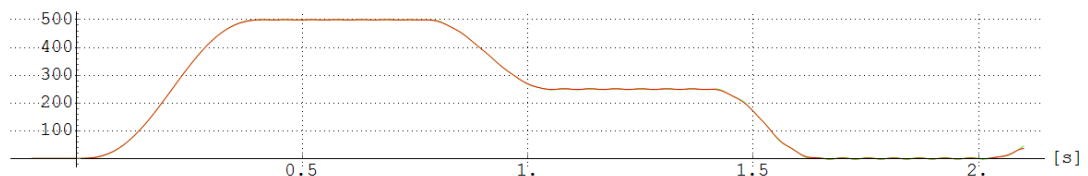
23-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas384\_30C\_F1



24-rel.zdvih.odpruž.hmoty [mm] - Meas384\_30C\_F1



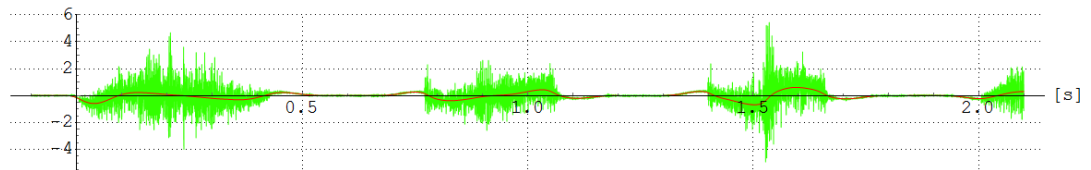
21-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas384\_30C\_F1



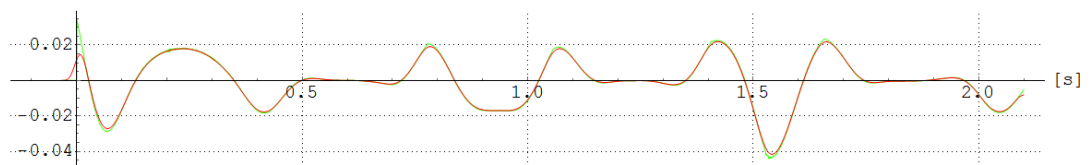
*Obr. A.3-1 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas384\_30C\_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, dynamicky uložená kmitající hmota na pružinách, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*



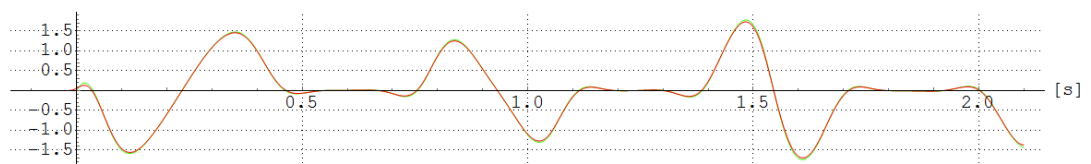
22-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas410\_30C\_F1



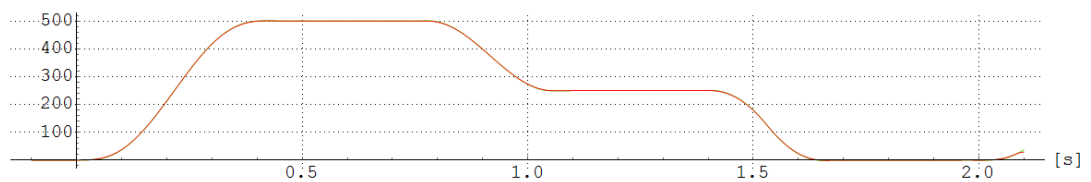
23-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas410\_30C\_F1



