

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program	P 2612	Elektrotechnika a informatika
Studijní obor	2612V045	Technická kybernetika

Řízení plošiny se šesti stupni volnosti s ohledem na
bezpečnost zkoušeného objektu.

Six degrees of freedom platform control in relation to
safety of part under test

Autoreferát disertační práce

Pracoviště:

Ústav mechatroniky a technické informatiky
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Technická univerzita v Liberci
Hálkova 6
461 17 Liberec

Autor:

Ing. Aleš Lufinka

Vedoucí disertační práce:

Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.

Anotace

Plošina se šesti stupni volnosti je zařízení pro testování vlastností mechanických celků při obecném prostorovém buzení. Protože se předpokládá využití plošiny pro testování dílů v interakci s člověkem (např. automobilové sedadlo a řidič), musí celé zařízení splňovat parametry normy ČSN EN ISO 13090-1. V ní jsou definovány maximální přípustné hodnoty zátěže pokusné osoby a neméně závažnost je kladena na technické prostředky řízení experimentu, aby v žádné situaci nemohlo dojít k překročení limitních hodnot. Proto musí být experimentální zařízení vybaveno kromě hlavního řídicího systému, který v normálním provozu ovládá celé zařízení, ještě záložním havarijním systémem. Ten monitoruje celý proces a v případě jakékoliv poruchy dokáže zastavit pohyb experimentálního zařízení nezávisle na stavu ostatních obvodů. Havarijní zastavení navíc musí být plynulé, aby při něm nedošlo ke skokovým změnám rychlosti a tím vzniku nepřipustných špiček zrychlení.

Náplní práce je realizace hardwaru a softwaru hlavního i havarijního řídicího systému plošiny a optimalizace jejich statických a dynamických parametrů tak, aby byly splněny požadavky výše uvedené normy.

Annotation

The six degrees of freedom platform is a device for testing of machine elements and systems properties by 3-axial excitation. Because we expect to use this device for human – mechanic parts interaction testing (for example a car seat with a driver), the device have to suit safety requirements of the ČSN EN ISO 13090 standard. This standard defines maximal excitation values for human tests and dictates experiment control technical facilities for fear of limit values break. It means, the experimental device have to contain main control system and safety system. The main system is used for regular control and safety system supervises activity of device and can shut down platform independently from the main control in case of any error. The emergency stop procedure has to handle the platform smoothly with no acceleration peaks.

The thesis covers hardware and software design of control and safety systems for six degrees of freedom platform and static and dynamic optimalization their parameters to fulfillment of the safety requirements of the ČSN EN ISO 13090 standard.

Obsah

1.	ÚVOD	4
2.	STANOVENÍ KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU PLOŠINY	4
2.1.	POPIS PLOŠINY SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI	4
2.2.	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PLOŠINY	5
2.3.	NORMA ČSN EN ISO 13090-1	7
2.4.	KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU	9
3.	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM	10
3.1.	HARDWARE ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU	10
3.2.	SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ	14
3.3.	OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU	16
3.4.	ŘÍDÍCÍ SYSTÉM - SHRNUÍ	22
4.	BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM	23
4.1.	STANOVENÍ KONCEPCE BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	23
4.2.	KOMPONENTY BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	25
Informační systém		27
4.3.	CELKOVÉ ZAPOJENÍ BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	29
4.4.	OVĚŘENÍ ČINNOSTI BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU	30
	Obr. 17 Závěrečné testy bezpečnostního systému	30
5.	ZÁVĚR	31
6.	PROTOKOL O SCHVÁLENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU	32
7.	PŘEHLED DALŠÍCH PUBLIKACÍ	33

1. ÚVOD

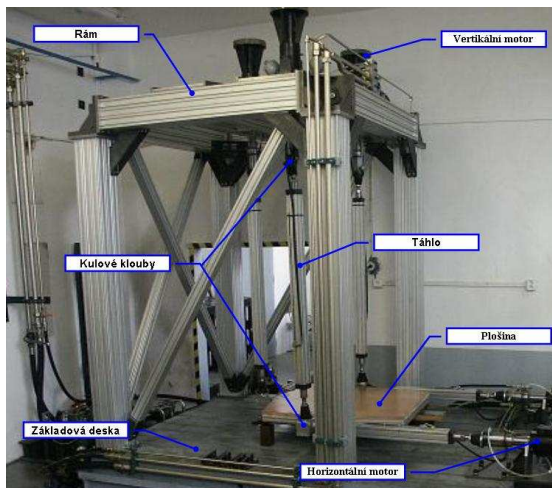
Hydrodynamická laboratoř vznikla při Katedře částí a mechanismů strojů v roce 1997 za podpory MŠMT v rámci grantů IN 96014 a VS 97085. Zařízení laboratoře se využívá pro výzkum a testování zařízení a strojních součástí v různých oblastech a oborech. Podstatnou část výzkumu již od počátku tvoří problematika vibroizolací strojních zařízení, zejména pak automobilových sedaček. V rámci tohoto výzkumu bylo však možno testovat sedačky jen při jednoosém zatížení, protože laboratoř disponovala jen jednoduchými lineárními hydromotory. Jednoosé zatěžování ale neumožňuje plně simulovat reálné provozní podmínky, protože například sedačky v nákladních automobilech nebo zemních strojích jsou vystavovány i značnému bočnímu namáhání. Z tohoto důvodu byla ze strany průmyslových podniků, které se vývojem sedaček zabývají, požadována možnost simulace reálných provozních podmínek – prostorového buzení sedačky v laboratoři. V rámci výzkumného záměru MSM 4674788501 Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem bylo proto rozhodnuto vybudovat v hydrodynamické laboratoři unikátní zařízení pro prostorové buzení – plošinu se šesti stupni volnosti. Ta umožňuje vykonávat s testovaným dílem (sedačkou) obecný prostorový pohyb a simulovat tak reálný provoz (např. jízdu terénem). Konstrukce se ujal tým odborníků z Katedry částí a mechanismů strojů a Katedry mechaniky, pružnosti a pevnosti strojní fakulty. Během konstrukce mechanické části plošiny byl vznesen ještě další požadavek na možnost testování sedaček nejen s umělou zátěží, ale přímo s živým člověkem. Tím by se laboratorní podmínky dále přiblížily reálným, protože náhradní umělá zátěž na sedačce neodpovídá ve všech parametrech vlastnostem lidského těla. Tento požadavek však přinesl úplně nové požadavky na ovládací systém celého zařízení, který pro zkoušky s člověkem musí splňovat bezpečnostní kritéria daná normou ČSN EN ISO 13090-1 „Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech“ [1].

Mým úkolem v týmu, který realizoval stavbu plošiny se šesti stupni volnosti, byl komplexní návrh a praktická realizace všech hardwarových i softwarových prostředků, sloužících k řízení celého zařízení, tedy vytvoření a zprovoznění ovládacího systému, který umožní řídit pohyby plošiny s požadovanou přesností a dynamickými vlastnostmi při splnění všech bezpečnostních požadavků kladených normou ČSN EN ISO 13090-1 na zkušební zařízení pro testy mechanických dílů v interakci s lidmi. V disertační práci je popsán kompletní postup návrhu, praktické realizace a optimalizace ovládacího systému plošiny se šesti stupni volnosti.

2. STANOVENÍ KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU PLOŠINY

2.1. POPIS PLOŠINY SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI

Plošina je elektrohydraulické zařízení. Základovou desku tvoří litinové drážkové desky zalité v betonovém bloku. Na deskách jsou ukotveny tři horizontální lineární hydromotory a pevný rám z hliníkových profilů ITEM, který na svém vrcholu nese další tři vertikální motory. Plošina je tedy vybavena celkem šesti shodnými motory. Na pístnici každého hydromotru je připevněno přes kulový kloub táhlo. Na druhý konec táhla je opět přes kulový kloub upevněna plošina, na kterou se pak kotví testovaný objekt.



Obr. 1 Celkový pohled na plošinu

Kombinací pohybů jednotlivých motorů lze docílit libovolného pohybu plošiny a tím i testovaného objektu. Rozsah pohybů je dán mechanickou konstrukcí a vychází z maximálního zdvihu jednotlivých motorů, který je $\pm 100\text{mm}$. Pro bezpečný provoz však byl stanoven jen maximální rozsah $\pm 70\text{mm}$, na každé straně tak zbývá 30mm pro dobrždění při eventuelních chybových stavech. Nosnost plošiny je přibližně 250 kg a maximálně dosahovaná rychlost motorů při plném napájecím tlaku je přibližně 1m/s .

2.2. TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PLOŠINY

Plošina je osazena šesti shodnými lineárními hydraulickými motory SAVAD 20-200 M019 firmy Inova Praha. Před použitím na plošině na nich byla provedena celková repase, spočívající v nové povrchové úpravě pístnice a výměně všech stěrácích a těsnících elementů. Motor SAVAD 20-200 M019 má zdvih 200mm a vyvine maximální sílu 20kN při plném provozním tlaku hydraulické kapaliny 25Mpa . V duté pístnici je instalován indukční snímač polohy - klasický LVDT snímač se střídavým napájením 2V s frekvencí 5kHz . Na boku válce je instalační místo pro řídicí servoventil a akumulátory tlaku.

Pro řízení motoru je použit proporcionální servoventil Rexroth 4WS2EM 10. Jde o klasický dvoustupňový servoventil s vnitřní mechanickou zpětnou vazbou. Použitý servoventil má dvě ovládací cívky, každou na proud ± 30 mA. Cívky lze řadit sériově nebo paralelně (při paralelním zapojení cívek je tedy řídicí proud ± 60 mA). Podstatnou vlastností servoventilu, která ovlivnila celý následný návrh ovládacího systému je provedení hran šoupátka. Použitý servoventil Rexroth 4WS2EM 10 má nedokryté hrany, je to běžná varianta u dynamicky řízených hydromotřů. Nepříjemným jevem tohoto provedení je ale neexistence nulového průtoku, takže ani při nulovém buzení servoventilu (nulovém proudu) není průtok nulový. Vzhledem k integrační povaze navazujícího hydromotoru dojde k pohybu jeho pístu rychlostí danou velikostí průtoku nedokrytím až k jedné z koncových poloh. Nulová rychlost pístu motoru (klid) se dá při zapnutém napájecím tlaku v hydraulickém obvodu docílit jen činností vnější polohové zpětné vazby. Další návrh ovládacího systému plošiny tedy musí počítat s tím, že zastavení pohybu plošiny v havarijních stavech není možno docílit přerušením napájení servoventilů. Dalším zařízením je napaječ. To je zařízení, které připojuje hydraulické obvody plošiny k centrálnímu tlakovému rozvodu laboratoře. Vzhledem k velkému potřebnému průtoku jsou na plošině použity dva shodné napaječe NOV 200 M10. Ke každému je připojena trojice motorů. Napaječ obsahuje celkem tři ventily. První pro sepnutí redukováného tlaku, druhý pro sepnutí plného tlaku a třetí je bezpečnostní zkratovací. Ten bez napájení zkratuje výstup napaječe do odpadu. Z hlediska ovládání jsou na každém napaječi tři dvoustavové ventily řízené stejnosměrným napětím 24V s odběrem 1,2A. Při funkci zařízení musí být sepnuty dva z nich, zkratovací vždy a k němu buď redukováný nebo vysoký tlak. Posledním z hydraulických prvků je systém aktivního odsávání průsakového oleje z těsnění hydraulických motorů. Aktivní odsávání zajišťuje čerpadlo poháněné klasickým asynchronním třífázovým motorem o příkonu 500VA. Z předchozího popisu technických prostředků plošiny vyplývají následující funkce, které musí zajistit ovládací systém pro chod celého zařízení:

