

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Ing. Martin Kubín

VÝVOJ NOVÉ KONCEPCE AUTONOMNÍCH JEŘÁBŮ

THE DEVELOPMENT OF THE NEW CONCEPT
OF AUTONOMOUS CRANES

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
Oponenti: Doc. Ing. Leopold Hrabovský, Ph.D.
Doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
Datum obhajoby: 27. 8. 2013

KLÍČOVÁ SLOVA

automatizace, jeřáb, manipulátor, kapacitní snímač

KEY WORDS

automatization, crane, manipulator, capacitive sensor

MÍSTO ULOŽENÍ RUKOPISU DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce je uložena v Areálové knihovně, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

© Martin Kubín, 2013

ISBN 978-80-214-4780-6

ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD.....	5
2 CÍLE PRÁCE	5
3 SOUČASNÝ STAV VĚDY V OBLASTI AUTOMATIZACE JEŘÁBŮ A MANIPULÁTORŮ	6
4 PODSTATA AUTONOMNÍHO SYSTÉMU	8
5 VLASTNOSTI BŘEMENA ZAVĚŠENÉHO NA HÁKU KLADNICE JEŘÁBU	10
5.1 Analytický popis pohybu kočky s břemenem	10
5.2 Numerické řešení kyvadel a pohybu kočky s břemenem.....	10
5.2.1 <i>Rovinné matematické kyvadlo s tlumením a bez buzení</i>	11
5.2.2 <i>Nelineární kyvadlo</i>	11
5.3 Modelování a simulace	13
6 EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVNÍ MÍSTO	14
7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU	16
7.1 Rovinné kyvadlo s pevným základem	16
7.2 Rovinné kyvadlo s pohyblivým závěsem.....	19
7.3 Rovinné kyvadlo – pohyblivá kočka a zdvih břemene	22
7.4 Pohyb břemene v prostoru	23
8 DISKUZE – VÝSLEDKY	24
9 ZÁVĚR.....	28

1 ÚVOD

Přes útlum průmyslového rozvoje vlivem světové finanční krize, která začala někdy v roce 2008 a se kterou se světové hospodářství ještě dosud plně nevyrovnalo, je stále rozvoj průmyslu velmi značný. S tím jak úspěšně se firmy s krizí vyrovnávají a budou dále vyrovnávat, bude souviset i rychlost rozvoje průmyslu. Snaha uspořít výrobní náklady a tím zvýšit zisky a nebo snížit cenu výrobku je v globálním konkurenčním prostředí veliká. Prostor na snižování nákladů je stále dostatečný a právě se stále rozšiřující se globální komunitou je zvětšován tlak na společnosti, aby náklady snižovaly. Snižování nákladů je možné provádět různými sofistikovanými způsoby zefektivňující samotnou výrobu a nevýrobní přidružené procesy. Nevýrobními procesy jsou zde chápány mimo jiné např. logistika a manipulace s materiálem.

Jedním z možných způsobů modernizace manipulace s materiálem je automatizace. Automatizovat manipulační procesy v některých případech není jednoduché a někde je automatizace dokonce téměř nemožná, avšak např. ve skladech a provozech, kde je manipulováno s konkrétními manipulačními jednotkami (paleta, kontejner, atd.) je to možné.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem práce je ověření možností nové koncepce manipulátoru a jeřábu vhodného do automatického provozu. Automatizovaný jeřáb by měl být schopen pracovat s vysokou mírou vlastní interakce s okolním prostředím a z pohledu míry autonomie stroje na člověku pracovat v autonomním režimu. To znamená, že by měl dosahovat cíle způsobem, který si zvolí (metodologie volby by měla být předepsána). Tento přístup vyžaduje precizní znalost okolního prostředí a vlastního stavu stroje a břemene, které přepravuje. Jedním z cílů práce je ověřit možnosti použití snímačů pro identifikaci vlastního stavu stroje a břemene. Vzhledem k absenci vhodných snímačů na trhu, je také třeba navrhnout snímače přesně pro tuto aplikaci. Jedním z možných postupů práce je sestavit vhodné laboratorní pracoviště, které umožní zkoumat kinematiku a dynamiku mostového jeřábu. Laboratorní pracoviště by mělo svými možnostmi přesahovat tuto práci a mělo by sloužit k pokračování výzkumu chování břemen zavěšených na lanovém závěsu. Především detailním zkoumáním těchto většinou nelineárních systémů je možné přispět k řešení efektivní automatizace jeřábové techniky a také přispět k vývoji systémů omezujících kývání břemene. Problematiku lze obecně aplikovat na další druhy manipulátorů, kde dochází k obdobnému rozkývání přepravovaného materiálu jako u jeřábů.

3 SOUČASNÝ STAV VĚDY V OBLASTI AUTOMATIZACE JEŘÁBŮ A MANIPULÁTORŮ

Automatizací jeřábů a manipulační techniky se zabývá mnoho výzkumných pracovišť a také mnoho firem, které vyrábí tuto techniku. Protože jeřáby mají dlouhou životnost, která souvisí s jejich pracovním nasazením (plánované a skutečné vytížení, prostředí,...), jsou dnes ve velké míře používány jeřáby 20 a více let staré. Je tedy zřejmé, že se automatizace jeřábů netýká pouze nových výrobků, ale při plánovaných rekonstrukcích dochází k vybavení stávajících jeřábů novými pohony, frekvenčními měniči, snímači, řídicí jednotkou a dalšími nezbytnými prvky. Automatizací stávajících jeřábů se ve světě zabývá např. Rosenfeld [26, 27]. Automatizací a jejími dílčími úkoly se zabývají všichni následující autoři, avšak Sawodny s kolektivem [28] nazvali jeden ze svých článků ve volném překladu „Automatický portálový jeřáb jako velkoprostorový robot“ nebo také robot s velkým pracovním prostorem. Toto přirovnání plně vysvětluje zadání a cíle této práce.

Asi nejvíce prací zabývajících se automatizací jeřábů a manipulační techniky bylo vypracováno na téma kontejnerových jeřábů, které jsou určeny pro vykládku a nakládku kontejnerových lodí a jeřábů na kontejnerových překladištích. Na kontejnerové překladiště je vlivem světového obchodu kladen vysoký požadavek na produktivitu práce. Vzhledem k objemu přepravovaného zboží se stále zvětšují nejen kontejnerové lodě ale i jeřáby a kontejnerové terminály, ve kterých se hledají rychlejší a účinnější způsoby řízení. Například Z. N. Masoud z Jordánské univerzity a A. H. Nayfeh z Virginského polytechnického institutu a univerzity z U.S.A. s kolektivou dalších autorů se zajímají o řízení kontejnerových jeřábů s ohledem na snížení kývání břemene – kontejneru [4, 20, 21, 24]. Snížením nebo úplným odstraněním kývání kontejneru s využitím neuronových sítí se zabývají Holanďtí výzkumní pracovníci van der Boom a jeho kolegové [2].

Vědecká práce a její směry v oblasti automatizace jeřábů

Vědecká práce v oblasti automatizace jeřábové techniky se podle světové odborné literatury soustřeďuje do několika hlavních směrů. Hlavní směry určují především základní problémy při automatizaci této manipulační techniky, jako hlavní problém je často označován základní princip manipulace s břemeny pomocí lanového závěsu a kladkostroje. Dalším souvisejícím problémem je znalost vlastního stavu (převážně polohy) samotného jeřábu a především břemene. Všechny tyto směry můžeme zobecnit na jeden zastřešující směr a to omezení kývání břemene, ať už částečně nebo snahy o úplné zamezení kývání. Vzhledem k rozdílným pohledům řešitelských týmů na tento problém došlo během řešení k rozdělení vývoje na několik různých směrů. Firmy a výzkumní pracovníci se s tímto problémem snaží vypořádat různými způsoby a v současné době existují funkční aplikace těchto systémů v průmyslové praxi.

Prvním a pravděpodobně nejrozšířenějším směrem je omezení kývání břemene pomocí vhodného řízení pohonů pojezdu kočky a mostu nebo celého jeřábu a pohonů zdvihu břemene. Samotné řízení jeřábových pojezdů je řešeno několika různými expertními systémy. Dnes se všeobecně upouští od používání klasické výrokové logiky, která používá pouze dvě logické hodnoty (pravdu a nepravdu). Nejvíce je rozšířena logika neurčitá, někdy též v české literatuře označovaná jako mlhavá – fuzzy. Řízení pohonů pomocí fuzzy logiky je zmiňováno v mnoha pracích po celém světě. Tomuto typu řízení je věnována značná část prací, ze kterých jsou vybrány následující [1, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 17, 18, 19]. Dalším využívaným expertním systémem jsou neuronové sítě. Neuronových sítí využili k řízení jeřábové techniky Nakazono a kolektiv [23] a Cho a kol. [12], na mostových jeřábech Suh a Méndez s svými kolektivy [29 a 22] a na věžových jeřábech Leung [16]. Pomocí metody Straight Transfer Transformation (STT) modelují pohyby laboratorního jeřábu Terashima a kol. [30]. Výsledkem metodiky je pohyb břemene z výchozího do koncového bodu po přímce, kterého je dosaženo vhodnou koordinací pohybů výložníku, sloupu a zdvihu břemene. Vzhledem ke skutečnosti, že je systém lanového závěsu nelineární a že je velmi obtížné zjistit aktuální polohu háku a břemene v prostoru, tak se řízením a stabilitou s využitím Ljapunovy stabilizační teorie zabýval Cho a další [12, 13] z Korejské univerzity.

Kromě elektrického a signálového řízení pohybů jeřábů k omezení kývání je také k dispozici několik systémů mechanických. Tyto mechanické systémy si většinou kladou za cíl částečně omezit kývání, protože úplné odstranění kývání touto cestou není pravděpodobně vůbec možné. Mimo samotné kývání je také problémem natáčení břemene podél svislé osy. Touto problematikou se zabývali pracovníci Katedry konstruování v Košicích Kulka a Ferenčíková [15], kdy pomocí využití gyroskopického jevu matematicky popsali důkaz o možnostech této metody. Velkou nevýhodou jejich představeného řešení je ovšem nutnost přívodu elektrické energie ke kladnici jeřábu. Ke zmenšení výchylky háku může značně přispět také vhodný způsob zalanování lanového převodu. Především vhodnému rozmístění vodících a vyrovnávacích kladek na kočce a případně na kladnici nebo na spreaderech (container spreader – rám k uchycení kontejneru), které jsou v kontejnerové přepravě používány. Touto problematikou se zabývá práce Dissanayake a kol. [5]. Další prací, která se zabývá mechanickým nebo spíše elektromechanickým systémem omezení výkyvu břemene, je práce Kawaie se svým Japonsko-Korejským týmem v roce 2009 [14]. Systém je založen na principu pohyblivého závěsného bodu na spreaderu a je řízen pomocí CCD kamer a obrazových značek. Vhodným řízením vloženého vozíku je kompenzována nepřesnost uložení nákladu, kdy je těžiště nákladu mimo střed kontejneru (pouze v jedné ose). Fungování tohoto systému dále ověřili v laboratorních podmínkách.

Třetím hlavním směrem vědecké práce v této oblasti je počítačová simulace, která souvisí s velkou dostupností osobních počítačů a vhodných programů. Řešení nelineárních systémů nevyžaduje přímo speciální software, ale postačí i základní matematické programy na řešení rovnic. Výhodou je také rozvoj programů

podporujících grafické programovací jazyky (např. LabView, Matlab-Simulink). Právě řešení pomocí programu Matlab-Simulink je často publikováno ve vědeckých pracích ve světě ale i doma, jak ukazuje např. Noskovič [25] z VŠB-TU Ostrava. Pomocí fuzzy logiky a využití programového výše zmíněného simulačního prostředí řešil tuto problematiku také Mahfouf s kolektivem z Británie [19] 2009. Grafický program ADAMS.MSC v kombinaci s programem Matlab-Simulink použili na virtuální experiment Dai [3] se svými kolegy z Harbin Institute of Technology (HIT) z Číny. Simulovali pohyb břemene zavěšeného na mostovém jeřábu v ADAMSu, kde se pohybovala kočka a most (2D model). Pohyby mostu a kočky byly řízeny fuzzy logikou v programovém prostředí Matlab. Poslední prací, která je zde uvedena, je práce kolektivu Wilsona z USA [31]. Wilson využívá k simulacím program Unigraphics s Unigraphics Assembly Package, který je přímo řízen operátorem.

4 PODSTATA AUTONOMNÍHO SYSTÉMU

Míra interakce stroje s okolím je vyjadřována několika stupni autonomie stroje ve vztahu k člověku (tab. 1). Nejnižším stupněm závislosti stroje na člověku je stroj plně závislý na člověku. Chod řízeného stroje (např. povely zapnuto, vypnuto, regulace otáček...) plně ovládá člověk s tímto strojem pracující, mezi tyto patří např. ruční náradí a jiné elektrické stroje bez řídicího systému. Druhým stupněm závislosti stroj-člověk je stroj ovládaný. Tento stroj je stále v podstatě plně závislý na člověku, ale už obsahuje některé např. bezpečnostní prvky (koncový spínač), které umožní stroj vypnout v případě, že by například mělo dojít ke kolizi pracovního stolu s rámem stroje. Takto pracující stroj stále pracuje na základě přímých pokynů od obsluhy, kde obsluhou může být myšlen člověk nebo řídicí program bez zpětné vazby. Právě zpětnou vazbou je rozlišen další třetí stupeň – regulovaný stroj. Regulovaný stroj přebírá některé nebo všechny funkce související se zpětnou vazbou, kterou u nižších úrovní vykonává člověk (např. regulace výkonu, rychlost pojezdu...). Stroj musí být vybaven nezbytnými snímači, které mu umožní interagovat s okolním prostředím. Autonomní systém, čtvrtý stupeň, je při řešení zadaných úkolů na člověku nezávislý, avšak tyto úkoly a algoritmus jejich řešení mu musí člověk (operátor) zadat. Tento stupeň je teoreticky druhým nejvyšším, výše z hlediska autonomie je už jen stroj inteligentní (UI – Umělá Inteligence /anglicky AI – Artificial Intelligence/), který člověka nepotřebuje ke svému „životu“, který si sám určuje své cíle. Ve skutečnosti a z hlediska praktické využitelnosti pro člověka je autonomní systém stupněm nejvyšším.

