



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Měření dynamických vlastností předpjatých stavebních táhel

Measuring of Dynamic Parameters of Tensioned Structural Bars

Diplomová práce

Studijní program: Kybernetika a Robotika
Studijní obor: Senzory a přístrojová technika

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Michael Nečas

Praha 2013



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Ing. Michael Nečas**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Měření dynamických vlastností předpjatých stavebních táhel**

Název tématu anglicky: **Measuring of Dynamic Parameters of Tensioned Structural Bars**

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete systém pro určení statických a dynamických vlastností předpjatých stavebních táhel.

Proveďte známé fyzikální dynamické modely táhel a vyhodnoťte jejich použitelnost v praxi na základě srovnání mechanického napětí změřeného pomocí tenzometrů a mechanické dynamické odezvy části konstrukce.

Pro záznam akceleroogramu použijte MEMS akcelerometr typu LIS302DL napojený na modul STM32F4 Discovery. Zaznamenaný signál se bude prostřednictvím rozhraní USB nebo Bluetooth dále přenášet do nadřazeného PC, kde se pomocí spektrální analýzy určí dynamické vlastnosti táhla. Činnost měřicího řetězce ověřte na funkčním vzorku s využitím kitu STM32F4 Discovery.

Seznam odborné literatury:

- [1] Brepta, R., Půst, L., Turek, F.: Mechanické kmitání. Technický průvodce. Sobotáles 1994
- [2] Main, I. G.: Kmitý a vlny ve fyzice. Academia, Praha 1990.
- [3] STMicroelectronics: Reference Manual, RM0090, doc ID 018909 Rev3

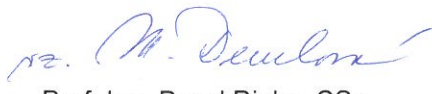
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jan Fischer, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 16. listopadu 2012

Platnost zadání do¹: 30. června 2014


Prof. Ing. Vladimír Haasz, CSc.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 16. 11. 2012

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Abstrakt

Předmětem diplomové práce je návrh levné měřicí pomůcky s akcelerometrem včetně příslušného software pro měření vlastních frekvencí předpjatých táhel stavebních konstrukcí. Práce řeší měření dynamické odezvy, zpracování naměřeného akcelerogramu, výpočet hodnot a filtraci jednotlivých složek vlastních frekvencí. Na základě takto získaných údajů jsou v této práci řešeny postupy automatického výpočtu útlumu jednotlivých frekvencí a diskutovány vhodné výpočetní modely reálného kmitajícího táhla. Nejvhodnější výpočetní model je ověřen na vzorku měření z reálných táhel. Tyto řešené problémy by ve výsledku měly umožnit vytvořit metodu pro dlouhodobý monitoring předpjatých táhel po dobu životnosti nosných stavebních konstrukcí.

Abstract

The subject of this thesis is development of low cost measurement instrument with accelerometer including appropriate software for measurement of eigenfrequencies of tensioned bars used in building structures. This paper deals with measurement of dynamic response, processing of measured accelerogram, calculation of values and filtering of particular eigenfrequencies. According to the data gained this way, procedure of automatic damping calculation is developed. Also this paper discusses appropriate computing models of dynamic response of a tensioned bar. The most appropriate computing model is verified on a set of measurements from real tensioned bars. The solutions of these objectives should allow to develop a long term method for monitoring of tensioned bars for the lifetime of building structures.

Čestné prohlášení autora práce

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 9.5.2013



.....
Podpis autora práce

Obsah

1.	Úvod	3
1.1	Uvedení do problematiky stavebních předpjatých táhel	3
1.2	Táhlo a jeho použití, montáž a aktivace na stavbě	3
1.3	Cíle této práce	7
2.	Harmonický pohyb táhel – základní přehled	8
2.1	Harmonický pohyb netlumený	8
2.2	Harmonický pohyb tlumený	8
3.	Filtrace vlastních frekvencí	10
3.1.1.	Extrakce vl. módů ze záznamu naměřených dat akcelerometru	10
3.1.2.	Popis a postup řešení zadání	10
3.2	Filtr FFT s váhovacím oknem	11
3.2.1.	Princip filtrace	11
3.2.2.	Porovnání filtrované funkce s původní frekvenční složkou	15
3.2.3.	Modifikované váhovací okno	16
3.3	Hilbert – Huangova transformace	16
3.3.1.	Popis filtrace	16
3.4	Modální dekompozice pomocí Kalmanova filtru	17
3.4.1.	Popis filtrace	17
3.5	Testování jednotlivých metod	18
3.5.1.	Testovací signál	18
3.5.2.	FFT filtrace s váhováním	18
3.5.3.	Hilbert – Huangova transformace	19
3.5.4.	Kalmanova filtrace	21
3.6	Porovnání filtrovacích metod	23
3.7	Výpis filtrovacích funkcí v MATLABU	23
3.8	Filtrace vlastních frekvencí v naměřeném průběhu reálného táhla	28
3.8.1.	Kotevní táhlo hlavního oblouku ZS Chomutov	28
3.8.2.	Táhlo EL22 – Trojský most	31
3.9	Přibližné určení koeficientu tlumení δ přímo z naměřeného akceleroogramu	34
4.	Měřící přípravek	38
4.1	Volba hardware	38

4.2	STM32F4 Discovery Kit.	38
4.3	Procesor STM32F407VGT6	39
4.4	MEMS akcelerometr LIS302DL	42
4.5	USB on-the-go řadič full speed (OTG_FS)	44
4.6	Základní popis systému Bluetooth	45
4.7	Bluetooth modul CB-OBS411i	52
5.	Software měřicího přípravku	59
5.1	Komunikace s PC	59
5.2	Aplikační komunikační protokol	61
5.3	Firmware procesoru STM32F407VGT6	62
5.4	Uživatelská aplikace v PC	64
6.	Teoretické modely kmitajícího táhla	66
6.1	Účel modelů a jejich hodnocení	66
6.2	Model 1 – příčně kmitající struna bez vlivu tlumení.	66
6.3	Model 2 – příčně kmitající struna s vlivem tlumení.	68
6.4	Model 3 – příčně kmitající nosník kloubově uložený.	69
6.5	Model 4 – příčně kmitající nosník na koncích vetknutý	71
6.6	Metoda konečných prvků – MKP	73
6.7	Vliv dodatečných setrvačných hmot napínákových matic	75
6.8	Vliv pružného uložení podpor modelu táhel (posun svislý)	78
6.9	Vliv pružného uložení podpor modelu táhel (rotační pružnost)	78
6.10	Porovnání výsledků aplikace modelu na souboru táhel.	81
6.11	Shrnutí výsledků – rekapitulace vhodného modelu	83
7.	Závěr	85
8.	Seznam literatury a zdrojů	86
9.	CD se zdrojovými soubory	

1. Úvod

1.1 Uvedení do problematiky stavebních předpjatých táhel

V posledních dvaceti letech se v nosných systémech ocelových konstrukcí začal ve větší míře využívat stavební prvek – předpjaté táhlo. Tento prvek se vyznačuje tím, že přenáší pouze tahové síly a nesmí dojít k poklesu této síly pod určitou minimální mez po celou dobu životnosti konstrukce. Z tohoto důvodu vznikla určitá poptávka po metodě a způsobu měření stálosti těchto tahových sil během periodických kontrol nosných konstrukcí. Povinnost provádět kontroly nosných ocelových konstrukcí je mimo jiné zakotvena v normě ČSN 73 2604.

Jednou z možných metod je porovnávání dynamických vlastností jednotlivých táhel v průběhu času, konkrétně posun vlastních frekvencí a změna útlumu.

1.2 Táhlo a jeho použití, montáž a aktivace na stavbě

Táhlo (obr. 1.1) je stavební ocelový prvek, který umožňuje při správném návrhu a použití dosahovat významných úspor hmotnosti a ceny nosné konstrukce. Zároveň je vnímáno jako architektonický prvek, který dodává konstrukcím dojem lehkosti a vzdušnosti. Stavební táhla jsou vyráběna z vysokopevnostní oceli v typových řadách v průměrech od 16mm do 105 mm včetně systému koncovek, čepů a napínákových matic.(obr. 1.2) Zároveň většinou mají výrobci táhel vyvinuté specializované hydraulické systémy pro předpínání táhel.(obr. 1.3)



Obr. 1.1. Konstrukce s využitím předpjatých táhel

Toto předpětí se vnáší utahováním napínákové matice a cílem je vnést do táhla takovou tahovou sílu, která zajistí že v každém zatěžovacím stavu konstrukce je táhlo v napnutém stavu po celou dobu životnosti konstrukce. Tuto sílu určuje projektant ve statickém výpočtu. Vzhledem

k tomu, že se táhla při předpínání vzájemně ovlivňují, bývá zároveň vypracován předpínací postup, ve kterém se určí pořadí montáže, předpínání a velikosti sil v jednotlivých fázích. Problém je obdobný jako při centrování jízdního kola. V současné době se testuje metoda určení předpínacího postupu pomocí lineárního programování tak, aby bylo dosaženo cíle za co nejmenšího počtu předpínacích kroků. Více o systémech táhel lze nalézt např. na [I01].



Obr 1.2 Napínáková matice a koncovka s čepem

Pro měření tahových sil se v současné době používá přepočtu tlaku v hydraulických napínacích zařízeních na sílu v táhle nebo tenzometrické měření. Ostatní metody jako strunové tenzometry, skleněná vlákna, měření změny magnetických vlastností materiálu atd. se používají z cenových důvodů zřídka a to většinou při výzkumu.

