



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ CHVĚNÍ NA
STEJNOSMĚRNÉM MOTORKU
LABORATORNÍHO POHONU

MEASUREMENT AND EVALUATION OF LABORATORY DC DRIVE VIBRATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Bílý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Michal Bílý**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Měření a vyhodnocení chvění na stejnosměrném motorku laboratorního pohonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stávající laboratorní ukázkou regulačního pohonu se stejnosměrným motorkem je žádoucí rozšířit o měření chvění s možností následné analýzy chvění. Hlavním smyslem je ukázat elektronické obvody měření a demonstrovat jakými cestami lze získat spektrální analýzu chvění.

Cíle diplomové práce:

Seznámit se s dotýčným laboratorním pohonem, s uvažovaným snímačem chvění, s měřením signálů pomocí karty fy National Instruments a obecnými poznatky o chvění.
Realizovat ukázková měření chvění za různých podmínek. Naměřená data ukládat do tabulek Excelu.
Výsledky měření vhodně zpracovat, nejlépe formou spektrální analýzy pomocí prostředí Matlab.
Obecně zpracujte problematiku chvění pro dotýčný přípravek.
Navrhněte laboratorní cvičení k dané problematice.

Seznam doporučené literatury:

MIŠUN, Vojtěch. Vibrace a hluk. Vyd. 2., V Akademickém nakl. CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN 80-214-3060-5.

ZAPLATÍLEK, Karel. MATLAB®: začínáme se signály. Brno: Tribun EU, 2015. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-263-0898-0.

ni.com: "USB 6341" . 301 Moved Permanently [online]. Copyright © National ... [cit. 13.02.2017].
Dostupné z: <http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/global/lang/cs/pg/1/q/USB%206341/>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením a vyhodnocováním vibrací v elektrických strojích. V teoretické části práce jsou nejdříve stručně popsány možné příčiny vzniku vibrací. Dále jsou diskutovány důsledky vibračního působení na elektrická zařízení. Následně je uveden souhrn nejčastěji používaných snímačů vibrací. Větší část je poté určena analýze vibračního signálu v časové i frekvenční oblasti. Praktická část práce je rozdělena do dvou kapitol. První z nich je věnována popsání laboratorní ukázky regulačního pohonu se stejnosměrným motorkem rozšířenou o možnost měření vibrací. Druhá kapitola se zabývá vlastním měřením a analýzou vibrací na dané laboratorní ukázce.

ABSTRACT

This thesis encompasses measuring and rating of vibrations in electric machines. The theoretical part begins with a short description of possible causes of vibrations, which is followed by a discussion about what consequences the vibrational effects have on electrical devices. Then there is a description of available vibration sensors. The bigger part is then devoted to analysis of vibratory signal in both time and frequency domains. The practical part is divided into two chapters. The first one describes laboratory demonstration of control drive with DC motor, which is expanded by measurement of vibrations. The second chapter deals with measurement and analysis of said vibrations in the demonstration.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrodiagnostika, závady rotačních strojů, snímače vibrací, analýza vibrací, National Instruments, SignalExpress.

KEYWORDS

Vibrodiagnostics, defects of rotary machines, vibration sensors, vibration analysis, National Instruments, SignalExpress.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BILÝ, M. *Měření a vyhodnocení chvění na stejnosměrném motorku laboratorního pohonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 76 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Němcovi, CSc. za odborné vedení, poskytnutý čas a ochotu při tvorbě této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým přátelům a rodině za podporu během mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeněk Němec, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 28.5.2018

.....

Michal Bílý

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	VIBRACE	17
2.1	Vibrodiagnostika	17
2.1.1	Zdroje vibrací	18
2.1.2	Základní pojmy kmitavého pohybu	20
2.1.3	Měřené veličiny	21
2.2	Běžné závady rotačních strojů	22
2.2.1	Nevyváženost rotoru	22
2.2.2	Nesouosost	24
2.2.3	Ohnutý hřídel	25
2.2.4	Excentrický rotor	25
3	MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ	27
3.1	Princip snímačů vibrací	27
3.2	Snímače výchylky	28
3.3	Snímače rychlosti	28
3.4	Snímače zrychlení	29
3.4.1	Delta Shear	30
3.4.2	Planar Shear	30
3.4.3	Snímače s centrálním tlakovým namáháním	30
3.5	Analýza signálu v časové oblasti	30
3.6	Analýza signálu ve frekvenční oblasti	32
3.6.1	Fourierova řada periodické funkce	32
3.6.2	Fourierova transformace časově diskrétního signálu DTFT	33
3.6.3	Diskrétní Fourierova transformace DFT (Discrete Fourier Transform)	34
3.6.4	Rychlá Fourierova transformace FFT (Fast Fourier Transform)	35
3.6.5	Okna Fourierovy transformace	36
3.6.6	Výkonová spektrální hustota	39
4	LABORATORNÍ ÚLOHA	41
4.1	Panel SIEMENS SIMATIC	41
4.1.1	SIMATIC S7-200, EM 235, EM 277	41
4.1.2	Obvod vyhodnocení vibrací akcelerometru 784A	43
4.2	DC motorek DYNAMO SLIVEN PIVT 6-25/3A	44
4.3	Měřicí karta NI USB-6341	45
4.4	Akcelerometr 784A	47
5	MĚŘENÍ A ANALÝZA DC MOTORKU	51
5.1	Measurement & Automation Explorer (MAX)	51
5.2	NI SignalExpress	53
5.2.1	Power Spectrum	54
5.3	MATLAB / Simulink	55
5.4	Analýza vibrací laboratorního motorku	56
5.5	Zhodnocení výsledků	66
6	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
	SEZNAM PŘÍLOH	73

1 ÚVOD

Měření vibrací, potažmo celá vibrodiagnostika, patří neoddiskutovatelně k hlavním prediktivním metodám údržby elektrických rotačních strojů v mnoha průmyslových odvětvích. Přerušení výroby vlivem poruchy nebo havárie může mít nedozírné následky a proto neustále rostou nároky na spolehlivost, životnost a účinnost strojů.

Cílem vibrodiagnostiky je včasná identifikace a lokalizace závady na daném zařízení. Princip této diagnostiky spočívá v měření vibračního signálu zkoumaného stroje a následně vyhodnocení analýzy různými metodami v časové a frekvenční oblasti. Získá se tedy informace o skutečném stavu zařízení, která může odhalit nevyváženost rotoru, nesouosost, excentricitu, ohnutý hřídel a další.

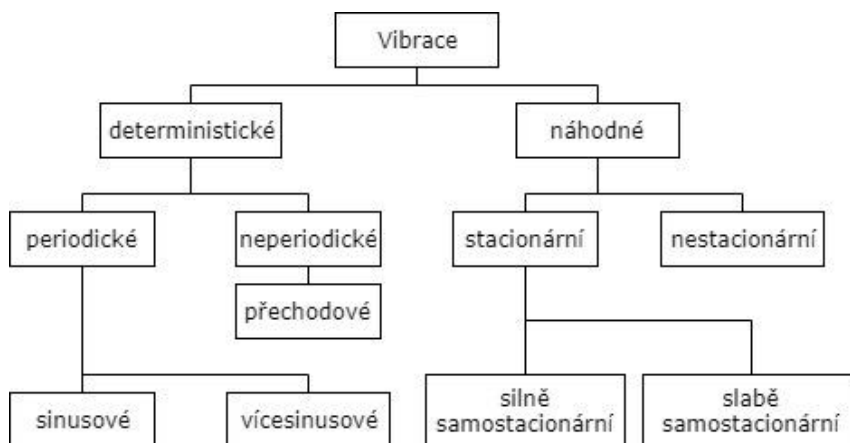
Diplomová práce si dává za cíl objasnit fyzikální popis vibrací a stanovení pro jaké aplikace je vibrodiagnostika vhodná. Dále budou uvedeny možné zdroje vibrací a základní veličiny určené k popisu vibračního signálu. V práci budou pospány různé závady rotačních strojů s důrazem na běžné závady a tři základní typy vibračních snímačů. Závěr teoretické části práce bude věnován analýze dat, získaných ze snímačů vibrací metodami ve frekvenční a časové oblasti.

Teoretické znalosti budou uplatněny k rozšíření stávající laboratorní ukázky regulačního pohonu se stejnosměrným motorkem o možnost měření a následnou analýzu vibrací. Budou zmíněny technické specifikace a popsány části laboratorní úlohy. Měření vibračního signálu bude realizováno pro různá uložení stejnosměrného motoru pomocí karty fy National Instruments. Výsledky měření budou zpracovány v prostředí SignalExpress a Matlab. Nakonec bude navrženo možné laboratorní cvičení k dané problematice měření a vyhodnocení vibrací na stejnosměrném motorku laboratorního pohonu.

2 VIBRACE

Pod pojmem vibrace rozumíme oscilace mechanické soustavy. Dle normy ČSN ISO 2041 vibrace popisují pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. V dřívějších dobách se k popisu kmitání v rozsahu slyšitelných kmitočtů užíval název chvění. Velikost vibrací se vyjadřuje výchylkou, nebo časovými derivacemi výchylky a to rychlostí nebo zrychlením. Díky přístupnosti k velké škále akcelerometrů a z praktických důvodů se nejhojněji užívá zrychlení. Vibrace lze rozdělit podle časového průběhu do dvou hlavních kategorií. Tyto kategorie i jejich další sub kategorie jsou znázorněny na obrázku 1.

U deterministických vibrací je jejich okamžitá hodnota v daném čase přesně dána časovým průběhem zaznamenaným dříve, než je daný časový okamžik. Pro náhodné vibrace nemůže být z jejich časového průběhu určena okamžitá hodnota vibrací v čase.[1]



Obr. 1 – Rozdělení vibrací podle časového průběhu [1]

2.1 Vibrodiagnostika

Jak již název vibrodiagnostika napovídá, jde o určování stavu sledovaného objektu na základě měření a analýzy vibrací. Toto odvětví technické diagnostiky hraje významnou roli k zajištění spolehlivé funkce a dlouhého bezporuchového provozu elektrických strojů, zejména u velkých strojů, které jsou většinu svého provozního života v provozu. Na těchto strojích je nesmírně žádoucí předcházet vzniku poruch prováděním kontrol a údržby. Porucha může mít za následek přerušení provozu nebo úplné odstavení stroje. Diagnostika se provádí nejen pro prodloužení životnosti stroje, ale i pro zvýšení spolehlivosti, efektivity a bezpečnosti. Určujícím parametrem pro údržbu a diagnostiku strojů je jejich cena. Stroje, pro které je výhodnější výměna kus za kus, nepodléhají údržbě. Takový stroj pracuje až do poruchy, po které je vyměněn. [2][6]

2.1.1 Zdroje vibrací

K dosažení analýzy vibrací je nezbytné pochopit, co je příčinou jejich vzniku. Každý druh diagnostiky analyzuje odezvu na působící příčinu. U vibrodiagnostiky jsou odezvou vibrace, jejichž charakteristika je dána druhem působící síly. Do běžných typů budících sil náleží:

- periodická budící síla
- impulsní budící síla
- budící síla náhodného průběhu [3]

Periodická budící síla

Základním příkladem periodické síly je síla harmonická. V technické praxi se velká část sil působících v oblasti rotačních strojů udává jako součet harmonických sil, neboť jen s čistě harmonickou silou se mnohokrát nesetkáme. Je-li pružně uložené těleso pod vlivem harmonické síly (rovnice 1):

$$f(t) = F \cdot \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (1)$$

F... amplituda síly [N]

ω ... kruhová frekvence budící síly [rad/s]

t... čas [s]

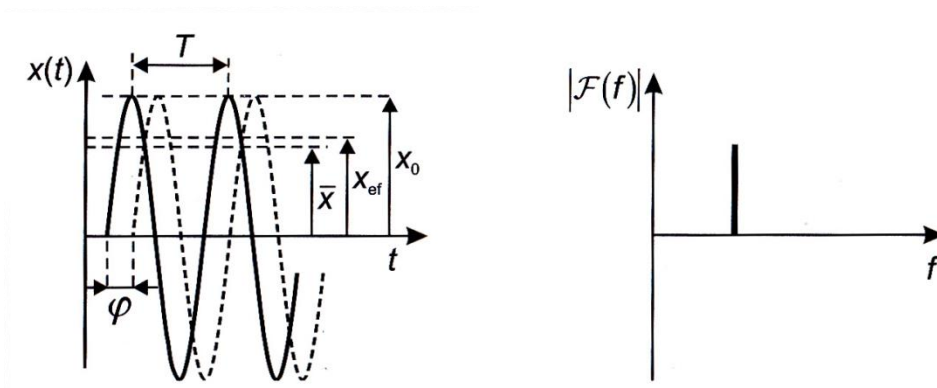
φ_F ... počáteční fázový posun budící síly

tak po ustálení je pohyb tělesa rovněž harmonický s totožnou kruhovou frekvencí ω , avšak s rozdílnou amplitudou. Jedná se o kmitání a je-li budící síla periodická pak o kmitání vynucené. Častou příčinou této periodické budící síly jsou nevyváženosti rotoru. Výchylka vynuceného kmitání je vyjádřena v rovnici 2. [3]

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t + \varphi_F - \varphi) \quad (2)$$

X... amplituda vynuceného kmitání

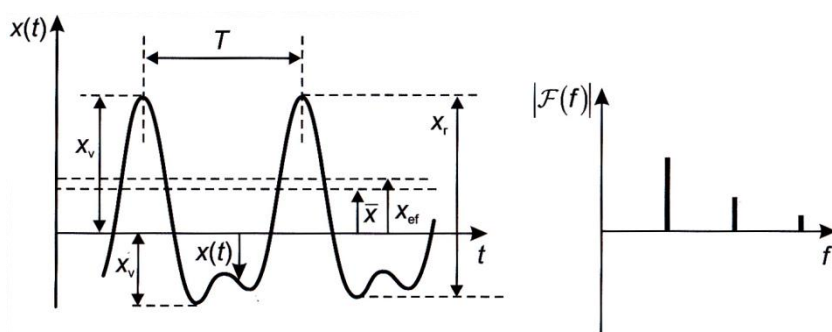
φ ... fázový posun



Obr. 2 – Harmonický průběh vibrací a jeho spektrum [4]

Impulsní budící síla

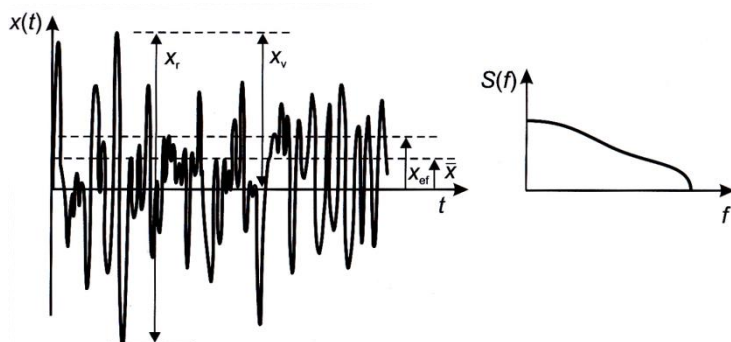
Je-li těleso pod vlivem impulsní síly, tak tato síla způsobí vychýlení tělesa z rovnovážné polohy a následné volné kmitání na jedné či více vlastních frekvencích. Na rozdíl od síly periodické může dojít ke kmitání, kdy výsledný průběh obsahuje se základní frekvencí i vyšší harmonické. Typickým příkladem je rozeznění zvonu nebo v technické praxi pohyb poškozené části stroje jakou může být kulička v ložisku. Impulsní síla je též označována jako síla rázová. [3]



Obr. 3 – Složený periodický průběh vibrací a jeho spektrum [4]

Budící síla náhodného průběhu

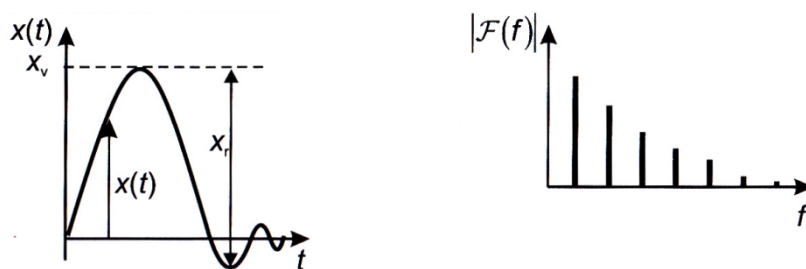
Odezva tělesa, na které působí síla náhodného průběhu, je také náhodná. Náhodné buzení je přítomné vždy, avšak ve většině případů jen jako šum. Při výskytu turbulentního proudění, které je nežádoucí, je nutné uvažovat náhodné buzení i při standardní vibrodiagnostice. Spektrum těchto neperiodických vibrací zahrnuje všechny frekvence od nuly do maxima. [3]



Obr. 4 – Náhodný průběh vibrací a jeho spektrum [4]

Samobuzené kmitání

Jestliže je objekt vystaven působení kapaliny nebo plynu, vzniká samobuzené kmitání. Pohyb takto vybuděn se obecně nazývá třepetání. Aerodynamické síly působící na těleso vybudí kmitání tělesa na jedné z jeho vlastních frekvencí, což je velmi destruktivní přechodový jev. Kmitání objektu umocní vliv aerodynamické síly, které zpětně zvýší amplitudu kmitání objektu. [3]



Obr. 5 – Přejchodový průběh vibrací a jeho spektrum [4]

2.1.2 Základní pojmy kmitavého pohybu

K názornosti popisu pojmů bude využit obrázek 6 a rovnice 3.

$$X(t) = X_V \sin \omega t \quad (3)$$

Doba kmitu

Perioda, nebo-li doba kmitu T , je určena časem mezi dvěma sousedícími kladnými maximálními výchylkami.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \text{ [s]} \quad (4)$$

Kmitočet

Frekvence, či-li kmitočet f , odpovídá počtu celých kmitů za sekundu.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

Úhlový kmitočet

Úhlová frekvence, jinak úhlový kmitočet ω , je určena společně se samotnou frekvencí dobou kmitu.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (6)$$

Efektivní hodnota

Efektivní hodnota X_{ef} se užívá pro popis harmonického i neharmonického signálu a vyjadřuje průměrný výkon měřené veličiny.

$$X_{ef} = X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (7)$$

Střední hodnota

Podobně jako efektivní hodnota se střední hodnota X_s používá k popisu signálu, nicméně ne tak často.

$$X_s = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (8)$$

Výkmit

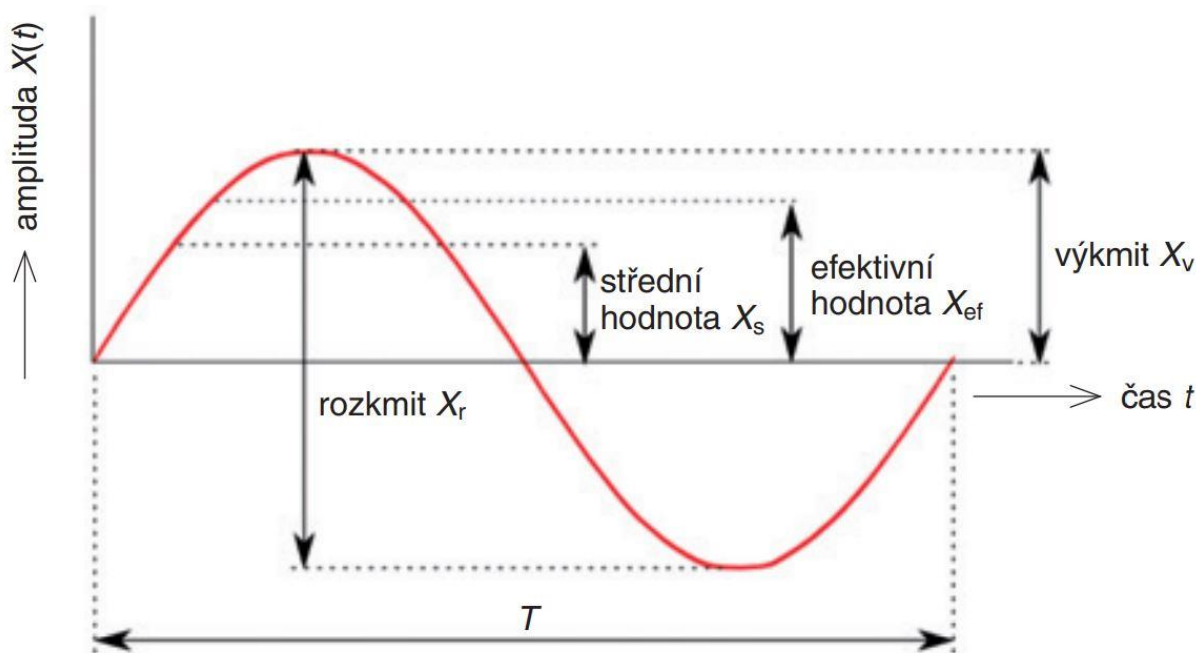
Špičková hodnota, či výkmit X_V , je největší vzdálenost vrcholu signálu od referenční hodnoty.

Rozkmit

Špička - špička, či-li rozkmit X_r , je maximální vzdálenost protilehlých vrcholů signálu.

Fázový úhel

Jestliže v náhodně časovém okamžiku sledovaný signál není ve své rovnovážné poloze, tak má tento signál počáteční fázový úhel φ [rad].



