

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

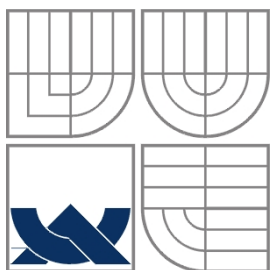
DYNAMICKÁ VYVAŽOVAČKA MALÝCH ROTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

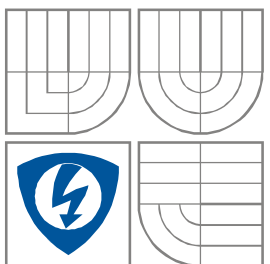
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Michal Staněk

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DYNAMICKÁ VYVAŽOVAČKA MALÝCH ROTORŮ

SMALL ROTOR DYNAMIC BALANCER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

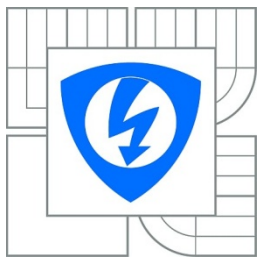
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MICHAL STANĚK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Michal Staněk

ID: 125177

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Dynamická vyvažovačka malých rotorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou vyvažování malých rotorů. Zpracujte přehled používaných metod měření imbalance motorů a vyberte vhodnou dynamickou metodu pro malé rotory. Navrhněte základní blokovou strukturu a mechanickou konstrukci zařízení pro automatické dynamické měření imbalance s výpočetním modulem pro korekci vyvážení - vyvažovačky.

Realizujte mechanickou i elektronickou část dynamické vyvažovačky a proveďte zkušební měření. Na základě výsledků měření a zkušeností s obsluhou systému navrhněte jeho případná vylepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MARTINEK, R. Senzory v průmyslové praxi. BEN-technická literatura: Praha., 2004. ISBN 80-7300-114-4.

[2] PAVELKA, J., ČEŘOVSKÝ, Z., JAVŮREK, J., Elektrické pohony. 2. vydání, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 221 s. ISBN 80-01-02314-1.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 23.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Vyvažování rotorů slouží k odstranění nežádoucích vibrací způsobených nerovnoměrným rozložením hmoty rotoru kolem osy otáčení. Provozování nevyváženého rotoru způsobuje zkracování životnosti ložisek, únavu materiálů a deformace hřídelí. Tato práce se zabývá konstrukcí vyvažovacího stroje. Na základě vlastností byl zvolen typ s měkkým uložením. Tento typ vyvažovačky dosahuje vyšší citlivosti za cenu nutnosti kalibrace pro každý typ rotoru. Pro snímání velikosti vibrací byly zvoleny elektrodynamické snímače. K zadávání údajů a zobrazení výsledků je použit mikroprocesor.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vyvažování, vyvažovačka, rotor, dynamická vyvažovačka s měkkým uložením.

ABSTRACT

Balancing of rotors is used to remove unwanted vibrations caused by uneven distribution of mass around the axis of rotation of the rotor. Operation of an unbalanced rotor may causes shortening of bearing life, fatigue of materials and deformation of shafts. This work deals with construction of a balancing machine (balancer). Because of its good properties, a soft bearing type balancer was chosen for construction. This type of balancer achieves higher sensitivity at the cost of calibration required for each type of rotor. To capture the magnitude of vibration electrodynamic sensors were chosen. To enter data and display results a microprocessor is used.

KEYWORDS

Balancing, balancing machine, rotor, dynamic soft bearing balancing machine.

STANĚK, M. *Dynamická vyvažovačka malých rotorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 48 s., 7 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Dynamická vyvažovačka malých rotorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Kubíčkoví, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

Za odbornou pomoc a možnost měření bych chtěl také poděkovat projektu SIX -
Centra senzorických, informačních a komunikačních systémů
(CZ.1.05/2.1.00/03.0072).



V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Teorie vyvažování	11
1.1 Statické vyvažování	12
1.2 Dynamické vyvažování.....	13
1.3 Základní typy dynamických vyvažovaček.....	15
1.4 Zbytková nevyváženost a metody umístění závaží.....	17
1.5 Snímače vyvažovaček.....	20
2 Návrh vyvažovačky	21
2.1 Návrh mechanické části	21
2.2 Návrh elektronické části	23
2.2.1 Návrh předzesilovače a zesilovače	23
2.2.2 Návrh snímače otáček a napájecího zdroje.....	26
2.3 Testování a Měření	27
3 Programové vybavení	31
3.1 Simulace výpočtů v programu MATLAB	31
3.2 Program pro vyvažovačku	33
3.3 Kalibrace vyvažovačky.....	36
4 Reálné využití vyvažovačky	40
4.1 Obsluha vyvažovačky	40
4.2 Příklad vyvažování rotoru.....	41
4.3 Vlastnosti profesionálních vyvažovaček	43
5 Závěr	46
Literatura	47
Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
Seznam příloh	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Nevyvážený rotor	11
Obr. 1.2	Staticky vyvážený, dynamicky nevyvážený rotor	11
Obr. 1.3	Osy dynamicky nevyváženého tělesa[3]	12
Obr. 1.4	Odstředivá a dostředivá síla.....	13
Obr. 1.5	Výchylka při nižší než rezonanční rychlosti[3]	14
Obr. 1.6	Výchylka při vyšší než rezonanční rychlosti[3]	15
Obr. 1.7	Rozdělení vyvažovaček podle relativní tuhosti[3]	16
Obr. 1.8	Vyvažovačka s měkkým uložením[3]	16
Obr. 1.9	Závislost maximálního přípustného nevyvážku na provozních otáčkách	18
Obr. 1.10	Metody vyvažování[3].....	19
Obr. 2.1	Návrh měkkého uložení.....	21
Obr. 2.2	Návrh pohonu rotoru	22
Obr. 2.3	Blokové schéma elektrické části.....	23
Obr. 2.4	Zesílení a posunutí signálu	24
Obr. 2.5	Přístrojový zesilovač INA827	24
Obr. 2.6	Schéma zapojení předzesilovače a zesilovače.....	25
Obr. 2.7	Výsledky simulace zapojení obvodů INA827	25
Obr. 2.8	Simulace funkce <i>Rail-to-Rail Output</i>	26
Obr. 2.9	Schéma zapojení snímače otáček	26
Obr. 2.10	Schéma zapojení zdroje.....	27
Obr. 2.11	Zkušební rotor.....	27
Obr. 2.12	Graf závislosti napětí snímače na excentricitě	28
Obr. 2.13	Graf závislosti napětí na vstupu A/D na excentricitě	30
Obr. 2.14	Srovnání naměřených hodnot	30
Obr. 3.1	Průběhy vstupních signálů simulace v programu MATLAB	32
Obr. 3.2	Vzorkovaný signál a zprůměrovaný signál a jeho spektrum	32
Obr. 3.3	Vývojový diagram měřicí části programu	34
Obr. 4.1	Úvodní obrazovka.....	40
Obr. 4.2	Upozornění před měřením	40
Obr. 4.3	Zobrazené hodnoty v jednotkách převodníku	40
Obr. 4.4	Upozornění před kalibrací	40
Obr. 4.5	Zobrazené hodnoty v gramech	41

Obr. 4.6 Fotografie vyvažovaného rotoru.....	41
Obr. 4.7 Mechanické provedení vyvažovačky Pasio 15[10]	44
Obr. 4.8 Nastavení parametrů vyvažované součásti[11]	44
Obr. 4.9 Změřené hodnoty vyvažované součásti[11]	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 Třídy kvality vyvažování[3]	18
Tab. 1.2 Rozdělení použitelnosti zařízení dle externího vyvažování [7].....	19
Tab. 2.1 Závislost napětí snímače na excentricitě	28
Tab. 2.2 Napětí snímače při změně polohy závaží	29
Tab. 2.3 Závislost napětí na vstupu A/D na excentricitě.....	29
Tab. 3.1 Zadané údaje v programu pro MATLAB	31
Tab. 4.1 Parametry vyvažovaného rotoru	42

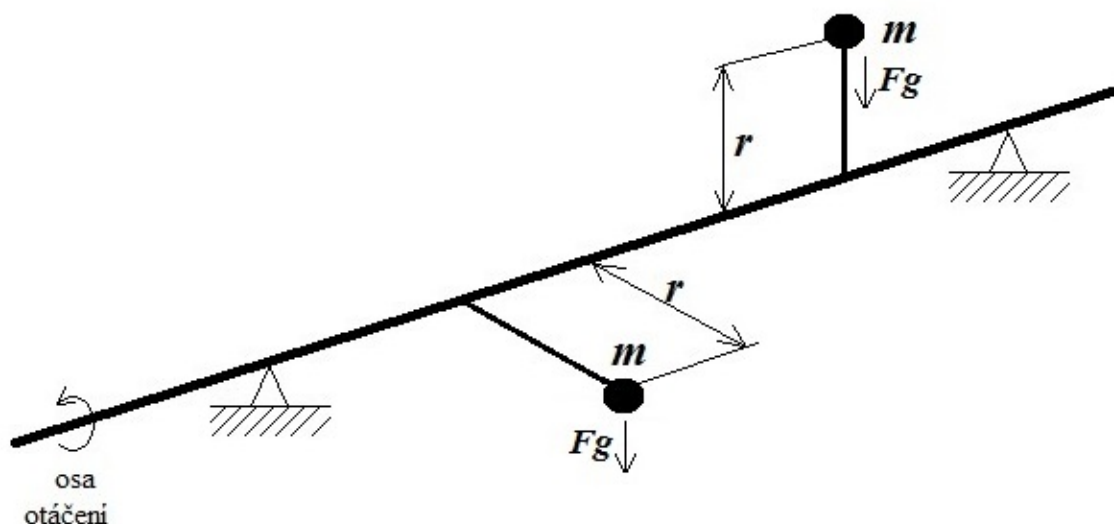
ÚVOD

Vyvažování slouží k odstranění nežádoucích vibrací způsobených rozdílnou polohou hlavní osy momentu setrvačnosti a osy otáčení rotačních součástí strojů, obecně rotorů. Nevyváženost je tedy stav, kdy rotor nemá rovnoměrně rozdělenou hmotu kolem osy otáčení. Ačkoli všechny rotory jsou při výrobě perfektně vyváženy, tak nevyvážení často vzniká z důvodu nevhodného používání, otřesů, nebo i při běžném používání. Následné mechanické vibrace způsobené nevyvážením zkracují životnost ložisek, způsobují únavu materiálů, která může vést až k prasklinám, způsobují deformace hřídelí. Více než polovina poruch strojů a zařízení je připisována přímo či nepřímo nevyváženosti rotorů [7].

Následující text je členěn do čtyř základních částí. První kapitola se zabývá teorií vyvažování obecně. Popisuje fyzikální model nevyváženého rotoru a jeho matematickou podstatu, a různé metody a způsoby vyvažování. Druhá kapitola se věnuje konstrukci vlastní vyvažovačky: mechanickému provedení, použitým snímačům, elektrickému zapojení, a podobně. Ve třetí části je provedena simulace a matematické řešení výpočtu nevyvážku a programové vybavení včetně kalibrace. V poslední části je provedeno ukázkové vyvážení rotoru a srovnání s profesionálními vyvažovacími stroji.

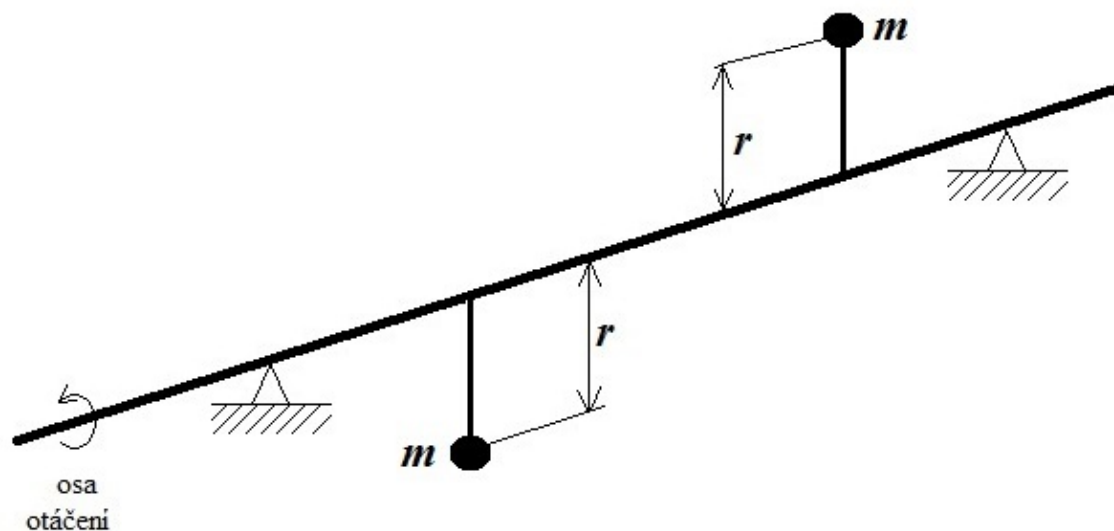
1 TEORIE VYVAŽOVÁNÍ

Při vyvažování rotorů se používají dvě metody, statické vyvažování a dynamické vyvažování. Nejprve bude vysvětlen rozdíl mezi nevyváženým, staticky vyváženým a dynamicky vyváženým rotorem.



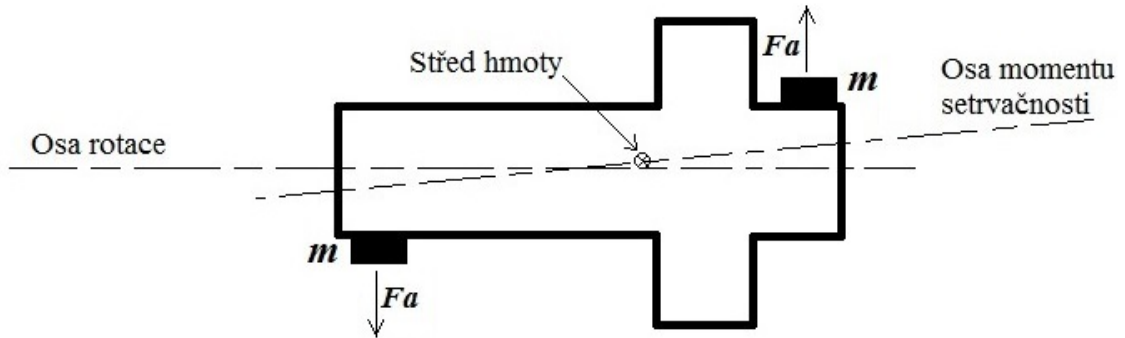
Obr. 1.1 Nevyvážený rotor

Na obr. 1.1 je znázorněn staticky i dynamicky nevyvážený rotor, který má pro ilustraci celou svoji hmotnost m uloženu ve dvou bodech vzdálených ve vzdálenosti r od osy otáčení. Tento rotor má při otáčení kolem osy pouze dvě rovnovážné polohy, při kterých gravitační síly F_g budou působit stejnou silou, každá na opačnou stranu otáčení. Přesouváním jednoho závaží o hmotnosti m můžeme docílit toho, aby rotor setrval ve stacionární poloze nezávisle na natočení podle osy. Tím docílíme statického vyvážení.



Obr. 1.2 Staticky vyvážený, dynamicky nevyvážený rotor

Na obr. 1.2 je znázorněn staticky vyvážený rotor. Tento rotor se nezačne pohybovat vlivem gravitace při natočení podle osy do libovolné polohy, gravitační síly jsou v rovnováze. Na obr. 1.3 je znázorněn staticky vyvážený, ale dynamicky nevyvážený rotor. Vlivem nezanedbatelné rychlosti otáčení kolem osy rotace vznikají odstředivé síly F_a , které způsobují odchýlení osy momentu setrvačnosti od osy rotace. Dynamické vyvažování má za úkol sloučit tyto dvě osy.



Obr. 1.3 Osy dynamicky nevyváženého tělesa[3]

1.1 Statické vyvažování

Statické vyvažování je v podstatě vyvažování bez rotace. Zabránit vibracím může pouze u rotorů, kde je délka rotoru zanedbatelná vzhledem k jeho průměru. Pak je i zanedbatelná dynamická nevyváženost. Využívá se například u vrtulí letadel, závodních cyklistických kol, nebo kotoučových pil.

Nejprve je nutné stanovit nevyvážek U (anglicky *unbalance*). Ten se definuje jako maximální hmotnostní moment.

$$U = m \cdot r [g \cdot mm], \quad (1)$$

kde m je hmotnost nevyvážku a r je poloměr k ose otáčení.

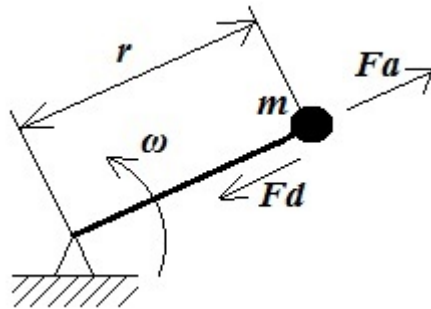
K vyvažování se používá hrotová vyvažovačka, kde je rotor upevněn v ose otáčení mezi hroty a může se téměř bez tření otáčet. Dále se používá nožová vyvažovačka, kde je rotor položen hřídélí na dva rovnoběžné vodorovné nože, na kterých se vyvažovaný rotor může téměř bez tření otáčet. K dosažení statického vyvážení se buď odebere hmota rotoru v místě nevyvážku, nebo přidá na opačné straně. Vyvažování je skončeno poté, když při jemném roztočení rotoru na jednu stranu, rotor zastaví ve všech polohách přibližně za stejnou dobu. Zbytkový nevyvážek, který je stejný jako citlivost vyvažovačky se poté dá zjistit přiděláním maximálního závaží, které neovlivní chování rotoru ve vyvažovačce.

Statické vyvažovačky využívají gravitační sílu k detekci nevyváženosti. Jsou citlivé pouze na statickou nevyváženost a nejsou schopny detekovat dynamickou nevyváženost. V následujícím textu bude pod pojmem vyvažování vždy uvažováno dynamické vyvažování, které přináší mnohem lepší výsledky, ale zároveň neexistuje žádná srovnatelně jednoduchá metoda.

1.2 Dynamické vyvažování

Cílem dynamického vyvažování je vyrovnat odstředivé síly, které působí na rotor. Z tohoto důvodu je měření nutné vždy provádět při otáčení rotoru. Na začátek je nutné stanovit a objasnit pojmy, které se vážou k nevyváženému rotoru při otáčení.

Odstředivou sílu F_a viz. obr. 1.4 vytváří hmotná částice při kruhovém pohybu. Odstředivá síla směřuje stále od středu otáčení. Stejně jako se otáčí částice kolem středu otáčení, otáčí se i vektor odstředivé síly.



Obr. 1.4 Odstředivá a dostředivá síla

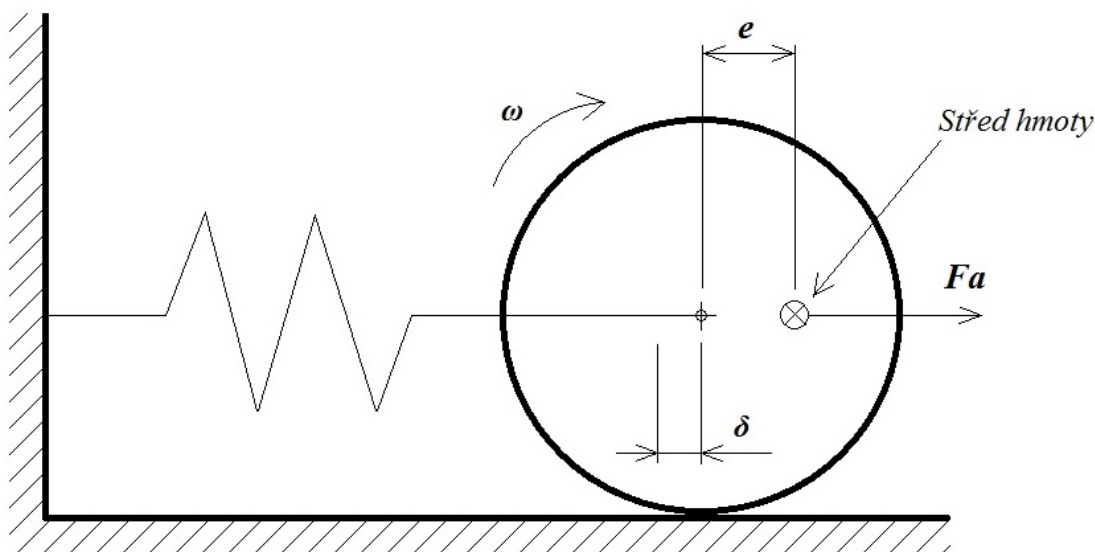
Aby částice setrvala v kruhovém pohybu, tak musí proti odstředivé síle působit stejně velká dostředivá síla F_d , kterou působí pevný střed otáčení na částici. Velikost odstředivé síly se vypočítá podle vzorce

$$F_a = m \cdot r \cdot \omega^2 = U \cdot \omega^2, \quad (2)$$

kde m je hmotnost, r poloměr, ω je úhlová rychlost otáčení a U je nevyvážek. Ze vzorce (2) vyplývá, že zatímco součin $m \cdot r$ již známý jako nevyvážek zůstává konstantní, tak velikost odstředivé síly roste velmi prudce s rychlostí.