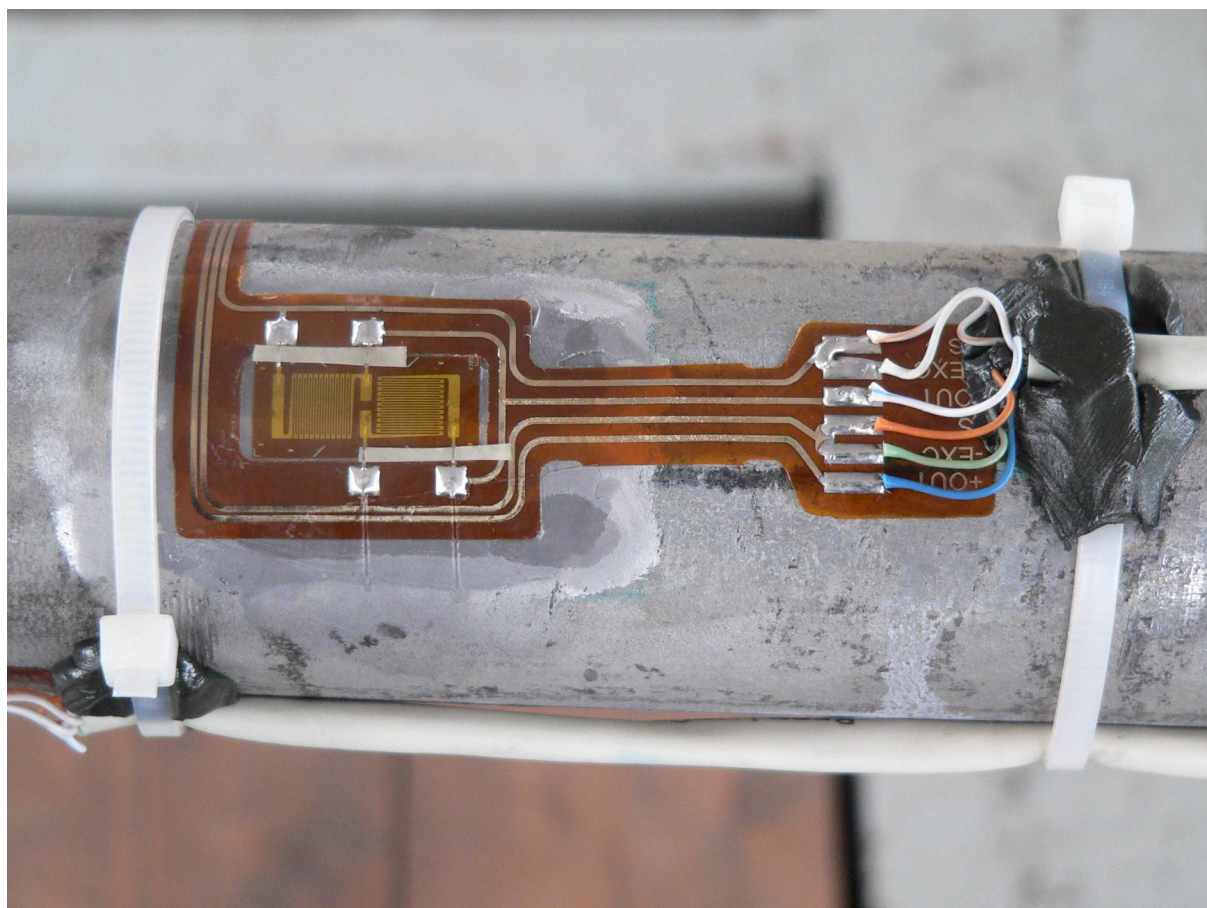
Měření hydraulického tlaku je pouze orientační a umožňuje měření síly pouze v napínaném táhle. Pro konstrukce kde se výrazněji ovlivňují jednotlivá táhla je nutné měřit současně všechna táhla nebo příslušné skupiny táhel pomocí foliových tenzometrů nalepených na táhlo. V praxi se většinou používá zapojení tenzometrů do plného můstku, kde dva tenzometry jsou měřicí a dva teplotně kompenzační. U rozsáhlých staveb se používá 6-ti vodičového zapojení a napájení můstku střídavým napětím o frekvenci cca 5 kHz, což umožní používat kabeláž s délkami kabelů až 100m.

Před dodáním táhel na stavbu jsou nalepeny na táhla tenzometrické můstky (obr. 1.4), zabezpečeny proti vlhkosti a mechanickému poškození a odečteny na měřicí ústředně (obr. 1.5) výchozí nulové hodnoty rozvážení můstku.

Měření na stavbě probíhá v průběhu montáže a přepínání táhel v definovaných montážních fázích během celé výstavby. Závěrečné měření se provádí před přejímkou stavby nebo u mostů při zatěžovací zkoušce. Bohužel pro další sledování tahových sil v táhlech během životnosti stavby nelze většinou používat nalepené tenzometry, jelikož se musí odstranit z táhel z důvodů estetických nebo kvůli antikorozi povrchové ochraně.



Obr.1.3 Hydraulické napínací zařízení



Obr.1.4 Nalepený tenzometr na táhle

Při závěrečném měření se předpokládá změření dynamických charakteristik táhel tj. při stejném zatížení a teplotě pro možnost navázání změřených dynamických charakteristik na změřené síly tenzometry. Pro další kontrolu se uloží změřený akceleroogram, z něj určených n prvních vlastních frekvencí, pro každou vlastní frekvenci se určí útlum, zaznamená se teplota konstrukce při měření a pro opakovatelnost měření se musí také uložit poloha akcelerometru pro správnou opakovatelnost měření.



Obr.1.5 Měřicí ústředna pro tenzometrická měření

Měření dynamických charakteristik táhel se provádí umístěním měřícího přípravku s akcelerometrem na táhlo a vybuzení kmitání úderem na táhlo. Tento způsob měření byl již ověřen měřicí pomůckou zhotovenou v rámci bakalářské práce [09]. Jedná se vlastně o impulsní buzení soustavy přibližně Diracovým impulsem $\delta(t)$, pro který platí v Laplaceově transformaci $L\{\delta(t)\} = 1$. Z této skutečnosti vyplývají dvě příznivé skutečnosti, jednak táhlo kmitá ve všech vlastních tvarech najednou a při buzení Diracovým impulsem je výstupem přenosová funkce, tj. není vstupem modifikován výstup.

Vzhledem k tomu, že jeden prototyp měřicí pomůcky zhotovené v rámci bakalářské práce [09] je po cca dvou letech používání vlivem působících vibrací nefunkční a druhý již vykazuje občasné poruchy, je nutné najít nový základ měřicího přípravku na trhu takový, kdy náhrada nefunkčního přípravku by znamenala pouze aktualizaci firmware a instalace do pouzdra. Jako vhodný základ měřicí pomůcky byl nalezen STM32F4 Discovery kit s akcelerometrem LIS302DL v ceně 330,- Kč s DPH (www.farnell.com).

1.3 Cíle této práce

Ze zadání a výše uvedeného vyplývají tyto cíle:

- Navrhnout a odladit firmware pro STM32F4 Discovery kit s akcelerometrem LIS302DL.
- Implementovat vhodný Bluetooth modul a odladit komunikaci s Discovery kitem a měřícím PC.
- Upravit stávající software v PC pro komunikaci s STM32F4 Discovery kitem přes USB a Bluetooth modul.
- Najít a ověřit způsob zpracování výsledků – určit vlastní frekvence a ověřit způsob určení útlumu jednotlivých vlastních frekvencí.
- Nalézt vhodný model pro vyhodnocení vlivu případných posunů vlastních frekvencí změřených v průběhu životnosti konstrukce.

2. Harmonický pohyb táhel – základní přehled

2.1 Harmonický pohyb netlumený

$$\text{Základní rovnice harmonického pohybu} \quad w = w_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

kde: w je okamžitá výchylka [m], w_0 je amplituda [m], ω = úhlová frekvence [s^{-1}] = $2\pi f$, t = čas [s], φ = fáze [rad], f = frekvence [Hz]

$$\text{Zrychlení harmonického pohybu} \quad a = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -w_0 \omega^2 \sin(\omega t + \varphi) = -w \omega^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Zpětný výpočet výchylky ze zrychlení} \quad w = \frac{-a}{\omega^2} \quad (2.3)$$

2.2 Harmonický pohyb tlumený

$$\text{Základní rovnice} \quad w = w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi) \quad , \quad (2.4)$$

kde δ je součinitel tlumení na jednotku délky [s^{-1}]

$$\text{Rychlost tlum. pohybu} \quad v = -\delta w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi) + w_0 \omega_t e^{(-\delta t)} \cos(\omega_t t + \phi) \quad (2.5)$$

$$\text{Zrychlení} \quad a = (\delta^2 - \omega_t^2) w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi) - 2\delta w_0 \omega_t e^{(-\delta t)} \cos(\omega_t t + \phi) \quad (2.6)$$

kde $\omega_t = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$ je úhlová frekvence tlumeného harmonického pohybu [s^{-1}].

Tlumený pohyb kromě součinitele tlumení δ charakterizuje také **útlum** (T_t je perioda tl. kmitů)

$$b = \frac{w(t)}{w(t+T_t)} \quad . \quad (2.7)$$

Po dosazení rovnice (1.4) do (1.7) dostaneme

$$b = \frac{w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi)}{w_0 e^{(-\delta(t+T_t))} \sin[\omega_t(t+T_t) + \phi]} \quad . \quad (2.8)$$

Po úpravách, kde $\sin(\omega_t t + \phi) = \sin[\omega_t(t+T_t) + \phi]$ a $e^{(-\delta(t+T_t))} = e^{(-\delta t)} e^{(-\delta T_t)}$, dostaneme

$$b = \frac{w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi)}{e^{(-\delta T_t)} w_0 e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi)} \rightarrow b = e^{(\delta T_t)} \quad \text{a přirozený logaritmus útlumu je}$$

$$\text{logaritmický dekrement tlumených kmitů} \quad \Lambda = \ln \frac{w(t)}{w(t+T_t)} = \ln b = \delta T_t \quad (2.9)$$

Jelikož akcelerometrem měříme průběh zrychlení a nikoliv výchylky, potřebujeme útlum odvodit i pro zrychlení, do rovnice (1.7) dosadíme výchylky vypočtené ze změřeného tlumeného harmonického zrychlení. Výchylku ze zrychlení určíme dvojí integrací zrychlení.

$$w = \int \int w_a e^{(-\delta t)} \sin(\omega_t t + \phi) dt = \frac{w_a e^{(-\delta t)} [(\delta^2 - \omega_t^2) \sin(\omega_t t + \phi) + 2\delta \omega_t \cos(\omega_t t + \phi)]}{(\delta^2 - \omega_t^2)^2} \quad (2.10)$$

Kde w_a je amplituda kmitání zrychlení.