- polohová regulace šesti motorů, kde každý z motorů je osazen: LVDT snímačem s napájením 2V na frekvenci 5kHz servoventilem Rexroth s řídicím proudem ± 30 mA (± 60 mA)
- spínání dvoustavových ventilů v napaječích: celkem 6 ventilů s napájením 24V a každý s odběrem 1,2A
- spínání motoru čerpadla odsávání oleje: třífázový motor s příkonem 500VA

2.3. NORMA ČSN EN ISO 13090-1

Norma ČSN EN ISO 13090-1 Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech [1] je českou verzí evropské normy EN ISO 13090-1:1998. Jak už název napovídá, zabývá se problematikou bezpečnosti experimentálního zařízení, které bude použito pro vykonávání testů prováděných s člověkem. Požadavky kladené touto normou na zkušební zařízení se dají rozdělit do třech kategorií. V první kategorii jsou požadavky týkající se prostorového uspořádání celého experimentálního pracoviště, druhá řeší maximální přípustné expozice testované osoby vibracemi a rázy a třetí popisuje technické prostředky zabezpečení experimentálního zařízení.

První kategorie požadavků se týká prostorového uspořádání celého experimentálního pracoviště a nespojuje tedy přímo s ovládacím systémem a vykonáváním vlastního experimentu. Jde například o zajištění přístupových cest k testované osobě, umístění krytů chránících testovanou osobu od dotyku s nebezpečnými (např. rotujícími, horkými) částmi zařízení a bezpečné umístění (připoutání) osoby na testovací zařízení. Protože se tato část požadavků přímo netýká ovládacího systému, ale spadá do oblasti mechanické konstrukce zařízení, je zde tato problematika jen takto stručně nastíněna a v rámci méj práce není řešena.

Další část normy řeší maximálně přípustné expozice testované osoby vibracemi a rázy. Zde norma lakonicky konstatuje, že „Zařízení by mělo být navrženo a vyrobeno tak, aby mohla obsluha při běžném provozu řídit pohybový podnět a velikosti vibrací a rázů nepřekračovaly očekávané hodnoty.“ Norma se zde odkazuje na jinou normu ČSN EN ISO 2631-1 Vibrace a rázy – Hodnocení expozice člověka celkovým vibracím. Podstatou této normy je popis vlivu vibrací a rázů na člověka a metody hodnocení vibrací, které umožňují stanovit, zda je uvažovaný budící signál přípustný pro testy s člověkem nebo nikoliv. Určující veličinou pro stanovení přípustnosti budícího signálu je zrychlení, které se měří ve třech kolmých osách v několika místech, kde bude následně umístěna testovaná osoba. Naměřené průběhy se pak hodnotí pomocí několika možných metod a pokud výsledné hodnoty nepřekračují stanovené limity, lze budící signál následně použít pro testy s člověkem. Základní metoda hodnocení se provádí pomocí vážené efektivní hodnoty zrychlení. Ta se počítá dle vztahu

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3-1)$$

kde $a_w(t)$ je vážené zrychlení v m/s^2 a T je doba měření v sekundách.

Pro různé typy signálů lze použít i jiné vztahy, které lépe vystihnou charakter signálu (např. pro signály s velkými špičkami). Pro vyhodnocování signálů

ověřujících přípustnost budících signálů pro zkoušky se musí vždy použít základní metoda dle vztahu 1, další metody se mohou přidat jako pomocná kritéria.

Z uvedených hodnotících metod a postupů je patrné, že hodnocení vhodnosti vibračního signálu pro použití pro testy z člověkem je značně složité. Předpokládá vlastně ověřovací měření a není proto reálné, aby ovládací systém hlídal přípustnost budícího signálu v reálném čase. To ostatně nepožaduje ani norma – ta pouze předepisuje konstrukci ovládacího systému tak, aby vhodné a bezpečné budící signály mohl s jistotou volit operátor zkoušky. To je již reálně splnitelný požadavek. Pro generování budících signálů jsou v podstatě možné dva principy. První možností je generování průběhů ovládacím systémem v reálném čase, druhá spočívá ve čtení žádaných hodnot z předem vytvořených datových souborů. Vzhledem k výše uvedeným požadavkům normy jsem se pro zadávání řídicích signálů pro plošinu jednoznačně rozhodl pro druhou variantu. Použitím tohoto principu se zcela splní požadavky normy, operátor zkoušky má jednoduše zajištěno, že signály nepřekračují očekávané hodnoty. Zároveň se vylučuje i možnost chyby operátora vzniklou nepozorností při volbě parametrů při dlouhodobých opakovaných zkouškách. Soubory se signály mohou být navíc předem „certifikovány“ pro použitelnost s člověkem. Mohou být na zařízení ověřeny pokusným spuštěním bez člověka, měřením odezvy na neživé zátěži a následným výpočtem podle výše naznačených kritérií ověřena jejich vhodnost.

Poslední část normy je nejvíce konkrétní a předepisuje již přímo funkce a prvky, které musí zařízení pro testování s člověkem obsahovat. Jejich výčet je uveden v následujícím přehledu:

- nouzové zastavení:

- možnost musí mít jak operátor, tak přímo testovaná osoba
- ovládací prvky pro nouzové zastavení musí být okamžitě a snadno přístupné a musí být jasně a jednoznačně označeny

- ovládací prvky a displye obsluhy musí obsahovat:

- údaje o stavu zařízení, tj. zda je v klidu bez energie, připraveno k zahájení pohybu, nebo v pohybu
- údaje o stavu bezpečnostních obvodů a nastavených limitních hodnotách, kdy dojde k jejich aktivaci
- údaje o parametrech zkoušky
- postupy zapínání a vypínání by měly tvořit logickou posloupnost, jejíž kroky jsou vzájemně blokovány, aby se zabránilo nesprávné činnosti
- ovládací prvky nesmí při použití vyvolávat nežádoucí přechodové děje na zařízení

- nezávislé monitorovací obvody zajišťující:

- sledování pohybu stolu budiče (plošiny)

- sledování parametrů řídicího systému, které charakterizují jeho standardní provoz, (např. přítomnost napájení, integritu zpětnovazebních obvodů atd.)
 - při jakémkoliv překročení předem nastavených hodnot sledovaných parametrů vyvolají nouzové zastavení
- definovaná činnost po výpadku elektrické sítě
- hydraulické obvody obsahující akumulátory mají zásobu energie i při zastavení generátoru, tlak v obvodech navíc nedefinovaně kolísá a klesá
 - řídicí nebo havarijní systém musí proto zůstat v činnosti i po výpadku hlavního napájení a bezpečně zastavit pohyb zařízení

Postup nouzového zastavení pohybu, který je spuštěn činností některého z výše uvedených principů, musí uvést zařízení do klidu BEZPEČNÝM A ŘÍZENÝM způsobem.

2.4. KONCEPCE OVLÁDACÍHO SYSTÉMU

Realizace ovládacího systému se mohla provést v zásadě dvěma cestami. První možností byl nákup ovládacího systému od některého z výrobců, druhou vlastní stavba. Na počátku pochopitelně bylo prověření možnosti nákupu hotového ovládacího systému. Většina firem zabývajících se výrobou hydraulických systémů a strojů má v nabídce i nějaký řídicí systém. Problém spočívá v tom, že systém je většinou postaven univerzálně, aby vyhověl většině standardních aplikací. Plošina se šesti stupni volnosti, navíc s požadavky normy pro testy s lidmi, však bohužel standardní aplikací není. Firmy pochopitelně staví i jednoúčelové zkušební stroje a k nim dodají řídicí systém na míru. V tom případě ale chtějí dodat celé zařízení včetně mechanické a hydraulické části. Zadání typu „postavte plošinu se šesti stupni volnosti“ na „zelené louce“ je pro ně to správné zadání. Cena tohoto řešení však mnohonásobně přesahovala finanční možnosti. V našem případě byla mechanická konstrukce plošiny navržena a postavena svépomocí a hydraulický systém byl sestaven z použitých repasovaných prvků. Samostatná dodávka jednoúčelového řídicího systému pak buď přestávala být pro firmy zajímavá nebo cenová hladina vývoje (respektive nutných úprav univerzálního systému) opět přesahovala možnosti výzkumného záměru.

Z výše popsaných důvodů tedy vyplynulo řešení – postavit ovládací systém z nějakých standardně vyráběných komponent, které jsou programovatelné opět v nějakém standardním prostředí a v něm vytvořit jednoúčelovou aplikaci pro řízení plošiny.

Analýzou funkcí potřebných pro řízení plošiny a zároveň požadovaných normou pro testy s člověkem jsem zvolil následující koncepci ovládacího systému.

Ovládací systém bude rozdělen na dvě části. První částí bude „**řídicí systém**“. Ten zajistí všechny funkce potřebné pro činnost plošiny v normálním provozu. Nad ním bude bdít „**bezpečnostní systém**“, který bude nepřetržitě sledovat stav zařízení a v případě poruchy zajistí bezpečné zastavení plošiny. Tato koncepce plně odpovídá

požadavkům normy a umožňuje realizovat kompletní ovládací systém s minimálními možnými náklady. Bezpečnostní systém totiž plošinu neřídí – nemusí tedy zdvojit regulační funkce řídicího systému, ale jen bezpečně zastavuje pohyb v případě poruchy.

Řídicí systém tedy plní tyto funkce:

- PID regulace polohy šesti hydraulických motorů, žádané hodnoty poloh jsou zásadně datové soubory
- ovládání dvoustavových prvků (ventily napaječů, mazání, odsávání)
- realizuje uživatelské prostředí pro komunikaci operátora se zařízením

Bezpečnostní systém má hlídat správnou funkci zařízení. To je ale značně obecný pojem, proto jsem se po prostudování požadavků normy rozhodl pro monitorování následujících funkcí:

- přítomnost napájení
- činnost hydraulického agregátu
- tlačítka „TOTAL STOP“
- pravidelnost běhu regulační smyčky hlavního systému (obvod watchdog)
- překročení vymezeného zdvihu pístnic $\pm 70\text{mm}$
- překročení zrychlení pístnic jednotlivých motorů

Hlídaní těchto funkcí plně zajišťuje bezpečnost testované osoby, překročení mezí kterékoliv z nich vyvolá okamžité zastavení plošiny. Mimo to bude bezpečnostní systém dále hlídat i systémy, jejichž porucha neohrozí osobu, ale ohrožuje funkčnost samotného zařízení. Sem patří hlavně průchodnost hydraulických cest a činnost odsávání průsakového oleje. Výpadek těchto systémů nejprve upozorní obsluhu, aby mohla zastavit činnost zařízení standardním ukončením zkoušky. Teprve v případě nereagování operátora odstaví zařízení automaticky. Výsledek kontroly všech hlídaných funkcí se dle požadavků normy bude předávat základnímu systému a ten zajistí zobrazení jejich stavu na operátorském stanovišti.