24-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas410\_30C\_F1

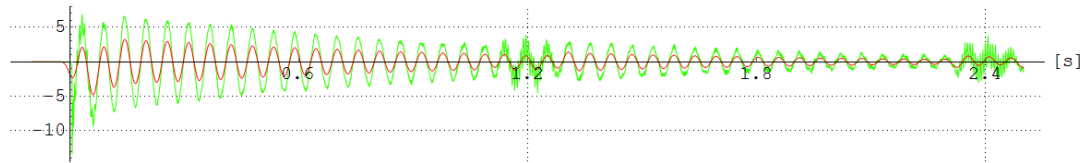


21-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas410\_30C\_F1

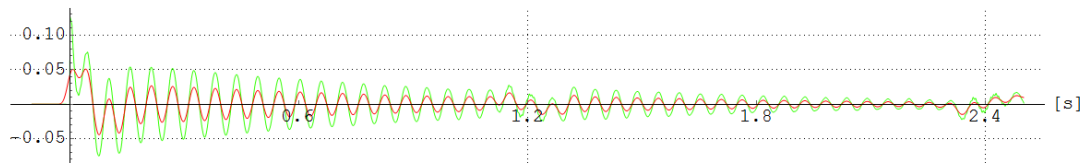


*Obr. A.3-2 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas410\_30C\_F1, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 30 CPM, pevně namontovaná hmota na primární části motoru, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*

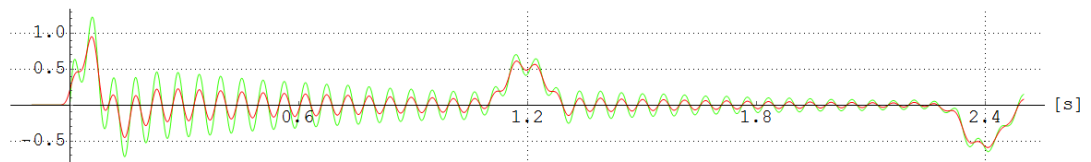
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas360\_25C\_F3



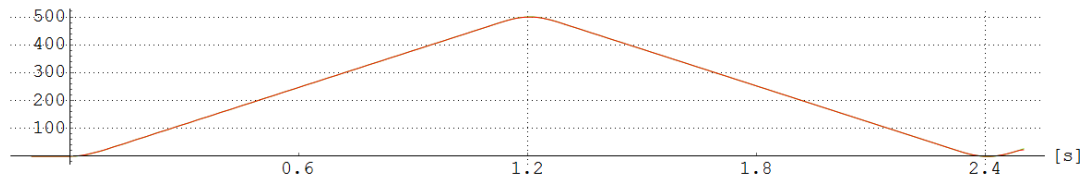
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas360\_25C\_F3



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas360\_25C\_F3

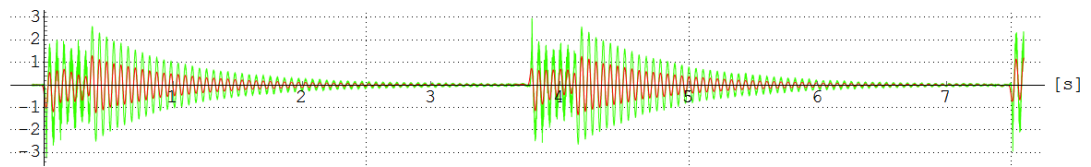


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas360\_25C\_F3

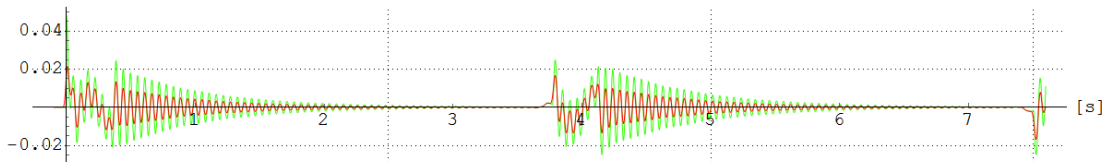


*Obr. A.3-3 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas360\_25C\_F3, rozsah zdvihu 0 – 500 mm, frekvence 25 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*