Interakce jakéhokoliv stroje s okolím je dána jeho povědomím o tomto svém okolí a neobejde se tedy bez různých snímačů vlastního stavu, stavu okolí a případně nějakými dalšími (např. aktuální předpověď počasí). Základními snímači, v dnešní době běžně používanými, jsou snímače s elektrickým výstupem. Tento signál může být buďto analogový nebo digitální. Dnes jsou používány výhradně digitální signály

(buď přímo nebo s využitím A/D převodníků) z důvodu snadného zpracování pomocí výpočetní techniky. Signály z celého stroje jsou dále zpracovány počítačem, který na základě probíhajícího programu rozhodne jak je využít k vykonání zadaného úkolu.

Tab. 1: Rozdělení strojů podle míry autonomie na člověku

stroj	závislost na člověku	interakce s okolím
Řízený	plně závislé na člověku (vedení, rozhodování...)	žádná, pouze člověk
Ovládaný	vykovává činnost podle zadaného pokynu, logická rozhodovací schopnost (výroková logika)	koncový spínač, tlačítko
Regulovaný	vykovává činnost podle zadaného pokynu, logická rozhodovací schopnost (fuzzy logika)	snímač polohy, akcelerometr, otáčkoměr, gyroskop
Autonomní	dosahuje cíle způsobem, který si zvolí (metodologie volby je však stále předepsána). Cesta nemusí být nejpřímější a v případě překážek si sám najde novou cestu k cíli (neuronové sítě)	snímač polohy, akcelerometr, otáčkoměr, gyroskop, kamery, termokamery, meteorologické snímače a předpověď...
Inteligentní	sám si volí cíle, člověka nepotřebuje (umělá inteligence)	jako předchozí

Program obsluhující stroj je dán přesně určeným algoritmem, který je naprogramovaný v paměti počítače. Na základě svého rozhodnutí začne provádět úkony, které vedou k provedení úkolu. Systém automatický by takový úkol prostě provedl. Co by se ale stalo v okamžiku, kdyby se z nějakého důvodu stala nějaká změna v okolí? Například kdyby mostový jeřáb uchopil břemeno a nesl ho po navržené (často nejkratší) dráze na místo určení a během tohoto pojezdu vjel do dráhy břemene nákladní automobil? Automatický jeřáb by do něj narazil a pouze v případě, je-li vybaven nějakými snímači pro případ kolize, by došlo k rychlému zastavení, avšak až po srážce. Autonomní systém by mohl takovým nehodám předcházet, je-li vybaven příslušným zařízením, např. kamerou atp. V případě autonomního systému bude tato změna v okolí akceptována a jeřáb najde novou upravenou dráhu, po které je možné břemeno nést až na místo určení.

Autonomní systémy by na základě analýzy informací ze snímačů např. v čase mohly případně předvídat jejich další vývoj a pracovat v jakémsi deterministickém nebo stochastickém režimu. Tím by systém mohl dokázat zamezit některým nežádoucím jevům v provozu jeřábové techniky. Dále by se systém z těchto nepříznivých událostí mohl sám poučit a v další práci pokud by porovnával data z minulé události s vývojem přicházejících informací ze snímačů, by mohl důsledku podobné nepříznivé události předejít rychlejší reakcí.

5 VLASTNOSTI BŘEMENA ZAVĚŠENÉHO NA HÁKU KLADNICE JEŘÁBU

Nejjednodušším modelem kyvadla je matematické kyvadlo, u něhož provádíme určitá zjednodušení a omezení. Prvním zjednodušením je možné zanedbání tření (čepového) v bodě závěsu a všech vnějších vlivů. Dále je kyvadlo ve většině případů omezeno na malé výchylky (cca do 5°). Důležitou vlastností kyvadla je, že si zachovává rovinu kyvu, díky čemuž dokázal J. B. Léon Foucault experimentálně potvrdit otáčení země kolem své osy (Pantheon v Paříži, 1851). Experiment dokázal nejen existenci tohoto jevu, ale také potvrdil vliv Coriolisovy síly na kyvadlo v neinerciální vztažné soustavě Země.

5.1 ANALYTICKÝ POPIS POHYBU KOČKY S BŘEMENEM

Matematických identifikací, které popisují pohyby jednotlivých částí jeřábu nebo dynamiku větších celků jeřábů, je v literatuře mnoho. Pohybové rovnice jsou sestavovány několika postupy nebo metodami. Nejčastěji je užívána metoda uvolňování a metoda redukce dále jsou užívány Lagrangeovy rovnice II. druhu, které jsou používány na systémy s více stupni volnosti, dále potom aplikace maticových metod (pomocí jakobiánů a kinetostatiky).

5.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ KYVADEL A POHYBU KOČKY S BŘEMENEM

Chování dynamického systému kyvadel zavěšených na pevném nebo na pohyblivém závěsu lze považovat za nelineární. Řešení soustavy nelineárních diferenciálních rovnic je obecně problematické a získání analytického řešení v uzavřeném tvaru není často vůbec možné. V praxi tyto problémy řešíme linearizací pohybových rovnic aplikací doplňkových rovnic pro malé úhly výchylek. Touto operací však skutečnou situaci v podstatě idealizujeme a množina možných typů řešení studovaného matematického modelu je omezena na triviální případy, kdy je stavovým atraktorem pevný bod nebo limitní cyklus.

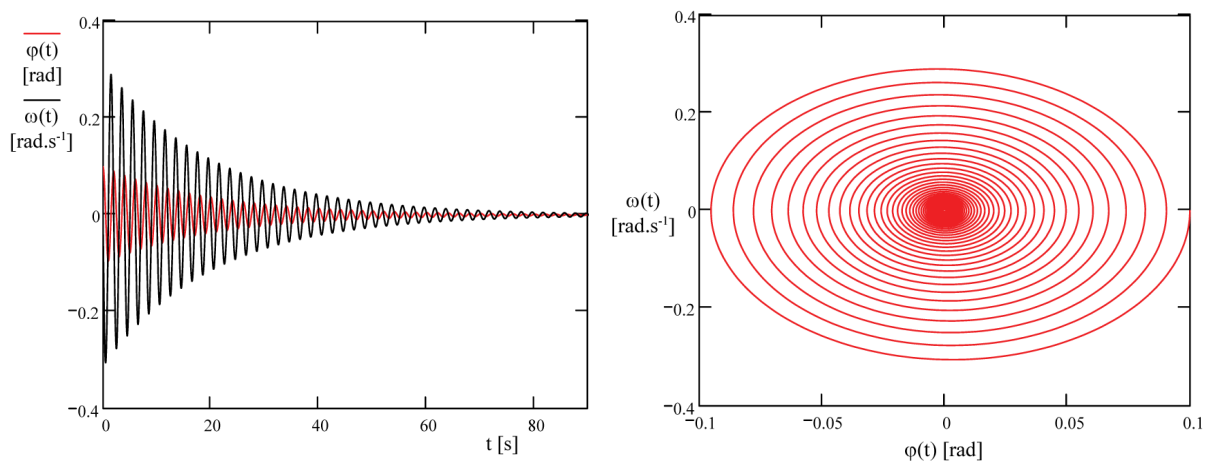
Následující podkapitoly ilustrují možnou složitost chování nelineárního kyvadla na poměrně jednoduchých příkladech matematických modelů. Jednotlivé příklady ukazují, jak může přítomnost nelineárních členů v diferenciálních rovnicích obohatit množinu možných řešení dynamického systému a jak s přibývajícím výrazy roste složitost řešení. Parametry vstupující do výpočtu a ovlivňující chování systému jsou často zanedbávány na základě zjednodušujících předpokladů, které dokonce většinou omezují výsledky na jednoduché lineární řešení. Ve většině případů se předpokládá nulový vliv prostředí, například odpor nebo proudění vzduchu a závěs kyvadla obvykle uvažujeme dokonale tuhý s neměnnou délkou. Pro potřeby simulací dynamického chování břemen zavěšených na jeřábech je zavádění zjednodušujících předpokladů vstupních parametrů nevhodné, protože odpovídající řešení je nepřesné a představuje značně idealizovaný obraz chování. Chování

nelineárního dynamického systému s uvažováním reálných vlivů velmi často vede k chaotickému chování. Tento typ řešení je specifický tím, že časové průběhy jednotlivých stavových proměnných systému jsou velmi citlivé na počáteční podmínky.

5.2.1 Rovinné matematické kyvadlo s tlumením a bez buzení

Příklad ilustruje chování rovinného matematického kyvadla s tlumením (tlumicí koeficient k zavedený například vlivem tření v bodu závěsu). Předpokládáme, že tlumicí síla je úměrná úhlové rychlosti. Chování systému je relativně známé. Základní pohybová rovnice je:

$$\ddot{\varphi}(t) + k\dot{\varphi}(t) + \frac{g}{L} \sin(\varphi(t)) = 0 \quad (1)$$



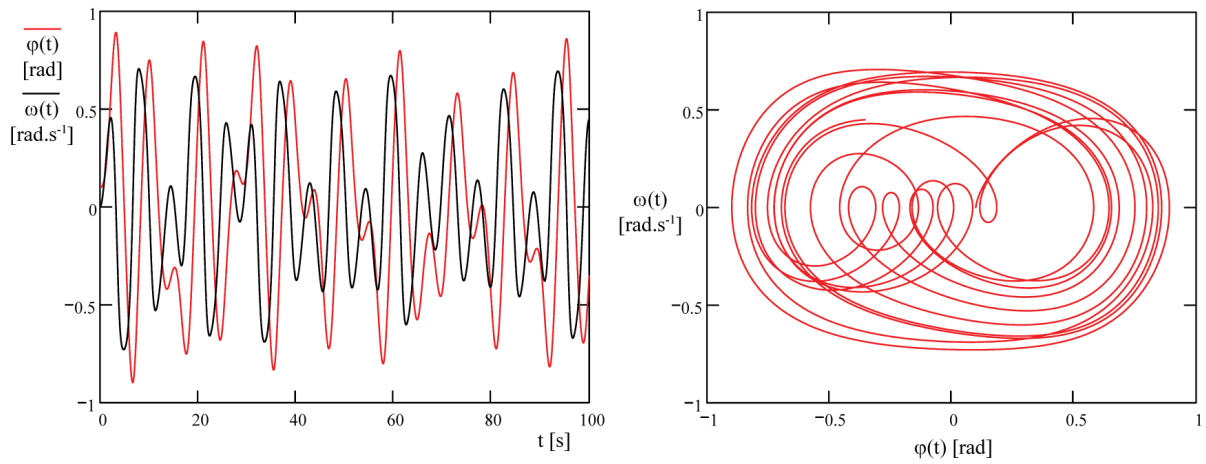
Obr. 1: Časový průběh úhlu φ a úhlové rychlosti ω a fázový portrét rovinného matematického kyvadla s tlumením a bez buzení

Časový průběh (obr. 1, vlevo) úhlu výchylky φ a úhlové rychlosti ω je opět podle předpokladu obrazem funkce sinus a kosinus s exponenciálně se zmenšující amplitudou. Fázový portrét (obr. 1, vpravo) ve stavovém (fázovém) prostoru popisuje tlumený periodický děj. Výsledkem je stabilní rovnovážný stav se singulárním bodem typu ohnisko. Nejedná se o chaotické řešení, největší Ljapunovský exponent je menší než nula.