3. ŘÍDICÍ SYSTÉM

3.1. HARDWARE ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Při rozhodování o komponentech, ze kterých bude sestaveno jádro řídicího systému, bylo jasné, že vzhledem k požadované bezpečnosti nemůže být jádro systému postaveno na obyčejném PC s operačním systémem Windows, ale základem musí být nějaký průmyslový standard s vysokou spolehlivostí a stabilním operačním systémem. Protože systém bude realizovat přímo regulační smyčky je potřeba navíc aplikaci velmi přesně časovat. Tomu pak nejvíce vyhovují speciální operační systémy reálného času. Základem řídicího systému se tedy stal průmyslový systém PXI-1002 od National Instruments. To je vlastně vana s napájecím zdrojem a čtyřmi pozicemi pro umístění modulů. Do první pozice se

umistňuje modul kontroléru, další tři jsou k dispozici pro vstupně – výstupní karty. Moduly jsou propojeny sběrnici PXI, což je sběrnice vyvinutá v National Instruments. Systém navíc obsahuje přesný hodinový signál s frekvencí 1MHz, který lze využít k hardwarovému časování softwarové smyčky.

Jako výpočetní jednotku jsem zvolil kontrolér NI PXI-8176. Kontrolér je osazen procesorem Intel Pentium III s frekvencí 1,2GHz, má 128MB operační paměti a 18GB pevný disk. Je vybaven disketovou mechanikou, standardními konektory klasického PC (klávesnice, myš, monitor, USB,...) a 100Mbit ethernetem. Dále bylo nutné vybrat komponenty pro vstup a výstup analogových signálů. Jako vstupní kartu jsem zvolil PXI 6040E. To je klasická karta s multiplexovanými vstupy. Má 16SE nebo 8DI vstupů a 12ti bitový A/D převodník s maximální rychlostí vzorkování 500kS/s. Pro analogové výstupy jsem použil kartu PXI 6713. Ta obsahuje celkem osm analogových výstupů řízených 12ti bitovými D/A převodníky s maximální rychlostí 1MS/s. Výstupní napětí je maximálně v rozsahu $\pm 10V$. Pro ovládání dalších obvodů plošiny (spínání ventilů napaječů, čerpadla,...) jsou potřeba logické výstupy. Pro zpětnou kontrolu stavu (např. kontrola proudové ochrany motoru čerpadla) jsou potřeba i logické vstupy. Tuto komunikaci zajišťuje karta PXI 6528. Ta obsahuje 24 opticky oddělených vstupů a 24 reléových výstupů. Pro „komunikaci“ se silovým rozvaděčem je proto naprosto ideální. Vstupy bez problému přímo zvládnou 24 voltů (maximum je 60V), výstupy mohou spínat až 150mA, což stačí na výkonová relé. Výchozí stav výstupních relé lze navíc naprogramovat do karty, takže okamžitě po zapnutí napájení se výstupy uvedou do požadované konfigurace. Karta dále obsahuje čítač-časovač, který lze použít jako obvod watchdog. V tomto stavu čítač kontroluje předem nastavený časový interval komunikace softwaru s touto kartou. Lze tak hlídat pravidelnost běhu aplikace, stačí v cyklu číst například stav vstupů karty. Překročí-li doba mezi dvěma odečty předem nastavený interval, dojde k vyslání poruchového signálu. Ten lze programově přiřadit na libovolný reléový výstup karty, který může být použit jako signál pro nouzové zastavení. To je přesně funkce požadovaná normou, jakýkoliv kolaps řídicího systému nebo jen nepravidelnost chodu je okamžitě detekován a vyslán reléovým výstupem.

Aby bylo možné používat tento systém v režimu real-time, je nutné vytvořit uživatelské a programátorské prostředí na jiném počítači. Pro tyto účely byl použit již klasický PC osazený procesorem AMD Athlon 2.18GHz, 1GB RAM a 40GB diskem s operačním systémem Windows XP Professional. Na počítači je nainstalován software Labview 8.2 s real-time modulem. V tomto prostředí je napsána celá aplikace pro ovládání plošiny. Počítač s kontrolérem komunikuje po 100Mbitovém ethernetu. Aby bylo spojení co nejstabilnější, byl počítač PC vybaven pro tuto komunikaci samostatnou síťovou kartou Realtek RTL8139 a s kontrolérem propojen přímo překříženým kabelem.

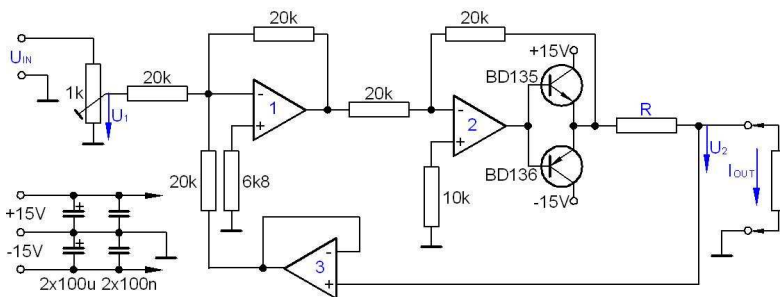
Vstupní a výstupní karty bylo potřeba doplnit dalšími obvody, které přizpůsobí signály použitých navazujících zařízení signálům karet.

Měření polohy:

Jak už bylo uvedeno dříve, každý hydromotor obsahuje uvnitř duté pístitnice integrovaný indukční snímač polohy. Jedná se o transformátorový typ, který se běžně označuje zkratkou LVDT (z anglického Linear Variable Differential Transformer). Snímače jsou připojeny k modulům DAQP-TRQ, které jsou umístěny ve standardní vaně DEWE-30-16. Moduly zajišťují vše potřebné pro provoz snímačů a na jejich výstupech je již standardní stejnosměrný signál (jeho velikost je úměrná poloze), který lze již přímo připojit na vstupy A/D karty.

Řízení servoventilů:

Servoventil Rexroth 4WS2EM 10 má dvě ovládací cívky, které při paralelním zapojení potřebují řídicí proud $\pm 60\text{mA}$. Použitá výstupní D/A karta má ovšem výstupy napěťové, ne proudové. Mezi výstupy karty a servoventily bylo tedy nutno vložit další obvod – napěťově-proudový převodník, který konvertuje napětí $\pm 10\text{V}$ na proud $\pm 60\text{mA}$. Zde jsem se rozhodl pro vlastní stavbu osvědčeného obvodu, který jsem již v laboratoři několikrát použil.



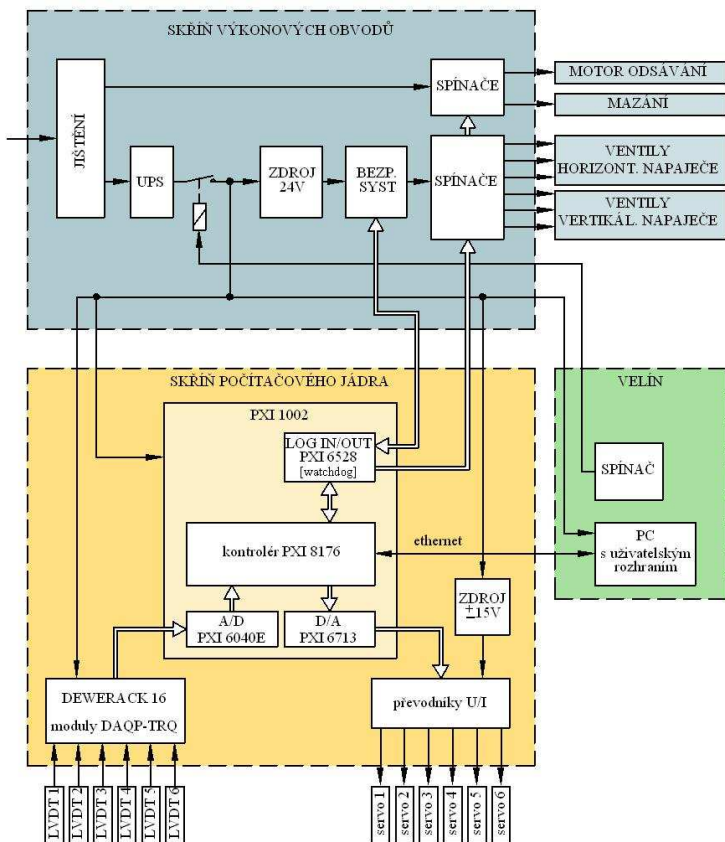
Obr. 2 Napěťově proudový převodník

Výkonové obvody:

Při návrhu ovládacího systému plošiny jsem musel částečně zabrousit i do „silnoproudé“ oblasti, i když to v mém případě představuje maximálně klasické třífázové 3x400V. Všechny systémy je totiž třeba nějak napájet, napájení zajistit proti výpadkům a dále zapínat motor čerpadla. V neposlední řadě je třeba postarat se o 24V napájení pro ventily v napaječích a zajistit jejich spínání.

Celá plošina má centrální přívod elektrické energie (standardní třífázová síť), který je jištěn hlavním jističem. Za ním následují jističe jednotlivých sekcí – motoru čerpadla odsávání, stykače motoru a elektroniky. Veškeré výkonové prvky jsou spínány klasickými relé, která jsou řízena přímo výstupy z karty PXI 6528. Napájení je při výpadku elektrické energie jištěno klasickou UPS.

Blokové schéma zapojení řídicího systému



Obr. 3 Blokové schéma řídicího systému

Závěrem této kapitoly lze konstatovat, že navržený řídicí systém je spolehlivě funkční a plní zatím bez poruch funkci, ke které byl postaven. Z toho plyne správnost návrhu i vhodné nadimenzování jednotlivých komponent (jak výkonové, tak i výpočetní kapacity).

Dále bych chtěl poznamenat, že součástí méj práce nebylo jen navrhnout komponenty systému a jejich vzájemné propojení, ale nedílnou součástí byla i praktická realizace výše popsaného systému. To představovalo například výrobu a osazení desek tištěných spojů, zapojení celé skříně výkonových obvodů i položení a zapojení veškeré kabeláže.