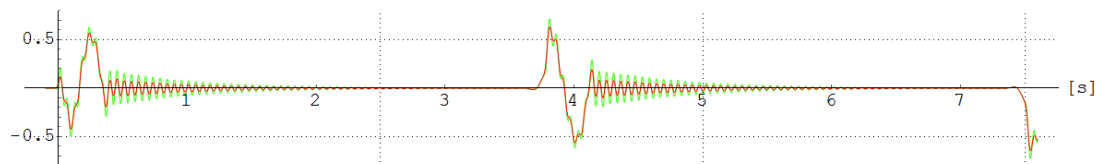
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas117\_8C\_F5-2



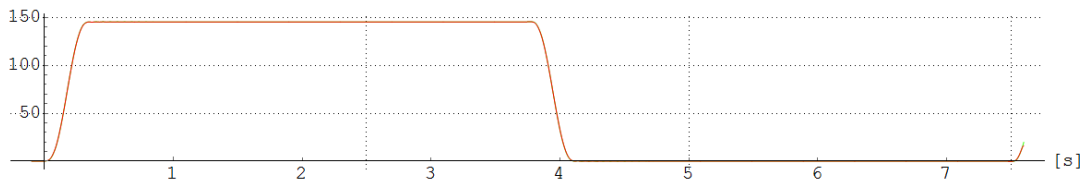
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas117\_8C\_F5-2



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas117\_8C\_F5-2

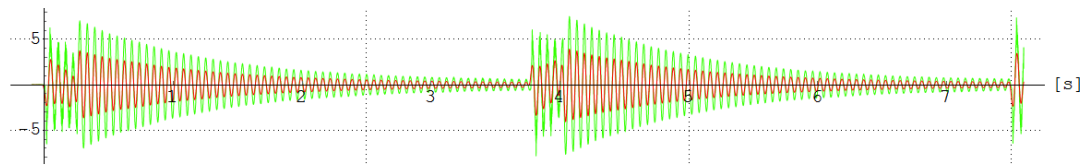


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas117\_8C\_F5-2

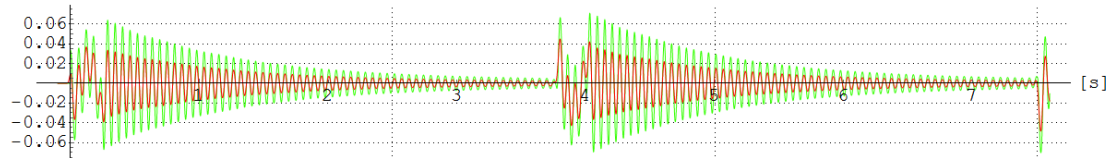


*Obr. A.3-4 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas117\_8C\_F5-2, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*

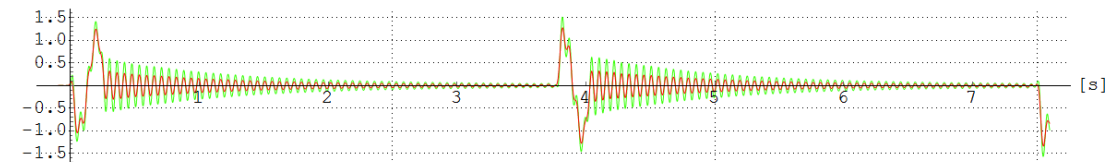
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas178\_8C\_F6



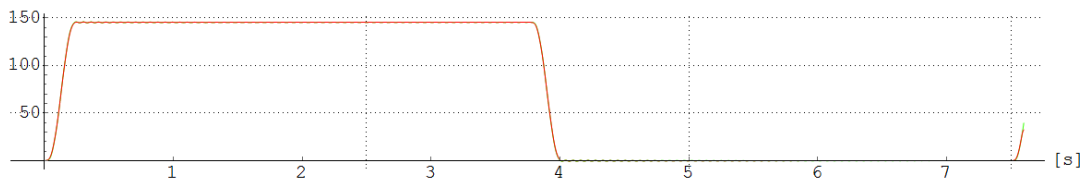
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas178\_8C\_F6