Obr. 6 – Veličiny popisující harmonický pohyb [8]

2.1.3 Měřené veličiny

V mechanice je pohyb možné popsat dráhou, rychlostí nebo zrychlením. K popisu vibračního chování není podstatné, jaká veličina bude pro tuto úlohu zvolena, neboť jsou všechny navzájem vázány matematickými vztahy. [3]

Výchylka vibrací

Vzdálenost objektu od jeho referenční polohy je definicí výchylky vibrací. Jedná se o amplitudu vibrací, kde jednotkou je délkový rozměr μm . Měření výchylky se užívá při práci s nízkými kmitočty a to nejčastěji pomocí indukčních snímačů. [5]

Rychlost vibrací

Podle obecné definice je rychlost definována jako derivace dráhy podle času. V případě rychlosti vibrací jde o derivaci výchylky za danou dobu. Značí se délkovou jednotkou za sekundu a to nejčastěji mm/s . Jde o hojně užívanou variantu vyjádření velikosti vibrací. K měření rychlosti se v dnešní době nejčastěji užívá akcelerometrů, kde se rychlost získá integrací naměřeného zrychlení. [5]

Zrychlení vibrací

Zrychlení je určeno derivací rychlosti podle času. Zrychlení vibrací je vyjádřeno absolutně mm/s^2 nebo v násobcích tíhového zrychlení g . Pro měření zrychlení, jak již bylo nastíněno v měření rychlosti vibrací, se používají piezoelektrické akcelerometry. [5]

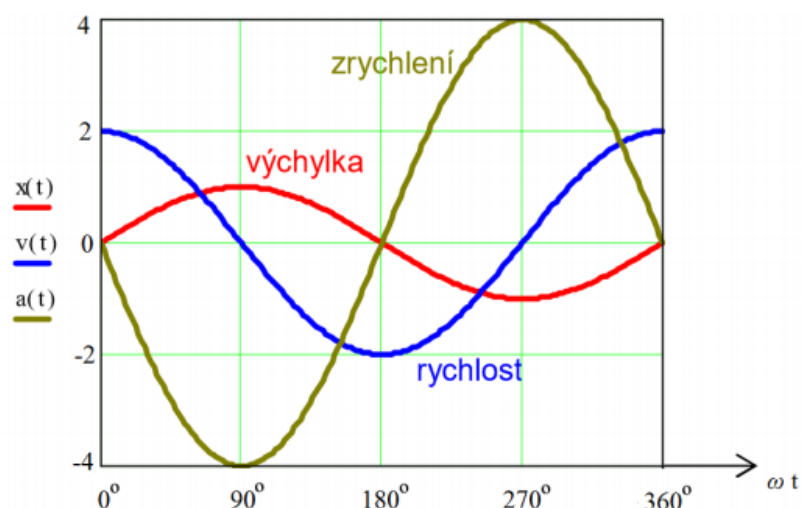
Příklad závislosti měřených veličin

Na obr. 7 jsou zobrazeny průběhy rovnic 9, 10, 11 pro zvolenou amplitudu $X = 1 \text{ mm}$ a úhlovou frekvenci $\omega = 2 \text{ rad/s}$.

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (10)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$



Obr. 7 – Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením [3]

Z grafu je patrné, že výchylka předchází rychlost o 90° a rychlost předchází zrychlení o 90° . Díky tomu stačí změřit pouze jednu z veličin a ostatní dopočítat. [3]

2.2 Běžné závady rotačních strojů

V technické praxi se setkáváme s mnoha různými druhy závad rotačních strojů, které mají za následek vznik vibrací. Značný vliv na vznik vibrací má především konstrukce součástí, jejich tvar i kvalita výroby. S rostoucí dobou, kdy je stroj v provozu, se zvyšuje pravděpodobnost vzniku vibrací a opotřebení jednotlivých součástí. [6][7]

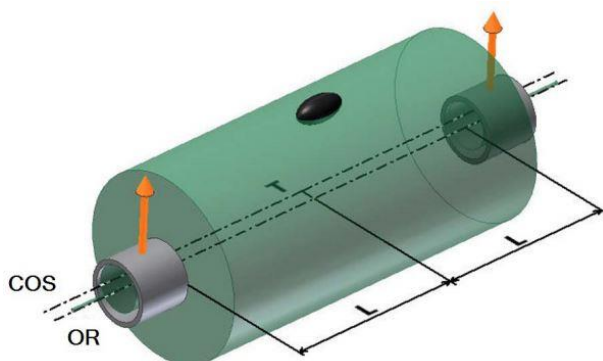
2.2.1 Nevýváženost rotoru

Odstředivá síla je jednou z elementárních budících sil u rotačních strojů. Zdrojem tohoto odstředivého působení je skutečnost, že těžiště rotoru není přesně umístěno na ose rotace a aby se s osou rotace shodovala hlavní osa setrvačnosti. Pro minimalizaci působení

zmíněné síly se rotory vyvažují. Základní druhy nevyváženosti jsou silová, momentová a dynamická.[3][6][7]

Silová (statická) nevyváženost

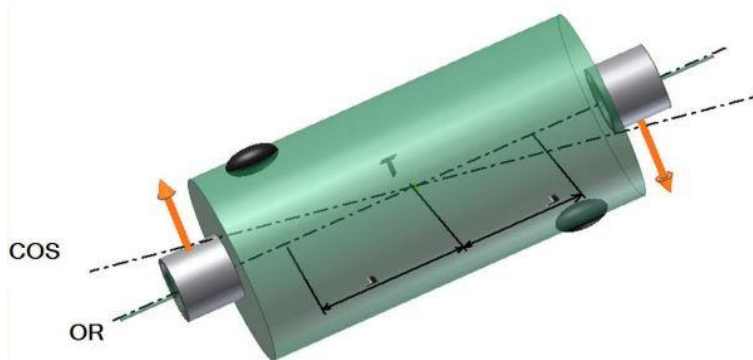
Při silové nevyváženosti je osa rotace posunutá od osy setrvačnosti při zachování rovnoběžnosti obou os. Má ustálený průběh a stejnou fázi. Jejím vlivem roste amplituda vibrací a ve spektru vibrací je zobrazena výraznou amplitudou na otáčkovém kmitočtu v radiálním směru na ložiscích. Fázový posun není velký a pohybuje se v rozmezí $\pm 30^\circ$. Pro odstranění statické nevyváženosti je přidána či odebrána hmota ve vyvažovací rovině tak, aby se centrální osa setrvačnosti posunula zpět na osu rotace. V obr. 8 náleží (COS) centrální ose setrvačnosti a (OR) ose setrvačnosti. V běžném provozu se statickou nevyvážeností moc často nesetkáme. Lze ji objevit u rotujícího kotouče na dlouhé hřídeli nebo kde je průměr hřídele výrazně větší než jeho délka. [3][6]



Obr. 8 – Silová nevyváženost [6]

Momentová nevyváženost

Tato nevyváženost se projevuje pouze při rotaci, tudíž ji v klidu nemůžeme sledovat. Rotor je momentově nevyvážen tehdy, když osa setrvačnosti (COS) a osa rotace (OR) jsou různoběžné se vzájemným protnutím v těžišti. Stejně jako silová nevyváženost se ve spektru projevuje výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na ložiscích. Rovněž fázový posun je stejný jako u statické nevyváženosti. V horizontálním a vertikálním směru je posuv 90° s odchylkou $\pm 30^\circ$. Příklad momentové nevyváženosti můžeme vidět na obr.9. [3][6]



Obr. 9 – Momentová nevyváženost [6]

Dynamická (obecná) nevyváženost

Dynamická nevyváženost je kombinací silové a momentové nevyváženosti. Je to nejčastěji se vyskytující typ nevyváženosti. Podobně jako u momentové nevyváženosti je těleso dynamicky nevyvážené právě tehdy když osa setrvačnosti (COS) a osa rotace (OR) jsou různoběžné, avšak protnutí nastane mimo těžiště. Dominantní ve spektru je první harmonická. Fázový rozdíl mezi vnitřním a vnějším ložiskem se může pohybovat v rozmezí 0° až 180° . Vyvažuje se přidáním nebo odebráním hmot ve dvou vyvažovacích rovinách. Momentovou nevyváženost můžeme vidět na Obr. 10. [3][6]



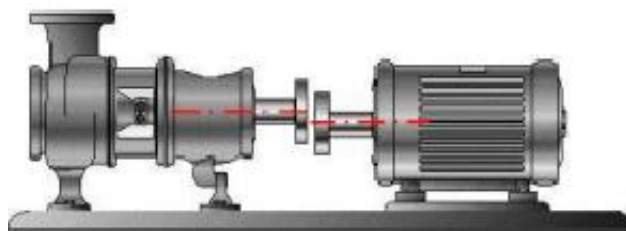
Obr. 10 – Dynamická nevyváženost [6]

2.2.2 Nesouosost

Jednou z dalších běžných závad rotačních strojů je nesouosost. Může dojít k jejímu vzniku u dvou axiálně spojených rotorů, které mají různé osy rotace. Příčinou jsou mimoběžné osy zařízení před montáží. Hlavní úskalí nesouososti je fakt, že přenáší značné síly do ložisek, které na to nejsou konstrukčně uzpůsobeny. Následkem je nárůst vibrací a hluku a zkrácení životnosti zařízení. Rozlišujeme nesouosost paralelní a nesouosost úhlovou. [3][7]

Paralelní nesouosost

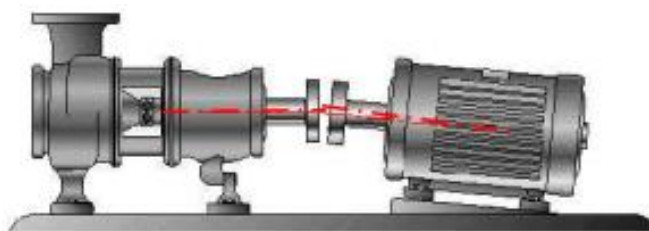
Osy rotace hřídelů jsou před montáží rovnoběžné (obr.11). Paralelní nesouosost zapříčiňuje velké radiální vibrace. Jejím následkem je ohybové napětí v rotoru s deformační křivkou ve tvaru S. Druhá harmonická je větší než první harmonická a její velikost je závislá na konstrukci a typu spojky. [3][7]



Obr. 11 – Paralelní nesouosost [3]

Úhlová nesouosost

Osy rotace hřídelů se před montáží protínají, ale jsou mimoběžné (obr.12). Úhlová nesouosost způsobuje velké axiální vibrace. Jejím následkem je ohybové napětí v rotoru s deformační křivkou ve tvaru U. [3][7]

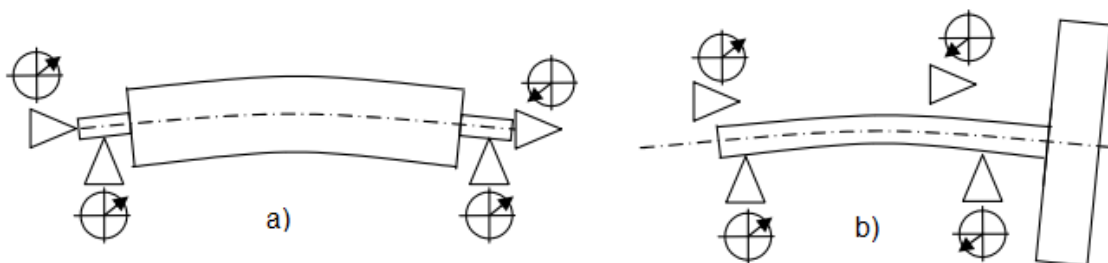


Obr. 12 – Úhlová nesouosost [3]

2.2.3 Ohnutý hřídel

Hřídel, který je ohnutý, lze definovat jako plasticky deformovaný hřídel. Tento hřídel má geometrickou osu křivku, jenž není totožná s osou rotace. Hřídel poté vykazuje chování jak nevyváženosti, tak nesouososti. Rozeznáváme tyto případy znázorněné na obrázku 13:

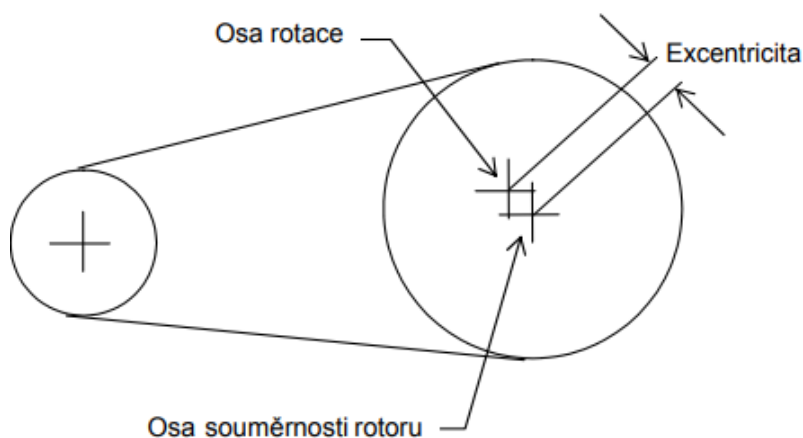
- ohnutý přepislý hřídel
- ohnutý hřídel na dvou podporách [6][7]



Obr. 13 – Ohnutý a) hřídel na dvou podporách b) přepislý hřídel [7]

2.2.4 Excentrický rotor

Excentricita je zapříčiněna růzností osy rotace a osy souměrnosti rotoru (obr.14). Takový rotor je poté velkým zdrojem vibrací, zejména v případech, kdy je součástí převodu ozubené kolo, ložiska, řetězové kolo, řemenice a další. Na první harmonické dosahují vibrace svého maxima. V excentrickém rotoru je mezi ním a statorem nestálá vzduchová mezera. Důsledkem této vzduchové mezery je vznik pulzujících vibrací tzv. záznějí. Postižená součást zanáší do převodu periodický zdroj síly, jenž je vyvolán vibrační výchylkou. Z tohoto důvodu bývá excentricita zaměňována za nevyváženost, nicméně vyvažováním nelze vibrace odstranit. [3][6][7]



Obr. 14 – Excentrický rotor [7]

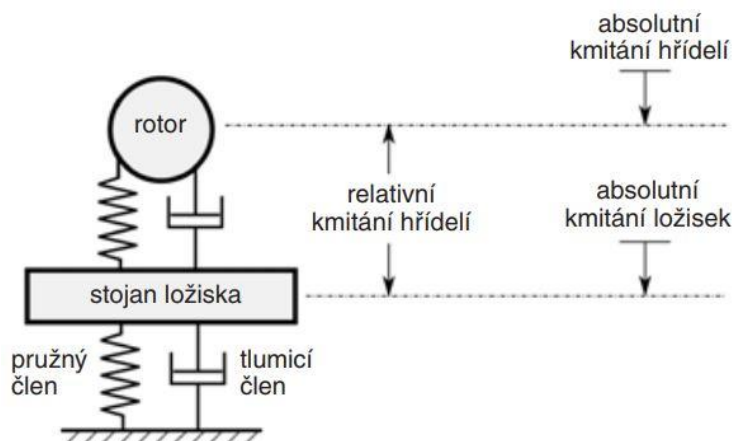
3 MĚŘENÍ A ANALÝZA VIBRACÍ

Jak již bylo v podkapitole 2.1.3 popsáno, měřit a následně provést analýzu vibrací lze z kterékoliv ze tří veličin popisujících kmitavý pohyb. Volba měřené veličiny i nepřímo určí typ snímače. Výběr se sestává ze snímačů:

- snímače výchylky
- snímače rychlosti (velometry)
- snímače zrychlení (akcelerometry)

3.1 Princip snímačů vibrací

Hlavní předpoklad k dobré volbě snímače je určení jestli jde o vibrace absolutní nebo relativní. Absolutní vibrace popisují pohyb části stroje vzhledem k zemskému povrchu. Relativní vibrace nepopisují pohyb vzhledem k Zemi, nýbrž k vhodně zvolené základně. Touto zvolenou základnou bývá většinou rám stroje, který sám o sobě může vzhledem k zemskému povrchu kmitat. Rozdíl absolutních a relativních vibrací je znázorněn na obr.15. Podstatná je přístupnost zasažené části stroje. [8]



Obr. 15 – Absolutní a relativní vibrace [8]

"Mechanické kmitání určují vedle frekvence společně výchylka, rychlost a zrychlení, které jsou navzájem závislé. Principiální pro funkci snímače vibrací je pohyb seizmické hmoty s hmotností m vzhledem k objektu o hmotnosti M , jehož vibrace se měří (obr. 16)." [8]

Pro ideální stav platí diferenciální rovnice popisující kmitání:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + ky = F_b = M\ddot{x} \quad (12)$$

F_b ... budící síla

M ... hmotnost objektu

m ... hmotnost seizmické hmoty snímače

k ... tuhost pružiny

b ... součinitel tlumení

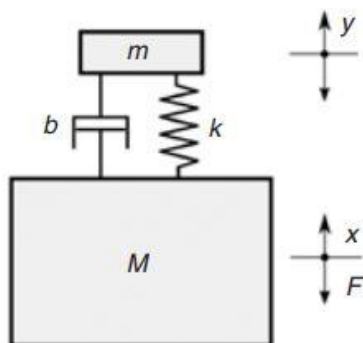
y ... výchylka

$\dot{y}$... rychlost

$\ddot{y}$... zrychlení

$\ddot{x}$... zrychlení objektu

Vhodným zvolením parametru m , b a k (rovnice 12) lze vytvořit snímač rychlosti, zrychlení nebo výchylky. [8]



Obr. 16 – Obecný princip snímače vibrací [8]

3.2 Snímače výchylky

Snímače výchylky se dají konstruovat na kapacitním, indukčním, magnetickém nebo optickém principu. V dnešní době se nejhojněji ve vibrodiagnostice využívají indukčnostní snímače, které pracují s využitím závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Takový snímač pak měří vzdálenost mezi hrotem snímače a vodivým povrchem. Měřidlo se skládá z vlastního snímače a proximitoru. Vysokofrekvenční střídavý proud generovaný oscilátorem v proximitoru po průchodu cívkou, zabudovanou ve snímači, způsobuje v okolí hrotu snímače vysokofrekvenční elektromagnetické pole. Pole cívky poté indukuje ve vodičích vířivé proudy. Následkem je změna impedance cívky. Kvůli vysoké citlivosti na parazitní vlivy se snímače na indukčním principu vyrábí jako integrované součásti, kde kovové stínící pouzdro obsahuje jak cívku, tak základní elektroniku.

Snímače výchylky mají velkou hmotnost seismické hmoty m a zároveň zanedbatelný součinitel tlumení b a tuhost pružiny k . Tyto změny se následně promítnou do rovnice (12) a přejdou v rovnici (13): [3][8]

$$m\ddot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx x \quad (13)$$

3.3 Snímače rychlosti

Tyto snímače slouží pro měření vibrací u rotačních strojů již velmi dlouhou dobu a v některých aplikacích se užívají dodnes. Fungují na principu elektromagnetické indukce. Cívka nebo magnet se pohybuje v magnetickém poli a důsledkem pohybu se na vývodech cívky vytváří indukované napětí u . Velikost tohoto napětí je přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem. Konstrukce snímačů rychlosti je uzpůsobena tak, aby tato relativní rychlost odpovídala rychlosti vibrací měřeného zařízení.

Oproti snímačům výchylky mají snímače rychlosti dominantní tlumení b a zanedbatelné hodnoty m a k . Poté vztah (12) přejde v: [3][8]

$$b\dot{y} = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \dot{x} \quad (14)$$

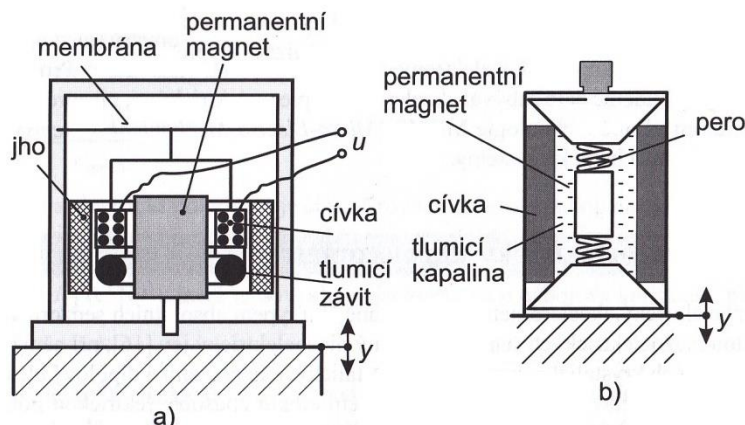
Pro indukované napětí na cívce platí vztah:

$$u = B \cdot l \cdot v \quad (15)$$

B... indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře snímače

l... délka vodiče cívky

v... rychlost kmitání pouzdra snímače



Obr. 17 – Absolutní elektrodynamický senzor rychlosti a) s pohyblivou cívkou, b) s pohyblivým magnetem [2]

Na obrázku 17 je zobrazen absolutní senzor rychlosti. Kladnou stránkou těchto senzorů je vysoká úroveň výstupního signálu a malý vnitřní odpor. Naproti tomu zápornou je omezená horní frekvence 2000 Hz až 3500 Hz, citlivost na parazitní magnetické pole a větší rozměr senzoru. [2]

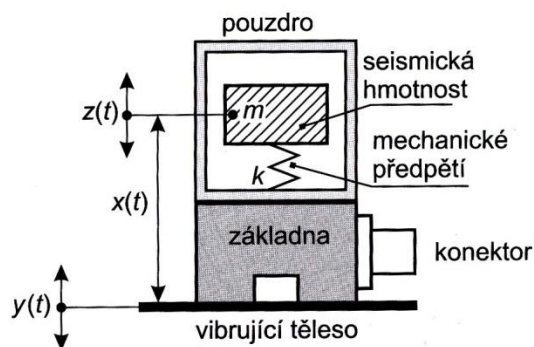
3.4 Snímače zrychlení

Dnes nejpoužívanější snímače pro měření vibrací jsou snímače zrychlení, konkrétně piezoelektrické akcelerometry (obr. 18) využívající piezoelektrický jev. Tento jev je vyvolán deformací destičky z piezoelektrického keramického materiálu. To způsobí vznik elektrického náboje, kde velikost tohoto náboje je přímo úměrná deformaci destičky. Umístění keramické destičky je mezi dvěma hmotami. Jedna hmota je pevně spojená s pouzdem snímače (základna) a druhá seismická referenční hmota je uložena pružně.

