

**České vysoké učení technické v Praze,
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague,
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph. D.

Simulace provozních podmínek mechanismů v experimentálním výzkumu

Operating Load of Mechanisms Simulated in Experimental Research

Summary

The paper deals with operating load simulation applicable for experimental analyses of rotary drives. Dividing according power transmission is done in two types: closed and opened systems. Mechanically and electrically closed systems and opened system with asynchronous motors or hydraulic motors are mentioned.

Three applications of asynchronous electric motors controlled with frequency converters used for simulation of operating load are described. The driving and loading unit of the measured reducer are arranged as couple of asynchronous electric motors controlled with frequency converters. First motor works as a drive, second as a brake.

First application is the simplest one, because only one frequency converter is used. The braking motor operates upon synchronous speed. It is not so correct method which includes a lot of problems.

Second method is solution with couple of asynchronous electric motors controlled with a couple of frequency converters. Its design is based on controlling of both motors. Braking power is lost using braking unit and braking resistance.

Third method is based on interconnection of frequency converter 's direct circuit. The electrically closed measuring station is realized. The electrical power recovery is possible when the braking power is transferred to driving power.

Next part of paper deals with energy balance if the electrically closed station is used for operating load of gearbox. Power lost of the system can be felt into those parts: mechanical power lost of gearbox and motors, electrical power lost of motors, power lost of frequency converters and power supply of ventilators used for cooling of frequency converters.

The last part is focused on realization of constant and various loads with described system. Controlling of loading motor is realized via software. An example of realization is shown.

Advantages and disadvantages of designed loading system are summarized on the bottom of the paper.

Souhrn

Práce se zabývá simulací provozního zatížení při experimentální činnosti s důrazem na rotační mechanismy. Je uvedeno rozdělení na okruhy uzavřené a otevřené. Jsou zmiňovány okruhy uzavřené mechanicky a elektricky a okruhy otevřené ve variantě s asynchronními elektromotory a variantě s hydraulickými motory.

V druhé části jsou podrobněji popsány tři metody simulace zatížení rotačních mechanismů pomocí dvojice asynchronních elektromotorů, z nichž jeden pracuje v režimu pohonu a druhý v režimu brzdy. Řízení je v těchto případech provedeno frekvenčními měniči. První metoda s přímým připojením elektromotoru k rozvodné síti vyžaduje pouze jediný frekvenční měnič, ale je to metoda s celou řadou problémů a nepřesností. V druhé metodě je realizován otevřený okruh s dvěma motory a dvěma měniči, který tyto problémy odstraňuje, ale brzdový výkon je absorbován pomocí brzděné jednotky a v brzděném odporu je zmařen.

Ve třetí metodě je propojením stejnosměrných obvodů použitých frekvenčních měničů realizován elektricky uzavřený okruh. Ten má všechny výhody předchozího řešení a navíc rekuperuje brzdový výkon, který je použit pro pohon soustavy.

V třetí části je provedena energetická bilance elektricky uzavřeného okruhu při zatěžování konkrétního převodového mechanismu. Na ztrátách okruhu se podílí ztráty mechanických prvků okruhu, elektrické ztráty elektromotorů, ztráty frekvenčních měničů a příkon ventilátorů frekvenčních měničů.

V poslední části je vysvětlena simulace konstantní a proměnlivé zátěže v elektricky uzavřeném okruhu s dvojicí asynchronních elektromotorů. Jeden z motorů pracuje v otáčkové vazbě a v režimu pohonu, druhý pracuje v momentové vazbě a v režimu brzdy. Zatímco vazby jsou pro oba motory neměnné, režimy lze vzájemně zaměňovat. Řízení zátěže je provedeno pomocí napěťového signálu a číselně zadaného údaje o vstupní frekvenci.

V závěru jsou uvedeny výhody i nevýhody popsaného elektricky uzavřeného okruhu.

Klíčová slova:

Experimentální simulace, provozní zatížení, asynchronní elektromotory, převodovky, řízení, krouticí moment, frekvence otáčení, převodový poměr, ztráty, účinnost

Keywords:

Experimental simulation, operating load, asynchronous electric motors, gearbox, measurement, control, torque moment, speed, ratio, lost power, efficiency

České vysoké učení technické v Praze

Název: Simulace provozních podmínek mechanismů v experimentálním výzkumu

Autor: Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph. D.

Počet stran: 20

Náklad: 150 výtisků

© Vojtěch Dinybyl

ISBN

Obsah

Summary.....	2
Souhrn.....	3
Klíčová slova:	4
Obsah.....	5
1. Varianty simulací reálného provozu při experimentech	6
2. Simulace provozního zatížení pomocí asynchronních elektromotorů	7
2.1 Brzdňý elektromotor s přímým připojením	7
2.2 Čtyřkvadrantová zatěžovací soustava.....	8
2.3 Elektricky uzavřený okruh s dvěma asynchronními elektromotory	9
3. Analýza ztrát elektricky uzavřeného okruhu.....	10
3.1 Blokové schéma měřicího okruhu a definice měřených veličin	10
3.2 Výsledky měření	12
3.3 Interpretace výsledků	13
4. Řízení zatížení v elektricky uzavřeném okruhu	15
4.1 Simulace konstantního zatížení	15
4.2 Simulace provozního cyklu řízením asynchronních elektromotorů	15
4.2.1 Popis měřicího stanoviště	16
4.2.2 Metodika měření.....	16
4.2.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení	17
5. Možnosti elektricky uzavřeného okruhu v experimentálním výzkumu	19
Literatura:	19
Ing. Vojtěch Dynybyl, Ph.D.	20

1. Varianty simulací reálného provozu při experimentech

Vhodný způsob simulace provozního zatížení je základním kamenem úspěšného experimentálního hodnocení mechanismů. Způsob řešení tohoto problému závisí na cílech experimentu, délce experimentu a nutnosti zajištění přesnějšího zatěžovacího stavu s ohledem na silové i kinematické účinky na zkoušený objekt. V této práci se zabývám simulací provozního zatížení rotačních mechanismů.

Pro simulaci provozního zatížení jsou běžně používány v zásadě dva druhy zkušebních okruhů.

1. uzavřené zkušební okruhy,
2. otevřené zkušební okruhy.

Zásadní rozdíl je ve způsobu práce s energií dodávanou do experimentu. V uzavřených okruzích je dodávána do experimentu pouze energie nutná na krytí ztrát soustavy. V rámci řešení projektu MSM 21200008 jsem projektoval a postupně realizuji dva typy zkušebních okruhů uzavřených:

1. mechanicky,
2. elektricky.

Nízká energetická náročnost uzavřených mechanických okruhů předurčuje tato zařízení pro realizaci dlouhodobých zkoušek, které obvykle slouží ke stanovení životnosti měřeného objektu. Dále jsou vhodná pro simulaci konstantního zatížení, i když v těchto okruzích proměnlivé zatížení realizovat lze.

U otevřených okruhů je nutno do soustavy přivádět stejný výkon jako v reálném provozu. Navíc na výstupu ze soustavy musí být tento výkon snížen pouze o ztráty v systému obvykle zmařen, nejčastěji v podobě tepla.

Při simulaci provozního zatížení v otevřených zkušebních okruzích je



Obr. 1.1 Základní schéma otevřeného zkušebního okruhu

charakteristické sestavení podle obr. 1.1. Navrhl jsem řešení otevřených zkušebních okruhů ve dvou variantách. První varianta je založena na využití asynchronních elektromotorů, které jsou řízeny frekvenčními měniči. Druhá

varianta je postavena na hydraulických okruzích, které jsou navrženy pro hnací i brzdny režim. Hydraulické okruhy byly zvoleny zvláště pro zatěžování mechanismů s přímočarým výstupem. Oba dva typy jsem projektoval i pro možnost použití v uzavřených okruzích.

