

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Diplomová práce

**Návrh zkušebního zařízení nové
generace pro dlouhodobé zkoušky
univerzálního aktuátoru**

Bc. Jakub Strejc

školitel: Ing. Libor Hrabal
konzultant: RNDr. František Adamec CSc.

České Budějovice 2017

Bibliografické údaje:

STREJC, J. 2017: Návrh zkušebního zařízení nové generace pro dlouhodobé zkoušky univerzálního aktuátoru. Diplomová práce – 72 str., Ústav fyziky a biofyziky, Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

STREJC, J. 2017: Proposal of a new-generation test bench for long-term tests of a general purpose actuator. M.Sc. Thesis [in Czech.] – 72 pp., Institute of Physics and Biophysics Faculty of Science, University of South Bohemia in České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:

Aktuátory jsou v dnešní době nedílnou součástí mnoha moderních zařízení a strojů. Typicky zajišťují ovládání různých částí zařízení, například správný chod klapek a ventilů. Jelikož jsou aktuátory důležitým prvkem mnoha strojů, je nutné a přínosné zabývat se jejich vývojem a testováním. Tato diplomová práce se soustřeďuje na výběr, sestavení a otestování nového zkušebního zařízení pro dlouhodobé zátěžové zkoušky univerzálního aktuátoru (*General Purpose Actuator*), hojně používaného v automobilovém průmyslu. Důvodem k zadání a praktickému řešení tohoto úkolu je nedostačující současný model zkušebního zařízení, který nevyhovuje moderním testovacím požadavkům zadávací společnosti.

Annotation [in English]:

Actuators are a fundamental part of many modern devices and machines nowadays. Typically, they are responsible for operation of various machine parts, for instance correct performance of flaps and valves. Since actuators are an important device, it is crucial and beneficial to pursue development and testing of this component. This Master's thesis focusses on the proposal, construction and testing of a new test bench used for long-term tests of a universal actuator (*General Purpose Actuator*), widely applied in automobile industry. The main reason for assigning this practical task is the unsatisfactory current type of the test bench, which does not comply with the modern testing demands of the requesting company.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích, 12. 12. 2017

Bc. Jakub Strejc

Poděkování

Rád bych poděkoval firmě Robert Bosch, s.r.o., v Českých Budějovicích, která mi umožnila se realizovat v tomto praktickém úkolu a finančně projekt zajistila. Jmenovitě bych rád poděkoval školiteli Ing. Hrabalovi za pomoc při praktické realizaci prototypu a za trpělivé konzultace při zprovoznění prototypu. Díky patří též konzultantovi Dr. Adamcovi za podnětné a inspirativní komentáře k textu práce, dále spolupracovníkům na pracovním oddělení ve firmě Robert Bosch, s.r.o., České Budějovice, za technickou výpomoc při zprovoznění prototypu a veselé pracovní prostředí. Děkuji též rodičům a přátelům za morální podporu během studia a zejména při dokončování mé práce.

Obsah

1	Cíle diplomové práce	1
2	Úvod	2
2.1	Aktuátor	2
2.2	Univerzální aktuátor (GPA) a jeho použití	2
2.2.1	Motor.....	4
2.2.2	Převodovka	5
2.2.3	Senzor.....	5
2.3	Aktuátory GPA 1.0 a 3.1	6
3	Řešení úkolu diplomové práce.....	9
3.1	Dlouhodobá zkouška.....	9
3.2	Rozbor současného stavu.....	13
3.3	Návrh řešení.....	18
3.3.1	Pásová brzda	18
3.3.2	Návrh řešení II. – Hysterezní brzda	21
3.3.3	Návrh řešení III. – Servomotor	25
3.3.3.1	Elektrický servopohon jako systém	25
3.3.3.2	Řízení servopohonu.....	26
3.3.3.3	Výběr servopohonu	27
3.4	Porovnání navrhovaných řešení.....	30
3.5	Realizace prototypu	31
3.5.1	Momentový snímač.....	31
3.5.2	Ložiska	34
3.5.3	Hřídelové spojky.....	36
3.5.4	Vlastní konstrukce prototypu	37
3.6	Měření a výsledky	42
4	Diskuze	67
5	Závěr	70
6	Literatura.....	71

1 Cíle diplomové práce

Tato práce má za úkol vytvořit praktický návrh nového zkušebního stavu pro dlouhodobé zátěžové zkoušky univerzálního aktuátoru pro firmu Robert Bosch, s.r.o., České Budějovice. Současný testovací stav nevyhovuje aktuálním zkušebním požadavkům, a je proto vyžadován nový, který bude schopen nové parametry testovat.

Cílem této diplomové práce je navrhnout tři řešení pro generování brzdného momentu představujícího umělou zátěž pro univerzální aktuátor, a z těchto tří řešení vybrat a otestovat technicky a ekonomicky nejvhodnější způsob.

Práce si též dává za cíl navrhnout a zkonstruovat konkrétní zkušební prototyp, provést na něm základní měření a vyhodnotit tak jeho úspěšnost.

2 Úvod

2.1 Aktuátor

Akční člen, nazýván též aktuátor (z anglického *actuator*), je vykonávací mechanismus, který zajišťuje ovládání, či regulaci určitého členu, např. klapky, ventilu, apod. Ve své podstatě aktuátor převádí přednastavené informace (elektrické, pneumatické a jiné impulzy) na konkrétně definovanou mechanickou energii, která je využita k ovládání různých zařízení. Například informace o změně směru je převedena aktuátorem na mechanickou energii potřebnou k vychýlení. Aktuátor je, jednoduše řečeno, převodníkem energie a je vlastně opakem senzoru. Rozdělení aktuátorů je mnoho, nicméně pro tuto práci je zajímavé rozdělení podle energie, kterou je aktuátor ovládán [1, 3, 25].

Rozdělení akčních členů podle fyzikálního působení [*upraveno z 1*]:

- Elektronické (např. kapacitní dioda)
- Elektro-magnetické (např. přesytka)
- Elektro-mechanické (např. stykač, stejnosměrné a střídavé motory)
- Hydraulické (např. hydromotory, ventily)
- Pneumatické (např. ventily, rotační pneumatické motory)
- Nekonvenční (např. mikroakumulátory)

2.2 Univerzální aktuátor (GPA) a jeho použití

Jeden z mnoha typů aktuátorů je tzv. univerzální aktuátor, neboli *General Purpose Actuator* (GPA). Dle předchozího rozdělení patří mezi elektro-mechanické aktuátory. Jak název napovídá, jedná se o multifunkční nastavovač využívaný zejména k polohování různých klapek nebo ventilů, a má tedy široké možnosti využití. Na trhu jsou dostupné nejrůznější typy GPA s variabilními parametry, které většinou určuje sám zákazník v závislosti na požadované oblasti využití GPA. Jde zejména o změny parametrů v převodovce, na které závisí, jak velký točivý moment bude GPA schopno vyvinout.

Jakožto člen managementu vznětového nebo zážehového spalovacího motoru slouží univerzální aktuátor v různých modifikacích k ovládnání například:

- a) vířivých klapek (*swirl flaps*) v sacím potrubí motoru. V určitých režimech spalovacího motoru (např. při vysokých otáčkách, velkém zatížení) zajišťují víření vzduchu v sacích kanálech vznětového motoru ještě před tím, než se vzduch dostane do spalovacího prostoru. Cílem tohoto víření je dokonalé promísení nasávaného vzduchu s palivem. GPA též slouží k uzavření sacího kanálu v případě systému se dvěma sacími kanály na válec.
- b) *Waste Gate* (WG), což je přepouštěcí klapka turbodmychadla zajišťující plnicí tlak dle režimu spalovacího motoru.
- c) *Variable Nozzle Turbine* (VNT), *Variable Turbine Geometry* (VTG). Aktuátor slouží k nastavování polohy variabilních lopatek turbíny turbodmychadla k udržení požadovaného plnicího tlaku dle režimu motoru.
- d) nastavování polohy EGR ventilu (*Exhaust Gas Recirculation*). Tento ventil zajišťuje zpětné vedení spalin z výfukového potrubí zpět do sání motoru, z důvodu snížení emisí oxidů dusíku vznětového nebo zážehového spalovacího motoru.

Univerzální aktuátor se skládá ze tří základních částí, a to z motoru, převodovky a senzoru (Obr. 1). Tyto části jsou detailněji rozebrány v následujících dílčích kapitolách. Přes konektor aktuátoru je zajištěno napájení motoru a senzoru a odečítání aktuálních hodnot polohy mechanické páky [0].

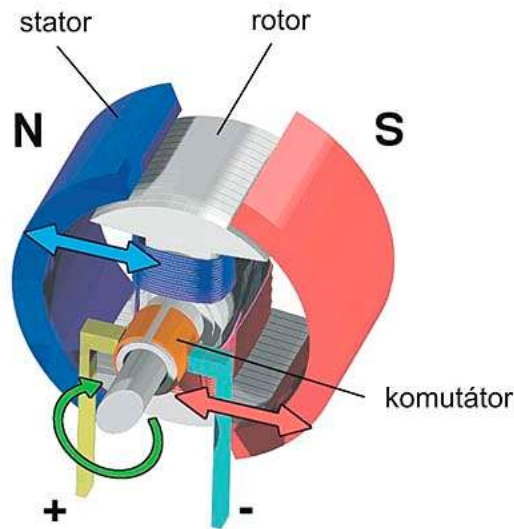


Obr. 1 Blokové schéma znázorňující základní části univerzálního aktuátoru (*General Purpose Actuator*). Šipka ukazuje směr otáčení páky [0].

2.2.1 Motor

Jako hnací ústrojí aktuátoru GPA se používá stejnosměrný (DC) motor s permanentními magnety. Použití tohoto motoru má za výhodu snadnou změnu směru otáčení pouze změnou polaritu napájení motoru. Další výhodou je lineární závislost otáček motoru na napětí. Nevýhodou však je nutnost použití komutátoru a uhlíkových kartáčů, které se časem opotřebovávají a je tedy nutné je po určité době vyměnit. GPA je navrženo na nájezd určeného počtu kilometrů a má tedy jasně danou životnost. S žádnou výměnou se nepočítá.

Princip fungování motoru v aktuátoru GPA spočívá v odpuzování a přitahování magnetů a elektromagnetů (Obr. 2). U DC motoru s permanentními magnety, jak už sám název napovídá, se stator skládá z permanentních magnetů. Napájecí napětí je přenášeno přes komutátor na rotor, který se skládá z elektromagnetů. Protože rotor je poháněn odpudivou silou stejně polarizovaných magnetů, vždy po určitém pootočení je nutné polaritu rotorových elektromagnetů změnit. Tuto důležitou změnu polaritu elektromagnetů zajišťuje právě komutátor ve spolupráci s uhlíkovými kartáči, umožňujícími vodivý kontakt rotoru s napájecím napětím [7, 8].



Obr. 2 Principiální schéma DC motoru se stator z permanentních magnetů (N = severní pól, S = jižní pól) Šipky: zelená = směr otáčení rotoru, modrá a červená = směr odpuzující síly stejně nabitých cívek a permanentního magnetu [7].

2.2.2 Převodovka

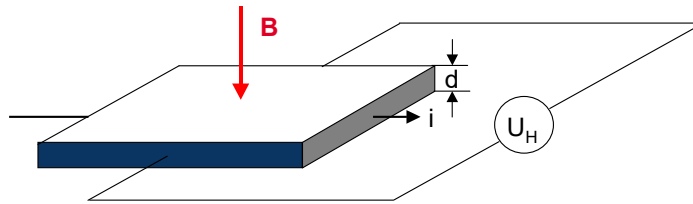
Převodovka aktuátoru GPA slouží k přenosu a násobení točivého momentu DC motoru. V naprosté většině případů se skládá z pastorku na hřídeli DC motoru, mezikola s větším počtem zubů než má pastorek pro znásobení točivého momentu a ozubeného segmentu sloužícího ke změně směru otáčení a přenosu momentu na páčku GPA. Podle počtu a velikosti ozubených kol je možné zvolit převodový poměr. Obecně, převodový poměr i je dán poměrem mezi průměrem hnaného a hnacího kola. Převodový poměr větší než jedna umožní těžký převod, poměr menší než jedna zajistí lehký převod [9].

2.2.3 Senzor

Senzor (neboli čidlo, snímač) je důležitou součástí GPA. Je umístěn na některém z ozubených kol a nepřímo informuje řídicí jednotku o poloze páky tak, že zjistí reálný stav a přemění tuto informaci o prostorové pozici páky na elektrický signál. Řídicí jednotka pak porovnává skutečnou polohu (zjištěnou senzorem) s požadovanou polohou a reguluje DC motor k dosažení požadované polohy. V minulosti se jako senzor používala odporová dráha s jezdcem (tj. potenciometrický senzor), kde díky změně elektrického odporu obvodu docházelo ke změně výstupního napětí senzoru. V současnosti se používají bezkontaktní senzory pracující na principu Hallovy sondy. Tyto senzory jsou méně citlivé na změnu teploty (díky menší roztažnosti) a tedy poskytují přesnější informaci. Další výhodou je spolehlivost. Kontaktní senzory (odporové) mohou být znečištěny prachem z komutátoru a uhlíků DC motoru a tím způsobovat výpadky signálu. Životnost bezkontaktních senzorů je také delší oproti kontaktním senzorům, protože u bezkontaktních nedochází k mechanickému opotřebení.

Hallova sonda (Hallův článek) je polovodičová deska, kterou prochází proud. Při vložení Hallovy sondy do magnetického pole se generuje tzv. Hallovo napětí (U_H , Obr. 3, V1), z kterého se určuje pozice páky. Hallovo napětí je tedy definované jako specifické napětí vznikající na Hallově článku, a je citlivé na velikost kolmého magnetického pole procházejícího polovodičovou deskou článku. Velikost generovaného Hallova napětí lze

vypočítat pomocí vztahu (V1) (R = odpor polovodičové desky, ostatní veličiny viz Obr. 3).



Obr. 3 Hallův článek. U_H = Hallovo napětí (též viz V1), B = magnetická indukce, d = výška polovodičové desky, i = proud procházející Hallovým článkem.

Velikost Hallova
napětí (U_H)

$$U_H = R \cdot \frac{i \cdot B}{d} \quad (V1)$$

Hallův článek patří mezi analogové typy senzorů, které zajišťují stejný napěťový výstup jako potenciometrické senzory (výstupní napětí senzoru: 0–5 V, [0]). Dalším typem senzorů jsou tzv. SENT (*Single Edge Nibble Transmisson*) senzory. Tyto senzory převádí Hallovo napětí na bitovou hodnotu digitálního signálu. Výhodou tohoto typu senzoru je vysoká rychlost, možnost programování dle potřeb zákazníka, vlastní diagnostika obvodu a možnost informovat i o jiných teplotách, např. i o teplotě senzoru [0, 4].

2.3 Aktuátory GPA 1.0 a 3.1

Aktuátory GPA 1.0 a 3.1 jsou konkrétní typy, jejichž 3D modely jsou vyobrazeny níže (Obr. 4, Obr. 5) a jejich parametry jsou pro přehlednost vyjmenovány v tabulce (Tab. 1) [0]. Tyto konkrétní typy aktuátorů jsou zde představeny blíže, protože byly vybrány pro testování a provádění měření pro tuto diplomovou práci.

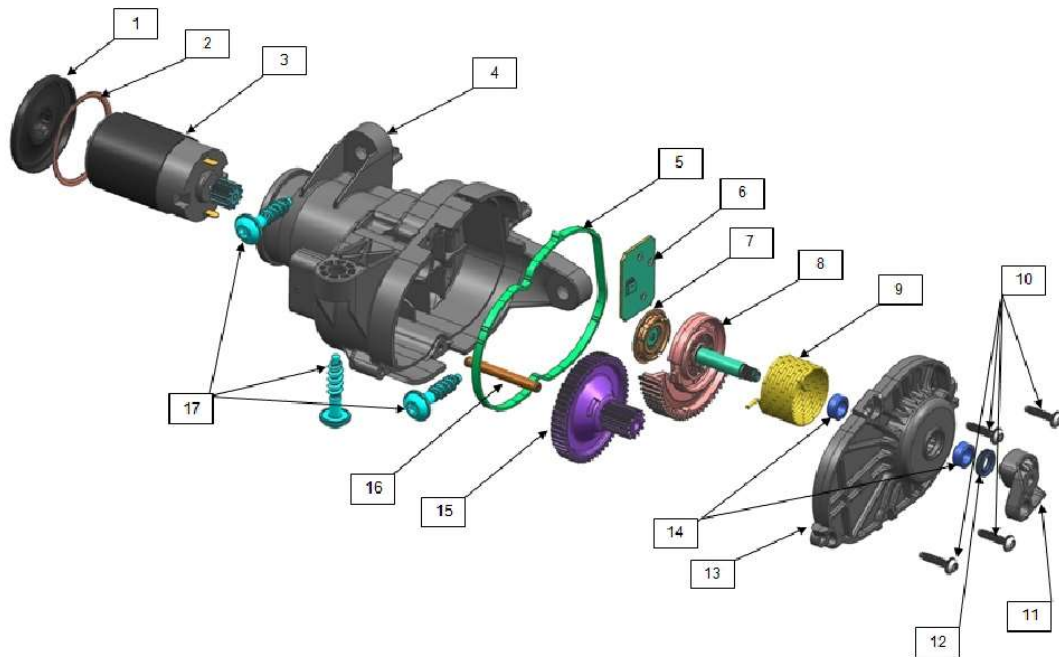


Obr. 4 Složený 3D model aktuátoru GPA 1.0 (vlevo) a GPA 3.1 (vpravo) [0].

Tab. 1 Parametry aktuátorů GPA 1.0 a 3.1 [0].

Veličina	Jednotka	Hodnoty pro GPA 1.0	Hodnoty pro GPA 3.1
Nominální točivý moment	N·m	0,2	0,5
Maximální točivý moment (max. 3 s)	N·m	0,8	0,9
Moment setrvačnosti	kg.cm ²	0,00965	-
Maximální úhel otočení	°	130	130
Převodový poměr	-	27,5 : 1	-
Rozsah pracovní teploty	°C	-40 – 140	-40 – 160
Napájení DC motoru	V	9 – 16	9 – 16
Rychlost odezvy (<i>actuating time</i>)	ms	< 350	< 120

Oba zmíněné typy univerzálních aktuátorů jsou běžně užívané v praxi. Rozdíl je v aplikaci, GPA 1.0 je aktuátor využívaný pro swirl klapky v sacím modulu motoru, kdežto GPA 3.1 je používán například pro regulaci plnicího tlaku turbodmychadla (WG nebo VTG). Typ GPA 3.1 se liší od typu GPA 1.0 zejména vyšší hodnotou nominálního točivého momentu (Tab. 1), která obecně určuje vyšší odolnost vůči dlouhodobé zátěži. Typ GPA 3.1 má též větší rozsah provozní teploty a výrazně kratší rychlost odezvy (tzv. *actuating time*), což je doba překonání vzdálenosti z jedné krajní polohy páky do druhé krajní polohy (Tab. 1). [0]



Obr. 5 Rozložený 3D model aktuátoru GPA 1.0 (popis jednotlivých částí viz Tab. 2) [0].

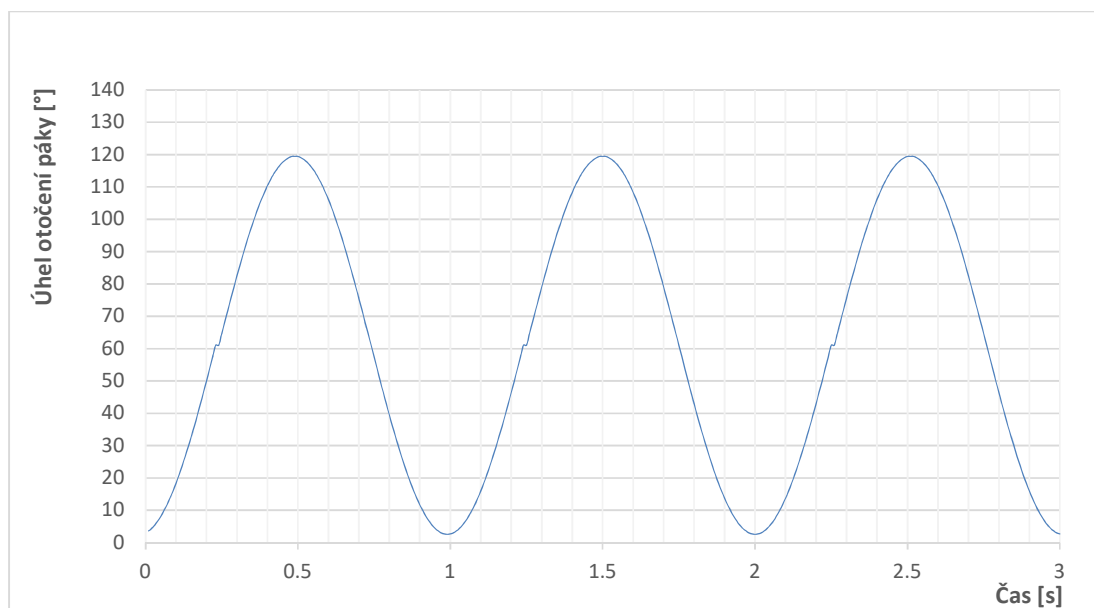
Tab. 2 Popis k 3D modelu aktuátoru GPA 1.0 na Obr. 5.

1	Kovový kryt DC motoru
2	Těsnění
3	DC motor
4	Obal
5	Hlavní těsnění
6	Senzor
7	Magnet
8	Ozubené kolo
9	Bezpečnostní pružina
10	Vruty
11	Páka
12	Těsnění
13	Spodní kryt
14	Ložiska
15	Ozubené kolo
16	Hřídel
17	Vruty

3 Řešení úkolu diplomové práce

3.1 Dlouhodobá zkouška

Dlouhodobá zkouška obecně slouží k testování zařízení, vzorku, apod. v podmínkách blízkých skutečnému použití. Při dlouhodobých zkouškách jsou testované vzorky vystaveny vyšší zátěži, ale po kratší dobu, než v běžném provozu. Životnost GPA je konstruována na 5 let nebo 6 000 hodin. Tato doba je však v praxi během dlouhodobé zkoušky zkrácena asi na čtyřicetinu díky zátěži (např. teplotní mechanické). Dlouhodobá zkouška týkající se této diplomové práce má za úkol vytvořit umělou mechanickou zátěž pro zkoušený univerzální aktuátor (GPA) [0].