3.2. SOFTWAREVÉ VYBAVENÍ

Pro vytvoření aplikace pro ovládání plošiny jsem naplno využil možnosti programového prostředí Labview 8.2. a Measurement and Automation Exploreru od National Instrument. V prostředí Exploreru jsou definovány úlohy (tasks), které řeší komunikaci s jednotlivými hardwarovými prostředky řídicího systému.

úloha `anal_inp`:

slouží pro vstup měřených hodnot ze snímačů polohy jednotlivých válců používá přepočtení měřítko (scales), takže výstupy jsou přímo v mm

úloha `anal_out`:

slouží pro výstup analogového napětí pro ovládání servoventilů jednotlivých motorů

úloha `dig_inp_rozvadec`:

slouží k přenosu stavu jednotlivých obvodů výkonového rozvaděče do programu

úloha `dig_out_rozvadec`:

slouží k ovládání výkonových relé v rozvaděči

úloha `dig_watchdog_reset`:

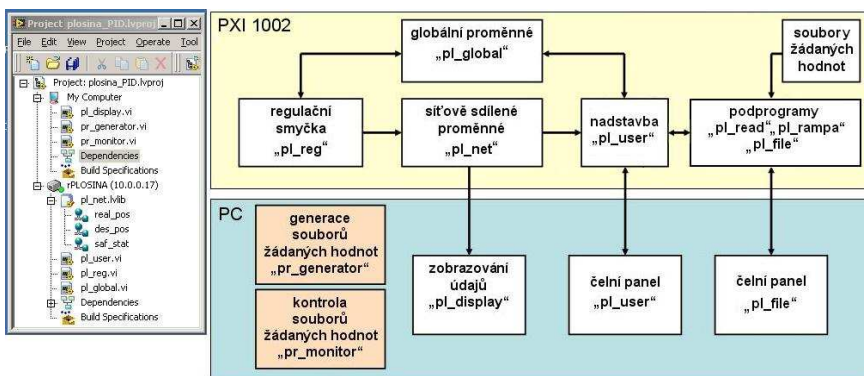
slouží k nastavení výchozího stavu výstupního relé obvodu watchdog karty PXI 6528

Struktura programu řídicího systému

Při navrhování struktury programu pro řízení plošiny jsem vycházel z důležitosti požadavků, které má systém plnit. Nejdůležitějším úkolem je bezesporu funkce šesti PID regulátorů polohy jednotlivých motorů. Regulační smyčka musí být přesně časována a její pravidelný chod musí být naprostou prioritou systému. Mimo to musí software ale plnit další pomocné funkce, převážně typu zajištění komunikace s operátorem a automatizace často opakovaných úloh (např. sekvence zapnutí, vypnutí, najetí do výchozí polohy apod.). Tyto „obslužné“ činnosti již nemusí být tak přesně časované, naopak jejich vykonávání nesmí ohrozit pravidelnost běhu regulační smyčky. Další částí softwaru pak budou pomocné prostředky, které již nebudou provozovány v reálném čase. Sem bych zařadil například generátor funkcí, který umožní vygenerovat soubory žádaných hodnot poloh pro jednotlivé motory. Labview 8.2. umožňuje soustředit celou strukturu použitých softwarových prostředků do jednoho projektu. V něm se přesně určí, která část softwaru poběží na jakém hardwaru a jak bude komunikovat s ostatními částmi softwaru. Pro řízení plošiny jsem proto založil projekt „*plosina_PID*“.

Na systému PXI 1002 běží paralelně dvě aplikace – regulační smyčka *pl_reg* a nadstavba *pl_user*, které spolu komunikují přes systém globálních a síťových proměnných. Aplikace *pl_reg* zajišťuje změření skutečných hodnot polohy, výpočet akčních veličin pro serva a jejich zápis na analogové výstupy. Dále přečtení logických stavů rozvaděče a bezpečnostního systému. Aplikace *pl_user* vykonává všechny nadstavbové funkce a dodává regulační smyčce přes globální

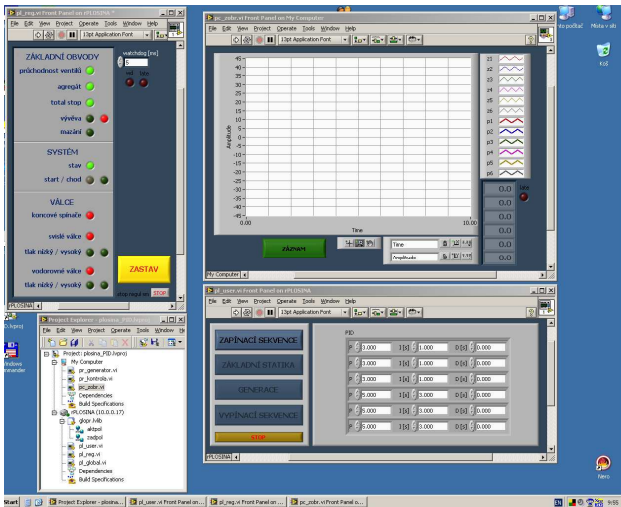
proměnnou žádané hodnoty poloh. Tím je regulační smyčka oprostěna od nutnosti přístupu na disk, který by mohl ohrozit časování smyčky. Čelní panel aplikace *pl_user* je zobrazován na monitoru operátorského PC a obsahuje povelová tlačítka pomocí kterých operátor obsluhuje činnost zařízení. Datový přenos je minimální, proto lze bez problémů použít metodu zobrazení čelního panelu aplikace na PC. Aplikace *pl_reg* běží bez zobrazení čelního panelu. Data z aplikace *pl_reg*, která je potřeba zobrazit na monitoru operátora, tedy průběhy žádaných a skutečných hodnot poloh a stav obvodů rozvaděče, smyčka *pl_reg* pouze předává do síťových proměnných. Odtud je vyčítá samostatná aplikace *pl_display*, která již celá běží na operátorském PC. Tento systém umožňuje plynulý přenos velkého toku dat, aniž by bylo ohroženo časování regulace. Struktura tohoto projektu je vidět na obrázku 4. V levé části je skutečný strom projektu v Project Exploreru Labview, v pravé části obrázku pak schematická struktura součinnosti jednotlivých částí projektu.



Obr. 4 Struktura projektu Plosina_PID

Do projektu patří ještě dvě nezávislé aplikace, které se již přímo neúčastní řízení plošiny. Obě se v případě potřeby spouští na operátorském PC. První z nich je *pr_generator*. Tato aplikace slouží ke generaci souborů žádaných hodnot polohy, které se pak používají při řízení pohybu plošiny. Umožňuje generovat bloky periodických funkcí nebo číst externě dodaná data z textových souborů. Pro kontrolu již vygenerovaných souborů slouží druhá aplikace *pr_monitor*. Její funkce je prostá – umožňuje pouze do grafu zobrazit průběhy žádaných hodnot, aby mohly být operátorem zkontrolovány ještě před použitím pro řízení. Datové soubory se z operátorského PC na real-time systém přenáší FTP propojením obou systémů.

Struktura jednotlivých aplikací projektu je podrobně rozebrána v disertační práci. Vzhledem ke značné složitosti a provázanosti jednotlivých částí nelze bez ztráty



srozumitelnosti popsat tuto partii zjednodušeně na omezeném prostoru této publikace. Proto zde jen zobrazím čelní panely aplikace, pro představu jak vypadá operátorské prostředí pro ovládání plošiny.

Obr. 5 Čelní panely projektu Plosina_PID

Zkušenosti z praktického provozu ukázaly, že se mi v programovacím prostředí Labview 8.2. podařilo vytvořit funkční real-timovou aplikaci, která splňuje všechna kritéria na ní kladená a zařízení proto spolehlivě pracuje. Při její tvorbě jsem uplatnil své dosavadní zkušenosti z programování jiných aplikací v Labview, ale pochopitelně jsem se neobešel bez studia nových funkcí a postupů z dostupných materiálů National Instruments.

Vytvoření této funkční aplikace považuji za jeden ze stěžejních bodů mé práce.

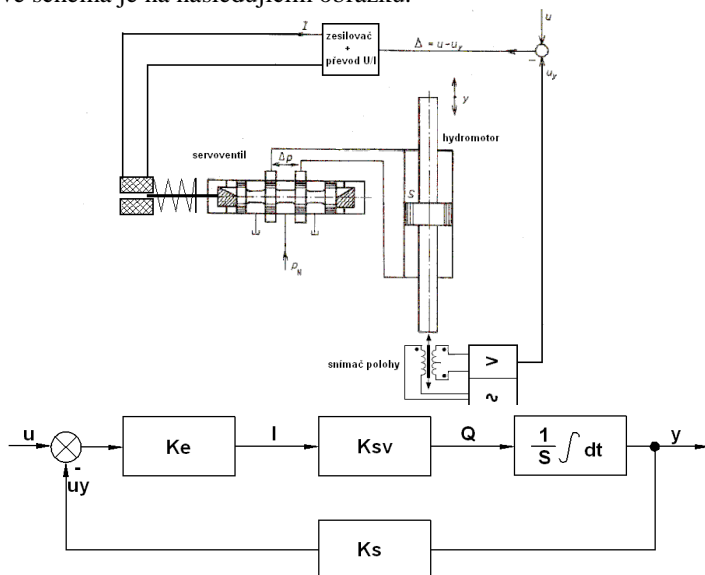
3.3. OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU

V předchozích kapitolách je popsán návrh a praktická realizace řídicího systému a to jak hardwarové, tak softwarové části. Hlavním úkolem řídicího systému je pochopitelně polohová regulace šesti lineárních hydromotorů. Ta je tvořena klasickým zpětnovazebním obvodem s regulátorem PID, který je realizován softwarovým modulem. Aby mohlo zařízení spolehlivě pracovat, bylo nutné optimalizovat nastavení regulátorů. Tato optimalizace proběhla ve dvou etapách. V první jsem se snažil pomocí matematického modelu určit alespoň základní nastavení regulačních parametrů. V druhé etapě jsem pak výsledky aplikoval na reálnou soustavu a následovalo doladění nastavení regulačních konstant metodou

měření přechodových charakteristik - odezev na reálný skok vstupního signálu, tj. reálně dosažitelnou dobu Heavisideova skoku. Po tomto naladění pak následovalo ověření skutečně dosahovaných parametrů zařízení. Jako nejvhodnější se mi jevílo stanovení frekvenčních charakteristik celého zařízení. Posledním ověřením funkčnosti pak bylo sledování přesnosti vykonání reálně předepsané trajektorie pohybu.