Volba typu zkušebního okruhu je velmi složitou záležitostí a závisí na nejrůznějších faktorech. Mezi ně patří i zvyklosti řešitele, spektrum výkonů přenášených zkoušeným objektem apod.

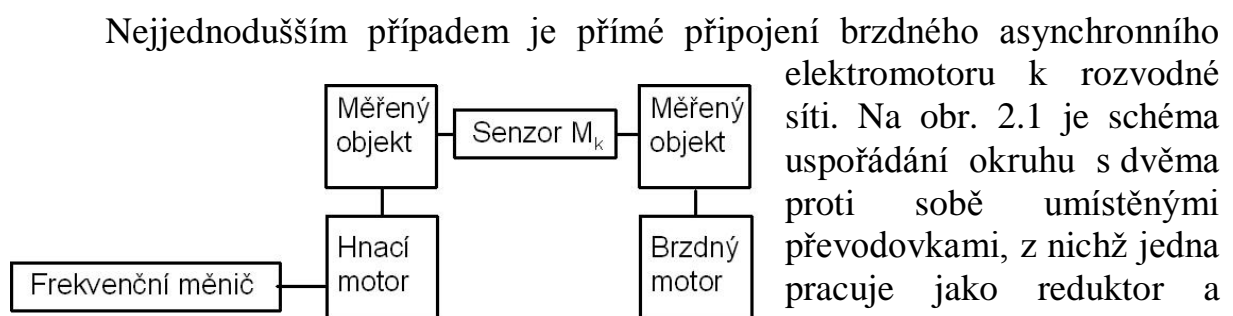
V této práci popisuji metodu, kterou jsem vyvinul pro simulaci provozního zatížení rotačních mechanismů pomocí dvojice asynchronních elektromotorů, které jsou řízeny frekvenčními měniči.

2. Simulace provozního zatížení pomocí asynchronních elektromotorů

V dalších odstavcích popisuji tři metody využití asynchronních elektromotorů řízených frekvenčními měniči pro simulaci provozního zatížení. Jedná se o vývojové typy, kdy následující vychází z předchozího a je jeho zdokonalením.

Všechny tři metody pracují tak, že jeden motor je v režimu pohonu a druhý v režimu brzdy.

2.1 Brzdný elektromotor s přímým připojením



Obr. 2.1 Schéma okruhu s jedním řízeným elektromotorem

Brzdného motoru ze strany pohonu zvyšována nad synchronní otáčky brzdícího motoru, který začíná pracovat v brzdném režimu. Tohoto lze dosáhnout zvyšováním frekvence otáčení hnacího asynchronního elektromotoru pomocí frekvenčního měniče. Lze k tomu použít i nejjednodušší druhy frekvenčních měničů.

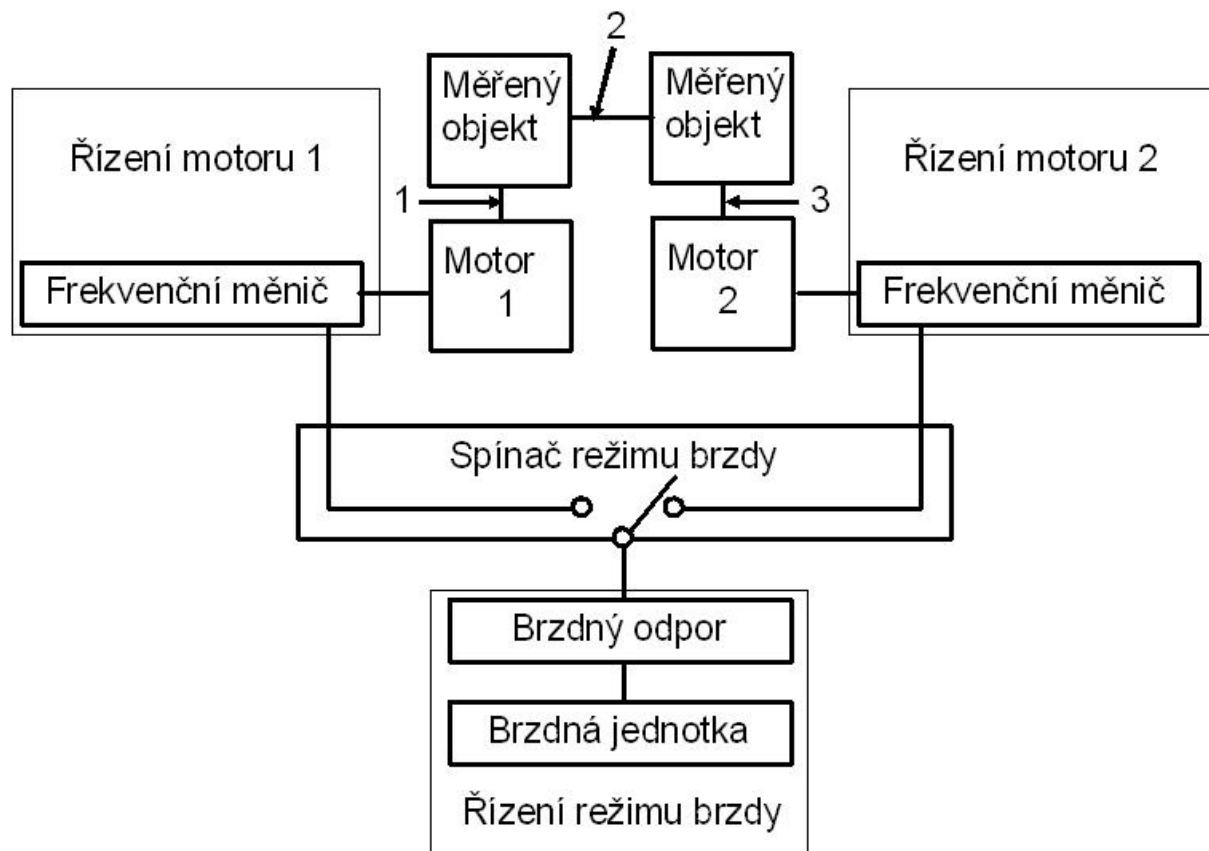
Propojení měřícího okruhu podle obr. 2.1 je vhodné pro realizaci dlouhodobých zkoušek životnosti převodových mechanismů, kdy nezáleží na přesnosti frekvence otáčení (frekvence otáčení je při experimentu obvykle vyšší než její jmenovitá hodnota) a požadovaná zátěž je konstantní. Současně jsou hodnoceny dvě stejné převodovky propojené na pomaloběžných hřídelích pomocí snímače krouticího momentu. Při experimentu se sleduje pouze úroveň zatěžovacího momentu na výstupních hřídelích převodovek. Každé úrovni zatěžovacího momentu odpovídá určitá frekvence nastavená na frekvenčním měniči a ten řídí hnací elektromotor.

V současné době je běžným produktem elektropřevodovka složená z asynchronního elektromotoru a převodovky. Prostým propojením výstupních hřídelí dvojice stejných produktů a osazením na vhodný rám lze rychle realizovat měřící stanoviště. Tato soustava je pouze dvoukvadrantová, což znamená, že pracuje ve dvou směrech otáčení a v jednom směru toku výkonu.