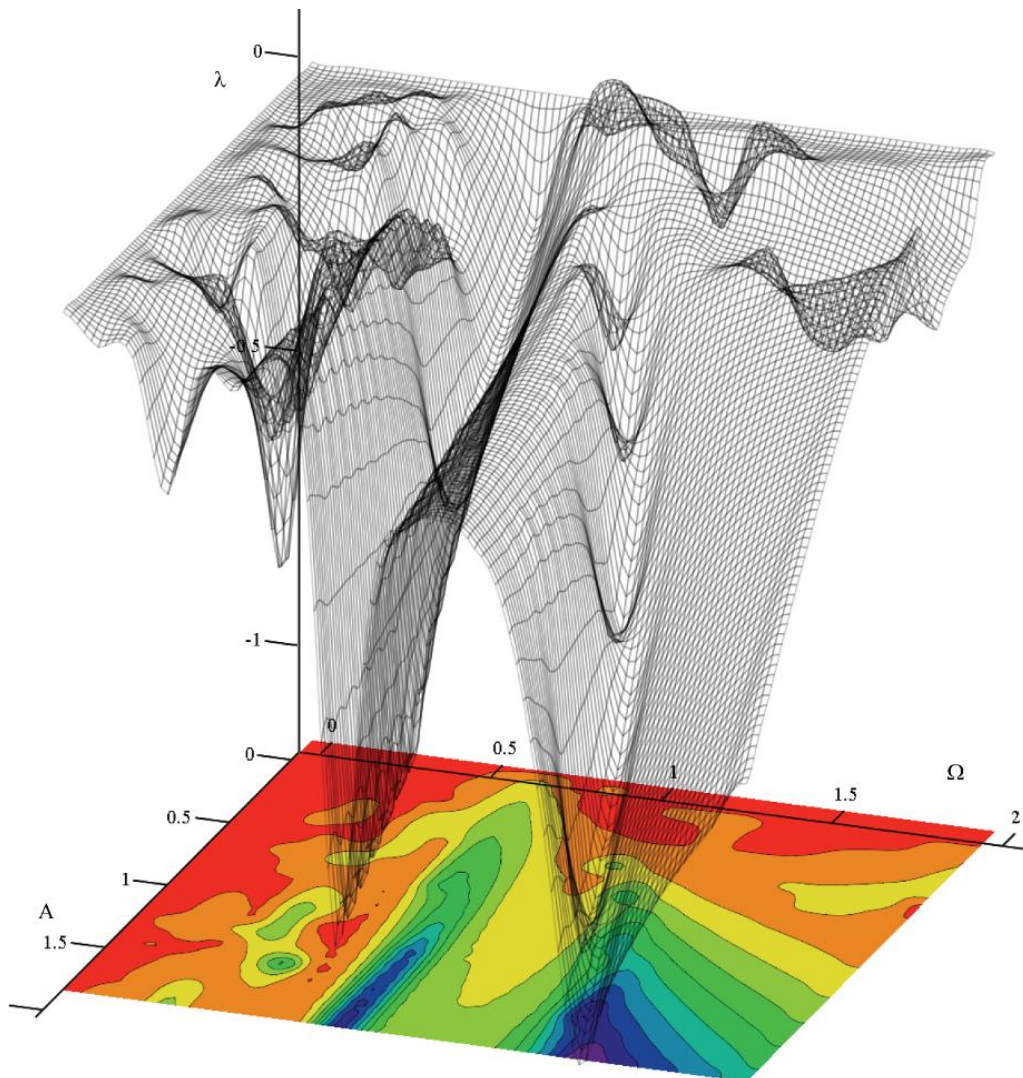
5.2.2 Nelineární kyvadlo

Dalším příkladem ilustrujícím chaotické chování je nelineární kyvadlo obecnějšího charakteru. Jedná se o silně nelineární typ kyvadla s buzením a tlumením. Chování této soustavy není snadno předvídatelné a může být i velice komplikované. Základní pohybová rovnice je:

$$\ddot{\varphi}(t) - 0,2\dot{\varphi}(t) + \varphi^3(t) + \dot{\varphi}^3(t) - A \cdot \sin(\Omega \cdot t) = 0 \quad (2)$$



Obr. 2: Časový průběh úhlu φ a úhlové rychlosti ω a fázový portrét rovinného nelineárního kyvadla



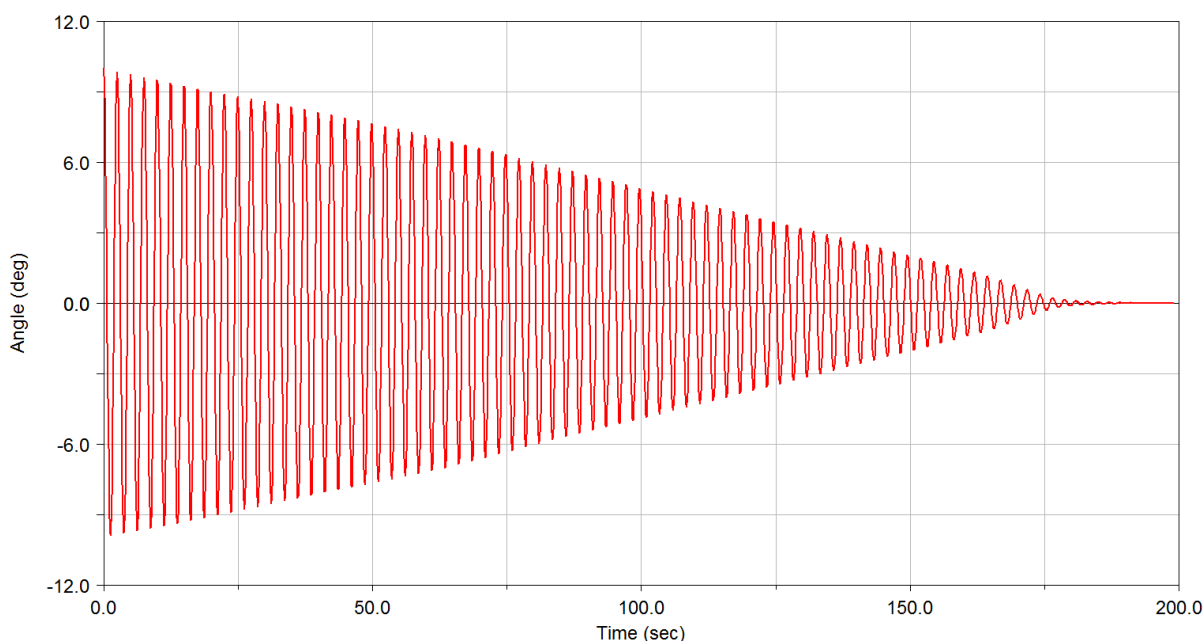
Obr. 3: Průběh největšího Ljapunovova exponentu λ [-] v závislosti na amplitudě A [j] a úhlovém kmitočtu Ω [j] budící síly rovinného nelin. kyvadla

Časový průběh úhlu výchylky φ a úhlové rychlosti ω je uveden na obrázku (obr. 2, vlevo). Fázový portrét (obr. 2, vpravo) ve stavovém (fázovém) prostoru popisuje odtlumený a buzený systém s chaotickým chováním. Výsledkem je stabilní rovnovážný stav s vícenásobnými singulárními body typu nestabilní ohnisko. Výpočtem tabulky hodnot největšího Ljapunovského exponentu pro různé kombinace vnitřních parametrů systému lze zjistit, že jeho velikost dosahuje v daném podprostoru parametrů různých hodnot (obr. 3). Místa s kladnou nenulovou hodnotou v grafu vyjadřují vznik chaotického chování v závislosti na koeficientu amplitudy budící síly a budící úhlové frekvenci. Maximální hodnota největšího Ljapunovova exponentu je ve zkoumané oblasti $\lambda = 0,1$.

5.3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE

Diskrétní modely představují nejčastější pojetí reality v počítačovém prostředí. Jedná se o rozložení modelovaného reálného systému do více podsystémů o daných vlastnostech – diskretizace. Dokonce i spojité systémy se nejčastěji řeší pomocí diskretizace. Diskrétní dynamické modely systémů jsou vytvářeny v případě, pokud cílem počítačového experimentu je zjištění vnějších sil působících na soustavu jako celek více dílčích těles. Výsledky diskrétních modelů jsou přirozeně rovněž diskrétní a při požadavku spojitěho výsledku se provádí různě sofistikované matematické úpravy výsledků.

Simulaci lze využít také k modelování kyvadel. Programy využívající Multibody systém (MBS) mají obecně problém s modelováním lan. Tento problém lze obejít modelováním lana po částech podobně jako řetěz. Jedná se o zjednodušení, které může výrazně ovlivnit výsledek. Záleží však na druhu očekávaného výsledku, kvůli kterému je simulační experiment prováděn. Možnosti simulačního prostředí byly vyzkoušeny na dvou základních typech kyvadel, která již byla v práci zmíněna v programovém prostředí MSC.ADAMS. První simulační experiment je prováděn na modelu rovinného kyvadla s pevným závěsem. Jedná se o dvě pevná tělesa spojená pevnou vazbou. Kyvadlo je spojeno se základním tělesem vazbou s povolenou rotací v jedné ose. Hmotnost těles je volena s ohledem na polohu těžiště kyvadla. Hmotnost závaží je 6,033 kg a hmotnost tyče závěsu je v řádech stovek gramů (0,270 kg). Poměr hmotností obou těles odpovídá reálnému experimentu, který je prováděn na laboratorním modelu. Hmotnosti těles jsou voleny tak, aby se jednalo přibližně o kyvadlo matematické. Na kyvadlo působí pouze tíhové zrychlení ve svislé ose a ostatní vlivy prostředí nejsou uvažovány. Kyvadlo je rozkýváno pomocí počáteční výchylky od svislé osy. Na kyvadlo působí tlumení v podobě čepového tření v závěsu kyvadla. Velikost koeficientu tlumení je odhadnuta a volena s ohledem na použité materiály kontaktních ploch čepu a ložiska. Vliv tlumení je patrný také na grafu (obr. 4), který zobrazuje závislost velikosti úhlu výchylky na čase od počátku kývání až do ustálení.

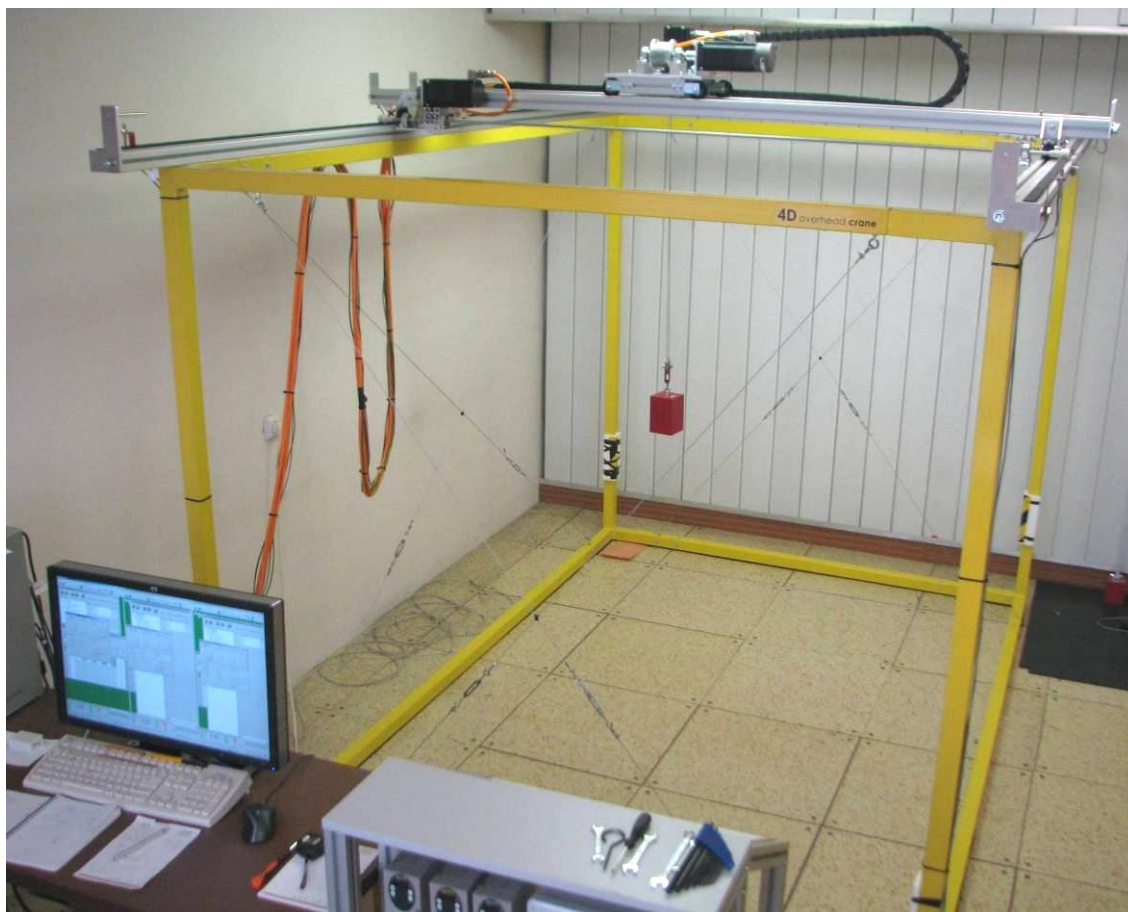


*Obr. 4: Rovinné kyvadlo v MSC.ADAMS,
záznam velikosti úhlu výchylky na čase*

6 EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVISTĚ

K verifikaci výpočtových modelů a simulací slouží mimo jiné laboratorní experimenty. Při vhodné stavbě laboratorní modely odpovídají více skutečným soustavám než modely počítačové. Je tomu tak především, protože při počítačovém modelování dochází k mnoha zjednodušením a zanedbáním důležitých vnitřních a vnějších účinků a parametrů. Počítačové modelování je závislé na počtu vstupních parametrů. Částečně lze těmto problémům předejít důkladným připravením detailního laboratorního modelu nebo opakováním simulace s využitím statistických metod. Laboratorní experimenty je ve většině případů nutné opět verifikovat na skutečných průmyslových aplikacích. Výhodou verifikace počítačové simulace pomocí laboratorních modelů je možnost opakování experimentu, než je tomu při verifikaci na skutečných často rozměrných soustavách, kdy opakování experimentu je často velmi nákladné.