Teorie hydraulického servomechanismu

Základem hydraulického servomechanismu je hydromotor. K vyvození vlastního pohybu pístu motoru je potřeba docílit průtok hydraulické kapaliny motorem. K tomu je potřeba zdroj této kapaliny a regulační prvek, který řídí velikost a směr průtoku kapaliny. Tento prvek se nazývá servoventil a je nedílnou součástí hydraulického servomechanismu. Servoventil tedy řídí průtok (tedy množství kapaliny dodané za čas) a tomu je úměrná nikoliv poloha, ale rychlost pohybu pístu hydromotoru. Z hlediska regulace polohy pístu se tedy lineární hydromotor chová jako integrační člen. Aby mohla být uzavřena zpětná vazba, musí být dále hydromotor vybaven snímačem polohy pístu. Schéma takového obvodu a jeho blokové schéma je na následujícím obrázku.



Obr. 6 Princip hydraulického servomechanismu

Charakteristiky jednotlivých částí obvodu jsou zde prozatím linearizovány a nahrazeny jednou konstantou: K_e – zesilovač regulační odchylky, K_{sv} - servoventil, K_s - zesilovač zpětné vazby a hydromotor zatím opět jako jednoduchý integrační člen (S je plocha pístu).

Z tohoto schématu lze odvodit nejjednodušší možnou rovnici popisující elektrohydraulický servomechanismus

$$y = \frac{1}{S} \int (u - k_s y) k_e k_{sv} dt \quad (3.3-1)$$

což je diferenciální rovnice prvního řádu. Shrňeme-li součin všech konstant do jedné

$$\tau = \frac{S}{k_e k_{sv} k_s} \quad (3.3-2)$$

můžeme rovnici vyjádřit ve tvaru

$$\tau y' + y = \frac{1}{k_s} u \quad (3.3-3)$$

Z tohoto tvaru je patrné, že statické zesílení (v klidu – tedy derivace je nulová) závisí nepřímo úměrně na zesílení zpětné vazby, nikoliv na zesíleních v přímé větvi. Dynamické vlastnosti jsou dány časovou konstantou τ u první derivace a ta závisí na všech členech regulačního obvodu.

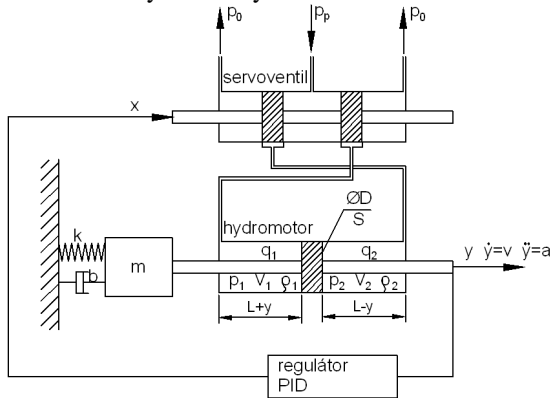
Skutečný hydraulický servomechanismus pracující s reálnými prvky se musí vypořádat s jejich konkrétními vlastnostmi. To není problém u „elektrických“ částí obvodu, které jsou tvořeny standardními prvky a jejich parametry (zesílení, přenos,...) se dají nastavit tak, že jejich eventuelní nedokonalosti jsou řádově menší než u „mechanických“ částí – tedy hydromotoru a servoventilu. Tyto reálné prvky obsahují nelinearity, popis vlastností servoventilu navíc selhává v okolí nulové polohy, kdy chování závisí na provedení hran šoupátka. Chování celé reálné soustavy je navíc ovlivněno vlastnostmi zdroje hydraulické kapaliny (čerpadla) a propojovacím hydraulickým vedením. To je navíc sestaveno i z dalších prvků (ventily, akumulátory, filtry), takže vytvoření modelu reálného zařízení je značně obtížné. I kdyby si někdo dal práci se sestavováním detailního modelu celého zařízení, narazí pak na nedostatek informací o jednotlivých prvcích a v modelu mu pak budou chybět reálné parametry a charakteristiky jednotlivých prvků.

Vytvořený model hydraulického servomechanismu

Hned úvodem této kapitoly chci konstatovat jeden fakt. Mým úkolem při konstrukci celé plošiny se šesti stupni volnosti nebylo vytvoření matematického modelu, jehož výstupem by byly krásně barevné grafy na monitoru počítače. Můj úkol byl mnohem náročnější. Já jsem musel v konkrétním časovém horizontu daným jednoznačným termínem dokončení vytvořit projekt celého ovládacího systému, ten vlastními silami sestavit a oživit, vybavit vlastní softwarovou realtimovou aplikací, uvést celé zařízení do provozu a ověřit v praxi jeho chování a vlastnosti, tak aby toto zařízení splnilo všechny požadavky normy ČSN EN ISO 13090-1. Vytvořený model je proto jen drobným kamínkem v celé mé práci. Byl

vytvořen proto, abych při ožívování regulace nemusel první hodnoty konstant P, I, D „střelit“ od oka, ale mohl se alespoň o něco opřít. Z tohoto důvodu jsem sestavil model co nejjednodušší, který, jak se nakonec ukázalo, daný účel beze zbytku splnil. Do modelu jsem zahrnul jen vlastní hydromotor a servoventil, na jehož vstupu jsem předpokládal ideálně konstantní zdroj tlaku.

Obr.7 Použitý model hydraulického servomechanismu



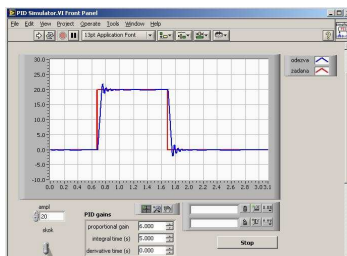
Popis vychází z pohybové rovnice hmoty m

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + k \cdot y = S \cdot (p_1 - p_2) \quad (3.3-4)$$

a rovnic průtoku kapaliny plynoucích z kontinuálního zákona

$$q_1 = c_0 \cdot s \cdot \sqrt{2\rho_1 \cdot (p_p - p_1)} \quad (3.3-5)$$

Z těchto základních kamenů byla sestavena soustava rovnic popisujících hydromotor a servoventil. Původní záměr byl namodelovat celé řešení v softwaru Mathcad 11.0. Při této realizaci by ale bylo nutné pochopitelně dosadit do modelu i vlastní PID regulátor. Aby se mi řešení zjednodušilo, rozhodl jsem se nakonec pro mé oblíbené Labview. Tím se navíc model dále přiblížil realitě, protože v modelu bude použit naprosto shodný regulátor PID, jako je v reálném systému. Labview obsahuje možnost vložit do něho matematickou soustavu rovnic, takže soustava rovnic popisujících hydraulické prvky tvořila blok „hydrauliky“ a ten byl obklopen již klasickými prostředky Labview, tvořících polohovou regulační smyčku s regulátorem PID.



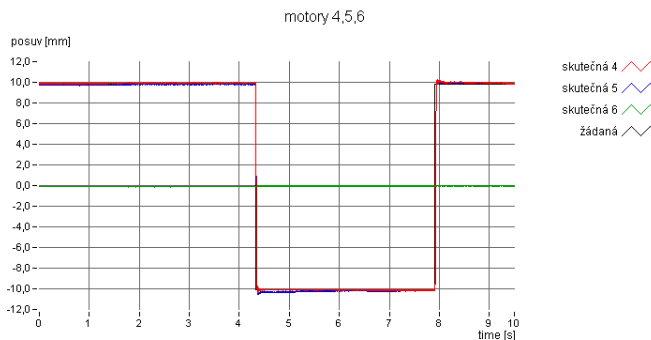
Obr. 8. Ukázka okna modelu

Pro ladění regulátoru se mi osobně nejvíce líbí zobrazovat přechodovou charakteristiku – tedy odezvu na Heavisideův skok. Ten je sice v praxi nerealizovatelný, ale vstupní signál, který má v čase t hodnotu 0 a v čase $t+1$ již hodnotu plné výchylky se softwarově realizuje velice snadno a ideálnímu skoku se hodně přibližuje. Tak byla sestavena i tato aplikace. V okně lze nastavit hodnotu skoku a „ručním“ přepnutím přepínače se skokem změnit žádaná hodnota jdoucí do regulátoru. Odezva systému je vidět v grafu. Hodnoty PID pro regulátor jde měnit opět přímo na panelu, konstanty soustavy hydromotoru byly nastaveny „natvrdo“ přímo v modulu rovnic. Pro nalezení optimální odezvy jsem již nepoužíval žádnou analytickou metodu. Po desetileté zkušenosti v hydrodynamické laboratoři se mi jeví metoda „nastavit PID, vygenerovat skok a posoudit tvar přechodové charakteristiky“ nejrychlejší. Zvlášť, když při tom nejde nic reálného zničit, což byl právě tento případ. Po několika „cvičných“ průchodech jsem dospěl k hodnotě $P=6$ a $I=3$. Derivační konstantu jsem nechal pro jistotu nulovou.

Optimalizace reálných parametrů PID regulace

Po zjištění hodnot konstant P a I na modelu, jsem přistoupil k ladění reálného systému. Metoda ladění byla shodná jako u modelu, tedy měření přechodové charakteristiky. Bylo mi jasné, že reálný výsledek nebude plně odpovídat chování modelu vzhledem ke všem zjednodušením, které v modelu byly. Ladění jsem začal na motoru číslo 4, což je jeden z vodorovných motorů. Tam realita více odpovídá modelu, protože na svislém motoru visí hmota plošiny, což v modelu nebylo zohledněno. Pro toto ladění jsem upravil aplikaci *pl_reg*. Na čelním panelu přibyl přepínač pro skokovou změnu žádané hodnoty. V této variantě tedy byla porušena zásada negenerovat nic v reálném čase. Žádaná hodnota byla generována přímo aplikací *pl_reg* dle jednoduchého pravidla: přepínač dolů = žádaná hodnota rovna nule, přepínač nahoru = žádaná hodnota rovna nastavené konstantě. Měření odezvy bylo prováděno nezávislým systémem, který zaznamenával průběh žádané a skutečné hodnoty polohy. Reálný regulátor jsem nastavil dle výsledků z modelu a pak následovalo ladění podobné při práci na modelu. Postupným zkoušením jsem dospěl k finálnímu nastavení ($P=4.5$ a $I=1$) a to pak aplikoval na všechny motory. Výsledek pro tři z motorů je na dalším obrázku.

Obr. 9 Výsledná odezva motorů 4,5 a 6



Detailním rozбором přechodové charakteristiky jsem dále provedl jednoduchou identifikaci chování. Z tvaru vyplývá, že jde o systém druhého řádu s dopravním zpožděním s následujícími konstantami:

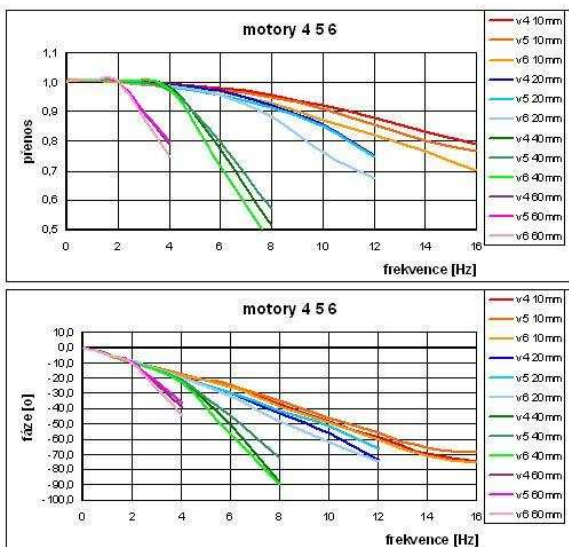
dopravní zpoždění $T_d = 3.5\text{ms}$

doba průtahu $T_u = 2.5\text{ms}$

doba náběhu $T_n = 20\text{ms}$.