Jakmile se měřené zařízení rozkmitá, začne kmitat i hmota pevně spojená s pouzdem snímače, zatímco pružně uložená hmota je v klidu. Takto vznikne síla, která působí na piezoelektrickou destičku, jenž se pod jejím vlivem deformuje. Zde vzniká elektrický náboj přímo úměrný zrychlení skříně měřeného zařízení. Mluvíme tedy o absolutním měření vibrací.

Akcelerometry mají značnou tuhost k při zanedbatelně malé hmotnosti m a tlumení b . Vztah (12) přejde v rovnici (16): [3][8]

$$ky = M\ddot{x} \Rightarrow y \approx \ddot{x} \quad (16)$$



Obr. 18 – Model piezoelektrického akcelometru [2]

Akcelerometry se vyrábí v mnoha konstrukčních variantách, přičemž mezi základní konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelometrů patří varianty Delta Shear, Planar Shear a s centrálním tlakovým namáháním. [8]

3.4.1 Delta Shear

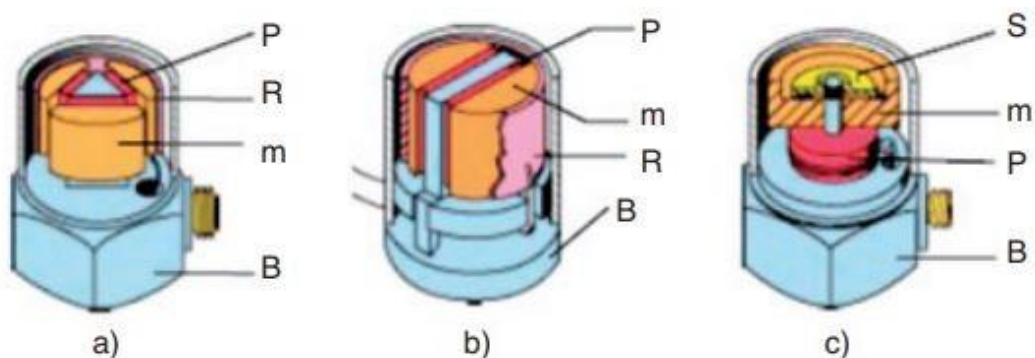
Piezoelektrické snímače zrychlení s konstrukcí Delta Shear se sestávají ze tří dvojic seizmických hmot a piezokrystalů. Hmoty jsou upevněny na trojbokém středovém sloupku s použitím předpnutého prstence. Výhodou je velmi dobrá linearita, citlivost, vysoká vlastní frekvence a malá hmotnost. [8]

3.4.2 Planar Shear

Konstrukce Planar Shear se liší od konstrukce Delta Shear pouze počtem seizmických hmot a piezokrystalů. Planar Shear snímače jsou tvořeny pouze dvojicí těchto komponent. Výhody konstrukce jsou stejné pouze citlivost je snížena. [8]

3.4.3 Snímače s centrálním tlakovým namáháním

Tyto akcelerometry mají jednoduchou klasickou konstrukci, která se vyznačuje menší citlivostí a větší hmotností setrvačné hmoty snímače. [8]



Obr. 19 – Základní konstrukce piezoelektrických akcelometrů a) Delta Shear, b) Planar Shear, c) s centrálním tlakovým namáháním (B - těleso snímače, m - seizmická hmota, P - piezoelektrický prvek, R - předpínací prstenec, S - předpínací disk) [7]

3.5 Analýza signálu v časové oblasti

Analýza vibrodiagnostického signálu v časové oblasti (anglicky Time Domain Analysis) spočívá ve vyhodnocování parametrů časových průběhů signálů. Tyto časové průběhy jsou

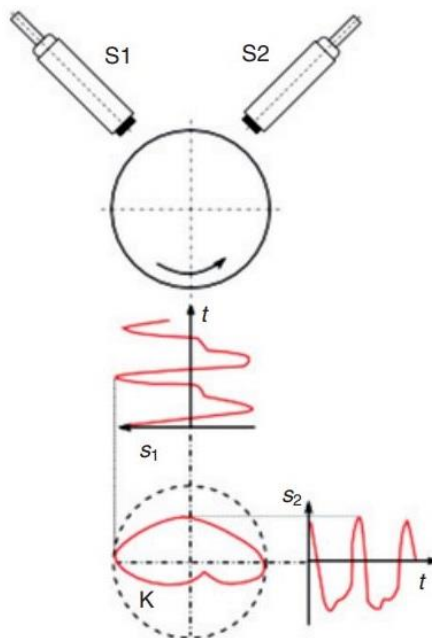
dány z veličin výchylky, rychlosti nebo zrychlení. V časové oblasti není složité vyhodnotit okamžité, střední a efektivní hodnoty signálu či obálky signálu. Je-li v signálu dominantní náhodná složka, tak je vhodné pro analýzu vibrací použít statistické výpočty, jako je směrodatná odchylka, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti, činitel výkmitu a mnoho dalších. Analýza signálu v časové oblasti se využívá při zkoumání přechodových jevů. Nejčastěji zkoumané jevy jsou rázové odezvy, rozběhy a doběhy motorů, nestacionární signály s proměnnou frekvencí, při nelineárních parametrech systému, při proměnné tuhosti kmitajícího objektu a proměnném tlumení systému během časové periody signálu.

Vhodnost užití časové analýzy je podmíněna počtem zdrojů vibrací, přičemž zdroj vibrací může být jen jeden. V případě výskytu většího počtu zdrojů vibrací dochází ke ztrátě diagnostické informace v šumu signálu, zapříčiněném přenosem vibrací z různých částí zařízení. V tomto případě je nalezení příčiny vibrací stroje velmi omezená. [2]

Uplatnění v analýze signálu zde nachází pojmy popsané v podkapitole 2.1.3. Dále budou popsány další způsoby analýzy.

Kinematická dráha

Metoda maximální výchylky, nebo-li kinetické dráhy, je základem mnoha norem a doporučení. Uplatnění nachází při měření vibrací na kluzných ložiscích, kde nelze z důvodu tlumení vibrací mazivem měřit chvění konvenčními způsoby. Pod úhlem 90° se k rotujícímu hřídeli umístí dva snímače výchylky. Z naměřených průběhů výchylek lze určit dráhu tzv. orbitu a také maximální výchylku, jenž se porovnává s předpisy v normách. Princip je znázorněn na obr. 20.[8]



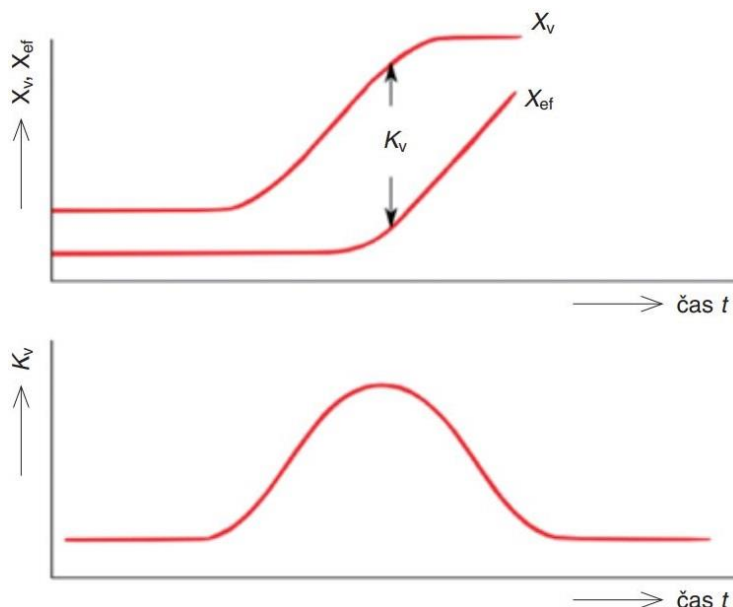
Obr. 20 – Stanovení orbity rotujícího hřídele (s_1, s_2 - složky výchylky snímačů $S1, S2$; K - kinematická dráha hřídele) [8]

Činitel výkmitu (Crest factor)

Metoda činitele výkmitu je velmi rychlá a levná, ale nepřesná v určování stupně poškození a nevhodná při parazitních rázech. Činitel výkmitu K_v je podíl výkmitu a efektivní hodnoty amplitudy:

$$K_V = \frac{X_V}{X_{ef}} \quad (17)$$

Opakující se vibrační ráz lze získat s dostatečnou rozlišitelností z výkmitu. Narůstající četnost rázů i jejich výkmitů je znamením zhoršujícího se technického stavu zařízení. [8]



Obr. 21 – Význam činitele výkmitu K_V [8]

3.6 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza lokalizuje vznikající poruchy jednotlivých částí stroje a při správném užití odstraňuje nedostatky analýzy v časové oblasti. Fázové a amplitudové spektrum signálu se získá úplnou kmitočtovou analýzou. Základ frekvenční analýzy je Fourierova transformace, přičemž vlastní analýza se získá rozkladem do Fourierovy řady. Ve vibrační diagnostice se uplatňují analyzátoři různých typů a to provozní nebo laboratorní, jedno nebo vícekanalové. Princip činnosti těchto analyzátorů je stejný. [2][8]

3.6.1 Fourierova řada periodické funkce

Z předpokladu že jakákoliv opakující se funkce $f(t)$ o periodě T může být vyjádřena součtem harmonických funkcí (sinus, kosinus), kde kmitočet těchto funkcí je násobkem základní frekvence (určené periodou signálu), lze psát Fourierovu řadu periodické funkce jako: [2][3][8]

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right] \quad (18)$$

kde koeficient a_0 je stejnosměrná složka:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (19)$$

koeficienty a_n a b_n jsou spektrální čili Fourierovy koeficienty funkce $f(t)$, n je řád harmonické, T je perioda signálu:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (20)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt \quad (21)$$

Fourierovy koeficienty jsou často zobrazovány ve tvaru amplitudy harmonické složky A_n s fázovým úhlem φ_n :

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (22)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{b_n}{a_n} \quad (23)$$

poté lze psát Fourierovu řadu ve spektrálním tvaru:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t}{T} + \varphi_n\right) \quad (24)$$

Fourierova transformace spojitého signálu $x(t)$ se definuje jako:

$$\mathcal{F}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi f t} dt \quad (25)$$

zpětná transformace je poté jako:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f) \cdot e^{j2\pi f t} df \quad (26)$$

kde j je imaginární jednotka a f náleží frekvenci. Někdy bývá ve vzorcích uvedena úhlová frekvence ω místo kmitočtu f . Uplatnění nachází tato transformace u spojitých neperiodických signálů, kde poskytuje neperiodické spojité spektrum $\mathcal{F}(f)$, které je často komplexní:

$$\mathcal{F}(f) = \operatorname{Re}(f) + j\operatorname{Im}(f) = |\mathcal{F}(f)|e^{j\varphi(f)} \quad (26)$$

kde $|\mathcal{F}(f)|$ bývá značeno amplitudové spektrum či amplitudová spektrální hustota a $\varphi(f)$ jako fázové spektrum. [2][3]

3.6.2 Fourierova transformace časově diskrétního signálu DTFT (Discrete Time Fourier Transform)

Součtem konečného počtu harmonických funkcí rozdílných kmitočtů lze vytvořit spojitě periodické signály. Spektrum takovýchto signálů má poté diskrétní (čárový) charakter odpovídající vyjádření signálu pomocí Fourierovy řady. Fourierova transformace diskrétních signálů je definována jako: [2]

$$\mathcal{F}(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j2\pi f n} \quad (27)$$

inverzní transformace poté:

$$x(n) = \int_{-\frac{f_{vz}}{2}}^{\frac{f_{vz}}{2}} \mathcal{F}(f) \cdot e^{j2\pi f n} df \quad (28)$$

3.6.3 Diskrétní Fourierova transformace DFT (Discrete Fourier Transform)

Uplatňuje se v případě počítačového zpracování signálu. Signál se transformuje z časové do frekvenční oblasti. Měřený signál $f(t)$ je vzorkován vzorkovací frekvencí f_{vz} v analogově-číslicovém převodníku. Získá se tedy z navzorkovaného diskrétního signálu diskrétní spektrum signálu. DFT pracuje s konečnými postoupnostmi v časové i kmitočtové oblasti a je definována vztahy:

$$\mathcal{F}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (29)$$

kde $k = 0, 1, \dots, N-1$, pro přímou transformaci a pro zpětnou transformaci platí vztah:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathcal{F}(k) \cdot e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (30)$$

kde $n = 0, 1, \dots, N-1$. Diskrétní Fourierova transformace získá pro N hodnot signálu N hodnot spektra rozložených ve frekvenci počínající nulou a vzdálených o frekvenci:

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (31)$$

kde NT je celková délka signálu v čase a T je časový interval mezi vzorky. Množina těchto kmitočtů se označována jako DFT mřížka (DFT grid) a rozestup frekvencí výsledného diskrétního spektra Δf se nazývá frekvenční bin.

Dále se můžeme setkat na vodorovné ose spektra s užitím úhlové frekvence ω nebo normovou kruhovou frekvencí θ namísto kmitočtu f . Normová kruhové frekvence má jednotku rad a je dána vztahem:

$$\theta = \frac{\omega}{f_{vz}} = \frac{2\pi f}{f_{vz}} \quad (32)$$

Kvůli periodičnosti spektra lze výsledek diskrétní Fourierovy transformace považovat za dvoustranné (oboustranné) spektrum. Stejnoseměrná hodnota $\mathcal{F}(0)$ je pak zde v levém a pravém spektru. Pravostranné spektrum:

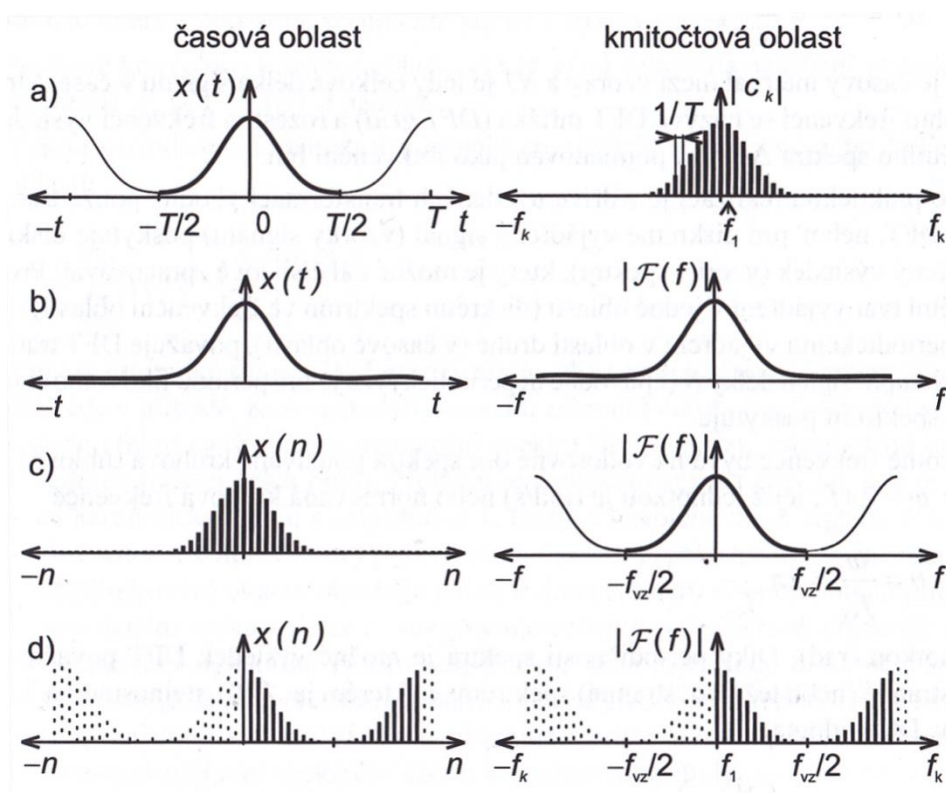
$$\mathcal{F}(1), \dots, \mathcal{F}\left(\frac{N}{2} - 1\right) \quad (32)$$

levostranné spektrum:

$$\mathcal{F}\left(\frac{N}{2}\right), \dots, \mathcal{F}(N) \quad (32)$$

Při práci s reálnými signály stačí pracovat pouze s pravostranným spektrem, neboť je pravostranné a levostranné spektrum komplexně sdružené. Neplatí to však při práci s komplexními signály, jelikož zde je nutné pracovat s oběma polovinami spektra.

V praxi je DFT nejvhodnější, protože pro vzorky signálu poskytuje vzorky spektra, které je dále možno číslicově zpracovávat. Diskrétní Fourierova transformace se dívá na vstupní signál o délce N , jehož spektrum poskytuje, jako na jednu periodu fiktivního signálu. Výše zmíněné je umožněné díky tomu, že diskrétní tvar vyjádření v jedné oblasti (diskrétní spektrum ve frekvenční oblasti) odpovídá periodickému vyjádření v druhé oblasti (časové). [2]



Obr. 22 – Vztahy mezi časovou a frekvenční oblastí: a) Fourierova řada periodického signálu, b) Fourierova transformace spojitého signálu, c) Fourierova transformace diskrétního signálu, d) +Diskrétní Fourierova transformace [2]

Na obr. 22 můžeme vidět závislosti mezi frekvenční a časovou oblastí Fourierovy řady a transformací.

3.6.4 Rychlá Fourierova transformace FFT (Fast Fourier Transform)

Dle vzorce (29) pro záznam o délce N je patrné, že k výpočtu všech koeficientů $\mathcal{F}(k)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, je zapotřebí N^2 sčítání a N^2 násobení komplexních čísel. Pro výpočet se užívá různých algoritmů. Jako první objevili metodu výrazného zrychlení výpočtu američtí matematikové Cooley a Tukey, pro kterou se vžil název rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform). Algoritmus vytvořený touto dvojicí matematiků je nazýván algoritmem decimování v čase (algoritmus DIT). Podstata metody FFT spočívá ve zvolené délce záznamu

$N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Dostáváme tedy např. délky záznamů $N = 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192$, jenž jsou velmi podobné dekadické řadě. [2][9]

3.6.5 Okna Fourierovy transformace

Je-li vstupní signál Fourierovy transformace chápán jako periodické prodloužení měřené části signálu, tak poté v okamžiku kdy se nezdaří do měřeného úseku zahrnout celistvý počet period signálu, nastává chyba zvaná rozmazání spektra či únik (leakage).

Zamezení vzniku chyby únikem docílíme použitím vhodného váhového okna. Jedná se o úpravu signálu před výpočtem Fourierovy transformace, která minimalizuje nespojitosti vzniklé na začátku a konci signálu. Signál se vynásobí vhodnou funkcí, tzv. oknem, jenž zapříčiní potlačení signálu na jeho začátku a konci k nule. [2][3][9]

Obdélníkové okno (rectangular window)

Používá se pro analýzu frekvenčně blízkých spektrálních složek s malým rozdílem amplitud (obr. 23). Obdélníkové okno násobí celý signál jedničkou a je tedy ekvivalentem výpočtu Fourierovy transformace bez úpravy signálu před vlastním výpočtem. [2]

Hammingovo okno

Zvyšuje stabilitu výpočtu potlačením vzorků signálu na jeho počátku a konci. Důležitá vlastnost je potlačení tzv. postraních laloků ve spektru. Časový průběh Hammingova okna spolu s dalšími můžeme vidět na obr. 24 a vztah pro jeho určení je dán: [2]

$$w(k) = 0,54 - 0,46 \cos\left(2\pi \frac{k-1}{n-1}\right) \quad (33)$$

kde $k = 1, \dots, N$

Flat-top okno

Je navrženo k maximálně přesnému odečtu amplitudy. Největší váhu obr. 23 má signál uprostřed záznamu, zatímco na začátku a konci je váha signálu záporná. Flat-top okno je užíváno pro kalibraci snímačů. Vztah kterým lze vyjádřit Flat-top okno: [2][9]

$$\begin{aligned} w(k) = & 1 - 1,93 \cos\left(\frac{2\pi k}{T}\right) \\ & + 1,29 \cos\left(\frac{4\pi k}{T}\right) + 0,388 \cos\left(\frac{6\pi k}{T}\right) \\ & + 0,0322 \cos\left(\frac{8\pi k}{T}\right) \end{aligned} \quad (34)$$

pro $k = 0, \dots, T$

Blackman-Harris okno

Okno s maximálním potlačením postraních laloků. Vhodné pro analýzu amplitudově rozdílných a kmitočtově vzdálených složek. Varianta vzorce pro vyjádření Blackman-Harris okna: [2]

$$w(k) = a_0 - a_1 \cos\left(2\pi \frac{k-1}{n-1}\right) + a_2 \cos\left(4\pi \frac{k-1}{n-1}\right) - a_3 \cos\left(6\pi \frac{k-1}{n-1}\right) \quad (35)$$

pro $k = 0, \dots, N$ a $a_0 = 0,35875$, $a_1 = 0,48829$, $a_2 = 0,14128$ a $a_3 = 0,01168$.