Jaký je tedy výsledný pohyb nevyvážených rotujících částí. V jednom extrému, když je rotor pevně uchycen, tak síly namáhající ložiska mohou být velmi velké a způsobovat poškození. V druhém extrému, když je rotor uložen volně, může velikost výchylky vibrací dosahovat velkých amplitud. Amplituda vibrací je úměrná velikosti nevyvážku a omezená vzdáleností mezi středem hmoty a osy otáčení. Při uvažování nevyváženého tenkého kotouče upevněného pomocí jednoduchého pružinového závěsu. Záznam pohybu v čase se mění amplitudou i fází v závislosti na jeho rychlosti otáčení. Při velmi malých rychlostech (menších než polovina rezonanční frekvence systému) nevyvážek kotouče vytváří odstředivou sílu, která je relativně malá. Odstředivá síla je potlačována silou pružiny a způsobuje jenom malou výchylku pružinového závěsu. Výchylka a vektory síly jsou ve fázi, to znamená, že výchylka a odstředivá síla mají stejný směr. Ve vysokých otáčkách odstředivá síla nevyvážku vzroste natolik, aby způsobovala značnou výchylku.

Na obr. 1.5 je znázorněna vzdálenost mezi osou otáčení středem hmoty a výchylka u nevyváženého kotouče při nižší než rezonanční rychlosti. Vzdálenost se nazývá excentricita e a výchylka se označuje řeckým písmenem δ .



Obr. 1.5 Výchylka při nižší než rezonanční rychlosti[3]

V tomto případě se vypočítá výchylka

$$\delta = Fa/k, \quad (3)$$

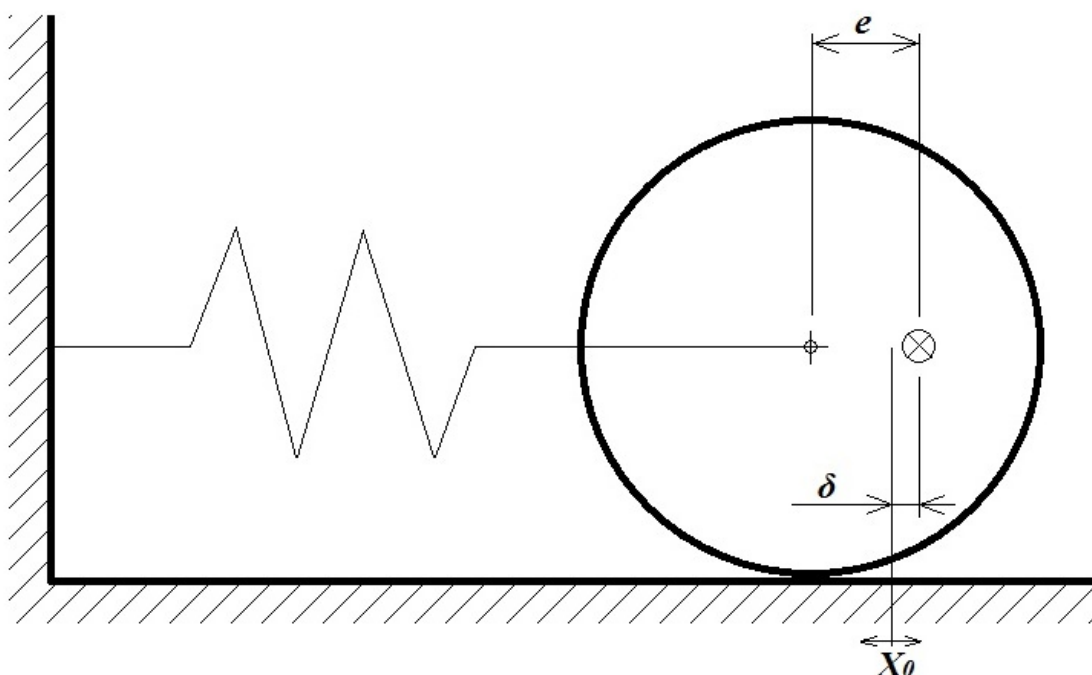
kde k je tuhost pružiny a Fa je odstředivá síla.

Při rychlostech blízkých rezonančnímu kmitočtu soustavy odstředivá síla a síla pružiny změní vzájemnou fázi a nejdou proti sobě. Při rezonanci jsou navzájem o 90° posunuty a amplituda výchylky může velice narůstat - mnohem více, než při vyšších rychlostech. Když je tlumení nízké, tak se amplituda vibrací stane opravdu velikou. V historii některé vyvažovačky pracovaly v okolí rezonance pro zvýšení citlivosti, ačkoli výsledky v oblasti blízko rezonance mohou být velmi nelineární až nepředpokladatelné. V dnešní době kvalitních integrovaných obvodů není problém kvalitně zesílit i velmi slabé signály, tak tato oblast bývá zpravidla zapovězena.

Při rychlostech nad rezonancí systému se fáze mezi odstředivou silou a výchylkou dále posunuje, až dosáhne 180° . Rychlost změny fáze závisí na velikosti tlumení. Slabě tlumené systémy mění fázi velmi rychle, silně tlumené systémy mění fázi velmi pomalu. Rozdíl fází 180° ukazuje, že výchylka jde obráceným směrem, než odstředivá síla. Při rychlostech dvakrát vyšších než je rezonanční frekvence systému pružinové uložení nemůže ovlivnit rotaci okolo osy otáčení, a nevyvážený kotouč rotuje okolo svého vlastního středu hmoty. V tomto případě pružina působí relativně malou silou na rotor. Tato síla způsobuje pouze malou výchylku na obrácenou stranu. V tomto případě se vypočítá výchylka [2]

$$\delta = F/k \cdot (\omega/\omega_n)^2, \quad (4)$$

kde je ω úhlová rychlost otáčení, a ω_n rezonanční úhlová rychlost otáčení systému. Malá excentricita vyvolá odstředivou sílu působící obráceným směrem. Jelikož síla vztažená k excentricitě roste se čtvercem úhlové rychlosti otáčení, tak i malá excentricita způsobí velkou odstředivou sílu vzhledem k síle pružiny. Na obr. 1.6 je znázorněna excentricita e a výchylka δ u nevyváženého kotouče při vyšší než rezonanční rychlosti.



Obr. 1.6 Výchylka při vyšší než rezonanční rychlosti[3]

Objasnění výchylky δ v tomto případě ale není důležité. Jelikož maximální výchylka od středu otáčení je rovna excentricitě e , tak může být spočítán nevyvážek

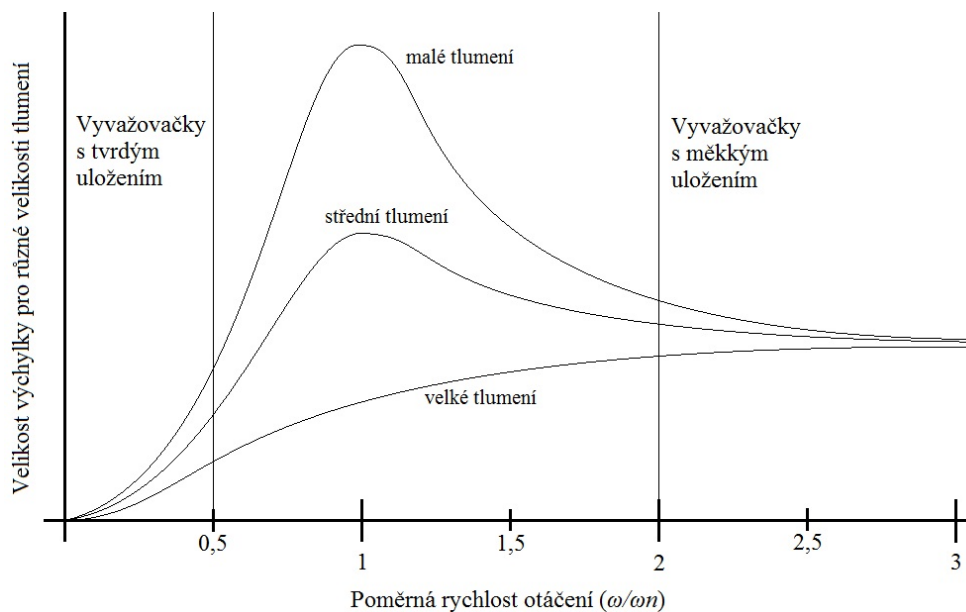
$$U = e \cdot M, \quad (5)$$

kde M je hmotnost kotouče včetně pohyblivých částí. Vyvažovačka pracující na tomto principu se chová jako vyvažovačka s měkkým uložením.

U rotoru, kde je jeho délka srovnatelná nebo větší než jeho průměr, se mohou vyskytnout dva případy nevyváženosti. Osa momentu setrvačnosti je rovnoběžná s osou rotace. Tento případ nevyváženosti lze řešit vyvážením pouze v jedné vyvažovací rovině. Obecně při dynamické nevyváženosti není osa rotace rovnoběžná s osou otáčení a ani ji v žádném bodě neprotíná. Pro úplné vyvážení je tedy vždy zapotřebí vyvažovat ve dvou vyvažovacích rovinách. Stanovením nevyváženosti ve dvou vyvažovacích rovinách je možné vždy přesně shrnout všechny dílčí nevyvážky rotoru.

1.3 Základní typy dynamických vyvažovaček

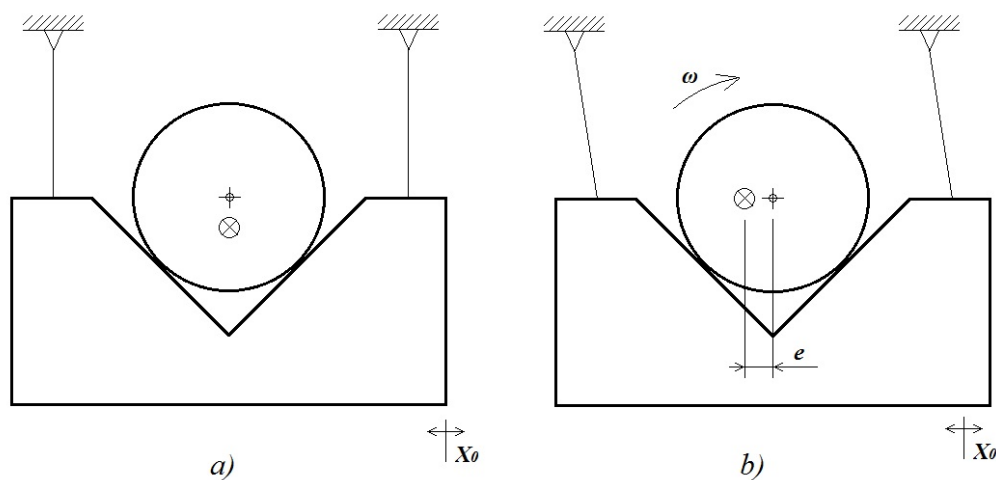
Dynamické vyvažovačky pracují na principu detekce odstředivé síly. Jsou schopny detekovat jak statickou tak i dynamickou nevyváženost. Dynamické vyvažovací stroje spadají do dvou hlavních skupin. Vyvažovačky s měkkým a tvrdým uložením (anglicky *soft bearing and hard bearing balancers*). Toto rozdělení vychází z relativní tuhosti měřicího systému, jak bylo přiblíženo v předešlé kapitole.



Obr. 1.7 Rozdělení vyvažovaček podle relativní tuhosti[3]

Na obr. 1.7 je graf přibližně rozdělující tyto dva typy vyvažovaček. Poměrná rychlost otáčení je vztažena k rezonanční frekvenci systému. Velikost výchylky je uvedena bez jednotek pro jeden nevyvážený systém. Při nízkých rychlostech je výchylka malá a odvozená od středu hmoty. Při rychlostech alespoň dvakrát vyšších než je rezonanční, se výchylka stabilizuje, těleso rotuje kolem osy momentu setrvačnosti. Při rychlostech blízko rezonance ($\omega/\omega_n = 1$) může být výchylka velmi velká a je velmi závislá na velikosti tlumení.

Dynamická vyvažovačka s měkkým uložením pracuje při rychlostech nad rezonanční frekvencí uložení vyvažovačky a měří výchylku způsobenou nevyvážeností. V tomto typu vyvažovačky se vyvažovaná součást může volně pohybovat v horizontální rovině, a rotuje okolo osy momentu setrvačnosti. Velikost výchylky se měří na uložení a ukazuje velikost nevyvážku.



Obr. 1.8 Vyvažovačka s měkkým uložením[3]

Na obr. 1.8 je znázorněno měkké uložení s rotorem a) v klidu, b) při otáčení. Největší nevýhodou tohoto typu vyvažovačky je skutečnost, že se vyvažovačka musí překalibrovat pro každou vyvažovanou součást. Levá i pravá strana uložení jsou významně ovlivňovány celkovou hmotností a rozložením hmoty podél osy. Kalibrace vyžaduje umístit závaží o známé hmotnosti do obou vyvažovacích rovin. Každé závaží způsobuje vibrace v obou měřících rovinách. Poměr mezi amplitudami může vyjadřovat vzájemné ovlivňování mezi rovinami, nebo jejich nezávislost. Oddělení rovin v poměru 100:1 se dá dosáhnout jen obtížně.

Dynamická vyvažovačka s tvrdým uložením pracuje při rychlostech otáčení nižších, než je rezonanční frekvence uložení, a měří síly vytvořené otáčením rotoru. Velikost výchylky vibrací je velmi malá, ale odstředivé síly jsou potenciálně velké. Kalibrace se provádí obdobně jako v předešlém případě. Kalibrace je mnohem stálejší a zůstává přesná přes široké rozpětí hmotnosti rotorů. Kalibrace může být také přepočítána pro různé otáčky. Oddělení rovin 100:1 je běžné. Při měření odstředivé síly a přesném měření rychlosti otáčení, počítač spočítá nevyvážek v místě vyvažovacích rovin, anebo jej přepočítá do jakékoli vyvažovací roviny. Pozice těchto různých rovin jsou zadávány relativně vzhledem k měřícím rovinám při nastavování vyvažovačky na určitý rotor. Vyvažovačky s tvrdým uložením nevyžadují, aby střed hmoty ležel mezi rovinami uložení. Jsou jednodušší na práci obsluhy, ale nedosahují přesnosti vyvažovaček s měkkým uložením.

Mobilní přenosné vyvažovačky jsou speciální zařízení, která detekují nevyváženost rotorů přímo v jejich aplikačním prostředí. Možnost vyvažování vychází přímo z konstrukčního provedení zařízení a možnosti přístupu k vyvažovacím rovinám. K měření používají dvojici akcelerometrů a optické čidlo rychlosti otáčení. Počítač následně interpretuje změřené vibrace dle požadavků. Mobilní vyvažovačky jsou schopny pracovat ve velmi širokém rozpětí frekvencí. To je možné využít, k měření vibrací způsobených poškozením ložisek, nebo například k změření rezonančních frekvencí celého zařízení. Nastavením zařízení je možné minimalizovat dobu chodu v nejkritičtějších otáčkách. Tyto přístroje bývají primárně určeny k diagnostice středních a velkých průmyslových zařízení.

1.4 Zbytková nevyváženost a metody umístění závaží

Pro úplné vyvážení rotoru je zapotřebí umístit na rotor takové závaží, které má za následek úplné odstranění vibrací způsobených odstředivými silami. Nevyváženost rotoru se uvádí jako součin hmotnosti [g] a poloměru [mm] od osy otáčení tohoto závaží. Úplně vyvážený rotor má tedy nulový nevyvážek, a při libovolné rychlosti otáčení nezpůsobuje žádné vibrace. Úplné vyvážení rotoru v praxi není možné, ale i vyvažování do reálných limitů je velmi pracné a časově náročné. Z důvodu ekonomičnosti je tedy nutné stanovit pro každý rotor maximální zbytkovou nevyváženost, při které nedochází k poškození zařízení, nebo nesprávné funkci vlivem vibrací. Pro tento účel je normou stanovena doporučující tabulka (tab 1.1), kde je uvedena třída kvality vyvažování, tomu odpovídající maximální rychlost vibrací a příklady rotorů nebo zařízení.

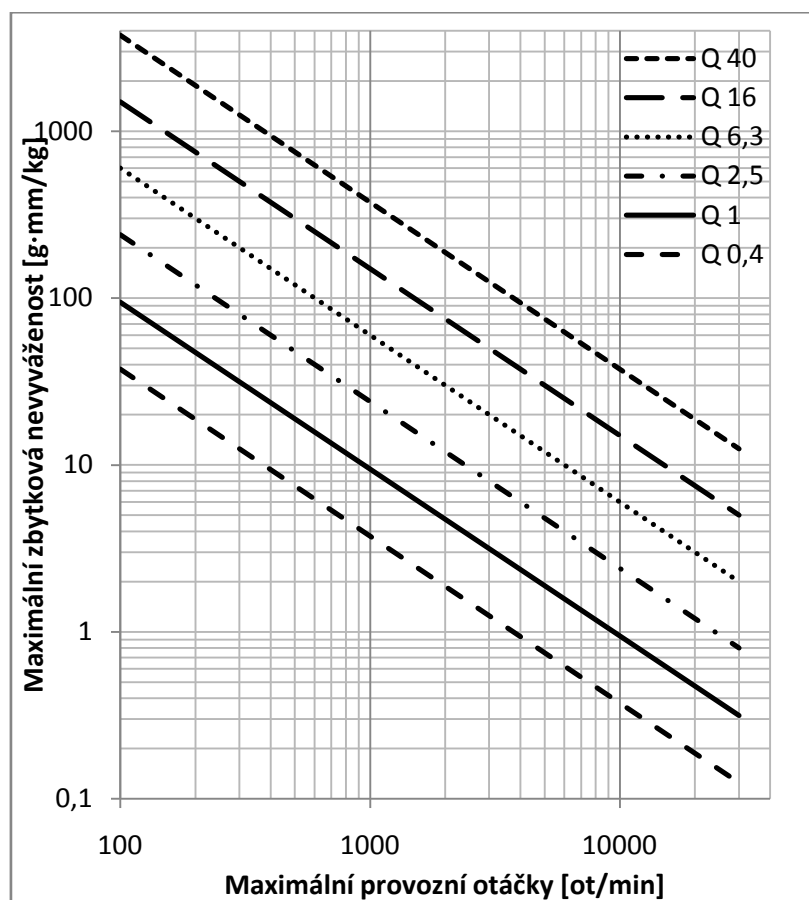
Třída kvality	Max. vibrace $e \cdot \omega$ [mm/s]	Příklady rotorů nebo strojů
Q 40	40	Automobilová kola, ráfky, kloubové hřídele, klikové hřídele spalovacích motorů
Q 16	16	Přesné kloubové hřídele, klikové hřídele motorů osobních automobilů
Q 6,3	6,3	Ventilátory, setrvačníky, normální elektromotory
Q 2,5	2,5	Plynové turbíny, turbokompresory, přesné elektromotory
Q 1	1	Přesné vyvažování - magnetofonové a přesné elektromotorky
Q 0,4	0,4	Velmi přesné vyvažování - gyroskopy

Tab. 1.1 Třídy kvality vyvažování[3]

Při přepsání vztahu (5) můžeme excentricitu stanovit jako

$$e = U/M \quad (6)$$

kde U je nevyvážek a M je hmotnost rotoru. Dopočítáním maximální přípustné excentricity pro všechny třídy kvality při běžně používaných otáčkách dostaneme lineární grafy obr. 1.9.