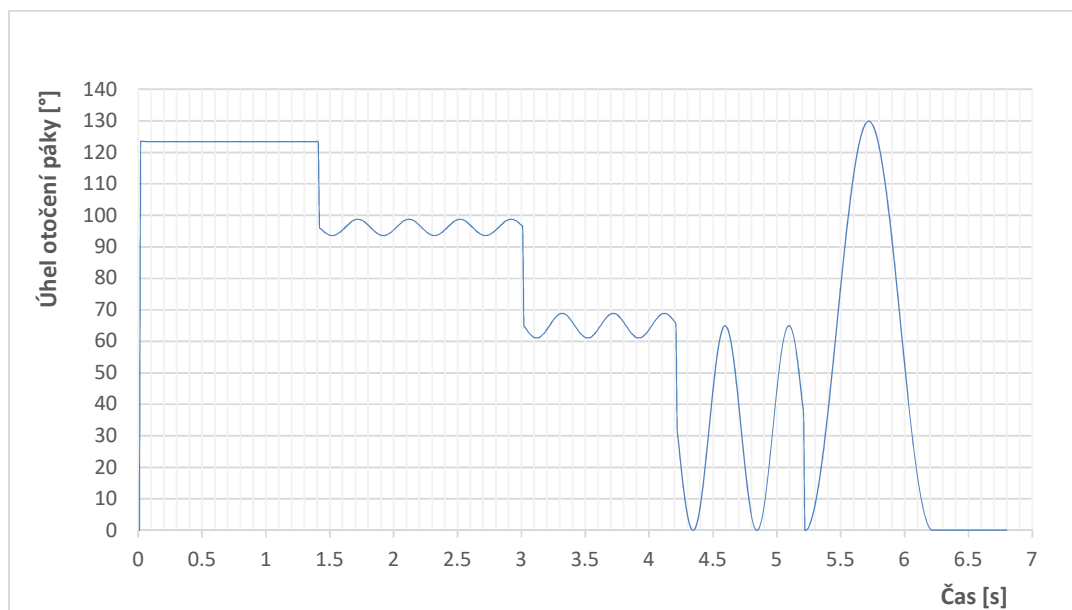


Obr. 6 Sinusový pohybový profil při zátěžové zkoušce aktuátoru.

Sinus o frekvenci 1 Hz [0].

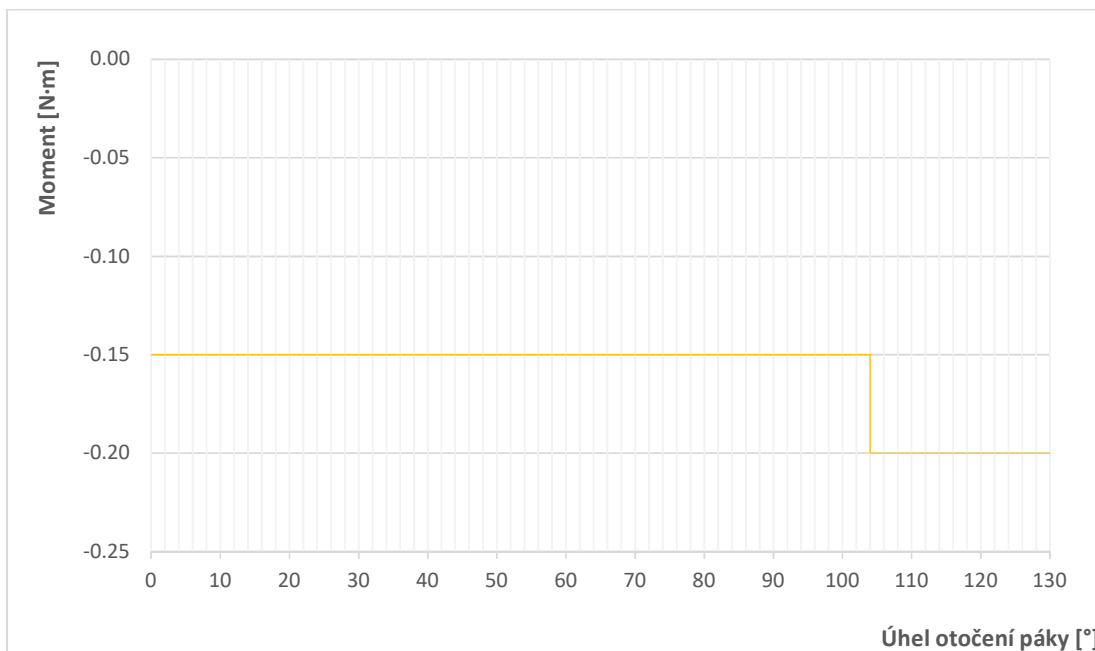
Nedílnou součástí dlouhodobé zkoušky je pohybový profil, který udává, jak se zkoušený aktuátor bude během zkoušky pohybovat. Tento profil je navržený tak, aby co nejvíce simuloval pohyb aktuátoru při jeho běžném použití. Jelikož aktuátory mají

různorodé využití, je těchto profilů používáno několik. Nejjednodušší pohybový profil je sinus o frekvenci 1 Hz (Obr. 6). Další pohybový profil může být například obdélník, nebo se může skládat z více sinusovek (Obr. 7). Každý pohybový profil je navržen tak, aby se shodoval jeho začáteční a koncový bod. Díky tomu je takto navržený profil možné mnohokrát opakovat, čímž je zajištěn neustálý pohyb aktuátoru při dlouhodobé zkoušce.



Obr. 7 Pohybový profil použitý při zátěžové zkoušce aktuátoru. Znázorněny jsou úhly otáčení aktuátoru během jednoho testovacího cyklu [0].

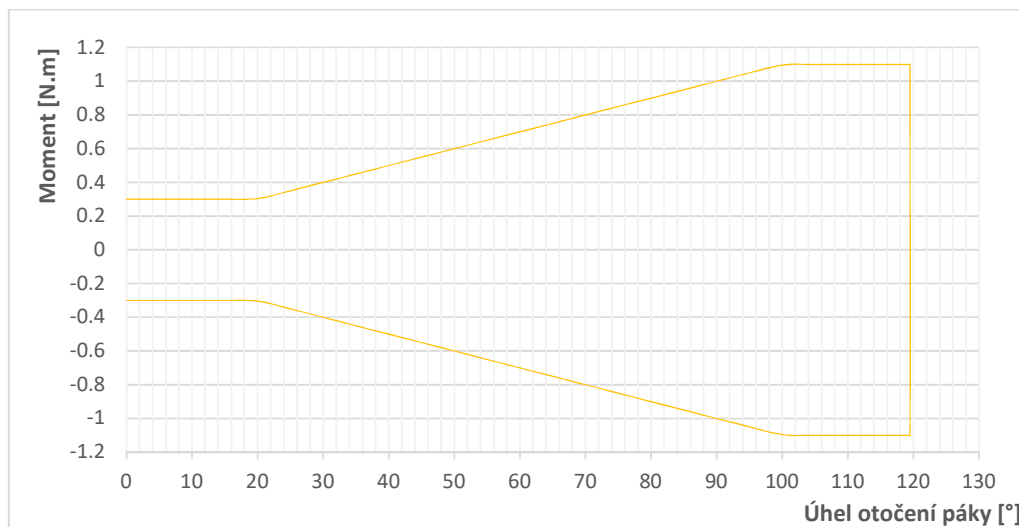
Brzdný moment, kterým jsou testované aktuátory zatěžované, může nabývat různých hodnot, od konstantního, kdy je moment po celou dobu zkoušky stejný, po složitější profily, které jsou závislé na úhlu otočení páky aktuátoru. Závislost brzdného momentu na úhlu natočení může být například skoková (Obr. 8). To znamená, že brzdný moment během testu nabývá dvou i více hodnot. V ukázkovém případě (Obr. 8) dosahuje brzdný moment hodnoty $-0,15 \text{ N}\cdot\text{m}$ při úhlu otočení od 0° do 104° . Rozhodovací hranice pro skokovou změnu momentu je úhel otočení páky aktuátoru (zde tedy 104°). Po překonání této hranice dojde ke skokové změně brzdného momentu, kdy dosáhne v tomto případě hodnoty mínus $0,2 \text{ N}\cdot\text{m}$.



Obr. 8 Profil brzdného momentu použitého během zátěžové zkoušky aktuátoru. Brzdný moment je závislý na úhlu otočení páky aktuátoru [0].

Další možností generování brzdného momentu je lineární závislost na úhlu otočení páky. Příklad je vidět na obrázku (Obr. 9), kde je z počátku moment konstantní a od úhlu 20° začne moment vzrůstat v závislosti na úhlu natočení, podle vztahu $y = 0,01 \cdot x + 0,1$ (kde y je moment v N·m a x je úhel natočení páky aktuátoru [°]). Po tomto úseku od úhlu 100° opět následuje konstantní moment.

Dalším důležitým specifikem při testování je, kterým směrem bude brzdný moment působit. Zda bude například brzdný moment aplikován v obou směrech, nebo pouze v jednom směru, anebo zda v jednom směru bude aktuátor brzdit a v druhém bude aktuátoru pomáhat. Všechna tato specifika vycházejí z požadavku co nejvíce přiblížit zkoušku reálnému prostředí.

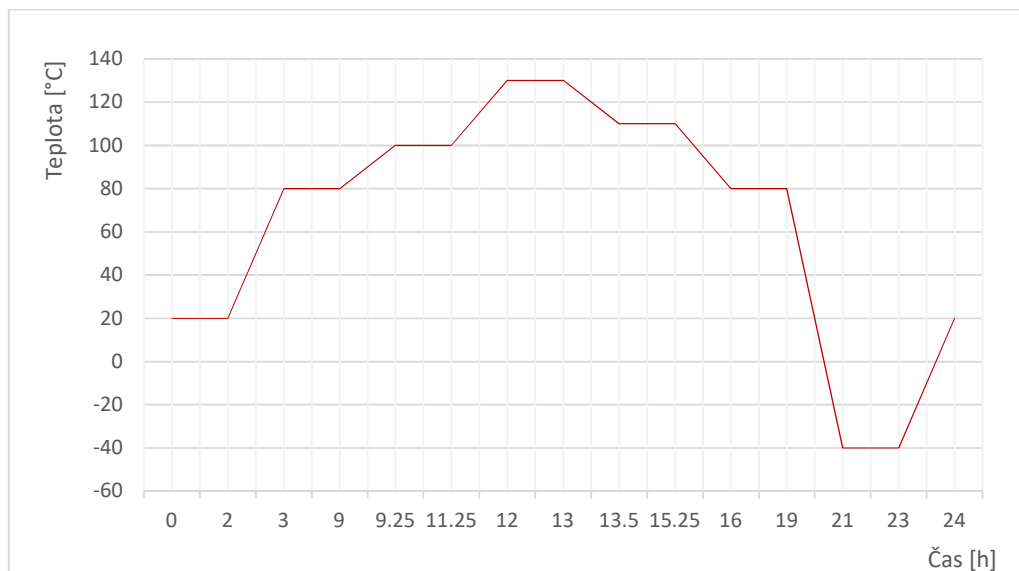


Obr. 9 Symetrický profil brzdného momentu M v závislosti na úhlu otočení páky aktuátoru. Brzdný moment je lineárně závislý na úhlu natočení páky aktuátoru při úhlu 20° až 100° [0].

Vezměme si situaci, kdy aktuátor je jedním směrem brzděn a druhým je mu pomáháno. Tento požadavek vychází z aplikace, kdy GPA ovládá regulační lopatky turbodmychadla. Úkolem lopatek je usměrňovat tok výfukových plynů a tím regulovat plnicí tlak turbodmychadla. Klapky se přivírají, pokud je nízký tlak výfukových plynů. Dochází tak k nárůstu rychlosti plynů, které dopadají na turbínové kolo turbodmychadla. Důsledkem je růst plnicího tlaku v sacím systému. Při vysokém tlaku výfukových plynů se klapky otvírají. Jsou tedy vystaveny vyšší zátěži od tlaku plynů a požadavek na točivý moment GPA tedy roste, aby klapky překonaly tlak plynů

Kromě mechanické zátěže jsou vzorky vystaveny teplotní zátěži a někdy i vlhkostní. Příklad teplotního cyklu je znázorněn na obrázku (Obr. 10). Teplota v tomto příkladu se po různou dobu pohybuje na hodnotách mezi -40°C a $+130^\circ\text{C}$. Tento cyklus je během zkoušky, stejně jako ostatní nastavované parametry, periodicky opakován v daném počtu cyklů.

Všechny tyto parametry (respektive profily parametrů) vycházejí z požadavků zákazníka nebo jsou dokonce dané příslušnou normou kvůli zajištění bezpečnosti produktu [0].



Obr. 10 Teplotní profil během jednoho cyklu (24 hodin) [0].

3.2 Rozbor současného stavu

V současné době tvoří umělou zátěž během testu elektromagnetické brzdy EBU 0,3L (Obr. 11) a EBU 1L od firmy ZF Tiratron. Jsou používány dva různé typy brzd z důvodu různých rozsahů generovaného brzdného momentu (Tab. 3).



Obr. 11 Elektromagnetická brzda UBU 0,3L.

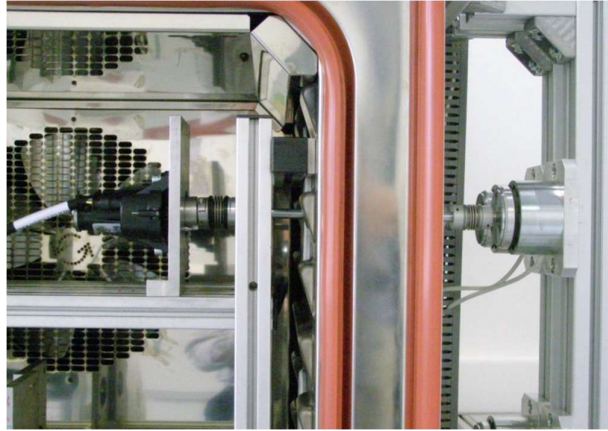
Tab. 3 Přehled charakteristických hodnot elektromagnetické brzdy [2].

Veličina	Jednotka	EBU 0,3L	EBU 1L
		Hodnota	Hodnota
Moment	N·m	0,4	1,1
Proud	A	0,75	1,25
Napětí	V	30	30
Moment setrvačnosti	kg·cm ²	1	3
Maximální otáčky	min ⁻¹	10 000	6 500
Hmotnost	kg	1,1	2,2

Velikost brzdného momentu generovaného elektromagnetickou brzdou závisí na velikosti napájecího napětí (Tab. 4). Elektromagnetická brzda je umístěna mimo teplotní komoru a se zkušebním vzorkem spojena pomocí hřídele a dvěma vlnovcovými spojkami skrz stěnu teplotní komory (Obr. 12). Vstup hřídele do teplotní komory je utěsněn, aby teplo neunikalo do okolí.

Tab. 4 Velikost napájecího napětí elektromagnetické brzdy EBU 0,3L

Moment [N·m]	Velikost napájecího napětí [V]
0,1	9,4
0,15	10,8
0,2	12,1
0,25	13,5
0,3	15,6



Obr. 12 Současný stav generování brzdného momentu pomocí elektromagnetické brzdy v teplotní komoře [0].

Elektromagnetické brzdy ne úplně vyhovují požadavků brzdného momentu během zkoušky. Zejména při malých amplitudách, do 10% (13°) výkmity páky GPA brzdy negenerují žádný moment. Ten jsou schopny vytvořit, až po překročení tohoto minimální výkmitu. Dalším důvodem pro hledání jiného způsobu brzdění je požadavek testování momentového profilu, ve kterém by měl být brzdný moment proměnlivý v závislosti na úhlu natočení páky GPA.

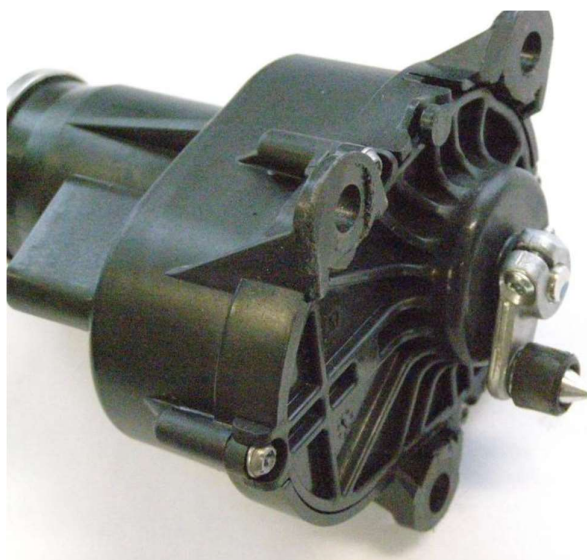
Chyba způsobená elektromagnetickou brzdou je zapříčiněna pólovými nastavci brzdy. Aby brzda mohla vytvářet brzdný moment, musí se pootočit minimálně o úhel 15° . To v případech, kdy brzdý moment není generován, není splněno. Další nevýhodou je velký moment setrvačnosti. Ten způsobuje chybu generovaného momentu při změně směru [11, 12].

Důležitou součástí a trochu i problémem je dobré uchycení vzorku. Na trhu je spousta typů GPA, které mají rozdílné páky různých tvarů. Proto musíme mít pro každé GPA jiné uchycení.

Při návrhu protikusů, který se nasadí na páku GPA musíme dbát, aby moment, kterým budeme GPA zatěžovat byl přenášen v ose výstupního hřídele z GPA. Dále by protikus páky měl být zhotoven přesně, aby vlivem výrobních vûl nedocházelo ke zkreslování zatížení. Příklad protikusů páky lze vidět na obrázku (Obr. 13).



Obr. 13 Pohled na protikus páky [0].



Obr. 14 GPA s unášecí pákou [0].

Aby byla omezena zmiňovaná vůle mezi pákou GPA a protikusem, na unášecí páku je možno nasadit gumový kroužek, který slouží k vymezení této vůle (Obr. 14).

U některých typů GPA je možno celou páku odšroubovat. V tomto případě je lepší použít jiný druh spojky, která je nasazena přímo na hřídel vystupující z GPA, čímž zajistí přesnější spojení bez vůlí (Obr. 15).



Obr. 15 GPA se spojkou [0].

Zmíněno bylo několik možností spojení GPA s hřídelí, která přenáší brzdny moment. Možností je však mnoho, což především záleží na použitém typu GPA. Často je nutné vyzkoušet několik možností a na základě zkušenosti se rozhodnout pro to nejlepší.

Další nutností je upevnění GPA. K tomuto účelu se opět používá široká škála upínacích přípravků. Aby nebylo používáno zbytečně mnoho kusů, je možné na jeden upínací přípravek připevnit více typů GPA (Obr. 16) [0].



Obr. 16 Upínací deska – modře a červeně jsou označeny otvory pro uchycení dvou různých typů GPA [0].

3.3 Návrh řešení

Po prostudování současného trhu a zjištění různých možností generování brzdného momentu, byly vybrány tři možnosti k bližšímu prozkoumání. Tyto možnosti jsou:

- 1) Pásová brzda – součtová
- 2) Hysterezní brzda
- 3) Servomotor

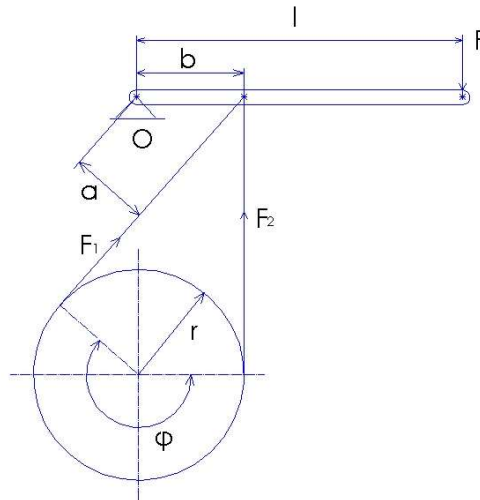
3.3.1 Pásová brzda

Pásová brzda se skládá z pásu s obložením, nebo je možno použít pás bez obložení, u kterého bude potřeba použít větší sílu potřebnou na brzdění. Tento pás je připevněn k páce, na kterou je působeno silou potřebnou pro brzdění [5, 6].

Podle způsobu uchycení konců pásu se pásové brzdy dělí na:

- Jednoduché
- Diferenciální
- Součtové

Každý typ pásové brzdy má svá specifika a oblast použití. Jednoduchá pásová brzda se používá pro malé brzdné síly a pro jeden smysl otáčení. Diferenciální pásová brzda je používána také pro jeden smysl otáčení, ale dokáže pomocí malé síly ubrzdít velký krouticí moment. Pásová součtová brzda (Obr. 17) má rozložení sil pro oba dva směry otáčení stejné, proto se používá pro oba směry otáčení. Její nevýhoda je menší účinnost oproti jednoduché a diferenciální pásové brzdy a přílišné namáhání hřídele na ohyb.



Obr. 17 Součtová pásová brzda (legenda viz Tab. 5).

Tab. 5 Legenda k veličinám použitých v Obr. 17 a vztazích (V2) – (V7).

Označení veličiny	Popis veličiny
a	Vzdálenost F_1 od O
b	Vzdálenost F_2 od O
l	Délka páky
O	Bod otáčení
r	Poloměr
F_1	Síla působící na jeden konec pásu
F_2	Síla působící na jeden konec pásu
F	Síla působící na páku
ϕ	Úhel opásání
M_B	Brzdňý moment
μ	Součinitel tření

Při uchycení obou konců pásu s obložením na páce ve stejné vzdálenosti od osy otáčení ($a = b$) se pásová brzda nazývá součtová (Obr. 17). Výpočet síly, kterou musíme působit na páku pro generování požadovaného brzdňého momentu, vychází z rovnováhy sil na páce (V2) [5, 6].

rovnováha sil na páce

$$F \cdot l - F_2 \cdot a - F_1 \cdot b = 0 \quad (\text{V2})$$

$$F = \frac{F_2 \cdot a + F_1 \cdot b}{l} \quad (\text{V3})$$

$$F = \frac{F_2 \cdot (a + b \cdot e^{\varphi \cdot \mu})}{l} \quad (\text{V4})$$

brzdny moment

$$M_B = (F_1 - F_2) \cdot r = F_2 \cdot (e^{\varphi \cdot \mu} - 1) \cdot r \quad (\text{V5})$$

$$M_B = \frac{F \cdot l \cdot (e^{\varphi \cdot \mu} - 1) \cdot r}{a + b \cdot e^{\varphi \cdot \mu}} \quad (\text{V6})$$

síla na páku

$$F = \frac{M_B \cdot (a + b \cdot e^{\varphi \cdot \mu})}{l \cdot (e^{\varphi \cdot \mu} - 1) \cdot r} \quad (\text{V7})$$

Z důvodu porovnávání vlastností navržených řešení byly orientačně vypočítány hodnoty (Tab. 5) pro pásovou brzdu podle rovnice (V7). Úhel opásání φ byl zvolen 270° . Součinitel tření f je pro pás s obložením.

Tab. 5 Hodnoty výpočtu parametrů pro součtovou pásovou brzdu dle vzorce (V7).