Exponenciální okno

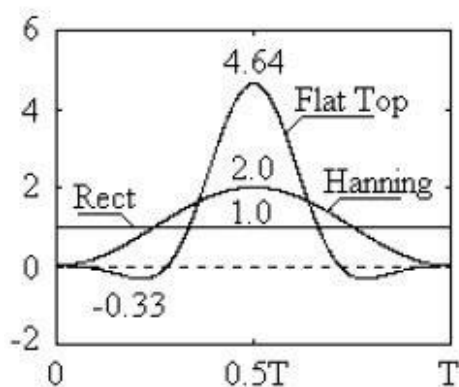
Ztlumuje amplitudu signálu v čase do nuly. Exponenciální okno je užíváno při analýze dlouhotrvajících přechodových jevů. [2]

Hannovo okno (též zvané Hanningovo okno)

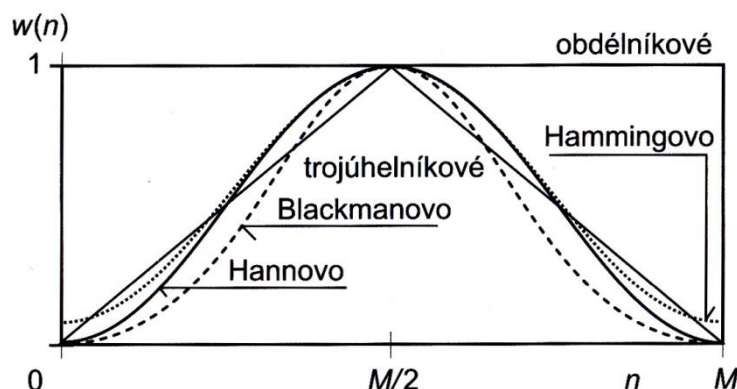
V praxi hojně používané okno velmi podobné Flap-top, avšak váha signálu na začátku a konci není záporná a uprostřed je váha signálu menší (obr. 23). Vzťah pro Hannovo okno: [2][9]

$$w(k) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{T}\right) \quad (36)$$

pro $k = 0, \dots, T$



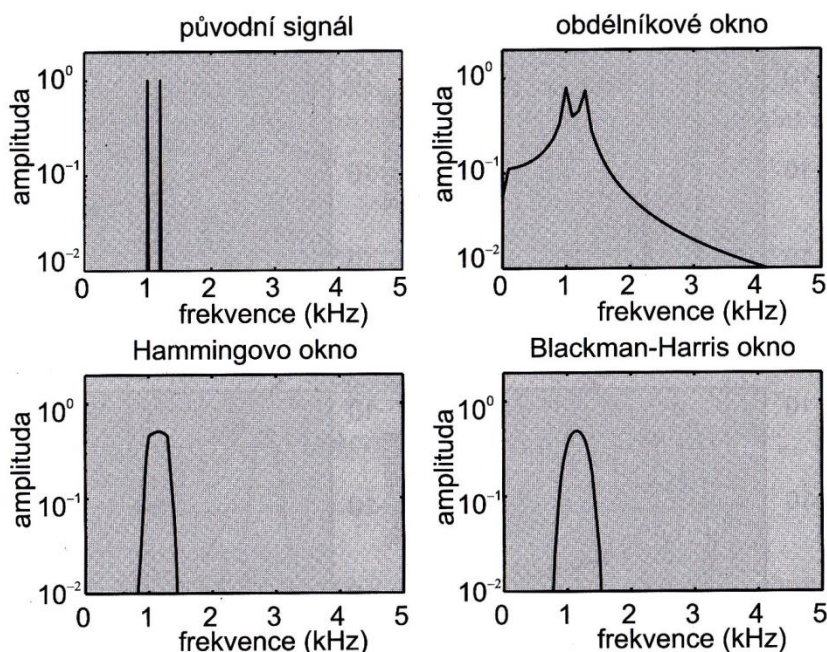
Obr. 23 – Váhy signálu časových oken pro měření spektra [9]



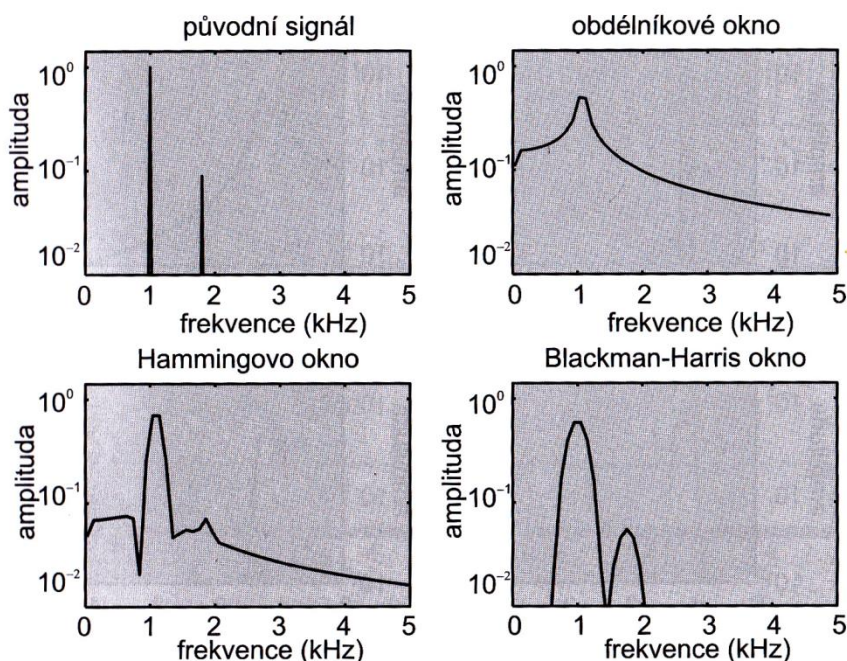
Obr. 24 – Časové průběhy různých oken [2]

Důležitost výběru správného okna je znázorněna na obr. 25 a obr. 26, kde na obrázku 25 je vhodné požit pro analýzu kmitočtově blízkých spektrálních složek s nepatrným rozdílem amplitud okno obdélníkové. Při užití jiného okna než obdélníkového

dojde k rozmazání spektra, takže nejsme schopni rozlišit obě složky. Naopak pro amplitudově rozdílné a dostatečně kmitočtově vzdálené složky je vhodné okno s dostatečným potlačením (obr. 26), díky čemu je možné identifikovat slabší složku spektra. [2]



Obr. 25 – Analýza frekvenčně blízkých složek (původní signál obsahuje dva sinusové průběhy 1 kHz a 1,2kHz) [2]



Obr. 26 – Analýza amplitudově rozdílných a frekvenčně vzdálených složek (původní signál obsahuje dva sinusové průběhy 1 kHz a 1,8kHz s rozdílem amplitud 40 dB) [2]

3.6.6 Výkonová spektrální hustota

Rozdělení výkonu signálu v závislosti na frekvenci charakterizuje výkonová spektrální hustota signálu (Power Spectral Density, PSD). Jde o limitu podílu výkonu daného určitým intervalem kmitočtů k délce tohoto intervalu, je-li jeho délka blízká nule. Jednotkou výkonové spektrální hustoty je $W \cdot Hz^{-1}$ nebo $V^2 \cdot Hz^{-1}$.

V praxi se využívají dvě varianty PSD a to jednostranná výkonová spektrální hustota, jenž je definována pouze pro kladné kmitočty, nebo dvoustranná výkonová spektrální hustota, která je definována pro celé frekvenční pásmo. Spektrální analyzátory nejčastěji využívají jednostrannou PSD. Metody určení PSD se dají rozdělit do tří oblastí. [2]

Metody neparametrické

Tyto metody odhadují výkonovou spektrální hustotu přímo ze signálu. Využívá se periodogram nebo Welschova metoda. [2]

Metody parametrické

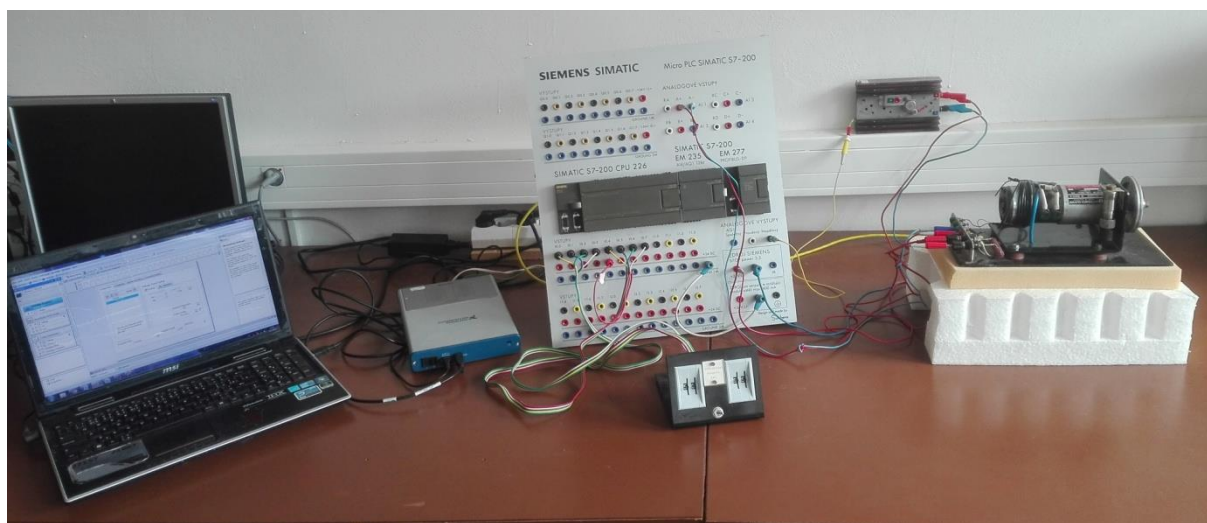
Odhadují PSD přímo za pomoci určování parametrů lineárního bílého šumu buzeného systému, jenž modeluje daný signál. Parametrické metody obvykle poskytují lepší odhad při práci s krátkými záznamy signálů, než metody neparametrické. Používají se autoregresní metody a Burgův algoritmus. [2]

Metody odhadující PSD pomocí určování vlastních čísel korelační matice

Zmíněné metody poskytují velmi dobré výsledky pro signály s čárovými spektry a fungují i případech signálu pod úrovní šumu. Velmi rozšířená je metoda MUSIC (Multiple Signal Classification). [2]

4 LABORATORNÍ ÚLOHA

Stejnoseměrný motorek PIVT 6-25/3A od Bulharské společnosti DYNAMO Sliven, je základním prvkem celé laboratorní úlohy. Otáčky motoru jsou regulovány programovatelným logickým automatem SIMATIC S7-200 od firmy SIEMENS. Vibrace jsou snímány akcelerometrem 784A od společnosti WILCOXON a následně zpracovány měřicí kartou NI USB-6341 od společnosti NATIONAL INSTRUMENTS. Pracoviště laboratorní úlohy je vyfotografováno na obrázku 27.



Obr. 27 – Pracoviště laboratorní úlohy

4.1 Panel SIEMENS SIMATIC

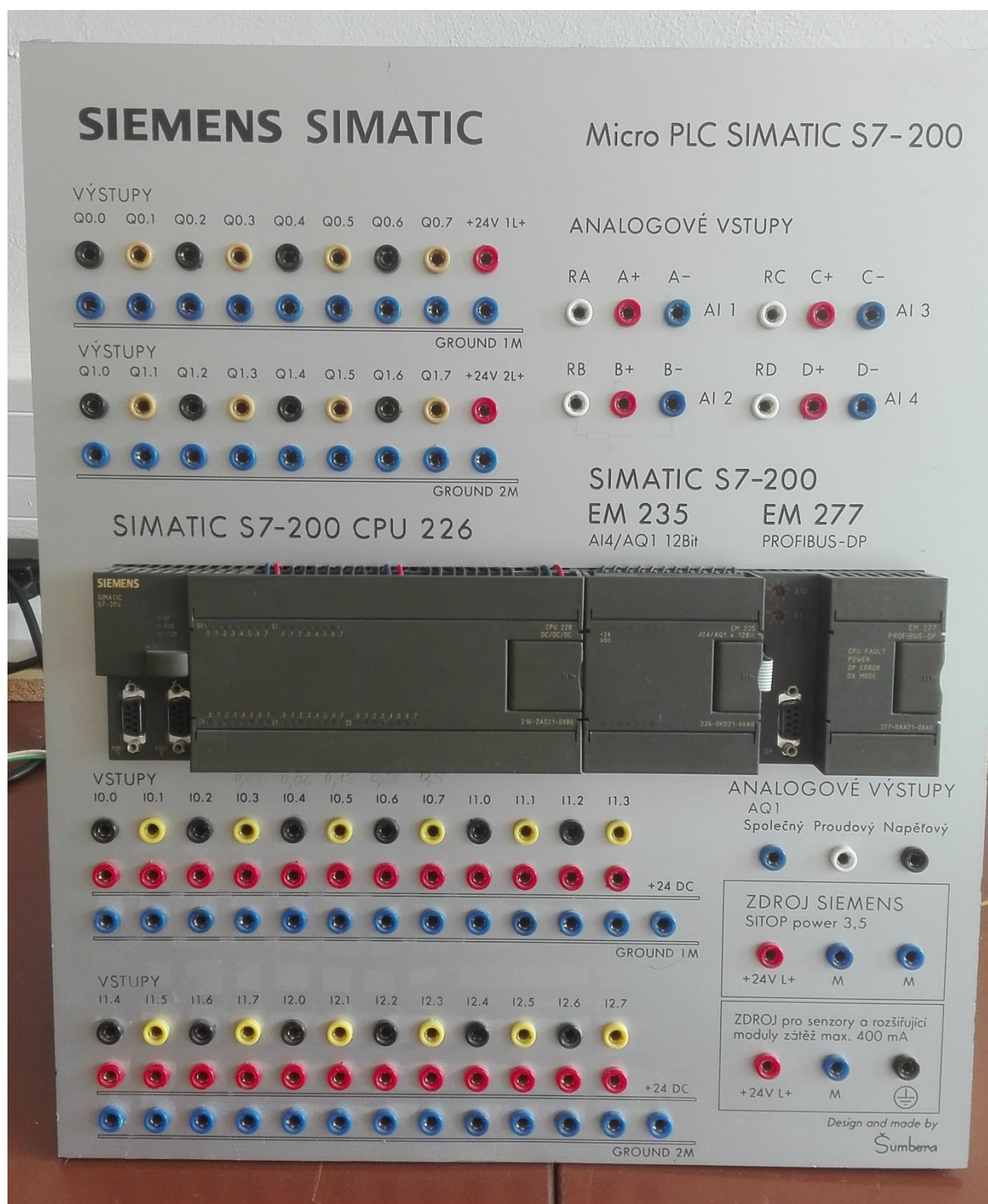
Panel je jednou z hlavních částí laboratorní úlohy. Obsahuje programovatelný automat SIMATIC S7 - 200 s procesorem CPU 226, rozšiřující jednotku analogových vstupů a výstupů EM 235 a rozšiřující modul EM 277 PROFIBUS-DP. Dále je v panelu umístěn obvod vyhodnocování chvění pro snímač zrychlení 784A. V neposlední řadě panel SIMATIC obsahuje zdířky pro snadné připojení vstupů a výstupů k práci s programovatelným automatem a jeho rozšiřujícími jednotkami. Panel je vyfocen na obrázku 28.

4.1.1 SIMATIC S7-200, EM 235, EM 277

Programovatelný automat SIMATIC se spolu s rozšiřujícími moduly používá v laboratorní ukázce k regulaci otáček stejnosměrného motorku PIVT 6-25/3A. Pro zadání požadované hodnoty otáček je na vstupy panelu SIEMENS SIMATIC připojen panel s číslicovými přepínači (obr. 29) na vstupy I0.0 až I0.7 a napájením na vstup + 24 DC. Požadované hodnoty lze zadávat v procentech a to v rozmezí 0 až 99%.

Zpětnou vazbu regulované soustavy programovatelnému automatu je možné zajistit dvěma způsoby. První možností je připojení indukčního snímače otáček, který snímá okamžitou hodnotu otáček motoru. Konkrétně se jedná o bezkontaktní indukční snímač otáček IE 5222 IEA 2001 - FROG od německé firmy EFECTOR. Umístění snímače na konstrukci laboratorního motorku je možno vidět na obrázku 30. Druhá možnost, která je

i použita, využívá výstupů tachodynamu stejnosměrného motorku PIVT 6-25/3A. Tachodynamo je připojeno na analogové vstupy A+ a A- panelu SIEMENS SIMATIC.



Obr. 28 – Panel SIEMENS SIMATIC



Obr. 29 – Panel s číslicovými přepínači


 Obr. 30 – Indukční snímač otáček IE
5222 IEA 2001 - FROG

Pro převod požadované hodnoty PH [%] na frekvenci otáček f_{ot} [Hz] a periodu otáček T_{ot} [ms] jsou měřením na tachodynamu zjištěny následující převodové vztahy:

$$f_{ot} = 0,4802 \cdot PH \quad (37)$$

$$T_{ot} = \frac{2082}{PH} \quad (38)$$

4.1.2 Obvod vyhodnocení vibrací akcelerometru 784A

Signál z akcelerometru (100 mV/g) je v elektronickém obvodu desetkrát zesílen a integrován. Tímto jsou dány cejchovní vztahy:

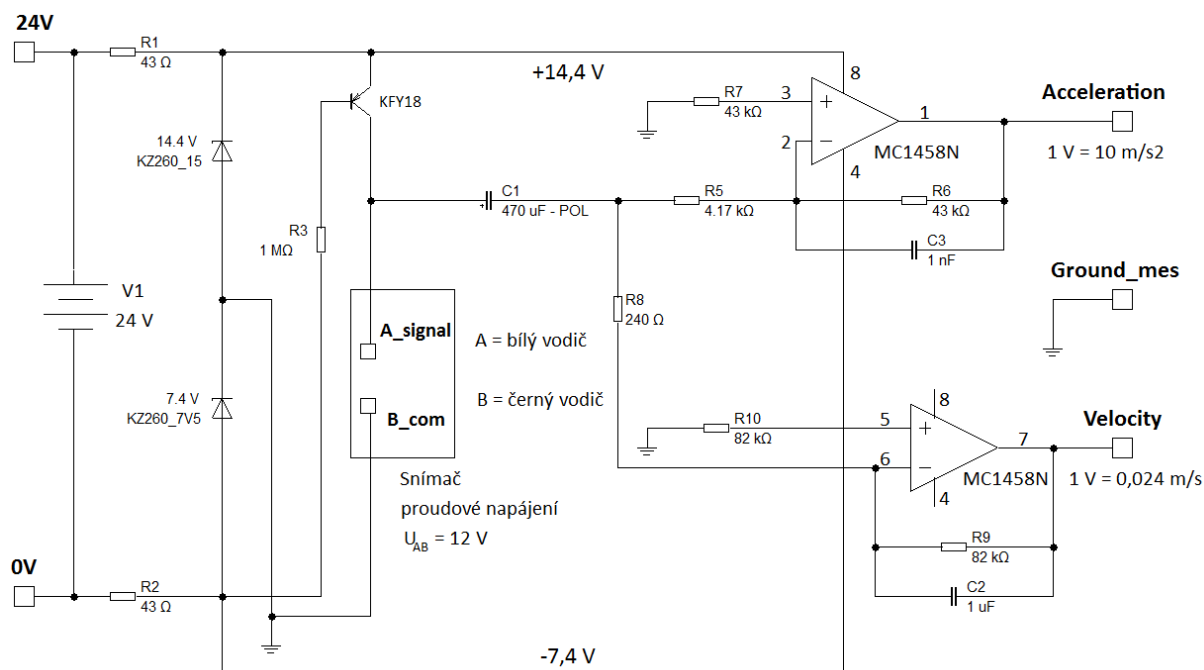
$$U_{acc}: 1 V = 10 m/s^2 \quad (39)$$

$$U_{vel}: 1 V = 0,024 m/s \quad (40)$$

Výstupy zrychlení (Acceleration) i rychlosti (Velocity) z elektronického obvodu se asymetricky připojují do měřicí karty NI USB-6341. Schéma obvodu je na obrázku 32 a vlastní obvod, nacházející se na zadní straně panelu SIEMENS SIMATIC, respektive jeho výstupy jsou vyfoceny na obrázku 31.



Obr. 31– Vstup a výstupy obvodu vyhodnocování vibrací



Obr. 32 – Schéma obvodu pro vyhodnocení vibrací akcelerometru 784A

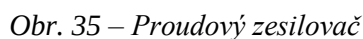
4.2 DC motorek DYNAMO SLIVEN PIVT 6-25/3A

Stejnoseměrné motory řady PIVT byly určeny pro pohon magnetických pásů, kovových řezacích strojů, průmyslových robotů a pro mnoho dalších aplikací. Buzení motoru je obstaráno permanentními feritovými magnety. Hřídele jsou vyrobeny z nerezové oceli a obsahují přesná kuličková ložiska. [10]

Napájení pohodu je zprostředkováno přes panel SIEMENS SIMATIC. Motorek je připojen na výstupy ZDROJ SIEMENS SITOP power 3,5 a napěťový analogový výstup. Tento napěťový výstup je k motorku připojen přes proudový zesilovač 20 mA / 2 A (obr. 35). Motorek můžeme vidět na obrázku 33 spolu s rozměry na obrázku 34. Parametry motoru jsou vypsány v následující tabulce:

Tabulka 1 – Parametry motorku PIVT 6-25-3A [10]

Model	PIVT 6-25/3A ON 0969379 -78
Jmenovité napájecí napětí	30 V
Točivý moment	0,1 Nm
Tachodynamo	3 V / 1000 min ⁻¹
Otáčky při maximálním točivém momentu	3000 min ⁻¹
Proud při maximálním točivém momentu	4,5 A
Výkon	30 W
Hmotnost	1,6 kg



National Instruments Corporation je celosvětová společnost sídlící v americkém Astinu, která již po několik desetiletí hraje zásadní roli v určování způsobu, jakým vědci a technici přistupují k měření a automatizaci.