Měření frekvenčních charakteristik plošiny

Častým vyjádřením frekvenční charakteristiky je vynesení dvou grafů – amplitudové a fázové charakteristiky, tedy závislosti zesílení $A(\omega)$ na fázového posuvu $\varphi(\omega)$ na hodnotě ω . Pro praktickou realizaci měření je potřeba budít vstup harmonickým signálem o různých frekvencích. Pro každou frekvenci je třeba nechat systém ustálit a odečíst amplitudu výstupního signálu a časový posuv oproti vstupnímu signálu. Aby se měření zrychlilo, budil jsem vstup sekvencí harmonických signálů o konstantní amplitudě a postupně se zvyšující frekvencí. Na každé frekvenci trvalo buzení několik sekund, aby se systém stihl ustálit. Tato měření jsem opakoval i s různou amplitudou budícího signálu. Před generací signálů jsem si stanovil pro každou z amplitud maximální hodnoty frekvencí, do kterých má smysl měření provádět. Limitním faktorem bylo překročení maximální rychlosti 1m/s, kterou je motor schopen realizovat. Při vyšších požadovaných rychlostech již stejně harmonický signál není reprodukován, na výstupu je jakýsi zablžený trojúhelník a zařízení je jen zbytečně mechanicky namáháno v oblastech, kde stejně nikdy nebude pracovat. Cílem měření bylo stanovit chování převážně v pracovní oblasti, proto testovací signál končil vždy těsně po překročení tohoto maxima.



Obr. 10 Frekvenční charakteristiky motorů 4,5 a 6

Výsledek odpovídá očekávanému chování hydraulicko mechanické soustavy, Potěšující je, že motory jdou prakticky shodně, hlavně fázový posuv mezi nimi je minimální. To je podstatné pro kvalitní reprodukci signálů, výsledný posuv nebude zkreslen rozdílnou fází jednotlivých motorů. Poznámka na závěr: výsledky druhé trojice svislých motorů jsou prakticky shodné, proto jsem je zde již nepublikoval.

Ověření funkčnosti zařízení při vykonávání reálné trajektorie

Pro zjištění komplexních vlastností plošiny bylo třeba kromě zjištění chování jednotlivých motorů, ověřit i celkovou funkčnost zařízení. Toto měření bylo založeno na následujícím principu. V prostoru plošiny byl náhodně zvolen kontrolní bod. Pro tento bod byla vygenerována prostorová trajektorie, která byla popsána časovým průběhem změn polohy v souřadnicích x , y , z a zároveň zrychlením v těchto osách a tento signál byl použit pro buzení plošiny. Ve zvoleném kontrolním bodě byl zpětně odměřen posuv tohoto bodu a zrychlení ve třech osách a výsledek porovnán s původním zadáním. Tento postup odpovídá reálnému použití, kdy je právě většinou požadováno vykonání nějaké předepsané prostorové trajektorie. Ověřovací měření pochopitelně proběhlo více, pro různé trajektorie bodu. Poloha kontrolního bodu zůstala vzhledem k poměrně složitému kotvení snímačů pro všechna měření shodná. Výsledky byly více než uspokojivé, odchylky výsledného pohybu od teoretického zadání nebyly nijak dramatické a dokonce i průběh zrychlení odpovídal zadání.

3.4. ŘÍDÍCÍ SYSTÉM - SHRUTÍ

Řídicí systém, jehož návrh, realizaci, ladění i ověření jsem popsal v kapitole 3 splnil očekávání do něj vkládaná. Plošina se šesti stupni volnosti plní funkce, které se od tohoto zařízení požadují. Výsledné vlastnosti odpovídají očekávanému normálnímu chování hydrodynamických systémů. Chování systému je srovnatelné s ostatními řídicími systémy používanými v laboratoři. Dá se tedy konstatovat, že koncepce, kterou jsem zvolil, je správná a řídicí systém sestavený z výše popsaných komponent spolehlivě pracuje. Velkým přínosem je ale speciální softwarové vybavení, stvořené přímo pro tuto konkrétní aplikaci. Vytvořený software ošetřuje všechna specifika tohoto složitěho zařízení a jeho koncepce minimalizuje možné chyby operátora při ovládání zařízení. Software navíc spolupracuje z bezpečnostním systémem, který bude popsán v následující kapitole a umožňuje tak používat zařízení pro testy s člověkem dle požadavků normy ČSN EN ISO 13090-1.

4. BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM

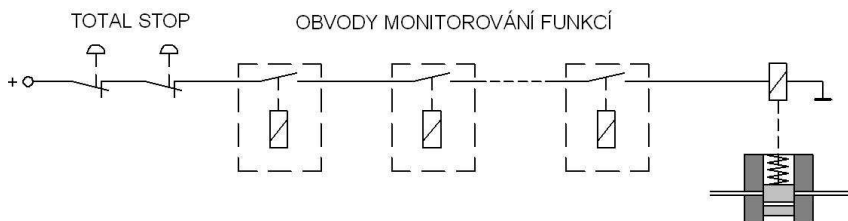
4.1. STANOVENÍ KONCEPCE BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

Z předchozího popisu použitých hydraulických servomechanismů vyplývá jeden podstatný fakt. Vzhledem k použití servoventilů s nedokrytými hranami lze při zapnutém hydraulickém napájení udržet motory v klidu jen činností zpětnovazební regulace. Kdyby tedy bezpečnostní systém v případě své aktivace měl plošinu dále polohově řídit, vedlo by to prakticky na zdvojení řídicího systému. Jednou z příčin poruchového stavu může být nejen výpadek jádra regulace (tedy systému PXI), ale i kterékoliv navazující části regulační smyčky včetně snímače polohy nebo servoventilu. Zdvojení by tedy muselo být stoprocentní. To se dá ještě akceptovat u snímačů polohy, kde by se mohly použít dva nezávislé snímače. Se servoventilem je situace složitější. Paralelní zapojení dvou servoventilů na jednom hydromotoru se sice také používá, ale servoventily jsou řízeny shodným signálem (např. k docílení větších průtoků a tím rychlosti pohybu). V případě poruchy by se však jeden servoventil musel vyřadit a do řízení zapojit záložní. Takovéto hydraulické zapojení servoventilů si však představit nedokážu. Proto jsem hned zpočátku od této varianty ustoupil. Bezpečnostní systém **nebude** plošinu dále řídit, jen ji v případě poruchy pokud možno definovaným způsobem zastaví. Takovýto princip navíc plně vyhovuje i normě. Celé řešení se tím podstatně zjednoduší, žádné zdvojování prvků nebude třeba. Jednoduchost bezpečnostního systému je totiž základem jeho bezchybné funkce. Bezpečnostní systém složitější než systém hlavní by totiž výslednou bezpečnost celého zařízení spíše ohrozil.

Další úvahy se tedy ubíraly směrem, jak plošinu v případě nějaké poruchy definovaně zastavit. Po mnoha konzultacích celého řešitelského týmu jsme nakonec zvolili řešení zastavení pohybu hydromotorů přerušením dodávky hydraulické energie. To se jeví jako velmi spolehlivé, nedodává-li se do systému hydraulický tlak, nemohou se pístnice motorů pohybovat ať už je stav všech ostatních obvodů jakýkoliv, tedy například i když je servoventil vlivem nějaké poruchy otevřen naplno. Do přívodu hydraulického oleje k motorům plošiny bude tedy zapojen nějaký odpojovač, který v případě poruchy zastaví přívod oleje k motorům. Aby tento prvek odpovídal normám pro bezpečnostní obvody, nesmí se uvádět do chodu vznikem poruchového signálu, ale naopak musí reagovat na výpadek „klidového“ signálu. To znamená, že například bez napájení elektrickou energií je ventil uzavřen, připojením napájení se otevře a umožní tak normální činnost zařízení. Bezpečnostní systém tedy za normálního provozu dodává ventilu energii, při vzniku poruchy se přívod energie přeruší a ventil se uzavře. Tímto jednoduchým principem se automaticky ošetří i všechny přetržené kabely, vypadnuté konektory, povolené svorkovnice, atd. Na tomto principu pak musí pracovat i všechny komponenty bezpečnostního systému. Jednotlivé obvody monitorování funkcí mají na svém výstupu spínací kontakt relé. Ten je sepnut v klidovém stavu, tedy pokud je sledovaná veličina v předepsaných mezích.

Jakmile dojde k překročení, kontakt rozezne. Kontakt tak ale rozezne například i v případě přerušení napájení monitorovacího obvodu, nebo opět nějakého vypadnutí konektoru atd. Tím se opět zvyšuje odolnost proti poruchám uvnitř monitorovacích obvodů. Všechny kontakty monitorovacích obvodů včetně tlačítek Total stop jsou řazeny do série a teprve správná činnost všech z nich dovede elektrickou energii k odpojovacímu ventilu, který sepne a umožní činnost zařízení. Tento princip odpovídá i všem požadavkům na zapojení tlačítek Total stop. Právě tato tlačítka nesmí být například vyhodnocována žádnou elektronikou, jejich stlačení musí přímo přerušit napájení nějakého odpojovače, který vyřadí zařízení z činnosti. Zvolený princip tomu plně odpovídá. Zapojení bezpečnostního systému, který odpovídá výše uvedeným zásadám je na obrázku 11.

Obr. 11 Princip bezpečnostního systému



Bezpečnostní systém bude monitorovat následující funkce, které se navíc dají rozdělit do několika skupin, podle typu reakce bezpečnostního systému:

Skupina 1: podmínka spuštění zařízení

- Nestlačená tlačítka Total stop
- Přítomnost elektrického napájení
- Otevřené mechanické ventily na potrubí
- Hydraulický agregát v chodu
- Stlačení tlačítka hardwarového potvrzení startu

Skupina 2: okamžité zastavení chodu

- Stlačení tlačítek Total stop
- Monitor watchdog, kontrola běhu řídicího systému
- Monitor zrychlení, kontrola zrychlení pístnic jednotlivých motorů
- Monitor polohy, kontrola překročení vymezeného zdvihu

Skupina 3: odložené zastavení pohybu

- Stlačení tlačítek předčasného ukončení zkoušky
- Výpadek napájení (činnost zařízení je jištěna UPS)
- Výpadek odsávání průsaků

Poznámka ke skupině 3

Aktivita zařazená do třetí skupiny neohrožuje přímo ani testovanou osobu ani zařízení. Jsou proto bezpečnostním systémem ošetřeny s pevně nastavenou časovou prodlevou. Tím je dána možnost zpracovat tento stav nejprve řídicím systémem, tj. zastavit normálním způsobem činnost zařízení. Teprve kdyby řídicí systém nereagoval, dojde k zastavení stejným principem jako u skupiny 2.