Veličina	Jednotky	Vypočtené hodnoty
M_B	N·m	3,00
f	-	0,35
ϕ	rad	4,71
$a = b$	m	0,01
l	m	0,10
r	m	0,05
F	N	8,86
J	Kg·cm ²	5,50

Pro porovnání bylo ještě zapotřebí dopočítat moment setrvačnosti pro navrženou pásovou brzdu. Pro výpočet jsme vycházeli z momentu setrvačnosti pro válec (V12). Nejdříve jsme bylo nutné dopočítat hmotnost navržené pásové brzdy. Jako materiál jsme zvolili dural.

Hustota duralu	$\rho = 2800 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$
Poloměr válce pásové brzdy	$r = 0,05 \text{ m}$
Délka válce pásové brzdy	$l = 0,02 \text{ m}$

Objem válce $V = \pi \cdot r^2 \cdot l$ (V8)

Objem válce po dosazení $V = \pi \cdot 0,05^2 \cdot 0,02 = 0,000157 \text{ m}^3$ (V9)

Hmotnost válce $m = \rho \cdot V$ (V10)

Hmotnost válce po dosazení $m = 2800 \cdot 0,000157 = 0,4396 \text{ kg}$ (V11)

Moment setrvačnosti válce $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$ (V12)

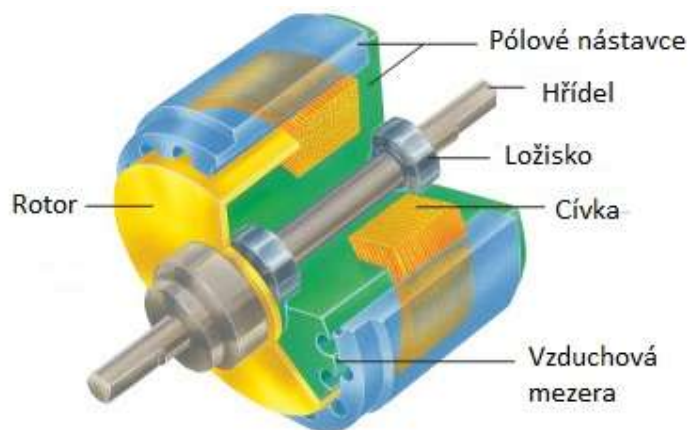
Moment setrvačnosti válce $J = \frac{1}{2} \cdot 0,4396 \cdot 0,05^2 = 0,0005495 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ (V13)

3.3.2 Návrh řešení II. – Hysterezní brzda

Hysterezní brzda je typ elektrické brzdy, která se používá pro zpomalení, nebo úplné zastavení rotačního pohybu. Používá se v průmyslovém odvětví. Na rozdíl od předchozí pásové brzdy nepoužívá k brzdění třecí sílu, ale sílu elektromagnetickou.

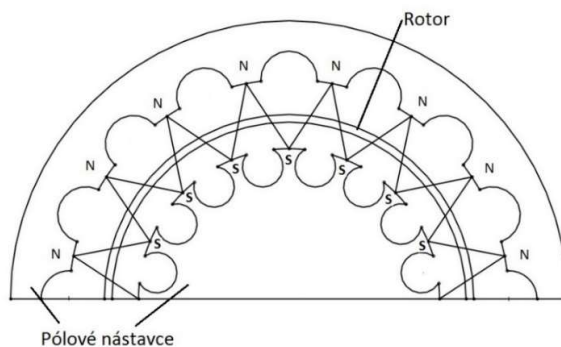
Hysterezní brzda (Obr. 18) se skládá ze dvou hlavních částí rotoru a statoru. Stator je dále tvořen z cívky a z pólových nástavců (vnitřní a venkovní). Jakmile proud začne procházet cívkou, vzniká magnetické pole. Rotor je připojen na hřídel a vložen mezi vnitřní

a venkovní pólové nástavce, do vzduchové mezery. Rotor je vyroben z magneticky tvrdého materiálu, který odolává magnetickým změnám. Mezi magneticky tvrdé materiály patří například permanentní magnet, který má širokou hysterezní smyčkou [10, 11, 12].



Obr. 18 Hysterezní brzda [15].

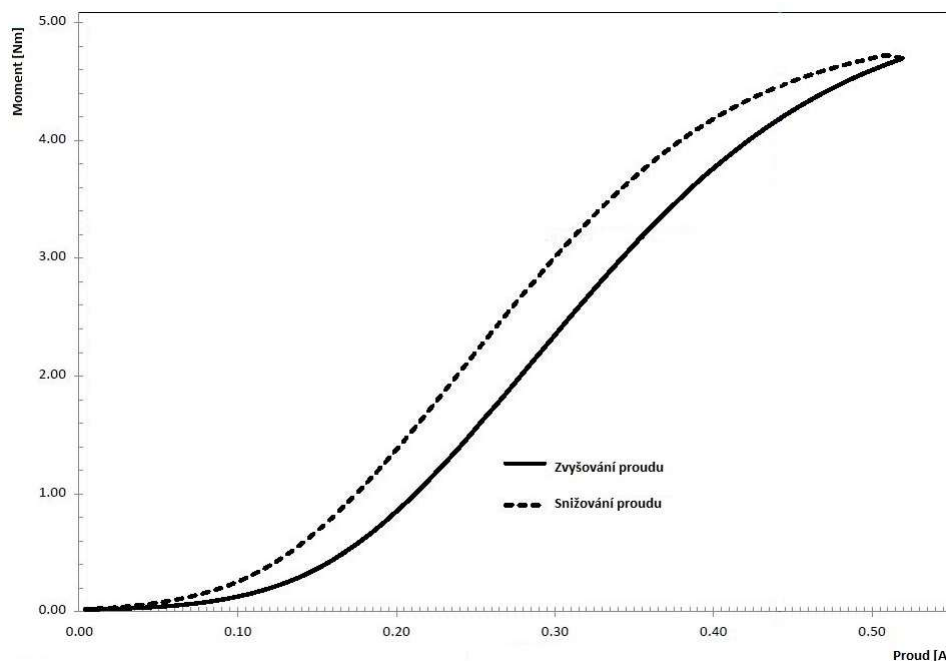
Přivedeme-li proud na cívku, ve vzduchové mezeře se vytvoří magnetické pole úměrné přivedenému proud. Magnetické pole se snaží zmagnetizovat rotor, ten je ale z magneticky tvrdého materiálu, rotor se tedy snaží vyrovnat magnetické pole mezi vnitřními a vnějšími pólovými nástavci. Brzdný moment je generován rotačním pohybem, který se snaží přetlačit magnetické pole. Náčrsek působících sil lze vidět na obrázku (Obr. 19). Na obrázku si také můžeme všimnout zubové struktury pólových nástavců [15].



Obr. 19 Náčrsek působících sil v hysterezní brzdě

(N = severní magnetický pól, S = jižní mag. pól).

Výhodou hysterezní brzdy je schopnost generovat konstantní brzdňý moment po celou dobu otáčení. Další výhodou je relativní nezávislost brzdňého momentu na rychlosti otáčení. Hysterezní brzda nemá žádné části, ve kterých by docházelo k velkému tření, to jí zajišťuje dlouhou životnost a bezúdržbový provoz a také přesné výsledky měření, které nejsou ovlivňovány třením [15].



Obr. 20 Hysterezní závislost proudu na brzdňém momentu generovány hysterezní brzdou [10].

Mezi nevýhody hysterezní brzdy patří hysterezní závislost proudu na momentu. Tato závislost má za následek rozdílný brzdňý moment při nastavování proudu zvyšováním a snižováním (Obr. 20). Tuto nevýhodu můžeme přisuzovat hysterezi magnetického materiálu [15].

Konkrétně pro tuto studii byla vybrána hysterezní brzda od firmy Magtrol (Obr. 21). Tato americká renomovaná firma se zabývá výrobou točivých strojů, zkušebních stavů pro testování točivých strojů a jejich testováním.



Obr. 21 Tři typy hysterézních brzd od firmy Magtrol [10].

Důležitým parametrem při výběru hysterézni brzdy je maximální brzdny moment, který je schopna vyvinout. Pro naši aplikaci by stačil 1 N·m, ale vzhledem k různým typům GPA, stále se vyvíjejících a zdokonalujících technologií, jsem vybral model s maximálním momentem 3 N·m. Po zvolení tohoto parametru jsem vybral konkrétního model (Tab. 6) [10].

Tab. 6 Vlastnosti hysterézni brzdy typu HB-450M-2 od firmy Magtrol.

Veličina	Jednotka	Hodnota
Maximální moment	N·m	3,2
Proud	mA	442
Napění	V	22,1
Odpor	Ω	50
Moment setrvačnosti	kg·cm ²	7,5
Maximální otáčky	min ⁻¹	8000
Hmotnost	kg	5,86

K řízení hysterézni brzdy výrobce nabízí a doporučuje své vlastní zdroje, které umí kompenzovat změnu nastaveného momentu zapříčiněnou změnou teploty (Obr. 22). Požadovaná hodnota momentu se nastavuje pomocí potenciometru na předním panelu. Na display je poté vidět proud, který brzda odebírá. Zdroj také umožňuje externí řízení

pomocí 0-5 V vstupu. Tento vstup by bylo možné využít například programem LabVIEW od firmy National Instruments™.



Obr. 22 Zdroj na řízení hysterezní brzdy [10].

3.3.3 Návrh řešení III. – Servomotor

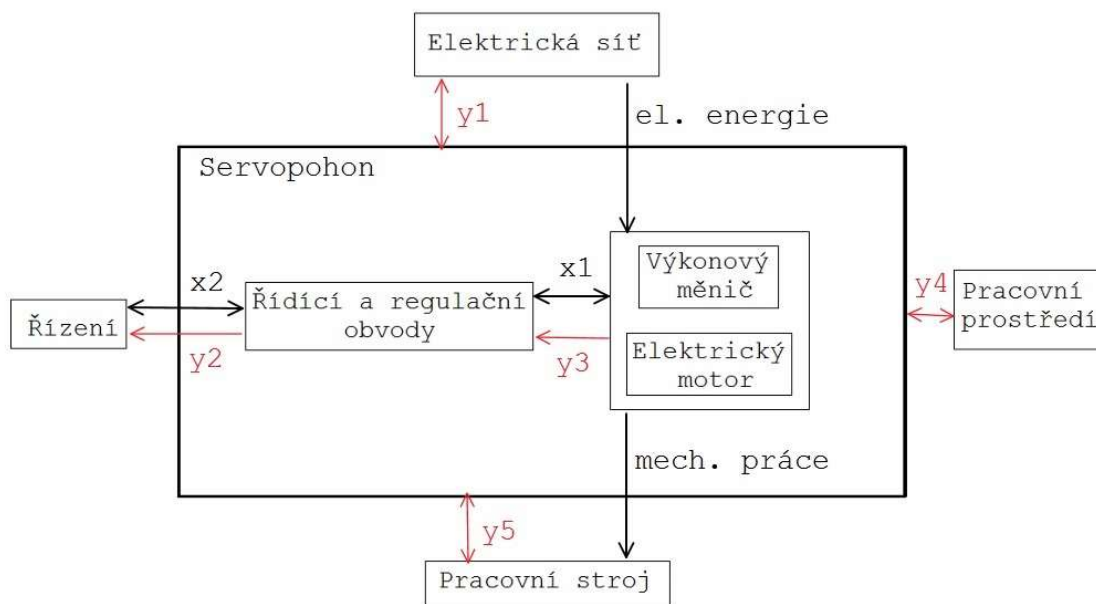
3.3.3.1 Elektrický servopohon jako systém

Elektrický servopohon je systém (Obr. 23), který se skládá z elektrického motoru (servomotoru), napájeného výkonovým měničem a řídicích a regulačních obvodů. Tento systém (Obr. 23) je popsán svou strukturou, okolím, vnitřními a vnějšími vazbami. Vazby můžeme rozdělit na užitečné (černé v Obr. 23) a rušivé (červené v Obr. 23). Běžný elektrický pohon (motor) může pracovat v otevřené regulační smyčce (bez zpětné vazby), ale servopohon nikoliv. Servopohon je vždy zapojen se zpětnou vazbou rychlostí a polohovou. Na servopohon je kladena vysoká přesnost a rychlost regulace.

Do okolí servopohonu patří elektrická napájecí síť, nebo jiný zdroj elektrické energie, řízení, což může být jednoduchý ovládací panel, nebo až řídicí počítač. Pracovní stroj představuje veškeré mechanické spojení a součásti. Do pracovního prostředí patří vnější vlivy okolí, jako je teplota, vlhkost, agresivní plyna a podobně.

V servomotoru a jeho okolí dochází k užitečným vazbám x1 a x2 (Obr. 23), které představují řídicí signály (rychlost otáčení, změna směru otáčení, velikost momentu a podobně) a zpětnovazební signály z čidel a snímačů (otáčky, proud, moment, poloha a podobně) [14].

Dochází také k rušivým vazbám vnitřním (způsobené servopohonem) a vnějším (působící z okolí). y_2 a y_3 (Obr. 23) představují rušivá vysokofrekvenční napětí a elektromagnetická pole. y_1 působí oběma směry. Jedním směrem, od servomotoru, se jedná o rušivé vlivy na napájecí napětí, jako je zkreslení vyššími harmonickými a rádiové rušení. Druhým směrem se jedná o vlivy ze sítě jako je pokles napětí, přepět'ovými špičkami a zkreslením vyššími harmonickými. y_4 jsou nepříznivé vlivy prostupující z pracovního a do pracovního prostředí jako je teplota okolí, vlhkost, voda, hluk a podobně. Poslední nepříznivé vlivy y_5 je například moment setrvačnosti, rezonanční kmitočet soustavy, chvění, odváděné tepelné ztráty a podobně [14].



Obr. 23 Elektrický servopohon jako systém

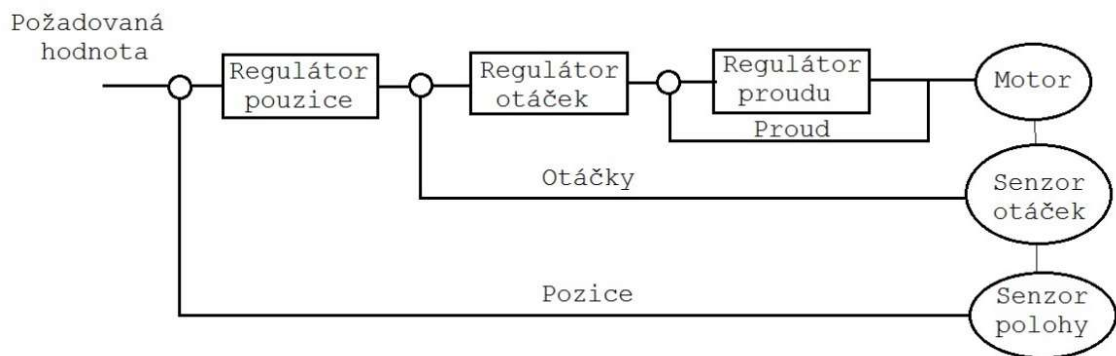
3.3.3.2 Řízení servopohonu

Pro nastavení vlastností a řízení servopohonu slouží několik řídicích obvodů (smyček) najednou (Obr. 24). První a nejvíce podřízená je smyčka proudová (momentová), která řídí proud do vinutí motoru, tím přímo ovlivňuje velikost momentu motoru.

Tato smyčka je velice rychlá.

Další smyčka je rychlostní. V této smyčce se porovnává skutečná rychlost otáčení motoru od požadované, proto musí být na motoru umístěn senzor snímání otáček. Tato smyčka je nadřazená proudové.

Nejvíce nadřazená smyčka je polohová. Srovnává skutečnou polohu servomotoru s požadovanou a řídí proudovou a rychlostní smyčku, aby docházelo k minimální odchylce od požadovaných hodnot. Ke zjištění polohy servomotoru se používá senzor polohy neboli enkodér. Ne všechny servopohony musí mít tyto tři uvedené smyčky. Některé servopohony jsou řízeny pouze dvěma, jednou, nebo žádnou smyčkou, například posilovač řízení.



Obr. 24 Řízená servopohonu

Pro regulaci otáček servopohonu se nejčastěji používá frekvenční měnič. Tato metoda je z technického (přesnost regulace) a energetického (bezeztrátový princip) hlediska nejlepší. Motory mají rychlost otáčení závislou na frekvenci napájecího napětí. Ke změně frekvence napájecího napětí slouží právě frekvenční měnič. Ten nejdříve napájecí napětí usměrní a poté ho pomocí střídače a výkonových prvků převede na třífázové s požadovanou frekvencí [14, 24].

3.3.3.3 Výběr servopohonu

Pro tuto práci byl vybrán synchronní servomotor MSK z nabídky firmy Bosch

Rexroth[®] (Obr. 25), která se zabývá výrobou polohovacích a regulačních zařízení všech druhů, jak elektrických, tak hydraulických. Tyto systémy jsou vyvíjeny hlavně pro průmysl a automatizaci. Firma Bosch Rexroth[®] s nimi má dlouholeté zkušenosti.



Obr. 25 Synchronní servomotor MSK od firmy Bosch Rexroth[®] [19].

Firma Bosch Rexroth[®] nabízí mnoho druhů servomotorů od vzduchem chlazených přes servomotory, které jsou uzpůsobeny pro výbušné prostředí až k výkonovým, které jsou chlazeny kapalinou. Pro naši aplikaci jsem vybral univerzální synchronní servomotor s obchodním označením MSK, který je chlazený vzduchem. Jako u předchozí hysterezní brzdy byl rozhodovací parametr jmenovitý moment, který je servomotor schopen vyvinout. Podle tohoto parametru jsem vybral servomotor s označením MSK040C-0450-NN (Tab. 7), který má jmenovitý moment 2,7 N·m. Důležitým parametrem, kterého si můžeme všimnout je moment setrvačnosti. Tento parametr by měl být co nejmenší vzhledem ke stálým změnám směru otáčení [19].

K tomuto motoru byl výrobcem doporučen a vybrán přesný enkodér s označením S2, který má přesnost určení polohy na $\pm 0,01^\circ$. Tento parametr je důležitý vzhledem k požadované přesnosti nastavení brzdného momentu závislého na úhlu natočení.

Další součástí, kterou bylo potřeba vybrat k servomotoru je frekvenční měnič. Ten nejenom řídí a reguluje otáčky servomotoru, ale také zajišťuje komunikaci mezi počítačem a servomotorem. Pro komunikaci s počítačem jsem zvolil PLC rozhraní a program IndraWorks Engineering, který je produktem také firmy Bosch Rexroth[®]. Další možností pro řízení servomotoru je například použití programu LabVIEW od firmy National Instruments[™]. Protože jsem se rozhodl pro řízení servomotoru pomocí PLC,

musel jsem zvolit měnič s PLC. Vybírání měniče jsem nechal na doporučení firmy Bosch Rexroth[®]. Firmou byl doporučen měnič s maximálním odběrem 6 A s tím, že pro tuto studii by měl vyhovovat. Z důvodu podobné výše pořizovací ceny se rozhodlo pro výkonnější frekvenční měnič s maximálním odběrem proudu 13 A (Obr. 26) [8, 14, 19].

Tab. 7 Parametry vybraného synchronního servomotoru typu MSK040C-0450-NN od firmy Bosch Rexroth[®] [19].

Veličina	Jednotka	Hodnota
Točivý moment v klidu	N·m	2,7
Proud v klidu	A	2,4
Maximální točivý moment	N·m	8,1
Maximální proud	A	9,6
Odpor vinutí	Ω	7,4
Indukčnost vinutí	mH	37,9
Počet pólových dvojic	-	4
Moment setrvačnosti rotoru	kg·cm ²	1,4
Maximální otáčky	min ⁻¹	6000
Hmotnost	kg	3,6
Třída ochrany	-	IP65



Obr. 26 Příklad frekvenčního měniče od firmy Bosch Rexroth[®] [20].

3.4 Porovnání navrhovaných řešení

Pro lepší porovnání mezi navrhovanými řešeními jsem vytvořil tabulku (Tab. 8) s přehledem nejdůležitějších vlastností všech navrhovaných řešení. Z těchto hodnot jsem dále vytvořil hodnotící tabulku (Tab. 9), ve které jsem hodnotám přidal váhu důležitosti [%] a každému parametru dal určitý počet bodů. Návrh s největším počtem bodů je nejlepší řešení a to je generování brzdného momentu pomocí servopohonu. Zbylé dvě řešení jsou na tom bodově velice podobně.

Tab. 8 Porovnání vlastností navrhovaných způsobů generování brzdného momentu.

	Současný stav	Pásová brzda	Hysterezní brzda	Servopohon
Moment setrvačnosti [kg·cm ²]	3,0	5,5	7,5	1,4
Maximální brzdný moment [N·m]	1,1	3,0	3,2	2,7
Ovládání	jednoduché (programovatelný zdroj)	složitě (<i>nutno měnit působící sílu na páku</i>)	jednoduché (programovatelný zdroj)	složitě (přes PLC)
Cena [EUR]	-	300	802 + zdroj	1 066
Životnost	5 let (odhad)	1 rok (opotřebení brzdového obložení)	5 let (odhad)	5 let (odhad)
Možnost jiného použití	NE	NE	NE	ANO

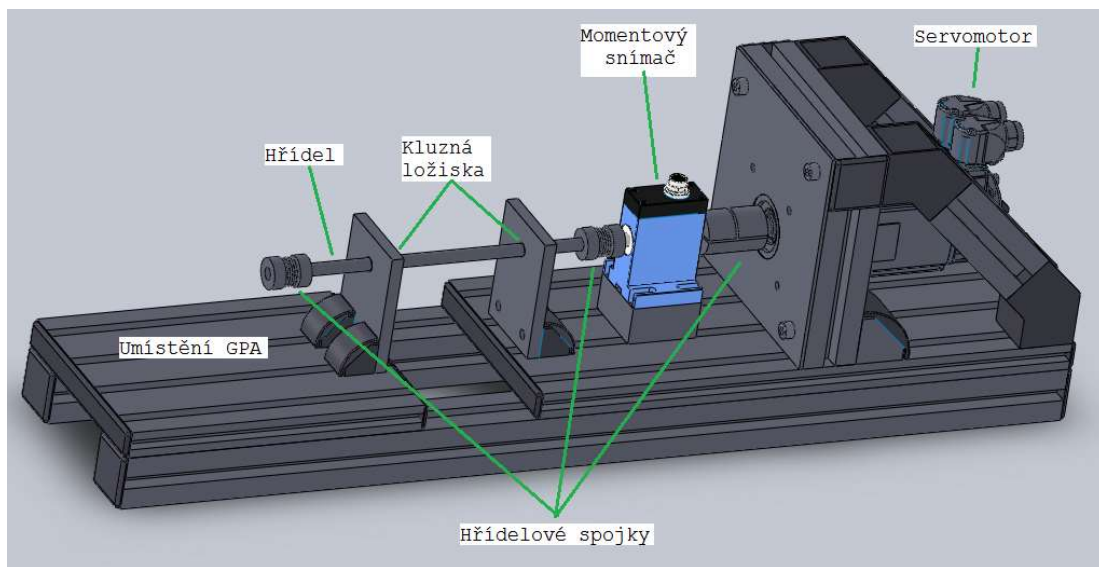
Tab. 9 Hodnotící tabulka

Řešení	Cena [EUR] (nižší číslo lepší)		Moment setrvačnosti [kg.cm2] (nižší číslo lepší)		Životnost [roky] (vyšší číslo lepší)		Možnost jiného použití (1=ANO, 0=NE) (vyšší číslo lepší)		Celkový počet bodů	Celkové pořadí
	35%		25%		30%		10%			
	hodnota	body x váha	hodnota	body x váha	hodnota	body x váha	hodnota	body x váha		
Pásová brzda	300	35,00	5,5	6,36	1	6,00	0	0	47,36	3
Hysterezní brzda	802	13,09	7,5	4,67	5	30,00	0	0	47,76	2
Servopohon	1 066	9,85	1,4	25,00	5	30,00	1	10,00	74,85	1

3.5 Realizace prototypu

Pro realizaci prototypu jsem po zhodnocení vybral způsob brzdění pomocí servopohonu. Aby bylo možné vyzkoušet funkčnost a chování celého systému, navrhl jsem prototyp (Obr. 27), který rozměry odpovídá upevnění aktuátoru v teplotní komoře. Z důvodu zjednodušení je prototyp myšlen pouze pro používání za pokojové teploty.