Její hlavní nevýhodou je, že musí být k dispozici akcelerátor frekvence otáčení, která je předtím redukována měřenou převodovkou.

2.2 Čtyřkvadrantová zatěžovací soustava

Při návrhu systému pro simulaci provozního zatížení pomocí asynchronních elektromotorů jsem uvažoval variantu, která umožňuje zatížení měřeného objektu (nejčastěji převodovky) ze strany rychloběžného i pomaloběžného hřídele a navíc v obou směrech otáčení. To ve skutečnosti znamená modifikaci, nebo lépe dovybavení soustavy na obr. 2.1. Schéma kompletní čtyřkvadrantové soustavy je na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Schéma čtyřkvadrantového systému s přepínáním režimů

Základem systému jsou dva asynchronní elektromotory (nejlépe stejného typu). Aby byly otáčky obou motorů stejné, je nejvýhodnější variantou propojení okruhu s dvěma shodnými měřenými objekty. Není-li k dispozici dvojice měřených objektů, je vhodné vložit do druhé větve objekt podobných parametrů. Tím je dosaženo podobných frekvencí otáčení na hřídelích motorů.

V soustavě podle obr. 2.2 jsou vyznačeny hřídele 1, 2 a 3, které propojují jednotlivé prvky měřicího řetězce. Je nutné, aby alespoň jeden z nich byl nahrazen snímačem krouticího momentu pro kontrolu reálného zatížení. Je-li předmětem měření určování přenosu výkonu měřeným objektem, musí být tyto snímače umístěny na vstupu i výstupu měřeného objektu.

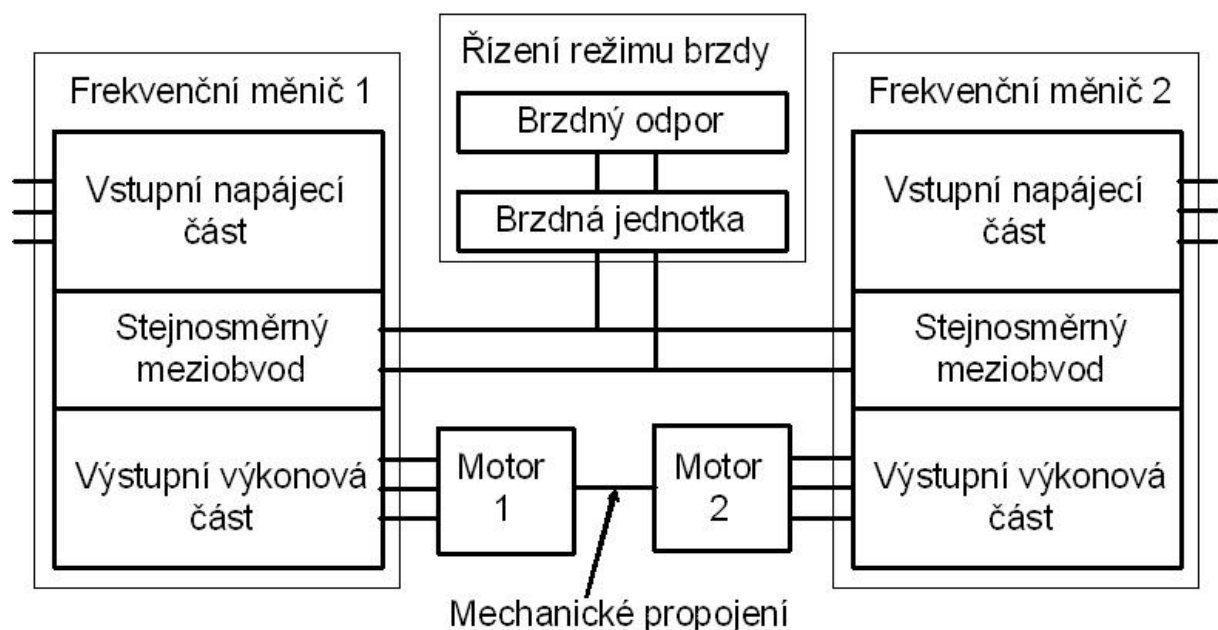
Každý motor je řízen vlastním frekvenčním měničem. Pro režim brzdy je k frekvenčnímu měniči připojována pomocí spínače režimu brzdy brzdná jednotka pro absorpci brzdného výkonu a brzdny odpor pro přeměnu brzdného výkonu v teplo. Tím je umožněno tzv. čtyřkvadrantové řízení simulace zátěže, což znamená, že oba motory mohou střídavě pracovat v režimu pohonu nebo brzdy a v obou směrech otáčení.

Nevýhodou tohoto řešení je ztráta celého příkonu v měřicím okruhu a brzdném odporu. Výhodou tohoto řešení je, že lze jeho hnací nebo brzdnu část použít v okruhu, kde proti hnacímu či brzdnému asynchronnímu elektromotoru stojí jiná brzdná jednotka či jiný druh motoru.

2.3 Elektricky uzavřený okruh s dvěma asynchronními elektromotory

Na obr. 2.3 je blokové schéma elektricky uzavřeného okruhu se dvěma asynchronními elektromotory, které jsou řízeny frekvenčními měniči.

Jeden z dvojice frekvenčních měničů pracuje v otáčkové vazbě. Protože jsou oba motory mechanicky propojeny, jsou otáčky na obou hřídelích stejné. Jsou-li mezi motory umístěny převodové mechanismy, jsou otáčky obou motorů shodné pouze v případě, že převodové poměry mechanismů redukujících i akcelerujících jsou shodné. Druhý frekvenční měnič pracuje ve vazbě momentové a jeho řízením je dosahován požadovaný krouticí moment v měřicím řetězci.



Obr. 2.3 Schéma elektricky uzavřeného měřicího okruhu

Toto řešení umožňuje vložit mezi motor 1 a motor 2 pouze jediný objekt, např. převodovku. Při tom je třeba uvážit, že moment na hřídeli motoru 2 je součinem momentu na hřídeli motoru 1, realizovaného převodového poměru a účinnosti zatěžovaného mechanismu. Proto je třeba na pozici motoru 2 projektovat motor o vyšším výkonu, aby byla zajištěna dostatečná momentová

kapacita. Výkon motoru ale využít nebude, protože frekvence otáčení je redukována realizovaným převodem. Toto řešení umožňuje vyloučit z měřicího řetězce akcelerační převodovku a tím zvýšit účinnost okruhu.

Elektrická uzavřenost okruhu spočívá v rekuperaci energie vytvořené asynchronním elektromotorem, který pracuje v brzděném režimu jako generátor. Elektrickým propojením stejnosměrných obvodů frekvenčních měničů je tato energie dodávána do frekvenčního měniče motoru, který pracuje v režimu pohonu. Tato energie je převedena do výstupní výkonové části tohoto měniče a slouží k napájení hnacího elektromotoru. Z rozvodné sítě je odebírána pouze energie nutná ke hrazení ztrát obvodu.

V blokovém schéma na obr. 2.3 je modul řízení režimu brzdy potřebný pro absorpci energetických špiček, které mohou vlivem elektrických či mechanických účinků v okruhu vzniknout.

3. Analýza ztrát elektricky uzavřeného okruhu

Probíhá-li simulace provozního zatížení měřeného objektu v elektricky uzavřeném okruhu je důležitou hodnotou energetická náročnost experimentu. Je-li brzděný motor schopen rekuperovat elektrickou energii a dodávat ji do okruhu tak, aby byla využita pro pohon měřicího okruhu, je možné porovnat velikost příkonu dodávaného do okruhu se skutečným výkonem, který je v okruhu realizován. Tento realizovaný výkon byl vztažen na hřídel hnacího elektromotoru proto, že je možné tento výkon měřit a není zatížen mechanickými ztrátami měřené převodovky.