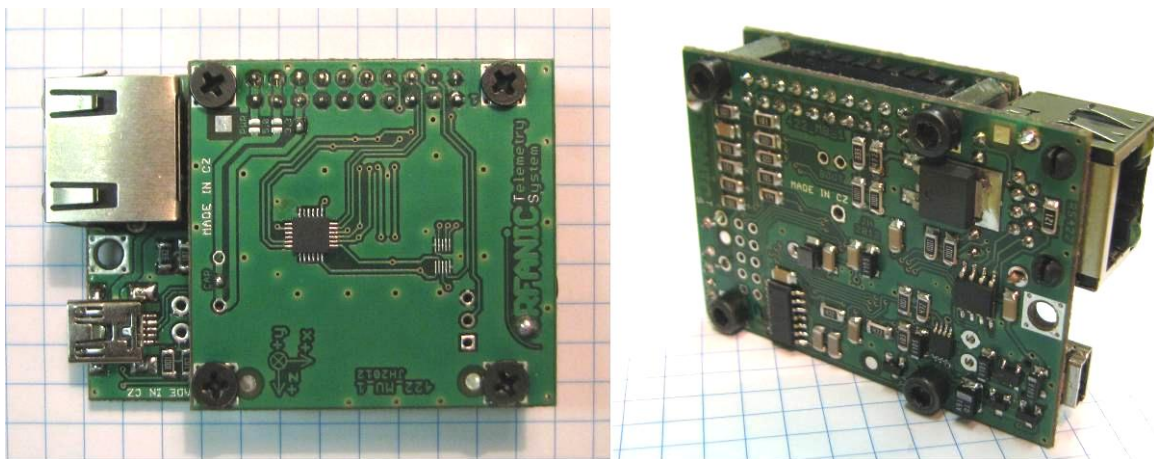
Za účelem ověření možnosti použití snímačů bylo postaveno laboratorní zařízení na provádění experimentů (obr. 5). Laboratorní zařízení odpovídá zmenšenému modelu mostového jeřábu a umožňuje všechny jeho pohyby. Pomocí krokových motorů je možné s břemenem manipulovat ve třech osách (pojezd mostu, pojezd kočky a zdvih břemene).



Obr. 5: Laboratorní pracoviště – 4D overhead CRANE

Snímače příčného zrychlení a úhlové rychlosti 6D MEMS

Měření je realizováno pomocí šestiosých snímačů zrychlení a úhlové rychlosti od firmy ORFANIC Telemetry System s.r.o. Snímače byly firmou vyvíjeny speciálně pro tuto aplikaci a jejich vývoj ještě nebyl úplně ukončen. V současné době se pracuje především na verifikaci snímaných dat, což řeší také tato práce. Byl použit šestiosý kapacitní snímač s označením MPU-6000 s velikostí čipu $4 \times 4 \times 0,9$ mm od firmy InvenSense. Jedná se o tříosý MEMS akcelerometr a tříosý MEMS gyroskop se zabudovaným čidlem pro měření teploty. Gyroskop je plně programovatelný s úplnou škálou stupňů ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 $^{\circ}/s$ s 16 bitovým A/D převodníkem. Akcelerometr je také plně programovatelný ve škále ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ± 16 g také s 16 bitovým A/D převodníkem. Snímač je osazen na desce, která je součástí snímacího modulu (obr. 6). Data jsou do počítače přenášena pomocí ethernetového kabelu nebo je možné data zaznamenat na mikroSD kartu. Data by u dalšího prototypu snímače mělo být možné posílat po bezdrátové síti.



Obr. 6: Snímač Oranic – 6 os

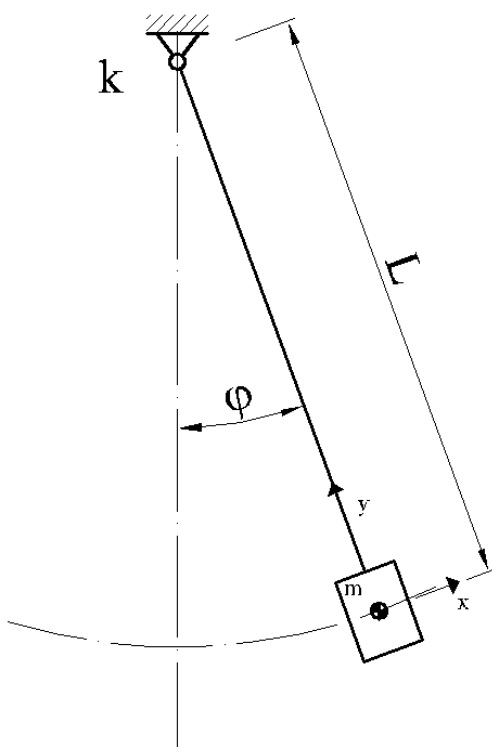
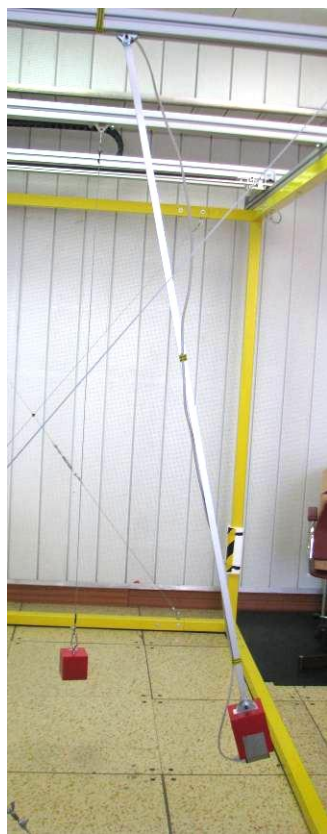
7 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Šestiosé snímače firmy Oranic jsou schopné zaznamenat v jednom okamžiku data ze všech subsnímačů. Tato skutečnost značně usnadňuje vyhodnocení měření, protože není nutné data následně synchronizovat v časové ose. Výstupem z měření jsou tedy translační zrychlení a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ve všech třech osách X, Y a Z. Dále jsou ve stejný okamžik zaznamenány hodnoty úhlové rychlosti otáčení ω [$^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$] kolem os X, Y a Z. Následně jsou z těchto hodnot výpočtem získána další data o poloze a orientaci snímače (břemene laboratorního jeřábu).

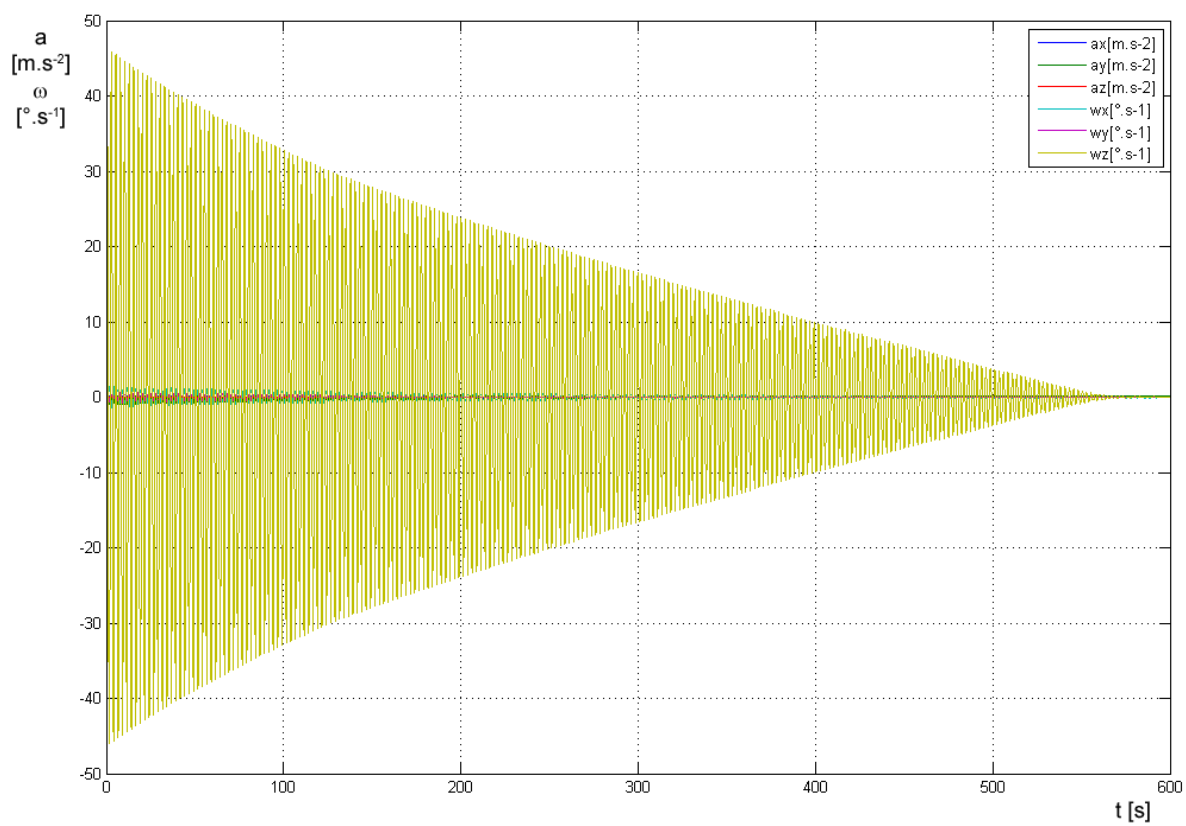
7.1 ROVINNÉ KYVADLO S PEVNÝM ZÁKLADEM

Prvním experimentem prováděným na laboratorním jeřábu byl základní experiment na modelu rovinného kyvadla (obr. 7). Tento jednoduchý model byl zvolen, protože výsledky experimentu jsou snadno předvídatelné vzhledem k jednoduchosti systému a také vzhledem k tomu, že chování tohoto systému je již dostatečně prostudováno. Model jednoduchého rovinného kyvadla byl tedy zvolen jako verifikační, který měl za cíl ověřit chování a případné možnosti měřicího řetězce.

Model kyvadla představují dvě tělesa. Prvním tělesem je závěs délky $l = 1482\text{mm}$ a hmotnosti $m_1 = 0,270\text{ kg}$, který je tvořen hliníkovou dutou tyčí čtverhranného průřezu (jákl). Druhé těleso je ocelové závaží z plného materiálu ($m_2 = 6,033\text{ kg}$) kumulující téměř všechnu hmotu kyvadla. Závaží má tvar přesného (frézovaného a nebroušeného) kvádrů ($80\times 80\times 100\text{ mm}$), jehož tvar umožňuje snadnou instalaci snímačů. Hmotnosti těles jsou voleny s ohledem na věrnost experimentu s modelem odpovídajícím přibližně matematickému kyvadlu. Vazba na základní těleso je realizována pomocí čepu uloženého v bronzových ložiscích. Graf (obr. 8) zobrazuje průběhy snímaných dat. Veličina s největší amplitudou je úhlová rychlost ω [$^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$] v ose Z.



Obr. 7: 2D kyvadlo s pevným základem a schéma kyvadla



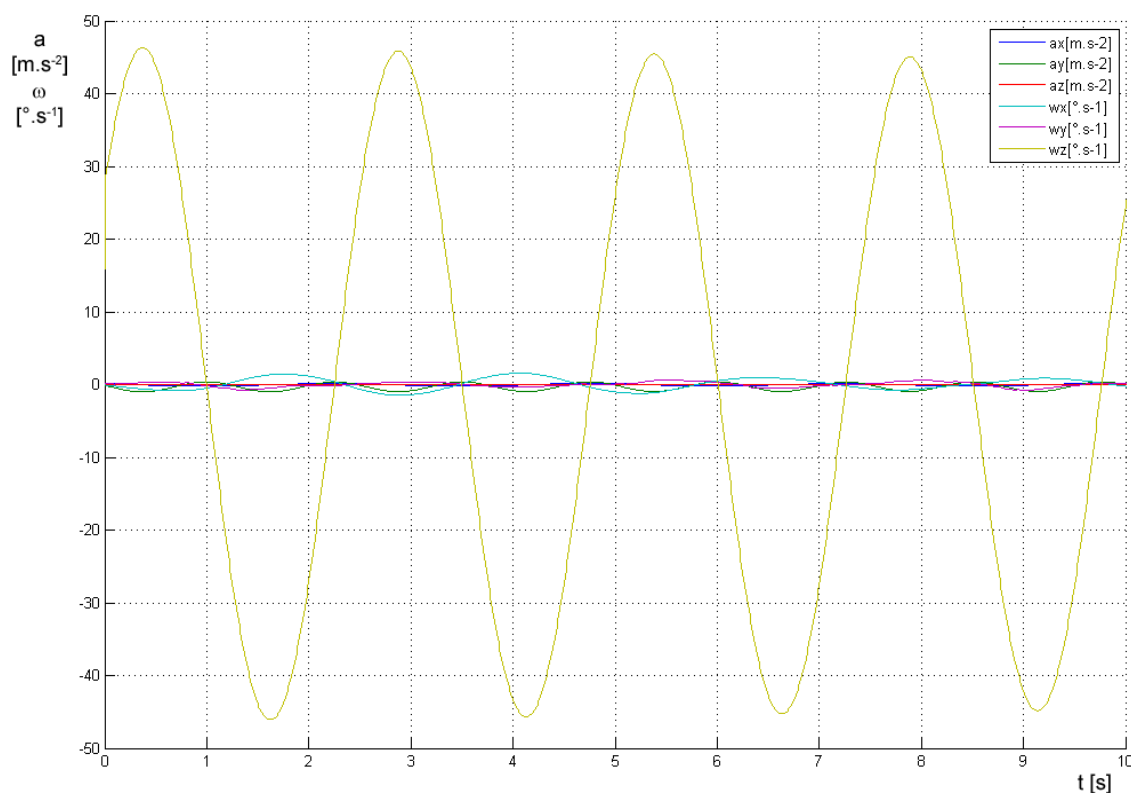
Obr. 8: 2D kyvadlo s pevným základem – průběh měření

Na detailu (obr. 9) je uveden výřez $t = 10$ s, kde je lépe vidět průběh této veličiny. Ostatní veličiny, jejichž amplitudy jsou řádově menší, jsou translační zrychlení a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$] ve všech třech osách a úhlová rychlost v osách X a Y. Legenda vpravo nahoře popisuje jednotlivé průběhy v grafu. Rovina kyvu kyvadla je vymezena osou X a Y. Osa Z je na tuto rovinu kolmá.