Jako základ byla použita montážní technika od firmy Bosch Rexroth[®], která umožňuje rychlé složení a rychlou přestavbu dle potřeby. Dále bylo použito duralových desek pro uchycení komponentů jako je servomotor, momentový snímač a uložení hřídele přenášející brzdný moment na GPA a podobně [13].



Obr. 27 Prostorový (3D) model navržené konstrukce prototypu.

3.5.1 Momentový snímač

Nabídka momentových snímačů je široká. Já jsem vybral švýcarskou značku Kistler zabývající se výrobou momentových, silových, akceleračních tlakových a mnoho dalších snímačů.

Při výběru snímače jsem kladl důraz na to, aby byl momentový snímač co nejpřesnější a cenově dostupný. Podle těchto parametrů jsem vybral dvě možnosti

(Tab. 10). Při rozhodování mezi těmito možnostmi jsem vytvořil hodnotící tabulku (Tab. 11), která porovnává cenu a třídu přesnosti dvou možných momentových snímačů. Po zhodnocení jsem vybral méně přesný, ale levnější momentový snímač s obchodním označením Mini-Smart (Obr. 28) [16, 17].

Tab. 10 Porovnání cen a vlastností dvou typů snímačů [16, 17].

Typ snímače	Dvou rozsahový snímač	Mini-Smart
Cena	118 000 Kč	72 700 Kč
Rozsah [N·m]	1 a 5	5
Třída přesnosti	0,1	0,2

Tab. 11 Hodnotící tabulka – momentový snímač.

Typ snímače	Cena snímače (nižší číslo lepší)		Třída přesnosti (nižší číslo lepší)		Celkový počet bodů	Celkové pořadí
	60%		40%			
	hodnota	bodů x váha	hodnota	bodů x váha		
Dvou rozsahový snímač	118 000	36,97	1	40,00	76,97	2
Mini-Smart	72 700	60,00	2	20,00	80,00	1



Obr. 28 Mini-smart torque sensor (momentový snímač) [16].

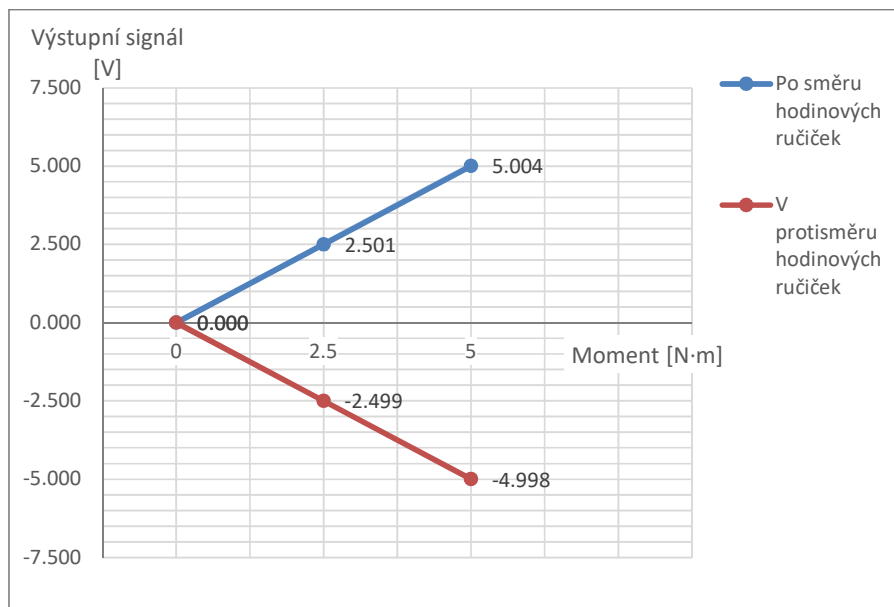
Výrobce v katalogu neudává maximální absolutní chybu přístroje, ale udává třídu přesnosti z této hodnoty lze maximální absolutní chybu vypočítat podle vztahu (V14). Absolutní chyba udává rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou pro celý rozsah momentového snímače. Další chyba, která se dá vypočítat, je relativní chyba. Ta se vždy počítá pro každou naměřenou hodnotu zvlášť. Výpočet této relativní chyby se provádí podle vztahu (V15). Tato chyba udává, jak velká chyba měření nastala pro danou naměřenou hodnotu. Používání tříd přesnosti zjednodušuje porovnávání měřících přístrojů [16, 21, 22, 23].

Maximální absolutní chyba	$\Delta_m = \left(\frac{M}{100}\right) \cdot \delta_T$	(V14)
------------------------------	--	-------

Relativní chyba	$\delta_M = \pm \delta_T \cdot \frac{M}{X_M}$	(V15)
-----------------	---	-------

Δ_m	Maximální absolutní chyba
M	Měřicí rozsah přístroje
δ_T	Třída přesnosti měřícího přístroje
δ_M	Relativní chyba
X_M	Měřená hodnota

Spolu se snímačem výrobce dodává kalibrační křivku (Obr. 29). Tato křivka ukazuje, naměřené a kalibrované hodnoty momentu při určitém výstupním napětí. Každý snímač, podle četnosti a druhu používání, se musí kalibrovat (provádět kontrolní měření a korekci výstupního napětí), aby byla zajištěna přesnost měření.



Obr. 29 Kalibrační křivka momentového snímače [18].

3.5.2 Ložiska

Další součástí pro kompletaci prototypu byla ložiska. V současné testovací verzi se používají kuličková ložiska, ale kvůli užití velkého rozsahu teplot (-40°C až 140°C) se tato ložiska musí mazat vazelínou (mazacím tukem). Z tohoto nepraktického důvodu byla hledána nová ložiska.

Nejdůležitějším parametrem při výběru ložisek byl rozsah snášených teplot. Na základě tohoto parametru byla vybrána ložiska od firmy INA Lanškroun, typ EGB1005-E40-B. Tato ložiska mají kluznou vrstvu s označením E40, která je schopná pracovat ve velkém a pro nás dostatečném teplotním rozmezí, od -200°C do $+280^{\circ}\text{C}$ (Tab. 12).

Parametrem, který bylo potřeba dále ověřit, byla hodnota maximální kluzné rychlosti. Pokud by byla tato hodnota během zátěžového testu překročena, mohlo by dojít ke zničení (neboli zadření) ložiska. V pohybovém profilu byl identifikován úsek, ve kterém dochází k největší změně polohy za nejkratší dobu a z toho úseku byly identifikovány hodnoty určující maximální změnu času Δt a změnu úhlu $\Delta\varphi$. Podle nich byla vypočítána úhlová rychlost dle vztahu (V16) [26].

Tab. 12 Vlastnosti bezúdržbového kluzného ložiska EGB1005-E40-B [26].

Veličina	Hodnota
Teplota [°C]	-200 až +280
Koeficient tření	0,03 až 0,25
Max. kluzná rychlost [m/s]	2,5
Únosnost statická [N/mm ²]	250
Únosnost dynamická [N/mm ²]	140
Vnitřní průměr [mm]	10
Délka [mm]	10

$$\Delta t = 0,1 \text{ s}$$

$$\Delta \varphi = 61,7766^\circ = 1,078 \text{ rad}$$

Úhlová rychlost $\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ (V16)

Po dosažení hodnot $\omega = \frac{1,078}{0,1} = 10,78 \text{ rad/s}$ (V17)

Mezi úhlovou rychlostí a obvodovou rychlostí platí vztah (V18), kde r je poloměr hřídele otáčející se v ložisku ($r = 5 \text{ mm}$).

Obvodová rychlost $v = \omega \cdot r$ (V18)

Po dosažení

hodnot

$$v = 10,78 \cdot 0,005 = 0,0539 \text{ m} \cdot \text{s} \quad (\text{V19})$$

Vypočítaná hodnota (V19) nepřekračuje tabulkovou hodnotu ložiska, je tedy možné toto ložisko použít.

3.5.3 Hřídelové spojky

Brzdňý moment, který bude servomotor generovat, musí být přenesen přes momentový snímač na GPA. K tomuto přenosu slouží hřídel o průměru 10 mm a hřídelové spojky. Konkrétně jsou vhodné pružné hřídelové spojky, které jsou schopny vyrovnat případnou nedokonalou souosost spojovaných hřídelí. Hřídelové spojky byly vybrány z nabídky firmy R+W (Obr. 30).



Obr. 30 Použité hřídelové spojky.

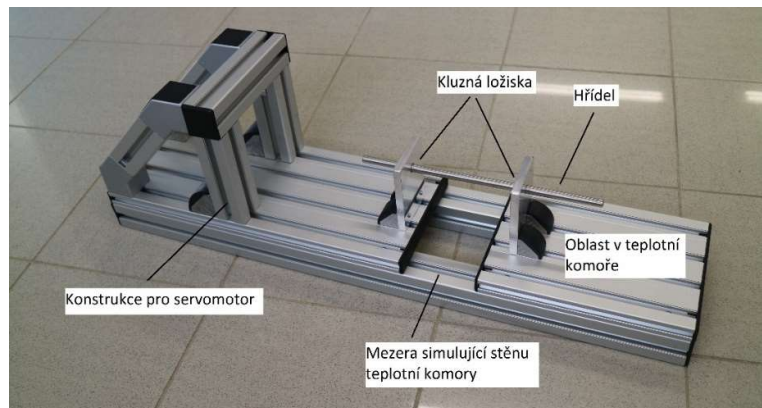
Při výběru spojek byl nejdůležitějším parametrem tzv. maximální moment, což je moment, který je spojka schopna přenést. Dalším parametrem potřebným při výběru hřídelových spojek je průměr spojovaných hřídelí. Spojka s omezením momentu do 3 N·m (Spojka 1, Tab. 13) byla vybrána pro spojení hřídele a momentového snímače. Spojka pro spojení servomotoru a momentového snímače má však rozdílné průměry spojovaných hřídelí, proto bylo nutné vybrat ještě další spojku (Spojka 2, Tab. 13). Přehled hlavních vlastností vybraných spojek je uveden v tabulce (Tab. 13). Zde jsou mimo jiné uvedeny důležité parametry s názvy „Axiální“, „Laterální“ a „Úhlový“, které udávají, jak velkou odchylku spojovaných hřídelí jsou spojky schopny vyrovnat v daném směru [27].

Tab. 13 Vlastností použitých bezvúlových vlnovcových spojek [27].

Vlastnost	Spojka 1	Spojka 2
Moment [N·m]	3	4,5
Průměr hřídele [mm]	4 - 12,7	6 - 16
Moment setrvačnosti [kg.m ²]	0,02	0,07
Hmotnost [g]	23	50
Torzní tuhost [N·m/rad]	1500	7 000
Axiální ±[mm]	0,5	1
Laterální ±[mm]	0,2	0,2
Úhlový ±[mm]	1	1
Otáčky [1/min]	do 10 000	do 10 000

3.5.4 Vlastní konstrukce prototypu

Konstrukce prototypu probíhala podle vytvořeného 3D modelu (Obr. 27). Tento model sloužil ke zjištění rozměrů jednotlivých komponent, podle kterých byly tyto komponenty vytvořeny a následně sestaveny (Obr. 31). Při vytváření prototypu jsem dbal na jeho budoucí použití v teplotní komoře, proto je na prototypu patrná mezera, která simuluje tloušťku stěny teplotní komory (Obr. 31).



Obr. 31 Konstrukce prototypu pro dlouhodobou zátěžovou zkoušku.

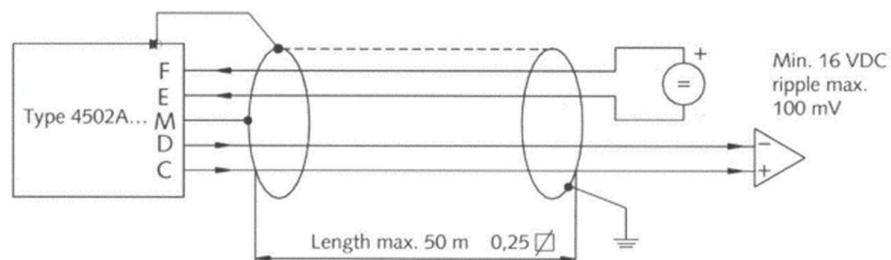
Po sestavení konstrukce byl přidán momentový snímač a servomotor (Obr. 32). Při sestavování je důležité, aby všechny komponenty byly přesně v ose a nedocházelo

ke zbytečně velkým ztrátám (tření). Nastavení umožňuje montážní materiál, který má určitou vůli v drážkách a je možné každou komponentu posunout dle potřeby.

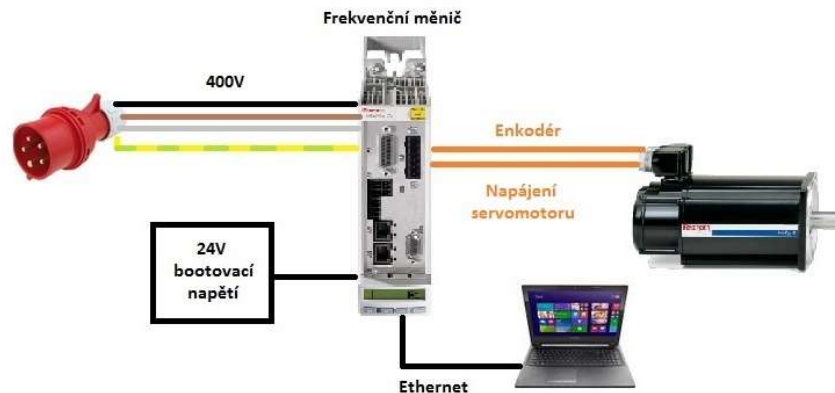


Obr. 32 Zkonstruovaný prototyp pro zátěžovou zkoušku se servomotorem.

Po sestavení prototypu bylo potřeba momentový snímač (Obr. 33) a servomotor (Obr. 34) zapojit a oživit. Momentový snímač stačí připojit na napájecí napětí od 13,5 do 26 V. Při působení momentu na snímač, je generováno napětí na výstupu, které je úměrné velikosti působeného momentu. K napájení servomotoru přes frekvenční měnič bylo použito třífázové napájecí napětí. Pro napájení PLC je potřeba napětí o velikosti 24 V. Komunikace a nastavení frekvenčního měniče je možná pomocí dvou programů, a to softwaru s názvem IndraWorks DS (který je dostupný zdarma) a softwaru IndraWorks Engineering, který umožňuje vytváření logiky a programování PLC uvnitř frekvenčního měniče.



Obr. 33 Zapojení momentového snímače [18].



Obr. 34 Blokové schéma zapojení servopohonu [19, 20].

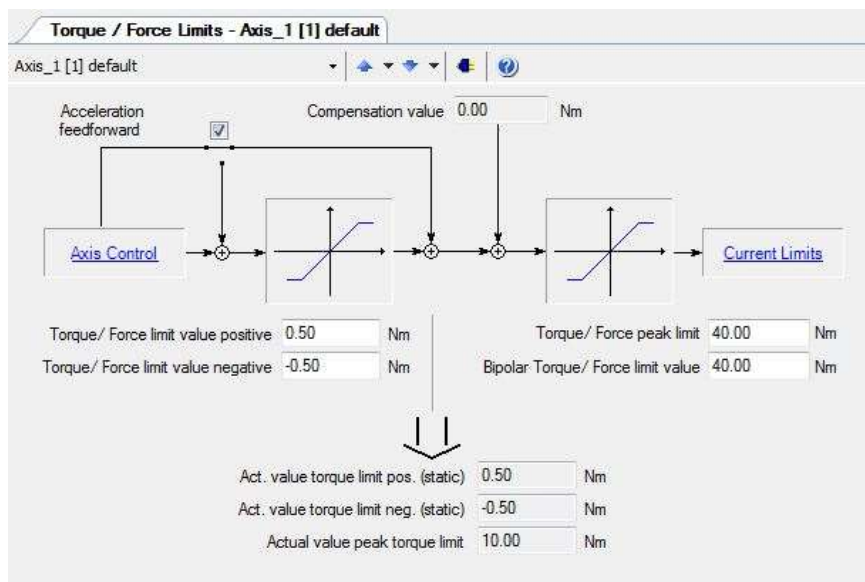
Po zapojení a oživení konstrukčního systému bylo zapotřebí nastavit potřebné parametry servomotoru a režim řízení. Servomotor použitý jako umělá zátěž může pracovat ve třech režimech: rychlostním, polohovém a momentovém.

Při rychlostním řízení je nastavena nulová rychlost pohybu, pouze stačí nastavit momentové omezení. Servomotor stojí na místě, a když se někdo pokusí silou pootočit hřídelí, ta se brání požadovaným momentem. Když je ale dosaženo pootočení hřídele, zůstane poté stát v nové poloze.

Při polohovém nastavení je potřeba nastavit rychlost servomotoru na nenulovou. Dále je třeba uvést polohu servomotoru, do které se má vracet, a momentové omezení. Servomotor potom stojí na místě a při pokusu o pootočení hřídele se brání požadovaným momentem. Pohon se vždy snaží vrátit servomotor do výchozí nastavené polohy definovanou rychlostí.

Posledním typem řízení je tzv. momentové. Při momentovém řízení se servomotor stále snaží dosáhnout požadovaného momentu. Při odlehčení hřídele se servomotor roztočí do vysokých otáček [14].

Pro nastavení momentu v rychlostním režimu slouží již přednastavené prostředí v programu IndraWorks Engineering (Obr. 35). V tomto prostředí lze nastavit momentové omezení (tj. brzdný moment) pro každý směr otáčení zvlášť.



Obr. 35 Nastavení brzdného momentu v programu IndraWorks Engineering.

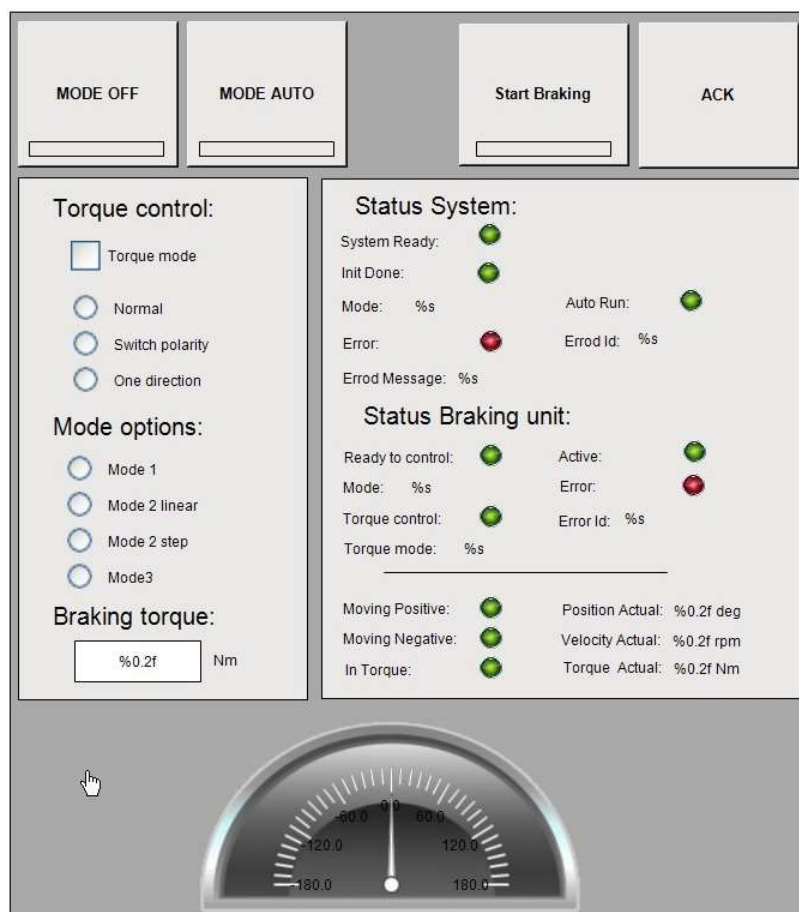
Pro použití logiky a momentového řízení bylo nutno naprogramovat PLC ve frekvenčním měniči. Tento program byl po konzultacích vytvořen pracovníkem firmy Bosch Rexroth[®] Ing. Pavlem Dederle. Tento program umožňuje různá nastavení velikosti a směru působení brzdného momentu.

Uživatelské rozhraní tohoto programu se skládá ze tří částí (Obr. 36). Nahoře v okně programu jsou umístěna čtyři tlačítka pro spuštění programu a brzdění. Pod nimi je v levé části okna umístěn soubor volitelných položek pro nastavení způsobu brzdění. V pravé části okna je potom box s informacemi o aktuálním stavu brzdění a servomotoru.

Ke spuštění programu slouží tlačítko „MODE OFF“. Po zmáčknutí tlačítka dojde ke kontrole servomotoru a zjištění, zda je připraven. Před zmáčknutím tlačítka „MODE AUTO“ je potřeba nastavit nulovou polohu páky GPA, protože po aktivování tlačítka se vynuluje hodnota enkodéru. Po nastavení způsobu brzdění tlačítkem „Start Braking“, servomotor začne generovat brzdný moment. Tlačítko „ACK“ slouží k resetování chyb servomotoru.

Volby pod nápisem „Torque control“ umožňují zvolit způsob (tedy směr) generování brzdného momentu. Při výběru hodnoty „Normal“ servomotor generuje brzdný moment

(tedy brzdí) při rostoucím úhlu a při klesajícím úhlu servomotor GPA pomáhá. Při výběru „Switch polarity“ servomotor generuje brzdňý moment při rostoucím i klesajícím úhlu. Při změně směru GPA tedy dochází ke změně polarity brzdňého momentu. Poslední možností je „One direction“. Při tomto způsobu brzdění je brzdňý moment generován pouze při rostoucím úhlu, při klesajícím úhlu je brzdňý moment nulový.