Účinnost elektricky uzavřeného měřicího okruhu je možno vyjádřit vztahem:

$$\eta_c = \frac{P_{m1} - P_{3f}}{P_{m1}}, \quad (3.1)$$

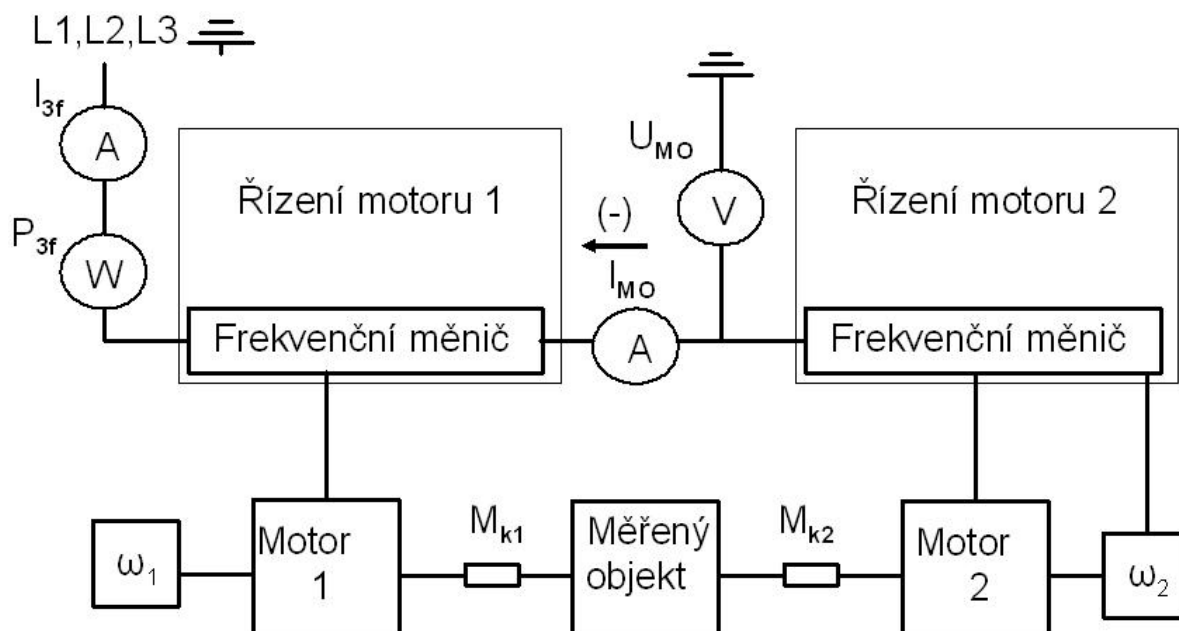
kde P_{m1} je výkon na hřídeli hnacího elektromotoru a P_{3f} je elektrický příkon z trojfázového rozvodu.

Elektrický příkon P_{3f} musí hradit energetické nároky všech členů okruhu, které nestačí hradit elektrická energie vzniklá rekuperací při brzdění. V tomto případě nelze tedy účinnost chápat ve smyslu veličiny, která vyjadřuje ztráty jednotlivých prvků. V dalším odstavci je proveden popis okruhu a rozbor ztrát a energetické náročnosti jeho jednotlivých prvků.

3.1 Blokové schéma měřicího okruhu a definice měřených veličin

K měření jsem použil stanoviště, které jsem navrhl pro experimentální analýzu jednostupňové kuželové převodovky. V této analýze byla experimentálně provedena měření účinnosti a chodu naprázdno zmíněné převodovky. Podrobný popis stanoviště a výsledky tohoto výzkumu jsou v [2].

Toto stanoviště bylo pro účely analýzy ztrát uzavřeného okruhu doplněno a jeho blokové schéma je na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Blokové schéma měření elektricky uzavřeného okruhu

Na obr. 3.1 je měřeným objektem zmíněná převodovka s těmito katalogovými hodnotami : převodový poměr $i_{12}=3$, výkon $2,5 \text{ kW}$ a vstupní frekvence otáčení 1200 min^{-1} . Tabulkový výkon motoru 1 je 4 kW a frekvence otáčení 1450 min^{-1} . Tabulkový výkon motoru 2 je $18,5 \text{ kW}$ a frekvence otáčení 1440 min^{-1} . Frekvenční měniče jsou VectorMasterDrives 22 kW firmy Siemens.

V mechanické části okruhu je hřídel motoru 1 propojen s vstupní hřídelí převodovky snímačem kroučícího momentu T20WN-20 Nm firmy HBM a hřídel motoru 2 je s výstupní hřídelí převodovky propojena snímačem kroučícího momentu TG 10-100Nm firmy Vibro-meter. Těmito snímači jsou měřeny kroučící momenty M_{k1} a M_{k2} . Ke snímání úhlové rychlosti motoru 1 ω_1 slouží inkrementální optoelektronický snímač IRC 305-1024 rysek firmy Larm. Veličiny ω_1 , M_{k1} a M_{k2} byly snímány kontinuálně v měřicím prostředí LabView.

Z obr. 3.1 jsou patrné i další měření veličiny. V třífázové napájecí větvi frekvenčního měniče byly v sérii zapojen wattmetr a ampérmetr pro sledování příkonu P_{3f} a proudu I_{3f} vstupujícího do celé soustavy. Ve stejnosměrném meziobvodu, kterým byly propojeny oba měniče, byl měřen meziobvodem protékající proud I_{MO} a velikost napětí U_{MO} . K měření byly použity školní přístroje a hodnoty veličin byly odečítány z indikátorů těchto přístrojů. Potom byly ručně zadávány v čelním panelu LabView do souboru měřených dat.

Záporné znaménko proudu meziobvodu I_{MO} znamená, že proud teče směrem z frekvenčního měniče 2 do frekvenčního měniče 1. To se děje v době kdy dochází k rekuperaci energie při brždění motoru 2.

Pro úplnost popisu je třeba dodat, že pro realizaci momentové vazby, ve které pracoval motor 2, byl ke snímání úhlové rychlosti motoru 2 ω_2 použit inkrementální optoelektronický snímač IRC 305-720 rysek firmy Larm.

3.2 Výsledky měření

Metodika měření byla navržena tak, že nejprve byl mechanický prvek řetězce (převodovka) zatížen na konstantní jmenovité zatížení na vstupu po dostatečně dlouhou dobu. Tím došlo ke zvýšení teploty na teplotu provozní a bylo dosaženo maximální účinnosti. Potom bylo zatížení postupně snižováno po 10% jmenovitého vstupního krouticího momentu.

Jmenovitý moment na vstupní hřídeli byl stanoven pro katalogové hodnoty převodovky takto:

$$M_{k1j} = \frac{P_{9550}}{n_1} = \frac{2,5 \cdot 9550}{1200} = 19,89 \text{ [Nm]} . \quad (3.2)$$

Za 100% zatížení byla použita hodnota 19,5 Nm.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny kompletní výsledky měření. Hodnoty všech veličin s výjimkou napětí stejnosměrného meziobvodu U_{MO} jsem stanovoval v čelním panelu zobrazení výsledků měření v prostředí LabView. Tento panel umožňuje libovolné zvětšování vybrané oblasti. Tak lze odečítat veličiny s vysokou přesností.