Za prvé z výše uvedeného logicky plyne, že translační zrychlení v ose Z by mělo být nulové ($a_z = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) a tedy také změna polohy v tomto směru by měla být nula ($s_z = 0 \text{ m}$). Dále velikost zrychlení v ose Y by měla odpovídat dostředivému (odstředivému) zrychlení a velikosti tíhového zrychlení pro příslušný směr (natočení snímače). Velikost amplitudy zrychlení pro osu X by měla odpovídat velikosti výchylky kyvadla od svislé osy.

Za druhé se budeme zabývat průběhy úhlové rychlosti otáčení kolem os. Úhlová rychlost natočení kolem osy X a Y by měla být vzhledem k výše uvedenému (rovina kyvu XY) nula ($\omega_x = 0 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$ a $\omega_y = 0 \text{ }^\circ\cdot\text{s}^{-1}$). Velikost výchylky sleduje průběh úhlové rychlosti otáčení kolem osy Z. Právě průběh této veličiny, jak bude dokázáno dále, je pro vyhodnocení experimentu zásadní.

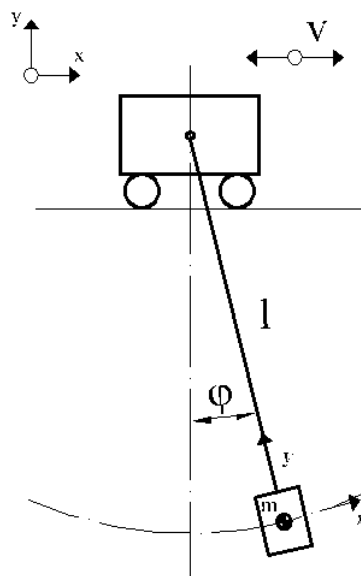
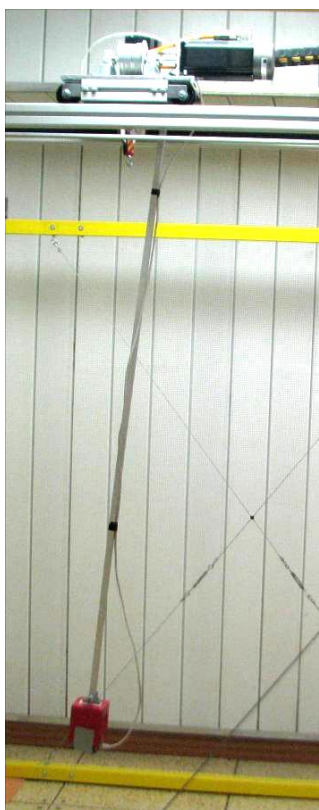
Třetí oblastí výsledků je posouzení systému jako celku. Vliv tlumení v závěsu kyvadla je patrný z celkového průběhu snímaných veličin (obr. 8). Je možné konstatovat, že po základním studiu výsledků se jedná o předvídaný průběh všech veličin (bez chyby měření) a experimentální model odpovídá teoretickým předpokladům.



Obr. 9: 2D kyvadlo s pevným základem – průběh měření

7.2 ROVINNÉ KYVADLO S POHYBLIVÝM ZÁVĚSEM

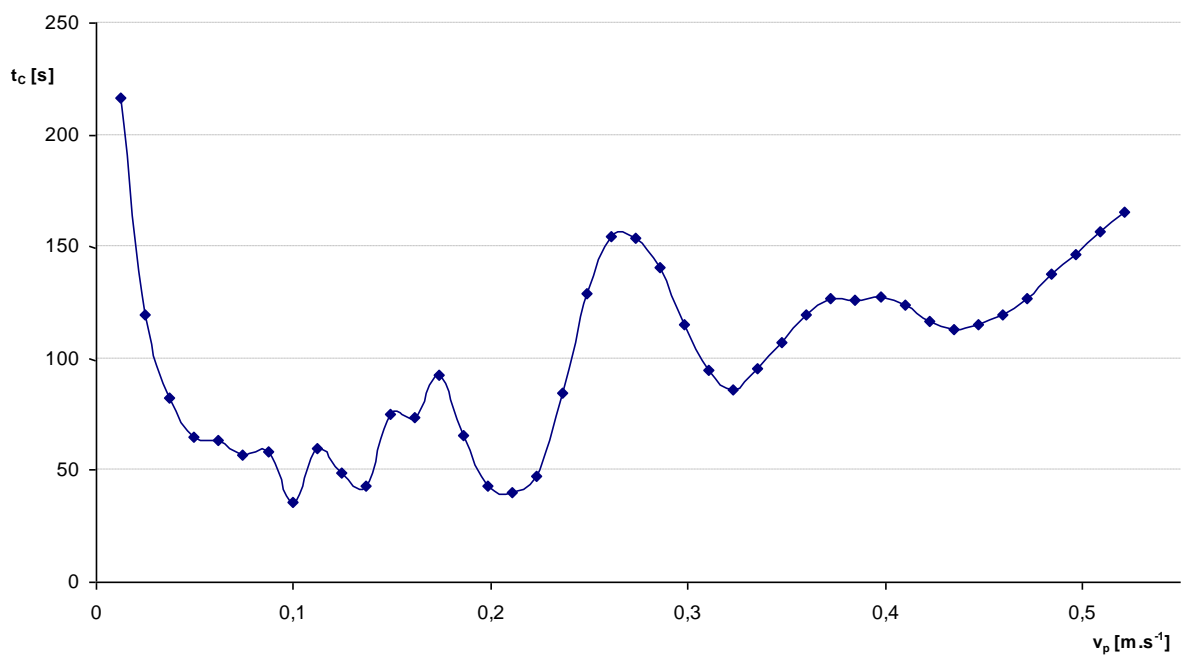
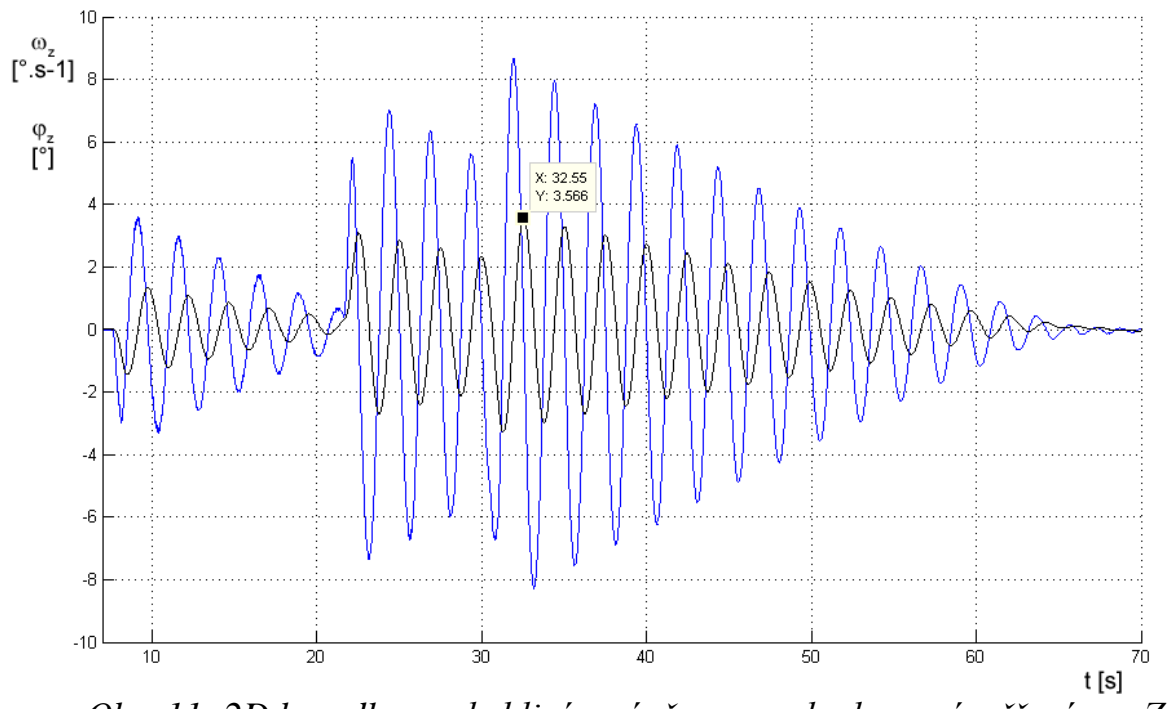
Rovinné kyvadlo s pohyblivým závěsem je třetím základním příkladem, který je experimentálně zkoumán. Experiment byl prováděn se stejným kyvadlem jako s rovinným kyvadlem v kapitole 7.1. Rozdíl oproti předchozímu rovinnému příkladu byl v uchycení závěsu na základovou desku kočky laboratorního jeřábu (obr. 10). Kočka jeřábu se pohybovala po přímé dráze (most jeřábu byl zabrzděn). Jak ukázaly předchozí výsledky, pro popis polohy břemene stačí v tomto případě pouze průběh úhlového natočení φ_z [°] kolem osy Z, které je vypočteno z úhlové rychlosti otáčení ω_z [°·s⁻¹] kolem příslušné osy. Poloha závěsného bodu (kočky) je získána z řídicí jednotky krokového motoru, který pohyb zajišťuje. Důvodem pro toto opatření je, že tyto hodnoty jsou přesnější než výsledné hodnoty získané měřením translačního zrychlení.



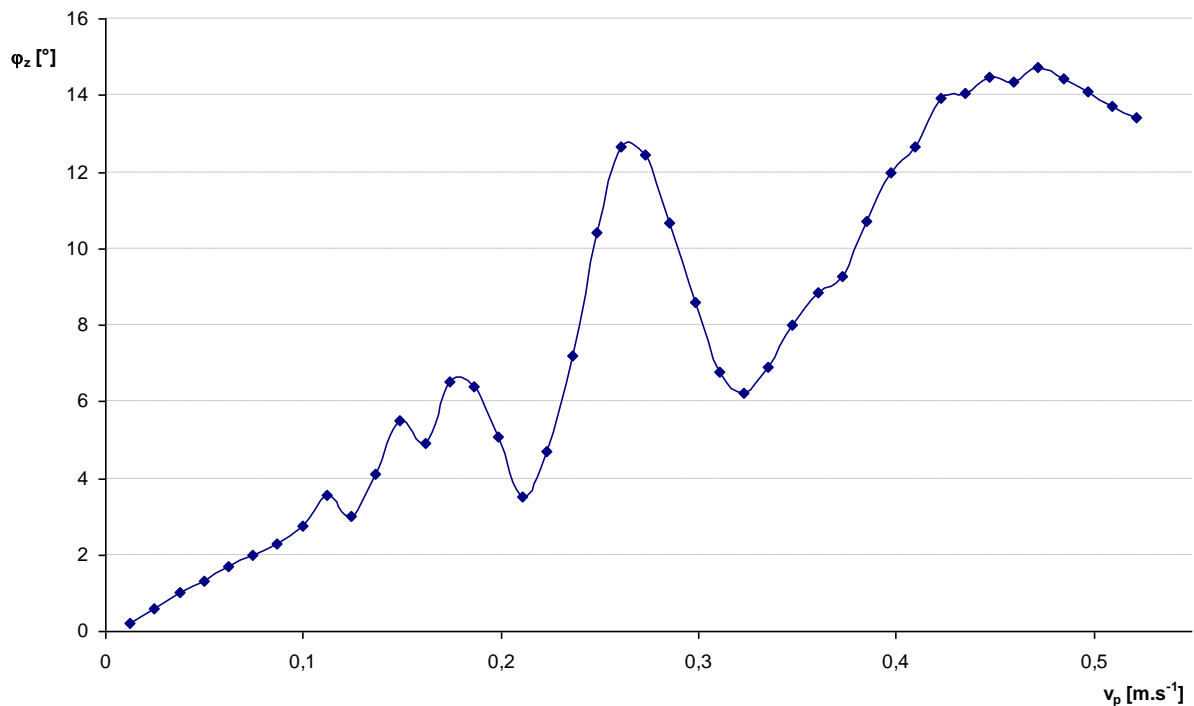
Obr. 10: Rovinné kyvadlo s pohyblivým závěsem.

Měření bylo opakováno pro různé rychlosti pojezdu kočky. Následující graf (obr. 11) ukazuje jeden z průběhů měření úhlové rychlosti ω_z [°·s⁻¹] v ose Z a vypočtenou hodnotu velikosti výchylky φ_z [°]. Jak je z grafu možné vyčíst, během pojezdu kočky již nedojde k ustálení břemene a dochází ke sčítání průběhů rychlostí. Experiment byl zaměřen na sledování dvou základních veličin, které jsou pro manipulaci s materiálem důležité. Za prvé byl sledován celkový čas t_c [s] přepravy břemene (závaží) v závislosti na rychlosti pojezdu kočky v_p [m·s⁻¹]. Čas byl sledován při přepravě z počátku až do koncové polohy a to až do ustálení břemene do klidu (obr. 12). Body označují jednotlivá měření a jsou následně proloženy hladkou

křivkou. Druhá sledovaná veličina je maximální velikost výchylky břemene φ_z [°] v závislosti na pojezdové rychlosti kočky v_p [m.s⁻¹] (obr. 12).