Obr. 1.9 Závislost maximálního přípustného nevyvážku na provozních otáčkách

Při dosazení maximálních provozních otáček a stanovení potřebné kvality vyvažování je přímo možné z obr. 1.9 odečíst maximální nevyvážek na kilogram hmotnosti rotoru.

Pro mobilní vyvažovačky jsou stanoveny maximální rychlosti vibrací, které odpovídají určitému stavu zařízení.

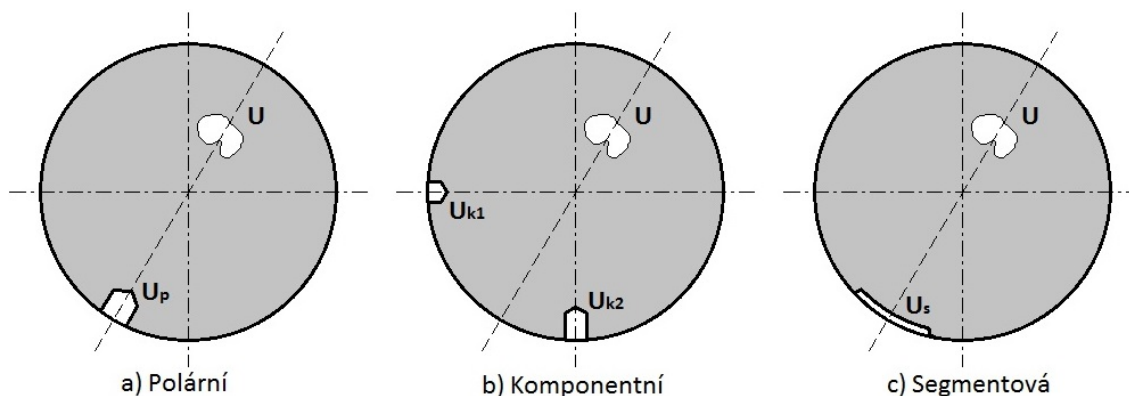
Výkon zařízení	$P \leq 15 \text{ kW}$		$15 \text{ kW} < P \leq 300 \text{ kW}$		$300 \text{ kW} < P \leq 50 \text{ MW}$		Max. mm/s
	Pevné	Pružné	Pevné	Pružné	Pevné	Pružné	
Stav Zařízení	A	A	A	A	A	A	0,71
	B	A	A	A	A	A	1,40
	B	B	B	A	A	A	2,30
	C	B	B	B	B	A	2,80
	C	B	C	B	B	A	3,50
	D	C	C	B	B	B	4,50
	D	D	D	C	C	B	7,10
	D	D	D	D	D	C	11,00
	D	D	D	D	D	D	> 11,00

A = Stav nového zařízení	C = Pouze časově omezené použití
B = Časově neomezené použití	D = Vibrace způsobují poškození

Tab. 1.2 Rozdělení použitelnosti zařízení dle externího vyvažování [7]

V tab. 1.2 jsou uvedeny přibližné stavy zařízení, které jsou rozděleny podle výkonu a uložení zařízení, a podle rychlosti vibrací. Při vyvažování středních a velkých rotorů je nutné dodržet bezpečnost při vyvažování, způsoby připevnění závaží, pracovní postupy, zpracování protokolu o vyvažování a další. Tyto požadavky, zejména na bezpečnost, jsou stanoveny v rámci norem, například norma ČSN ISO 21940-13/2012 *Vibrace - Vyvažování rotorů - Část 13: Kritéria a bezpečnostní opatření pro vyvažování středních a velkých rotorů in situ*.

Při vyvažování je možné vyrovnat rozložení hmoty rotoru připevněním závaží, nebo odebráním části hmoty rotoru. Odebírání hmoty rotoru se provádí odvrtáváním nebo broušením. Závaží se upevňují šrouby na místech určených konstrukcí rotoru, nebo přivařením na vhodném místě.



Obr. 1.10 Metody vyvažování[3]

Z hlediska konstrukčního provedení rotoru je možné vyvažovat pomocí tří základních metod, které jsou znázorněny na obr. 1.10. Při polární metodě je závaží umístěno přesně v ose nevyvážku. Komponentní metoda se využívá například u rotorů, které mají montážní otvory pro připevnění závaží. Závaží je nutné rozdělit podle rozdělení nevyváženosti na jednotlivé komponenty. Segmentová metoda se používá nejčastěji při odbrušování. Osa těžiště segmentu musí odpovídat ose nevyvážku.

1.5 Snímače vyvažovaček

Výběr vhodného snímače zásadně ovlivňuje přesnost a citlivost vyvažování.

U vyvažovaček s tvrdým uložením se v praxi využívá výhradně piezoelektrických snímačů. Piezoelektrický jev je možné pozorovat na krystalech určitých látek. Při deformaci krystalu křemene se vytvářejí elektrické dipólové momenty. Připojením elektrod na určité stěny krystalu je tedy možné měřit elektrické napětí způsobené mechanickou silou působící na krystal.

Pro měření výchylky vyvažovaček s měkkým uložením se používají snímače využívající vířivých proudů, elektrodynamické snímače a optické snímače. Snímače využívající vířivých proudů jsou schopné měřit vzdálenost elektricky vodivých předmětů. Cívka snímače, která je napájena střídavým proudem, vyvolává v okolních vodivých předmětech vířivé proudy. Magnetické pole těchto vířivých proudů působí proti magnetickému poli cívky. Změna vzdálenosti vodivého předmětu od cívky snímače vyvolá tedy změnu impedance cívky. Elektrodynamické snímače se skládají ze dvou částí, magnetu a cívky. Změnou polohy magnetu oproti cívce se mění velikost magnetického toku protékajícího cívkou. Změna velikosti magnetického toku vyvolává v cívce elektrický proud. Elektrický proud cívkou je úměrný rychlosti změny magnetického toku. Optické snímače využívají k měření změny vzdálenosti změnu fáze vysílaného paprsku a paprsku odraženého od měřeného objektu. Tyto snímače jsou velice přesné, ale pro svoji náročnost jsou využívány jen v nejnáročnějších zařízeních.

Nejčastějšími senzory vibrací, které používají externí vyvažovačky, jsou akcelerometry. Akcelerometr se dá nejjednodušeji představit jako zařízení obsahující těleso zavěšené na pružině. Při zrychlení celého zařízení se těleso snaží setrvávat ve své poloze a způsobí stlačení pružiny. Velikost stlačení pružiny je pak úměrná zrychlení.

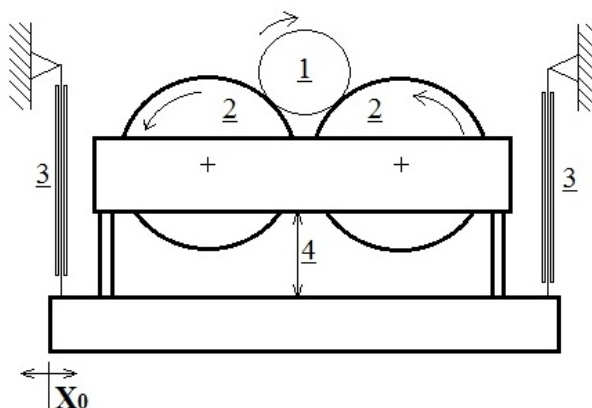
2 NÁVRH VYVAŽOVAČKY

Cílem této práce je zhotovit vyvažovací stroj, na kterém je možné kvalitně vyvážit rotory po opravě. Jedná se převážně o rotory stejnosměrných motorů a alternátorů z nákladních automobilů. Dále se jedná o rotory motorů čerpadel, ventilátorů, praček a podobně. Vyvažovačka bude obsluhována pracovníkem, který má bohaté zkušenosti s vyvažováním a tudíž není hlavním požadavkem jednoduchost obsluhy stroje.

Celý návrh zařízení je ovlivněn zejména finanční nedostupností snímačů, kladek, závěsů a dalších mechanických součástí vyvažovaček. Po řádné úvaze bylo přistoupeno k návrhu vyvažovačky s měkkým uložením s náhonem přes kardan, elektrodynamickým snímáním vibrací a vyhodnocení pomocí mikroprocesoru a displeje. Popis jednotlivých částí a důvody jejich výběru jsou uvedeny jednotlivě v následujících podkapitolách.

2.1 Návrh mechanické části

Nejprve bylo rozhodnuto o systému uložení rotoru. Měkké uložení nabízí vyšší citlivost měření a z důvodu možnosti sledování vibrací pouhým okem nabízí jednoduchou eliminaci velkých systematických nebo nahodilých chyb. Pro tuto volbu bylo navrženo uložení, které se z důvodu zachování linearitu co nejvíce přibližuje matematickému kyvadlu.



Obr. 2.1 Návrh měkkého uložení.

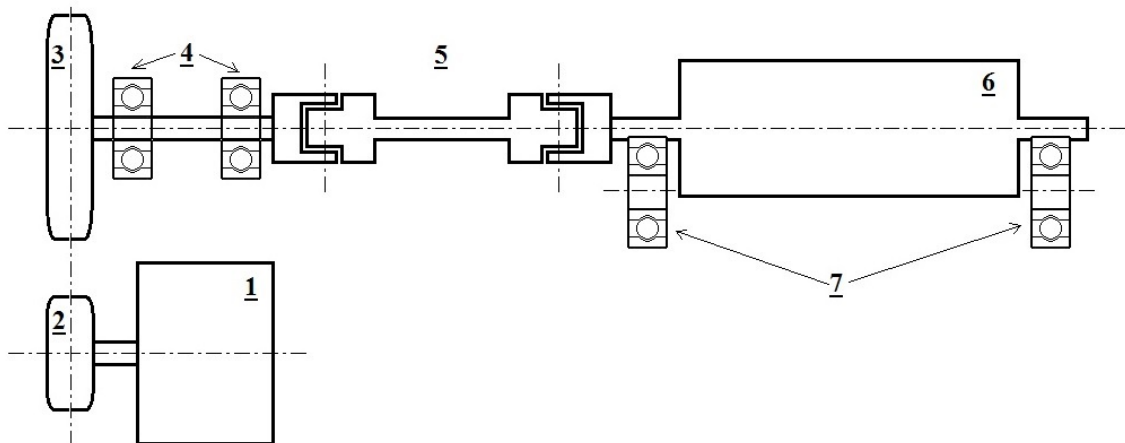
Na obr. 2.1 je znázorněna hřídel vyvažovaného rotoru (1), volně otočné rolny (2), tenké uprostřed vyztužené ocelové plechy (3) a možnost výškového nastavení (4) pro zachování vodorovné polohy rotorů s různými průměry hřídelí.

Stanovení maximální výchylky stojanu, a tím i maximální měřitelné nevyváženosti bylo provedeno po zvážení všech pohyblivých částí. Tyto pohyblivé části dvou stojanů váží přibližně 1,2 kg. Při uvažovaném 800 g rotoru s celkovým nevyvážkem 1000 g·mm je excentricita vypočítaná podle vztahu (6) 500 g·mm/kg. Rotor s tímto nepravděpodobně velkým nevyvážkem způsobí maximální výchylku stojanu $\pm 0,5$ mm. Pro matematické kyvadlo platí, že výchylka nesmí přesáhnout $\pm 5^\circ$. Zde je nutné uvažovat, že závěs je tvořen tenkým ocelovým plechem. Aby nedošlo k ovlivnění

linearity, byl použit závěs dlouhý 12 cm, Výchylka 0,5 mm znamená vychýlení přibližně o $0,5^\circ$. Tenké ocelové plechy jsou po délce vyztuženy z důvodu zabránění možným nežádoucím vibracím.

Rolny (vodící kladky) určené pro vyvažovací stroje začínají se svojí cenou kolem 800USD. Z tohoto důvodu byly místo rolen použity kvalitní ložiska SKF, u kterých bylo vyměněno originální mazivo za plně syntetické mazivo SIL100 s nízkou viskozitou. Pohyblivé části jsou zhotoveny převážně z hliníku a polyamidu. Nepohyblivé části stojanu jsou zhotoveny z pertinaxu a jsou připevněny k ližinám základní desky. Tím je umožněno nastavení vzdálenosti mezi stojany.

Pro pohon rotoru se v praxi používají převážně dva systémy. Pohon řemenem přes tělo rotoru a pohon kardanovou hřídelí. Pohon řemenem je z konstrukčního hlediska mnohem složitější, musí být nastavitelný pro různé průměry rotorů a vyžaduje zabezpečení proti pohybu rotoru do strany. Hlavní nevýhodou je, že při konstantní rychlosti motoru a při stejné velikosti řemenic jsou otáčky rotoru úměrné jeho průměru. Z těchto důvodů byl zvolen pohon přes kardanovou hřídel.



Obr. 2.2 Návrh pohonu rotoru

Na obr. 2.2 je znázorněn motor (1), který roztáčí řemenici (2). Pomocí řemenu se hnací síla přenáší na řemenici (3), která je přes hřídel uložena v ložiscích (4). Kardanovou hřídelí (5) je roztáčen rotor (6), který je položen na rolnách závěsu (7).

Otáčky malých rotorů pro vyvažování musí být v doporučeném rozmezí přibližně 300 až 1000 ot/min. Při menších otáčkách jsou odstředivé síly velmi malé. Při vyšších otáčkách je nebezpečí nelineárního tření a tím nelineární výchylky. Otáčky byly nastaveny na 600 ot/min. Aby nedocházelo k ovlivnění vyvažování vibracemi motoru, tak jsou velikosti řemenic v necelistvém poměru 60 : 125. V případě problémů s vyvažováním je možné rychlost otáčení upravit výměnou jedné řemenice za jinou.

Hlavní nevýhodou tohoto druhu pohonu je tlumení vibrací jedné strany uložení vlivem ohýbání kardanu. Z tohoto důvodu byl použit velmi kvalitní kardan s jehlovým uložením. Je pravděpodobné, že při měření a kalibraci bude ovlivnění jedné měřicí roviny znatelné. Tření v kardanu by však nemělo způsobovat nelinearitu.

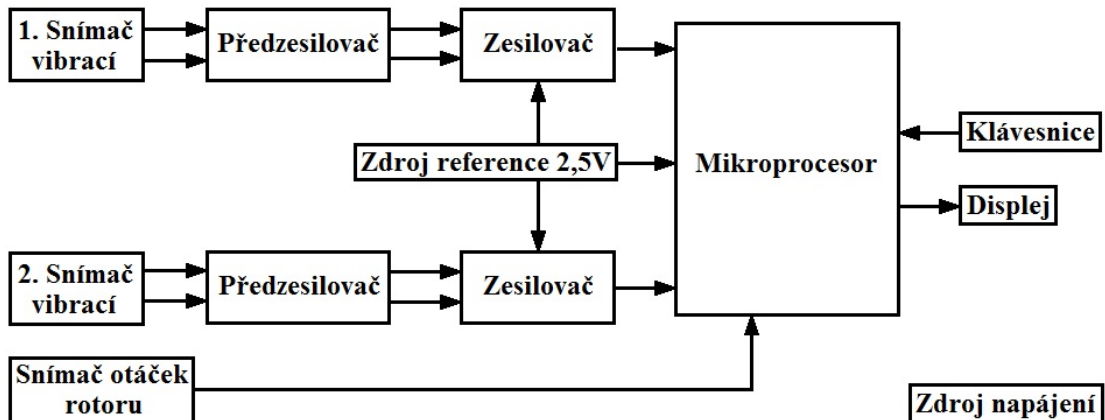
Celá mechanická část byla zhotovena pomocí ručního nářadí, jen pár částí bylo

zhotoveno na soustruhu. Přesnost mechanického provedení odpovídá použitým nástrojům. Jednotlivé díly jsou spojovány pomocí šroubů, takže v případě velké nepřesnosti, opotřebení, nebo potřebné úpravy je možné jednotlivé díly vyměnit.

Z důvodu cenové nedostupnosti senzorů určených pro vyvažování byl jako senzor zvolen miniaturní reproduktor VS-BF32-8. Tento kvalitní 8 ohmový reproduktor s průměrem 32 mm a maximálním zdvihem membrány 2 mm by měl splňovat požadavek na linearitu převodu velikosti výchylky na velikost indukovaného napětí. Membrána reproduktoru byla připevněna k pohyblivé části stojanu, a tělo k pevné části stojanu. Konstrukce vyvažovačky nabízí snadnou úpravu pro náhradu tohoto snímače za jiný v případě nevhodnosti. Změřené výsledky závislosti velikosti nevyvážky na velikosti indukovaného napětí jsou uvedeny níže.

2.2 Návrh elektronické části

Pro prezentaci změřených vibrací slouží elektronická část vyvažovačky. Na obr. 2.3 je znázorněno blokové schéma.



Obr. 2.3 Blokové schéma elektrické části

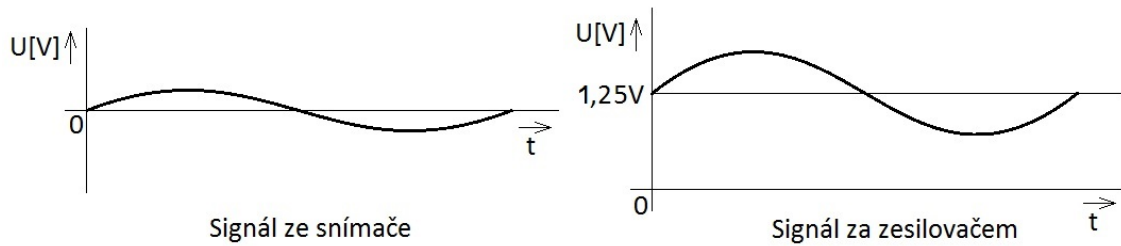
Signály ze snímačů vibrací jsou z důvodu minimalizace rušení zesíleny v předzesilovačích umístěných v blízkosti snímačů. Zesílený signál je veden do zesilovačů, které upraví signál tak, aby je bylo možné zpracovat pomocí integrovaného A/D převodníku. Dále je do mikroprocesoru přiveden signál ze snímače otáček. Na základě zadaných údajů pomocí klávesnice jsou prezentovány výsledky na displeji. Napájení je zajištěno pomocí stabilizovaného zdroje z důvodu minimalizace rušení.

V následujících podkapitolách jsou uvedeny návrhy jednotlivých bloků.

2.2.1 Návrh předzesilovače a zesilovače

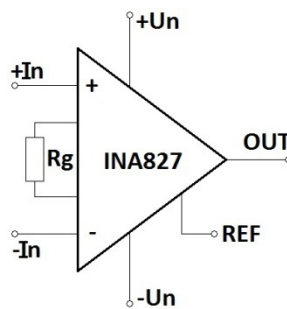
Snímače generují střídavý signál, ale mikroprocesor je schopný zpracovávat pouze kladné hodnoty napětí. V katalogovém listu mikroprocesoru[6] je uvedeno, že na piny A/D převodníku nesmí být přivedeno záporné napětí. Z tohoto důvodu je nutné signál ze snímačů nejen zesílit, ale i posunout do kladných hodnot napětí. Na obr. 2.4 je

znázorněna potřebná úprava signálu.



Obr. 2.4 Zesílení a posunutí signálu

Na základě těchto požadavků byla zvolena dvojice přístrojových zesilovačů INA827 firmy Texas Instruments. Na obr. 2.5 je znázorněn vybraný zesilovač.