4.2. KOMPONENTY BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

Hydraulický odpojovač

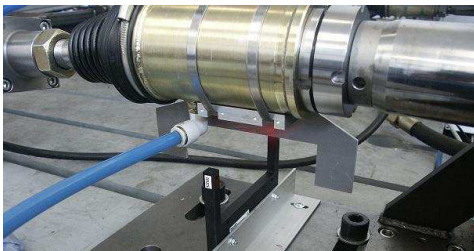
Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, realizační tým rozhodl, že nouzové zastavení pohybu plošiny bude probíhat odpojením přívodu hydraulické energie do motorů. Toto odpojení přitom musí být dostatečně rychlé, aby byl pohyb zastaven včas, ale zase nesmí být skokové, aby jeho aktivací nedošlo ke skokovým změnám rychlosti nebezpečným pro testovanou osobu. Po mnoha testech byl zvolen speciální odpojovací ventil Rexroth Z4WE 6, který má potřebnou reakční rychlost. Ta je udávána v rozmezí 10 až 25ms, takže i při nejpomalejší době a rychlosti pohybu 1m/s to představuje maximálně 25mm dráhy, což je pro plošinu vyhovující údaj. Pro použití na plošině bylo vybráno provedení E68. To má odpovídající logiku ovládání bezpečnostním systémem – tedy bez napájení uzavřeno. Ve vypnutém stavu uzavře na vstupní straně přívod hydraulické kapaliny a na výstupní straně propojí výstupy zkratem. To v podstatě znamená volný průtok kapaliny na výstupní straně. Toto provedení zajišťuje, že po odpojení ventilu nedojde k „zakousnutí“ pístnic, ale volný průtok kapaliny naopak pístnici uvolní a ta se bude moci dále volně pohybovat vlivem setrvačných sil. U ventilů musela být nakonec provedena úprava šoupátek, aby se snížil zkratovací průtok a tím docházelo k rychlejšímu ubrzdění pohybu.

Tlačítka

Mezi základní komponenty každého bezpečnostního systému patří pochopitelně tlačítka pro ruční zastavení a odpojení systému. Tato tlačítka se povětšinou nazývají TOTAL STOP. Jak operátor, tak testovaná osoba, mají k dispozici dvě tlačítka. První je skutečný TOTAL STOP, který okamžitě aktivuje bezpečnostní systém a ten vypne odpojovací ventily a napájěče. I když se přitom vzhledem k použité technologii odpojovacích ventilů negenerují žádná extrémní přechodová zrychlení, chtěl jsem dát testované osobě i možnost řízeného ukončení pohybu. K tomu slouží druhé tlačítko. To je sice také zpracováno bezpečnostním systémem, ale se zpožděnou tří sekundovou reakcí. Okamžitě je však zpracováno řídicím systémem – aplikací pl_reg, která plynule utlumí pohyb a „zaparkuje“ plošinu řízeným způsobem. Po uplynutí času pak reaguje i bezpečnostní systém odpojením všeho.

Monitor překročení vymezeného zdvihu

Jak už bylo uvedeno, je celkový zdvih pístnic $\pm 100\text{mm}$, ale pro praktickou činnost zařízení se používá jen $\pm 70\text{mm}$. Překročení tohoto vymezeného prostoru bylo zvoleno jako jedno z bezpečnostních kritérií. Pro hlídání jeho překročení jsem použil optické závory BGL 120A firmy Balluff. Každý motor je osazen jednou závorou.

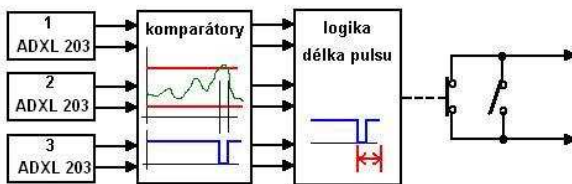


Obr. 12 Optická závora na pístnici motoru

Závory jsou zapojeny sériově do dvou trojic a každá trojice ovládá jedno relé v bezpečnostním systému.

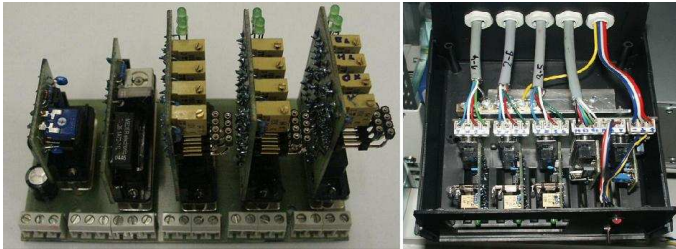
Monitor zrychlení

Hlídání překročení limitních hodnot zrychlení je důležitou součástí bezpečnostního systému. Dokáže totiž zjistit již zárodek nesprávné funkce a zastavit zařízení dříve, než dojde k velkému nárůstu rychlosti. Jako místo pro ukotvení akcelerometrů byl zvolen kulový kloub u plošiny, kde se vždy setkávají táhla od pístnic dvou kolmých motorů. Na každý tento kloub bude umístěn dvouosý akcelerometr, který bude měřit ve směrech táhel připojených pístnic hydromotorů. Z hlediska elektrického zapojení tedy půjde o tři dvouosé akcelerometry, tedy celkem o šest kanálů. Z široké škály akcelerometrů na trhu jsem opět sáhl pro již osvědčené řešení. Jím jsou jednočipové akcelerometry ADXL 203 od Analog devices. Akcelerometry dávají na výstupu analogový signál úměrný zrychlení. Pro potřeby bezpečnostního systému je tedy potřeba hlídat překročení úrovně tohoto signálu přes nastavenou mez. Protože se jedná o jednoučelový obvod, rozhodl jsem se pro vlastní návrh i realizaci celého elektronického obvodu. Sledování představuje hlídání překročení předem nastavených mezí, takže obvodové řešení je poměrně triviální, jde o jednoduchý komparátor úrovně. Princip vyhodnocovacího obvodu je tedy následující.



Obr. 13 Princip vyhodnocovacího obvodu

Signál z každého akcelerometru je sledován dvojicí komparátorů. Pokud dojde k překročení úrovně, vyšle komparátor logický signál. Signály ze všech komparátorů zpracovává obvod kontroly délky pulzu, aby se odfiltrovaly zanedbatelně krátké pulzy. Pokud délka překročí nastavenou dobu, dojde k rozpojení kontaktu relé zapojeného do bezpečnostního systému. Celý systém jsem navrhl modulárně a jeho výsledné provedení je na následujícím obrázku.

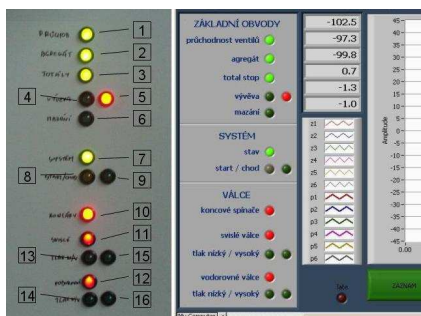


Obr. 14 Výsledné provedení monitoru zrychlení

Informační systém

Norma předepisuje jednoznačnou informovanost operátora o stavu jednotlivých obvodů řídicího systému. Jedná se hlavně o signalizaci zapnutí jednotlivých výkonových obvodů a stav zabezpečovacích prvků. V ovládacím systému plošiny tuto úlohu řeší bezpečnostní systém dvěma paralelními zobrazovacími. Prvním je panel kontrolky přímo na skříní rozvaděče a druhým je tatož informace zobrazována přímo na monitoru operátorského PC – o zobrazování se stará aplikace pl_display. Obě zobrazovací místa jsou shodná rozmístěním i barvou signálních prvků.

Obr. 15 Panel kontrolky (vlevo) a část okna aplikace pl_display (vpravo)

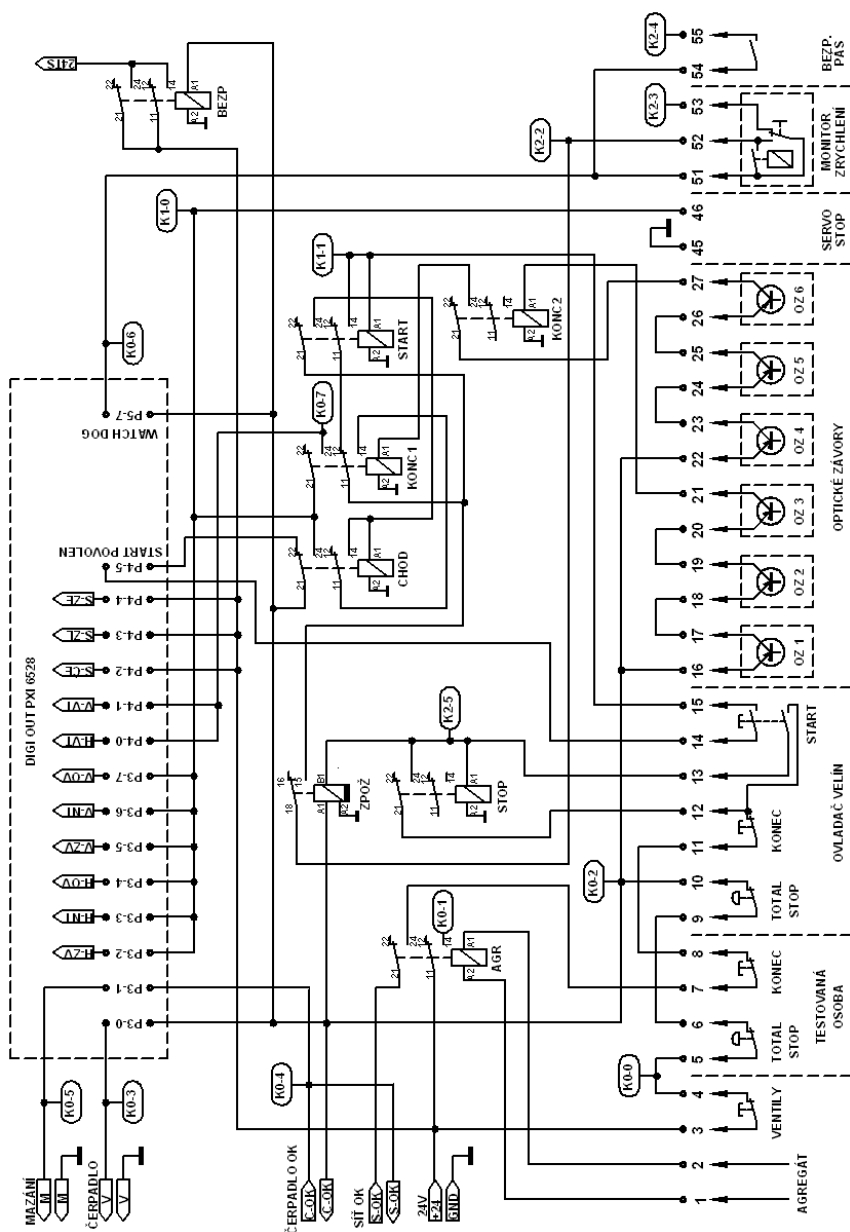


Pomocné spínače

První sada spínačů hlídá otevření mechanických vstupních hydraulických ventilů. Jako další spínače jsou použity pomocné kontakty stykače motoru čerpadla odsávání a jeho proudové ochrany. Z těchto kontaktů se získává informace o

činnosti odsávání. Poslední informací je přítomnost síťového napájecího napětí, která je vedena z kontaktů relé z cívkou na síťové napětí.