45

analogovou, digitální a počítač/časovací funkcionalitu do jednoho zařízení. To je předurčuje k velké škále pracovních aplikací od základního záznamu dat po řízení a automatizaci.

Karta NI USB-6341 společně s celou sérií X benefituje z časovací a synchronizační technologie NI-STC3. NI-STC3 zahrnuje pokročilé časovací funkce, zahrnující nezávislé analogové a digitální časovací zařízení, znovu spustitelné měřicí úlohy a čtyři čítače/časovače. Měřicí karta dále obsahuje NI Signal Streaming, což je technologie používající instrukce založené na zprávách a zpravodajství na straně zařízení, které umožňují vysokorychlostní obousměrný přenos dat přes USB. Schéma znázorňující funkci popsaných technologií můžeme vidět na obrázku 37.

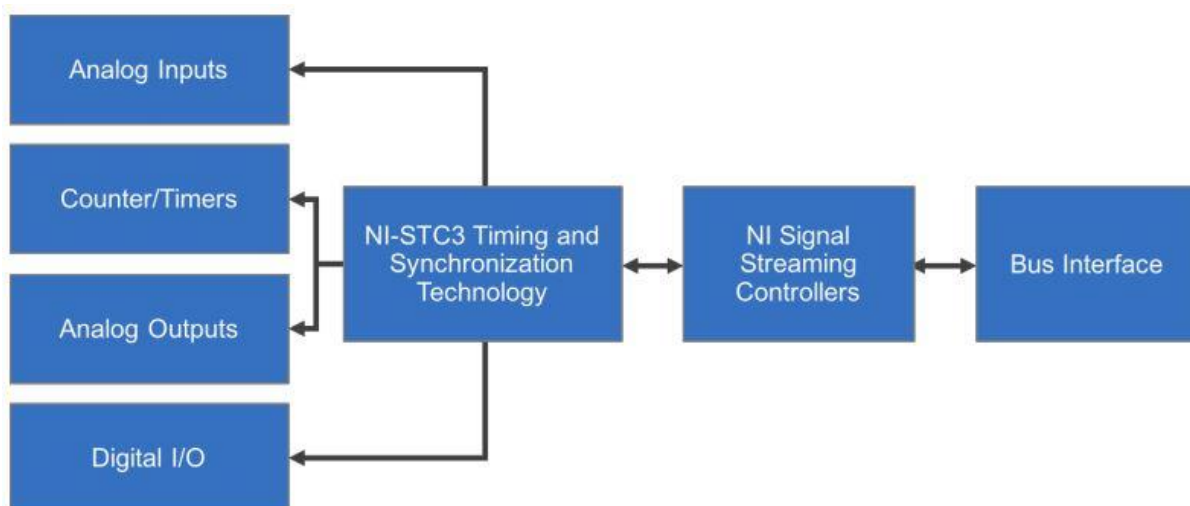
Měřicí karta NI USB-6341, kterou můžeme vidět na obrázku 36, je navržena pro práci s operačním systémem Windows, umožňuje měřit napětí a kmitočet. Napájena je externě přes USB. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 2. [11][12][13][14][17]

Tabulka 2 – Parametry karty NI USB-6341 [12][17]

Analogové vstupy		Digitální I/O	
Kanály	16 , 8	Obousměrné kanály	24
Jednopolové kanály	16	Maximální rychlost hodin	1 MHz
Diferenciální kanály	8	Logická úroveň	TTL
Rozlišení	16 bits	Maximální rozsah vstupu	0 V , 5 V
Vzorkovací rychlost	500 kS/s	Maximální rozsah výstupu	0 V , 5 V
Počet rozsahů	4 (0,2-1-5-10V)	Čítače/časovače	4
Analogové výstupy		Maximální rozsah	0 V , 5 V
Kanály	2	Maximální zdrojová frekvence	100 MHz
Rozlišení	16 bits	Rozlišení	32 bits
Obnovovací doba	900 kS/s	Logická úroveň	TTL

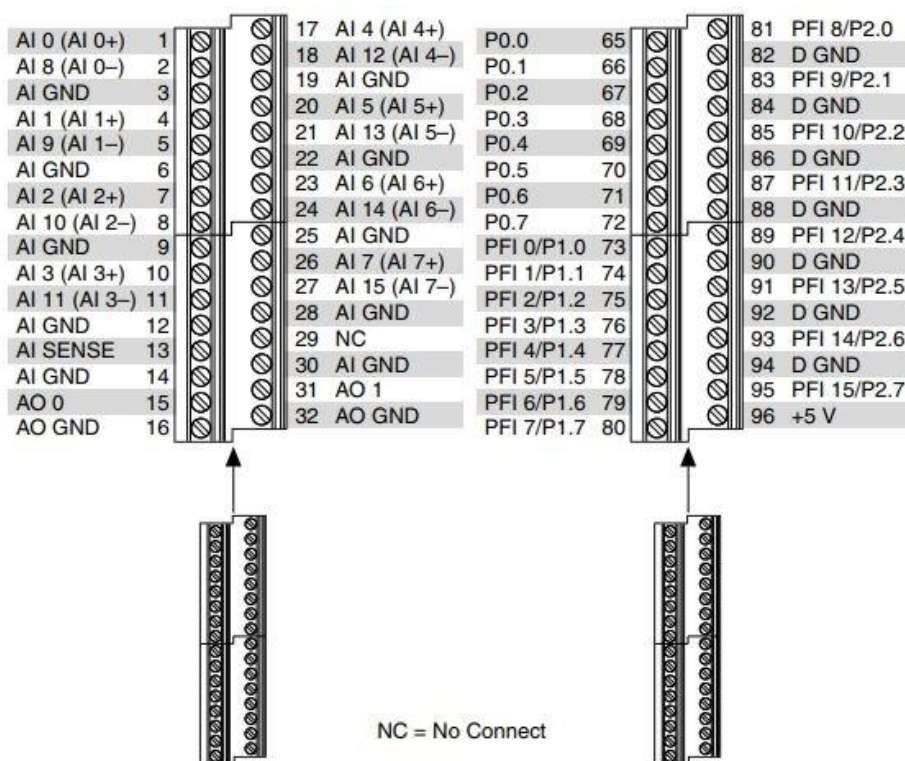


Obr. 36 – Měřicí karta NI USB-6341



Obr. 37 – Schéma popisující funkci technologie NI-STC3 [11]

Výstupy z obvodu vyhodnocování chvění jsou připojeny na analogové vstupy měřicí karty AI 0 a AI GND. Schéma vstupních pinů karty je zobrazeno na obrázku 38.



Obr. 38 – Šroubovací piny karty USB-6341 [17]

4.4 Akcelerometr 784A

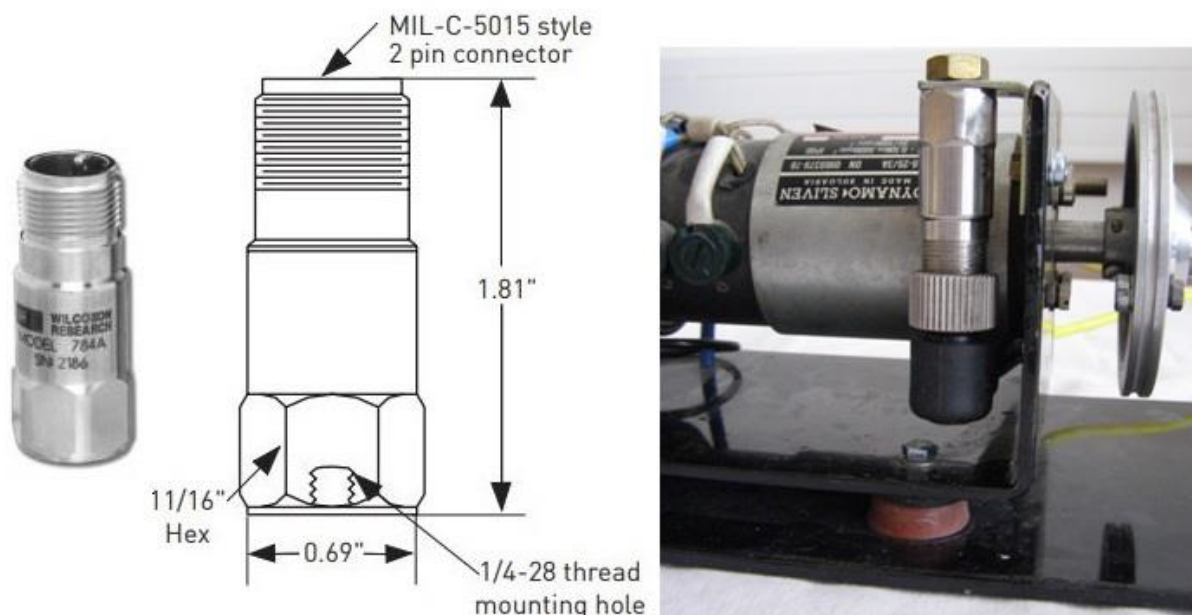
Akcelerometr je od společnosti Wilcoxon SENSICG TECHNOLOGIES, která vyvíjí a prodává senzory pro snímání vibrací v mnoha průmyslových odvětvích včetně armádních.

784A je piezoelektrický akcelerometr ze série General Purpose Accelerometers, která je určena pro měření vibrací v široké škále frekvencí pro monitorování většiny průmyslových strojů. [15]

Vlastní akcelerometr můžeme vidět na obrázku 39 a jeho vlastnosti v následující tabulce:

Tabulka 3 – Vlastnosti akcelerometru 784A [16]

Dynamické vlastnosti		Elektrické vlastnosti	
Sensitivita 25°C	100 mV/g	Napájecí napětí	18 - 30 VDC
Rozsah	max 50 g	Proudová regulační dioda	2 - 10 mA
Frekvenční odezva $\pm 10\%$	4 - 7000 Hz	Maximální impedance výstupu	100 Ω
Frekvenční odezva ± 3 dB	2 - 10000 Hz	Bias výstupní napětí	12 VDC
Rezonanční frekvence	25 kHz	Zemnění	izolované pouzdro
Vlastnosti prostředí		Fyzikální vlastnosti	
Teplotní rozsah	-50 až 120°C	Konstrukce	PTZ ceramic/flexure
Vibrační limit	500 g	Váha	45 gramů
Utěsnění	hermetické	Doporučená kabeláž	J10 / J9T2A

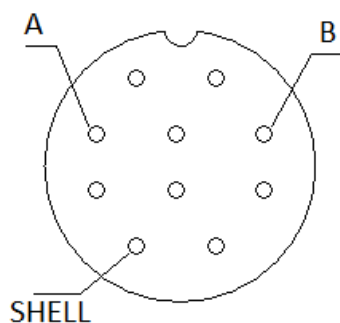


Obr. 39 – Akcelerometr 784A (vzhled, rozměry, upevnění) [16]

Na obrázku 39 vpravo lze vidět upevnění snímače zrychlení 784A ke konstrukci laboratorního motorku. Jak je ze snímku patrné, akcelerometr snímá vibrace ve vertikálním směru. Signál z akcelerometru je přiveden do obvodu vyhodnocování vibrací pomocí speciálního kabelu s ruskými vojenskými koncovými konektory PC10TB. Konektory jsou deseti pinové kde zapojení pinů snímače 784A se nachází v tabulce 4.

Tabulka 4 – Piny a jejich funkce snímače zrychlení 784A

Pin konektoru	Funkce	Barva vodiče v kabelu
Shell	ground	zelená (stínění)
A	power/signal	bílá
B	common	černá



Obr. 40 – Konektor PC10TB (pohled na samce)

Na obrázku 40 je zobrazen pohled na samce, ze strany přípojů, konektoru PC10TB s označením pinů. Připojení konektoru do obvodu vyhodnocování chvění můžeme vidět v podkapitole 4.1.2 na obrázku 31 a obrázku 32.

5 MĚŘENÍ A ANALÝZA DC MOTORKU

Vlastní měření byla realizována pro čtyři různé uložení (obr.41-44) laboratorního motorku. Pro každou podložku byla měřena rychlost i zrychlení vibrací pohonu v rozmezí 10% až 99% požadované hodnoty otáček. Při otáčkách menších než 10% nastává problém v oblasti regulace, protože regulátor dostává informace o skutečných otáčkách z indukčního snímače v příliš velkých intervalech. Problém zůstává i při zapojení tachodynamu.

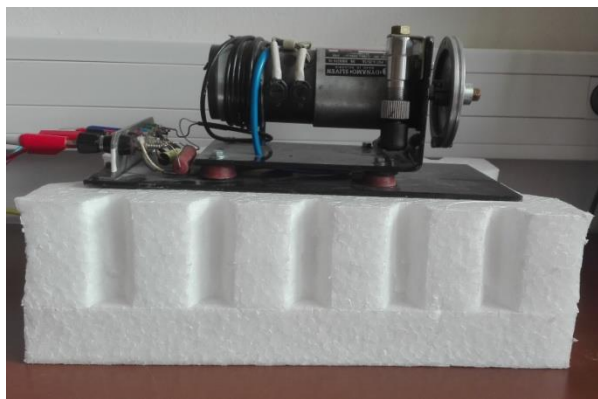
Data z měření byla získána pomocí softwarů od společnosti National Instruments, konkrétně Measurement & Automation Explorer (MAX) a NI SignalExpres 2013. Následně byla data importována do prostředí Microsoft Office Excel, kde byla upravena pro vyhodnocení v programu MATLAB a Simulink. V prostředí NI SignalExpres bylo využito možnosti vyhodnocení přímo v daném softwaru.



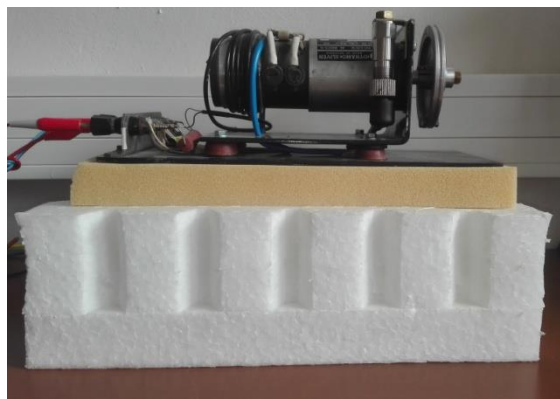
Obr. 41 – Bez podložek



Obr. 42 – Pěnová guma 2,7 cm



Obr. 43 – Pěnový polystyrén 10,5 cm



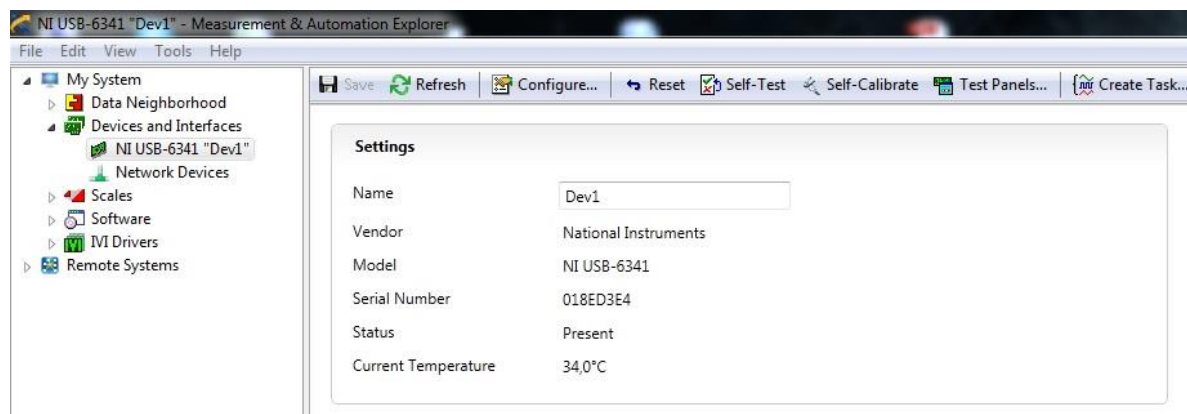
Obr. 44 – Kombinace obou podložek

5.1 Measurement & Automation Explorer (MAX)

Software Measurement & Automation Explorer (MAX) zprostředkovává přístup k zařízením a systémům od společnosti National Instruments. Konkrétně MAX umožňuje:

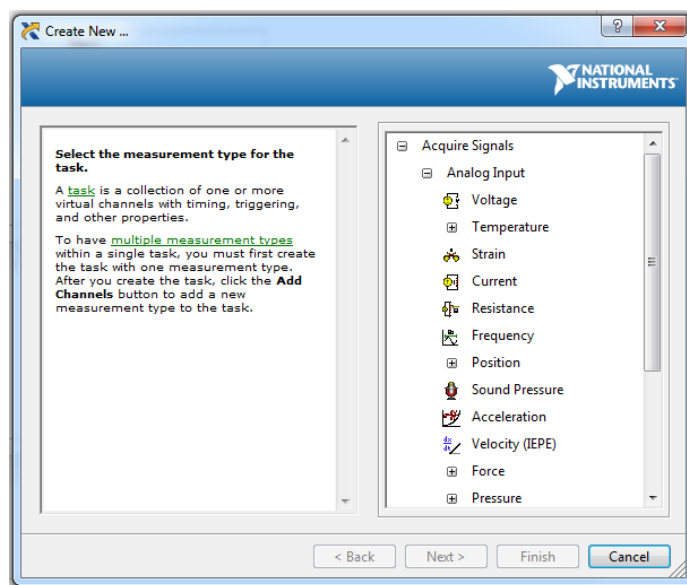
- konfiguraci softwaru a hardwaru od National Instruments
- vytvoření a editaci kanálů, úloh, rozhraní, rozsahu a virtuálních nástrojů
- vykonávání systémových dialogů
- zobrazení připojených zařízení a rozhraní do systému
- update softwaru od National Instruments [18]

Po spuštění MAX a propojení měřicí karty NI USB-6341 s notebookem přes USB program MAX identifikuje měřicí kartu, nakonfiguruje a přidá ji do položky Devices and Interfaces (Obr.45). V záložce Settings jsou zobrazeny základní parametry karty a může zde být zadán název zařízení (defaultně Dev1). Dále se zde nachází záložky Attributes a Device Routes, kde je možné získat informace o driveru a zapojení měřicí karty.



Obr. 45 – Identifikace karty MI USB-6341 v prostředí MAX

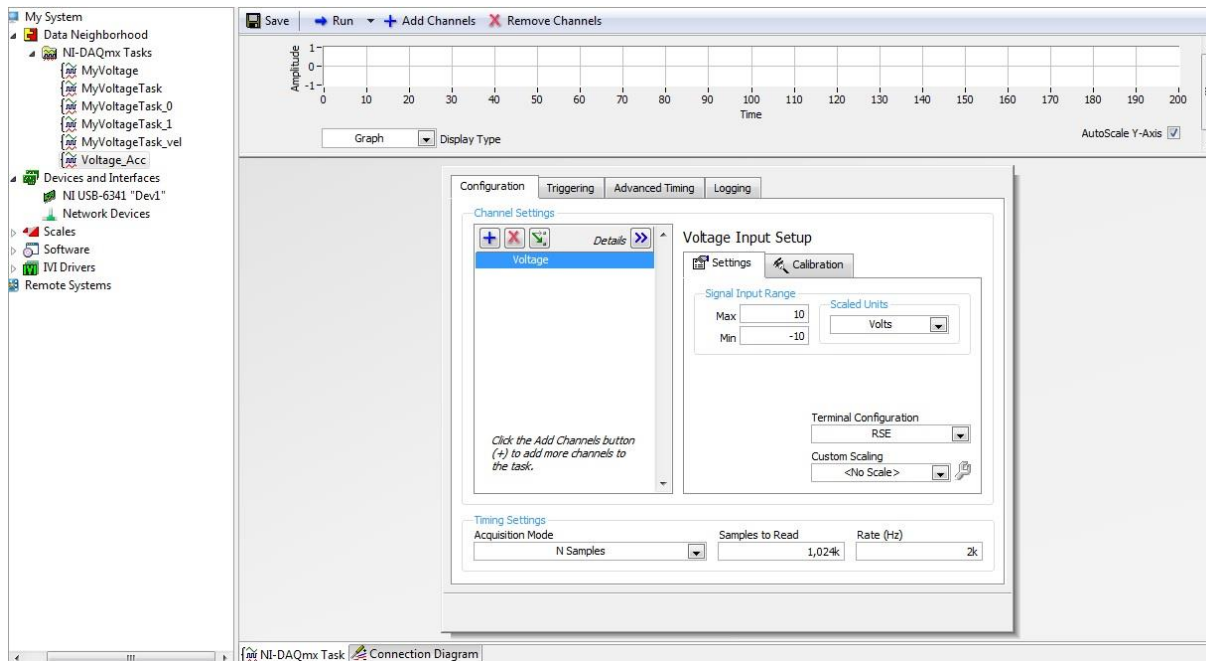
Pro vlastní měření je možné využít ikonku Create Task..., či pravým buttonem myši zmáčknout na kartu NI USB-6341 "Dev1" v záložce Devices and Interfaces. Následně se objeví okno (obr.46), ve kterém je zapotřebí navolit co se bude měřit a na jakém kanálu je zapojen vstup signálu do karty. V mém případě je zvoleno Acquire Signals ⇒ Analog Input ⇒ Voltage a při volbě kanálu, na který je signál z obvodu vyhodnocování vibrací připojen ke kartě, je vybráno ai0. Na závěr je možnost pojmenování úlohy měření. Takto vytvořená úloha je uložena do složky NI-DAQmx Tasks, umístěné v Data Neighborhood.