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas178\_8C\_F6

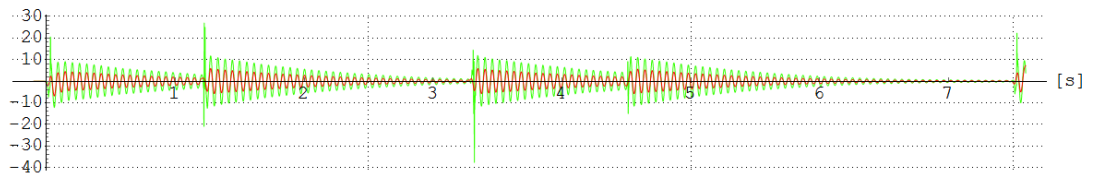


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas178\_8C\_F6

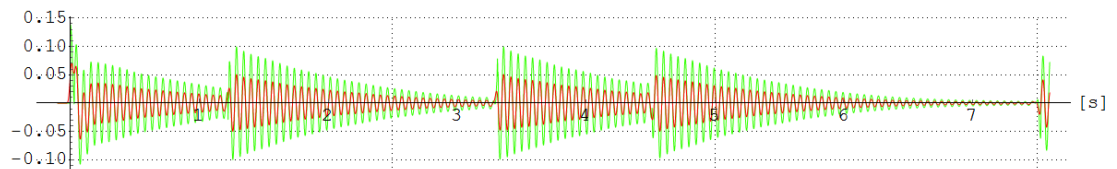


Obr. A.3-5 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas178\_8C\_F6, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů

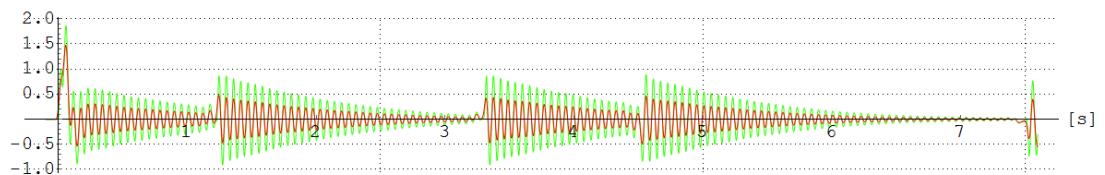
20-rel. zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas363\_8C\_F6-7



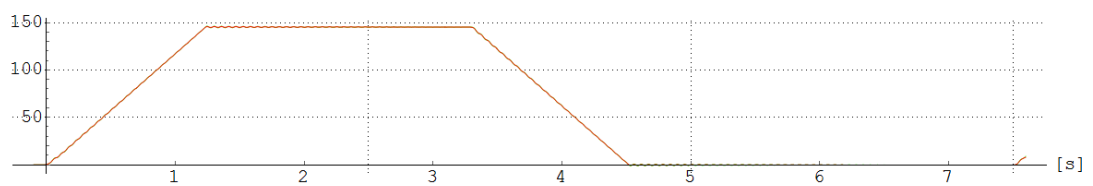
21-rel. rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas363\_8C\_F6-7



22-rel. zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas363\_8C\_F6-7



19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas363\_8C\_F6-7

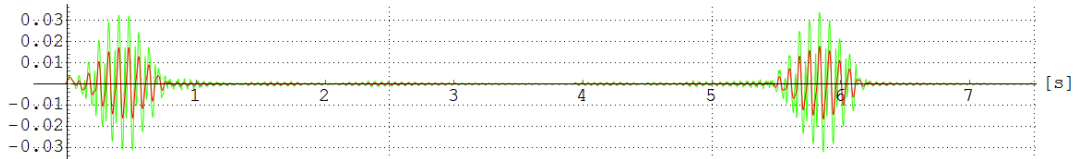


Obr. A.3-6 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas363\_8C\_F6-7, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů

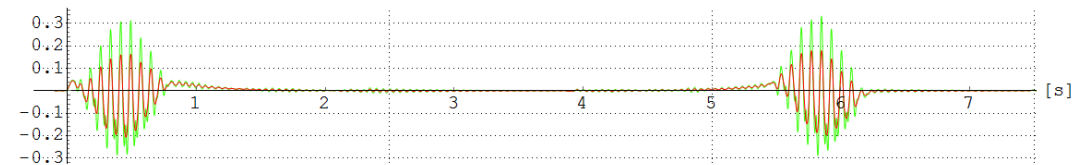
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas378\_8C\_F8-4