Dosazením rovnice (2.10) do (1.7) dostaneme útlum pro průběh změřeného zrychlení.

$$b_a = \frac{\frac{w_a e^{(-\delta t)} [(\delta^2 - \omega_t^2) \sin(\omega_t t + \phi) + 2 \delta \omega_t \cos(\omega_t t + \phi)]}{(\delta^2 - \omega_t^2)^2}}{\frac{w_a e^{(-\delta(t+T_t))} [(\delta^2 - \omega_t^2) \sin(\omega_t(t+T_t) + \phi) + 2 \delta \omega_t \cos(\omega_t(t+T_t) + \phi)]}{(\delta^2 - \omega_t^2)^2}} \quad (2.12)$$

Opět po úpravách, kde $\sin(\omega_t t + \phi) = \sin[\omega_t(t+T_t) + \phi]$, $\cos(\omega_t t + \phi) = \cos[\omega_t(t+T_t) + \phi]$ a $e^{(-\delta(t+T_t))} = e^{(-\delta t)} e^{(-\delta T_t)}$, dostaneme

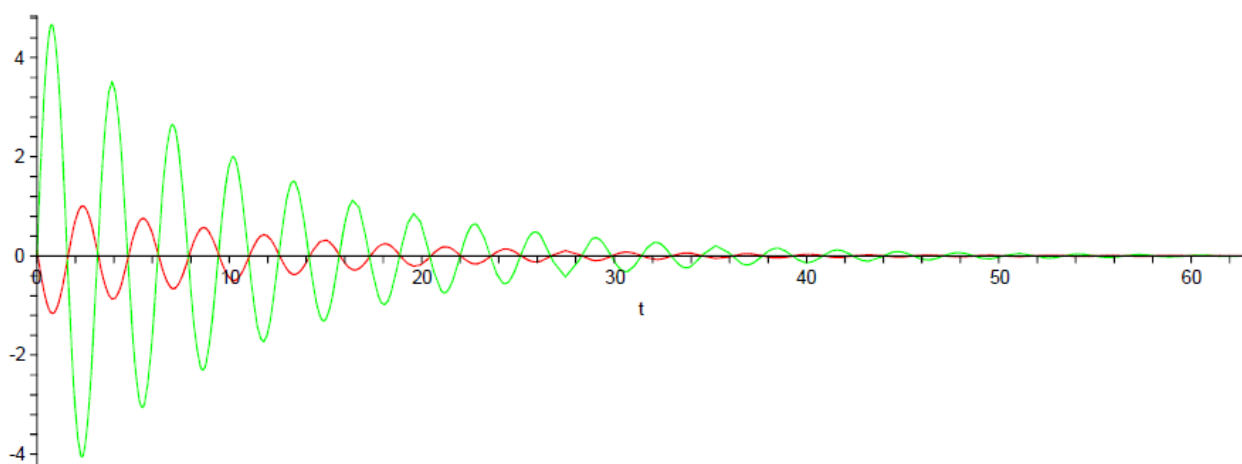
$$b_a = \frac{w_a e^{(-\delta t)} [(\delta^2 - \omega_t^2) \sin(\omega_t t + \phi) + 2 \delta \omega_t \cos(\omega_t t + \phi)]}{e^{(-\delta T_t)} w_a e^{(-\delta t)} [(\delta^2 - \omega_t^2) \sin(\omega_t t + \phi) + 2 \delta \omega_t \cos(\omega_t t + \phi)]} \rightarrow b_a = e^{(\delta T_t)} = b \quad (2.13)$$

Z rovnice (2.13) plyne zjištění, že pro určení útlumu výchylek kmitajícího táhla lze určit útlum ze změřeného záznamu zrychlení z akcelerometru. Zároveň z rovnice (2.6) vyplývá, že kruhová frekvence zrychlení je stejná jako u průběhu výchylky, proto lze tyto frekvence určit přímo ze záznamu zrychlení. Průběh výchylek a zrychlení se ve velikosti amplitud a průběhy jsou fázově posunuty o 180° (π rad).

Výše uvedené shrnutí je zobrazeno na příkladu v programu Maple.

```
> plot([eval(A*exp(-delta*t)*(2*omega*delta*cos(omega*t+phi)-omega^2*sin(omega*t+phi)+delta^2*sin(omega*t+phi))/(delta^2+omega^2)^2,{delta=.09,omega=2.,phi=0,A=5.}),eval(A*exp(-delta*t)*sin(omega*t+phi),{delta=.09,omega=2.,phi=0,A=5.})],t=0..20*Pi);
```

Zelená barva je průběh zrychlení, červená je průběh výchylky.



Obr.1.6 Zadání a zobrazení průběhu výchylek a zrychlení tlumeného kmitání

3. Filtrace vlastních frekvencí

3.1.1 Extrakce vlast. módů ze záznamu naměřených dat akcelerometru

Cílem této kapitoly je nalézt a porovnat metody extrakce průběhu jednotlivých vlastních frekvencí (módů) dynamického systému měřeného akcelerometrem. Jednotlivé vlastní frekvence jsou známy (vypočteny např. FFT) a jsou vstupem pro extrakci jednotlivých průběhů vlastních frekvencí. Tyto průběhy pak slouží k dalšímu zpracování, např. výpočtu útlumu jednotlivých módů, nebo k ověření dynamického modelu měřeného systému.

3.1.2 Popis a postup řešení zadání

Metody jsou testovány na vygenerovaném souboru dat, kde jsou známy jednotlivé frekvenční složky a jejich útlumy. Výsledky jsou porovnávány jednak „vizuálně“ na výstupech z grafu, kde jsou vykresleny současně a jednak podle vypočteného útlumu a porovnáním se skutečným útlumem z původních složek generovaného vzorku dat.

Pro extrakci jednotlivých vlastních frekvencí byly zvoleny tyto metody:

- FFT filtr s váhovacím oknem
- Hilbert – Huangova transformace
- Modální dekompozice pomocí Kalmanova filtru

Útlum je vypočítán z průběhu obálky metodou nejmenších čtverců pro exponenciální průběh. Obálka je nalezena jako spojnice bodů lokálních maxim s využitím znalosti frekvence (periody), kdy další lokální maximum je hledáno v oknu o velikosti jedné nebo několika period, přičemž po nalezení maxima se okno posune o půlku periody za nalezené maximum.

Volbou velikosti okna se určuje „hladkost“ nalezené obálky. Obálka se hledá v první třetině průběhu nalezené vlastní frekvence, přičemž hledání začíná až po odeznění přechodných jevů v průběhu. Délka vynechaného záznamu se zadává procentem z celkového počtu vzorků záznamu.

Průběhy obálky a teoretické exponenciály jsou vykresleny v grafech spolu s průběhy nalezených vl. frekvencí.

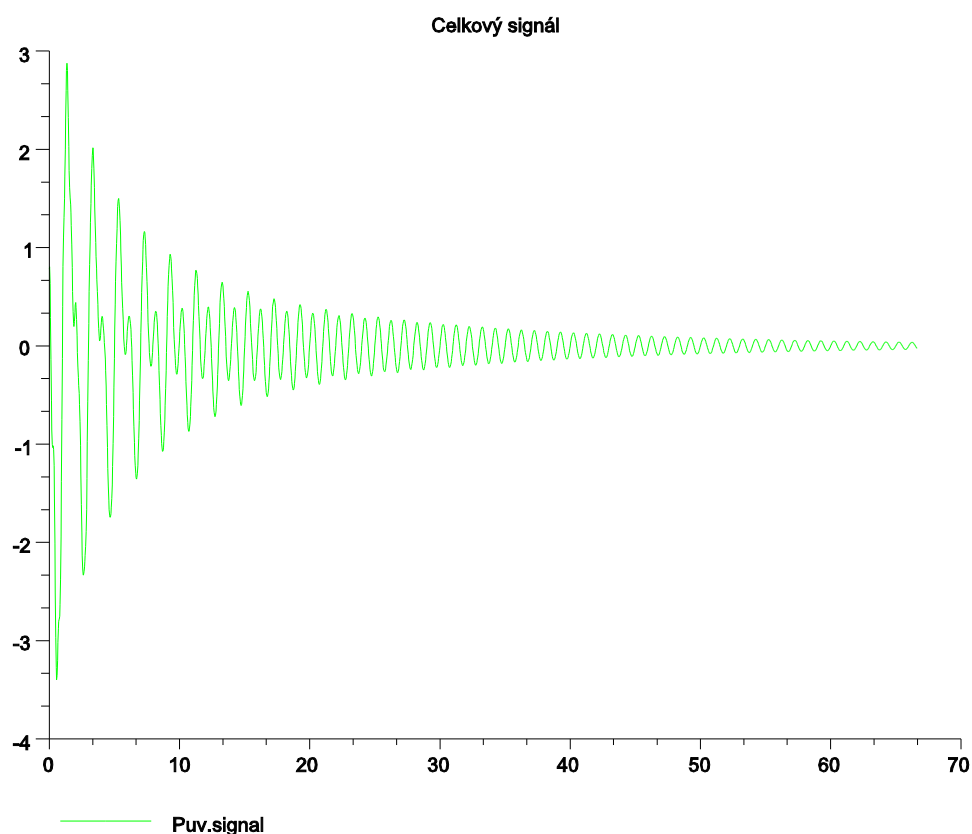
Dále v textu jsou popsány jednotlivé metody filtrace.