Obr. 36 Uživatelské prostředí vytvořeného programu pro ovládání servomotoru.

Momentový profil se vybírá pod nápisem „Mode options“. První možnost, tj. „Mode 1“, generuje konstantní brzdňý moment o velikosti 0,2 N·m. Tento způsob je podobný módu „Mode 3“, s tím rozdílem, že u „Mode 3“ je možné zvolit brzdňý moment zapsáním hodnoty do políčka „Braking torque“. Dalším způsobem je „Mode 2 linear“.

Jedná se o generování brzdného momentu s lineární závislostí na úhlu otočení páky GPA (Obr. 9). Poslední možností je „Mode 2 step“. V tomto případě jde o generování skokového brzdného momentu, u kterého se při překročení úhlu otočení 104° skokově změní hodnota momentu (Obr. 8).

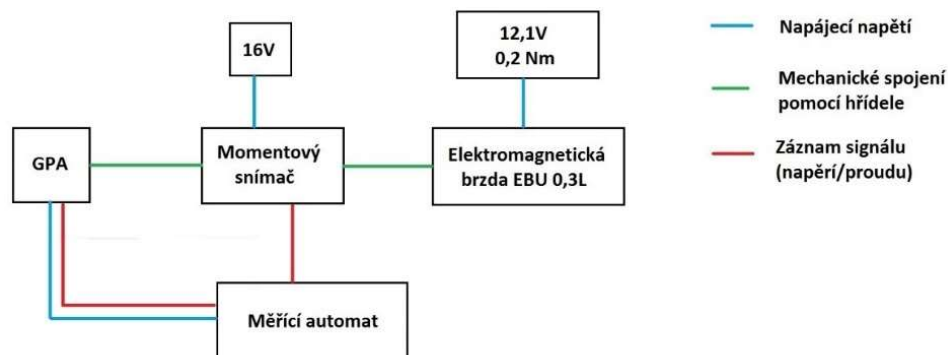
3.6 Měření a výsledky

Pro zaznamenávání naměřených dat byl použit měřící automat, který slouží k záznamu fyzikálních veličin převedených na napětí a proud při dlouhodobých zkouškách.

Automat se skládá z řídicích jednotek, které zajišťují pohyb GPA. Další částí je měřící hardware od firmy ETAS, který je schopen odečítat napětí a proud na pohybovaném GPA a jiných zapojených zařízeních. Záznam dat a komunikaci s hardwarem zajišťuje měřící program INCA.

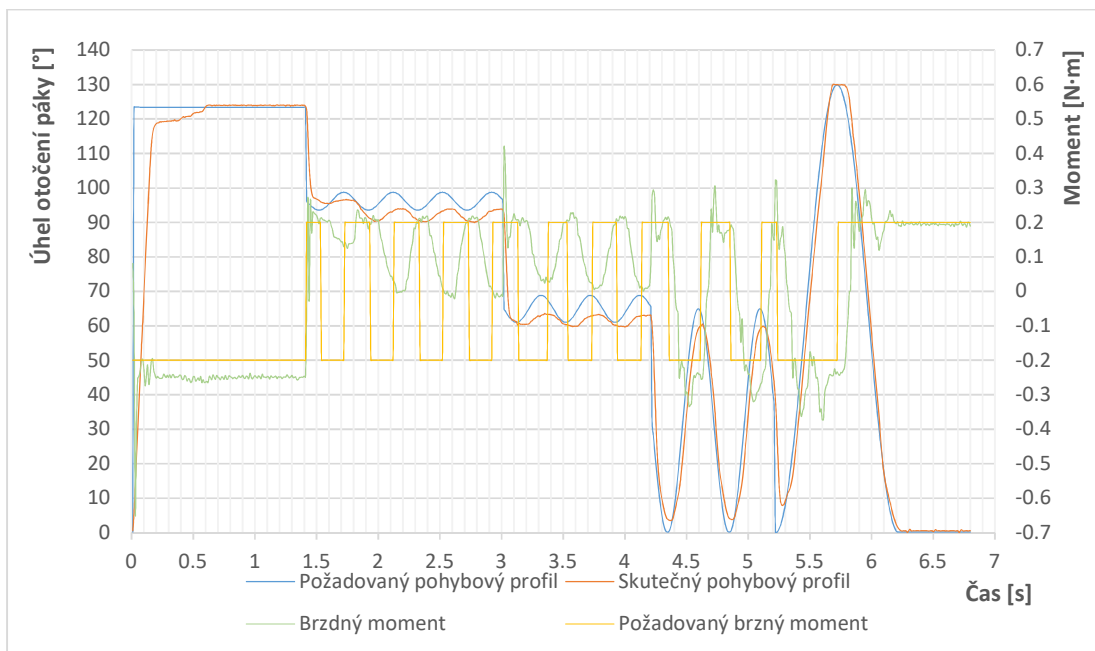
K řízení GPA 1.0 při měření na elektromagnetické brzdě byl použit starší typ automatu s řídicí jednotkou (ŘJ) ME7, který nereguluje pohyb stejně kvalitně jako novější typ s ŘJ MED17, který byl použit u zbývajících měření.

Momentový snímač byl napájen napětím o velikosti 16 V (Obr. 37).



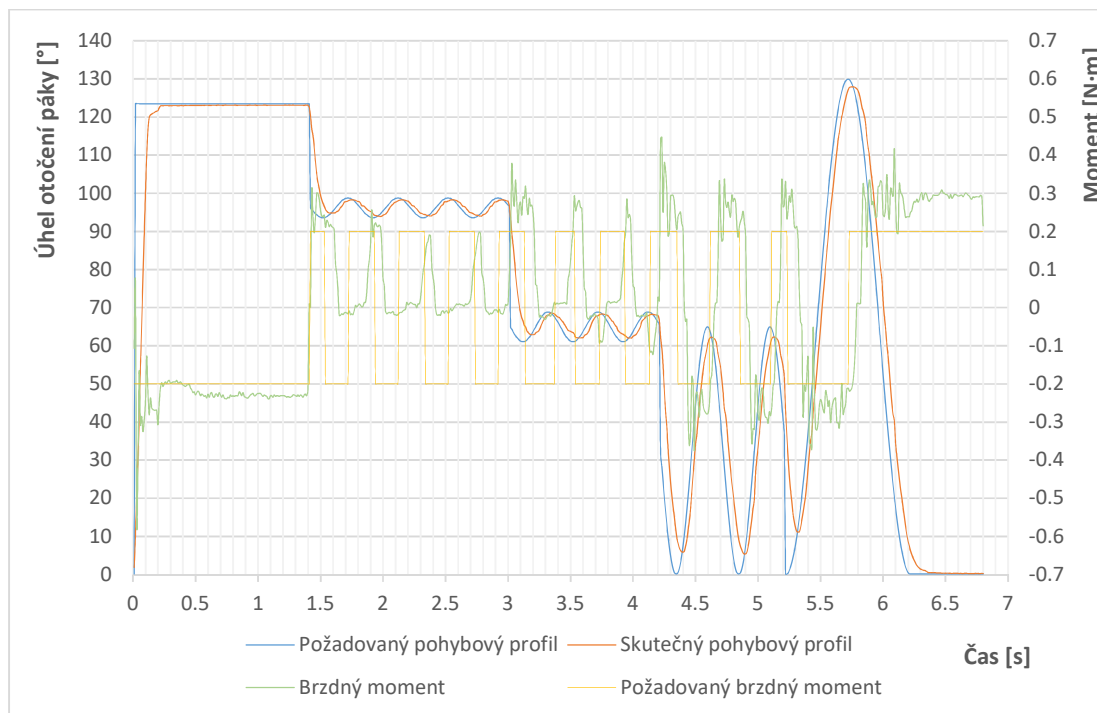
Obr. 37 Schéma zapojení měření na prototypu s elektromagnetickou brzdou.

Při měření byl nahráván záznam dat po dobu 10 minut. Z tohoto záznamu byl následně vybrán jeden cyklus, u sinusového profilu tři cykly, pohybového profilu a vyneseno do grafu spolu s naměřeným brzdným momentem [25].



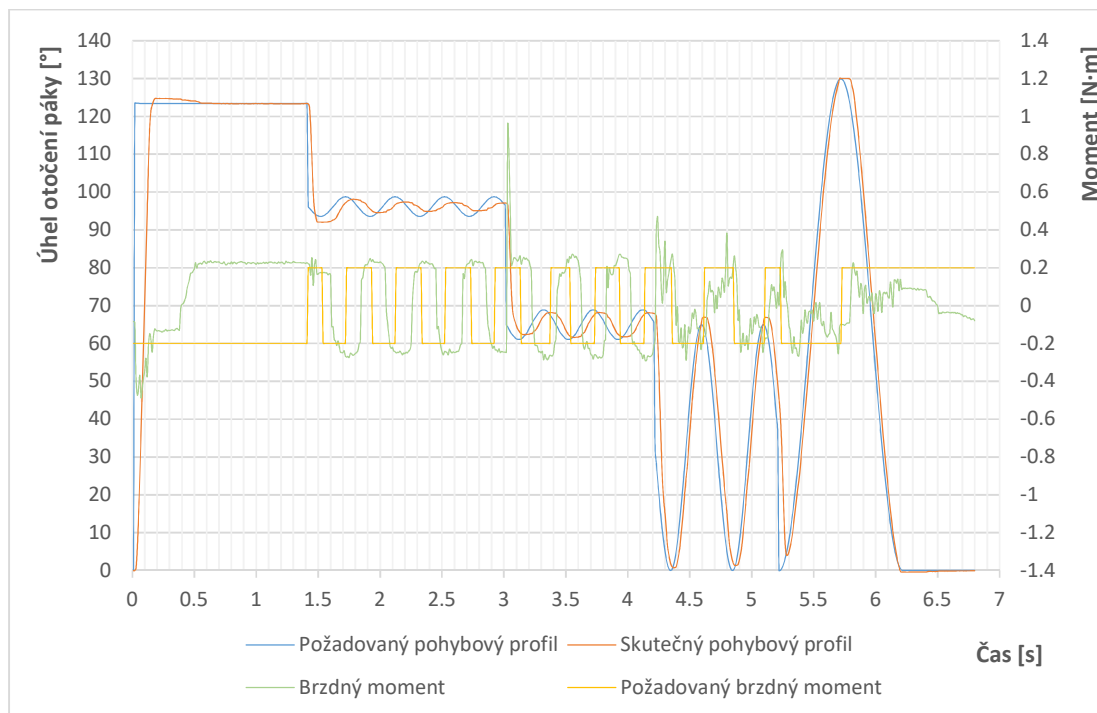
Obr. 38 Elektromagnetická brzda (GPA 1.0, 0,2 N·m)

Pro první měření byla použita elektromagnetická brzda, která byla napájena napětím 12,1 V (Obr. 38). Tato kalibrace odpovídá generování brzdného momentu 0,2 N·m. Jak se ukázalo, v čase 0 až 1,5 s je brzdný moment o 0,05 N·m větší oproti požadovanému. V čase 1,5 s až 4 s elektromagnetická brzda nereaguje na sinusové změny polohy s frekvencí 2,5 Hz a amplitudou 6 % a brzdí pouze v jednom směru. To je částečně způsobeno nekvalitou generovaného pohybu GPA (velký rozdíl mezi červenou a modrou křivkou) a částečně pólovými nastavení elektromagnetické brzdy. Další příčinou je vůle v uchycení páky GPA 1.0. Pro toto uchycení byla použita silonová spojka, která nezajišťovala potřebné bezvůlové spojení. Tato příčina byla zjištěna až při testování na servomotoru a z tohoto důvodu bylo od testování s GPA 1.0 upuštěno. Při vyšších amplitudách a nižší frekvenci (4–6 s) elektromagnetická brzda generuje brzdný moment v obou směrech otáčení. Jsou zde, ale značně překmitý přes požadovaný moment. K řízení GPA 1.0 byl použit starší typ automatu s ŘJ ME7, který nereguluje pohyb stejně kvalitně jako novější typ s ŘJ MED17, který byl použit u všech zbývajících měření.



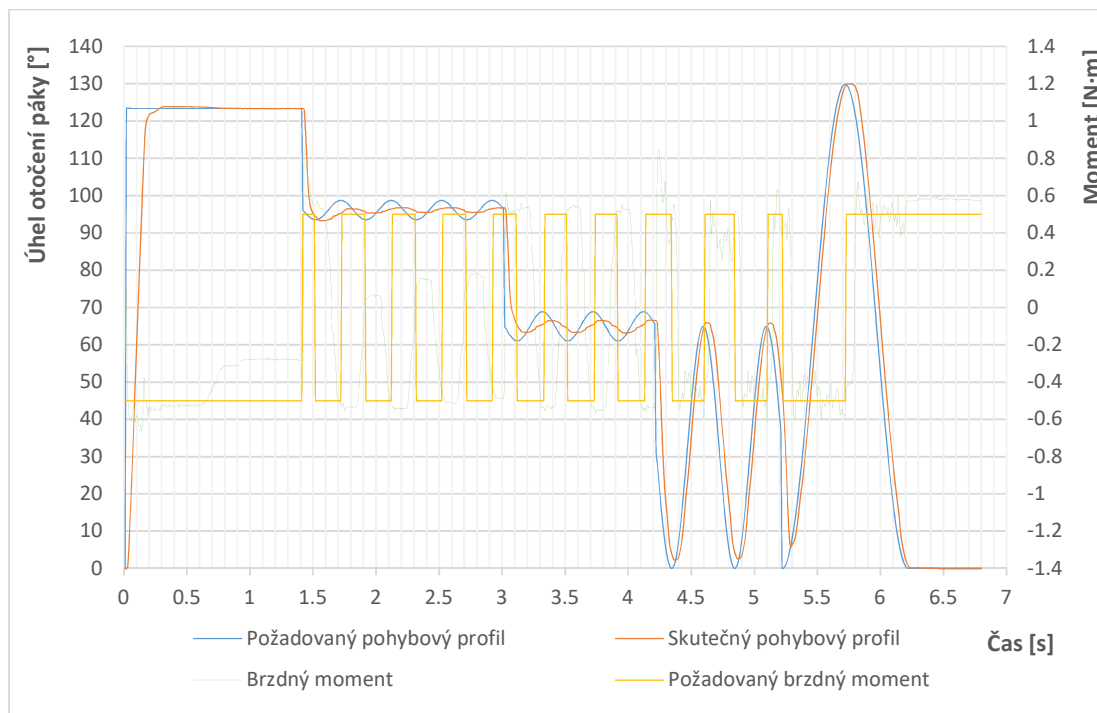
Obr. 39 Servomotor – rychlostní řízení (GPA 1.0, 0,2 N·m)

Pokud servomotor pracuje v rychlostním režimu, brzdný moment je nastaven na hodnotu 0,2 N·m a je použito GPA 1.0 (Obr. 39), pak servomotor pracuje podobně jako elektromagnetická brzda (viz Obr. 38). V čase 1,5 s až 4 s nereaguje na sinusové změny polohy s frekvencí 2,5 Hz a amplitudou 6 % a brzdí pouze v jednom směru. V následujících sinusových změnách polohy o frekvenci 2 Hz a 1 Hz a amplitudou 50 % a 100 % již servomotor generuje brzdný moment oběma směry, i když je reakce zpožděna o 0,07 s. Zpoždění je způsobeno posunutím skutečného pohybu (červená křivka, Obr. 39) od požadovaného (modrá křivka, Obr. 39). Generovaný brzdný moment je větší o 0,05 N·m, místy až o 0,2 N·m.



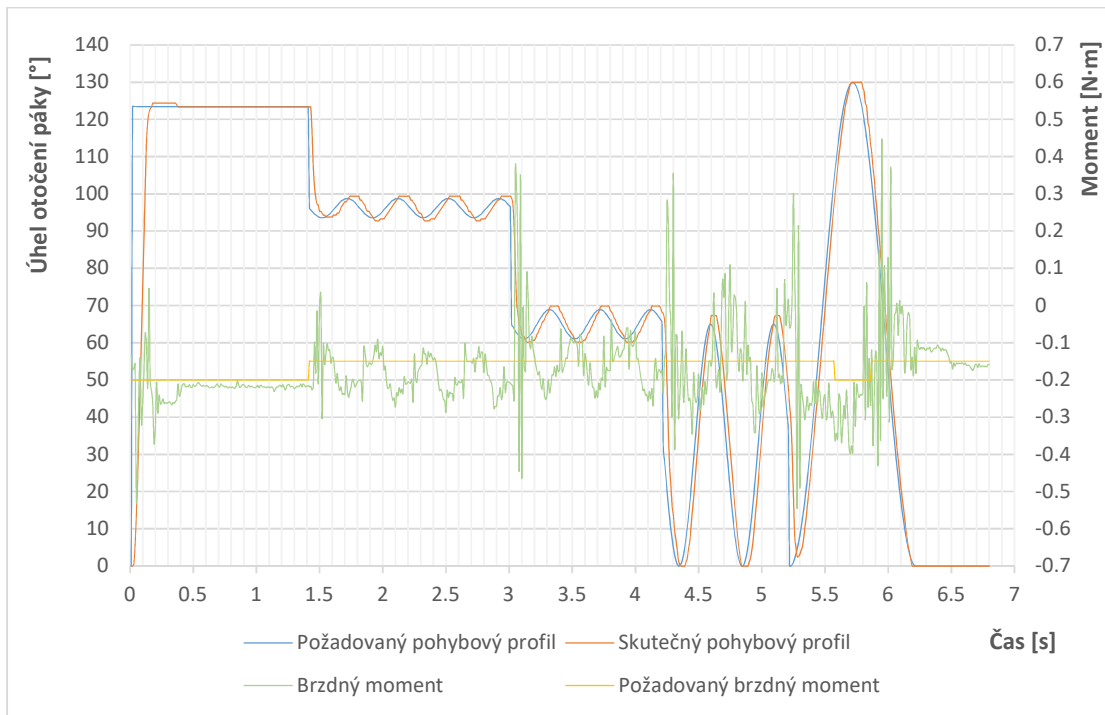
Obr. 40 Servomotor – rychlostní řízení (GPA 3.1, 0,2 N·m)

Pokud servomotor pracuje v rychlostním režimu s nastavením brzdného momentu o velikosti 0,2 N·m a testovaným vzorkem je GPA 3.1 (Obr. 40), pak je brzdný moment na začátku pohybového profilu (tj. při držení konstantní polohy) generován s opačnou polaritou. Změna této polaritě je způsobena poklesem úhlu otočení a tudíž generování brzdného momentu proti směru otáčení páky. V následujících sinusových změnách polohy servomotor reaguje na změnu směru otáčení změnou polaritě brzdného momentu. Dochází ke zpoždění generovaného momentu o 0,1 s, které je způsobeno zpožděním pohybu páky GPA oproti požadovanému pohybovému profilu (modrá a červená křivka, Obr. 40). Z porovnání stejného měření s GPA 1.0 (Obr. 39), které má oproti GPA 3.1 menší moment a pomalejší odezvu, je patrné, že servomotor vyžaduje spojení bez vůle a rychlejší odezvy GPA, čehož bylo u GPA 3.1 dosaženo.



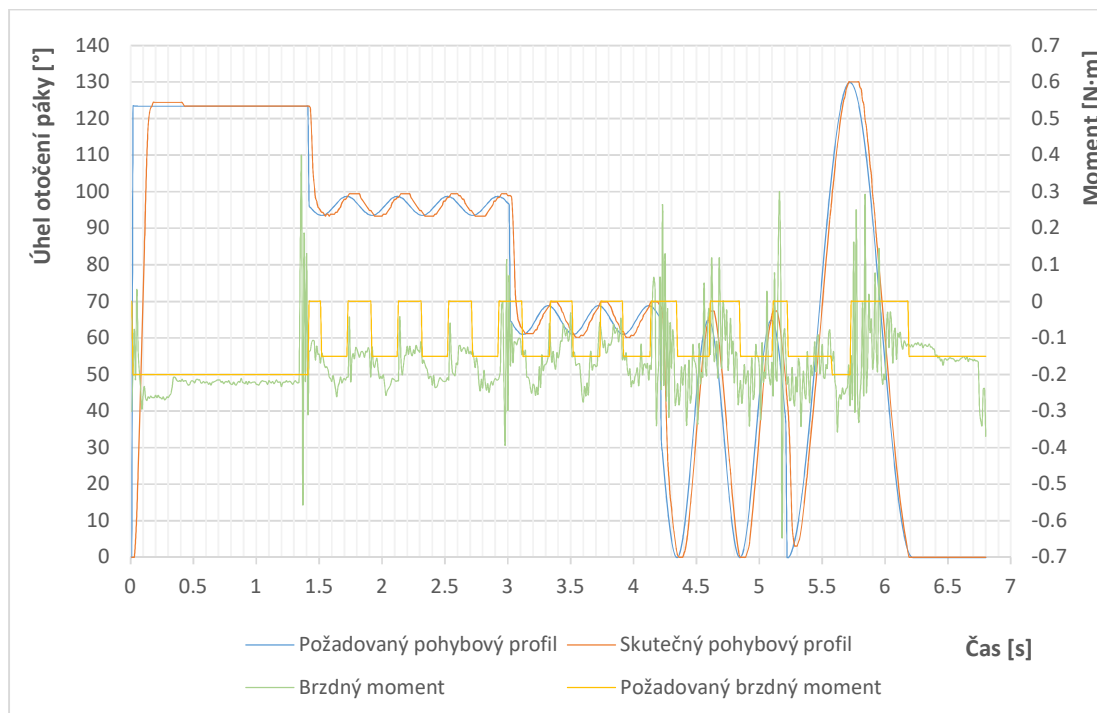
Obr. 41 Servomotor – rychlostní řízení (GPA 3.1, 0,5 N·m)

Při testu, kdy servomotor pracoval v rychlostním režimu s nastavenou hodnotou momentu 0,5 N·m a s použitou zátěží v podobě GPA 3.1 (Obr. 41), generovaný moment nedosahoval požadovaných hodnot zejména v časovém úseku 1,5 s až 3 s. Pohyb GPA je v této oblasti téměř nulový, protože při tomto měření byl motor GPA již značně zahřátý a proto s nižším výkonem a opožděnou reakcí. Pro GPA je taková zátěž příliš velká a není ji schopno při tak malé změně úhlu vykonat. Z důvodu odlišnosti skutečného a požadovaného pohybového profilu je generovaný brzdný moment po většinu času zpožděn až o 0,2 s.