Obr. 46 –Volba měřené veličiny v prostředí MAX

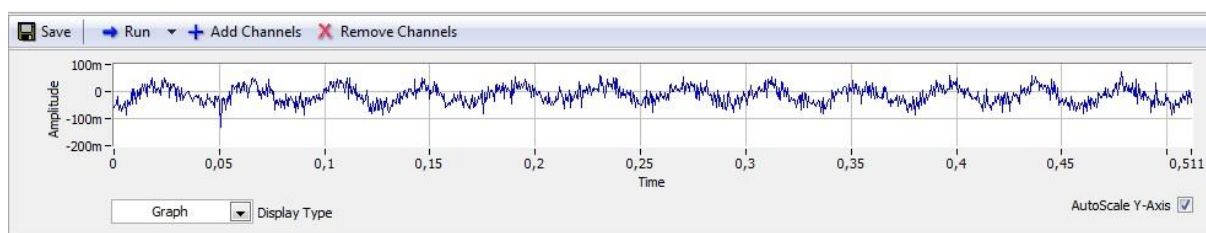
Následně je zobrazeno nové rozhraní, vyfoceno na obrázku 47, kde je možno nakonfigurovat průběh měření. V mém případě je zvolen vstupní rozsah Max 10, Min -10, jednotky Volts a konfigurace terminálu RSE. V časovém nastavení (Timing Settings) je zadáno sejmutí přesně daného počtu vzorků N Samples. Počet vzorků je volen 1024

nebo 2048. Výhoda je v následné práci se signálem, při rychlé Fourierově transformaci (FFT). Vzorkovací frekvence je použita 2000 Hz, což dostačuje k předejití chybě typu Aliasing. K této chybě může dojít v případě, když vzorkovací kmitočet není dostatečně velký v porovnání s maximální frekvencí signálu.



Obr. 47 – Rozhraní pro měření signálu z výstupu obvodu vyhodnocování chvění v programu MAX

Poté co je nastavena požadovaná hodnota otáček motorku, lze získat hodnoty napětí kliknutím na ikonku Run. Následně dojde k sejmutí zadaného počtu vzorků a zobrazení průběhu signálu v grafu (obr.48). Kliknutím pravým tlačítkem na graf je zobrazena možnost importovat data do prostředí Excel. Po provedení exportu se spustí Microsoft Office Excel s importovanými daty ve dvou sloupcích. V prvním sloupci jsou načteny hodnoty času a v druhém hodnoty napětí zrychlení nebo rychlosti vibrací. Získaná data jsou v Excelu dále upravena pro použití v prostředí MATLAB.



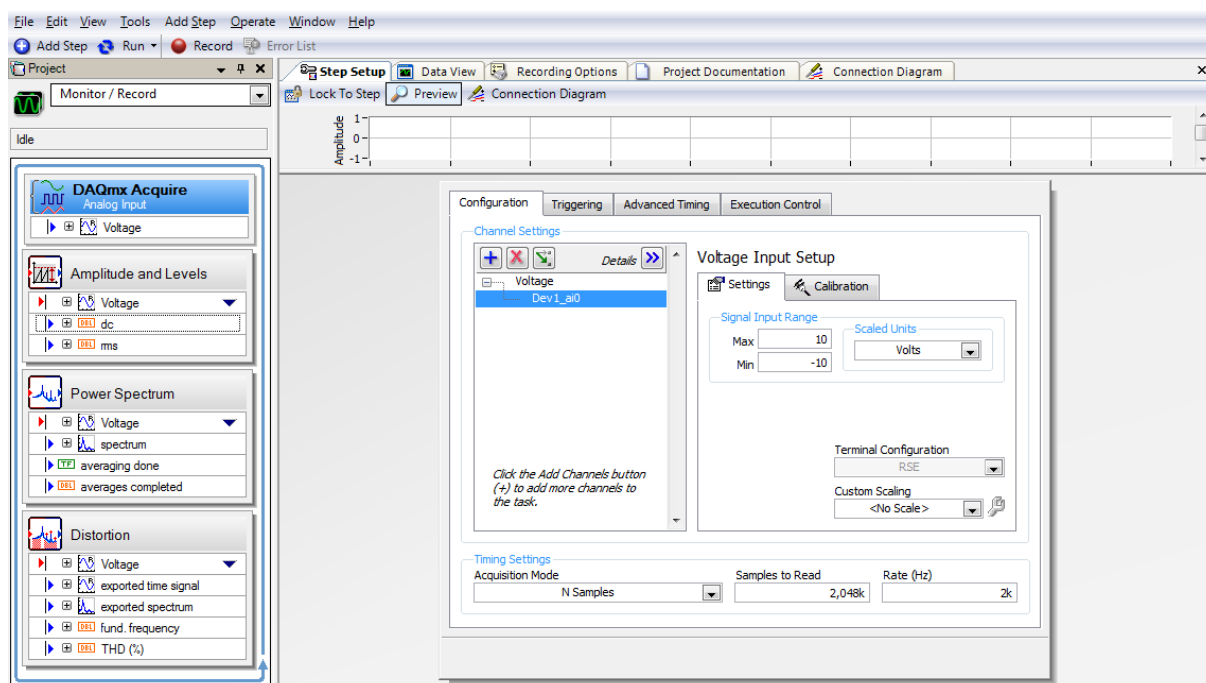
Obr. 48 – Grafické zobrazení signálu v MAX

5.2 NI SignalExpress

Software SignalExpress umožňuje okamžitá interaktivní měření, která nevyžadují programování. Konkrétně je možné signály generovat, získávat, porovnávat, zaznamenávat, importovat a analyzovat. Hlavní výhodou oproti softwaru Measurement & Automation Explorer je možnost analýzy signálu. [19]

Vlastní prostředí SignalExpress je velmi podobné MAX. Po spuštění se objeví okno s možnostmi. Možnost Empty SignalExpress Project vytvoří nový prázdný projekt, ve kterém je zapotřebí nastavit parametry vstupního signálu bez průvodce nastavením. Možnost Data Acquisition Assistant vyvolá totožného průvodce nastavení parametrů měření jako Create Task v prostředí MAX.

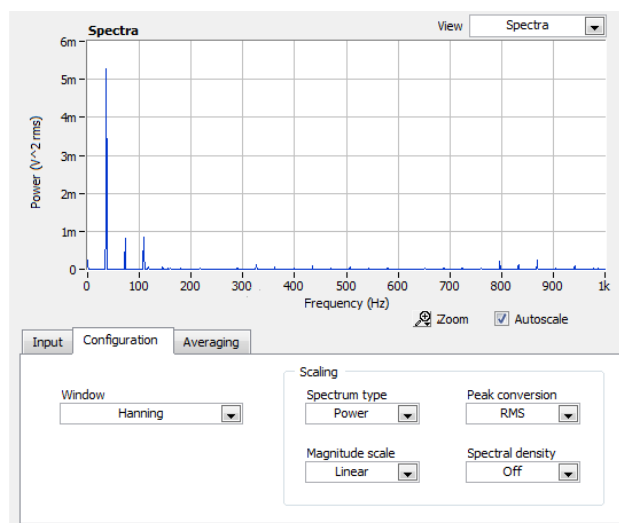
Po výběru jedné z možností se zobrazí téměř totožné rozhraní (obr. 49), jako v programu MAX. Nicméně je možné přidat interaktivní bloky pro práci se signály. Bloky zahrnují výše vypsané možnosti SignalExpress. V mém měření jsou využity funkce bloků pro analýzu signálu. Konkrétně blok z měření v časové oblasti Amplitude and Levels, který ze vstupního signálu určí hodnoty výkmitu, rozkmitu a efektivní hodnotu. Dále jsou použity bloky Power Spectrum a Distortion, určené k měření ve frekvenční oblasti. Distortion zobrazí na jakém kmitočtu se nachází dominantní frekvence ve spektru. O bloku Power Spectrum toho bude více napsáno níže. Nastavení parametrů měření je totožné s MAX.



Obr. 49. – Rozhraní pro měření analýzu signálu v programu SignalExpress

5.2.1 Power Spectrum

Jedná se o blok určený k analýze signálu, pro měření ve frekvenční oblasti. Blok vykreslí spektrum vstupního signálu. Následně lze spektrum editovat v záložce Configuration. Zde je možný výběr okna transformace, konkrétně none (obdelníkové), Hanning, Hamming, Blackman-Harris, Exact Blackman, Blackman, Flat Top, 4 Term B-Harris, 7 Term B-Harris, Low Sidelobe a Gaussian. Dále je možné měnit typ spektra, kde je možnost zobrazení v jednotkách Magnitude nebo Power (výkon), přičemž magnituda se rovná druhé odmocnině z výkonu. Rozsah jednotek magnitudy může být nastaven lineárně (Linear) nebo v decibelech (dB). Následně je možné vypnout nebo zapnout spektrální hustotu (Spectral density) a zvolit konverzi vrcholů (Peak conversion). Na obrázku 50 je zobrazeno spektrum a jeho nastavení, k měření zrychlení vibrací laboratorního motorku bez podložek pro 75% požadované hodnoty otáček.



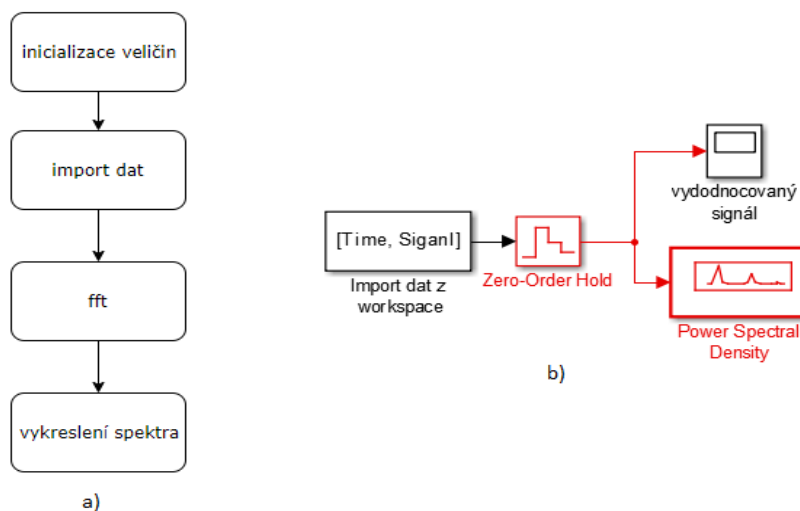
Obr. 50 – Spektrum zrychlení vibrací v prostředí SignalExpress

5.3 MATLAB / Simulink

Data získaná exportem naměřeného signálu v softwaru Measurement & Automation Explorer a SignalExpress do prostředí Microsoft Office Excel jsou v Excelu upravena pro použití v Matlabu.

Vlastní analýza se provádí za pomoci programu, který po inicializaci veličin (vzorkovací frekvence 2 kHz) a importování dat z Excelu provede rychlou Fourierovu transformaci importovaného vibračního signálu. Pro uvedenou transformaci je použit příkaz fft. Následně je vykresleno spektrum analyzovaného signálu.

V programu Simulink je k analýze využit blok Power Spectral Density z knihovny simulink extras. Který zobrazí PSD z importovaných dat v grafu. Nastavení bloku: buffer 256, fft 256, points 250, sample time 0,002. Výsledný graf je však vykreslen v jednotkách rad/sec a je nutné vzít v potaz převodový vztah $1 \text{ rad/sec} = 1/2\pi \text{ Hz}$. Řešení je vhodné pro přibližné určení spektra a proto je ve výsledcích zmíněno jen okrajově.



Obr. 51 – a) vývojový diagram programu analýzy spektra signálu v Matlabu

b) model analýzy signálu v prostředí Simulink

Na obrázku 51 je vlevo zobrazen vývojový diagram programu analýzy signálu v programovém prostředí MATLAB a vpravo ukázán model analýzy signálu v Simulinku.

5.4 Analýza vibrací laboratorního motorku

Vlastní měření, jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, bylo provedeno pro čtyři způsoby uložení laboratorního pohonu pro požadované otáčky 10 až 99% v kroku 5%. Všechna naměřená data byla ukládána do tabulek v Excelu. Pro každou hodnotu otáček byla vypočtena efektivní hodnota vibrací RMS a činitel výkmitu K_v . Zařízení v dobrém stavu by nemělo mít hodnotu činitele výkmitu větší než čtyři.

Perioda měřených vibrací je shodná s periodou otáčení motorku. V následujících tabulkách je uvedena frekvence f a perioda otáčení T vzhledem k požadované hodnotě otáček PH vypočtené podle vztahu (37) a (38):

Tabulka 5 – Frekvence a perioda otáček od 10 do 55% PH

PH	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%
f [Hz]	4,8	7,2	9,6	12,0	14,4	16,8	19,2	21,6	24,0	26,4
T [ms]	208,2	138,8	104,1	83,3	69,4	59,5	52,1	46,3	41,6	37,9

Tabulka 6 – Frekvence a perioda otáček od 60 do 99% PH

PH	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	99%
f [Hz]	28,8	31,2	33,6	36,0	38,4	40,8	43,2	45,6	47,5
T [m]	34,7	32,0	29,7	27,8	26,0	24,5	23,1	21,9	21,0

Z naměřených rychlostí v a zrychlení a vibračního signálu jsou vypočteny efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro dané otáčky. Pro převod hodnot napětí na dané jednotky byly použity rovnice (39) a rovnice (40). Výsledky jsou uvedeny v následujících tabulkách:

Tabulka 7 – Efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro rychlost a zrychlení vibrací 10 - 25%

požadovaná hodnota otáček		10%		15%		20%		25%	
		a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
bez podložek	RMS	0,06	1,06	0,06	0,82	0,08	0,72	0,09	0,80
	K_v	4,66	1,31	4,00	1,45	3,80	1,58	3,52	1,55
obě podložky	RMS	0,06	3,00	0,08	1,69	0,09	2,65	0,11	4,15
	K_v	3,75	1,16	4,62	1,24	3,83	1,28	3,18	1,21
polystyrén	RMS	0,07	2,39	0,08	1,23	0,09	1,08	0,11	1,37
	K_v	4,00	1,20	3,79	1,36	5,12	1,55	3,54	1,46
guma	RMS	0,07	6,01	0,08	2,48	0,09	1,92	0,12	1,71
	K_v	3,98	1,07	3,60	1,16	3,47	1,24	4,29	1,36

Tabulka 8 – Efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro rychlost a zrychlení vibrací 30 - 45%

požadovaná hodnota otáček		30%		35%		40%		45%	
		a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
bez podložek	RMS	0,11	0,77	0,16	0,93	0,17	0,96	0,21	1,62
	Kv	3,80	1,60	4,25	1,65	3,48	2,01	3,11	1,86
obě podložky	RMS	0,14	3,52	0,20	3,57	0,29	6,53	0,48	4,09
	Kv	3,73	1,27	3,18	1,46	3,13	1,30	2,79	1,89
polystyrén	RMS	0,14	1,13	0,27	2,31	0,31	2,22	0,37	3,40
	Kv	3,70	1,99	3,15	1,84	2,73	1,93	2,48	1,77
guma	RMS	0,15	1,57	0,25	2,38	0,25	1,94	0,32	1,83
	Kv	3,57	1,72	3,55	1,91	3,61	1,80	2,85	1,83

Tabulka 9 – Efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro rychlost a zrychlení vibrací 50 - 65%

požadovaná hodnota otáček		50%		55%		60%		65%	
		a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
bez podložek	RMS	0,24	3,35	0,74	3,07	1,01	3,67	1,22	3,69
	Kv	3,75	1,70	2,73	2,21	2,49	2,19	3,02	2,03
obě podložky	RMS	0,27	3,14	0,41	2,67	0,89	4,31	0,85	4,68
	Kv	3,28	1,64	3,03	1,77	2,39	1,79	2,59	2,71
polystyrén	RMS	0,42	4,60	0,49	2,30	0,43	1,26	0,51	3,30
	Kv	2,05	1,72	3,00	1,93	3,15	1,91	3,63	1,84
guma	RMS	0,41	2,76	0,90	3,03	0,72	3,07	0,57	2,25
	Kv	2,77	1,82	2,33	1,89	2,74	1,82	3,60	1,91

Tabulka 10 – Efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro rychlost a zrychlení vibrací 70 - 85%

požadovaná hodnota otáček		70%		75%		80%		85%	
		a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
bez podložek	RMS	1,08	3,63	1,05	3,51	1,06	3,03	1,02	2,84
	Kv	3,10	2,06	3,16	2,16	3,04	2,06	3,19	2,00
obě podložky	RMS	0,96	5,06	1,17	6,40	1,69	6,94	1,66	5,70
	Kv	2,65	2,11	2,39	2,52	2,25	1,70	1,94	1,75
polystyrén	RMS	1,14	4,79	1,13	4,56	1,08	4,05	1,14	5,08
	Kv	3,08	1,65	2,49	1,73	2,24	1,72	2,50	1,80
guma	RMS	0,63	2,45	0,53	2,47	0,56	2,24	0,79	2,68
	Kv	2,83	1,95	3,06	1,79	2,98	1,83	2,74	1,94

Tabulka 11 –Efektivní hodnoty a činitele výkmitu pro rychlost a zrychlení vibrací 90 - 99%

požadovaná hodnota otáček		90%		95%		99%	
		a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]	a [m/s ²]	v [mm/s]
bez podložek	RMS	1,07	2,26	1,24	2,84	1,33	2,39
	Kv	2,86	2,33	3,04	1,82	3,07	2,15
obě podložky	RMS	1,61	5,05	1,61	5,70	1,60	5,25
	Kv	1,83	1,71	1,91	2,20	2,11	1,94
polystyrén	RMS	1,86	4,03	2,65	5,72	2,64	4,68
	Kv	1,91	1,70	1,76	1,59	1,84	1,68
guma	RMS	3,17	6,09	3,62	7,45	3,41	5,91
	Kv	3,89	1,80	2,13	1,86	2,17	2,06

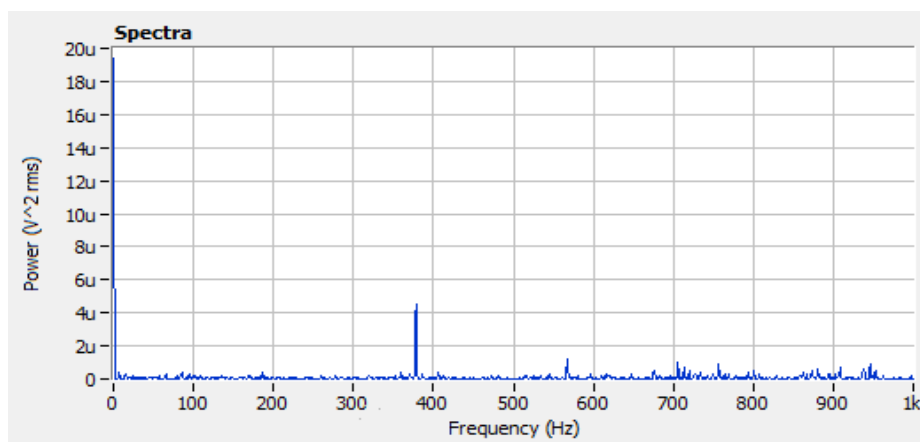
Z tabulek je možné vyčíst, že hodnotu 4 činitele výkmitu přesahují vibrační signály zrychlení v pásu do čtvrtinové hodnoty maximálních otáček. To naznačuje že pro tyto signály je vhodné provést frekvenční analýzu.

Během měření bylo pozorováno zvýšení amplitudy vibrací na určitých hodnotách otáček. Konkrétně pro uložení bez podložek 65%, obě podložky 75%, polystyrén a guma 95%. Potvrzení odhadů se dostavilo po provedení rázového testu. Test byl prováděn poklepem šroubovákem na stejnosměrný motorek při 0% požadovaných otáček. Z tohoto signálu bylo vytvořeno spektrum, ze kterého byly odečteny zmíněné kmitočty.

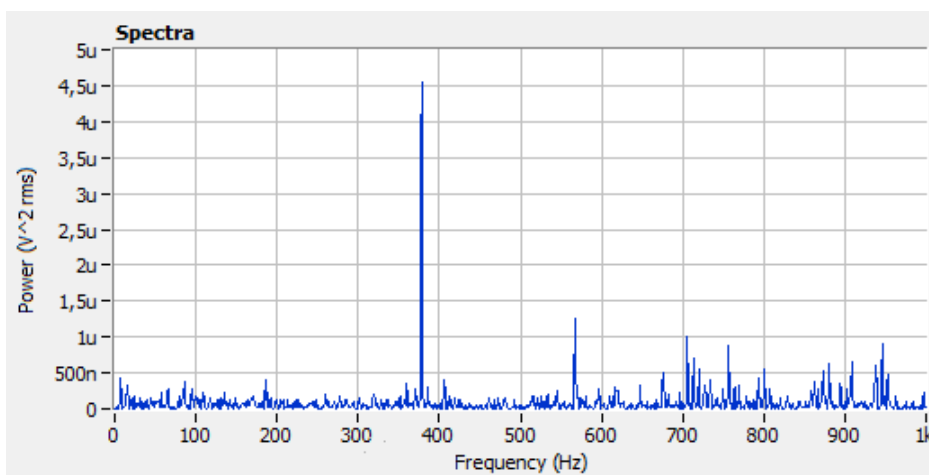
Měření s kartou NI USB-6341 odhalila, že při pouhém zapojení napájení (bez připojení k obvodu vyhodnocení vibrací) je ve spektru přítomna kromě špičky síťové frekvence 50 Hz a její dalších harmonických i špička frekvence blízké 0 Hz. Pomocí okna Flat Top byla identifikována na kmitočtu 0,97 Hz. Špička této frekvence je přítomna při každém měření s kartou, tedy i při měření signálu z obvodu vyhodnocení chvění. To výrazně stíží schopnost práce z grafem spektra signálu pro nízké otáčkové frekvence. Nelze ji potlačit žádným oknem a proto je vhodné použít filtr.