3.2 Filtr FFT s váhovacím oknem

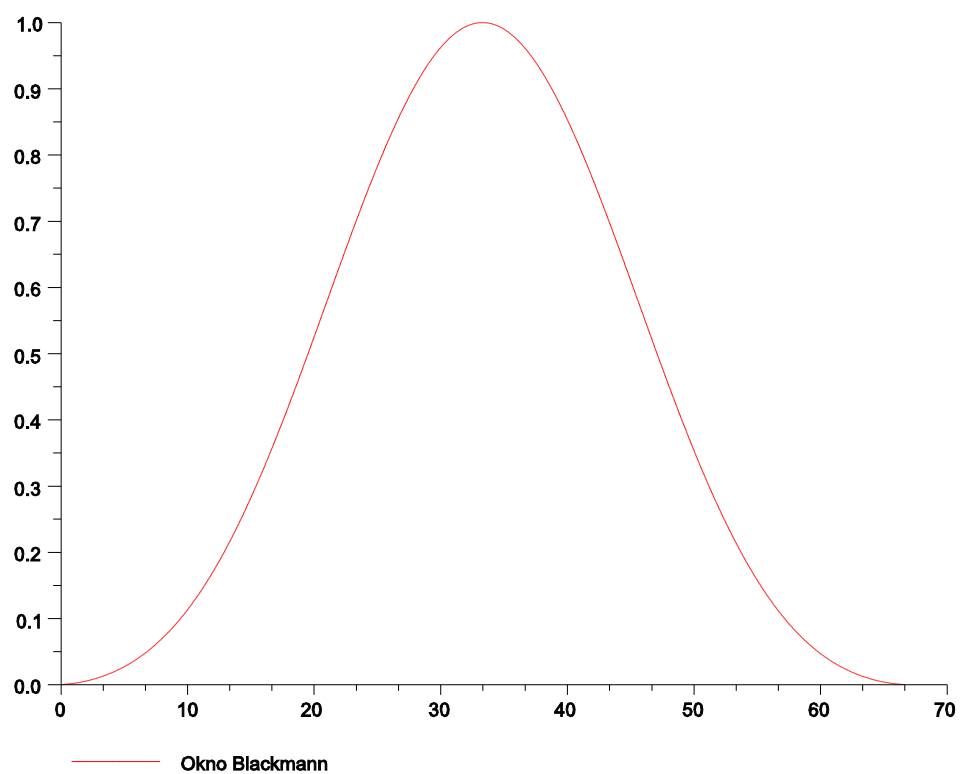
3.2.1 Princip filtrace

Filtrace pomocí Fourierovy transformace při použití váhovací funkce (okna) probíhá v následujícím postupu:

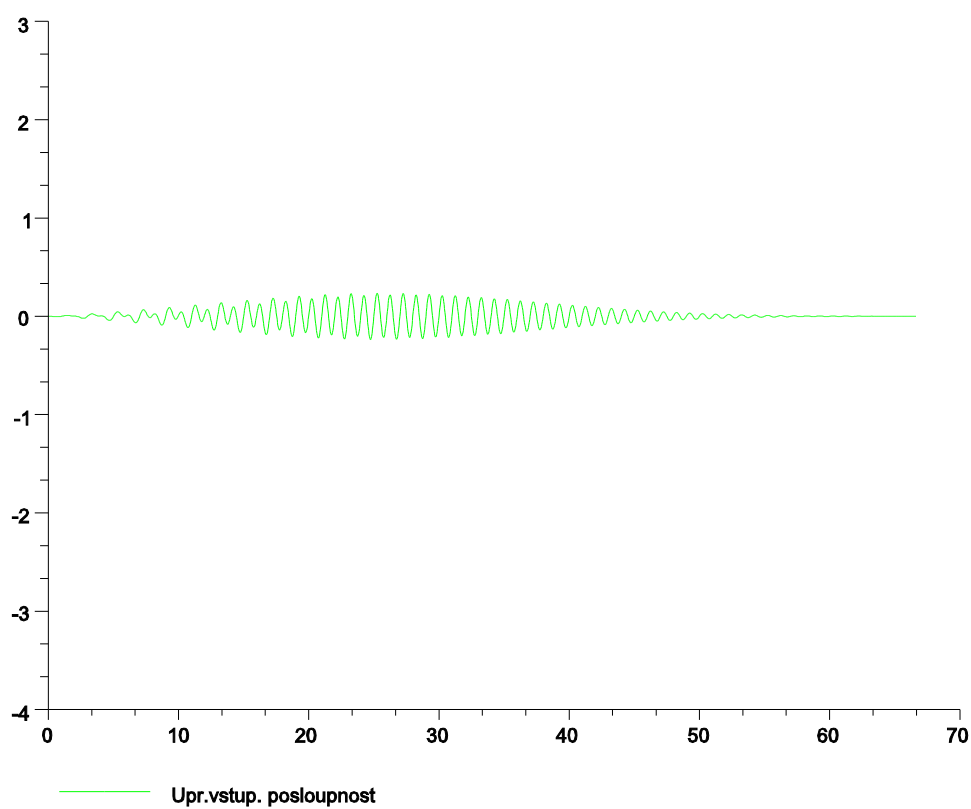
- vstupní posloupnost (obr.3.1) se vynásobí váhovacím oknem (obr.3.2)
- pro takto upravenou posloupnost (obr. 3.3) se vypočítá průběh FFT (obr.3.4)
- z komplexní posl. FFT se symetricky vynulují veškeré nežádoucí frekvence (obr.3.5)
- vypočítá se zpětná FFT (obr.3.6)
- získaná posloupnost se vydělí váhovacím oknem (obr.3.7)



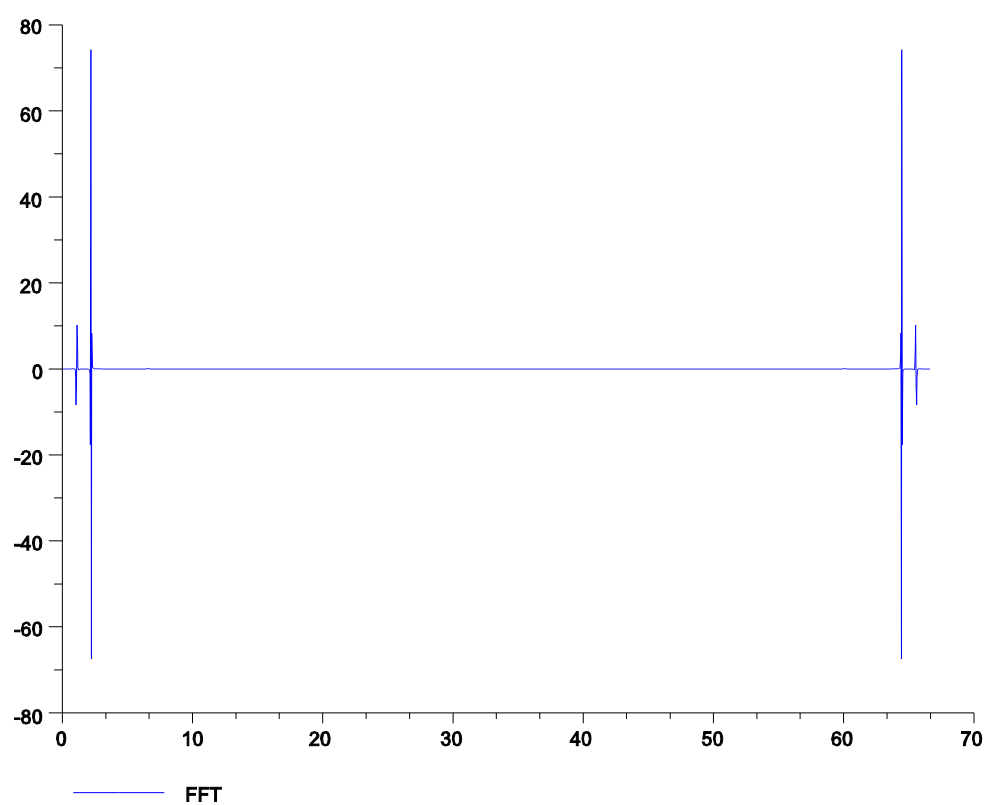
Obr. 3.1 – Průběh původního signálu



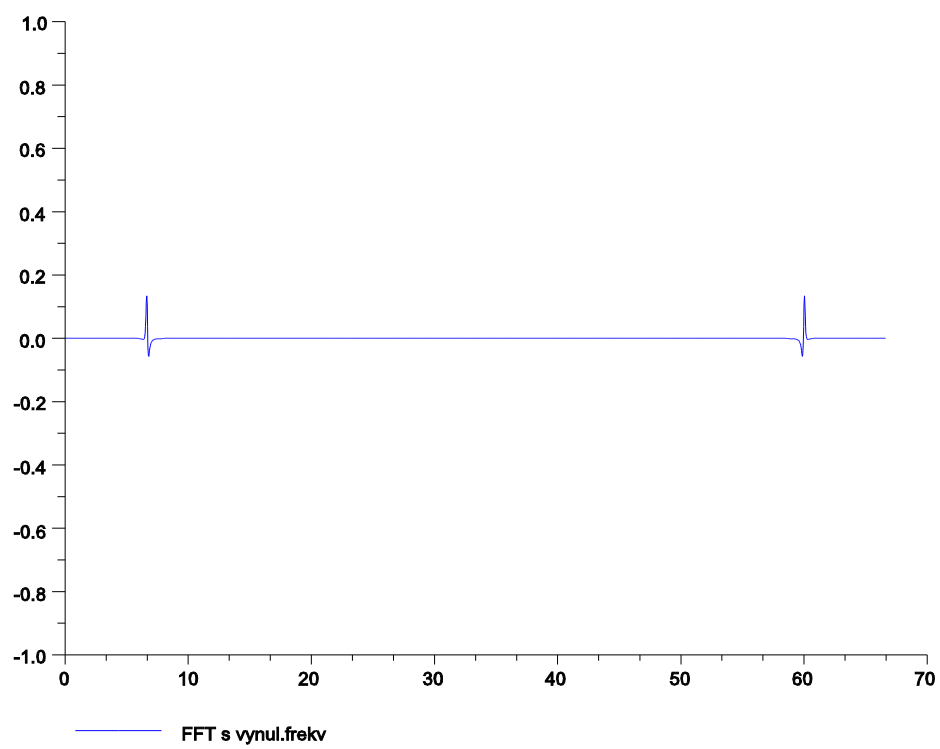
Obr. 3.2 – Modifikované Blackmanovo okno