V posledním sloupci tabulky je uvedena teplota povrchu skříně T_p v místě ložisek vstupní hřídele. Tento údaj byl sledován v průběhu celého měření a sloužil k posouzení aktuálního stavu měřené převodovky během měření. To vycházelo z podrobné znalosti chování této převodovky při zatěžování (viz. [2]).

Během měření byla nastavena konstantní frekvence otáčení vstupní hřídele převodovky, také měřené napětí stejnosměrného meziobvodu bylo konstantní. Ostatní veličiny se měnily v závislosti na úrovni zatížení převodovky.

Teplota povrchu skříně byla pro kontrolu měřena během celého experimentu a pohybovala se na hodnotách odpovídajících provozní teplotě této převodovky.

$n[\text{min}^{-1}]$	$P_{3f} [\text{W}]$	$I_{3f} [\text{A}]$	$U_{MO}[\text{V}]$	$I_{MO}[\text{A}]$	$M_{k1}[\text{Nm}]$	$M_{k2}[\text{Nm}]$	$T_p [^{\circ}\text{C}]$
1200	1080	2,4	585	-3	19,5	52,5	68
1200	1035	2,3	585	-2,8	17,5	46,75	70
1200	945	2,1	585	-2,35	15,6	41,4	70,8
1200	915	2,05	585	-2	13,65	35,8	71,2
1200	885	2	585	-1,6	11,72	30,3	71,2
1200	810	1,8	585	-1,25	9,74	24,6	71,2
1200	810	1,8	585	-0,9	7,81	19	70,9
1200	795	1,75	585	-0,55	5,85	13,4	70,5
1200	780	1,75	585	-0,2	3,92	7,7	70,4

Tabulka 3.1

Celková doba měření byla 36 minut a zatížení bylo snižováno v intervalech přibližně 3 min dlouhých.

3.3 Interpretace výsledků

Dříve než budu interpretovat výsledky měření, je třeba provést rozbor ztrát a energetické náročnosti zařízení, která jsou v okruhu použita.

Tento rozbor provedeme postupně pro všechna zařízení v souladu s obr. 3.1. Účinnost elektromotoru 1 je dána jeho ztrátami mechanickými P_{zm1m} a elektrickými ztrátami P_{zm1el} . Stejně je dána účinnost elektromotoru 2 jeho ztrátami mechanickými P_{zm2m} a elektrickými ztrátami P_{zm2el} . Ztráty v převodovce jsou dány její účinností, kterou lze za předpokladu konstantního převodu i_{12} počítat ze vztahu:

$$\eta_{př} = \frac{M_{k2}}{M_{k1} \cdot i_{12}}, \quad (3.3)$$

kde M_{k1} a M_{k2} jsou měřené veličiny. Ztráty převodovky jsou dány vztahem:

$$P_{zpř} = (1 - \eta_{př}) P_{m1} \quad [W], \quad (3.4)$$

Ztráty ve spojkách, které propojují mechanickou část okruhu, jsou v těchto úvahách zanedbány.

Další zařízení, která vstupují do této bilance jsou frekvenční měniče. V jejich případě je vhodné velikost energie, kterou spotřebují pro svůj provoz nenazývat ztrátami, ale energetickou náročností. To proto, že část spotřebované energie jde na vrub tepla, které vzniká nutným napájením jejich elektroniky a část jde na vrub pohonu ventilátoru, který toto teplo proudem vzduchu odvádí do okolí.

Z hlediska účinnosti uzavřeného elektrického obvodu lze energetickou náročnost frekvenčních měničů posoudit jako ztráty a v dalším textu budou tyto ztráty označeny P_{zfm1} a P_{zfm2} .

Celkové ztráty uzavřeného elektrického obvodu jsou dány součtem dílčích ztrát:

$$P_{zc} = P_{zm1m} + P_{zm1el} + P_{zm2m} + P_{zm2el} + P_{zpř} + P_{zfm1} + P_{zfm2} \quad [W] \quad (3.5)$$

a platí, že:

$$P_{zc} = P_{3f} \quad [W]. \quad (3.6)$$

V tabulce 3.2 jsou uvedeny výkony P_{m1} , P_{m2} a P_{MO} vypočítané z měřených veličin a výkon P_{3f} , který byl měřen přímo. Výkon P_{m1} byl vypočítán ze vztahu:

$$P_{m1} = \frac{M_{k1} \cdot n_1}{9,55} \quad [Nm \cdot min^{-1} = W], \quad (3.7)$$

výkon P_{m2} ze vztahu:

$$P_{m2} = \frac{P_{m1} \cdot \eta_{př}}{100} \quad [W], \quad (3.8)$$

a elektrický výkon stejnosměrného obvodu P_{MO} ze vztahu:

$$P_{MO} = I_{MO} \cdot U_{MO} [W] . \quad (3.9)$$

Záporné hodnoty tohoto výkonu znamenají, že je to výkon vzniklý při rekuperaci.

% z M_{k1j}	$P_{MO}[W]$	$P_{3f} [W]$	$P_{m1}[W]$	$P_{m2}[W]$	$\eta_{př}[\%]$	$\eta_c[\%]$
100	-1755	1080	2450,3	2199,0	89,7	55,9
90	-1638	1035	2199,0	1958,1	89,0	52,9
80	-1374,75	945	1960,2	1734,0	88,5	51,8
70	-1170	915	1715,2	1499,5	87,4	46,7
60	-936	885	1472,7	1269,1	86,2	39,9
50	-731,25	810	1223,9	1030,4	84,2	33,8
40	-526,5	810	981,4	795,8	81,1	17,5
30	-321,75	795	735,1	561,3	76,4	-8,2
20	-117	780	492,6	322,5	65,5	-58,4

Tabulka 3.2

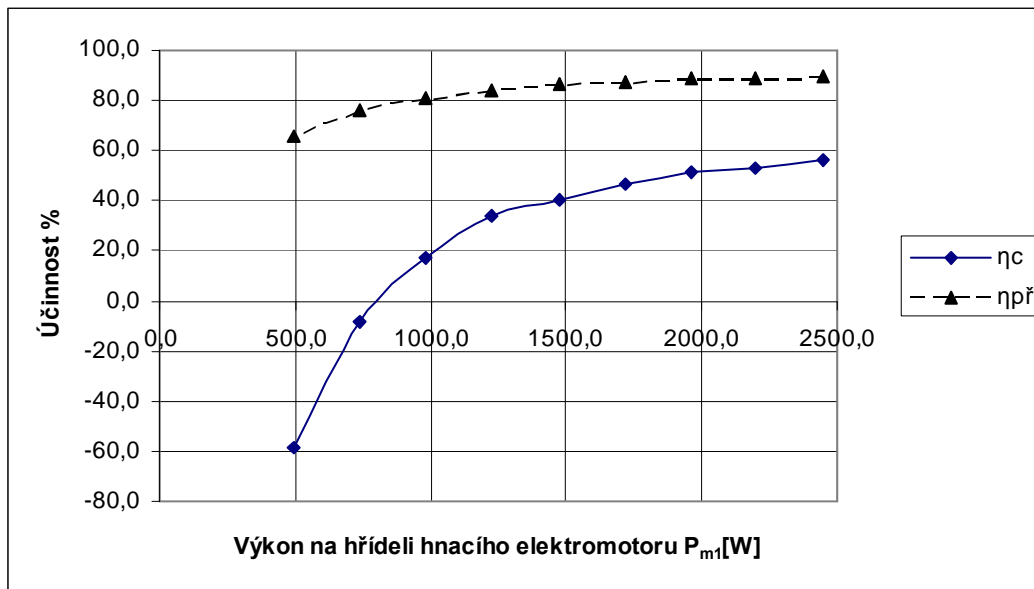
Dále je v tabulce uvedena účinnost převodovky $\eta_{př}$, která je počítána podle vztahu (3.3) a účinnost celého okruhu η_c , která je počítána podle vztahu (3.1). Výsledky obou výpočtů jsou násobeny číslem 100, aby bylo vyjádření provedeno v obvykle používaných procentech.