4.3. CELKOVÉ ZAPOJENÍ BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU



Obr. 16 Zapojení jádra bezpečnostního systému

Jak je z tohoto schématu patrné, je bezpečnostní systém skutečně tvořen reléovým systémem, který dostává informace z jednotlivých komponent bezpečnostního systému. Při reakci bezpečnostního systému je odpojeno napájení pro výkonová relé a tím dojde k zavření odpojovacích ventilů na motorech i ventilů v napajecích. Na schématu jsou vyznačeny i kontrolní body (např. K0-1), ze kterých je signál veden na logické vstupy karty PXI 6528 a tím je řídicímu softwaru umožněno číst stav všech obvodů plošiny.

4.4. OVĚŘENÍ ČINNOSTI BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU

Pro ověření celkové činnosti bezpečnostního systému byla provedena řada zkoušek, které odpovídaly reálnému použití plošiny. Na desku byla ukotvena sedačka a na ní umístěna zátěž 80 kg.



Obr. 17 Závěrečné testy bezpečnostního systému

V první fázi se testovaly jednotlivé prvky bezpečnostního systému. Pro tento účel byla vytvořena sada budících signálů, založených na harmonických průbězích, do kterých byla vždy vsunut poruchový děj pro jednu veličinu – tedy například překročení maximální polohy nebo zrychlení na jednom motoru. Výsledkem musela být reakce bezpečnostního systému. Sada těchto zkoušek byla zdlouhavá a nezajímavá - najetí do výchozí polohy, spuštění signálu, reakce bezpečnostního systému, zastavení pohybu a znovu totéž pro další signál. Poslední zkoušky se zaměřily na proces vlastního zastavení pohybu. Plošina vykonávala obecný prostorový pohyb, složený z různých harmonických signálů jednotlivých motorů, který byl volen tak, aby odpovídal normě pro použití z člověkem. V náhodném okamžiku byla vyvolána akce bezpečnostního systému, například stlačením Total stop a byla sledována plynulost zastavení pohybu pomocí měření zrychlení a polohy tří zvolených motorů (dvou svislých a jednoho vodorovného). Zrychlení bylo měřeno třísým akcelerometrem na plošině (na obrázku 17 je to ta oranžová krabička pod sedačkou).

Z provedených testů jasně vyplynulo, že bezpečnostní systém plošiny splňuje kritéria požadovaná normou a všechny jeho obvody plní svou funkci. Navržená koncepce i praktická realizace je tedy správná.

5. ZÁVĚR

V předložené práci je popsán můj příspěvek ke zrodu unikátního testovacího zařízení – plošiny se šesti stupni volnosti. Ta vznikla v Hydrodynamické laboratoři Katedry částí a mechanismů strojů a na její stavbě se podíleli odborníci jak z této, tak z katedry Mechaniky pružnosti a pevnosti. Práce trvaly několik let a byly podpořeny výzkumným záměrem MSM 4674788501 Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem. Zařízení je v současné době již dokončeno a předáno do normálního provozu v laboratoři. O důležitosti stavby tohoto zařízení svědčí fakt, že prakticky ihned po uvedení do provozu se začalo používat v rámci grantu řešícího problematiku snížení vibrační zátěže obsluhy důlního stroje v povrchových dolech a v pomyslné frontě na jeho používání čekají další dva týmy, zabývající se vývojem aktivně odpružené sedačky a výzkumem komfortu sezení v osobních vozech. Všechny tyto aktivity vznikly z popudu průmyslu a provádí se v těsné spolupráci s významnými firmami působícími v uvedených oborech. Další probíhající výzkum se zaměřuje na vliv vibrací na svalové reakce člověka a probíhá v přímé spolupráci s lékaři.

Ve své práci jsem se převážně zaměřil na problematiku, kterou jsem řešil já – tedy řídicí a bezpečnostní systém, ale vzhledem k provázanosti celého projektu jsem se občas zmínil i o navazujících systémech. V práci je popsán komplexní návrh, postup ladění i praktická realizace jak hardwarových tak softwarových prostředků řízení, který jsem provedl tak, aby byla zajištěna potřebná dynamika systému při dodržení požadované přesnosti regulace a celý systém navíc odpovídal všem požadavkům normy ČSN EN ISO 13090-1 „Vibrace a rázy – Pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech“. Práce rovněž uvádí příklady praktických měření, kterými se v realu ověřovala činnost zařízení.

Stěžejní část mojí práce vidím v návrhu a konstrukci bezpečnostního systému a ve vytvoření speciálního jednoúčelového softwarového balíku v operačním systému reálného času, který řeší veškeré potřeby uvedeného zařízení z ohledem na požadavky normy pro testy s člověkem. Tím se toto zařízení liší od jiných systémů v laboratoři, která původně neměla pro takovéto zkoušky sloužit a proto jsou jejich bezpečnostní standardy na nižší úrovni. Tuto skutečnost, tedy existenci propracovaného bezpečnostního systému přímo svázaného s ostatními prostředky plošiny a ovládání zařízení speciálním softwarem, který automatizuje standardní úkony při ovládání plošiny a je koncepčně sestaven tak, aby prakticky vyloučil chyby operátora, ocenila i technická komise při schvalování zařízení do provozu. Komise byla složena ze čtyřech odborníků z různých institucí zabývajících se podobnou problematikou a po seznámení s principy řízení a zabezpečení plošiny ji jednomyslně uvolnila pro testy mechanických celků z člověkem. Tím bylo vlastně nezávislými odborníky potvrzeno, že práce celého realizačního týmu byla úspěšně dovedena do cíle. Bylo tedy potvrzeno, že i můj řídicí a bezpečnostní systém, jehož

zrod, oživování, ladění a testování jsem popsal v této práci, je spolehlivě funkční i pro tak náročné aplikace, jako jsou testy mechanických celků s živými lidmi.

6. PROTOKOL O SCHVÁLENÍ ZAŘÍZENÍ DO PROVOZU

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Protokol z jednání komise pro technickou bezpečnost „Posouzení technické bezpečnosti vibračního experimentálního zařízení s šesti stupni volnosti z hlediska zkoušek s pokusnými osobami“

Komise pro technickou bezpečnost jmenovaná děkanem Fakulty strojní technické univerzity v Liberci ve složení:

Ing. Jaroslav Bříza, CSc.
Ing. Martin Bušek, Ph.D.
Ing. Ivan Kraus
doc. Ing. Pavel Souček, DrSc.

GTM s.r.o. Praha
VÚTS a.s. Liberec
SEALL v.s.o. Chomutov
FS ČVUT Praha

se sešla dne 2. 12. 2008, aby ve smyslu normy ČSN EN ISO 13060-1 *Vibrace a rázy – pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech Část 1: Expozice celkovým vibracím a opakovaným rázům*, posoudila technickou způsobilost a bezpečnost experimentálního vibračního zařízení s šesti stupni volnosti z hlediska zkoušek s pokusnými osobami, při kterých se zamýšlí sledování přenosu vibrací v soustavě sedadlo vozidla (resp. pracovního či důlního stroje) – řidič (resp. operátor, uživatel).

Autoři experimentálního zařízení doc. Ing. Jaromír Barбора, CSc., Ing. Aleš Lufinka a provozovatelé doc. Ing. Josef Mevald, CSc., Ing. Jiří Blekta, Ph.D. seznámili komisi s konstrukcí, funkcí a bezpečnostními prvky experimentálního vibračního zařízení instalovaného v hydrodynamické laboratoři katedry částí a mechanismů strojů na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.

Po prohlídce experimentálního vibračního zařízení a ověření funkcí bezpečnostních prvků při všech normou doporučených simulovaných poruchových stavech technická komise konstatuje, že jsou splněny všechny podmínky *Přílohy E – Konstrukce zařízení* normy ČSN EN ISO 13060-1 *Vibrace a rázy – pokyny pro bezpečnostní hlediska zkoušek a pokusů na lidech Část 1: Expozice celkovým vibracím a opakovaným rázům* a v souladu s touto normou uděluje povolení k provozu tohoto zařízení pro zkoušky s pokusnými osobami zahrnující expozici vibrací a rázů.

Komise doporučuje:

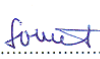
- vedení provozní knihy a pravidelné testování hardwarových prvků bezpečnostního a řídicího systému dle bodu E6 přílohy,
- jednoletou kontrolu čistoty oleje hydraulické kapaliny dle ISO 4406.

V Liberci 2. 12. 2008.


.....
Ing. Jaroslav Bříza, CSc.


.....
Ing. Ivan Kraus


.....
Ing. Martin Bušek, Ph.D.


.....
doc. Ing. Pavel Souček, DrSc.

7. PŘEHLED DALŠÍCH PUBLIKACÍ

Lufinka, A.: Návrh bezpečnostního systému plošiny se šesti stupni volnosti, 46. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů, TU Liberec, 2005, str. 198, ISBN 80-7083-951-1

Lufinka, A.: Bezpečnostní systému plošiny se šesti stupni volnosti, 47. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů, ČZU Praha, 2006, str. 196, ISBN 80-213-1523-7

Lufinka, A.: Six degrees of freedom platform control in relation to safety of part under test, 48. medzinárodná konferencie katedier částí strojov, STU Bratislava, 2007, str. 81, ISBN 978-80-227-2708-2

Lufinka, A.: The six degrees of freedom platform, 45th International Conference Experimental Stress Analysis, ZČU Plzeň, 2007, str.71, ISBN 978-80-7043-552-6

Lufinka, A.: Optimalizace dynamických vlastností plošiny se šesti stupni volnosti, 49. mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů, ZČU Plzeň, 2008, str.155, ISBN 978-80-7043-718-6

Blekta, J., Lufinka, A., Dvořák, B., Šír, M.: Some problems of car seat measurement on board with six degrees freedom, 46th International Conference Experimental Stress Analysis, VŠB Ostrava, 2008, str. 23, ISBN 978-80-248-1774-3