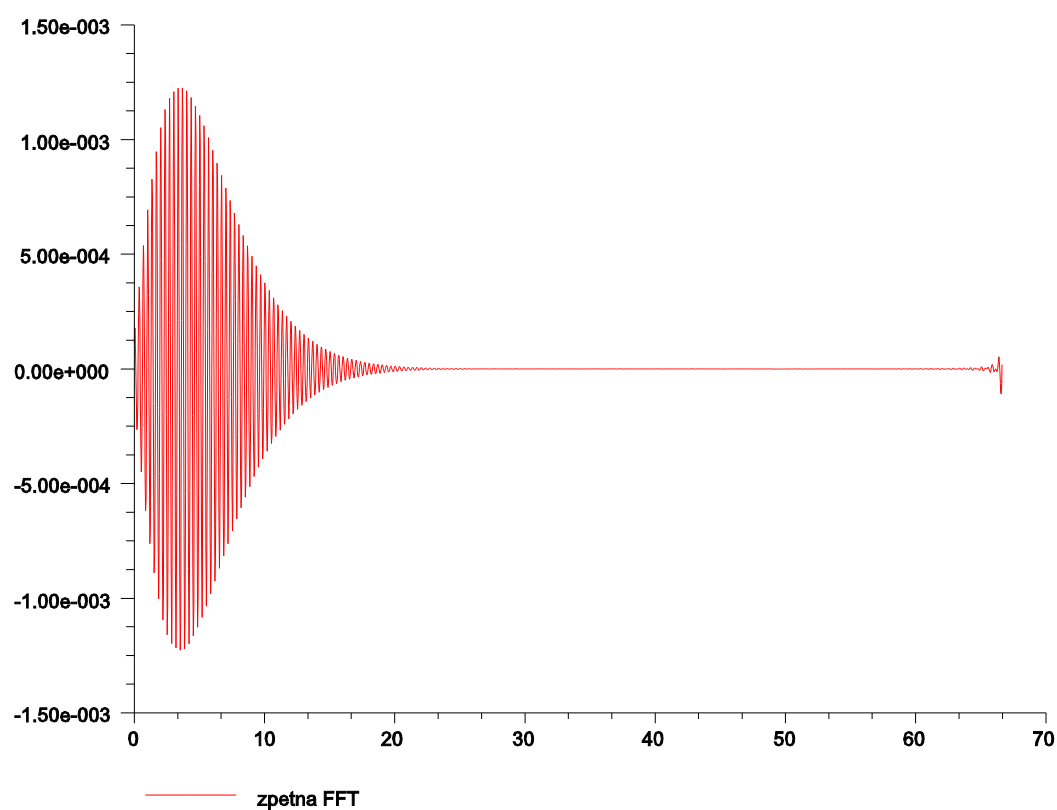
Obr. 3.3 – Původního signál vynásobený Blackmanovým oknem



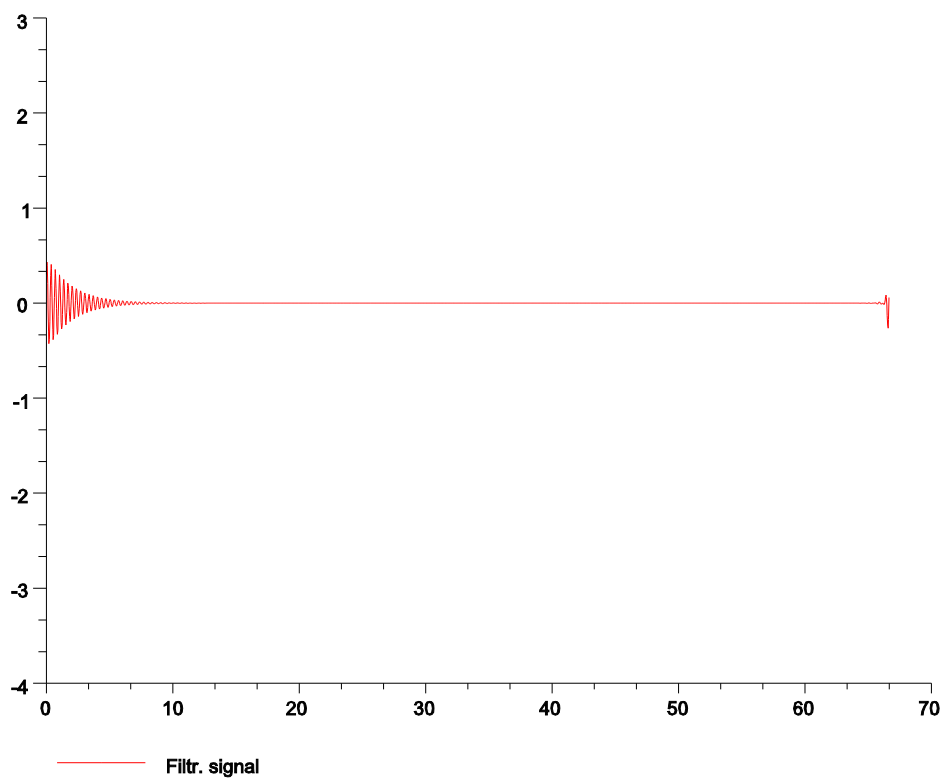
Obr. 3.4 – zobrazení FFT



Obr. 3.5 – FFT s vynulovanými frekvencemi (80x zvětšeno)



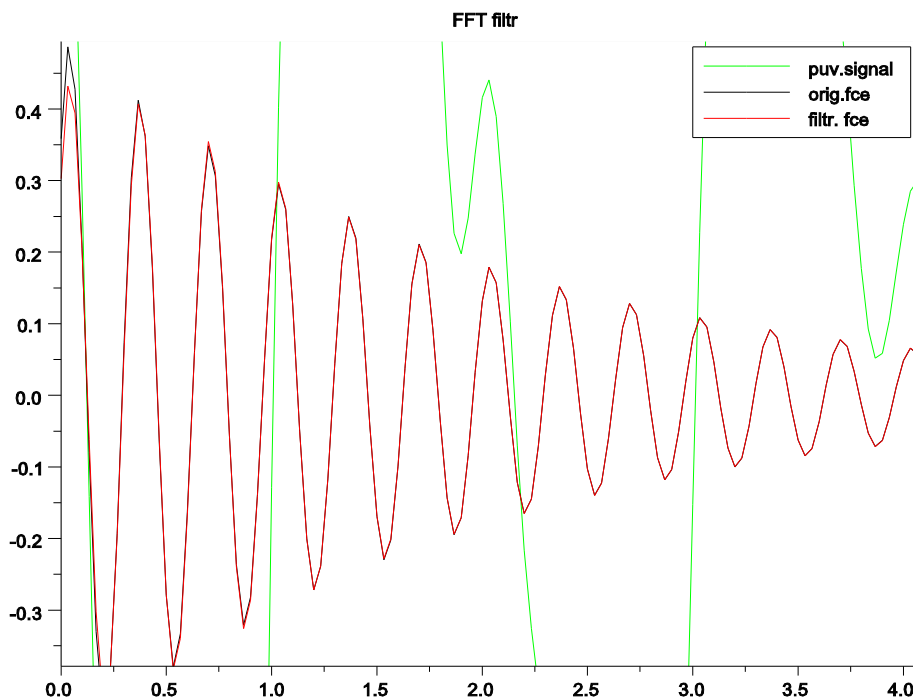
Obr. 3.6 – zobrazení zpětné FFT (zvětšeno)



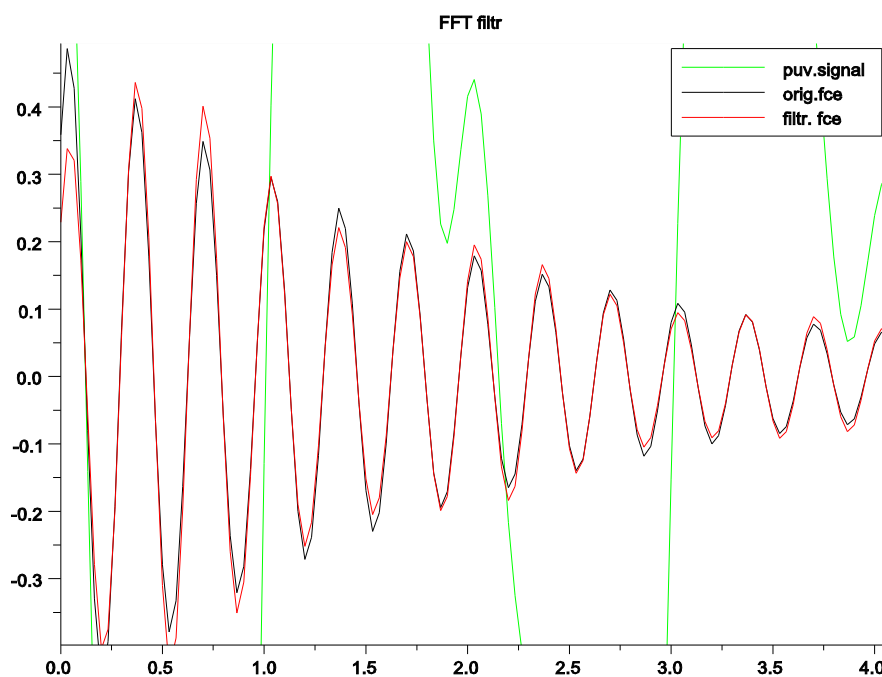
Obr. 3.7 – výsledný vyfiltrovaný signál

3.2.2 Porovnání filtrované funkce s původní frekvenční složkou

Pro porovnání vlivu okna na FFT filtraci pás. propust bylo zvoleno Blackmanovo okno s modifikací 1%. Na obr. 3.8 je porovnání průběh vyfiltrovaného signálu s původní frekv. složkou při použití modifikovaného okna. Na obr. 3.9 je porovnání průběhů bez použití okna.



Obr. 3.8 – porovnání průběhu sig. s použitím okna (výřez)



Obr. 3.9 – porovnání průběhu sig. bez použití okna (výřez)

3.2.3 Modifikované váhovací okno

Standardní definice váhovacích oken používaných při zpracování signálů je následující: [05]

$$f(k) = a - b \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + c \cdot \cos\left(\frac{4\pi k}{N}\right), \text{ pro } 0 \leq k \leq N$$

Okno	Parametr	a	b	c
Pravoúhlé	'Box'	1,00	0,00	0,00
Hannovo	'Hann'	0,50	0,50	0,00
Hammingovo	'Hamm'	0,54	0,46	0,00
Blackmanovo	'Black'	0,42	0,50	0,08

Vzhledem k tomu, že jsou hodnoty průběhu váhovacích oken používány k inverzní operaci dělení, je nutné modifikovat hodnoty průběhu oken tak, aby nedocházelo k dělení nulou nebo hodnotami způsobujícími nestabilitu numerického výpočtu a tím i zkreslení výsledného průběhu signálu.

Jedna z možných modifikací je následující:

$$f(k) = a - b \cdot \cos\left(2\pi \frac{k+p}{N+2p}\right) + c \cdot \cos\left(4\pi \frac{k+p}{N+2p}\right), \text{ pro } 0 \leq k \leq N$$

Kde p je počet bodů který se symetricky přidá na obou koncích k původnímu počtu bodů, spočítá se průběh okna a hodnoty pro přidané body se odstraní. Parametr p se vypočítá z počtu fiktivních bodů na 100 bodů, tj. v %.