Obr. 2.5 Přístrojový zesilovač INA827

Tento zesilovač obsahuje diferenční vstupy, možnost nastavení zesílení 5 až 1000 pomocí rezistoru R_g . Výstupní napětí může být superponováno podle napětí na referenčním vstupu. Výstupní napětí je rovno[4]

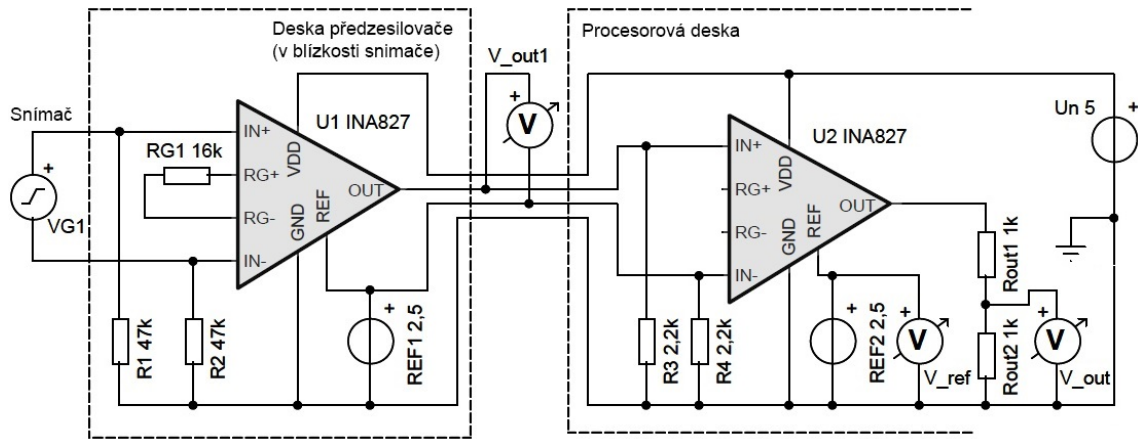
$$U_{OUT} = U_{REF} + G \cdot (U_{+In} - U_{-In}), \quad (7)$$

kde U jsou napětí na jednotlivých svorkách, a G je zesílení. Zesílení se vypočítá podle vztahu[4]

$$G = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_g}, \quad (8)$$

kde R_g je hodnota rezistoru v kiloohmech. Na základě měření, které je uvedeno dále, byla stanovena přibližná celková hodnota zesílení 25. Zesílení předzesilovače 10, která odpovídá přibližně rezistoru $R_{g1} = 16 \text{ k}\Omega$ a zesílení zesilovače 5, které odpovídá nezapojenému rezistoru R_{g2} . Výstupní napětí je dále vyděleno dvěma v odporové děliči pro dosažení výstupního napětí v rozmezí 0 V až 2,5 V pro možnost použití jediného zdroje referenčního napětí pro zesilovač i pro A/D převodník.

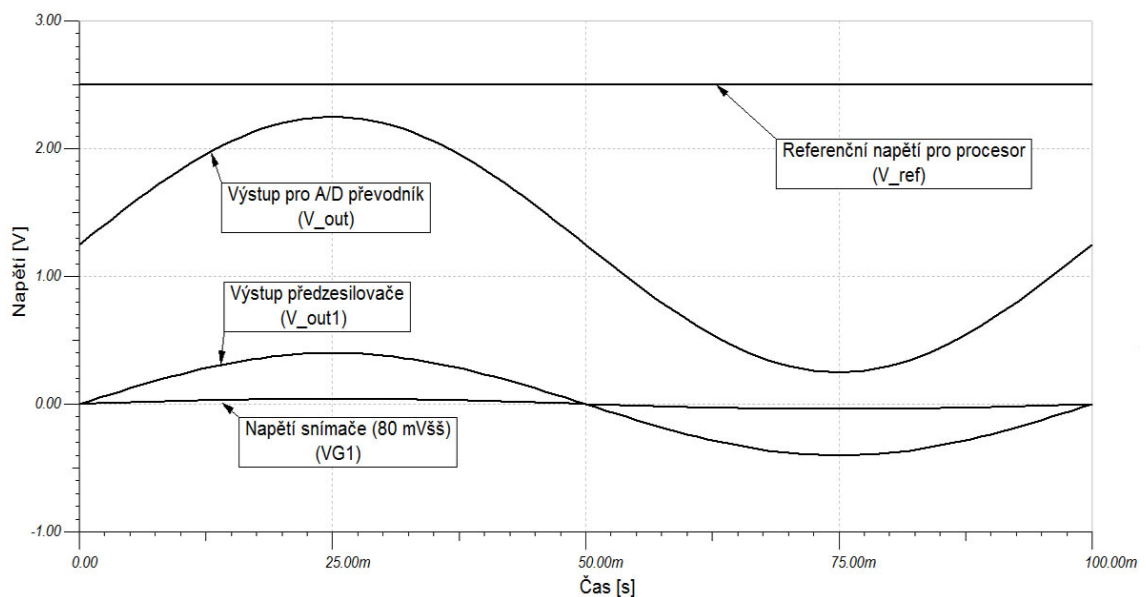
Podle doporučení v katalogovém listu [4] bylo navrženo schéma zapojení, které je znázorněno na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Schéma zapojení předzesilovače a zesilovače

Navržené zapojení bylo odsimulováno v bezplatné verzi programu Tina-TI [5], který nabízí výrobce Texas Instruments. V tomto programu je dostupný model použitého přístrojového zesilovače INA827.

Na obr. 2.7 je znázorněn vstupní signál z čidla reprezentovaný zdrojem sinusového signálu VG1. Dále je na tomto obrázku

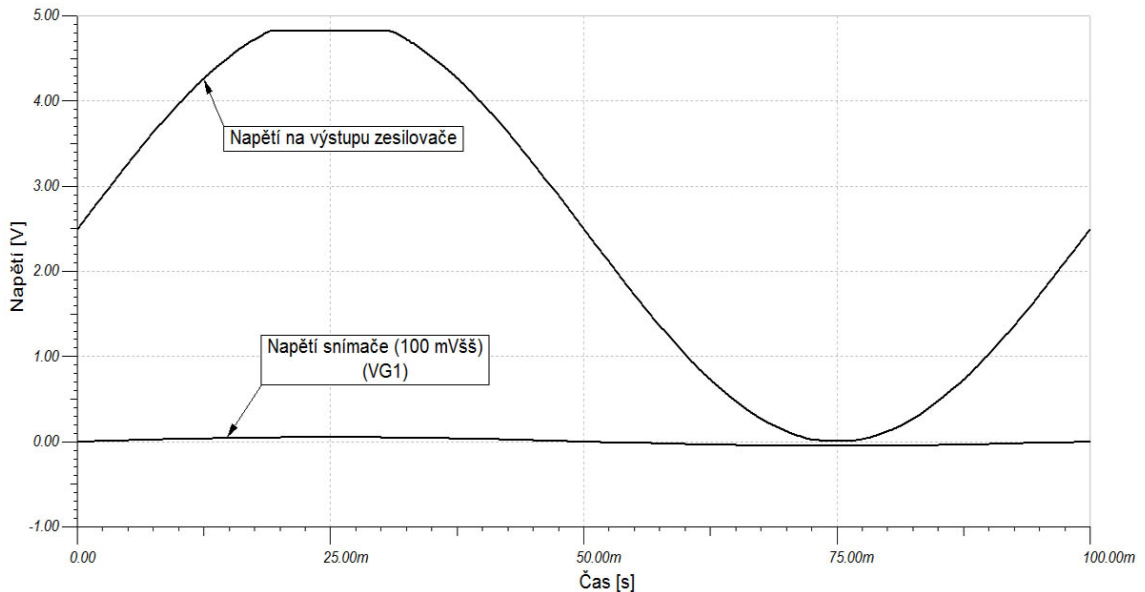


Obr. 2.7 Výsledky simulace zapojení obvodů INA827

znázorněn průběh napětí na výstupu předzesilovače V_{out1} , průběh napětí na výstupu určeném pro připojení A/D převodníku V_{out} a referenční napětí V_{ref} , které je použité pro zesilovač a zároveň jako referenční napětí integrovaného A/D převodníku mikroprocesoru.

Nejcitlivějším bodem celého zapojení pro dosažení stabilní funkce je přesná hodnota rezistoru R_g . Při použití rezistoru s přesností 5% se zesílení předzesilovače může pohybovat v rozmezí 9,76 až 10,26. Celkové zesílení se tedy může pohybovat v rozmezí 24,4 až 25,7. Z tohoto důvodu je nutné vybrat rezistor s přesnou hodnotou.

Ještě zde stojí za zmínku, že přístrojový zesilovač INA827 má velice užitečnou funkci *Rail-to-Rail Output*. Výstupní napětí může nabývat hodnoty v celém rozpětí



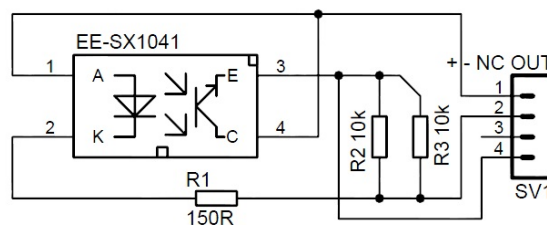
Obr. 2.8 Simulace funkce *Rail-to-Rail Output*

napájecího napětí. Na obr. 2.8 je znázorněn výstupní signál přímo za zesilovačem, který je omezen rozmezím napájecího napětí. Pomocí simulace bylo zjištěno, že při napájení 5 V, se může výstupní napětí pohybovat v rozmezí přibližně od 0 V do 4,7 V.

Po zhotovení desek byly změřeny simulované průběhy, které odpovídaly předpokladům. Dále byl změřen maximální rozsah výstupního napětí od 0 V do 4,8 V. Změřený průběh napětí a návrhy desek plošných spojů jsou uvedeny v příloze.

2.2.2 Návrh snímače otáček a napájecího zdroje

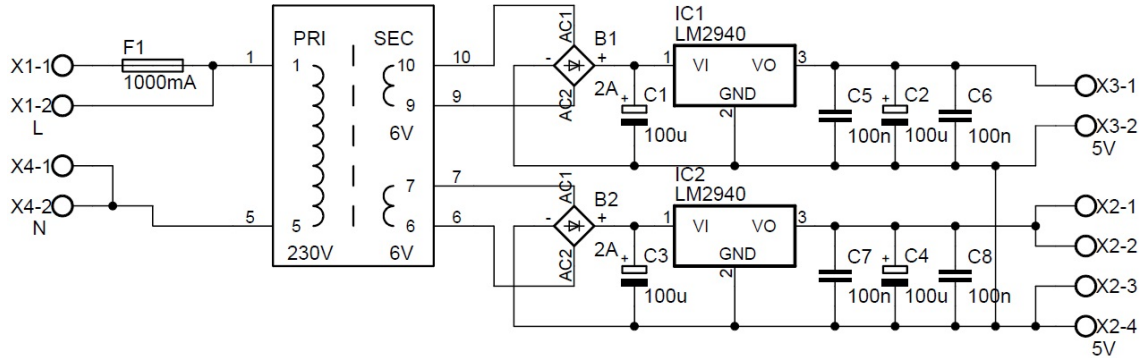
Tento snímač slouží k vytvoření obdélníkového signálu, podle kterého mikroprocesor rozeznává polohu natočení rotoru na 0°. K tomuto účelu byl zhotoven jednoduchý snímač otáček tvořený kotoučem s otvorem a optobránou EE-SX1041. Jednoduché schéma zapojení je na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Schéma zapojení snímače otáček

Tento snímač je současně určen pro spolehlivé měření výstupních signálů čidel pomocí osciloskopu. Obdélníkový signál shodné frekvence je použitý pro synchronizaci osciloskopu.

Dále byl zhotoven stabilizovaný zdroj s transformátorem 2 x 5V pro napájení celého zařízení. Dvojitý zdroj byl zhotoven pro oddělené napájení citlivých částí zařízení. Jednou polovinou zdroje jsou napájeny zesilovače, předzesilovače a napěťová reference a druhou polovinou je napájen mikroprocesor, displej a snímač otáček.

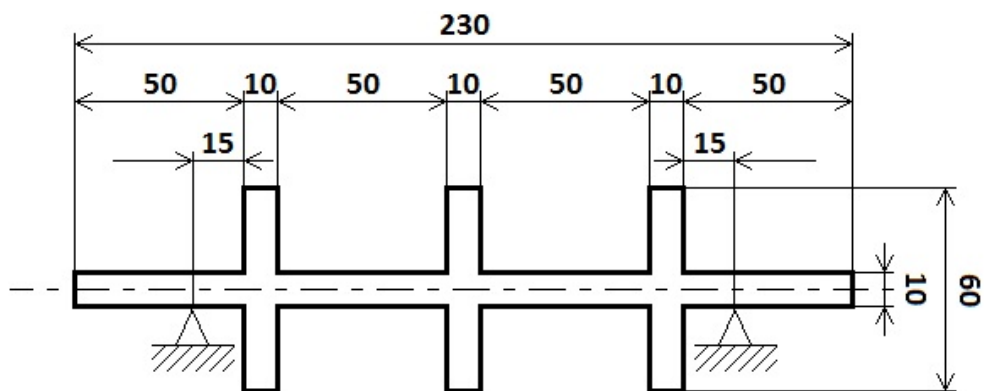


Obr. 2.10 Schéma zapojení zdroje.

V tomto jednoduchém zdroji (obr 2.10) byly použity kvalitní stabilizátory LM2940 s nízkým úbytkem napětí. Stabilizovaný zdroj byl použit z důvodu dosažení co nejnižšího rušení. Návrhy desek plošných spojů jsou uvedeny v příloze.

2.3 Testování a Měření

Pro odzkoušení vlastností vyvažovačky byl zhotoven jednoduchý rotor, na kterém je možné přidat závaží do třech vyvažovacích rovin, aby bylo možné posoudit velikost vibrační způsobených přidaným závažím. Zkušební rotor váží přibližně 800 g a všechny pohyblivé části vyvažovačky váží přibližně 1200 g. Celková uvažovaná hmotnost je tedy 2 kg. Zkušební rotor je vyobrazen na obr. 2.11. Všechny uvedené míry jsou v milimetrech.



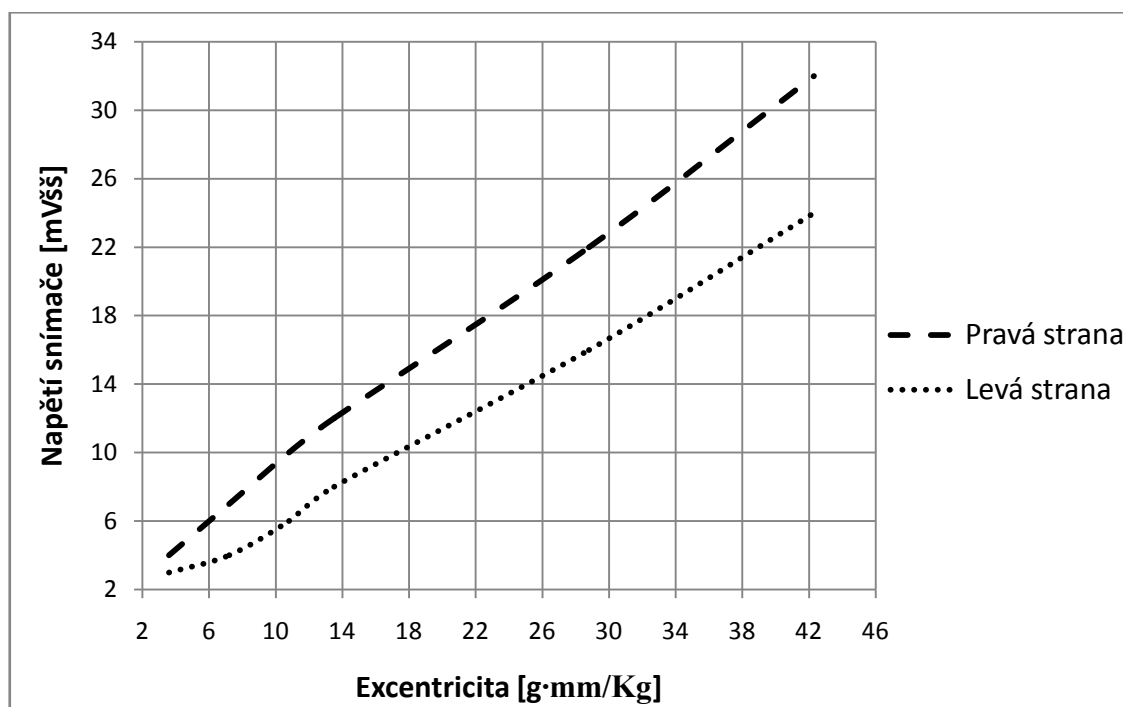
Obr. 2.11 Zkušební rotor

V následující tabulce (tab. 2.1) jsou uvedeny výsledky měření závislosti velikosti měřené výchylky na velikosti závaží.

Velikost excentricity[g·mm/Kg] (hmotnost závaží na poloměru 18mm)			Indukované napětí [mVšš]	
vlevo	uprostřed	vpravo	Levý snímač	Pravý snímač
3,6 (0,4g)	0	0	3	0
0	0	3,6 (0,4g)	0	4
7,2 (0,8g)	0	0	4	0
0	0	7,2 (0,8g)	0	7
10,8 (1,2g)	0	0	6	0
0	0	10,8 (1,2g)	0	10
13,5 (1,5g)	0	0	8	0
0	0	13,5 (1,5g)	0	12
28,8 (3,2 g)	0	0	16	0
0	0	28,8 (3,2g)	0	22
42,3 (4,7g)	0	0	24	0
0	0	42,3 (4,7g)	0	32

Tab. 2.1 Závislost napětí snímače na excentricitě

Při měření byly snímače zatíženy rezistorem 91 k Ω podle návrhu zapojení zesilovače. Výrobce osciloskopu, kterým bylo měření provedeno, udává přesnost přístroje na nastaveném rozsahu 2 mV/dílek \pm (3% + 10 číslic)[12]. Na tomto rozsahu je měřená hodnota udávána číslem s jedním desetinným místem. Přesnost měření, hlavně u malých výchylek, může být zatížena velikou nepřesností osciloskopu. Změřené údaje byly zpracovány v grafu (obr. 2.12).



Obr. 2.12 Graf závislosti napětí snímače na excentricitě

V grafu je jasně zřetelný přidavný útlum levé strany, který je způsoben kardanovou

hřídeli. Z teoretických poznatků uvedených v předešlé kapitole vyplývá, že závislost velikosti měřeného napětí snímače je lineární vzhledem k velikosti excentricity (závaží). Na pravé měřicí rovině byla tato linearita přibližně potvrzena. Levá strana při větších výchylkách je lineární, ale při malých výchylkách tato linearita nebyla potvrzena. Při měření výchylek za zesilovačem, které je uvedeno níže, bylo potvrzeno, že důvodem je měření pomocí osciloskopu s malou přesností.