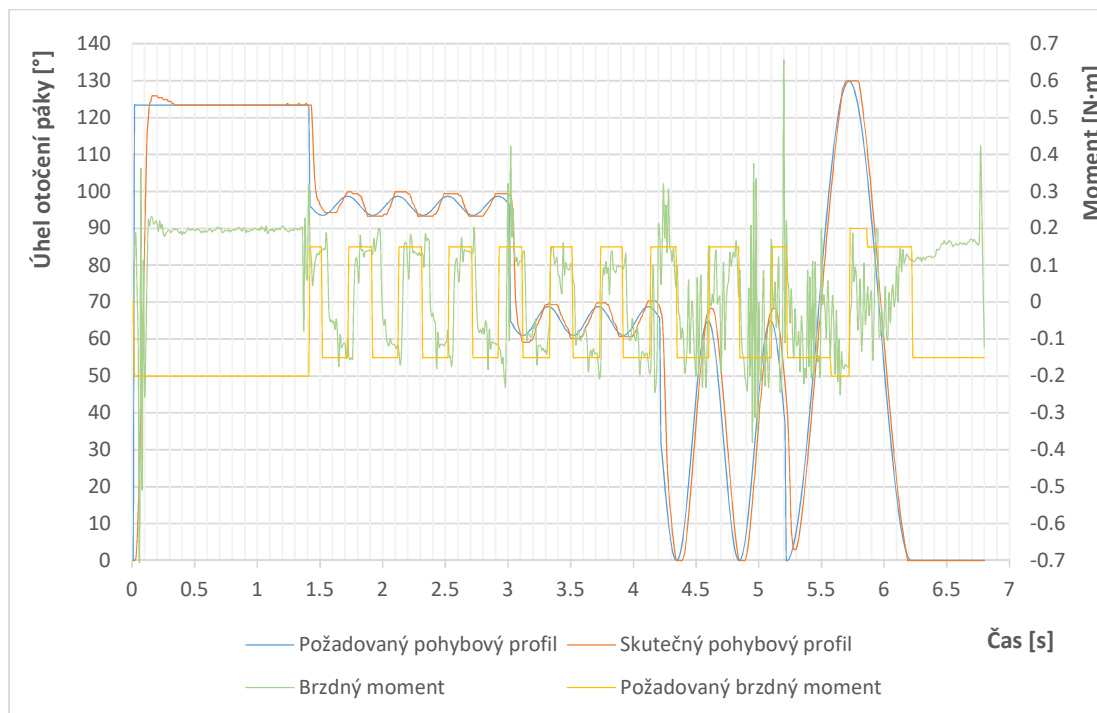
Obr. 42 Servomotor (GPA 3.1, Mode 2 step, Normal)

V dalším testu servomotor pracoval v momentovém režimu brzdění, v programu byl aktivován režim "Mode 2 step" a způsob brzdění (*torque control*) byl nastaven na hodnotu "Normal" (Obr. 42). V počáteční a závěrečné části pohybového profilu, kdy je páka GPA v konstantní poloze, je i brzdňý moment až na počáteční oscilaci také konstantní. Absolutní hodnota momentu je zde 0,22 N·m (resp. 0,165 N·m), tj. o 10% vyšší než byla požadovaná (tedy nastavená) hodnota. Oscilace na počátku a při všech změnách polohy jsou způsobené ovládací logikou servomotoru. Ta potřebuje na rozhodnutí, zda dochází ke změně polohy, minimálně 50 ms. V tomto případě servomotor pracuje v minimálních hodnotách svého rozsahu (Tab. 7). Při sinusových změnách polohy páky je patrné, že absolutní hodnota brzdňého momentu je cca o 70% vyšší než požadovaná.



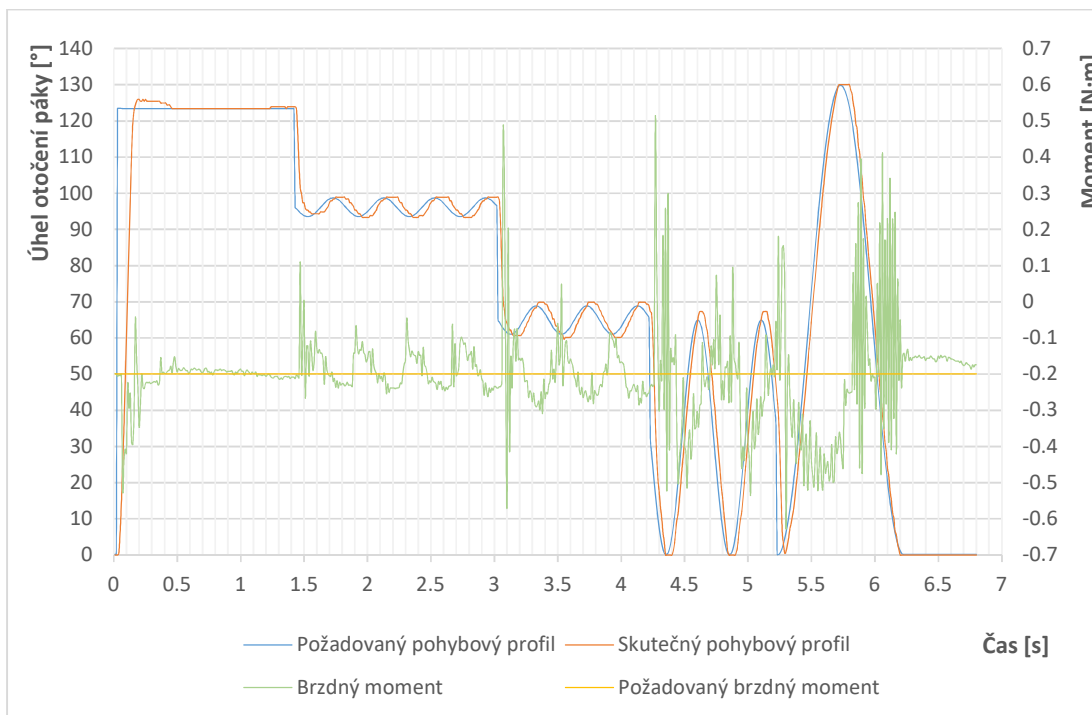
Obr. 43 Servomotor (GPA3.1, Mode 2 step, One direction)

Při nastavení, v kterém servomotor pracuje v momentovém režimu a v programu byl zvolen „Mode 2 step“ a směr brzdění "One direction“ (Obr. 43), je brzdňý moment v časovém úseku 0 až 1,5 s (po ustálení polohy páky) o 0,01 N·m větší oproti požadovanému. Při změně polohy páky ze 123° na 95° v čase 1,4 s dochází k oscilacím brzdňého momentu. V následujících sinusových změnách polohy o frekvenci 2,5 Hz servomotor reaguje změnou momentu na změnu polohy. Při klesajícím úhlu otočení moment nedosahuje nulové hodnoty, jak bylo požadováno. Celkově je skutečný brzdňý moment vyšší o cca 40%. V časovém úseku 4 až 6,5 s, kdy má pohybový profil větší amplitudu a menší frekvenci, je brzdňý moment zatížen oscilacemi. Skutečný pohybový profil je zpožděn o 0,04 s oproti požadovanému.



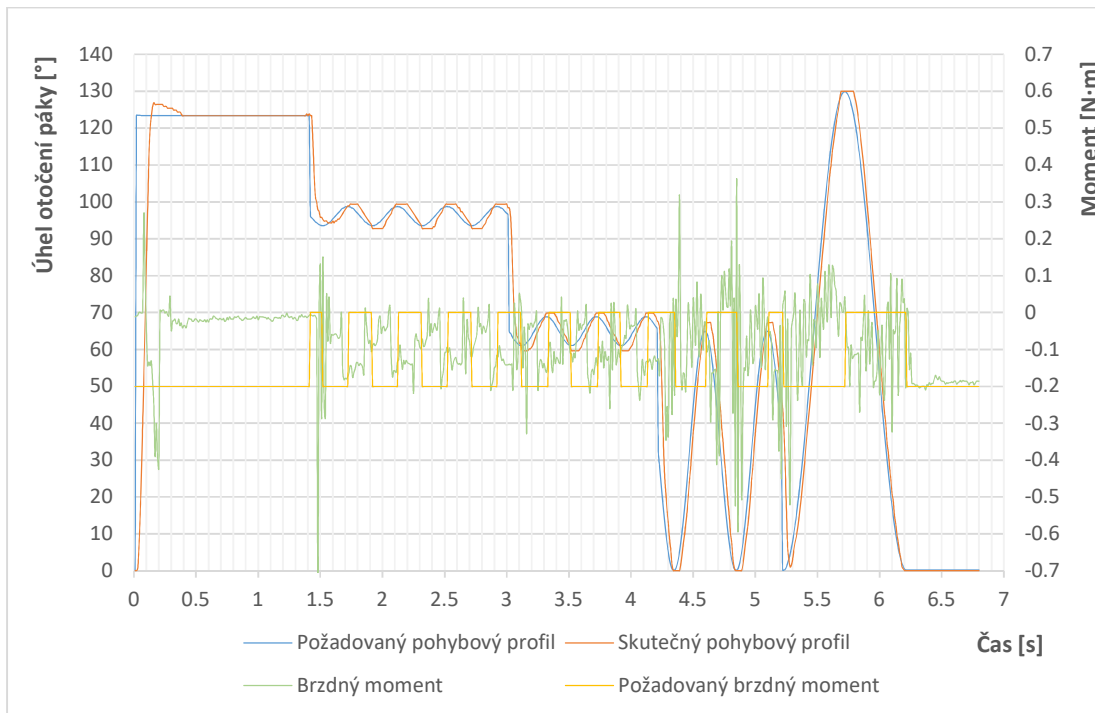
Obr. 44 Servomotor (GPA 3.1, Mode 2 step, Switch polarity)

Pokud je způsob brzdění servomotoru změněn na "Switch polarity" (Obr. 44), pak se na začátku a na konci pohybového profilu (tj. v době kdy je páka GPA držena v konstantní poloze) ukazuje rozdílná polarita požadovaného a naměřeného brzdného momentu. Tato odchylka není chybou. V tomto případě totiž není definováno, jakým směrem by měl brzdný moment působit. O směru působení momentu rozhoduje rozhodovací logika servomotoru na základě pohybu GPA. V čase 0,15 s se GPA po prudkém nárůstu úhlu vrací zpět (tj. klesá úhel otočení páky) a servomotor působí proti této změně. Při sinusových změnách polohy o frekvenci 2,5 Hz a amplitudě 6 % v časovém úseku 1,5 s až 4 s dochází k přepínání polarit brzdění momentu. V následujícím úseku s frekvencí 2 Hz a amplitudou 50 % dochází k oscilacím brzdného momentu. Přes přítomné výkmity je v tomto režimu, oproti módu „Normal“ (Obr. 42) a „One direction“ (Obr. 43), nejmenší rozdíl mezi požadovaným a skutečným brzdným momentem.



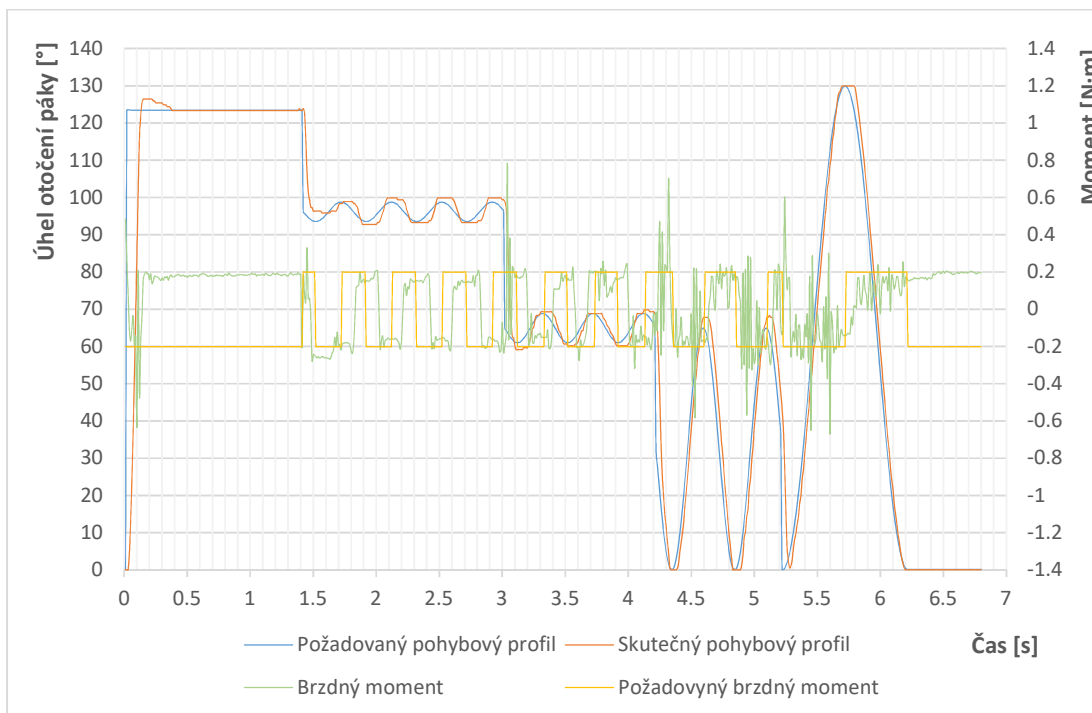
Obr. 45 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – konstantní moment 0,2 N·m, Normal)

Při sérii dalších měření byl zvolen "Mode 3", při kterém bylo GPA zatěžováno momentem, jehož velikost je možné si zvolit. V prvním případě byl použit brzdný moment o velikosti 0,2 N·m (Obr. 45) a způsob brzdění byl nastaven na pozici "Normal". V grafu (Obr. 45) jsou vidět velké oscilace, zejména při větších změnách úhlu otočení páky. Na začátku pohybového profilu v časovém úseku od 0,5 s do 1,5 s je brzdný moment totožný s požadovaným. Při amplitudě 6% v čase mezi 1,5 s a 4,2 s je brzdný moment větší o 0,05 N·m (cca o 25%). Při klesajícím úhlu je brzdný moment -0,1 N·m, tedy o cca 45% nižší, než byl požadován. To znamená, že servomotor při klesajícím úhlu otáčení pomáhá méně, než se od něj očekává. V čase od 4,2 s do 6,5 jsou vidět velké oscilace, které v případě rostoucího úhlu dosahují místy až 2,5 násobku oproti požadovanému momentu.



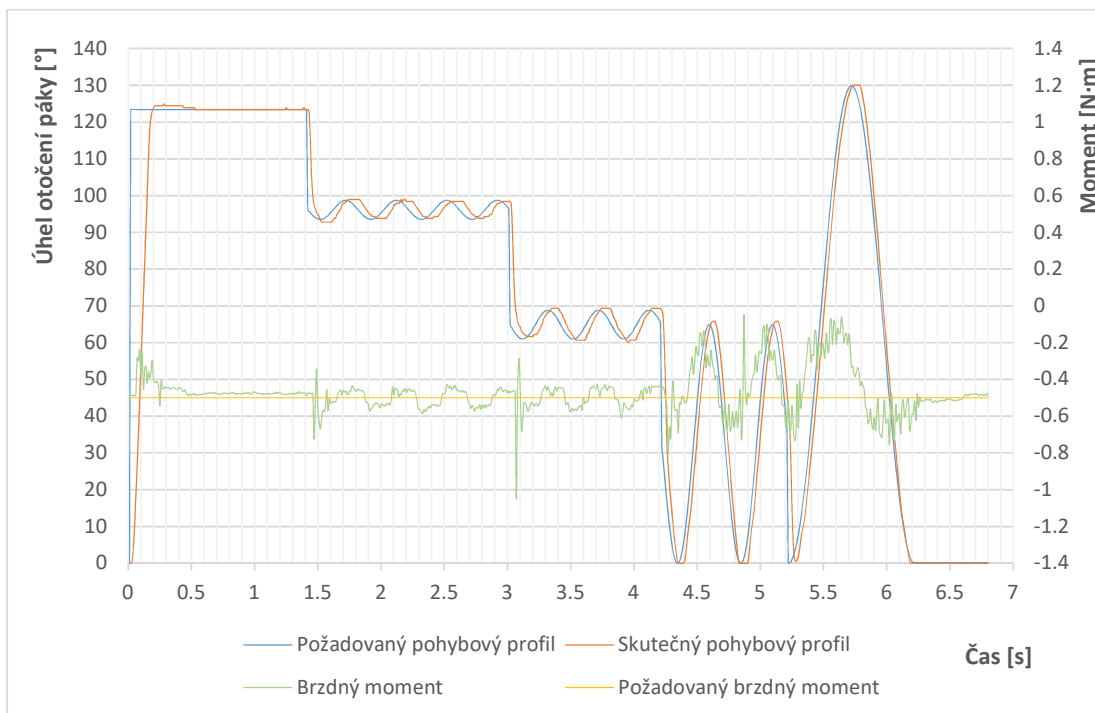
Obr. 46 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,2 N·m, One direction)

V následujícím testu byl použit brzdňý moment o velikosti 0,2 N·m se způsobem brzdění "One direction" (Obr. 46). V čase 0,2 s je znatelný překmit GPA oproti požadovanému momentu a následný návrat GPA na požadovaný moment. Tento překmit má za následek to, že brzdňý moment se v čase 0,2 s až 1,5 s rovná 0. Logika servomotoru situaci vyhodnotila jako směr s klesajícím úhlem (tedy „nebrzdit“). V časovém úseku 1,5 s až 4 s je patrné, že oproti módu "Step torque" (Obr. 42) servomotor „padá“ téměř na požadovaný nulový moment. Toto je způsobeno použitím vyššího brzdňého momentu a tedy lepší pracovní oblastí servomotoru. Naměřený brzdňý moment je v tomto čase zpožděn oproti požadovanému o 0,15 s. Zpoždění je způsobeno odlišným pohybem GPA oproti požadovanému pohybovému profilu. Brzdňý moment je generován na základě skutečného pohybu GPA. V čase 4 s a dále jsou patrné velké oscilace. Servomotor zřejmě není schopen reagovat na velké změny úhlu otočení páky. Těmito změnami dochází k velkým rázům, které se snaží servomotor neúspěšně potlačit. Tyto rázy jsou viditelné i v časech 0,1 s a 1,5 s.



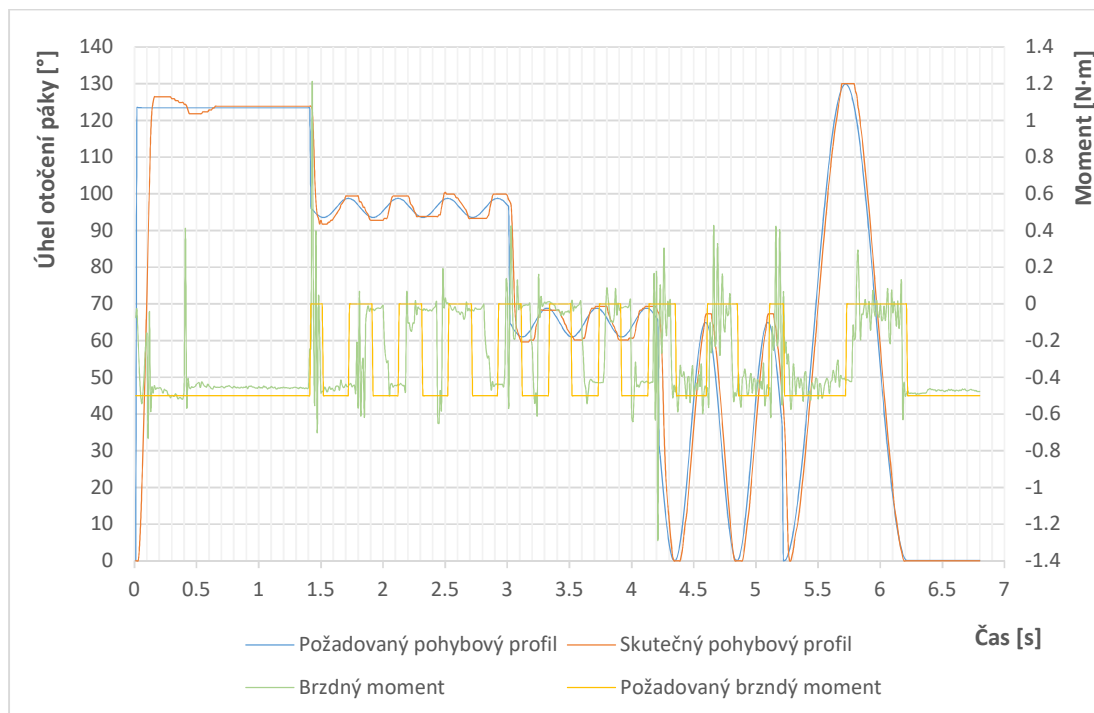
Obr. 47 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,2 N·m, Switch polarity)

V dalším testu v „Mode 3“ při nastavení servomotoru na generování brzdňého momentu o velikosti 0,2 N·m a se způsobem brzdění typem "Switch polarity" (Obr. 47), se způsob brzdňý ukázal stejný jako při použití elektromagnetické brzdy (viz Obr. 38). Při držení konstantní polohy páky je brzdňý moment rovný požadovanému. V sinusových změnách polohy (v časovém úseku 1,5 s až 4 s) brzdňý moment mění polaritu se zpožděním o 0,1 s. V tom samém časovém úseku pohybového profilu nebyla elektromagnetická brzda schopna takto měnit polaritu brzdňého momentu (Obr. 38). V časovém úseku 4 s až 6,2 s dochází k oscilacím brzdňého momentu. I přes tyto oscilace se brzdňý moment přibližuje požadované hodnotě. Zpoždění brzdňého momentu je způsobeno zdeformovaným pohybovým profilem, který se značně liší od požadovaného. Při celkovém srovnání generování brzdňého momentu pomocí servomotoru a elektromagnetické brzdy, dává lepší výsledky použití servomotoru, který i přes některé odlišnosti lépe kopíruje požadovaný brzdňý moment. Výhodou elektromagnetické brzdy však je, že GPA nezatěžuje žádnými oscilacemi.