Ve výše uvedených grafech je použito okno typu Blackman s parametrem p vypočteným ze zadáním 1 % z N bodů.

3.3 Hilbert – Huangova transformace

3.3.1 Popis filtrace

Tato metoda pracuje na základě hledání vlastních modálních funkcí označovaných IMF (Intrinsic Mode Funktion). Tyto vlastní modální funkce musí splňovat dle [02] tyto fyzikální podmínky:

- funkce jsou symetrické vzhledem k lokální hladině nulové střední hodnotě
- funkce mají stejný počet průchodů nulou a počet extrémů
- v celém souboru dat se musí počet extrémů a počet průchodů nulou rovnat, nebo se lišit maximálně o jeden.
- V každém okamžiku je střední hodnota obálky definované lokálními maximy a obálky definované lokálními minimy

Postup rozkladu na IMF funkce probíhá následovně:

- nalezení extrémů (mezi průchody nulou)
- proložení kubickými splajny (maxima-horní/ minima-dolní obálka)
- nalezení střední hodnoty horní/dolní obálky (kandidát na IMF)
- odečtení nalezeného kandidáta IMF a opakování postupu do naplnění kritéria

- odečtení nalezené IMF a opakování postupu
- výpočet okamžité frekvence pro každou IMF
- porovnání nalezené frekvence s hledanou frekvencí → výsledná složka

Tato metoda je implementována za pomoci funkcí *emd.m* a *findpeaks.m* z Toolboxu Hilbert Huang transformace, získané z www.mathworks.com

3.4 Modální dekompozice pomocí Kalmanova filtru

3.4.1 Popis filtrace

Dle [06] se pro diskretní Kalmanův filtr vytvoří model rezonátoru na základě známých frekvencí spektra (získaných např. pomocí FFT). Jednotlivé matice modelu jsou sestaveny následovně:

- Stavová matice
$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & A_n \end{bmatrix}, \text{ kde } A_n = \begin{bmatrix} \cos(h \cdot \omega_n) & \sin(h \cdot \omega_n) \\ -\sin(h \cdot \omega_n) & \cos(h \cdot \omega_n) \end{bmatrix}, \text{ kde}$$

 $h = \text{perioda vzorkování a } \omega_n = 2\pi f_n, f_n \text{ je vlastní frekvence}$

- Výstupní matice $C = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 1 \ 0], (1 \times 2n)$

- Stavový šum $G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_n \end{bmatrix}, (2n \times 1)$ a šum měření $R = [R], (1 \times 1)$

Kalmanova filtrace probíhá v těchto fázích:

- definice počátečních podmínek – G a R
- výpočet počátečního Kalmanova zisku $K(0)$
- výpočet počáteční kovariační matice P
- odhad počátečního stavu $x(0)$ tak aby platilo $y(0) = C \cdot x(0)$ pro omezení překmitů, jelikož celkový výstup y_v (součet modálních funkcí) ihned sleduje vstup

Výpočet probíhá v cyklu následujícími kroky:

- výpočet stavu $x(k+1) = A \cdot x(k) + K(k) \cdot (y(k) - (C \cdot x(k)))$, kde $y(k)$ je vstup
- korekce kovariační matice $P(k+1) = A \cdot P(k) \cdot A^T + G \cdot G^T - K(k) \cdot (C \cdot P(k) \cdot A^T + R \cdot G^T)$
- korekce Kalmanova zisku $K(k) = (A \cdot P(k) \cdot C^T + G \cdot R^T) \cdot (C \cdot P(k) \cdot C^T + R \cdot R^T)^{-1}$
- výstup složek $y_v(k+1) = C \cdot x(k+1)$

3.5 Testování jednotlivých metod

3.5.1. Testovací signál

Testovací signál se skládá ze tří tlumených sinusových průběhů, kde jsou frekvence navzájem sudými a lichými násobky frekvencí, s různými amplitudami, různým tlumením a nulovou střední hodnotou. Jednotlivé složky $y_i = A_i \cdot \sin(2\pi f_i + \phi) \cdot e^{(-kx)}$ jsou generovány s těmito parametry:

$$y_1 = 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 1 + 0) \cdot e^{(-\frac{1}{20}x)}$$

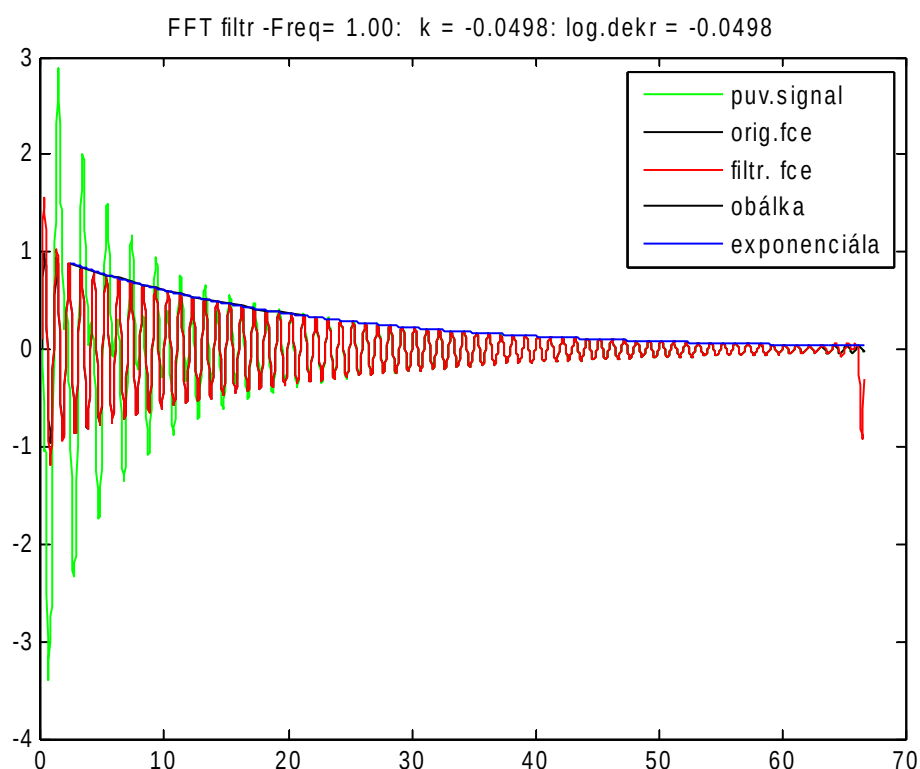
$$y_2 = 3 \cdot \sin(2\pi \cdot 0.5 + 3) \cdot e^{(-\frac{1}{5}x)}$$

$$y_3 = 0.5 \cdot \sin(2\pi \cdot 3 + .8) \cdot e^{(-\frac{1}{2}x)}$$

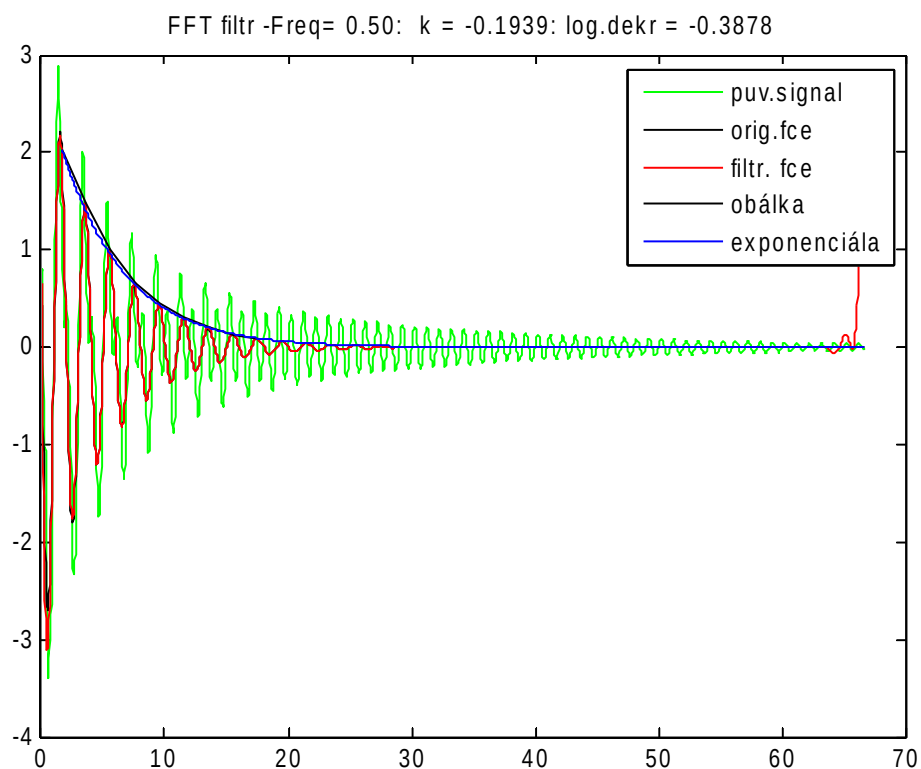
Frekvence vzorkování je $f_{vz} = 30 \text{ Hz}$, délka vygenerovaného signálu je 2000 vzorků.