Obr. 12: 2D kyvadlo s pohyblivým závěsem, celkový čas do ustálení břemene v závislosti na pojezdové rychlosti kočky

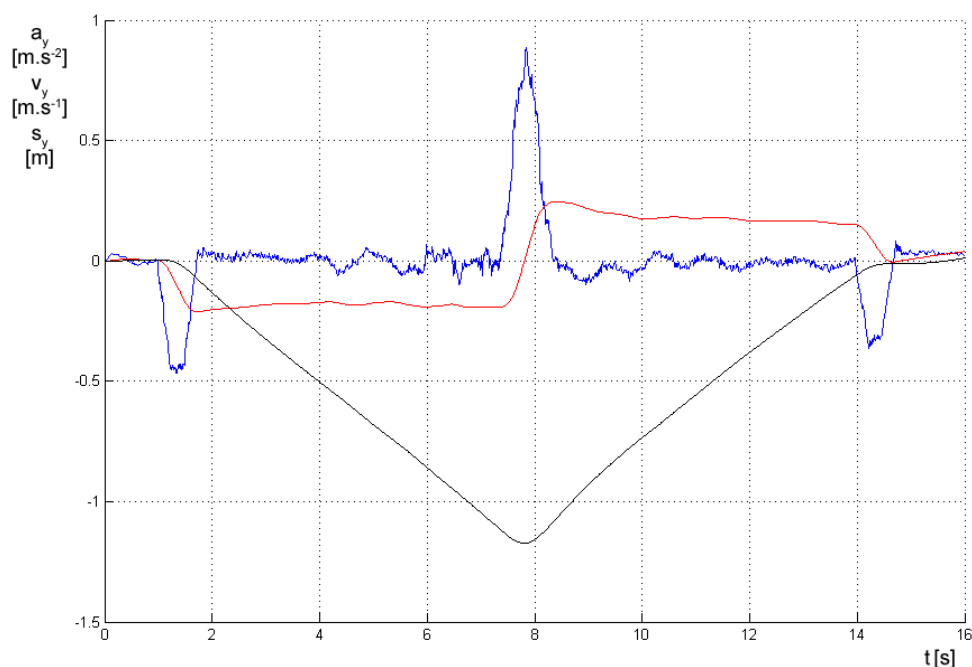


Obr. 13: 2D kyvadlo s pohyblivým závěsem, maximální výkyv břemene v závislosti na pojzdové rychlosti kočky

Z uvedených grafů (obr. 12 a 13) je možné vyčíst, že při nižších rychlostech pojezdu kočky nedochází k velkým výchylkám břemene, avšak celkový čas manipulace je velmi dlouhý. Obecně lze konstatovat, že s rostoucí pojzdovou rychlostí roste také velikost maximální výchylky břemene. Avšak s rostoucí pojzdovou rychlostí kočky nedochází obecně ke zkrácení doby manipulace. Oba průběhy ukazují, že existuje určitá konstelace vstupních veličin, která umožní efektivně tuto přepravu zkrátit, aby přitom nedocházelo k nadměrným výkyvům závaží od svislé osy. Vstupními veličinami se rozumí hmotnost břemene, délka závěsu, zrychlení kočky, rychlost kočky, dráha pohybu kočky atd. Výsledkem experimentu a posouzení výsledků dle výše uvedeného je zjištění vhodné pojzdové rychlosti pro manipulaci s laboratorním břemenem. Pokud sledujeme celkový čas z klidu do klidu břemene, je vhodné zvolit rychlost pojezdu kočky přibližně $v_{p1} = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ nebo $v_{p2} = 0,21 \text{ m.s}^{-1}$. Při těchto rychlostech dochází současně k relativně malé výchylce břemene $3,0^\circ$ až $3,8^\circ$. Sledujeme-li z nějakého důvodu velikost výchylky břemene φ_z [°], můžeme jednoznačně doporučit nízkou pojzdovou rychlost kočky. Současně ale roste celkový čas manipulace, který není ovlivněn zásadně kýváním břemene ale časem potřebným na pojezd kočky. Výsledky ukazují, že je možné zvolit velikost pojzdové rychlosti kočky tak, aby se pohyb kyvadla dostal proti fázi pohybu kočky. Při volbě pojzdové rychlosti v oblasti přibližně $v_{p1} = 0,1 \text{ m.s}^{-1}$ je náklad přepraven za minimální čas s akceptovatelnou velikostí bočních výchylek břemene do 3° .

7.3 ROVINNÉ KYVADLO – POHYBLIVÁ KOČKA A ZDVIH BŘEMENE

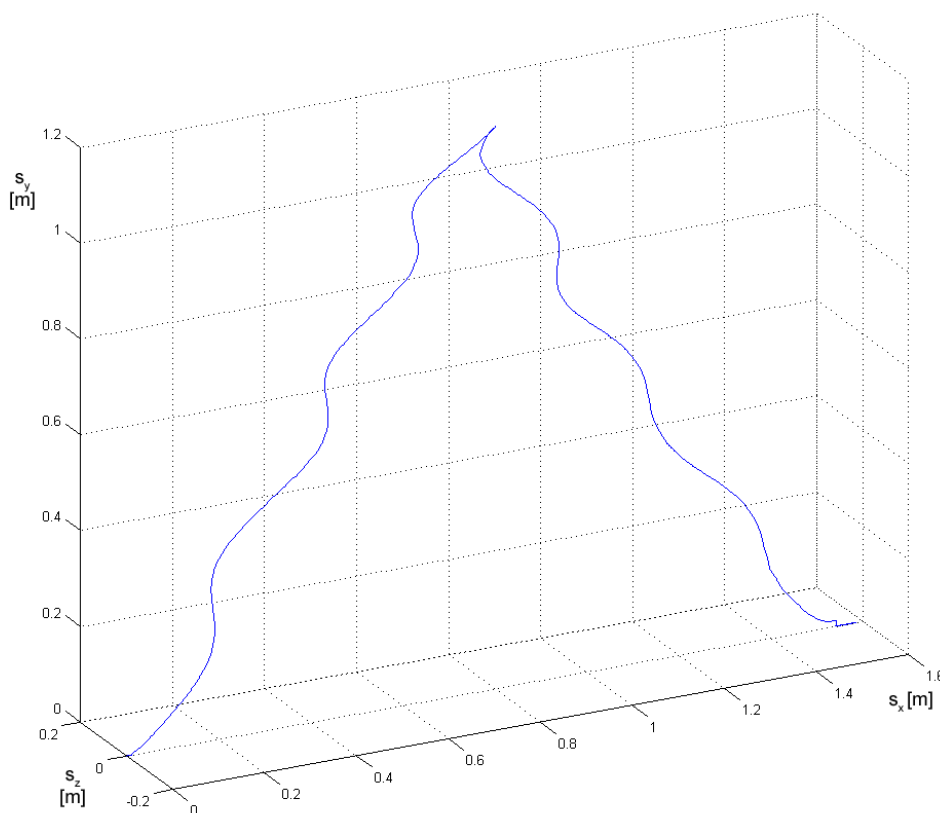
Další prováděný experiment vychází z předchozího rovinného kyvadla na pohyblivém závěsu a je doplněn o zdvih břemene. Model kyvadla představuje čtyři tělesa. Prvním tělesem je závěs proměnné délky $l = 150$ až 1380 mm a proměnné hmotnosti závislé na délce. Závěs je tvořen ocelovým lankem o průměru $d = 2$ mm s lanovým převodem $i = 2$. Druhé těleso je ocelové závaží z plného materiálu ($m_2 = 6,033$ kg) kumulující téměř všechnu hmotu kyvadla. Závaží je zavěšeno na jednoduché kladnici. Posledním tělesem je vozík kočky jeřábu. Hmotnosti těles jsou voleny s ohledem na věrnost experimentu s modelem odpovídajícím reálným součastem. Vazba na základní těleso (kočku jeřábu) je realizována přes lanový hladký buben.



Obr. 14: 2D kyvadlo s pohyblivým závěsem a zdvihem břemene, průběh zrychlení, rychlosti a polohy závaží v ose Y (osa zdvihu)

Vypočtené průběhy rychlosti v_y [$m.s^{-1}$] a polohy s_y [m] ze snímaných dat translačního zrychlení a_y [$m.s^{-2}$] jsou uvedeny v grafu (obr. 14). Graf je obrácen vlivem opačné orientace snímače, což nemá vliv na absolutní hodnotu sledované polohy břemene. Modrou barvou je znázorněno snímané zrychlení a_y , kde je názorně vidět počáteční zrychlení při zdvihání břemene a přibližně konstantní rychlost zdvihání. Dále průběh pokračuje brzděním v horní úvrati a následným začátkem spouštění břemene. Poslední výraznou změnou je brzdění břemene v nulové hodnotě. Tento průběh podle předpokladů sledují ostatní vypočtené veličiny. Nárůst rychlosti (červenou barvou) při akceleraci a ustálenou rychlost zdvihání. Výraznou změnu rychlosti v horní úvrati a opět přibližně konstantní rychlost spouštění břemene do zastavení. Podstatnou veličinou je průběh polohy koncového bodu závaží. Závaží je podle grafu postupně vyzvednuto do výšky $s_y = 1,19$ m. Hodnota

zjištěná pomocí řídicí jednotky krokového motoru se od hodnoty získané výpočtem ze snímaných dat liší přibližně o 0,04 m. Rozdíl hodnot je připisován chybě měření, filtraci signálu a integrační chybě při výpočtu. Přes tento drobný rozdíl je možné konstatovat, že by bylo možné výsledná data považovat za dostatečně přesná.

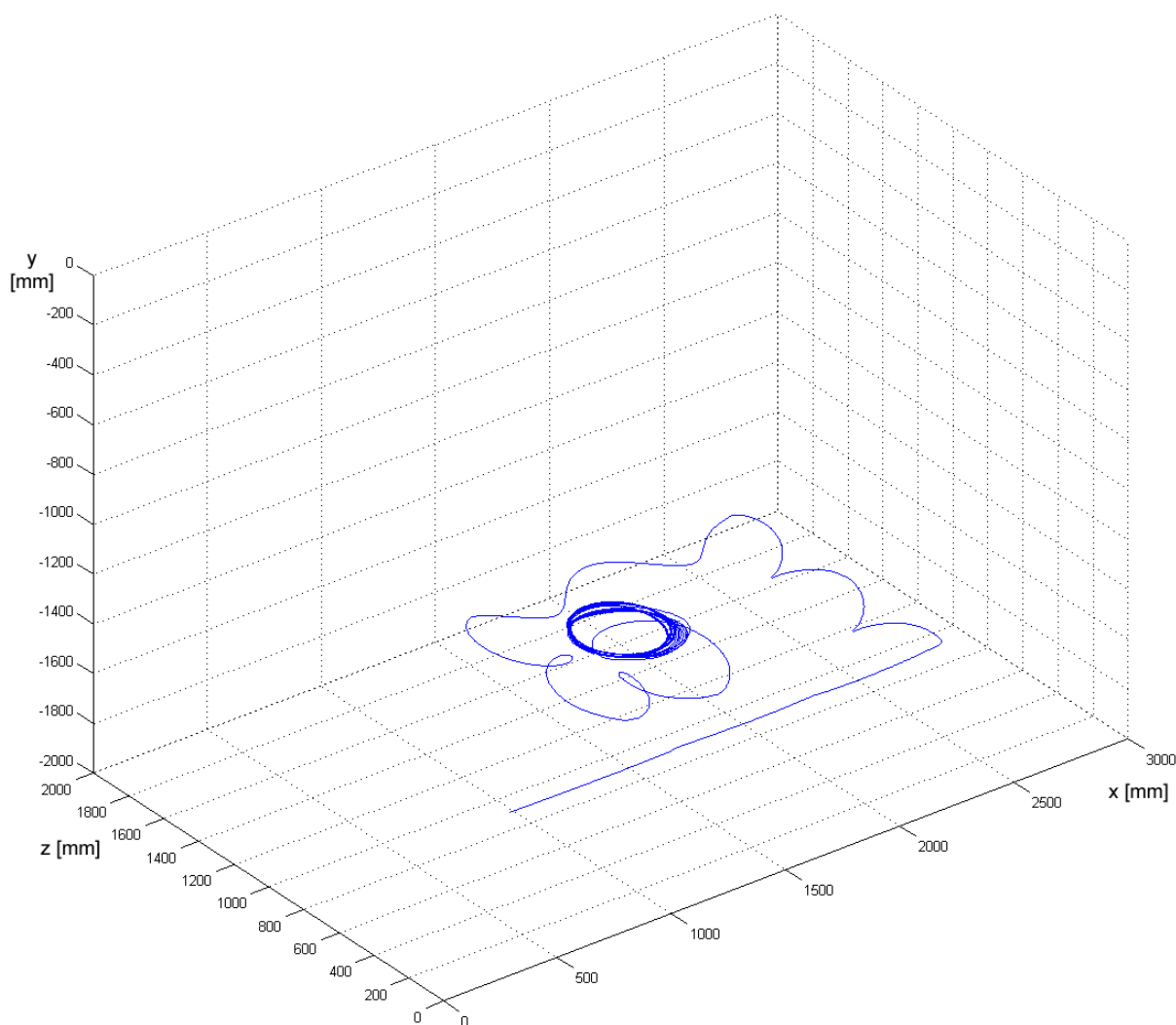


Obr. 15: 2D kyvadlo s pohyblivým závěsem a zdvihem břemene, průběh polohy závaží v prostoru

7.4 POHYB BŘEMENE V PROSTORU

Posledním experimentálně řešeným příkladem uvedeným v této práci je pohyb břemene v prostoru. Model kyvadla představují dvě tělesa. Prvním tělesem je závěs délky $l_1 = 1635$ mm a hmotnosti $m_1 = 0,08$ kg, který je tvořen ocelovým lankem o průměru $d = 2$ mm. Druhé těleso je ocelové závaží z plného materiálu ($m_2 = 4,030$ kg) kumulující téměř všechnu hmotu kyvadla. Vazba na základní těleso (kočku jeřábu) je realizována přes lanový hladký buben. Břemeno není během experimentu zvedáno ani spouštěno.