Pro tyto účely je v softwaru SignalExpress použit při některých měření blok určený k filtraci. Typ filtru je nastaven na horní propust s topologií Butterworth a módem IIR Filter. Pro spolehlivé měření by řád filtru měl být nastaven nejméně na hodnotu 3.

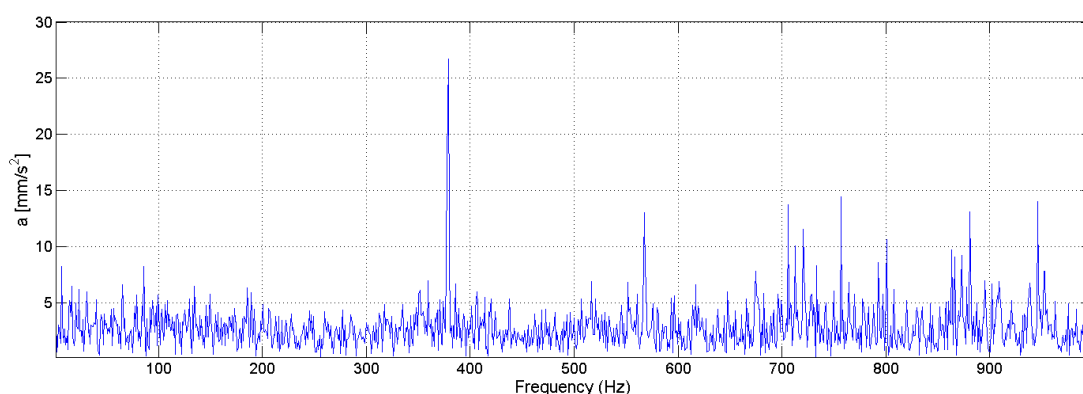
Následovat budou získané grafy frekvenčních spekter zrychlení vibrací, pro signály překračující hodnoty Kv > 4. Dále budou prezentovány grafy spekter ve zvoleném řezu otáček pro hodnoty 25%, 50%, 75% a 99% PH.



Graf 1 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalExpress, 15% PH, okno Hanning

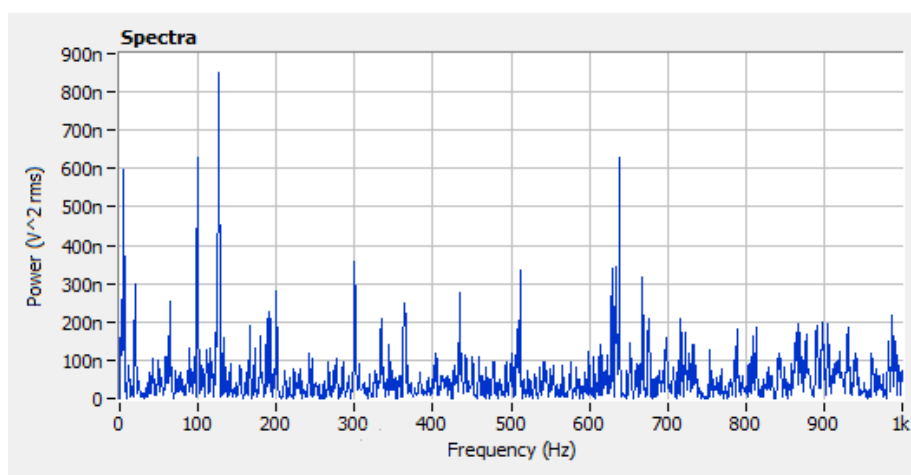


Graf 2 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalExpress, 15% PH, okno Hanning - s filtrem

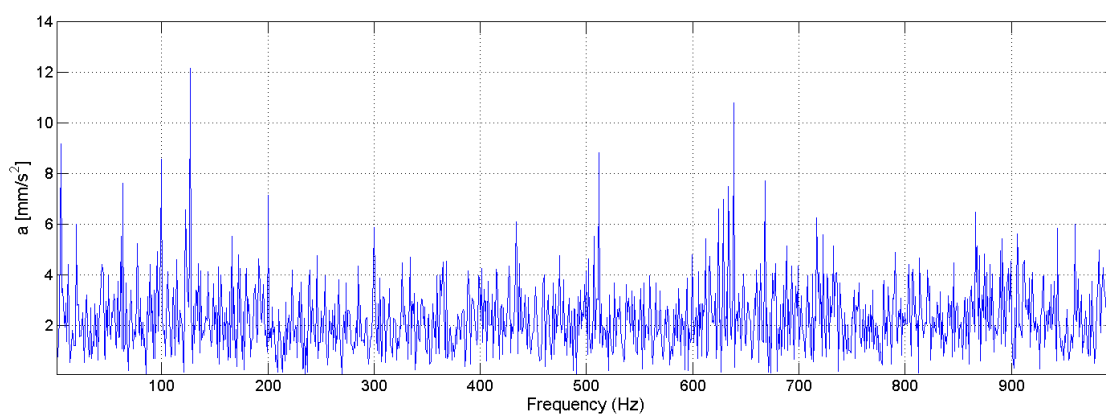


Graf 3 – Frekvenční spektrum pro obě podložky v programu MATLAB, 15% PH, okno rectangular

Z grafů můžeme pozorovat základní frekvence vibrací 1X o hodnotě 7,2 Hz, což odpovídá 15% PH, která není dominantní ve frekvenčním spektru. Dominantní špička ve spektru se nachází na kmitočtu 379 Hz. Hodnota zrychlení pro tento kmitočet je $26,8 \text{ mm/s}^2$.

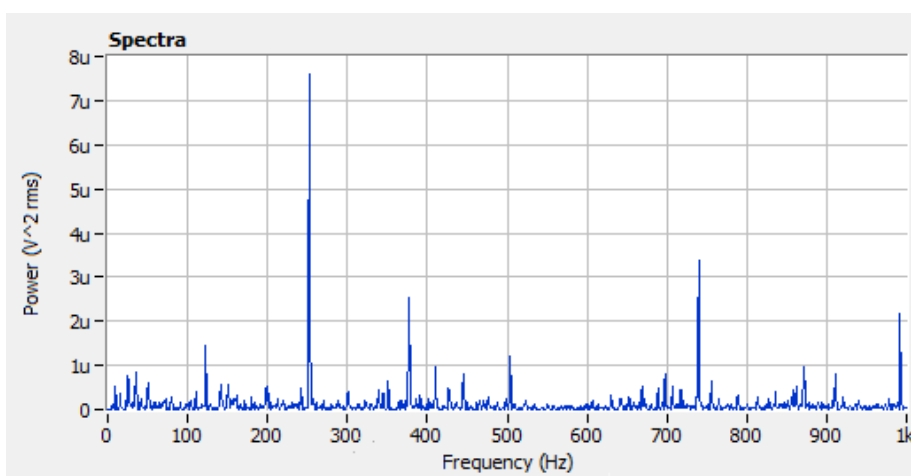


Graf 4 – Frekvenční výkonové spektrum pro uložení bez podložek v SignalExpress, 10% PH, okno Hanning - s fitrem

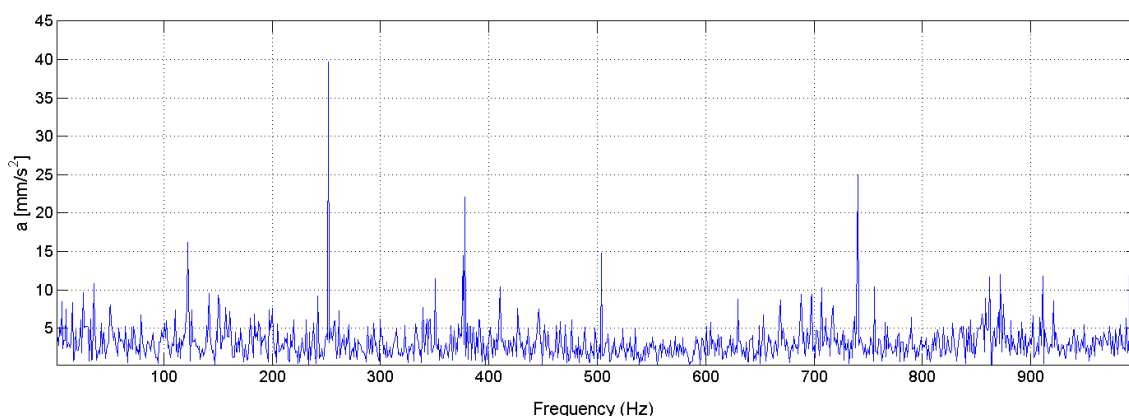


Graf 5 – Frekvenční spektrum pro uložení bez podložek v programu MATLAB, 10% PH, okno rectangular

Základní frekvence vibrací pro 10% PH je 4,8 Hz což odpovídá grafům a hodnota zrychlení je $9,20 \text{ mm/s}^2$. Největší frekvenční špička má hodnotu $12,2 \text{ mm/s}^2$ a nachází se na kmitočtu 127 Hz.

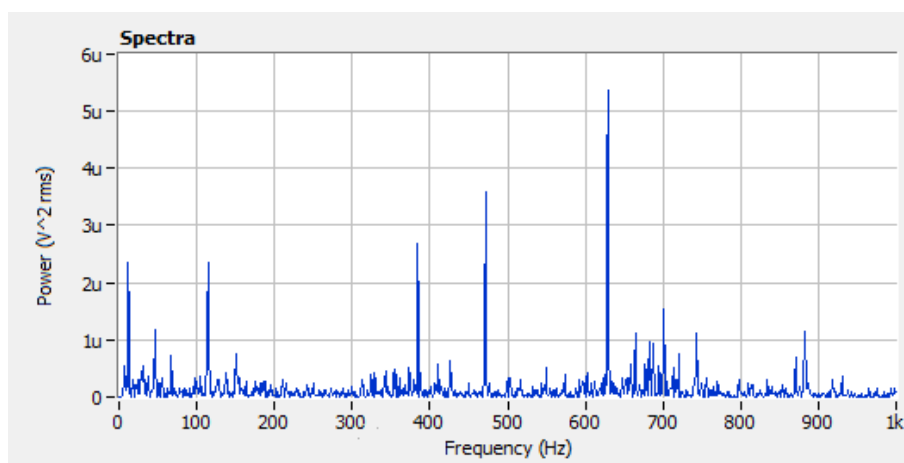


Graf 6 – Frekvenční výkonové spektrum pro polystyrén v SignalExpress, 20% PH, okno Hanning - s fitrem

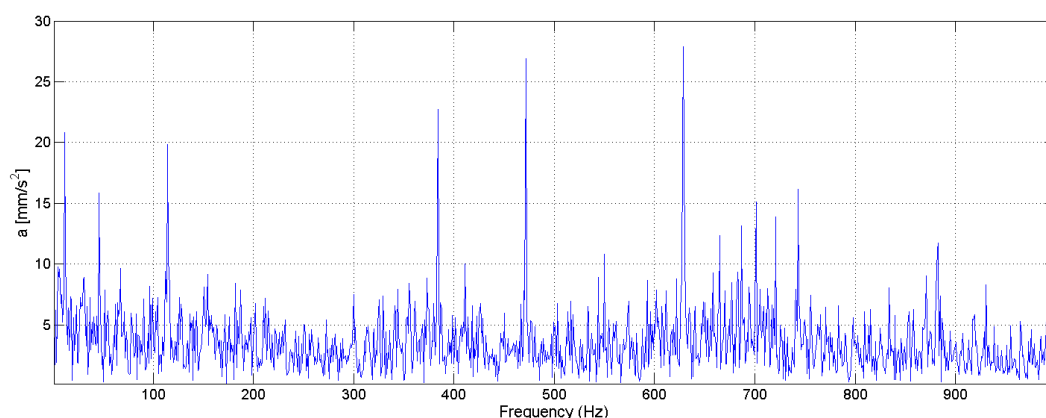


Graf 7 – Frekvenční spektrum pro polystyrén v programu MATLAB, 20% PH, okno rectangular

Pro PH 20% je základní frekvence vibrací 9,6 Hz. Největší špička vibrací je na kmitočtu 252 Hz a má hodnotu 39,7 mm/s².



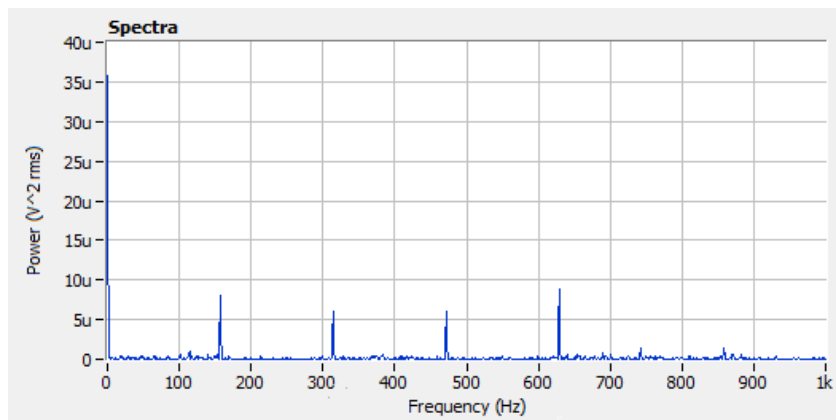
Graf 8. – Frekvenční výkonové spektrum pro gumu v SignalExpress, 25% PH, okno Hanning - s fitrem



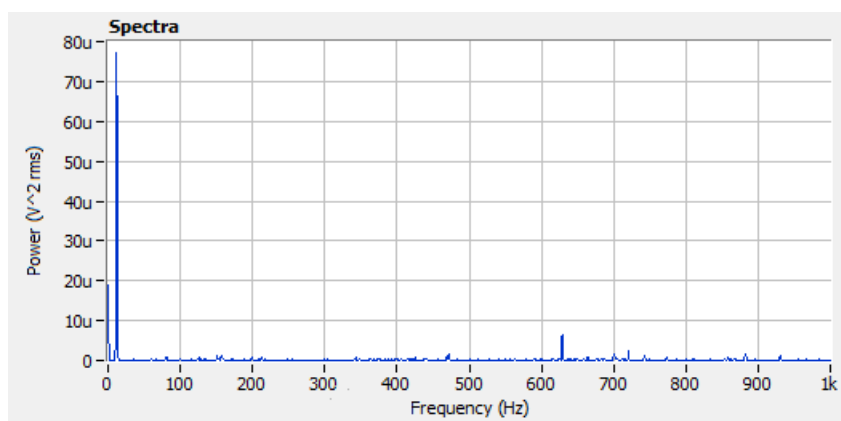
Graf 9 – Frekvenční spektrum pro gumu v programu MATLAB, 25% PH, okno rectangular

U měření s pěnovou gumovou podložku byl činitel výkmitu nevyhovující pro 25% PH. Základní frekvence vibrací je 10,2 Hz a má hodnotu 20,83 mm/s². Maximální hodnotu zrychlení vibrací 27,90 mm/s² má špička 628 Hz.

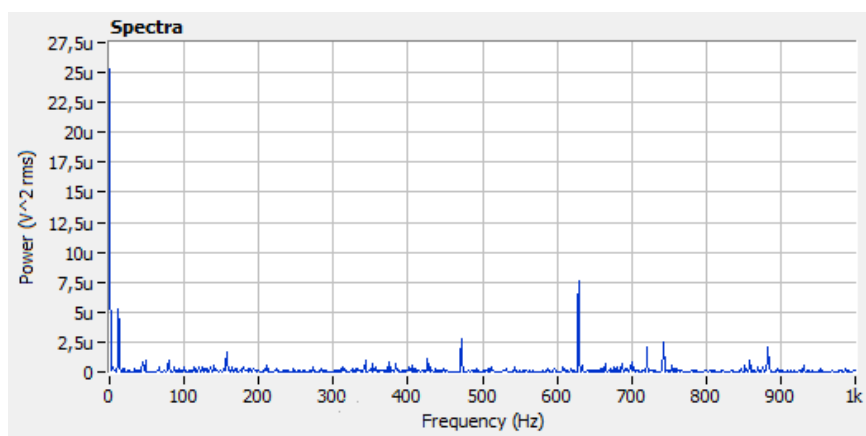
Následují grafy spekter v zvoleném řezu otáček získané ve vytvořeném projektu v SignalEspress.



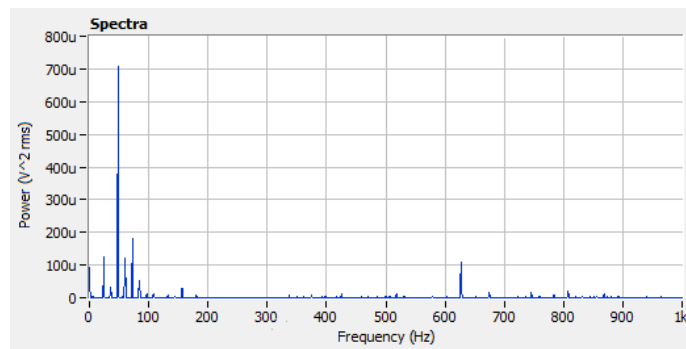
Graf 10 – Frekvenční výkonové spektrum pro uložení bez podložek v SignalEspress, 25% PH, okno Hanning



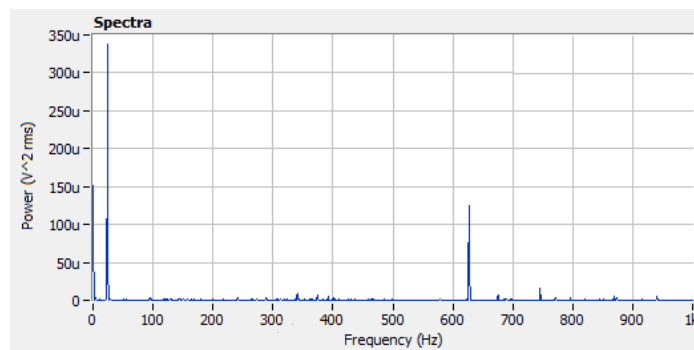
Graf 11 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalEspress, 25% PH, okno Hanning



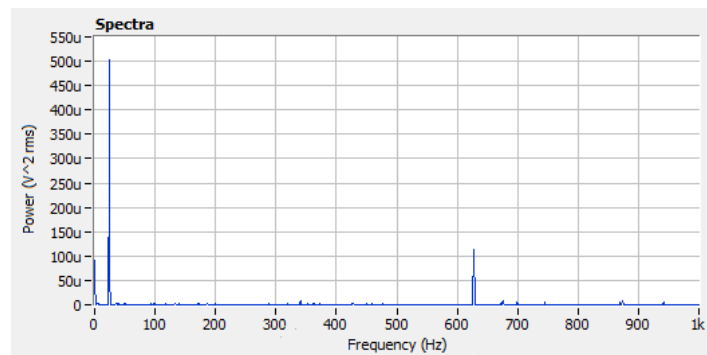
Graf 12 – Frekvenční výkonové spektrum pro polystyrén v SignalEspress, 25% PH, okno Hanning



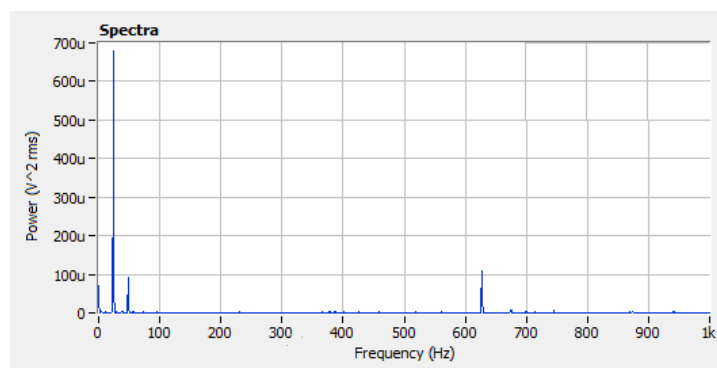
Graf 13 – Frekvenční výkonové spektrum pro uložení bez podložek v SignalExpress, 50% PH, okno Hanning



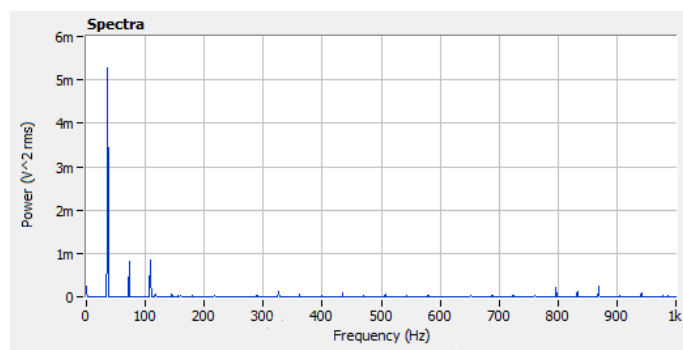
Graf 14 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalExpress, 50% PH, okno Hanning