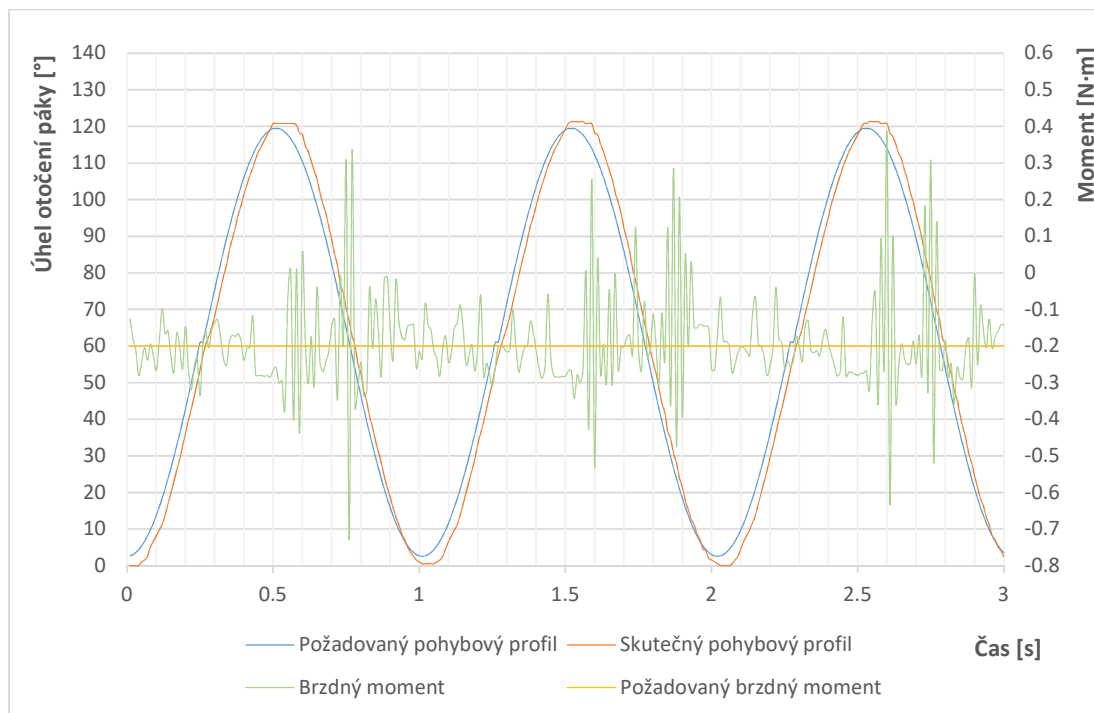
Obr. 48 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,5 N·m, Normal)

Při podobném nastavení servomotoru jako v předchozích případech, nicméně s brzdňým momentem o velikosti 0,5 N·m a způsobem (tedy směrem) brzdění nastaveném na "Normal" (Obr. 48), se pohybový profil zpozdil až o 0,1 s. Naměřený brzdňý moment však neobsahoval, až na dvě výjimky, žádné oscilace. Jak je patrné (z Obr. 48), při generování většího brzdňého momentu má servomotor lepší zpětnou vazbu s GPA v porovnání s předchozím případem, kdy byl brzdňý moment nastavený na hodnotu 0,2 N·m (viz Obr. 45).



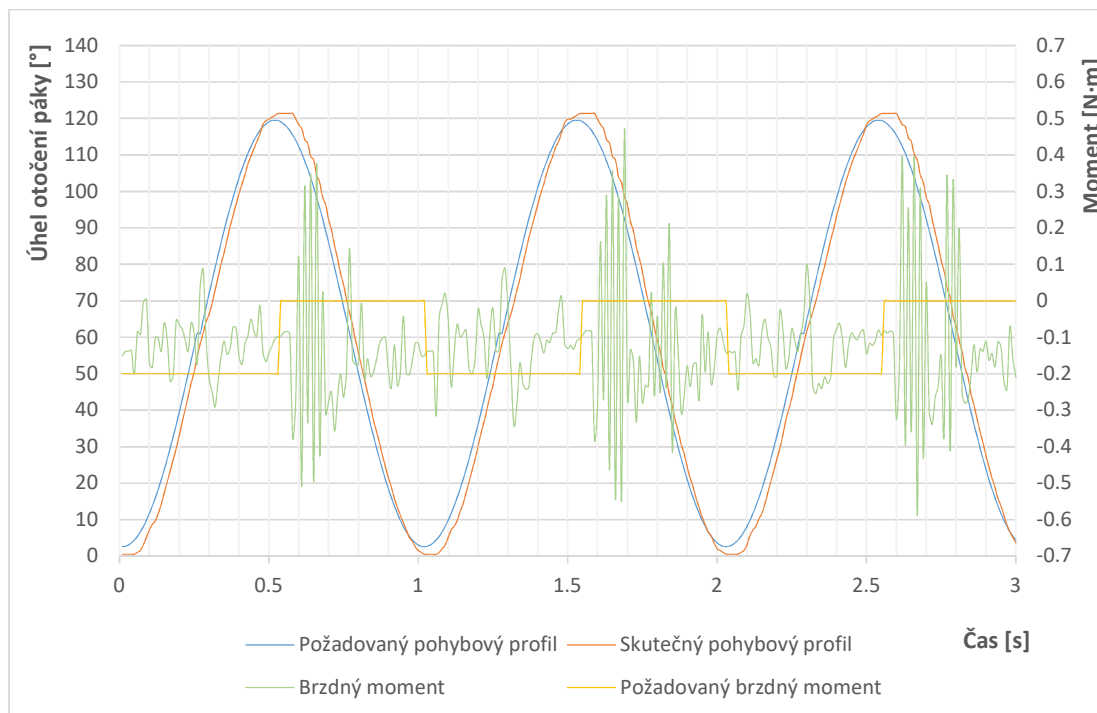
Obr. 49 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,5 N·m, One direction)

Při identickém nastavení servomotoru s předchozím testem, kromě způsobu brzdění změněném na "One direction" (Obr. 49), se brzdňý moment správně vrací téměř na nulovou hodnotu, jak bylo požadováno. V časovém úseku mezi 4 s a 6,5 s je patrné, že generovaný brzdňý moment kopíruje požadovaný o poznání lépe než v případě nastavení brzdňého momentu na hodnotu 0,2 N·m (Obr. 46). Stále však dochází k oscilacím brzdňého momentu, které jsou způsobeny změnou směru otáčení GPA. Pohybový profil je ztelně odlišný od požadovaného, kdy ze sinusu vzniká „obdélník“. To je patrně způsobeno nedostatečným výkonem GPA, které má s požadovanými změnami úhlu velké problémy.



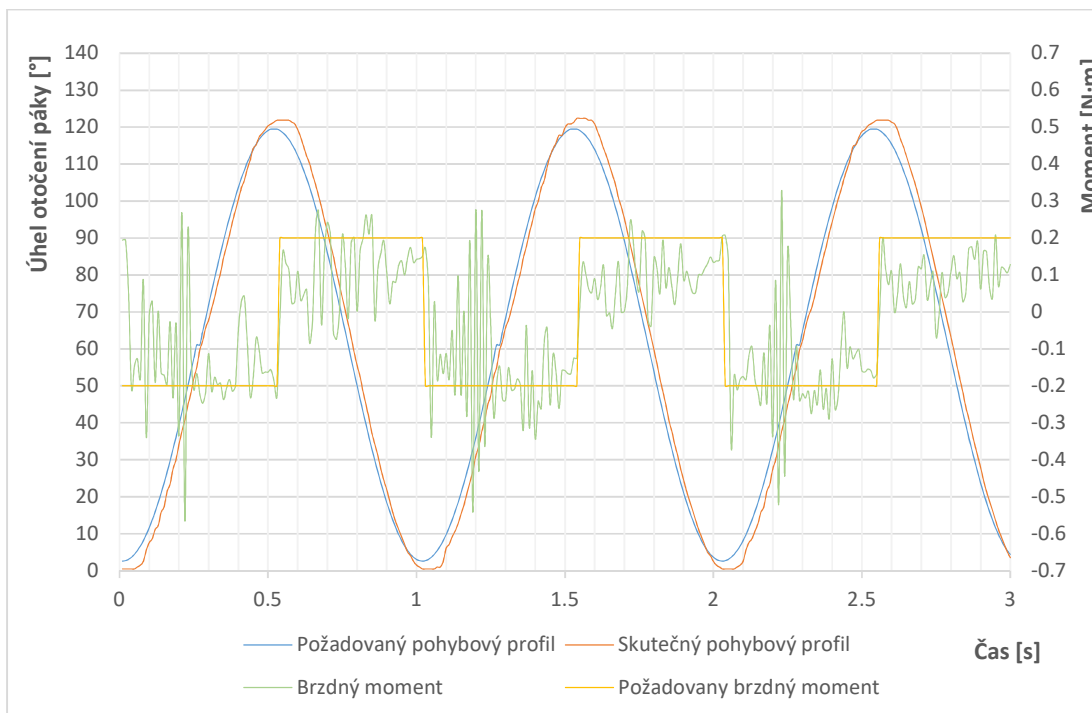
Obr. 50 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,2 N·m, Normal)

Při nastavení servomotoru na generování momentu o velikosti 0,2 N·m a zvolení způsobu brzdění na typ "Normal", pohybový profil odpovídá 1 Hz sinusové křivce (Obr. 50). Po celou dobu je brzdňý moment zatížen oscilacemi. Při klesajícím úhlu otočení páky, kdy má servomotor GPA „pomáhat“, jsou oscilace větší a dosahují i opačné polarity. Při rostoucím úhlu otočení páky se brzdňý moment vždy dostává do záporných hodnot, tj. proti pohybu páky GPA působí brzdňý moment. Skutečný pohybový profil je od požadovaného zpožděn o 0,03 s. V krajních pozicích, tedy před změnou směru otáčení, je patrné, že zde dochází k chvilkovému držení páky na konstantní pozici.



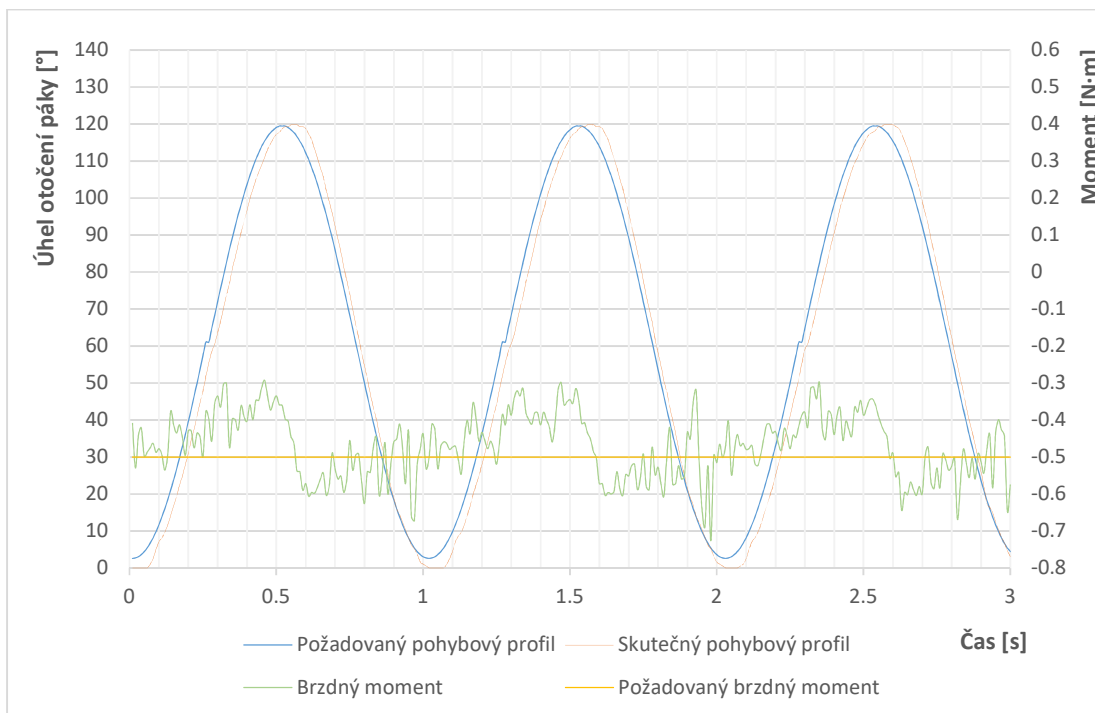
Obr. 51 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,2 N·m, One direction)

Při stejném nastavení pohybového profilu a brzdňného momentu jako v předchozím testu, ale s rozdílným způsobem (tedy směrem) brzdění nastaveném na "One direction" (Obr. 51), dochází k oscilacím při klesajícím úhlu otočení páky. V tomto případě by však měl být brzdňný moment nulový. Tyto oscilace mají za následek zvlnění částí pohybového profilu (červená křivka, Obr. 51) po změně směru v časech 0,5 s, 1,5 s a 2,5 s. Logika servomotoru se zřejmě snaží dosáhnout požadovaného brzdňného momentu, ale při této snaze dochází k oscilacím, které mají za následek další oscilace.



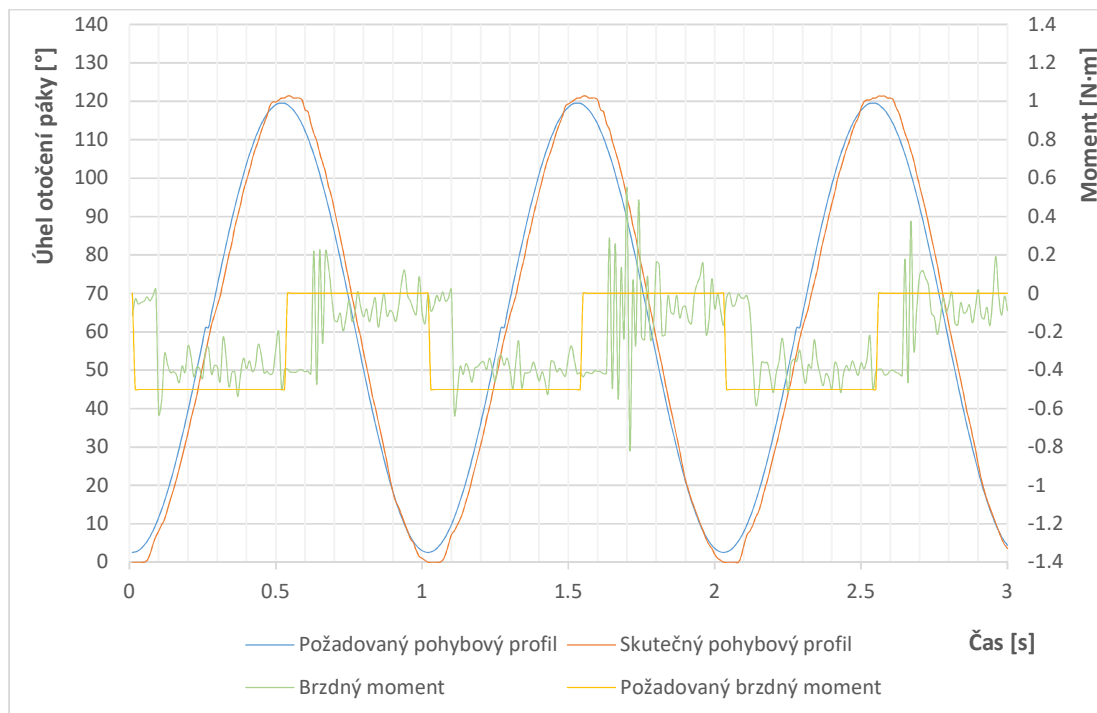
Obr. 52 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,2 N·m, Switch polarity)

Pokud je proveden test se stejným nastavením servomotoru, tj. s generováním brzdňého momentu o velikosti 0,2 N·m, ale v obou směrech ("Switch polarity"), pohybový profil je opět ve tvaru 1 Hz sinusové křivky (Obr. 52). V tomto případě ukazuje naměřený brzdňý moment správné reakce servomotoru na změnu směru otáčení páky GPA v časech 0,5 s, 1 s, 1,5 s, 2 s, a 2,5 s, tedy v době, kdy dochází ke změně polarity brzdňého momentu. Při rostoucím úhlu otočení páky GPA dochází opět k oscilacím.



Obr. 53 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – konstantní moment 0,5 N·m, Normal)

Pokud je servomotor nastaven na brzdění momentem o velikosti 0,5 N·m a pro způsob brzdění je zvolen typ "Normal" (Obr. 53), naměřený brzdňý moment osciluje kolem požadované hodnoty s rozkmitem $\pm 0,1$ N·m. Při změně směru otáčení na klesající úhel otočení páky v časech 0,5 s, 1,5 s a 2,5 s dochází k nárůstu brzdňého momentu, což ukazuje na to, že v této chvíli servomotor pomáhá GPA více, než je požadováno. Při porovnání s testem, kdy byl použit nižší generovaný brzdňý moment (viz Obr. 50), se tento způsob ukazuje jako přesnější a méně rozkmitaný. Je zřejmé, že servomotor lépe pracuje v horní části svého momentového rozsahu. Nominální moment servomotoru v klidu je 2,7 N·m.



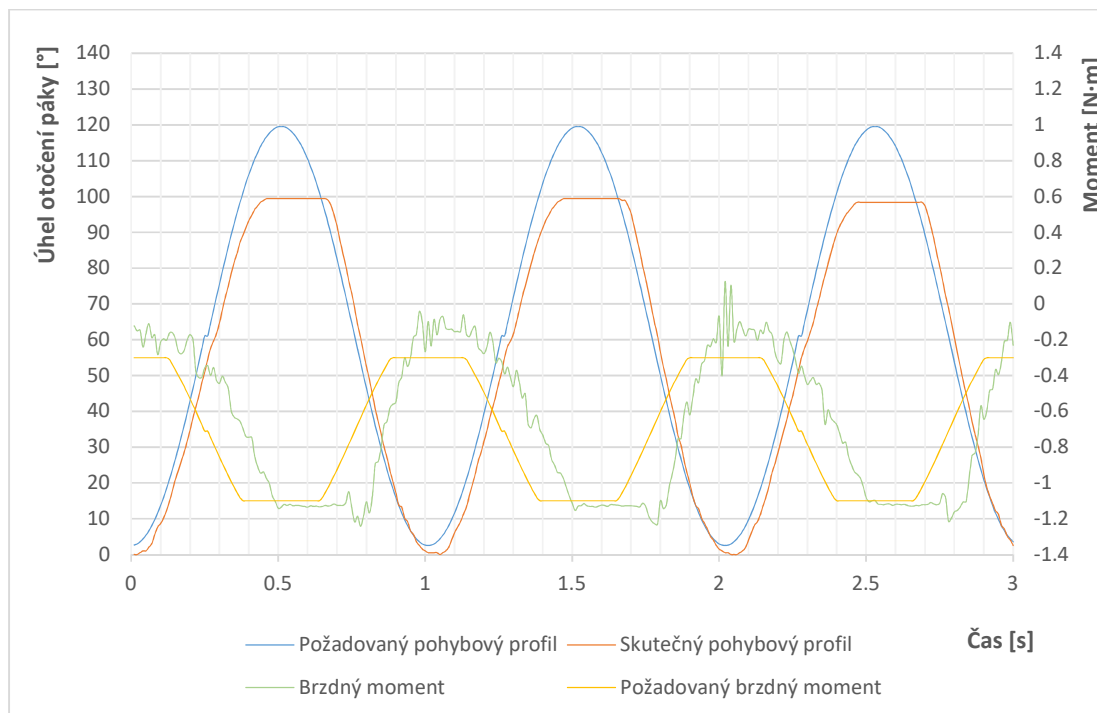
Obr. 54 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,5 N·m, One direction)

Pokud je servomotor nastaven na stejné hodnoty jako v předchozím případě a je změněn způsob brzdění na "One direction" (Obr. 54), servomotor viditelně reaguje na změnu směru otáčení páky GPA v časech 0,5 s, 1 s, 1,5 s, 2 s a 2,5 s, i když se zpožděním 0,1 s. Zpoždění je způsobeno odchylkou skutečné polohy páky GPA od požadované a ke změně směru dojde o 0,1 s později. Opět dochází k oscilacím při klesajícím úhlu otočení páky. Při porovnání s nastaveným brzdícím momentem na hodnotu 0,2 N·m (Obr. 51) se potvrzuje, že je pro servomotor lepší pracovat s větším momentem. Servomotor tedy lépe pracuje v horní části rozsahu momentu.



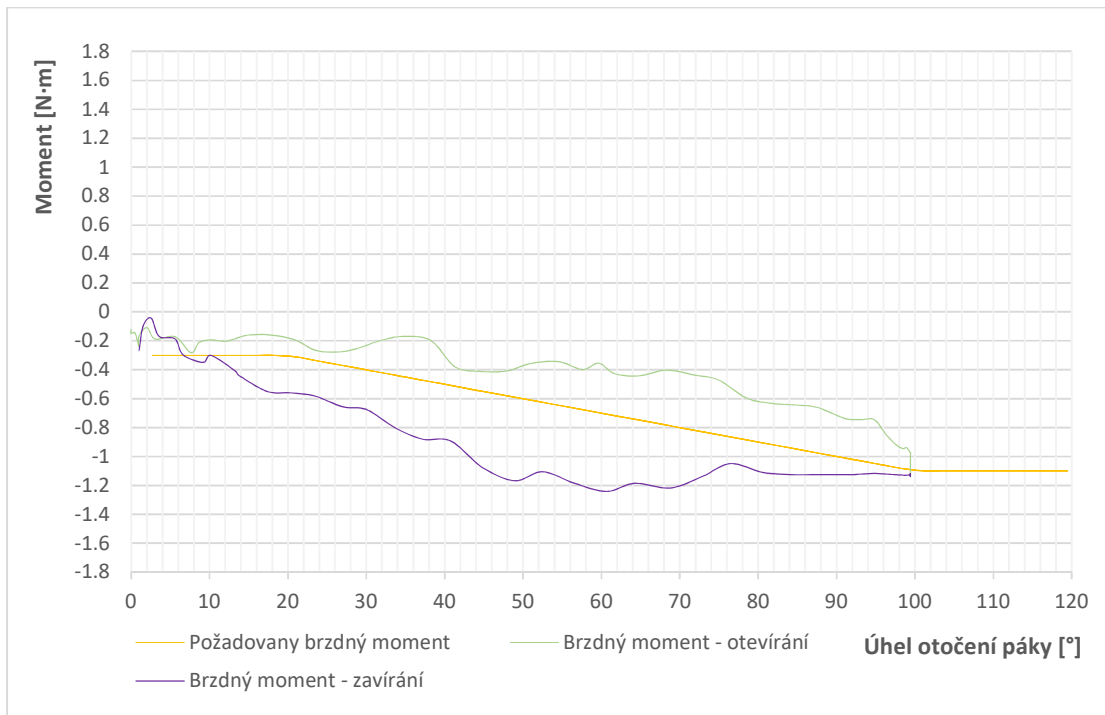
Obr. 55 Servomotor (GPA 3.1, Mode 3 – 0,5 N·m, Switch polarity)

V případě, že je servomotor nastaven na generování brzdného momentu o velikosti 0,5 N·m a se způsobem generování brzdění v obou směrech, tj. "Switch polarity" (Obr. 55), naměřený brzdný moment reaguje na změny směru otáčení páky GPA v časech 0,5 s, 1 s, 1,5 s, 2 s a 2,5 s. Zpoždění reakce změny směru naměřeného momentu o 0,1 s od požadovaného je způsobeno odchylkou požadovaného pohybového profilu od skutečného pohybu v oblastech změny směru otáčení. Oscilace brzdného momentu jsou v průměru $\pm 0,1$ N·m od požadované hodnoty. Při porovnání s testem, při kterém byl nastaven brzdný moment na hodnotu 0,2 N·m (na Obr. 52) se opět potvrzuje, že pro vybraný typ servomotoru je lepší vyšší hodnota brzdného momentu.