Dále bylo provedeno kontrolní měření, které mělo za úkol posoudit ovlivnění velikosti výchylky v závislosti na poloze uložení závaží. V tab. 2.2 jsou uvedeny výsledky kontrolního měření. Nejprve při upevnění závaží doprostřed rotoru došlo

Velikost excentricity [g·mm/Kg] (hmotnost závaží na poloměru 18 mm)			Indukované napětí [mVšš]	
vlevo	uprostřed	vpravo	Levý snímač	Pravý snímač
Umístění závaží doprostřed rotoru				
0	57,6 (6,4 g)	0	14	24
0	86,4 (9,6 g)	0	24	31
0	115,2 (12,8 g)	0	29	44
Umístění dvou závaží posunutých o 180°				
13,5@0° (1,5 g)	0	13,5@180° (1,5 g)	9	13
28,8@0° (3,2 g)	0	28,8@180° (3,2 g)	16	24
42,3@0° (4,7 g)	0	42,3@180° (4,7 g)	24	32

Tab. 2.2 Napětí snímače při změně polohy závaží

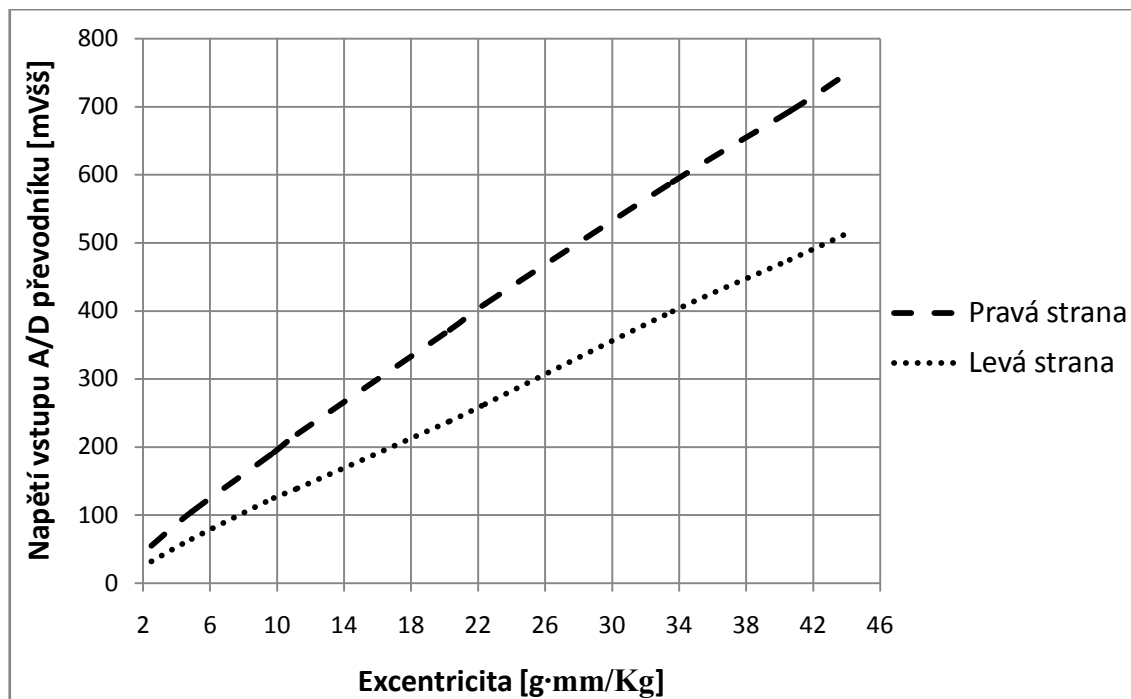
k rozložení výchylky rovnoměrně na obě strany. Dále bylo vyzkoušeno ovlivnění měření vlivem kmitání obou měřících rovin s obrácenou fází. Ani druhé kontrolní měření neprokázalo žádné vzájemné ovlivňování mezi vyvažovacími rovinami.

Po zhotovení zesilovačů bylo provedeno podrobnější měření závislosti výchylky na vstupu A/D převodníku na velikosti závaží. Výchylka byla měřena na stejné straně, kde bylo přiloženo závaží.

Velikost excentricity [g·mm/Kg] (hmotnost závaží na poloměru 18 mm)	Napětí A/D převodníku [mVšš]	
	Levá strana	Pravá strana
2,5 (0,28 g)	32	55
4,9 (0,54 g)	65	105
9,8 (1,1 g)	125	192
11,2 (1,25 g)	139	219
20,3 (2,25 g)	238	372
22,4 (2,5 g)	263	410
33,6 (3,7 g)	339	589
40,6 (4,5 g)	475	693
44,1 (4,9 g)	515	750
88,2 (9,8 g)	936	1338
132,3 (14,7 g)	1409	1946

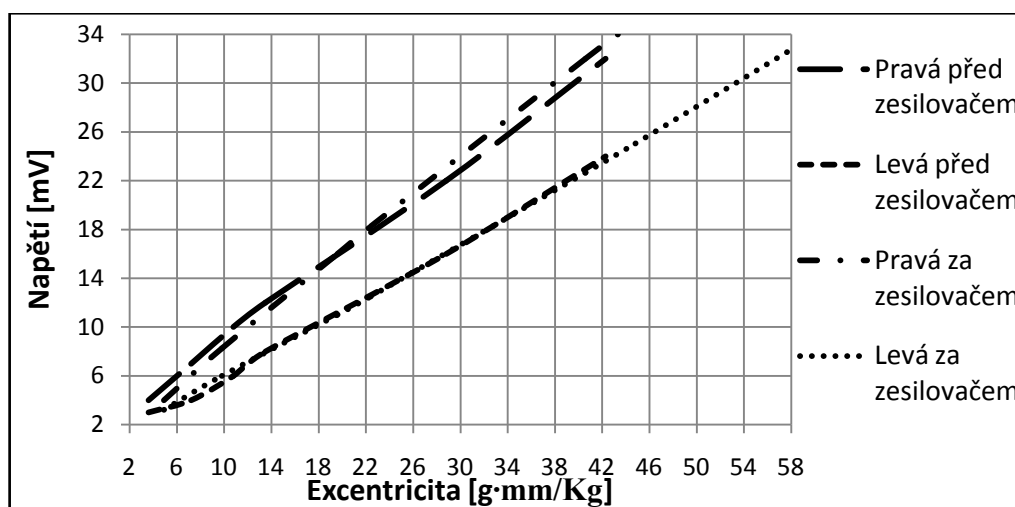
Tab. 2.3 Závislost napětí na vstupu A/D na excentricitě

Přesnost osciloskopu na rozsazích 5 mV/dílek až 100 V/dílek je $\pm(3\% + 6 \text{ číslic})$. Při tomto měření již bylo možné zvolit rozsah tak, aby chyba počtu číslic měla co nejmenší vliv. Změřené údaje z tab. 2.3 byly zpracovány v grafu (obr. 2.13). Měření potvrdilo lineární závislost velikosti napětí na velikosti přiloženého závaží.



Obr. 2.13 Graf závislosti napětí na vstupu A/D na excentricitě

V následujícím grafu (obr. 2.14) je porovnáno změřené napětí před zesilovačem se změřeným napětím za zesilovačem. Napětí za zesilovačem bylo vyděleno celkovým nastaveným zesílením.



Obr. 2.14 Srovnání naměřených hodnot

3 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Při měření byly pozorovány rušivé vlivy, které omezují citlivost vyvažovačky, proto před tvorbou programu pro mikroprocesor byla nejdříve vytvořena simulace možných rušivých vlivů v programu MATLAB. Následně je řešen vlastní program a kalibrace vyvažovačky.

3.1 Simulace výpočtů v programu MATLAB

Vlivem valivého odporu dochází nejen k indukci šumu ve snímačích, ale také dochází k rozkmitávání stojanů na jejich vlastní rezonanční frekvenci. Při měření středních a velkých výchylek jsou tyto vlivy zanedbatelné, ale při měření malých výchylek může dojít k ovlivnění měření. K řešení tohoto problému bylo použito průměrování z více naměřených hodnot. To sebou ale přináší další problém v možnosti časového posunu jednotlivých vzorků při vzorkování.

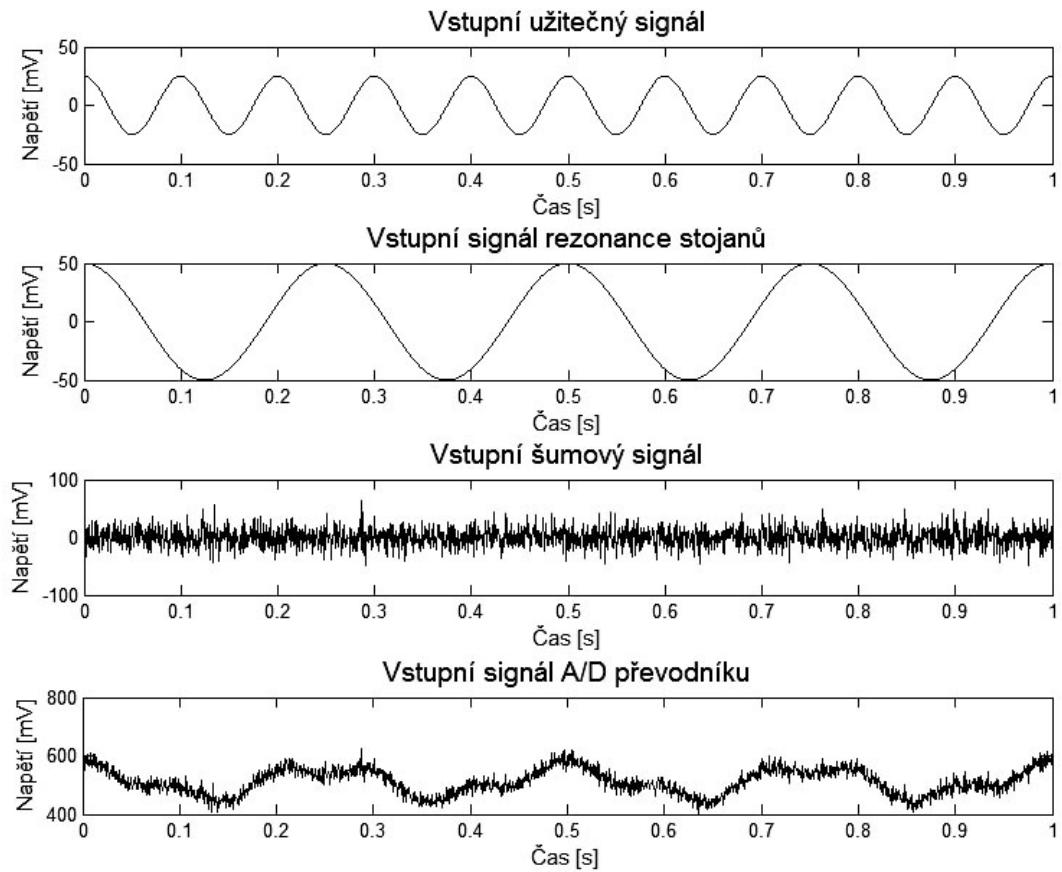
Program funguje následovně. Nejprve je vygenerován vstupní signál. Ten je následně vzorkován 10-ti bitovým převodníkem, kde je daný převodový poměr 1 dílek = 1 mV. Tento převodový poměr byl zvolen z důvodu snadné interpretace výsledků simulace. Vzorkované a vypočítané hodnoty tedy přesně odpovídají vstupním signálům. Dále je provedeno zprůměrování přes délku periody užitečného signálu s nastavenou nepřesností překrývání. Na závěr je vypočítáno spektrum zprůměrovaného signálu pomocí Fourierovy transformace.

V simulaci jsou řešeny závažnosti nežádoucích účinků šumu, rezonanční frekvence stojanů a možného posunu vzorků při vzorkování. Vše je uvažováno při měření velmi malé výchylky, a velikého valivého odporu. Nastavitelné hodnoty programu byly pro ukázkou nastaveny, jak je uvedeno v tab. 3.1. Všechny signály mají nulovou počáteční fázi.

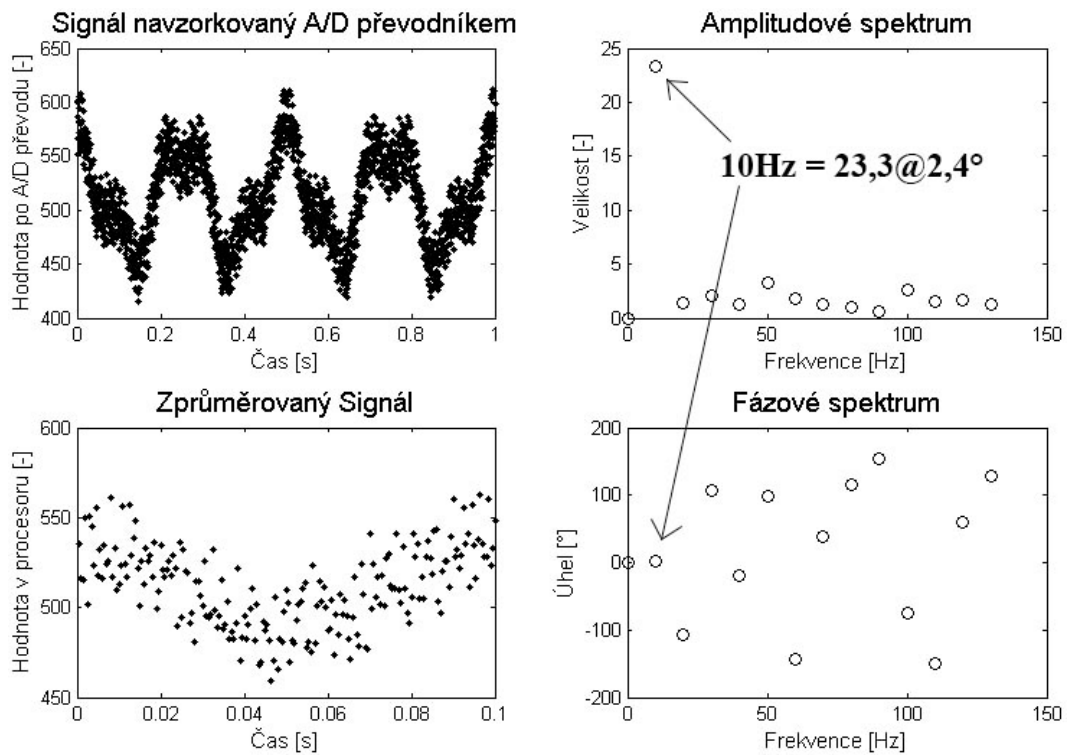
Amplituda užitečného signálu	25 mV
Amplituda šumu	50 mV
Amplituda rez. frekvence stojanů	50 mV
Rezananční frekvence stojanů	4 Hz
Počet vzorků na periodu	200
Maximální posun o počet vzorků	10
Počet průměrování	10

Tab. 3.1 Zadané údaje v programu pro MATLAB

Na obr. 3.1 jsou znázorněny jednotlivé složky signálu odvozené ze zadaných hodnot. Jako poslední je znázorněn součet všech tří signálů superponovaný na střední hodnotu převodu. Převodník s rozlišením deset bitů má maximální hodnotu převodu 1023_{DEC} . Střední hodnota převodu je tedy 512_{DEC} , která odpovídá 512 mV. Poslední průběh na obrázku 3.1 odpovídá skutečnému signálu přivedenému na vstup A/D převodníku.



Obr. 3.1 Průběhy vstupních signálů simulace v programu MATLAB



Obr. 3.2 Vzorkovaný signál a zprůměrovaný signál a jeho spektrum

U vstupního signálu A/D převodníku (obr. 3.1) je zřejmé, že k zjištění velikosti amplitudy a fáze užitečného signálu je zapotřebí důmyslné metody. Na obr. 3.2 vlevo nahoře je znázorněn vzorkovaný signál s nastavenou nepřesností posuvu vzorků podle jednotlivých period užitečného signálu. Na obr. 3.2 vlevo dole je znázorněn zprůměrovaný signál se všemi uvažovanými nepřesnostmi. Na zprůměrovaném signálu je již sice okem jasně patrná jedna perioda funkce cosinus, ale pro matematické zjištění amplitudy a fáze je vhodné použít Fourierovu transformaci. Na obr. 3.2 vpravo je znázorněna část amplitudového a fázového spektra vypočítaného pomocí rychlé Fourierovy transformace. Zadaný užitečný signál měl velikost $25\text{mV}@0^\circ$ a vypočítaný v tomto případě $23,3$ dílků $@ 2,4^\circ$. Při novém spuštění simulace se stejnými zadanými hodnotami se můžou vypočítané hodnoty mírně lišit kvůli náhodnosti šumu a náhodnosti posuvu při vzorkování.

Na základě testování různých nastavených hodnot bylo zjištěno, že rušivý signál rezonance stojanů neovlivňuje výsledek výpočtu. Dále bylo zjištěno, že posun vzorků v čase do 10% délky periody jen minimálně snižuje vypočítanou amplitudu signálu. Největším problémem při zpracování se jeví šum, který má za následek náhodnou oscilaci výsledku kolem zadané hodnoty. Jediný způsob jak při použití této metody zabránit vlivu šumu je průměrování z více hodnot. Simulace prokázala funkčnost daného řešení. Celý program pro MATLAB je v samostatné příloze.

3.2 Program pro vyvažovačku

Na základě údajů známých z měření a simulace byl nejprve napsán jednoduchý program pro zjištění přesného chování při měření a výpočtech pomocí mikroprocesoru. Tento jednoduchý program zjišťuje největší naměřenou hodnotu během jedné periody, její pořadí, a celkový počet vzorků během této periody. Amplituda signálu v jednotkách dílků převodníku se vypočítá

$$AMP_j = \text{Velikost } MAX_j - 512 [-], \quad (9)$$

kde se od velikosti maximálního vzorku MAX_j odečítá střední hodnota převodu. Fáze signálu ve stupních se vypočítá

$$UHEL_j = \frac{\text{Pořadí } MAX_j}{\text{Počet vzorků v periodě}} * 360 [^\circ], \quad (10)$$

kde se podílem stanoví desetinné číslo menší než jedna, které odpovídá posunu fáze o právě tak velikou část periody. Po vynásobení 360-ti je získán posun fáze ve stupních.

V tomto jednoduchém programu je použito průměrování z více naměřených hodnot. Pro správné průměrování je nezbytné převést měřené hodnoty z polárního tvaru na složkový, jednotlivé složky zprůměrovat a pak převést zpět do polárního tvaru. Tento jednoduchý program tedy zobrazuje vibrace stojanů, a posouzení jaké závaží v jakém místě přidat či ubrat závisí jen na zkušenostech obsluhy. Měření signálů, kde rušivé složky nedosahují velikosti užitečného signálu, bylo bez problémů. Ale měření signálů, kde rušivé složky mají podobnou velikost jako užitečný signál, je tímto způsobem nemožné.

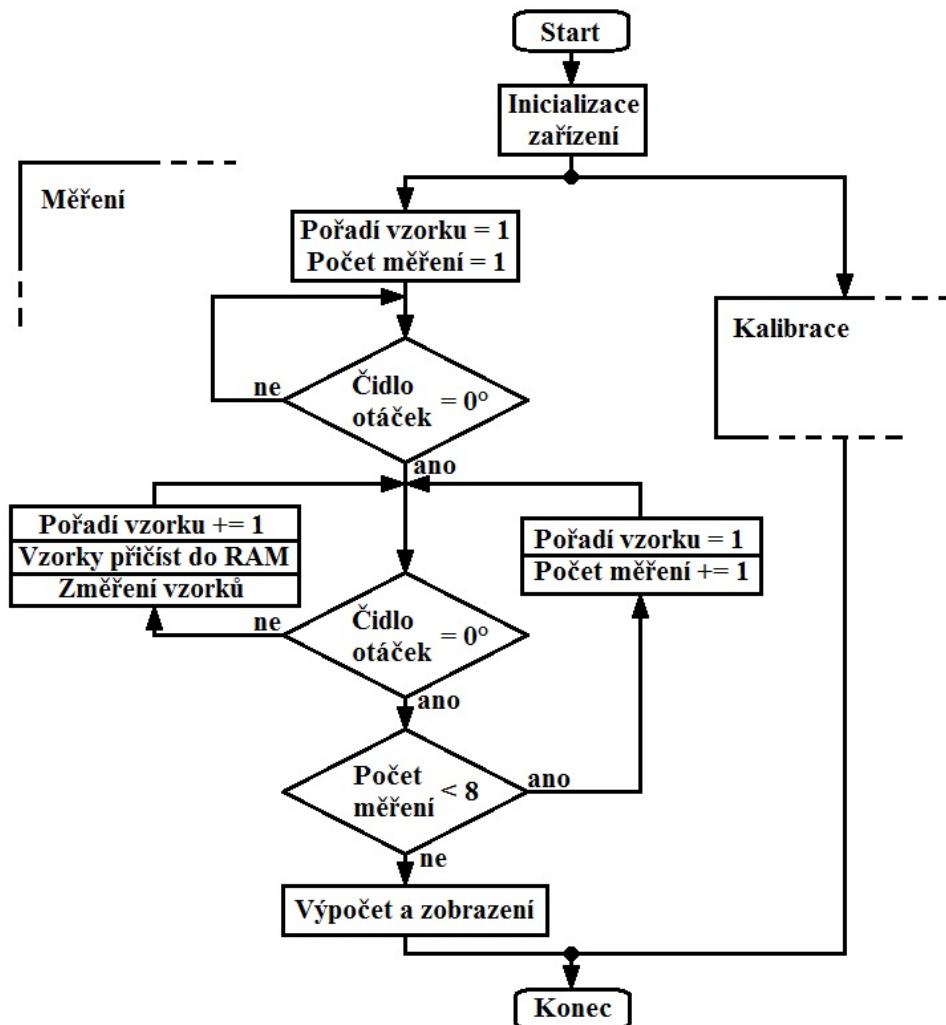
Dále bylo zjišťováno, kolik změřených vzorků je na jednu periodu užitečného

signálu. Při kmitočtu užitečného signálu 10 Hz, při kmitočtu integrovaného A/D převodníku 125 kHz, potřebě 13 cyklů A/D převodníku na načtení jedné hodnoty převodu a použití dvou kanálů je maximální počet vzorků na jednu periodu

$$\text{Počet vzorků} = \frac{125\,000}{10 * 13 * 2} = 480 \text{ vzorků.} \quad (11)$$

Vlivem nedokonalého programu je ve skutečnosti získáno 409 až 410 10-ti bitových vzorků signálu na jednu periodu. Ve finálním programu je použito stejné přepínání kanálů A/D převodníku, tudíž počty vzorků jsou stejné. Velmi dobrým výsledkem je stabilní počet vzorků na jednu periodu. To umožňuje dále se nezabývat problémem spojeným s nedokonalým překrýváním vzorků při průměrování. Kompletní projekt v programu ATMEL Studio je v samostatné příloze.