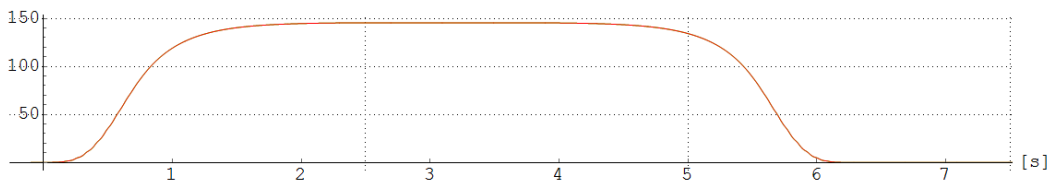
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas378\_8C\_F8-4



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas378\_8C\_F8-4



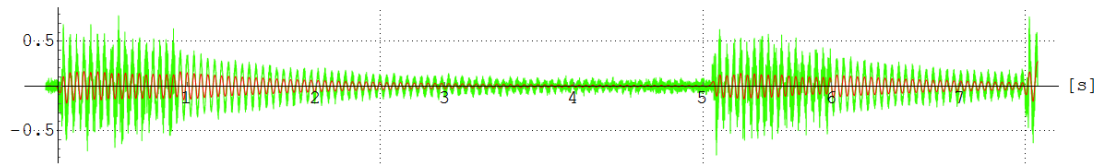
19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas378\_8C\_F8-4



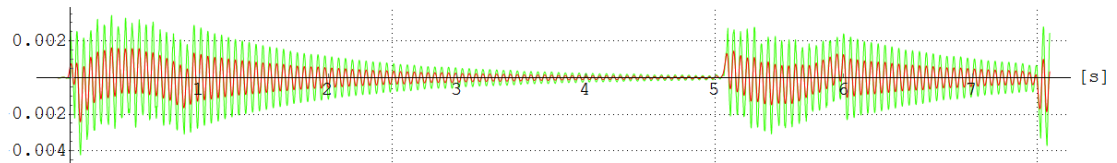
*Obr. A.3-7 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas378\_8C\_F8-4, rozsah zdvihu 0 – 145.38 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*

Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin pro měření s označením Meas160\_8C\_F9-1 resp. Meas163\_8C\_F9-2 jsou uvedeny v kapitole 12.2.3. v hlavní části textu.

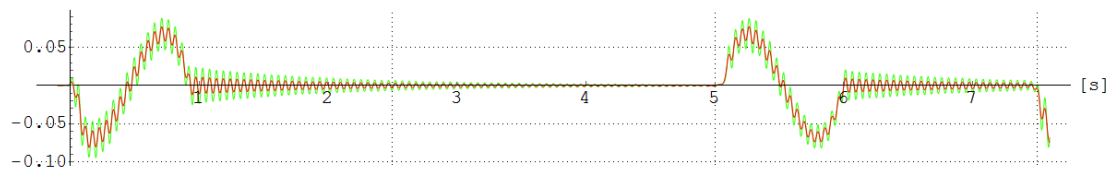
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas229\_8C\_F10-1