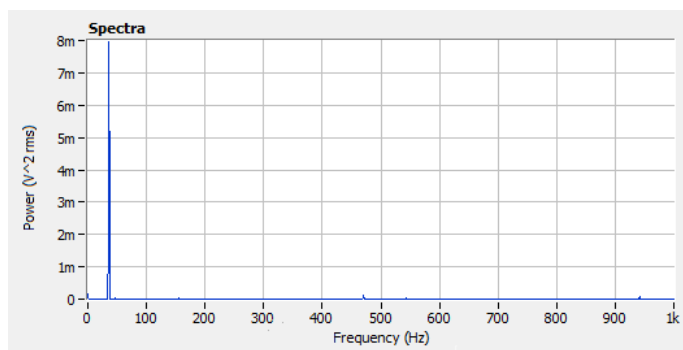
Graf 15 – Frekvenční výkonové spektrum pro polystyrén v SignalExpress, 50% PH, okno Hanning



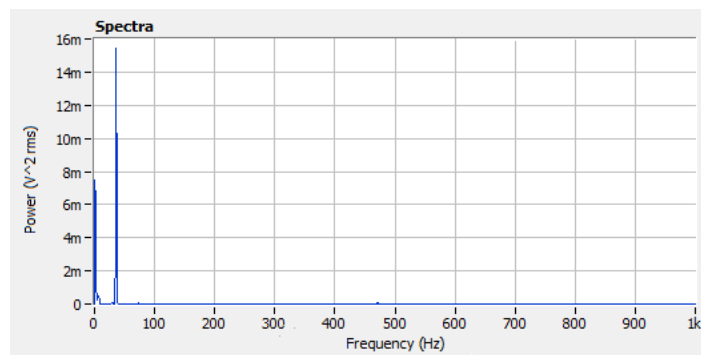
Graf 16 – Frekvenční výkonové spektrum pro gumu v SignalExpress, 50% PH, okno Hanning



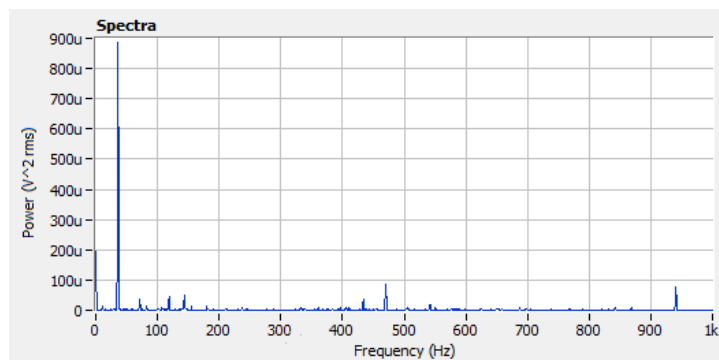
Graf 17 – Frekvenční výkonové spektrum pro uložení bez podložek v SignalExpress, 75% PH, okno Hanning



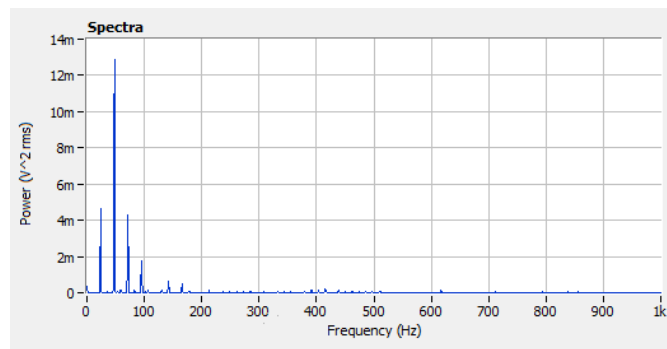
Graf 18 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalExpress, 75% PH, okno Hanning



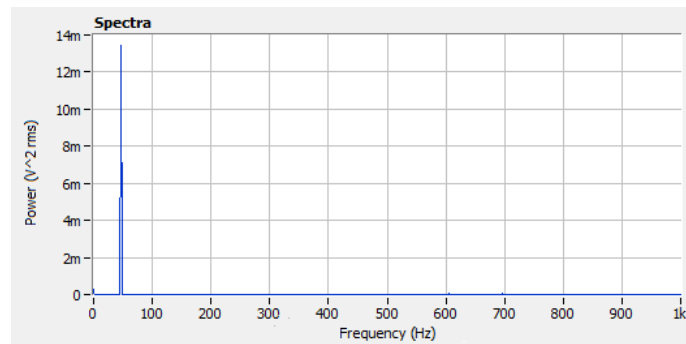
Graf 19 – Frekvenční výkonové spektrum pro polystyrén v SignalExpress, 75% PH, okno Hanning



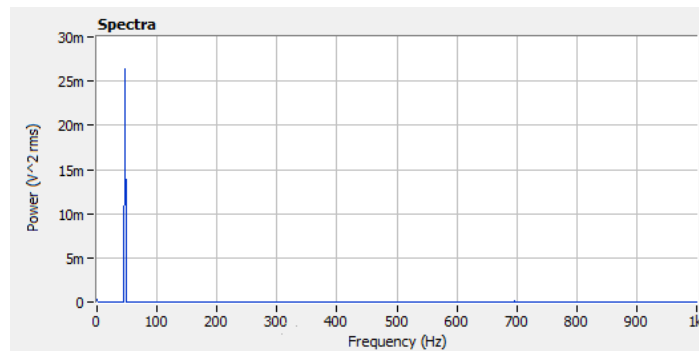
Graf 20 – Frekvenční výkonové spektrum pro gumu v SignalExpress, 75% PH, okno Hanning



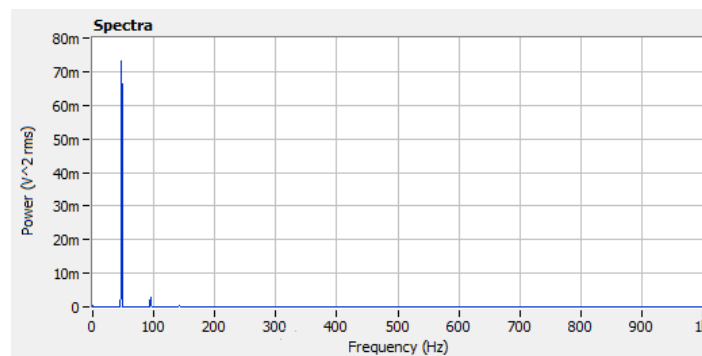
Graf 21 – Frekvenční výkonové spektrum pro uložení bez podložek v SignalExpress, 99% PH, okno Hanning



Graf 22 – Frekvenční výkonové spektrum pro obě podložky v SignalExpress, 99% PH, okno Hanning

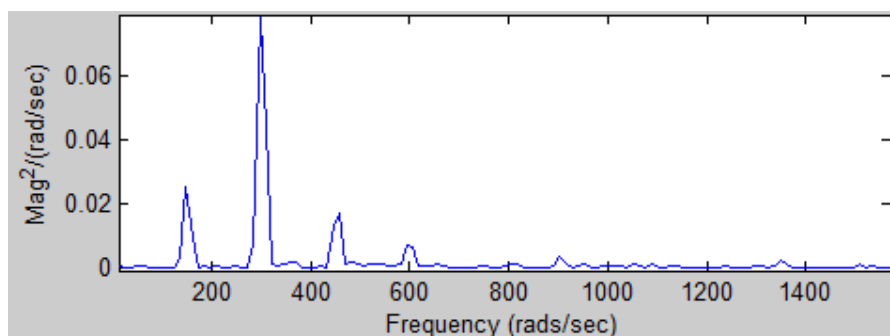


Graf 23 – Frekvenční výkonové spektrum pro polystyrén v SignalExpress, 99% PH, okno Hanning



Graf 24 – Frekvenční výkonové spektrum pro gumu v SignalExpress, 99% PH, okno Hanning

Pro porovnání uveden graf získaný v programu Simulink. Jedná se o měření bez podložek pro PH 99%.



Graf 25 – Hustota frekvenčního výkonového spektra pro uložení bez podložek v programu Simulink, 99% PH

5.5 Zhodnocení výsledků

Z výsledných grafů spekter je patrné, že zmíněná frekvenční špička 0,97 Hz značně ovlivňuje spektrum signálu do hodnot otáček 25% PH. Po jejím odfiltrování ve spektru zůstanou její harmonické na 157 Hz, 314 Hz a 628 Hz. Pro hodnoty otáček nad 25% PH přestává být tato frekvence ve spektru dominantní a proto je její vliv na výsledné spektrum značně omezen.

Výkonové spektrum a okno Hanning bylo v prostředí SignalExpress zvoleno s ohledem na kvalitu čitelnosti spektra, kde ze všem dostupných možností byla tato varianta nejideálnější. V programu MATLAB bylo zvoleno okno obdélníkové s ohledem na odčítání hodnot zrychlení vibrací z grafu.

Pro měření s podložkami je ve spektru signálu zastoupena většinou pouze základní frekvence vibrací 1X, která je na otáčkové frekvenci motorku (1. harmonická). U měření bez podložek se ve frekvenčním spektru zobrazí kromě 1. i 2. a 3. harmonická. Což jsou celé násobky základní frekvence a jsou označovány 2X a 3X. Pro hodnoty 50% a 99% PH jsou ve spektru signálu přítomny, vedle frekvencí 1X, 2X a 3X, i dvě frekvence posunuté o polovinu 1X. První se nachází v oblasti pod frekvencí otáčení a druhá nad frekvencí otáčení.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty zrychlení vibrací 1. harmonické, která je pro většinu měření dominantní frekvencí ve spektru. Toto skutečnost ukazuje na nevyváženost.

Tabulka 12 – Hodnoty zrychlení vibrací pro 1.harmonické frekvence

PH 25%	f [Hz]	12,0	PH 50%	f [Hz]	24,0
bez podložek	a [m/s ²]	0,01	bez podložek	a [m/s ²]	0,38
obě podložky	a [m/s ²]	0,12	obě podložky	a [m/s ²]	0,24
polystyrén	a [m/s ²]	0,03	polystyrén	a [m/s ²]	0,30
guma	a [m/s ²]	0,02	guma	a [m/s ²]	0,35
PH 75%	f [Hz]	36,0	PH 99%	f [Hz]	47,5
bez podložek	a [m/s ²]	1,04	bez podložek	a [m/s ²]	1,43
obě podložky	a [m/s ²]	1,29	obě podložky	a [m/s ²]	1,43
polystyrén	a [m/s ²]	1,78	polystyrén	a [m/s ²]	1,97
guma	a [m/s ²]	0,43	guma	a [m/s ²]	3,16

U uvedené tabulky je zřejmé, že amplituda 1. harmonické frekvence zrychlení vibrací roste se zvyšující se úrovní otáček DC motorku. Závislost mezi způsobem uložení je pro každou úroveň otáček *PH* jiná.

Například u *PH* 99% je amplituda zrychlení vibrací maximální pro podložku z pěnové gumy, tak pro hodnotu požadovaných otáček 75% *PH* je naopak minimální.

Rozdíl velikosti amplitud mezi grafy spekter v MATLABU a SignalExpress je způsoben úpravou signálu v prostředí Excel. Zde se signál převede podle vzorce (39) z napětí na zrychlení.

6 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce uvedla čtenáře do problematiky měření a analýzy vibračního signálu. První polovina práce představila základní fyzikální vlastnosti vibrací a popsala běžné závady rotačních strojů. Dále se teoretická část věnuje měření a analýze vibrací, ve které jsou popsány snímače vibrací a způsoby analýzy vibrací v časové oblasti signálu i frekvenční oblasti. Důraz je především kladen na využití Fourierovy transformace v analýze vibrací ve frekvenční oblasti.

Praktická část práce je rozdělena na dvě kapitoly. V první kapitole praktické části jsou popsány prvky stávající laboratorní ukázky regulačního pohonu se stejnosměrným motorkem. Dále jsou zde popsány části rozšiřující úlohu o možnost měření a následnou analýzu vibrací. Konkrétně se jedná o měřicí kartu od společnosti National Instruments NI USB-6341 a akcelerometr 784A od firmy Wilcoxon.

V druhé kapitole praktické části jsou představeny dva měřicí softwary pro měření s kartou NI USB-6341. Prostředí Measurement & Automation Explorer (MAX) umožňuje základní měření signálu s následným exportem získaných dat do Excelu. Software NI SignalExpress umožňuje i následnou analýzu signálu.

Vlastní měření probýhalo pro čtyři způsoby uložení stejnosměrného motoru v rozmezí otáček 10 až 99%. Data získaná měřením byla ukládána do tabulek v Excelu a následně zpracována. Zjištěné efektivní hodnoty zrychlení a rychlosti vibrací byly v práci zveřejněny spolu s vypočtenými hodnotami činitele výkmitu. Následně jsou prezentovány grafy spekter pro zvolený řez vibrací, získané vytvořenými programy v prostředí MATLAB a SignalExpress. Vyšší harmonické obsahují pouze spektra získaná z dat měření bez podložek. Pro měření s podložkami je ve spektru signálu přítomna většinou jen 1. harmonická.

Analýza dat měření s kartou, připojenou pouze do sítě přes napájecí kabel, odhalila kromě frekvenční špičky síťové frekvence 50 Hz a její harmonické násobky i špičku na hodnotě 0,97 Hz. Špička tohoto kmitočku je přítomna i při měření s kartou zapojenou do obvodu vyhodnocení vibrací. Tento fakt komplikuje spektrální analýzu zejména u měření do 25% otáček motoru. Pro nízké otáčky je totiž frekvence 0,97 Hz dominantní špičkou ve spektru signálu.

V přílohách je uveden návrh laboratorního cvičení k dané problematice měření a vyhodnocení vibrací na stejnosměrném motorku.

V závěru bych chtěl poznamenat, že mi tvorba předložené diplomové práce pomohla hlouběji proniknout do problematiky vibrodiagnostiky a uvědomit si její důležitost v technické praxi i běžném životě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [2] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická diagnostika*. BEN, Praha 2006. 408 stran. ISBN 80-7300-158-6
- [3] BILOŠ J., BILOŠOVÁ A.: *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: Část vibrační diagnostika*. VŠB - TU OSTAVA, Fakulta strojní. Vydání první. 142 s. Ostrava, 2012.
- [4] JAKSCH, Ivan. *Technická diagnostika: Měření a diagnostika vibrací* [online]. Liberec, 2010 [cit. 24.01.2018]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=150
- [5] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky*. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku. 2009, č. 10, s. 10-13. DOI: ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39703.pdf
- [6] HELEBRANT F., HRABEC L., BLATA J.: *Provoz, Diagnostika a údržba strojů*. [online]. VŠB - TU OSTRAVA: Ostrava, 2013. [cit. 11.02.2018]. Dostupné z: www.340.vsb.cz/doc/cms_library/provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-189.pdf
- [7] NĚMEČEK P., ELIAS T.: *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010 [cit. 12.02.2018]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [8] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. AUTOMA: Časopis pro automatizační techniku. 2010, č. 1, s. 1-4. DOI: ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/40375.pdf
- [9] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 stran. ISBN 80-901936-1-7
- [10] Серводвигатели РИК серии. *Качественное электро-оборудование. Евро-Контракт - официальный представитель «GAMA MOTORS ltd.»* [online]. Copyright © 2010 [cit. 24.04.2018]. Dostupné z: <http://ek.ck.ua/produkcija/elektrodvigateli/serija-rk/>
- [11] ni.com: "Multifunction IO Product Flyer" - Manuals [online]. [cit. 24.03.2018] Dostupné z: <http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/tech/lang/cs/pg/1/sn/catnav:pm/q/Multifunction%20IO%20Product%20Flyer/>
- [12] NATIONAL INSTRUMENTS: "NI USB-6341 X Series Data Acquisition" - Datasheet
- [13] NATIONAL INSTRUMENTS: "NI X Series Multifubction Data Acquisition" - Specifikace
- [14] NATIONAL INSTRUMENTS: *Company*. [online]. 2018 [cit. 1.2.2018]. Dostupné z: <http://www.ni.com/company/>
- [15] Wilcoxon SENSING TECHNOLOGIES: *Company*. [online]. 2018 [cit. 11.2.2018]. Dostupné z: <https://wilcoxon.com/about/company/>

- [16] WILCOXON RESEARCH, INC. : *"Model 784A Economy, General Purpose Accelerometer"* - Datasheet
- [17] ni.com: *"USB 6341"* . 301 Moved Permanently [online]. Copyright © National [cit.13.12.2017]. Dostupné z: <http://search.ni.com/nisearch/app/main/p/bot/no/ap/global/lang/cs/pg/1/q/USB%206341/>.
- [18] Measurement and Automation Explorer (MAX) [online]. [cit. 19.4.2018]. Dostupné z: <http://home.hit.no/~hansha/documents/software/MAX.htm>
- [19] SignalExpress Support - National Instruments. 301 Moved Permanently [online]. [cit.2.3.2018]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-233/lang/cs>

SEZNAM PŘÍLOH

CD:

- elektronická verze diplomové práce
- elektronická verze návrhu zadání laboratorního cvičení
- program v SignalExpress k laboratorní úloze

Příloha: Návrh laboratorního cvičení

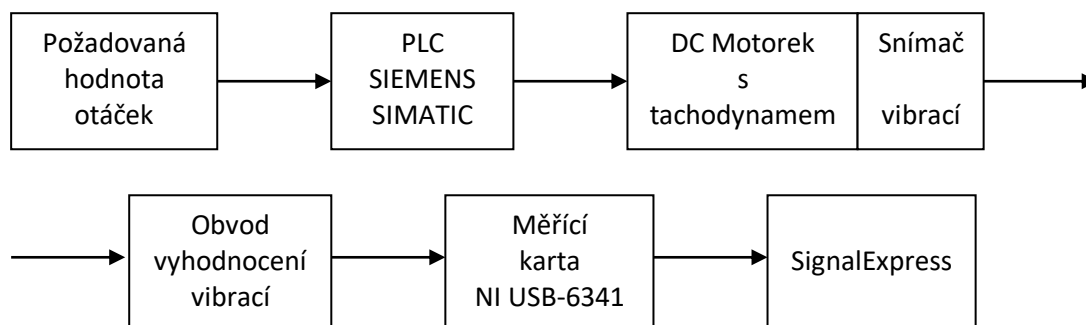
PŘÍLOHY

Název: **Měření a vyhodnocení vibrací na stejnosměrném motorku**

Cíl: Experimentálně zjistit vlastnosti dané soustavy z vyhodnocení vibračního signálu v časové a frekvenční oblasti.

Pomůcky: Pracoviště s PC s nainstalovaným software SignalExpress 2013, měřicí karta NI USB-6341, panel SIEMENS SIMATIC, stejnosměrný motorek s tachodynamem a senzorem vibrací.

Měřicí řetězec laboratorní úlohy



Úvod, rozbor úlohy

Otáčky DC motorku jsou nastavovány pomocí číslicového panelu, který je připojen na vstupy panelu SIEMENS SIMATIC. Tento panel zprostředkovává regulaci otáček motorku pomocí PLC SIMATIC S7-200. Vlastní motorek je připojen na napěťový analogový výstup panelu přes proudový zesilovač. Pro regulaci otáček je k panelu připojeno na analogové vstupy A+, A-tachodynamo. Vibrace snímá akcelerometr připevněný ke konstrukci motorku. Data ze snímače putují přes obvod vyhodnocení chvění do měřicí karty NI USB-6341. Vlastní měření a analýza dat probíhá v softwaru SignalExpress 2013.

Zadání

1. Zkontrolujte zapojení laboratorní úlohy.
2. Připravte si tabulku následujícího vzoru.

PH	30%	65%	99%
f [Hz]	14,4	31,2	47,5
RMS [V]			
max Peak [V]			
Kv			
1X Uacc [V]			

3. Vyzkoušejte si regulaci otáček stejnosměrného motorku postupným zvyšováním otáček.

$$f_{ot} = 0,4802 \cdot PH \text{ [Hz]}$$

4. Spustíte nachystaný program mereni_vibraci.seproj. Po spuštění programu zkontrolujte nastavení bloku DAQmx Acquire INPUT: 10, -10 Volts; Terminal: RSE; Timing: N Samples, 2048, 2 kHz.
5. Nastavte požadovanou hodnotu otáček stejnosměrného motorku a spustíte měření použitím ikony Run Continuously (Ctrl+E). Vyčkejte alespoň 10 vteřin a následně klikněte na ikonu Stop.
6. Následně v bloku Amplitude and Levels v záložce configuration odečtete hodnoty *RMS* (efektivní hodnota měřeného signálu) a maximum z hodnot *+Peak -Peak* v absolutní hodnotě. Výsledky запиšte do tabulky.
7. Vypočtete hodnotu činitele výkmitu *Kv*. Činitel výkmitu je dán podílem výkmitu a efektivní hodnoty amplitudy signálu. Jedná se rychlou metodu určení stavu zařízení, kde pro stroje v dobrém stavu jsou hodnoty $K_v < 4$.

$$K_v = \frac{|\max Peak|}{RMS}$$

8. Následně Poté přejděte do bloku Power Spectrum a vyzkoušejte si v záložce Configuration různé možnosti zobrazení spektra signálu včetně oken.
9. Odečtete z grafu spektra v bloku Power Spectrum hodnotu amplitudy první harmonické frekvence 1X. Měla by být zobrazena na kmitočtu otáček motorku.
10. Body 5 až 8 opakujte pro další požadované hodnoty otáček motorku (*PH*). Výsledky porovnejte.
11. Závěrem umístěte motorek na některou z podložek a pozorujte změny při opakovaném měření s danou podložkou.

Poznámka: Převodový poměr napětí na zrychlení je dán $1 \text{ V} = 10 \text{ m/s}^2$ a proto stačí výsledky v tabulce, které jsou ve voltech, vynásobit deseti.