Obrázek níže (obr. 16) zobrazuje trajektorii pohybu břemene v pracovním prostoru laboratorního jeřábu. V počáteční fázi pohybu dochází podle předpokladu ke kývání především v jedné rovině vymezené osou závěsu kyvadla a směrem pohybu mostu jeřábu. Po zastavení mostu se začne pohybovat jeřábová kočka. To má za následek již prostorový pohyb. Tento obecný pohyb doprovází břemeno během celé dráhy až do zastavení na cílovém místě. Břemeno se ovšem kýve krouživým pohybem kolem svislice závěsného bodu až do ustálení. Zde zobrazený záznam je omezen z důvodu přehlednosti na $t = 80$ s od počátku pohybu.



Obr. 16: 3D kyvadlo s pohyblivým závěsem, trajektorie pohybu závaží v pracovním prostoru laboratorního jeřábu

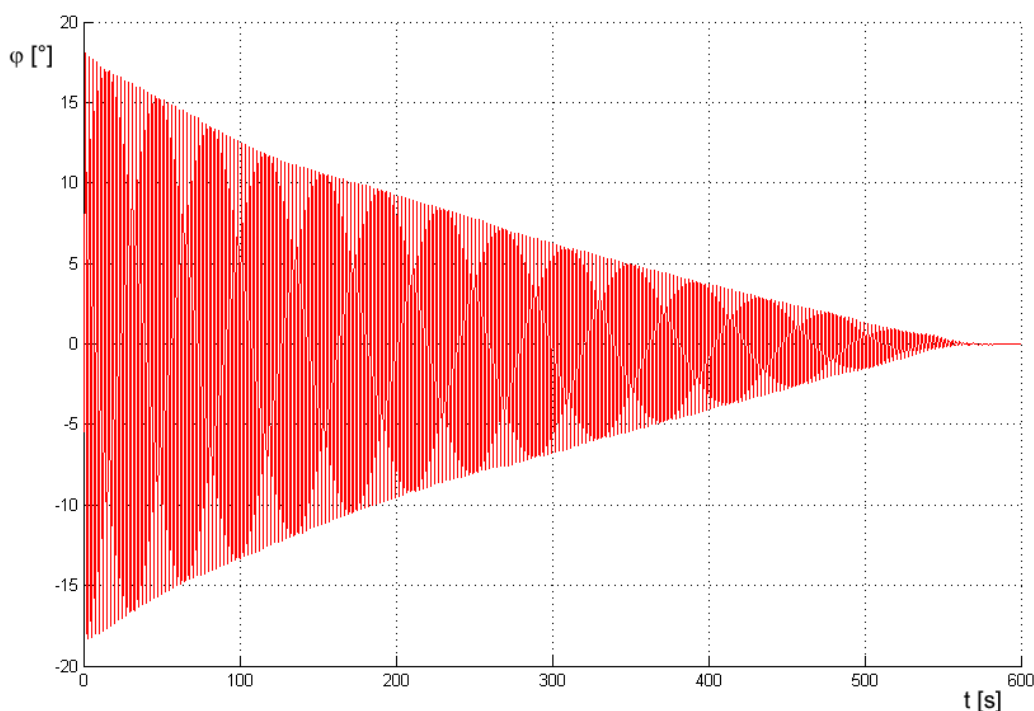
8 DISKUZE – VÝSLEDKY

Výsledky této práce lze rozdělit do dvou typů. První jsou výsledky matematických popisů břemene zavěšeného na lanovém závěsu. Jako jeden z možných příkladů matematického popisu břemene zavěšeného na jeřábové kočce je uvedena analytická identifikace rovinného modelu pojezdu jeřábu podle Noskiewiče [25]. Základní nevýhodou tohoto matematického modelu je popis děje pouze v jedné rovině a provedené zjednodušení linearizací stavového modelu systému. Chování dynamického systému kyvadel zavěšených na pevném nebo na pohyblivém závěsu lze považovat za nelineární. Linearizací však skutečnou situaci v podstatě idealizujeme a množina možných typů řešení studovaného matematického modelu je omezena na triviální případy, kdy je stavovým atraktorem pevný bod nebo limitní cyklus. Pohybové rovnice kyvadel a podobných

mechanických systémů lze zapsat jako soustavu diferenciálních rovnic prvního řádu a tyto následně řešit tzv. numerickou integrací. Časový průběh (obr. 1) úhlu výchylky φ ilustruje chování rovinného matematického kyvadla s tlumením. Předpokládáme, že tlumící síla je úměrná úhlové rychlosti. Průběh úhlu výchylky φ je podle předpokladu obrazem funkce kosinus s exponenciálně se zmenšující amplitudou.

Zvláštním případem matematického popisu břemene na lanovém závěsu může být simulace systému v MBS. Simulační počítačový experiment a jeho výsledky jsou zásadně závislé na znalosti všech parametrů a vlastností použitých prvků. Vliv tlumení je patrný na grafu níže (obr. 4), který zobrazuje závislost velikosti úhlu výchylky na čase od počátku kývání až do ustálení.

Experiment je prováděn na laboratorním pracovišti postaveném speciálně na řešení podobných úloh. Jednotlivé experimenty a postupně rostoucí složitost modelů je volena s ohledem na postupnou verifikaci výsledků. Výsledkem jsou poloha a orientace břemene v každém okamžiku jeho pohybu. Hmotnosti těles jsou voleny s ohledem na věrnost experimentu s modelem odpovídajícím přibližně matematickému kyvadlu. Vazba na základní těleso je realizována pomocí čepu uloženého v bronzových ložiscích. Graf (obr. 17) níže zobrazuje průběh úhlu výchylky φ [°] vypočtený z naměřených dat.

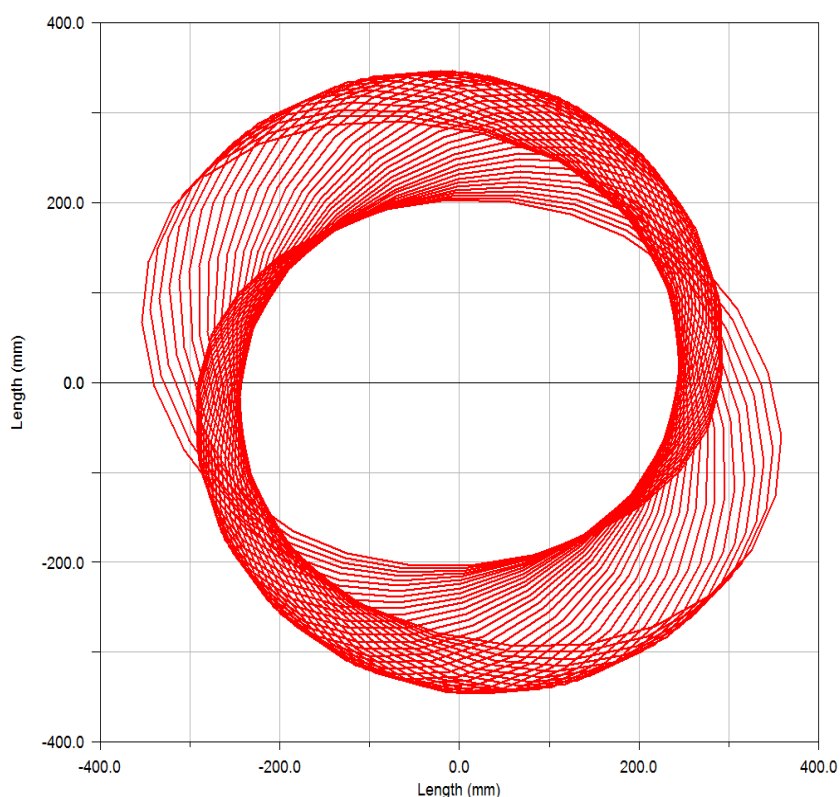


Obr. 17: 2D kyvadlo s pevným základem – průběh úhlu výchylky kyvadla

Pokud budeme vzájemně posuzovat výsledky zkoumání rovinného matematického kyvadla získané z matematického modelu (obr. 1), simulačního modelu MBS (obr. 4) a výsledky získané měřením z laboratorního experimentu (obr. 19), lze konstatovat, že první dva uvedené se podle předpokladu blíží výsledkům

laboratorního experimentu. Matematický model vycházející z pohybových rovnic se chová přesně podle zadaných rovnic. Stejně tak výsledky simulačního modelu představují idealizovaný stav vycházející ze zadaných hodnot do výpočtu. Skutečné kyvadlo popisují výsledky z laboratorního experimentu a je patrné, že v první části záznamu dochází k přibližně exponenciálnímu snižování amplitudy. Naproti tomu v závěrečné fázi kývání dochází spíše k lineárnímu poklesu amplitudy. Mohlo by se tedy jednat o kombinaci výsledků z obou matematických modelů, avšak nelze s určitostí určit míru vlivu jednotlivých dějů na uvedené matematické popisy.

Druhé srovnání vychází ze získaných výsledků simulačního počítačového experimentu a laboratorního experimentu prostorového kyvadla na pevném závěsu. Graf na obrázku (obr. 18) níže zobrazuje polohu koncového bodu modelu kyvadla v MBS.

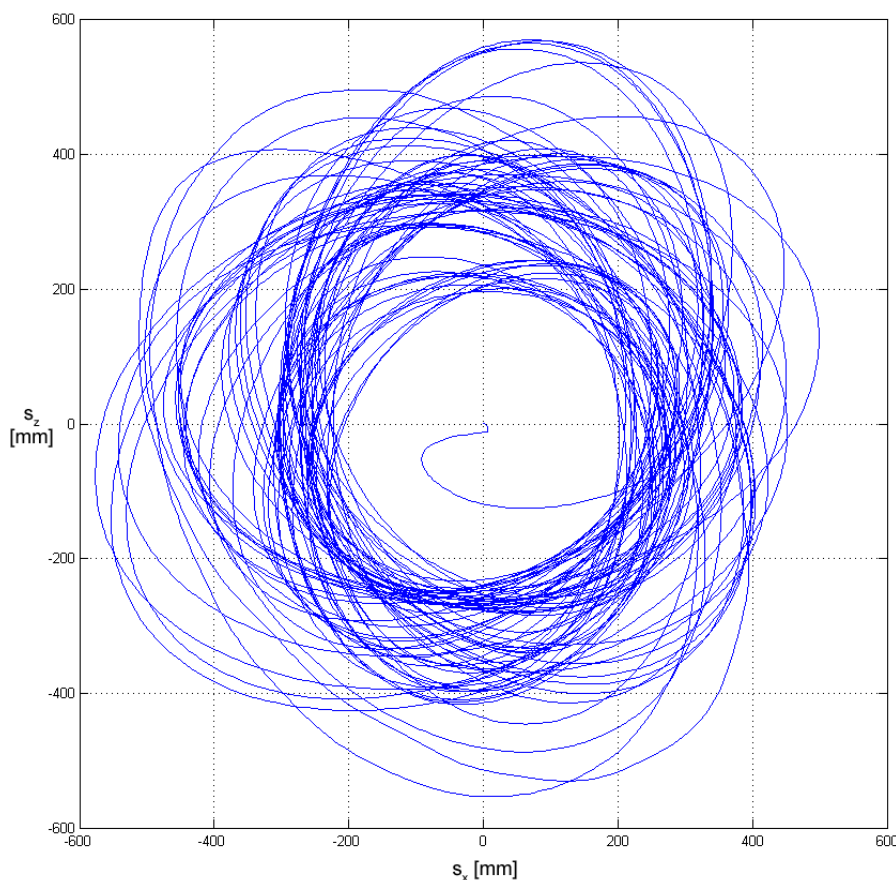


Obr. 18: Prostorové kyvadlo v MSC.ADAMS – pohled na těžiště kyvadla shora

Výsledkem laboratorního experimentu je graf (obr. 19), který zobrazuje polohu koncového bodu závaží (polohu čipu snímače). Výsledky jasně ukazují složitost pohybu skutečného prostorového kyvadla. Základním problémem experimentálního modelu je bod uchycení závěsu, který je v tomto případě realizován karabinou zavěšenou v oku. Teoreticky se jedná o bodový styk dvou válcových ploch, jejichž osy jsou na sebe kolmé. Prakticky se jedná o obecnou plochu, jejíž velikost a vliv na pohyb břemene nelze jednoduše stanovit.