21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas229\_8C\_F10-1



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas229\_8C\_F10-1

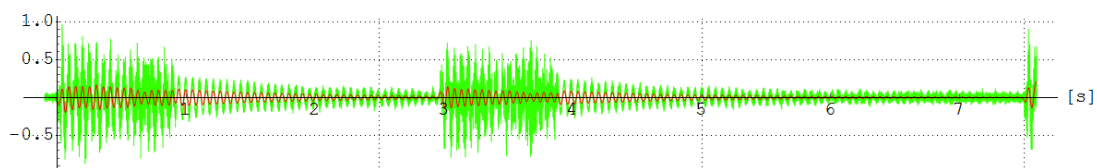


19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas229\_8C\_F10-1

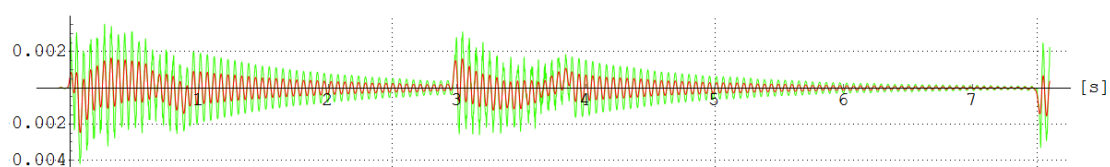


Obr. A.3-8 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas229\_8C\_F10-1, zdvihová křivka **pro lineární průběh, bez korekce IS**, rozsah zdvihu 0 – 140 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů

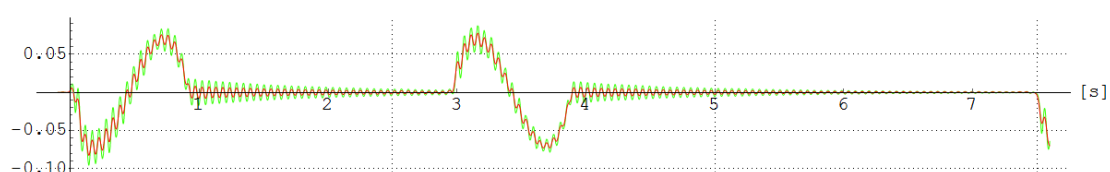
20-rel.zrych.odpruž.hmoty [m/s<sup>2</sup>] - Meas232\_8C\_F10-2



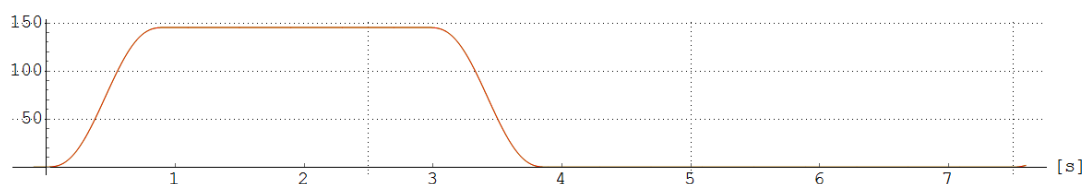
21-rel.rych.odpruž.hmoty [m/s] - Meas232\_8C\_F10-2



22-rel.zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas232\_8C\_F10-2



19-zdvih odpruž.hmoty [mm] - Meas232\_8C\_F10-2



*Obr. A.3-9 Průběh naměřených a vyhodnocených relativních mechanických veličin, měření Meas232\_8C\_F10-2, zdvihová křivka fce F6, bez korekce IS, rozsah zdvihu 0 – 145 mm, frekvence 8 CPM, zeleně naměřené redukované průběhy, červeně vyhlazená data pomocí klouzavého průměru přes 13 bodů*

Naměřené a vyhodnocené průběhy mechanických veličin pro měření Meas370\_8C\_F11-1 resp. Meas372\_8C\_F11-2 jsou uvedeny v kapitole 12.2.3. v hlavní části textu.



## Příloha [A.4] – Tabulky maxim, minim a směrodatných odchylek zdvihu

V následujících tabulkách přílohy A.4 jsou uvedené naměřené a vyhodnocené hodnoty maximálního a minimálního zdvihu v krajních úvratích spolu se směrodatnou odchylkou a průměrnou hodnotou zdvihu pro jednotlivá měření. Všechny uvedené hodnoty jsou počítané z několika po sobě jdoucích cyklů a jsou v jednotkách [mm]. Označení {mx} odpovídá množině maximálních hodnot, ozn. {mn} množině minimálních hodnot.