3.5.2. FFT filtrace s váhováním

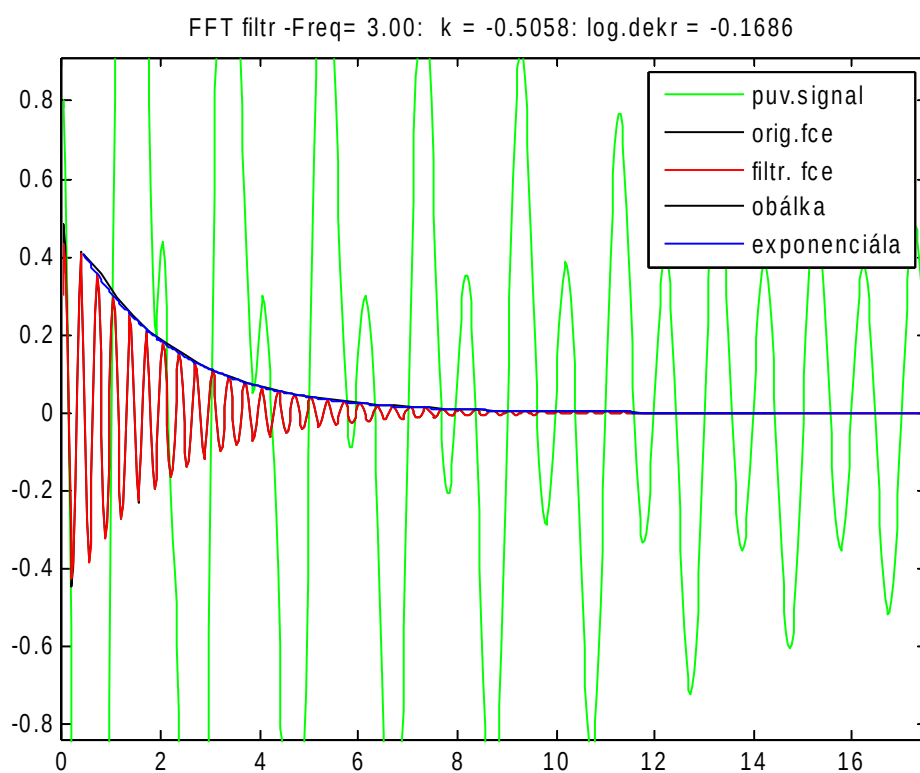
Testováno scriptem test_fft_filtru.m



Obr. 3.10 – FFT filtrace složka y_1



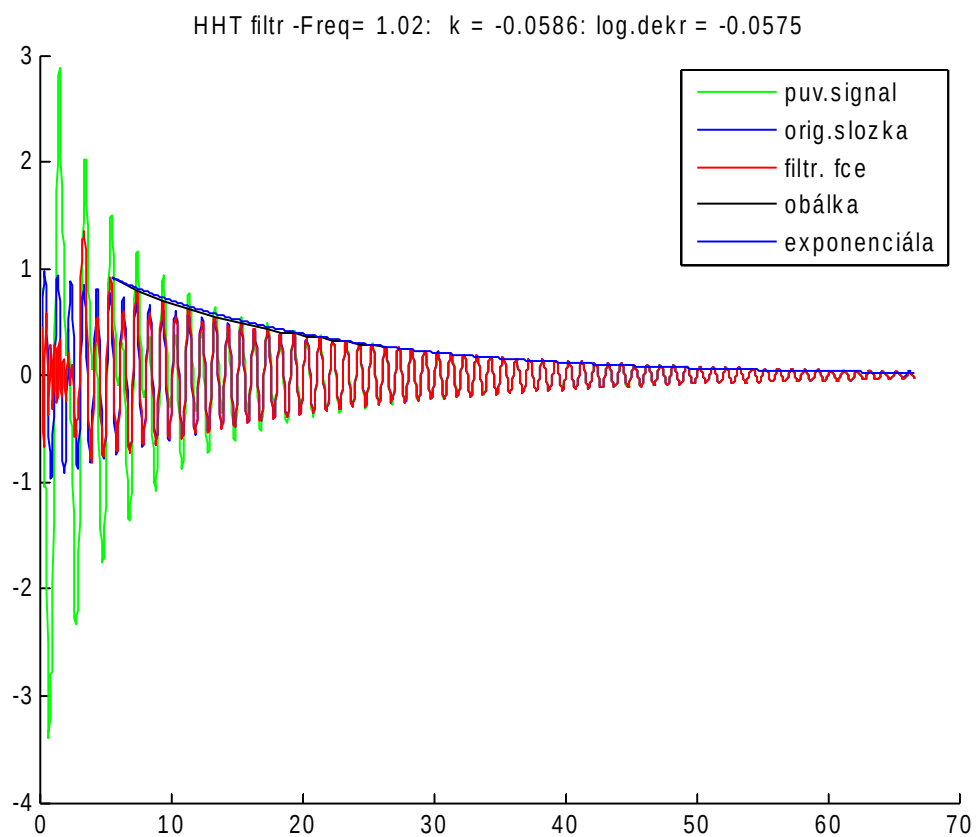
Obr. 3.11 – FFT filtrace složka y2



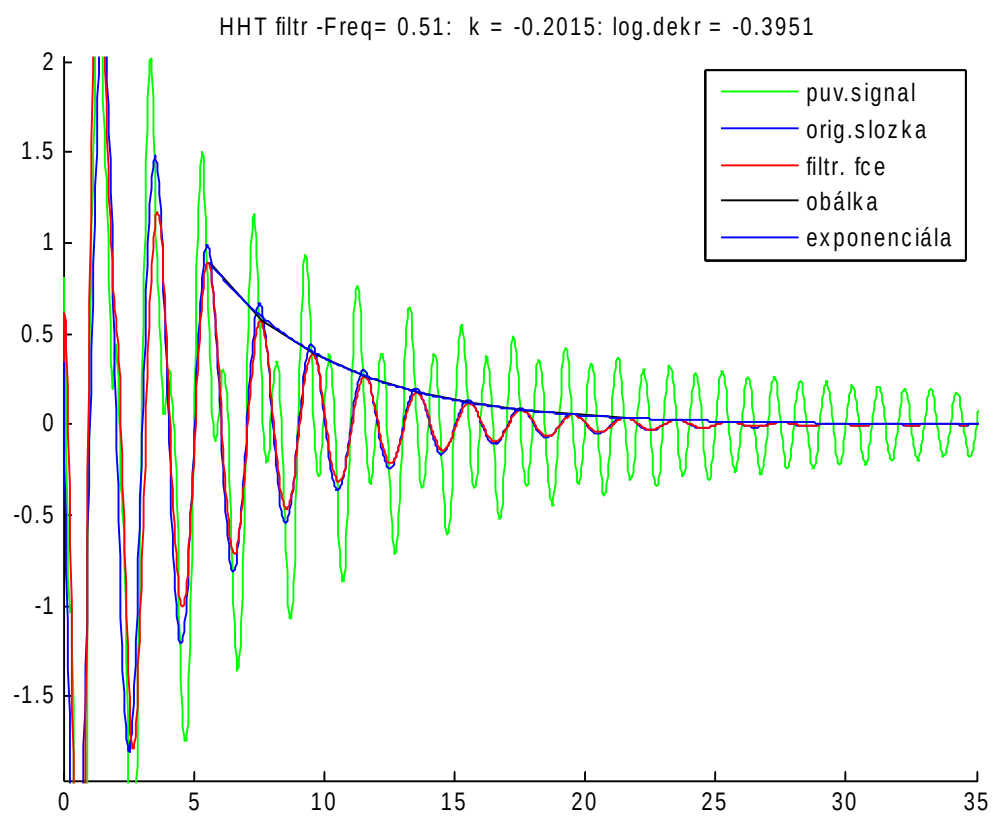
Obr. 3.12 – FFT filtrace složka y3 (zvětšeno)