Na obrázku 3.2 je graf závislosti účinnosti celého okruhu η_c a účinnosti převodovky $\eta_{př}$ na výkonu P_{m1} . Tento graf dokumentuje obvyklý růst účinnosti při zvyšujícím se vnějším zatížením. Z tohoto grafu i z tabulky 3.2 je patrné, že účinnost celého okruhu je při nejvyšším realizovaném momentu na vstupní hřídeli převodovky, resp. na hřídeli motoru 1 přibližně 56%. Strmější růst účinnosti celého okruhu při nižších zatíženích je dán především vlivem podílu konstantních příkonů, které jsou potřebné pro provoz frekvenčních měničů.

K podrobnějšímu rozboru této skutečnosti použijeme vztahu (3.5) a naměřených resp. vypočítaných výkonů. Měřicí okruh rozdělíme na zónu 1, do které patří frekvenční měnič 1 a motor 1, a na zónu 2, do které patří frekvenční měnič 2 a motor 2.

Energetickou situaci budeme sledovat při nejvyšším výkonu realizovaném na hřídeli motoru 1. Z obr. 3.1 a z tabulky 3.2 je patrné, že do zóny 1 vstupuje výkon $P_{3f}=1080 W$ a $P_{MO}=1755 W$. Jejich součet je 2835 W. Z této zóny vystupuje výkon $P_{m1}=2450 W$, který je realizován na hřídeli motoru 1. Bilance této zóny je tedy $1080+1755-2450=385 W$. Do zóny 2 vstupuje výkon na hřídeli motoru 2 $P_{m1}=2199 W$, a vystupuje z ní $P_{MO}=1755 W$. Bilance této zóny je tedy $2199-1755=444 W$. Rozdíl bilancí obou zón je 59 W.

Další rozbor prvků zúčastněných v obou zónách není možno zodpovědně provést, protože dílčí výkony nebyly měřeny a experimentální zkušenost s chováním těchto prvků není zatím dostatečná. Rozdíl mezi zónami je možné vysvětlit odlišnými ztrátami motoru 1 a motoru 2.



Obr. 3.2 Graf závislosti účinnosti celého okruhu η_c na výkonu P_{m1}

4. Řízení zatížení v elektricky uzavřeném okruhu

V následující kapitole jsou uvedeny dvě varianty simulace provozního zatížení pomocí dvojice asynchronních elektromotorů, z nichž jeden pracuje jako pohon a druhý jako brzda. Každý z nich je řízen vlastním frekvenčním měničem. Brzdový motor pracuje v momentové vazbě a hnací motor ve vazbě otáčkové.

Velikost momentu na hřídeli motoru, který pracuje v momentové vazbě lze u použitých frekvenčních měničů řídit pomocí napěťového signálu. Druhým zadávaným parametrem je frekvence, která řídí frekvenci otáčení motoru, který pracuje v otáčkové vazbě.

4.1 Simulace konstantního zatížení

Pro nastavení konstantního momentu na hřídeli brzdového elektromotoru (předpokládá se, že pracuje v momentové vazbě) postačuje vhodným způsobem zadat napěťový signál na svorky frekvenčního měniče. Toto napětí je nutné stanovit na základě měření požadovaného krouticího momentu a závisí na frekvenci otáčení hřídele brzdícího elektromotoru. Frekvence otáčení hnacího motoru (předpokládá se, že pracuje v otáčkové vazbě) se zadává na ovládacím panelu příslušného měniče ručně. Je-li požadováno konstantní zatížení, obvykle je i frekvence otáčení konstantní. Proto je toto řešení velmi jednoduše aplikovatelné na jakýkoliv případ simulace konstantní zátěže.

Tento způsob byl úspěšně použit při experimentální analýze kuželové převodovky – viz. [2].

4.2 Simulace provozního cyklu řízením asynchronních elektromotorů

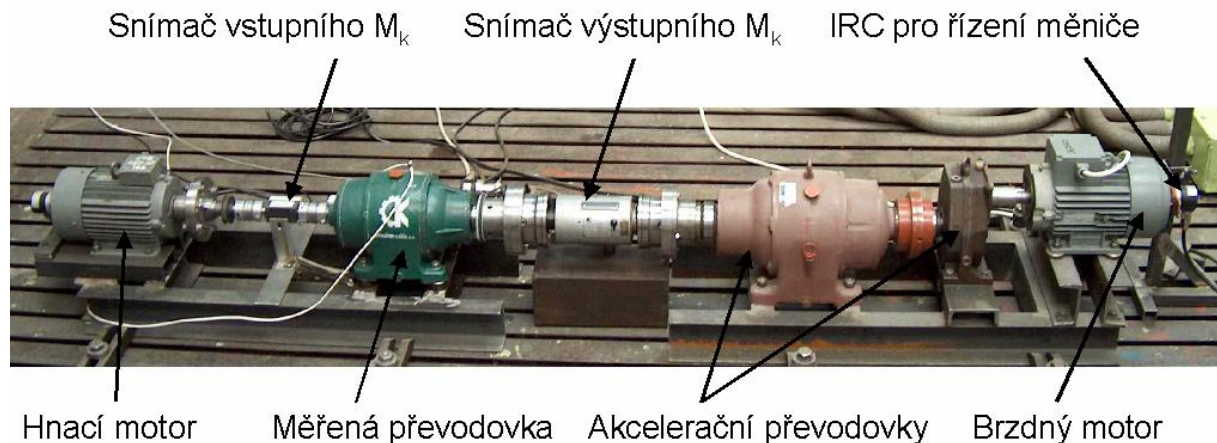
Simulaci proměnlivé zátěže jsem rozvíjel proto, aby bylo možno při experimentech simulovat co nejvěrněji reálný provoz. Tvar reálného provozního

cyklu lze stanovit v zásadě dvojím způsobem. Buď je možné průběh cyklu vypočítat podle známého zatížení pohonu v závislosti na čase a nebo je možné průběh cyklu experimentálně stanovit měřením spektra zatížení pohonu v reálném provozu. Tento průběh, např. krouticí moment na hřídeli elektromotoru, je pak možné matematicky upravit a transformovat na napěťový signál, který určuje velikost momentu realizovaného měničem.

V této práci uvádím měření zatěžovacího cyklu s přímkovými úseky, který simuluje pohon dopravníku. Ten by byl zatěžován různým množstvím přepravovaného materiálu po různou dobu. Zatěžovací cyklus je navržen na dvě hodnoty jednak pro pohon dopravníku bez zátěže, tj. překonávají se pouze pasivní odpory dopravníku a jednak pro pohon dopravníku se zátěží s maximem 67% jmenovitého zatížení. Pro přechody mezi různými úrovněmi zatížení byly použity náběhové rampy, které jsou naprogramovány v měničích od výrobce. Délka cyklu byla zvolena 104 s.

4.2.1 Popis měřicího stanoviště

Pro simulaci tohoto cyklu bylo použito měřicí stanoviště s reálným převodovým mechanismem - viz. obr.4.1. Mezi hnacím elektromotorem a měřeným objektem byl umístěn snímač krouticího momentu stejně jako mezi výstupní hřídel měřeného objektu a zatěžovací jednotku – v tomto případě akcelerační převodovky a brzdny motor.