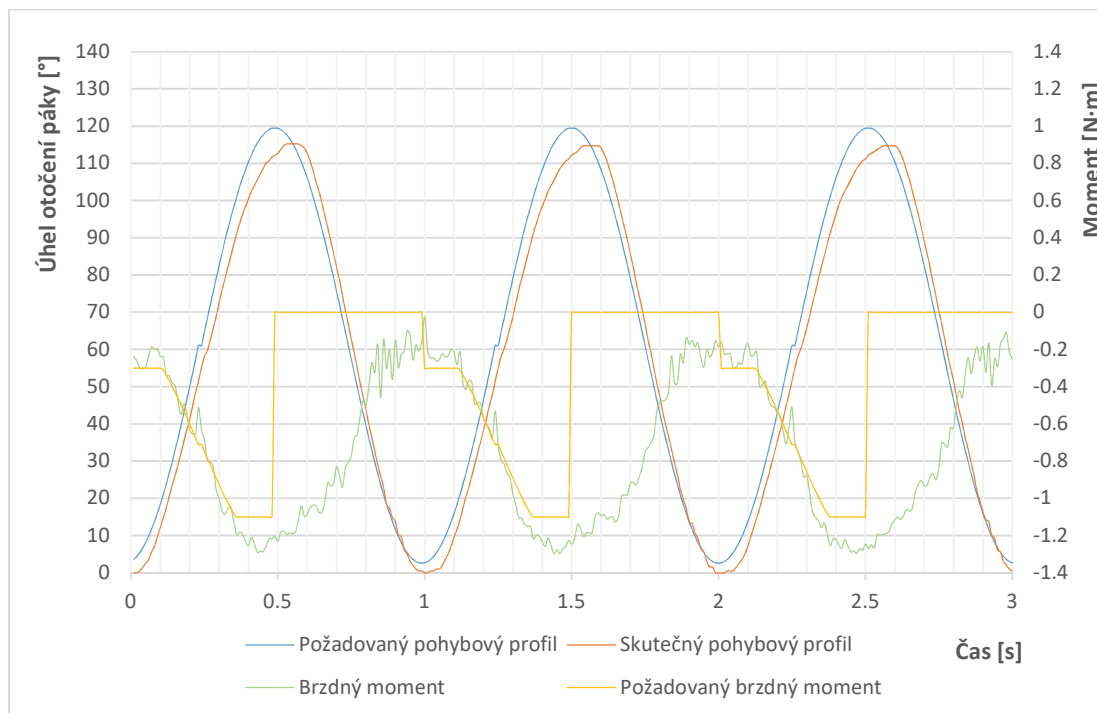
Obr. 56 Servomotor (GPA 3.1, Mode 2 linear, Normal)

Při nastavení servomotoru na mód „Mode 2 linear“ a způsobu brzdění „Normal“ (Obr. 56), naměřený pohybový profil nedosahuje v největší amplitudě (konkrétně v časech 0,5 s, 1,5 s a 2,5 s) požadovaných hodnot. V této oblasti je na GPA aplikován brzdný moment o velikosti 1,1 N·m. Tato hodnota je vyšší, než je nominální brzdný moment udávaný pro GPA 3.1 (tj. 0,9 N·m). Tento momentový profil byl navržen pro silnější typ GPA, než je GPA 3.1. Nicméně generovaný brzdný moment obstojně sleduje požadovaný, až na zpoždění o 0,1 s.



**Obr. 57 Závislost generovaného brzdícího momentu na úhlu otočení páky GPA
(GPA 3.1, Mode 2 linear, Normal)**

Pro pochopení a zkoumání generovaného brzdícího momentu je názornější vynést brzdící moment v závislosti na úhlu otočení (Obr. 57). V grafu je vynesena první cyklus (0–1 s) z celkem třech zobrazených na Obr. 56 a je v něm konkrétně vynesena naměřený brzdící moment v závislosti na skutečném úhlu otočení páky. V tomto grafu je dobře vidět průběh brzdícího momentu při rostoucím úhlu (tedy „otevírání“) a při klesajícím úhlu („zavírání“). Při rostoucím úhlu generovaný moment nemá tak rychlý nárůst, jak je požadováno, naopak při klesajícím úhlu je brzdící moment větší, než požadovaný (tj. neklesá tak rychle). Servomotor tedy pomáhá GPA více, než je od něj očekáváno.

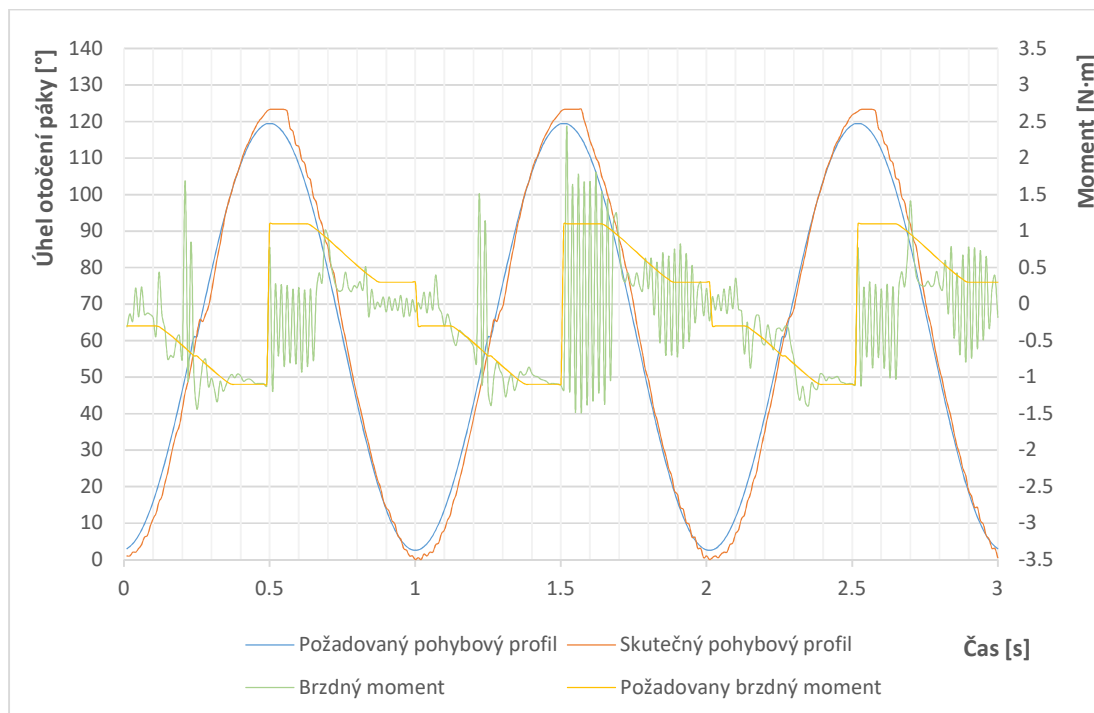


Obr. 58 Servomotor (GPA 3.1, Mode 2 linear, One direction)

Při nastavení servomotoru na mód „Mode 2 linear“ a způsobu brzdění typem „One direction“ (Obr. 58), brzdný moment (zelená křivka, Obr. 59) velmi obstojně kopíruje požadovaný brzdný moment (žlutá křivka, Obr. 59) při růstu úhlu otáčení páky. Při klesajícím úhlu otočení páky by měl mít brzdný moment nulovou hodnotu (Obr. 59), nicméně brzdný moment lineárně klesá (fialová křivka, Obr. 59). Ačkoliv byl v programu nastaven způsob brzdění na typ „One direction“, naměřené výsledky ukazují, že se jedná a velice dobrý a přesný způsob brzdění typu „Normal“.



Obr. 59 Závislost generovaného brzdňého momentu na úhlu otočení páky GPA
(GPA 3.1, Mode 2 linear, One direction)



Obr. 60 Servomotor (GPA 3.1, Mode 2 linear, Switch polarity)

Pokud je servomotor nastaven jako v předchozím případě s použitím stejného momentového profilu a způsob brzdění je změněn na „Switch polarity“ (Obr. 60), dochází při generování brzdného momentu k velkým oscilacím. Dochází zde patrně k problému s rozhodovací logikou servomotoru, která má problém rozhodnout, jakým směrem se GPA pohybuje, a snaží se na jakoukoliv malou změnu úhlu zareagovat otočením polarity generovaného brzdného momentu.



**Obr. 61 Závislost generovaného brzdňého momentu na úhlu otočení páky GPA
(GPA 3.1, Mode 2 linear, Switch polarity)**

Pokud je opět vynesena závislost generovaného brzdňého momentu na skutečném úhlu otočení páky GPA, je z ní patrné, že při „otevírání“ (zelená křivka, Obr. 61) se generovaný brzdňý moment snaží sledovat požadovaný brzdňý moment a až na výrazné oscilace se mu to daří. Při „zavírání“ (fialová křivka, Obr. 61) je zprvu momentový profil z důvodu nerozhodnosti logiky servomotoru velmi rozkmitaný (mezi úhly 100° a 120°) a nedosahuje požadované hodnoty. Při klesajícím úhlu je dále znatelný pokles brzdňého momentu v závislosti na úhlu otočení. Z grafu je patrné, že toto nastavení je vzhledem k velkým oscilacím zcela nevhodné pro praktické využití. Čím více je GPA zahřáté (a má tedy menší výkon), tím dochází k větším oscilacím.

4 Diskuze

Cílem této diplomové práce bylo najít tři možné způsoby generování brzdného momentu a vyřešit tak praktický úkol zadáný firmou Robert Bosch, s.r.o., České Budějovice. Tento úkol konkrétně spočíval v návržení, vlastní konstrukci a otestování nového zkušebního prototypu pro jejich potřeby. Při průzkumu trhu se ukázalo, že jsou na trhu reálně dostupné pouze tři možnosti generování brzdného momentu. Z těchto tří prakticky možných a v této práci popsaných návrhů byl vybrán finální způsob na základě zvážení několika parametrů: pořizovací ceny, očekávané přesnosti výsledků, momentu setrvačnosti a univerzálnosti použití. Jako nejvhodnější byl vybrán a následně testován způsob generování brzdného momentu pomocí servomotoru (Obr. 32). Servomotor se totiž ukázal jako cenově dostupný, na základě parametrů uvedených výrobcem od něj bylo možno očekávat nejpřesnější generování brzdného momentu s nejmenším momentem setrvačnosti (v porovnání s dalšími dvěma možnostmi) a nespornou výhodou je též možnost jeho využití i v jiných testech.

Prototyp byl navržen tak, aby bylo možno změřit generování brzdného momentu pomocí servomotoru (Obr. 32), ale i elektromagnetické brzdy, která představuje současný způsob generování brzdného momentu při dlouhodobé zkoušce. Zároveň byl prototyp navržen tak, aby byl co možná nejvíce kompatibilní s požadavky pro možná budoucí použití.

Na zkonstruovaném prototypu byla provedena měření s elektromagnetickou brzdou a servomotorem, přičemž na servomotoru byly vyzkoušeny a naměřeny všechny jeho dosavadní možnosti nastavení. Celkem bylo provedeno a zde je uvedeno 21 různých měření.

Přesné chování elektromagnetické brzdy při dlouhodobé zátěžové zkoušce, tedy současný stav provádění dlouhodobé zkoušky, byl poprvé proměřen a testován až v této studii. Výsledky tohoto měření ukázaly, jakým způsobem ve skutečnosti elektromagnetická brzda generuje brzdný moment (Obr. 38). Bylo zjištěno, že elektromagnetická brzda obstojně kopíruje požadované hodnoty brzdného momentu, nicméně problém nastává při sinusových změnách polohy o frekvenci 2,5 Hz a amplitudě 6 % (tj. 7,8°). Při těchto

pohybových změnách je brzdňý moment generován pouze na jednu stranu, tedy asymetricky. Aby byl brzdňý moment správně generován, musí dojít k otočení elektromagnetické brzdy o úhel větší než 15°. Tento závažný problém byl u elektromagnetické brzdy tušen, avšak dosud přesně neznám, a byl jedním z původních důvodů k hledání nového praktického řešení.

Z měření a porovnávání naměřených hodnot brzdňého momentu generovaného pomocí servomotoru (Obr. 47) a elektromagnetické brzdy (Obr. 38) se ukázalo, že brzdňý moment je lépe vygenerován, ač ne zcela dokonale, pomocí servomotoru. Ten, na rozdíl od elektromagnetické brzdy, je schopen generovat brzdňý moment oběma směry otáčení, a to i při malých amplitudách o velikosti 6 %.

Pro uchycení páky GPA 1.0 byla použita (jako jediná možná) silonová spojka, která se v průběhu testování ukázala jako nevhodná. Tato spojka nezajišťovala potřebné bezvúlové spojení mezi GPA a servomotorem. Protože nebyla k dispozici žádná spojka, která by umožňovala lepší spojení, bylo od testování s GPA 1.0 upuštěno a zbylé testování bylo provedeno s GPA 3.1, které umožňuje lepší spojení se servomotorem pomocí duralové spojky a je navíc výkonnější než GPA 1.0.

Generování brzdňého momentu pomocí servomotoru přineslo nové možnosti nastavení, které u elektromagnetické brzdy bylo komplikované nebo nebylo vůbec možné. Mezi největší výhody patří možnost nastavení působení směru brzdňého momentu. Servomotor umožňuje tři způsoby působení brzdňého momentu. Mód „Normal“ brzdí servomotor při nárůstu úhlu otočení páky GPA, a při poklesu úhlu pomáhá stejným brzdňým momentem. Mód „One direction“ při nárůstu úhlu otočení servomotor brzdí, ale při poklesu úhlu je brzdňý moment nulový. Posledním módem je typ „Switch polarity“, při kterém servomotor brzdí otáčení oběma směry stejně (tedy symetricky).

Další z výhod servomotoru je možnost volby momentového profilu. Ten může být závislý například na úhlu otočení páky GPA (Obr. 9), nebo může být jeho absolutní hodnota neměnná. Velikost momentového profilu je možné snadno zadat ve vytvořeném ovládacím programu. Tato možnost nastavení je podobná jako při užití elektromagnetické brzdy, kdy velikost napájecího napětí odpovídá velikosti generovaného brzdňého momentu.

Na servomotoru byly testovány dvě množnosti generování brzdňého momentu,

rychlostní a momentové. Generování brzdného momentu pomocí rychlostního řízení (Obr. 39) se ukázalo podobné jako při použití elektromagnetické brzdy (Obr. 38), což však nevyhovovalo našim požadavkům. Z tohoto důvodu bylo použito na vytvoření ovládacího programu pro servomotor momentové řízení (Obr. 47). Tento program byl vytvořen Ing. Pavlem Dederlem, který přiznal, že je taková aplikace servomotoru neobvyklá (setkal se s ní prvně) a velmi zajímavá.

Nevýhodou servomotoru, zjištěnou při testování a měření během této studie, jsou oscilace. Nejvíce k těmto oscilacím dochází při generování brzdného momentu oběma směry v módu „Switch polarity“, konkrétně při použití lineárního momentového profilu (Obr. 60). Tyto oscilace jsou způsobeny rozhodovací logikou servomotoru, která potřebuje na rozhodnutí směru působení alespoň 50 ms. Pokud během této doby dojde ke změně směru otáčení páky GPA oproti předchozímu stavu, servomotor změní směr působení brzdného momentu. Během oscilací se tyto změny cyklicky opakují. Při změně směru dojde ke změně směru působení brzdného momentu (proti směru otáčení páky GPA) z důvodu vůle ve spojení GPA a servomotoru, zubové vůle převodovky GPA a nedostatečného výkonu GPA dojde k pootočení ve směru působení brzdného momentu, a tedy i k další změně směru působení tohoto momentu. Nutno připomenout, že testovaný momentový profil, při kterém k těmto oscilacím nejvíce docházelo, není pro typ GPA 3.1 vhodný. Tento profil byl vyvinut pro silnější GPA s větším jmenovitým momentem, nicméně k testování byl dostupný pouze typ GPA 3.1.

Problém s oscilacemi byl s Ing. Dederlem důkladně konzultován. Možné řešení problému do budoucna je přivedení signálu požadovaného pohybového profilu přímo do řídicího systému servomotoru. Servomotor by tak měl jasně definovaný směr působení brzdného momentu, tudíž by nemělo docházet k samovolnému přepínání směru působení a k oscilacím. Tato možnost je vedena v patrnosti a bude v budoucnu prakticky řešena a testována.

Z porovnání naměřených dat s rozdílným nastavením velikosti brzdného momentu 0,2 N·m a 0,5 N·m, ať při použití složeného pohybového profilu nebo 1 Hz sinusové křivky, je patrné, že servomotor lépe generuje vyšší z těchto brzdných momentů (tj. 0,5 N·m).

K dalšímu zlepšení generování brzdného momentu by mohlo pomoci použití servomotoru se jmenovitým momentem, který se více blíží požadovanému brzdnému momentu. Servomotor by poté pracoval v horní polovině svého rozsahu, což se z výsledků měření ukázalo jako lepší. V případě zmenšení jmenovitého momentu servomotoru by došlo i ke snížení momentu setrvačnosti, což by vedlo k dalšímu zlepšení, zejména při změnách směru otáčení. Vhodnější servomotor pro generování skokového momentu (zobrazeného na Obr. 8) by například byl typ MSK030B-0900 od firmy Bosch Rexroth[®] s jmenovitým momentem 0,4 N·m a momentem setrvačnosti 0.000013 kg·m² [19].

Celkově, řešení zadaného úkolu se jeví jako úspěšné. Zkušební prototyp byl zkonstruován a otestován, přičemž použitý servomotor aktuálně umožňuje veškerá nastavení, která od něj byla požadována. K úplnému zavedení tohoto zkušebního zařízení do provozu bude nicméně zapotřebí několika dalších dílčích testů.

5 Závěr

Výsledky této práce ukázaly, že dle předpokladů v současnosti užívané testovací zařízení pro dlouhodobé zátěžové zkoušky s použitím elektromagnetické brzdy není dostatečně účinné při malých amplitudách do 6 %. Z tohoto a dalších důvodů bylo zkoumáno nové řešení pro vyvinutí testovacího zařízení, které by odstranilo tento závažný problém a splňovalo i jiné nové požadavky. Na základě srovnání tří možných návrhů na generování brzdného momentu byl vybrán způsob a zprovozněn prototyp s použitím servomotoru pro generování umělé zátěže. Tato práce předkládá podrobný popis, zdůvodnění výběru a celkovou konstrukci prototypu, který byl následně využit pro proměření požadovaných hodnot. Měření na nově zkonstruovaném prototypu ukázalo, že použití servomotoru generuje lepší výsledky, než při užití elektromagnetické brzdy, a navíc umožňuje nové a užitečné možnosti nastavení, např. momentového profilu či směru působení brzdného momentu.

6 Literatura

- [0] Interní dokumenty firmy Robert Bosch, s.r.o., České Budějovice
- [1] Actuator - Wikipedia [online] [cit. 11.4.2016]
<<https://en.wikipedia.org/wiki/Actuator#Electric>>
- [2] ZF Maschinenantriebe GmbH Hysteresis brakes, Hysteresis clutches Electronic control unit - katalog (2016). 28 pp.
- [3] Janocha, H. (2004). Actuators: Basics and Applications, Springer, 346 pp.
- [4] Halliday, D., Resnick, R., Walker J. (2000). Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno, VUTIUM. 1198 pp.
- [5] Sharma, C.S., Kamlesh, P. (2006). Theory of mechanisms and machines, PHI, 720 pp.
- [6] Orthwein, W.C. (2004). Clutches and Brakes Design and Selection Second Edition, Marcel Dekker, Inc., 330 pp.
- [7] Princip motoru. [online] [cit. 4.12.2016] <<http://knihomilka.webnode.cz/news/pusobeni-magnetickeho-pole-na-civku-s-proudem/>>
- [8] Roubíček, O. (2004). Elektrické pohony a motory, BEN – technická literatura, 192 pp.
- [9] Převodovka – Wikipedia, [online] [cit. 15.4.2016]
<https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99evodovka_%28rozcestn%C3%ADk%29>
- [10] Magtrol - Hysteresis brakes [online] [cit. 23.9.2016]
< http://www.magtrol.com/brakesandclutches/hysteresis_brakes.html>
- [11] Novák, P. (2011). Návrh zařízení pro vyvolání opakovatelného průběhu krouticího momentu při zkouškách řízení vozidla. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 98 pp.
- [12] Havel, T. (2010). Elektromagnetická vozidlová brzda. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, 79 pp.
- [13] Lacko, P. (2013). Návrh mechanické konstrukcekušebního stolu pro elektrickou brzdu. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 43 pp.
- [14] Skalický, J. (2001). Elektrické servopohony. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 82 pp.

- [15] Magtrol - Principles of hysteresis [*online*] [cit. 23.9.2017]
<<http://www.magtrol.com/brakesandclutches/principles.html>>
- [16] Kistler – Data-sheet Mini-smart torque senzor [*online*] [cit. 10.1.2017]
<<https://www.kistler.com/?type=669&fid=59073&model=document&callee=frontend>>
- [17] Kistler – Data-sheet Dual range torque senzor [*online*] [cit. 10.1.2017]
<<https://www.kistler.com/?type=669&fid=56471&model=document&callee=frontend>>
- [18] Kistler – Instrukční manuál k výrobku Mini-smart torque senzor. (2016). 23 pp.
- [19] Bosch Rexroth[®] - Synchronous servo motors [*online*] [cit. 25.11.2016]
<<http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/VorNavi.cfm?PageID=p146802&LLang=en>>
- [20] Bosch Rexroth[®] - Servo drives [*online*] [cit. 25.11.2016]
<<http://www.boschrexroth.com/dcc/Vornavigation/VorNavi.cfm?Language=EN&PageID=p146994>>
- [21] Schovánek, P., Havránek, V. Chyby a nejistoty měření [*online*] [cit. 10.4.2017]
<<https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>>
- [22] Přesnost a chyby měření (Fyzikální praktikum I). Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta [*online*] [cit. 10.2.2017]
<http://home.pf.jcu.cz/~kriz/index.php?option=com_content&view=article&id=226:chybymer&catid=55:fpr1&Itemid=27>
- [23] Třída přesnosti. (2008). [*online*] [cit. 10.2.2017] <<http://elektrika.cz/data/clanky/trida-presnosti>>
- [24] Frekvenční měnič. [*online*] [cit. 8.10.2017] <<http://www.pohonnatechnika.cz/frekvencni-menice/princip-frekvencniho-menice>>
- [25] Clarence, W. (2016). Sensors and actuator: Engineering systém instrumentation, Second edition, Taylor & Francis Group, 800 pp
- [26] INA ložiska. [*online*] [cit. 15.8.2017]
<<https://www.schaeffler.cz/content.schaeffler.cz/cs/index.jsp>>
- [27] Hřídelové spojky R+W. [*online*] [cit. 15.8.2017] <<https://www.rw-couplings.com/>>