Na základě všech získaných informací byla vytvořena finální verze programu. Nejdůležitější částí programu je postup měření, který je uveden na obr. 3.3. Kalibraci je věnována následující podkapitola.



Obr. 3.3 Vývojový diagram měřicí části programu

Po roztočení rotoru ve vyvažovače se pomocí stisku daného tlačítka spustí měření. Program nejprve vyčká, než dojde k natočení rotoru na 0°. Poté dochází ke střídavému ukládání hodnot dvou kanálů A/D převodníku tak dlouho, než dojde k dalšímu natočení rotoru na 0°. Při dalším otáčení rotoru opět dochází ke střídavému měření hodnot A/D převodníku. Tyto hodnoty jsou ale přičítány k hodnotám uloženým při první měřené otáčce. Tímto postupem se postupně získají dva řetězce hodnot součtů osmi po sobě jdoucích otáček rotoru. V programu jsou použity řetězce typu *unsigned int*, tedy 16-ti bitové neznaménkové číslo. Sčítány jsou 10-ti bitové hodnoty A/D převodníku. To umožňuje sčítat až 64 po sobě jdoucích period bez přetečení. Pro zjištění průměrné měřené hodnoty již jen stačí podělit hodnoty v řetězcích počtem měřených period. Pro rychlé dělení je nejvýhodnější použít bitový posuv. Bitové posunutí vpravo o jeden bit odpovídá dělení dvěma. Z tohoto důvodu je tedy výhodné použít měření počtu period odpovídající celé mocnině dvou. Na začátek bylo tedy zvoleno měření osmi period, které trvá 0,8 s.

Po naměření všech vzorků je přistoupeno k výpočtu. Nejprve jsou všechny hodnoty v řetězcích posunuty o tři bity vpravo, a následně je přistoupeno k výpočtu diskrétní Fourierovy transformace pro oba měřené kanály. Jednotlivé komplexní spektrální koeficienty se počítají pomocí obecného vzorce[8]

$$F(k\tilde{\Omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad (12)$$

kde k je číslo koeficientu, $x(n)$ je příslušný vzorek signálu a N je celkový počet vzorků. Vzhledem k tomu, že vzorkovaný signál odpovídá přesně jedné periodě užitečného signálu, požadovaným výsledkem je spektrální koeficient odpovídající první harmonické, tedy koeficient roven jedné. Požadovaný komplexní koeficient je roven

$$F = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}n}. \quad (12)$$

Jednoduchou úpravou je možné vzorec rozložit na

$$F(\text{real}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right), \quad (13)$$

$$F(\text{imag}) = - \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right), \quad (14)$$

pro získání odděleného výpočtu reálné a imaginární části. Amplituda a fáze vypočítaného komplexního koeficientu odpovídá jeho polárnímu tvaru. Výpočet polárního tvaru komplexního koeficientu je proveden praktickou aplikací výpočtu pravoúhlého trojúhelníku. Z jednotlivých složek se získá amplituda v hodnotách vzorků převodníku

$$AMP_F = \frac{\sqrt{F(\text{real})^2 + F(\text{imag})^2}}{\text{vzorkovací frekvence}} = \frac{\sqrt{F(\text{real})^2 + F(\text{imag})^2}}{N * 10\text{Hz}}. \quad (15)$$

Nakonec se vypočítá úhel posunu fáze oproti natočení rotoru na 0°

$$UHEL_F = \frac{180}{2\pi} \cdot \text{atan} \left(\frac{F(\text{imag})}{F(\text{real})} \right). \quad (16)$$

Tento výpočet je použitý na oba řetězce změřených a zprůměrovaných hodnot, a tím je zjištěna amplituda a fáze kmitů rotoru obou měřících rovin. Pro zjištění úhlu, kde má být závaží přidáno, je zapotřebí posunout vypočítaný úhel o 180° .

Časová náročnost výpočtu diskrétní Fourierovy transformace je závislá především na rychlosti výpočtu funkce sinus a cosinus. Pro tyto výpočty je použita knihovna *math.h*, která je součástí programu ATMEL Studio, ve kterém byl program vytvořen. Pro výpočet Fourierovy transformace je zapotřebí vypočítat přibližně 820 hodnot funkce sinus, 820 hodnot funkce cosinus, 820 hodnot dělení a 1640 hodnot násobení. Výpočet jedné hodnoty funkce sinus nebo cosinus trvá maximálně 1800 hodinových cyklů, výpočet jedné hodnoty násobení, nebo dělení trvá maximálně 16 hodinových cyklů. Při použitém taktovacím kmitočtu 8 MHz je tedy potřebná doba

$$\text{čas DFT} = \frac{1640 * 1800 + 2460 * 16}{8\,000\,000 \text{ Hz}} = 0,374 \text{ s}, \quad (17)$$

pro výpočet hodnot obou kanálů. Celková doba měření a výpočtu je tedy maximálně 1,4 s.

Po výpočtu jsou vypočítané hodnoty zobrazeny na dvouřádkovém znakovém displeji. Pro komunikaci s displejem je použita knihovna *lcd_h.h*[9], kterou původně napsal Peter Fleury, a kterou následně zjednodušil Tomáš Frýza. Tato knihovna obsahuje užitečnou sadu příkazů pro zápis znaků na displej a zjednodušuje určení místa, kde jsou znaky na displeji zobrazeny. V knihovně byl upraven příkaz pro inicializaci displeje na základě katalogového listu použitého displeje.

Zadávání potřebných údajů a potvrzování startu měření popřípadě kalibrace je prováděno pomocí maticové klávesnice. Stisk libovolné klávesy vyvolává vektor přerušení programu. Stisknutá klávesa je detekována skenováním, kde je provedena ochrana proti zákmitům při stisku tlačítka.

Celý projekt finálního programu včetně kalibrace uvedené níže je uveden v samostatné příloze.

3.3 Kalibrace vyvažovačky

Rotory mívají zpravidla konstrukčně daná místa pro upevnění závaží, nebo místa kde je možné odebrat hmotu za účelem vyvážení. Tyto místa se nazývají vyvažovací roviny. U zkušebního rotoru jsou vyvažovací roviny umístěny do těsné blízkosti měřících rovin vyvažovačky, díky čemuž dochází při přiložení závaží do jedné vyvažovací roviny k ovlivnění pouze jedné měřící roviny. Na obecném rotoru jsou vyvažovací roviny umístěny s ohledem na co nejvhodnější mechanické provedení a přidáním závaží do jedné vyvažovací roviny dochází k ovlivnění obou měřících rovin. Přepočítání amplitudy a fáze kmitů měřících rovin v hodnotách vzorků převodníku na velikosti závaží v gramech a úhlu jejich umístění ve vyvažovacích rovinách se nazývá kalibrací vyvažovačky. V teoretickém úvodu je zdůvodněno, že tento typ vyvažovačky s

měkkým uložením vyžaduje kalibraci pro každý rotor. I při vyvažování stejného rotoru, když přesně nesouhlasí uložení rotoru ve vyvažovačce, tak je vhodné znovu provést kalibraci.

Kalibrace se provádí následovně. Po upnutí a roztočení obecně nevyváženého rotoru dojde ke změření hodnot amplitudy a fáze kmitů v měřících rovinách a jejich uložení do paměti. Následně je stejný rotor roztočen s přesně daným závažím na přesném úhlu v jedné vyvažovací rovině, změřeny nové hodnoty kmitů a uloženy. Nakonec je rotor roztočen s přesně daným závažím na přesném úhlu v druhé vyvažovací rovině, hodnoty kmitů opět změřeny a uloženy. Na základě těchto tří měření je vypočítáno ovlivnění měřících rovin přiložením závaží do vyvažovacích rovin. Toto ovlivňování se v číselné podobě nazývá kalibračními konstantami. Na základě znalosti kalibračních konstant je zpětně přepočítáno první měření bez přídavných závaží na velikosti závaží a úhlu jejich uložení ve vyvažovacích rovinách. Každé další měření v průběhu vyvažování již pak umožňuje přepočet ze známých kalibračních konstant. Z pohledu uživatele kalibrace není obtížná, ale na přesnosti jejího provedení závisí i přesnost zobrazovaných výsledků.

Dále je pozornost věnována matematickému provedení kalibrace. Požadované závaží, které je zapotřebí umístit, je závaží o hmotnosti jeden gram přesně do úhlu 180° pro obě vyvažovací roviny. Pro správné posouzení změny měřených výchylek s přiložením známého závaží je zapotřebí rozložit polární tvary na složkové

$$x_F = AMP_F \cdot \cos(UHEL_F), \quad y_F = AMP_F \cdot \sin(UHEL_F), \quad (18)$$

kde x_F a y_F jsou jednotlivé složky. Přiložení závaží do úhlu 180° způsobí ovlivnění pouze složky x_F . Složka x_F se přiložením závaží v jedné vyvažovací rovině zmenší v každé měřících rovin o hodnotu, která odpovídá vlivu dané vyvažovací roviny na danou rovinu měřící. Dále je známo, že zmenšení složek v obou rovinách dohromady odpovídá hmotnosti závaží 1 gram. Z těchto znalostí jsou nejprve stanoveny čtyři kalibrační konstanty

$$LnaL = x_F(\text{měření levá bez závaží}) - x_F(\text{měření levá závaží vlevo}) \quad (19)$$

$$LnaP = x_F(\text{měření pravá bez závaží}) - x_F(\text{měření pravá závaží vlevo}) \quad (20)$$

$$PnaL = x_F(\text{měření levá bez závaží}) - x_F(\text{měření levá závaží vpravo}) \quad (21)$$

$$PnaP = x_F(\text{měření pravá bez závaží}) - x_F(\text{měření pravá závaží vpravo}) \quad (22)$$

kde první písmeno každé zkratky označuje danou vyvažovací rovinu vztaženou na příslušnou měřící rovinu označenou posledním písmenem zkratky. Na základě znalosti těchto čtyř kalibračních konstant je možné učinit přepočet změřených hodnot ve vzorcích převodníku na gramy v příslušných vyvažovacích rovinách.

Přepočet využívá základní skutečnosti, že vibrace změřené v levé měřící rovině odpovídají součtu určitého poměru závaží na levé vyvažovací rovině a určitého poměru závaží na pravé vyvažovací rovině. Stejně tak i vibrace změřené v pravé měřící rovině odpovídají součtu určitého poměru závaží na pravé vyvažovací rovině a určitého poměru závaží na levé vyvažovací rovině. Zmíněné určité poměry závaží ovlivňující měřící roviny je možné matematicky odvodit z kalibračních konstant.

Na základě poměrného ovlivňování měřících je odvozena následující soustava rovnic pro jednu osu

$$L_{gram} \cdot X1 + P_{gram} \cdot X2 = x_F(\text{měření levá rovina}) \cdot X3, \quad (23)$$

$$L_{gram} \cdot X4 + P_{gram} \cdot X5 = x_F(\text{měření pravá rovina}) \cdot X6, \quad (24)$$

kde L_{gram} a P_{gram} jsou hodnoty dané vyvažovací roviny x-ové složky v gramech, x_F je x-ová složka měřené výchylky a konstanty X1 až X6 jsou odvozeny z kalibračních konstant. Řešením uvedené soustavy rovnic jsou získány x-ové složky vyvažovacích rovin v gramech. Nahrazením x-ové složky měřené výchylky za y-ovou jsou pak řešením y-ové složky vyvažovacích rovin v gramech. Převodem složkového tvaru na polární jsou následně získány velikosti závaží v gramech, které je nutné přiložit na vypočítané úhly natočení rotoru k dosažení úplného vyvážení rotoru.

Konstanty jsou odvozeny následujícím způsobem. První konstanta

$$X1 = \frac{LnaL}{LnaL + LnaP} \quad (25)$$

je vliv levého závaží na levou měřící rovinu vydělen vlivem levého závaží na obě měřící roviny. Druhá konstanta

$$X2 = \frac{PnaL}{PnaL + PnaP} \quad (26)$$

je vliv pravého závaží na levou rovinu vydělen vlivem pravého závaží na obě měřící roviny. Třetí konstanta

$$X3 = \frac{1}{LnaL + PnaL} \quad (27)$$

vydělí změřenou hodnotu součtem vlivů obou vyvažovacích rovin na levou měřící rovinu. Čtvrtá konstanta

$$X4 = \frac{LnaP}{LnaL + LnaP} \quad (28)$$

je vliv levého závaží na pravou měřící rovinu vydělen vlivem levého závaží na obě měřící roviny. Pátá konstanta

$$X5 = \frac{PnaP}{PnaL + PnaP} \quad (29)$$

je vliv pravého závaží na pravou rovinu vydělen vlivem pravého závaží na obě měřící roviny. Poslední konstanta

$$X6 = \frac{1}{LnaP + PnaP} \quad (30)$$

vydělí změřenou hodnotu součtem vlivů obou vyvažovacích rovin na pravou měřící rovinu.

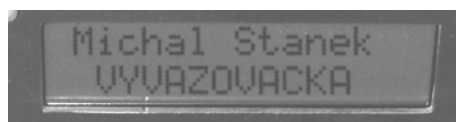
Ve jmenovateli každé konstanty jsou součty dvou vlivů, které v přeneseném významu odpovídají gramovému přiloženému závaží. V čitateli každé konstanty je vliv odpovídající svému umístění v soustavě rovnic.

Podmínkou správné funkce přepočtu změřených hodnot ve vzorcích převodníku na gramy v příslušných vyvažovacích rovinách je linearita měřených hodnot, která byla potvrzena v rámci měření závislosti napětí A/D převodníku na velikosti přiloženého závaží. Linearita integrovaného A/D převodníku je dle katalogového listu mikroprocesoru[6] 0,5 hodnoty nejméně významného bitu. To je považováno za nadmíru dostačující. Kalibrace je nedílnou součástí finálního programu, který je uveden v samostatné příloze.

4 REÁLNÉ VYUŽITÍ VYVAŽOVAČKY

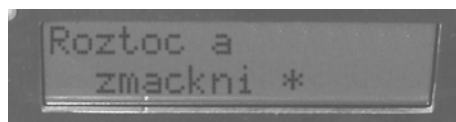
4.1 Obsluha vyvažovačky

Po zapnutí vyvažovačky dojde k zobrazení úvodní obrazovky (obr. 4.1). Dále je možné přistoupit k měření stiskem klávesy '*', nebo ke kalibraci stiskem klávesy 'C'.



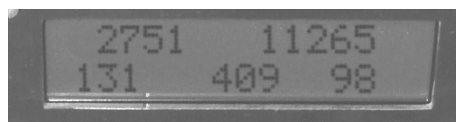
Obr. 4.1 Úvodní obrazovka

Po stisknutí klávesy měření '*' je zobrazeno upozornění (obr. 4.2).



Obr. 4.2 Upozornění před měřením

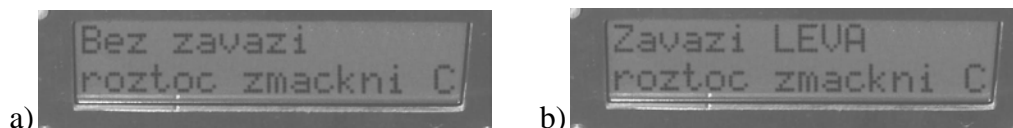
Po roztočení vyvažovačky a následném stisku požadované klávesy dojde k zobrazení informace o probíhajícím měření a výpočtu. Následně dojde k zobrazení vypočítaných hodnot vibrací v měřících rovinách (obr. 4.3).



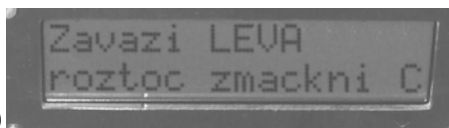
Obr. 4.3 Zobrazené hodnoty v jednotkách převodníku

Na obrázku 4.3 jsou v horním řádku zobrazeny hodnoty v jednotkách převodníku. Pod těmito hodnotami jsou zobrazeny příslušné úhly ve stupních a uprostřed je pomocná hodnota počtu měření na jednu periodu, která byla využita při doladování programu.

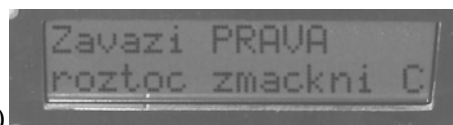
Kalibraci je možné provést po zapnutí vyvažovačky, nebo po dokončení měření. Stiskem klávesy 'C' dojde ke zobrazení upozornění (obr. 4.4 a)).



b)



c)



Obr. 4.4 Upozornění před kalibrací

Po provedení příslušných kroků (obr. 4.4), změření hodnot rotoru bez závaží a zvláště se závažím na každé straně dojde k zobrazení velikosti nevývažků v miligramech ve vyvažovacích rovinách (obr. 4.5).

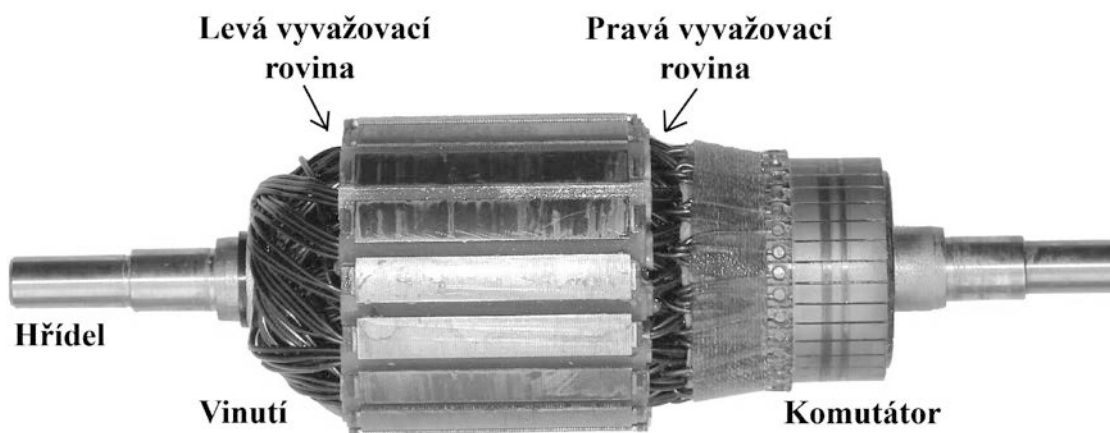


Obr. 4.5 Zobrazené hodnoty v gramech

Po provedení kalibrace zůstávají kalibrační konstanty uloženy v paměti, dokud není provedena nová kalibrace, nebo do vypnutí přístroje. Po dokončení kalibrace, nebo libovolného dalšího měření je možné pomocí stisku kláves 'A' a 'B' přepínat mezi zobrazováním velikosti nevývažku ve vyvažovacích rovinách v gramech nebo velikosti vibrační stojanu v jednotkách převodníku.

4.2 Příklad vyvažování rotoru

V této podkapitole je uvedena praktická ukázka postupu vyvažování rotoru, který je vyobrazen na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Fotografie vyvažovaného rotoru

Jedná se o rotor stejnosměrného motoru, který pohání ventilátor u nákladního automobilu. Vyvažování se u tohoto rotoru provádí nanesením vyvažovacího tmelu na vinutí ve vyvažovacích rovinách znázorněných na obr. 4.1. K vyvažování je použit epoxidový tmel Sincolor Eprosin, který má vysokou přilnavost a vysokou hustotou a po vytvrzení nabízí dobrou obrobiteľnosť.