Závěrem diskuze o výsledcích lze konstatovat, že břemeno zavěšené na kladnici jeřábu nemusí být vždy jednoduchým obecným typem mechanického oscilátoru. Verifikací matematických modelů pomocí laboratorního experimentu lze dosáhnout

uspokojivé shody výsledků, avšak nelze na matematický model nahlížet jako na obecné řešení problému. Hledat obecné řešení této problematiky je úkol velmi složitý a časově náročný. Existují aplikace, kde se experimenty na matematických nebo simulačních modelech uplatní a vykazují vynikající výsledky. Avšak pro oblast zájmu této práce lze výsledky z počítačových simulací považovat za nedostatečné. V případě aplikace složitějších matematických postupů, které umožňují pohlížet na problém jako na nelineární úlohu, narážíme na složitost sestavování příslušných rovnic do výpočtu a především je výpočet náročný na výpočtový čas. Výsledky získané matematickým aparátem jsou správné, avšak idealizují modelovanou skutečnost. Tím se výsledek často omezuje na předvídatelné průběhy. Experimentem byla potvrzena hypotéza o významném vlivu charakteristických materiálových vlastností, nepřesnosti výroby jednotlivých součástí a vlivu okolního prostředí na pohyb kyvadel obecnějších ale i základních typů. Tyto vlivy není matematický model schopen plně absorbovat bez mnohačetných verifikací. Modelování náhodných jevů je obecně nemožné. Především nelze tyto jevy předvídat a díky tomu je nelze úspěšně zapracovat do připravovaných modelů. Laboratorním experimentem byla ověřena možnost použití snímačů, které mohou identifikovat aktuální stav břemene bez znalosti charakteristických vlastností jednotlivých součástí, kontaktů a vlivu okolního prostředí.



Obr. 19: 3D kyvadlo s pevným základem, pohyb koncového bodu, vyhodnocení měření osa ZX (pohled shora)

9 ZÁVĚR

Cílem práce bylo ověřit možnosti nové koncepce jeřábu vhodného do automatického provozu. Automatizovaný jeřáb by měl být schopen pracovat s vysokou mírou vlastní interakce s okolním prostředím a z pohledu míry autonomie stroje na člověku pracovat v autonomním režimu. Tento přístup vyžaduje precizní znalost okolního prostředí a vlastního stavu stroje a břemene, které přepravuje. Cílem práce tedy bylo především ověřit možnosti použití snímačů pro identifikaci vlastního stavu stroje a břemene. Měření je realizováno pomocí šestiosých snímačů zrychlení a úhlové rychlosti typu MEMS od firmy ORFANIC Telemetry System s.r.o. Snímače byly vyvíjeny v úzké spolupráci s firmou speciálně pro tuto aplikaci.

Jednou z možností řešení práce bylo sestavit vhodné laboratorní pracoviště, které umožní zkoumat kinematiku a dynamiku mostového jeřábu. Laboratorní zařízení odpovídá zmenšenému modelu mostového jeřábu s pracovním prostorem $2 \times 2 \times 3$ metry a umožňuje všechny jeho pracovní pohyby. Pomocí krokových motorů je možné s břemenem manipulovat ve třech osách (pojezd mostu, pojezd kočky a zdvih břemene). Laboratorní pracoviště svými možnostmi přesahuje tuto práci a může sloužit k pokračování výzkumu chování břemen zavěšených na lanovém závěsu.

Laboratorní experiment je rozdělen do pěti základních experimentů s kyvadlem. Tyto základní experimenty přehledně ilustrují možnou identifikaci jednotlivých kinematických a dynamických dějů. První experiment je uskutečňován na modelu, který se blíží svými vlastnostmi rovinnému matematickému kyvadlu. Tento model je vybrán především proto, že jeho průběh je dostatečně prostudován a všechny snímané veličiny jsou odvoditelné podle předem známých vztahů. Posledním prováděným experimentem je pohyb břemene v pracovním prostoru laboratorního jeřábu. Výsledkem je trajektorie pohybu koncového bodu kyvadla a jeho orientace. Výsledky experimentu potvrzují, že je možné tyto snímače použít k popisu vlastního stavu břemene jeho polohy a orientace.

Použití systémů založených na snímačích typu MEMS obecně nic nebrání a tyto systémy mohou přispět k automatizaci jeřábové techniky. Především mohou najít uplatnění u systémů, které omezují kývání břemene. Problematiku lze obecně aplikovat na další druhy manipulátorů, kde dochází k obdobnému rozkývání přepravovaného materiálu jako u jeřábů.

Přínos této práce je především v novém pohledu na způsob identifikace stavu břemene zavěšeném na háku jeřábu. Zejména se jedná o popis aktuální polohy a orientace břemene na lanovém závěsu pomocí vhodných snímačů. Lze konstatovat, že bylo provedeno původní řešení, jehož publikace není známa. Práce v tomto ohledu prohloubila poznání v oblasti studia kinematických a dynamických dějů probíhajících při manipulaci s materiálem pomocí jeřábové techniky. Konkrétní příklady a jejich zde uvedené výsledky jsou přínosem pro praktické využití zejména v návrhu jeřábů s možností pracovat v autonomním režimu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BENHIDJEB, A.; GISSINGER, G. L. Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control. *Control Engineering Practice*. 1995, n. 12, pp. 1687-1696.
- [2] BOOM, T. J. J.; KLAASSENS, J. B.; MEILAND, R. REAL-TIME TIME-OPTIMAL CONTROL FOR A NONLINEAR CONTAINER CRANE USING A NEURAL NETWORK. *Informatics in Control : Automation and Robotics II*. 2007, n. xx, pp. 79-84.
- [3] DAI, Shi-jie, et al. Sliding Model Fuzzy Control for a Bridge Crane. *Fuzzy Info. and Eng.*. 2009, n. 2, pp. 23-30.
- [4] DAQAQ, M. F.; MASOUD, Z. N. Nonlinear Input-Shaping Controller for Quay-Side Container Cranes. *Nonlinear Dynamics*. 2006, n. 45, pp. 149-170.
- [5] DISSANAYAKE, M. W. M. G., et al. Control of Load Sway in Enhanced Container Handling Cranes. The University of Sydney NSW, 2006, pp.241-251
- [6] CHANG, C. Y.; CHIANG, K. H. Fuzzy projection control law and its application to the overhead crane. *Mechatronics*. 2008, n. 18, pp. 607-615.
- [7] CHANG, C. Y.; CHIANG, K. H. Intelligent fuzzy accelerated method for the nonlinear 3-D crane control. *Expert Systems with Applications*. 2009, n. 36, pp. 5750-5752.
- [8] CHANG, C. Y.; CHIANG, T. C. Overhead cranes fuzzy control design with deadzone compensation. *Neural Comput & Applic*. 2009, n. 18, pp. 749-757.
- [9] CHANG, Cheng-Yuan. The switching algorithm for the control of overhead crane. *Neural Comput & Applic*. 2006, n. 15, pp. 350-358.
- [10] CHANG, C. Y.; HSU, S.; CHIANG, K. H. A practical fuzzy controllers scheme of overhead crane. *Journal of Control Theory and Applications*. 2005, n. 3, pp. 266-270.
- [11] CHEN, Y. J.; WANG, W. J.; CHANG, C. L. . Guaranteed cost control for an overhead crane with practical constraints: Fuzzy descriptor system approach. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2009, n. 22, pp. 639-645.
- [12] CHO, H. Ch.; LEE, K. S. Adaptive control and stability analysis of nonlinear crane systems with perturbation. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008, n. 22, pp. 1091-1098.
- [13] CHO, Hyun Cheol, et al. Lyapunov theory based robust control of complicated nonlinear mechanical systems with uncertainty. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008, n. 22, pp. 2142-2150.
- [14] KAWAI, H.; KIM, Y. B.; CHOI, Y. W. Anti-sway system with image sensor for container cranes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009, n. 23, pp. 2757-2765.
- [15] KULKA, Jozef; FERENČÍKOVÁ, Mária. Využitie gyroskopického javu pri natáčaní bremena. *Zdvihací zařízení v teorii a praxi*. 2007, č. 2, s. 38-42, ISSN 1802-2812.

- [16] LEUNG, A. W. T.; TAM, C. M.; LIU, D. K. Comparative study of artificial neural networks and multiple regression analysis for predicting hoisting times of tower cranes. *Building and Environment*. 2001, n. 36, pp. 457-467.
- [17] LIU, Diantong, et al. Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane. *Mechatronics*. 2005, n. 15, pp. 505-522.
- [18] LIU, D.; GUO, W.; YI, J. GA-Based Composite Sliding Mode Fuzzy Control for Double-Pendulum-Type Overhead Crane. *FSKD*. 2005, n. 3613, pp. 792-801.
- [19] MAHFOUF, M., et al. Fuzzy Logic-Based Anti-Sway Control Design for Overhead Cranes. *Neural Comput & Applic*. 2000, n. 9, pp. 38-43.
- [20] MASOUD, Z. N. Effect of hoisting cable elasticity on anti-sway controllers of quay-side container cranes. *Nonlinear Dynamics*. 2009, n. 58, pp. 129-140.
- [21] MASOUD, Z. N.; NAYFEH, A. H. Sway Reduction on Container Cranes Using Delayed Feedback Controller. *Nonlinear Dynamics*. 2003, n. 34, pp. 347-358.
- [22] MÉNDEZ, J. A., et al. An Application of a Neural Self-Tuning Controller to an Overhead Crane. *Neural Comput & Applic*. 1999, n. 8, pp. 143-150.
- [23] NAKAZONO, Kunihiko, et al. Vibration control of load for rotary crane system using neural network with GA-based training. *Artif Life Robotics*. 2008, n. 13, pp. 98-101.
- [24] NAYFEH, N. A.; BAUMANN, W. T. Nonlinear analysis of time-delay position feedback control of container cranes. *Nonlinear Dynamics*. 2008, n. 53, pp. 75-88.
- [25] NOSKIEVIČ, P.; VANĚK, M.; STRNAD, K. Použití programu MATLAB – SIMULINK a VIRTUAL REALITY TOOLBOXU při návrhu a experimentálním ověření řízení jeřábové kočky.
- [26] ROSENFELD, Y.; SHAPIRA, A. Automation of existing tower cranes: economic and technological feasibility. *Automation in Construction*. 1998, n. 7, pp. 285-298.
- [27] ROSENFELD, Yehiel. Automation of existing cranes: from concept to prototype. *Automation in Construction*. 1995, n. 4, pp. 125-138.
- [28] SAWODNY, O.; ASCHEMANN, H.; LAHRES, S. An automated gantry crane as a large workspace robot. *Control Engineering Practice*. 2002, n. 10, pp. 1323-1338.
- [29] SUH, Jin-Ho, et al. Anti-Sway Position Control of an Automated Transfer Crane Based on Neural Network Predictive PID Controller. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2005, n. 2, pp. 505-519.
- [30] TERASHIMA, K.; SHEN, Y.; YANO, K. Modeling and optimal control of a rotary crane using the straight transfer transformation method. *Control Engineering Practice*. 2007, n. 15, pp. 1179-1192.
- [31] WILSON, B. H., et al. A virtual environment for training overhead crane operators: real-time implementation. *IIE Transactions*. 1998, n. 30, pp. 589-595.

AUTOROVO CV

Jméno a příjmení: Ing. Martin Kubín
Datum narození: 10. 10. 1983
Místo narození: Chrudim



Vzdělání:

- 2008 – 2013 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Disertační práce: Vývoj nové koncepce autonomních jeřábů
- 2003 – 2008 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství
Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Diplomová práce: Zajišťovací mechanismus kontejneru
- 1999 – 2003 Střední průmyslová škola strojnická Chrudim

Odborná praxe:

- 2013 – dosud MENDELU v Brně, Agronomická fakulta, ÚZPET
vědecko-výzkumný pracovník
- 2012 – 2013 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ÚADI
technický pracovník
- 2012 – 2013 ORFANIC s.r.o.
spolupráce na projektu
- 2011 – 2012 UMIKOV CZ s.r.o.
spolupráce na projektu
- 2009 – 2011 EUROM s.r.o.
spolupráce na projektu
- 2008 – 2012 VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ÚADI a ÚK
výuka a externí výuka
- 2008 – 2009 LECOM Ledec a.s.
spolupráce na projektu
- 2006 – 2008 SVAN Chrudim s.r.o.
konstruktér

Kontakt:

e-mail: kubin.martin@email.cz

ABSTRACT

Předložená dizertační práce si klade za cíl ověřit možnosti použití kapacitních snímačů zrychlení na jeřábové a manipulační technice. Kapacitní snímače zrychlení typu MEMS jsou dnes hojně využívány v elektronice, např. notebooky a mobilní telefony. Použití těchto snímačů by mohlo pomoci v automatizaci jeřábů, což by ve výsledku snížilo finanční náklady na manipulaci s materiálem. Precizní znalost vlastního stavu a polohy stroje a břemene je nezbytnou součástí autonomních manipulátorů. První část práce se zabývá rešerší vědecké práce u nás v ČR a ve světě. Dále jsou popsány možnosti matematického popisu pohybu břemene na lanovém závěsu s uvedenými řešenými příklady. Jedna z kapitol se věnuje popisu snímačů, které by mohly být při automatizaci jeřábů použity. Hlavní částí práce je popis několika experimentů. Experimenty byly prováděny na laboratorním pracovišti postaveném speciálně pro tato měření. Jsou popsány především základní jednodušší modely, na kterých jsou názorně ukázány možnosti snímače. Poslední část práce se věnuje nastínění dalšího možného postupu výzkumu v této oblasti.

The presented PhD thesis aims to verify the possibilities of using capacitive accelerate sensors on the crane and handling technology. Capacitive acceleration sensors of MEMS type are currently widely used in electronics, e.g. laptops and mobile phones. Using these sensors could help to automate cranes, which would eventually reduce the financial costs of material handling. Precise knowledge of their own condition and position of the machine and the load is a necessary part of autonomous manipulators. The first part of thesis deals with the exploration of scientific research in the Czech Republic and abroad. Furthermore the options of mathematical description of moving the load on the rope tow are described including solved examples. One chapter is devoted to the description of sensors that could be used in the automation of cranes. The main part is focused on description of several experiments. The experiments were conducted in a lab constructed specially for this measurement. Mainly basic simpler models are described illustrating abilities of the sensor. The last part outlines further possible progress of research in this area.