Obr. 4.1 Měřicí stanoviště

Simulace byla provedena na třístupňové planetové převodovce, která má tyto katalogové údaje: $P=0,47 \text{ kW}$, $i=355$, $n_1=1420 \text{ min}^{-1}$. Její jmenovité zatížení na výstupní hřídeli je 1000 Nm . Měřicí stanoviště je podrobně popsáno v [1].

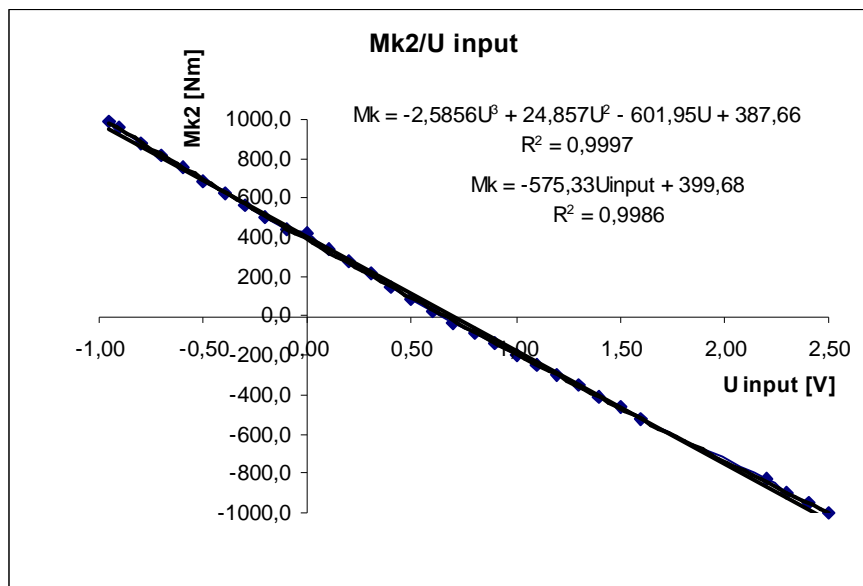
4.2.2 Metodika měření

V programovatelném prostředí LabWindows byl sestaven řídicí SW. Průběh zátěže cyklu byl řízen naprogramovaným napěťovým signálem.

Nejproblematictější se ukázalo stanovení velikosti tohoto řídicího napěťového signálu. Pro naprogramování zatížení je rozhodující velikost krouticího momentu na výstupní hřídeli u měřeného objektu. Mezi brzdým motorem a výstupní hřídelí měřeného objektu jsou však akcelerační převodovky. Proto není možné výpočtově určit velikost momentu potřebného na hřídeli brzdícího motoru, který by po transformaci v akceleračních převodovkách realizoval přesně požadovanou zátěž. Je to způsobeno tím, že v akceleračních převodovkách je spotřebovávána část výkonu procházejícího měřicím řetězcem na krytí jejich mechanických ztrát.

Proto bylo provedeno experimentální stanovení výše řídicího napěťového signálu. Cílem měření bylo stanovit velikost potřebného napěťového signálu na realizaci zatížení na výstupní hřídeli z měřeného objektu v rozmezí $\pm M_{kj} = 1000 \text{ Nm}$. Měření bylo realizováno při konstantní frekvenci otáčení 450 min^{-1} . Tyto otáčky byly zvoleny proto, že v prvním kroku bylo uvažováno měření při nižších otáčkách.

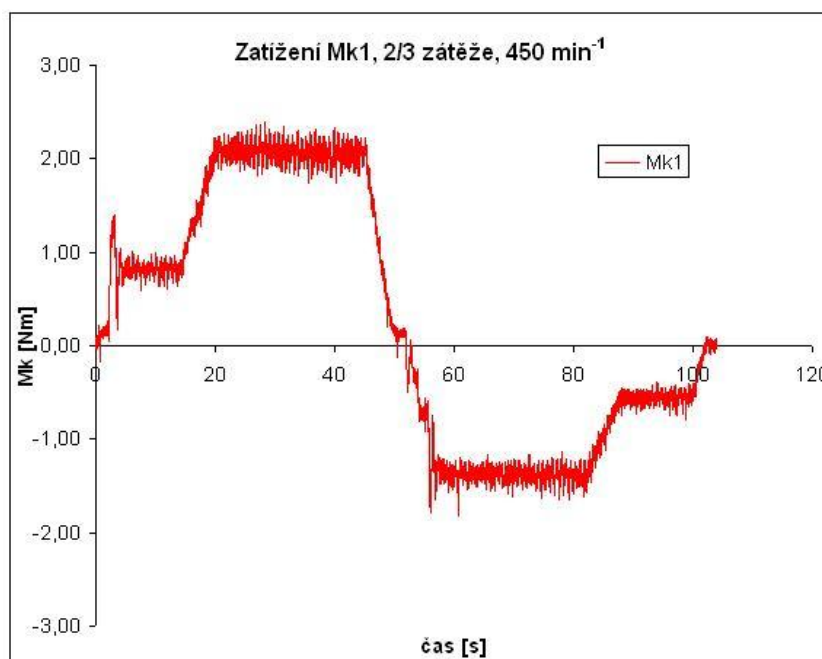
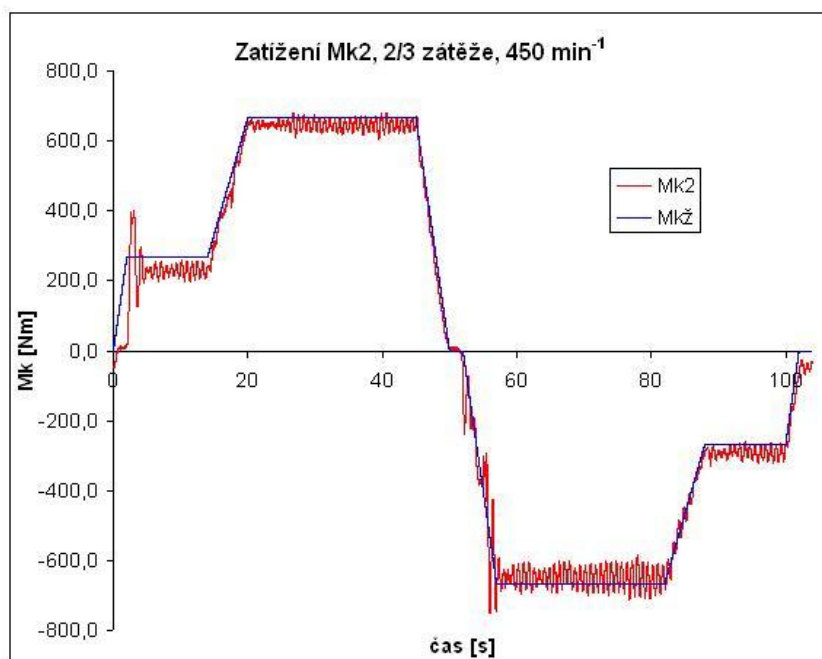
Z naměřených výsledků byla vynesena závislost krouticího momentu M_{k2} na řídicím signálu, která je uvedena na obr. 4.2. Posunutí křivky vpravo je dáno velikostí pasivních odporů akceleračních převodovek. Pro měření byla použita linearizovaná závislost krouticího momentu na řídicím napětí.