Tab. A.4-1 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F1 a F3, jednotky [mm])

	Meas383_25C_F1	Meas360_25C_F3
Max {mx} – Min {mx}	0.115	0.008
Mean maxim	499.861	499.861
Stdv maxim	0.061	0.005
Max {mn} – Min {mn}	0.115	0.146
Mean minim	- 0.074	0.098
Stdv minim	0.059	0.084
Max {mx} – Min {mn}	500.07	499.814
Mean {mx - mn}	499.935	499.763
Stdv {mx - mn}	0.033	0.082

Tab. A.4-2 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F1, měření Meas384\_30C\_F1 s dynamicky uloženou kmitající hmotou na pružinách, měření Meas410\_30C\_F1 s pevně namontovanou hmotou na primární části motoru, jednotky [mm])

	Meas384_30C_F1	Meas410_30C_F1
Max {mx} – Min {mx}	0.082	0.063
Mean maxim	499.897	500.063
Stdv maxim	0.041	0.037
Max {mn} – Min {mn}	0.04	0.103
Mean minim	- 0.066	0.114
Stdv minim	0.021	0.057
Max {mx} – Min {mn}	500.02	500.036
Mean {mx - mn}	499.963	499.949
Stdv {mx - mn}	0.029	0.021

Tab. A.4-3 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F5-2 a F8-4, jednotky [mm])

	Meas117_8C_F5-2	Meas378_8C_F8-4
Max {mx} – Min {mx}	0.115	0.113
Mean maxim	145.333	145.417
Stdv maxim	0.039	0.064
Max {mn} – Min {mn}	0.063	0.077
Mean minim	- 0.107	0.039
Stdv minim	0.024	0.042
Max {mx} – Min {mn}	145.53	145.48
Mean {mx - mn}	145.439	145.378
Stdv {mx - mn}	0.026	0.023

Tab. A.4-4 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F6 a F6-7, jednotky [mm])

	Meas178_8C_F6	Meas363_8C_F6-7
Max {mx} – Min {mx}	0.018	0.448
Mean maxim	145.499	144.954
Stdv maxim	0.009	0.224
Max {mn} – Min {mn}	0.027	0.33
Mean minim	0.035	- 0.639
Stdv minim	0.015	0.17
Max {mx} – Min {mn}	145.483	145.961
Mean {mx - mn}	145.464	145.593
Stdv {mx - mn}	0.014	0.069

Tab. A.4-5 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F9-1 a F9-2, jednotky [mm])

	Meas160_8C_F9-1	Meas162_8C_F9-1
Max {mx} – Min {mx}	0.038	0.067
Mean maxim	139.923	140.067
Stdv maxim	0.021	0.034
Max {mn} – Min {mn}	0.067	0.097
Mean minim	- 0.135	0.061
Stdv minim	0.035	0.051
Max {mx} – Min {mn}	140.111	140.093
Mean {mx - mn}	140.058	140.006
Stdv {mx - mn}	0.018	0.017

Tab. A.4-6 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F10-1 a F10-2, jednotky [mm])