Před započítím vyvažování je zapotřebí zjistit parametry rotoru důležité pro vyvažování, které jsou uvedeny v tab. 4.1.

Parametr [označení]	Hodnota [jednotka]
Hmotnost rotoru [M]	1400 [g]
Poloměr levé vyvažovací roviny [r_L]	26 [mm]
Poloměr pravé vyvažovací roviny [r_P]	26 [mm]
Maximální provozní otáčky [Ω]	2800[ot·min ⁻¹]
Třída vyvažování [Q]	6,3 [mm·s ⁻¹]

Tab. 4.1 Parametry vyvažovaného rotoru

Maximální provozní otáčky jsou zpravidla udávány v počtu otáček za minutu. Pro výpočet maximálního možného nevyvážku je zapotřebí vypočítat maximální úhlovou rychlost otáčení

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \Omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot 2800 = 293,22 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (31)$$

Přepsáním rovnice (6) může být vypočítán celkový maximální nevyvážek

$$U[g \cdot mm] = \frac{Q \cdot M}{\omega} \left[\frac{mm \cdot s^{-1} \cdot g}{rad \cdot s^{-1}} \right] = \frac{6,3 \cdot 1400}{293,22} = 30,1 \text{ g} \cdot mm, \quad (32)$$

kde jsou uvedeny použité jednotky v hranatých závorkách z důvodu používání dílů hlavních jednotek. Maximální nevyvážek pro každou rovinu je roven polovině celkového maximálního nevyvážku. Z rovnice (1) je již snadné vypočítat maximální hmotnost závaží, která nezpůsobí větší vibrace, než jsou stanoveny. Jelikož se závaží obou vyvažovacích rovin připevňují na stejný poloměr, tak i maximální hmotnost závaží je stejná. Maximální hmotnost závaží je

$$m = \frac{U/2}{r} = \frac{15,05}{26} = 0,58 \text{ g} \quad (33)$$

pro každou vyvažovací rovinu.

Po vypočítání maximálního možného nevyvážku byl vložen rotor do vyvažovačky tak, aby rotor i hnací kardanová hřídel byly uloženy vodorovně. Protože je průměr na okraji hřídele shodný s vnitřním průměrem kardanové hřídele, je možné připojit rotor přímo na kardanovou hřídel. Pokud je u rotoru průměr okraje hřídele jiný než vnitřní průměr kardanové hřídele, pak je zapotřebí vyrobit spojovací díl, který by měl mít co nejnižší hmotnost a co největší přesnost zpracování. V takovémto případě se dá velikost ovlivnění vyvažování odhadnout měřením výchylek při různém vzájemném natočení kardanové hřídele, spojovacího dílu a rotoru.

Dále byla provedena kalibrace vyvažovačky. Podle postupu byl rotor změřen nejprve bez přidaných závaží. Potom byl rotor změřen s jednogramovým závažím přiloženým v úhlu 180° na levou vyvažovací rovinu, a nakonec byl rotor změřen s jednogramovým závažím přiloženým v úhlu 180° na pravou vyvažovací rovinu. Na základě těchto tří měření procesor vyhodnotil velikost závaží, které je na rotor zapotřebí připevnit, aby došlo k úplnému vyvážení rotoru. Na displeji bylo zobrazeno 1043 mg do úhlu 137° pro levou vyvažovací rovinu a 3751 mg do úhlu 97° pro pravou vyvažovací rovinu. Pro odhad maximální přesnosti vyvažovačky bylo následně přistoupeno k co nejpřesnějšímu vyvážení rotoru. Co nepřesnějšího vyvážení rotoru bylo dosaženo tak, aby zobrazovaná hmotnost závaží byla co nejnižší, měřením při různém vzájemném

pootočení rotoru a kardanové hřídele. Po opakovaně provedené kalibraci vyvažovačky a opakovaném měření bylo dosaženo vyvážení rotoru, kdy zobrazená velikost závaží nepřesáhla 70 mg pro levou vyvažovací rovinu a 30 mg pro pravou vyvažovací rovinu. Takto vyvážený rotor dosahuje maximální rychlosti vibrací

$$Q = \frac{U \cdot \omega}{M} = \frac{(0,1 \cdot 26) \cdot 293,22}{1400} = 0,54 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (34)$$

kteřá odpovídá možnosti použití rotoru ve třídě Q1-přesné vyvažování. Tento rotor je tedy vyvážen o dvě třídy přesnosti přesněji, než je požadováno.

Dalším testováním bylo zjištěno, že nemožnost přesnějšího vyvážení je způsobena z velké části vlivem vůlí v použité kardanové hřídeli. Použitá kardanová hřídel je však velmi přesná a patří k nejdražším dílům vyvažovačky. Výměna kardanu za ještě přesnější by byla velmi finančně nákladná, takže pro získání větší přesnosti vyvažování by bylo nejvhodnější přepracovat celou mechanickou část, která se stará o pohon rotoru. Vzhledem k tomu, že náhodné vibrace jsou způsobené převážně kardanovou hřídelí, tak je zřejmé, že čím těžší bude vyvažovaný rotor, tím menší bude vliv nepřesností kardanu. Problémy s vyvažováním by tedy mohly nastat při potřebě vyvažování velmi malých rotorů. Velmi malé rotory, které jsou použity například v ručních vrtačkách a bruskách, se kvůli obtížnosti oprav a nízké ceně zpravidla neopravují. Nové rotory se dodávají vyvážené a není zapotřebí je vyvažovat. Ale pokud by bylo zapotřebí vyvážit nějaký velmi malý rotor, tak se náhodným vibracím způsobeným kardanovou hřídelí musí věnovat velká pozornost.

4.3 Vlastnosti profesionálních vyvažovaček

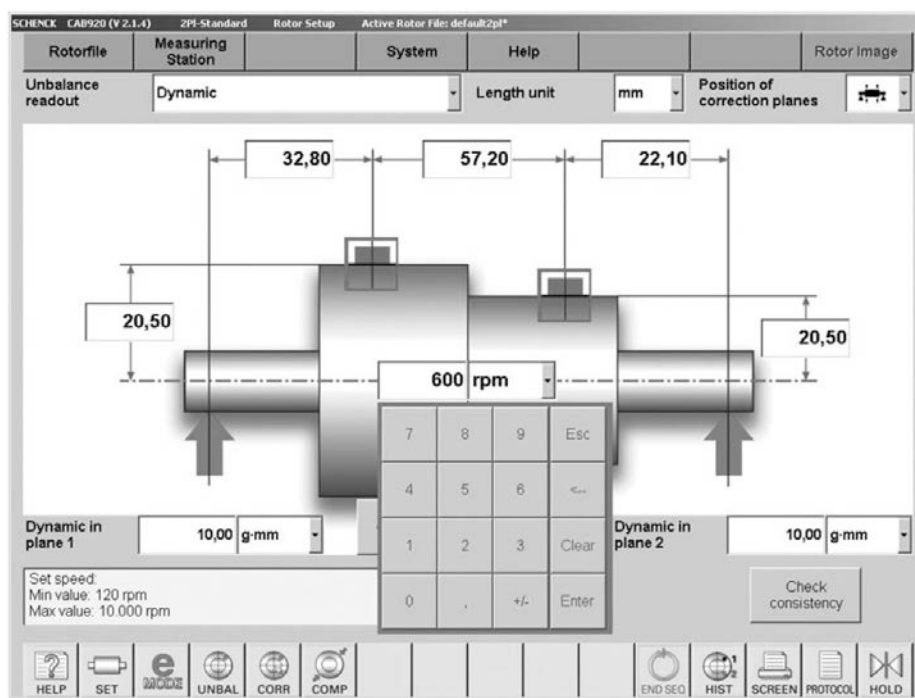
Základem velmi kvalitních profesionálních vyvažovacích strojů je přesný betonový pracovní stůl s integrovaným ovládním. Pracovní stůl je osazený mechanickou vyvažovací jednotkou obsahující ložiskové rolny a pohon řemenicí. Vyvažovací jednotku je možné zakrýt bezpečnostním krytem. Všechny mechanicky nastavitelné části jsou vybaveny měřítky pro možnost nastavení podle rozměrů vyvažovaného rotoru. Všechny součásti jsou vyrobeny z kvalitních materiálů s ohledem na možnost vyvažování zmagnetizovaných rotorů. Mechanické provedení velmi kvalitní vyvažovačky Pasio 15 je znázorněno na obr. 4.7.

Mechanické provedení je konstrukčně řešeno s ohledem na velmi vysokou přesnost měření a snadnou a rychlou výměnu jedné vyvažované součásti za jinou. Nabízí široké rozpětí rozměrů měřených rotorů a je brán ohled na ergonomii a praktičnost celého mechanického provedení.



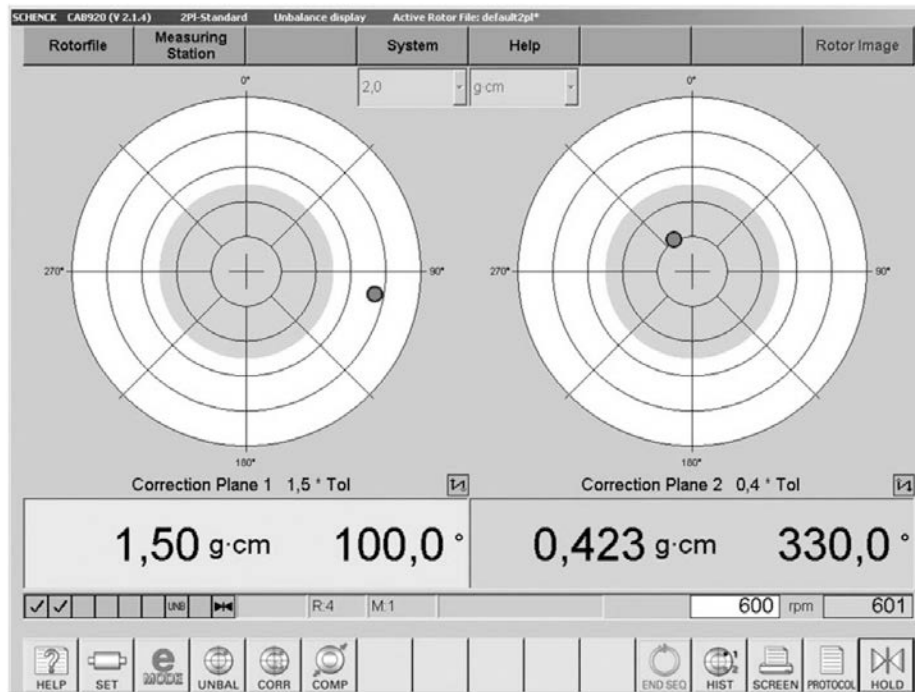
Obr. 4.7 Mechanické provedení vyvažovačky Pasio 15[10]

Pro obsluhu vyvažovačky se používá dotykového displeje, kde je pro jednoduchost možný výběr ze dvou dialogových stránek. První dialogová stránka (obr. 4.8) obsahuje



Obr. 4.8 Nastavení parametrů vyvažované součásti[11]

nastavení vyvažovačky podle rozměrů a vlastností měřeného rotoru. Druhá dialogová stránka (obr. 4.9) zobrazuje změřené hodnoty vyvažované součásti.



Obr. 4.9 Změřené hodnoty vyvažované součásti[11]

Pomocí této vyvažovací sestavy je možné měřit dynamické nevyvážení ve dvou měřících rovinách, nebo statické nevyvážení a moment nevyváženosti. Dále nabízí velké množství funkcí. Automatické porovnání s předepsanou tolerancí dle normy pro snadné vyhodnocení kvality vyvážení. Zobrazení změřených hodnot v číselném formátu a v grafu pomocí polárního nebo komponentního zobrazení. Kompenzaci pomocí indexovaného vyvažování, to znamená, pokud jsou vyvažovány dvě součásti, které jsou následně spojeny, tak při vyvažování druhé součásti je brán ohled na výsledek zbytkové nevyváženosti první vyvažované součásti tak, aby zbytkové nevyváženosti obou měřených částí působily proti sobě, a tím docházelo k jejich kompenzaci. Definování a ukládání různých typů automatických vyvažovacích procedur. Možnost automatického vytvoření vyvažovacího protokolu na základě provedených měření ve formátu PDF. Možnost připojení k počítačové síti. Dále obsahuje integrovanou funkci nápovědy, automatický vnitřní test ověření funkčnosti a monitorování měřících signálů.

Na závěr je zapotřebí zmínit, že takovéto vyvažovací stroje mají odpovídající cenu. Na základě poptávky u českého zastoupení firmy SCHENCK RoTec GmbH bylo zjištěno, že nejlevnější univerzální nová vyvažovací sestava tohoto renomovaného výrobce se prodává za 19 000 €. To je po přepočtu více než půl miliónu korun za sestavu, která zdaleka neovládá všechny výše zmíněné funkce. Na trhu je ovšem celá řada dalších firem zabývajících se touto problematikou, stejně jako množství použitých renovovaných strojů. Cena se vždy odvíjí od přesnosti a použitelnosti daného stroje.

5 ZÁVĚR

V rámci této práce byla kompletně navržena a zhotovena mechanická část vyvažovačky. Byly zhotoveny dva stojany s měkkým uložením rotoru a hnací část, která převádí hnací sílu motoru přes řemenice a kardanovou hřídel na měřený rotor. Celá mechanická část byla zhotovena za pomoci ručního náradí, pouze některé rotační části byly zhotoveny na soustruhu. Na výrobu kardanové hřídele byly zakoupeny dva kvalitní křížové klouby s jehlovým uložením a spojeny přes hřídel zakolíkovaním. Použité materiály jsou: Pertinax pro nosné části, obyčejná ocel na spojování, a slitina hliníku na pohyblivé části vyvažovačky. Přesnost vyhotovení odpovídá použitému náradí a je dostačující pro požadovaný účel použití.

Následně byly ke stojanům přidělaný snímače vibrací, a na hnací hřídel byl přidělán kotouč s otvorem, který přerušuje světelný paprsek snímače otáček. Signál od snímače otáček byl při měření použitý k synchronizaci osciloskopu. Při měření byl zjištěn průběh závislosti velikosti indukovaného napětí na snímači v závislosti na velikosti excentricity (závaží). Na základě teoretických poznatků je uvažována lineární závislost, která byla měřením potvrzena. Po zhotovení zesilovačů byla provedena další měření, která potvrdila simulaci předpokládané průběhy a potvrdila linearitu závislosti velikosti amplitudy signálu přivedeného na vstup A/D převodníku na velikosti přiloženého závaží.

Dále byla provedena simulace potřebných výpočtů v programu MATLAB. Na základě této simulace a daného zapojení použitého mikroprocesoru byl vytvořen program pro mikroprocesor pomocí vývojového nástroje ATMEL Studio. Program umožňuje zadávání potřebných hodnot pomocí maticové klávesnice, navigaci a zobrazení měřených hodnot na dvouřádkovém znakovém displeji. Na závěr byl program doplněn o kalibrační část.

Na základě všech provedených měření byl vypočítán minimální dosažitelný zbytkový nevyvážek 2,6 g·mm. Tento zbytkový nevyvážek je způsoben hlavně náhodnými vibracemi kardanové hřídele a pro jeho snížení by bylo zapotřebí přepracovat celou hnací mechanickou část. I přes problém s nepřesností kardanu umožňuje uvedená přesnost vyvažovačky vyvažovat rotory s minimálně desetkrát lepší přesností, než je požadováno. Srovnatelně velké profesionální vyvažovačky firmy SCHENCK mají minimální dosažitelný zbytkový nevyvážek menší než 0,2 g·mm.

Náklady na výrobu vyvažovačky dosáhly přibližně 10 000 Kč a prací na vyvažovačce bylo stráveno přibližně 400 hodin. V rámci této práce se podařilo vytvořit funkční vyvažovací stroj.

LITERATURA

- [1] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika - Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*, z anglického originálu *Fundamental of Physics*, 1. vydání, VUTIUM, 2000, 1198 s., ISBN 80-214-1869-9.
- [2] BROCH, J. T., *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, 2. vydání, K. LARSEN & SON, 1984, 370 s., ISBN 87-87355-34-5.
- [3] SCHENCK Library [online], SCHENCK RoTec GmbH, 2013 [cit. 13. listopadu 2013]. Dostupné na www: <http://www.schenck-rotec.com/company/library/Literature-Publications.php>.
- [4] Datasheet, *INA827*, Texas Instruments, 2013, [cit. 13. listopadu 2013]. Dostupné na www:<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina827.pdf>.
- [5] Program, *TINA-TI*, Texas Instruments, 2013, Po registraci dostupné na www: <http://www.ti.com/tool/tina-ti>.
- [6] Datasheet, *ATmega644*, Atmel Corporation, 2012, [cit. 26. listopadu 2013]. Dostupné na www:<http://www.atmel.com/Images/doc2593.pdf>.
- [7] SCHENCK *SmartBalancer Brochure*, SCHENCK RoTec GmbH, 2013, [cit. 13. listopadu 2013] Dostupné na www: http://www.schenck-usa.com/userFiles/library-PDF/DigitalLibrary/Schenck_Brochures_STC/Smart_Balancer_USA.pdf.
- [8] JAN, J., *Číslicové zpracování a analýza signálů - stručné skriptum*, VUT v Brně, 2010, 138 s., ISBN 978-80-214-4018-0.
- [9] FRÝZA, T., *lcd_h.h - hlavičkový soubor pro komunikaci s LCD*, 2012, [cit. 13. listopadu 2013] Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/downloads/lcd.zip>.
- [10] SCHENCK *Pasio 15 Brochure*, SCHENCK RoTec GmbH, 2014, [cit. 11. března 2014]. Dostupné na www: <http://en.pasio.eu/fileadmin/pasio/downloads/RM1058ePasio15.pdf>.
- [11] SCHENCK *Modernisation package CAB 920 Brochure*, SCHENCK RoTec GmbH, 2014, [cit. 11. března 2014]. Dostupné na www: http://www.schenck-worldwide.com/PDF/cz-cs1/Modernisation_package_CAB_920.pdf.
- [12] FLUKE *ScopeMeter 190 Series II Manual*, FLUKE Corp., 2011, [cit. 1. května 2014]. Dostupné na www: http://assets.fluke.com/manuals/190_104_umcze0200.pdf.