Obr. 4.2 Závislost krouticího momentu M_{k2} na řídicím signálu

4.2.3 Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení

Na obr. 4.3 jsou pro frekvenci otáčení 450 min^{-1} uvedeny výsledky měření. V horním grafu na obrázku je uveden naprogramovaný cyklus, tj. žádaný krouticí moment $M_{kž}$, a do stejného grafu je vynesena i moment měřený na výstupu z měřeného objektu. V dolní části obrázku je v samostatném grafu vynesena průběh krouticího momentu na hřídeli vstupní.



Obr. 4.3 Výsledky měření cyklu pohonu dopravníku při $n=450 \text{ min}^{-1}$

Při interpretaci grafu závislosti M_{k2} na čase, který je uveden v horní části obr. 4.3, lze konstatovat, že reálný průběh zatížení se dobře shoduje s žádaným. Je patrné rozkmitání při spuštění soustavy a nepřesná realizace zatížení na první úrovni. Podobné rozkmitání lze očekávat i v reálném provozu, kde by bylo nutné tuto skutečnost analyzovat a případně vhodným způsobem odstranit.

Při interpretaci grafu závislosti M_{k1} na čase, který je uveden v dolní části obr. 4.3 je třeba se zaměřit na dvě skutečnosti. Jednak je to nesymetrie průběhu v kladné a záporné oblasti vůči časové ose a jednak je to skutečnost, že průběh není nulový v okamžiku, kdy je nulový průběh momentu M_{k2} . První skutečnost je způsobena tím, že v záporné oblasti průběhu motor pracuje v režimu brzdy a

tudíž je jeho moment menší o mechanické ztráty v měřeném objektu, které se také podílí na brzdění. Druhá skutečnost je způsobena tím, že má-li být moment M_{k2} nulový, musí motor na vstupním hřídeli měřeného objektu hradit jeho mechanické ztráty tak, aby se nestal pasivní brzdou.

5. Možnosti elektricky uzavřeného okruhu v experimentálním výzkumu

Tři uvedené metody použití asynchronních elektromotorů, které jsou řízeny frekvenčními měniči byly postupně autorem vyzkoušeny pro simulaci provozní zátěže převodovek. Postupným vývojem metody bylo nalezeno řešení, které umožňuje rekuperaci energie vzniklé při brzdění. Realizace uzavřeného elektrického okruhu pro simulaci zatížení rotačních mechanismů má tyto **výhody**: umožňuje nahradit komutátorové dynamometry, lze snadno řídit úroveň simulované zátěže, lze simulovat zatížení při volitelné frekvenci otáčení, lze realizovat konstantní i proměnlivé zatížení, frekvenční měniče komunikují s PC, měniče umožňují zavedení regulačních smyček do experimentálního procesu, lze plně využívat momentovou kapacitu motorů, energie vzniklá při brzdění je rekuperována a použita pro hnací motor, frekvenční měniče vypočítávají moment, takže v některých případech není nutno použít při měření drahé snímače momentu, kompletace měřicího stanoviště je jednoduchá (není nutno používat akcelerační převodovky).

Pro úplnost je třeba uvést **nevýhody a omezení metody**: metoda je omezena výkonem frekvenčních měničů a použitých elektromotorů, při nízkém využití výkonové kapacity měničů je nízká účinnost okruhu, při provozu měničů vznikají rušivé signály, do energetické kalkulace je třeba započítat vlastní spotřebu měničů.

Literatura:

- [1] Dynybyl, V.: Universitní experimentální základna pro výzkum pohonů a její aplikace na rotační převodové mechanismy, habilitační práce, ČVUT v Praze 2004.
- [2] Dynybyl, V., Chyský, J., Mossóczy, P., Novák, J., Žák, P.: Experimentální analýza parametrů kuželové převodovky 2,5 kW, výzkumná zpráva, ČVUT v Praze, 2004.
- [3] Chyský, J., Kubačák, A.: Equipment for Simulation of Rotating Loading Usány Frequency Converter for Controlling Induction Motors, Workshop, CTU Prague 2003, pp. 742-743.
- [4] Chyský, J.: Frequency converter with regeneration of electrical energy. In: SEKEL 2004. Ostrava 2004, p. 48-50. ISBN 80-24806-19-3. (in Czech).
- [5] Chaloupka, V., Neckářová, J., Bauer, Z.: Kinematické a dynamické poměry u zařízení pro zkoušky převodovek a spojek, výzkumná zpráva, ČVUT v Praze, 1983.

This research has been supported by MSM grant No. J04/98:21200008

Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.

Vojtěch Dinybyl (*1963 v Praze) studoval na Fakultě strojní, ČVUT Praha, mezioborové studium „Automatizace a robotizace technologických procesů“. Studium ukončil úspěšně v roce 1987.

V letech 1987 – 91 působil jako samostatný konstruktér ve vývojové základně Elektromontážních závodů Praha, kde využíval své znalosti z oboru strojírenské technologie a automatizace a robotizace technologických procesů. Kromě rozsahově menších konstrukčních prací byl samostatným řešitelem dvou větších konstrukčních projektů uváděných do provozu vývojovou základnou EZ: polohovací stůl a upínací přípravek pro automatizované pracoviště se svařovacím robotem ESAB a malý dílenský lis 25t s nástrojovým vybavením pro výrobu tvarových otvorů do ocelového plechu.

V roce 1991 úspěšně absolvoval konkursní řízení a získal místo odborného asistenta Katedry částí a mechanismů strojů, Fakulty strojní, ČVUT Praha. Doktorské studium úspěšně ukončil 21. 9. 1999 státní doktorskou zkoušku a 15. 12. 2000 obhajobou disertační práci na téma: „Posouzení napjatosti pružného kola harmonického ozubeného převodu komparační metodou“.

Byl spoluřešitelem IG CTU 0828171, „Zlepšování provozních vlastností harmonických převodů“ (1994), IG CTU 10028171, „Zlepšování provozních vlastností harmonických převodů“ (1995), IG CTU 3096336, „Diagnostika dynamických podmínek rotačních pohonů“ (1996). Byl vedoucím řešitelem IG CTU 30904102, „Experimentální hodnocení rozběhových a brzdových parametrů brzdového asynchronního elektromotoru“ (1999) a IG CTU 300005002, „Metodika posuzování pevnostního výpočtu extrémně namáhaných strojních součástí“ (2000). Od roku 1999 se podílel na řešení problematiky Výzkumného záměru MSM 212200008 – „Rozvoj metod a prostředků integrovaného strojního inženýrství“. Zpracovával problematiku harmonických převodů a od roku 2001 byl vedoucím skupiny, která řešila dílčí projekt výzkumného záměru s názvem „Simulační a experimentální výzkum pohonů s převodovými mechanismy“.

V letech 2001 až 2003 se podílel na řešení pedagogického projektu evropské unie s názvem „E-dilema“, Minerva Project no. 90683-CP-1-200 v rámci programu Sokrates. Projektu s problematikou e-learningu se zúčastnil jako člen Českomoravské společnosti pro automatizaci.

Další odborné práci se věnoval v rámci hospodářských smluv Fakulty strojní ČVUT. V roce 2001 vedl skupinu, která zpracovala odborné posudky pro Strojírny Košíře, a.s. V roce 2003 vedl skupinu, která zpracovala odborné posudky pro Envig-bronswerk, a.s. Od roku 2002 je vedoucím skupiny, která řeší experimentální výzkumná experimentální hodnocení hřídelových spojek 2/4-400 a hydraulické průmyslové brzdy typ HH. Od roku 2004 spolupracuje s WIKOV MGI Hronov a.s. při výzkumu a vývoji ozubených převodových mechanismů.