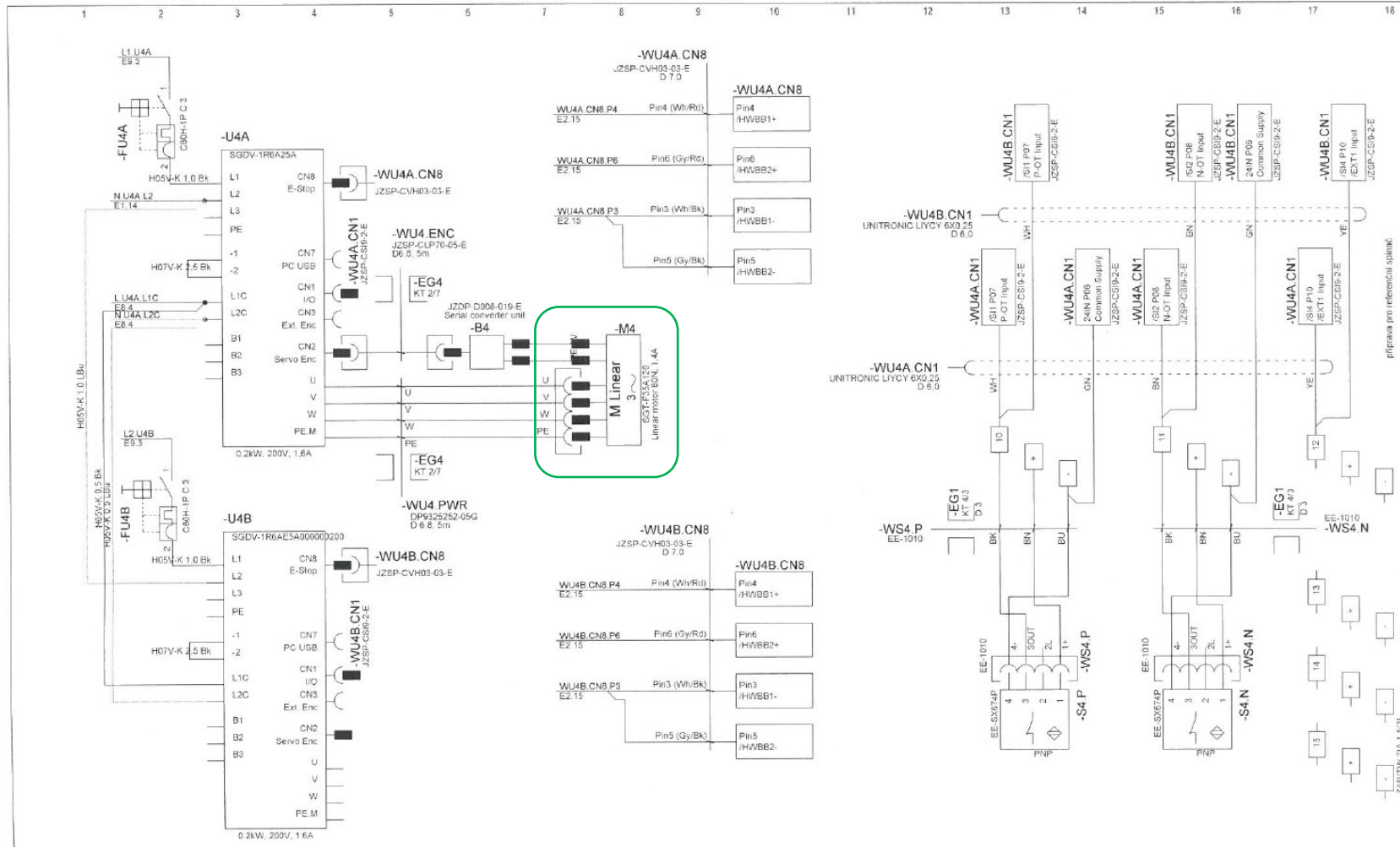
	Meas229_8C_F10-1	Meas232_8C_F10-2
Max {mx} – Min {mx}	0.041	0.034
Mean maxim	140.016	145.345
Stdv maxim	0.021	0.017
Max {mn} – Min {mn}	0.047	0.091
Mean minim	0.015	- 0.103
Stdv minim	0.033	0.064
Max {mx} – Min {mn}	140.048	145.509
Mean {mx - mn}	140	145.448
Stdv {mx - mn}	0.041	0.053

Tab. A.4-6 Výsledky naměřených a vyhodnocených maxim a minim zdvihu v krajních úvratích (zdvih. křivka F11-1 a F11-2, jednotky [mm])

	Meas370_8C_F11-1	Meas372_8C_F11-2
Max {mx} – Min {mx}	0.054	0.074
Mean maxim	135.02	135.037
Stdv maxim	0.027	0.038
Max {mn} – Min {mn}	0.065	0.07
Mean minim	- 0.003	- 0.001
Stdv minim	0.034	0.036
Max {mx} – Min {mn}	135.087	135.12
Mean {mx - mn}	135.023	135.039
Stdv {mx - mn}	0.009	0.015

Příloha [A.5] – Elektrické schéma připojení motoru SGT-C-F35A120 do rozvaděče „Stand Yaskawa v.2“

140



Obr. A.5-1 – Elektrické schéma zapojení rozvaděče, převzatý obrázek z [33], zeleně zvýrazněné připojení motoru SGT-C-F35A120 do rozvaděče