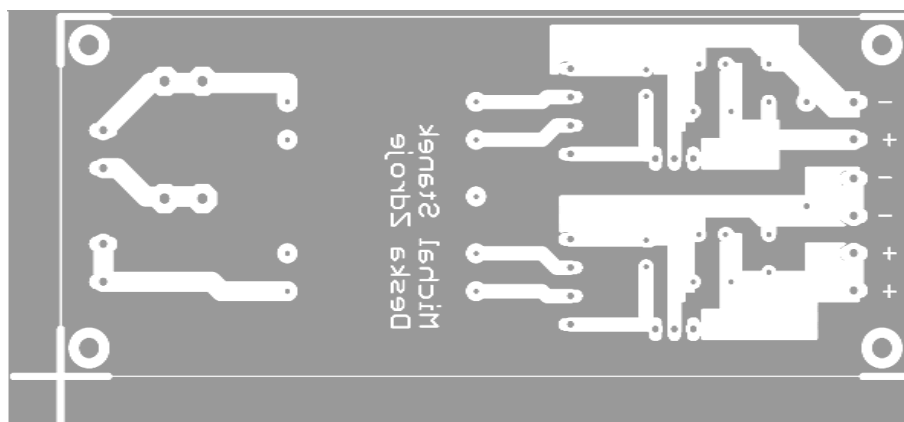
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

F_g	Gravitační síla
F_a	Odstředivá síla
F_d	Dostředivá síla
r	Poloměr
m	Hmotnost nevyvažku
M	Hmotnost pohyblivých částí
U	Nevývažek
U_p	Polární vývaha
U_k	Komponentní vývaha
U_s	Segmentová vývaha
e	Excentricita
δ	Výchylka
X_0	Klidová poloha
k	Tuhost pružiny (systému)
ω	Úhlová rychlost otáčení
ω_n	Rezonanční úhlová rychlost otáčení systému
Q	Třída kvality vyvažování
G	Zisk
MAX	Maximální vzorek
AMP	Amplituda signálu
$UHEL$	Fáze signálu
F	Komplexní koeficient
$x(n)$	n-tý vzorek signálu
N	Počet vzorků
x_F, y_F	Reálná, imaginární složka
L_{gram}	Hodnota levé vyvažovací roviny v gramech
P_{gram}	Hodnota pravé vyvažovací roviny v gramech
Ω	Maximální provozní otáčky
$LnaL, LnaP, PnaL, PnaP$	Kalibrační konstanty
$X1, X2, X3, X4, X5, X6$	Vypočítané konstanty

SEZNAM PŘÍLOH

A	Deska plošného spoje zdroje.....	50
B	Seznam součástek zdroje	50
C	Deska plošného spoje snímače otáček	50
D	Seznam součástek snímače otáček.....	50
E	Deska levého a pravého předzesilovače	51
F	Seznam součástek předzesilovačů	51
G	Deska plošného spoje procesorová deska.....	51
H	Seznam součástek procesorová deska.....	52
I	Fotografie vyvažovačky.....	52

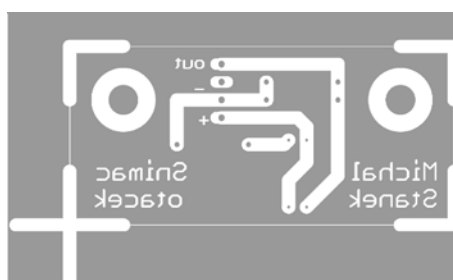
A DESKA PLOŠNÉHO SPOJE ZDROJE



B SEZNAM SOUČÁSTEK ZDROJE

Označení	Hodnota	Popis
TEZ_60D	230/2x6V	Transformátor
F1	1000mA	Pojistka
B1,B2	2A	Usměrňovací můstek
IC1,IC2	LM2940	Stabilizátor 5V
C1,C2,C3,C4	100 μ F	Elektrolytický kondenzátor
C5,C6,C7,C8	100nF	keramický kondenzátor

C DESKA PLOŠNÉHO SPOJE SNÍMAČE OTÁČEK

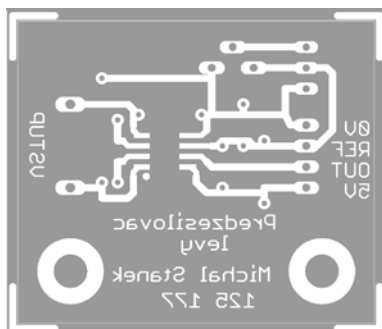


D SEZNAM SOUČÁSTEK SNÍMAČE OTÁČEK

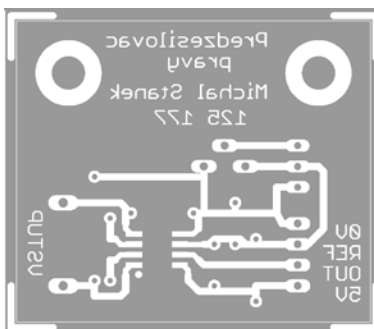
Označení	Hodnota	Popis
EE-SX1041	-	Optočlen
R1	150 Ω	Rezistor
R2,R3	10 k Ω	Rezistor

E DESKA LEVÉHO A PRAVÉHO PŘEDZESILOVAČE

DPS levý předzesilovač



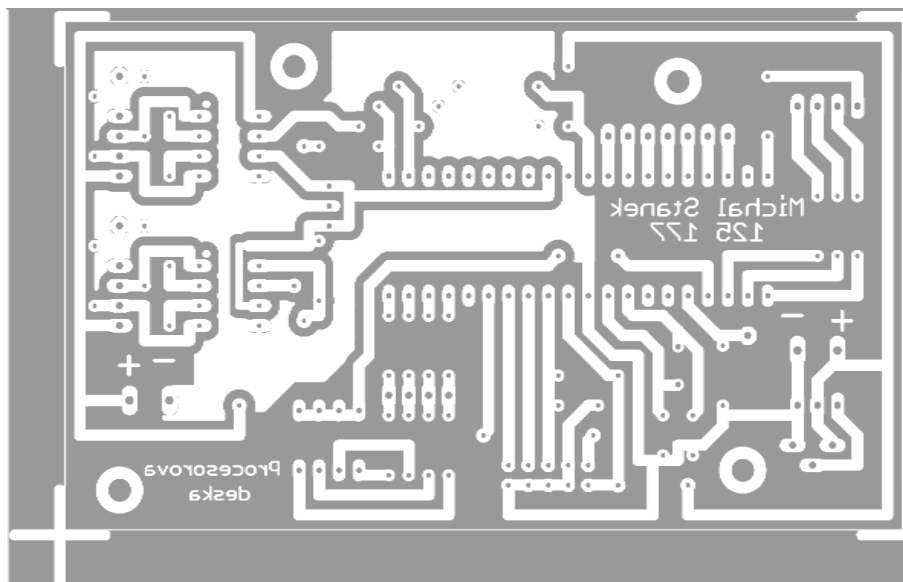
DPS pravý předzesilovač



F SEZNAM SOUČÁSTEK PŘEDZESILOVAČŮ

Označení	Hodnota	Popis	Označení	Hodnota	Popis
IC1	INA827	Zesilovač	R3	470 Ω	Rezistor
REF1	LM336Z	Reference 2,5 V	P1	10 k	Trimr
Rg	16 k Ω	Rezistor	C1, C2	100 nF	Kondenzátor
R1, R2	47 k Ω	Rezistor			

G DESKA PLOŠNÉHO SPOJE PROCESOROVÁ DESKA

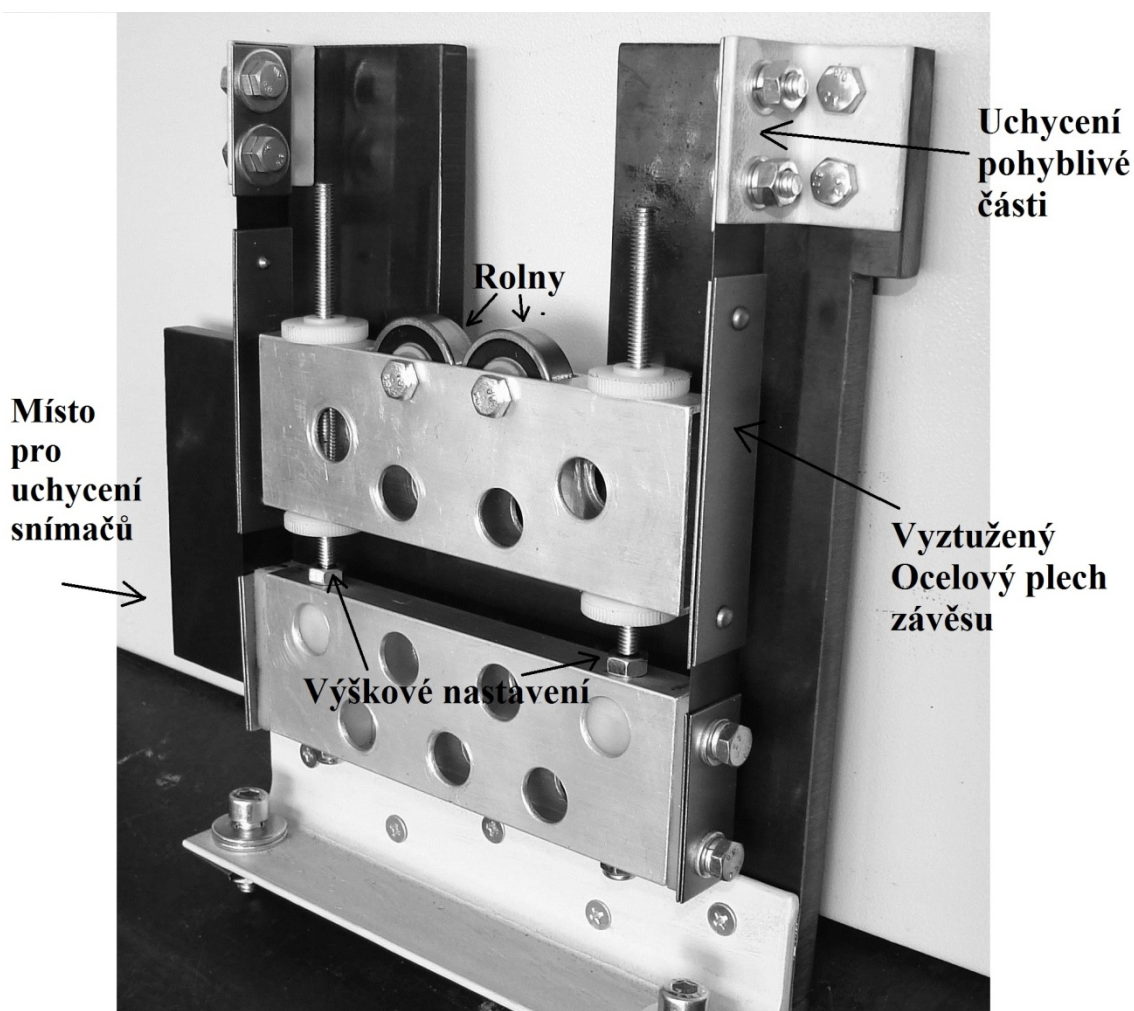


H SEZNAM SOUČÁSTEK PROCESOROVÁ DESKA

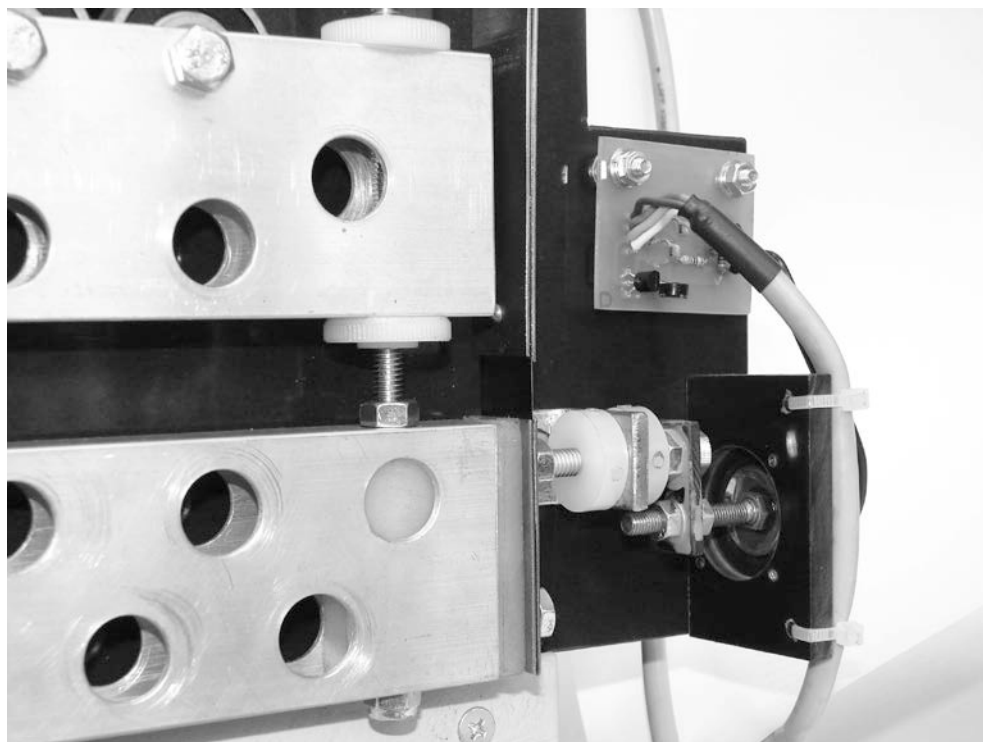
Označení	Hodnota	Popis	Označení	Hodnota	Popis
IC1	ATMega644	Mikroprocesor	R14	470 Ω	Rezistor
IC2,IC3	INA827	Zesilovač	R15-R18	1 k Ω	Rezistor
REF1	LT1431	Reference 2,5 V	R19	47 k Ω	Rezistor
Q1	8 MHz	Krystal	R21-R24	2,2 k Ω	Rezistor
L1	10 μ H	Tlumivka	R20	10 k Ω	Trimr
D1-D4	1N4148	Dioda	C1,C2	22 pF	Kondenzátor
R1-R12	470 Ω	Rezistor	C3,C4	100 nF	Kondenzátor
R13	10 k Ω	Rezistor			

I FOTOGRAFIE VYVAŽOVAČKY

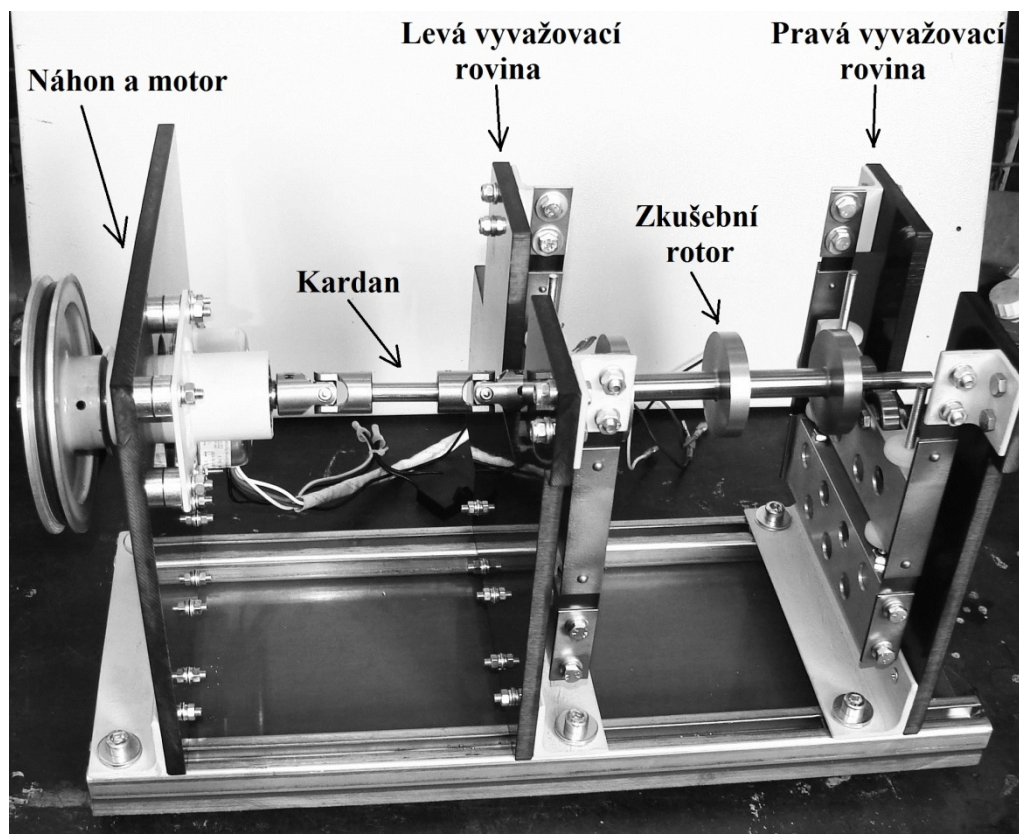
Detail jednoho stojanu



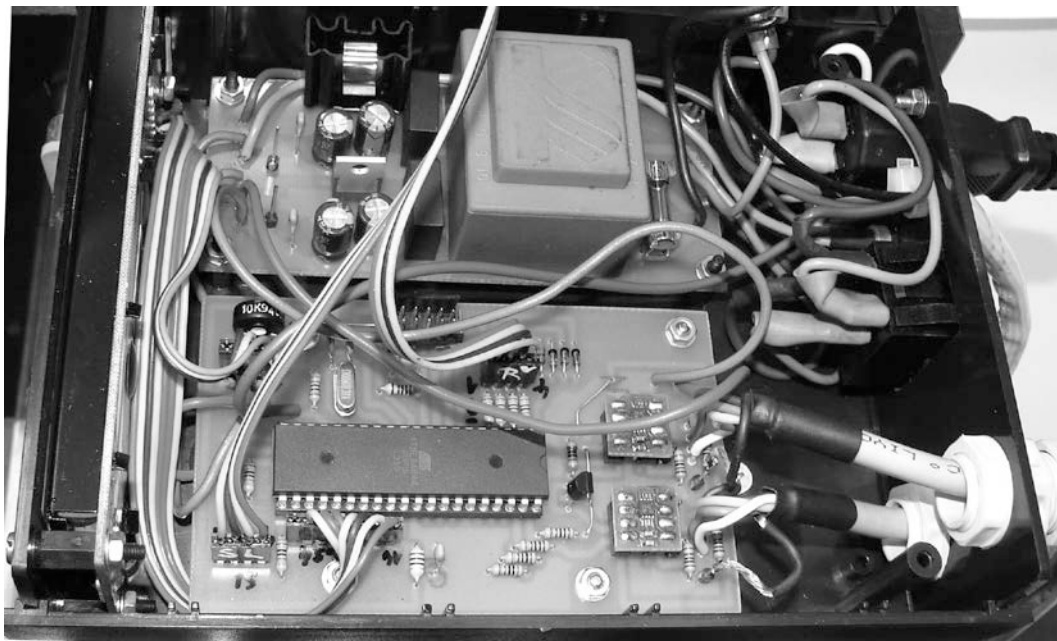
Detail snímače a jeho uchycení a předzesilovače



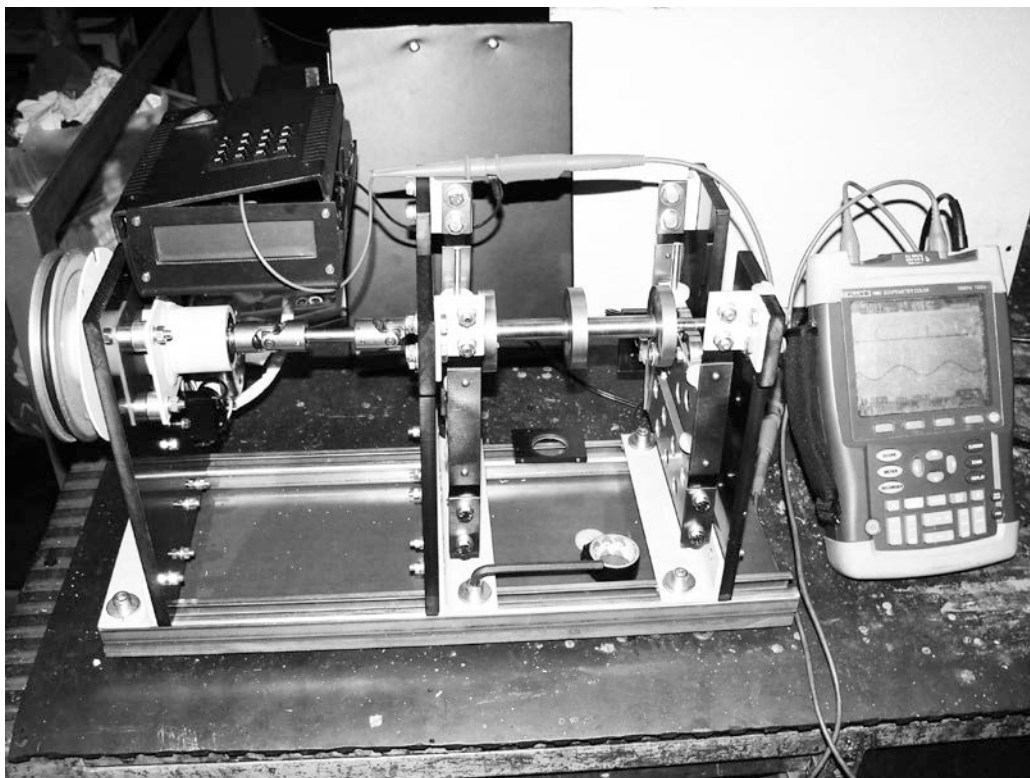
Celá vyvažovačka



Vnitřní uspořádání elektronické části



Měřící pracoviště



Průběh na osciloskopu při měření

(Průběh A čidlo otáček; Průběh B snímač)