3.5.3. Hilbert – Huangova transformace

Testováno scriptem test_HH.m



Obr. 3.13 – HHT filtrace složka y1

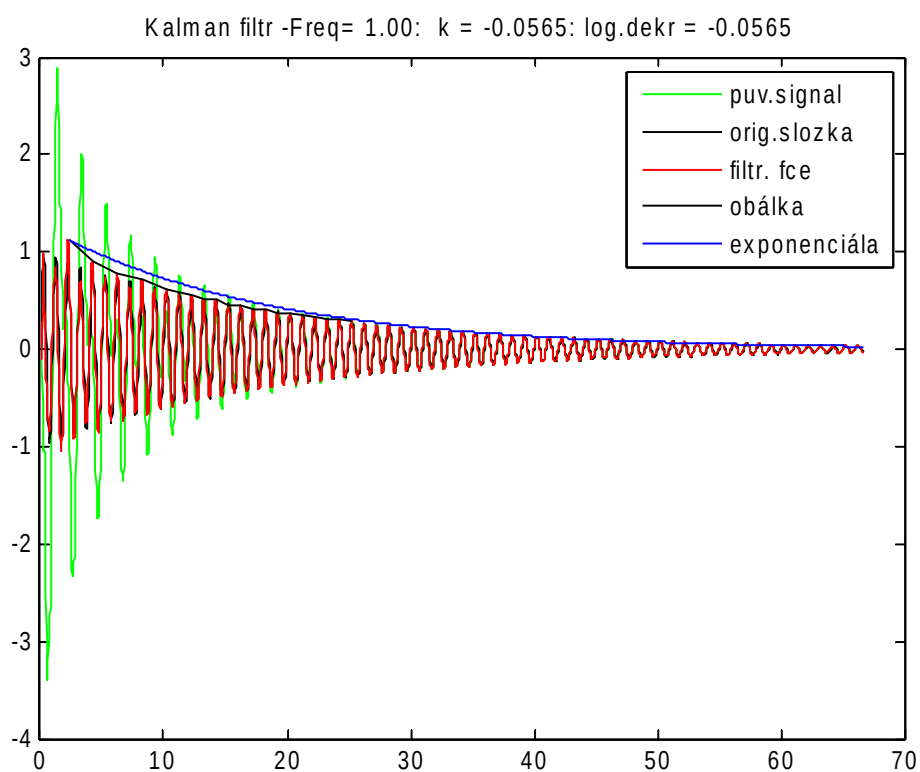


Obr. 3.14 – HHT filtrace složka y2

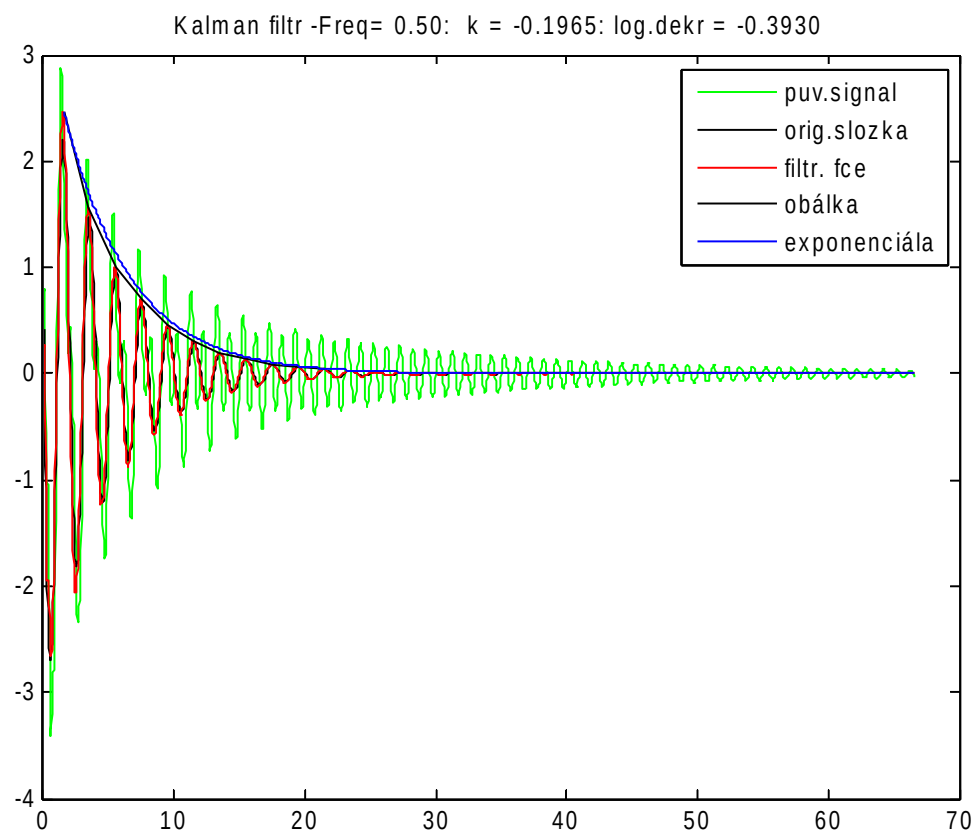
Složka y_3 nebyla nalezena, jelikož vstupní signál nesplňuje podmínku počtu průchodu nulou rovnou počtu extrémů. Jednotlivé složky signálu byly vybrány tak, aby tyto podmínku nesplnily pro ověření nutnosti této podmínky.

3.5.4. Kalmanova filtrace

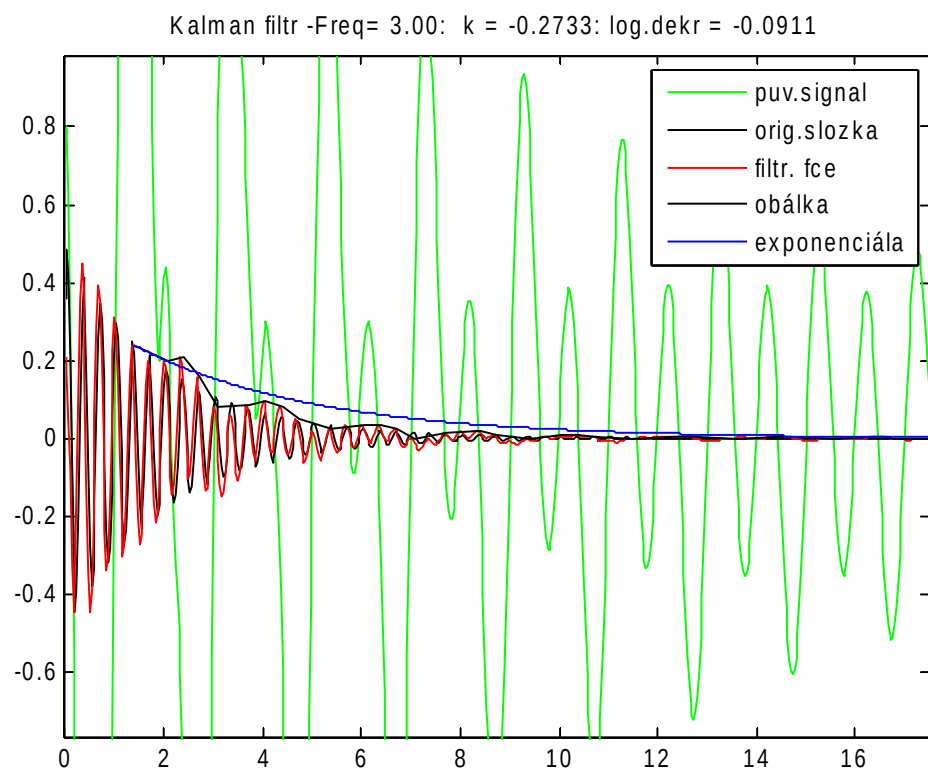
Testováno scriptem test_Kalman.m. Odhad počáteční chyby “měření” dat $R = 0.0000001$, odhad prvků matice šumu vnitřního stavu $G_i = 0.0000001$.



Obr. 3.15 – Kalmanova filtrace složka y_1



Obr. 3.16 – Kalmanova filtrace složka y2



Obr. 3.17 – Kalmanova filtrace složka y3

3.6. Porovnání filtrovacích metod

Z výše uvedených grafů vyplývá, že tento konkrétní signál nejlépe vyhodnotila metoda FFT filtru s váhováním, Kalmanova filtrace poměrně zkreslila složku y3 a Hilbert – Huangova transformace nenašla vůbec složku y3. Tento závěr dokresluje tabulka porovnání vypočtených parametrů útlumu k.

	Teoretic. k	FFT filtrace - k	HHT filtrace - k	Kalman - k
Složka y1	$-1/20 = -0,05$	-0,0498	-0,0586	-0,0565
Složka y2	$-1/5 = -0,2$	-0,1939	-0,2015	-0,1965
Složka y3	$-1/2 = -0,5$	-0,5058	nenalezeno	-0,2733

3.7. Výpis filtrovacích funkcí v MATLABU

```
test_FFT_filtru.m
%% Generování testovacích funkcí
clear all;
f_vz = 30; %% vzorkovací frekvence Hz
poc_bodu = 2000; %% počet vygenerovaných vzorků
x=(0:1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz); %% rozsah generování průběhů
y1=sin(2*pi*1*x).*exp(-x/20); %% jednotlivé funkce
y2=3*sin(2*pi*.5*x+3).*exp(-x/5);
y3=.5*sin(2*pi*3*x+.8).*exp(-x/2);
yf=y1+y2+y3; %% součet funkcí
%%-----
%% "Šířka pásma" je volena jako max vzd. do půlky k nejbližší frekvenci
y_fil=fft_fil(yf,'Black',1.0,3,1.25,f_vz); %%FFT filtr pr 3 Hz
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(y_fil,0.5,f_vz,3.0);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
clf();
plot(x,yf,'green',x,y3,'black',x,y_fil,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('FFT filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.fce','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;
%%-----
y_fil=fft_fil(yf,'Black',1.0,.5,0.3,f_vz); %%FFT filtr pr 0.5 Hz
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(y_fil,2.5,f_vz,0.5);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
figure;
plot(x,yf,'green',x,y2,'black',x,y_fil,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('FFT filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.fce','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;
%%-----
y_fil=fft_fil(yf,'Black',1.0,1.0,0.25,f_vz); %%FFT filtr pr 1.0 Hz
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(y_fil,2.5,f_vz,1.0);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
figure;
```

```

plot(x,yf,'green',x,y1,'black',x,y_fil,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl = (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('FFT filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.fce','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;

```

fft_fil.m

```

function y_fil=fft_fil(y,okno_type,proc,f_a,s_pasma,fs)
%% y_fil = vysledek filtrace
%% y      = vstupní vektor
%% okno_type = typ okna
%% proc = procentuální roztažení okna [%]
%% f_a = frekvence - střed pásmové propusti [Hz]
%% s_pasma = šířka pásma [Hz]
%% fs = vzorkovací frekvence [Hz]
N = length(y); %% počet bodů
f_okno = fenster1(N,okno_type,proc); %% vypočte upravené okno
f_bin = 1/N*fs; %% frekvenční bin
y_okno = y.*f_okno; %%posloupnost vynásobí oknem
f2 = fft(y_okno); %% Fourierova transformace
in1_frekw = round(f_a/f_bin); %% vypočte index ve fft vektoru
in2_frekw = N-in1_frekw; %% vypočte index pro zrcadlovou frekvenci
okno = round(s_pasma/2/f_bin); %% polovina š.pásma ve fr.bínech (bodech)
sprintf('Okno=%i',okno)
%% vymazání všeho kromě "frekvence" s "šířkou pásma" okno*2+1
f2a = f2(in1_frekw-okno:in1_frekw+okno);
f2b = f2(in2_frekw-okno:in2_frekw+okno);
f2(:)=0;
f2(in1_frekw-okno:in1_frekw+okno)=f2a;
f2(in2_frekw-okno:in2_frekw+okno)=f2b;
y51=ifft(f2); %% zpětná DFT transformace
y_fil = y51./f_okno; %% zpětné vynásobení výsledku oknem
end

```

fenstr1.m

```

function v_vec=fenster1(n,f_type,proc)
%% funkce pro vypocet vahovych posloupnosti okna
%% n = počet bodu,
%% f_type = je typ okna
%% proc = počet bodů v % pro "oříznutí" krajů
%% obdelnikove okno
a=1;b=0;c=0;
if strcmp(f_type, 'Hann')
a=.5;b=.5;c=0;
end
if strcmp(f_type, 'Hamm')
a=.54;b=.46;c=0;
end
if strcmp(f_type, 'Black')
a=.42;b=.5;c=0.08;
end
p=ceil(n/100.*proc); %% výpočet procent na body
nn=n+2.*p;
v_vec(n)=0;
for k=1:n
v_vec(k) = a-b*cos(2*pi*(k+p)/nn) + c*cos(4*pi*(k+p)/nn);
end
end
end

```

najdiUtlum.m

```

%% funkce pro nalezení obálky a výpočet tlumení
function [Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] =
najdiUtlum(y_fil,orez,vz_fr,fr1)
%% Parametry:
    %% y_fil - vstupní průběh vyfiltrované frekvence Hz
    %% orez - oříznutí vstupních dat na obou koncích v %
    %% vz_fr - vzorkovací frekvence Hz
    %% fr_1 - frekvence vyfiltrovaného průběhu v Hz
%% nalezení horní obálky jednotlivé frekvence
%%orez=1.5; %% oříznutí počátku a konce dat v %
nrOfPoints = length(y_fil); %% počet bodů
y_fil = real(y_fil); %% pouze reálná část
bod_i=round(nrOfPoints*orez/100); %% počet bodů k oříznutí
y_prum=mean(y_fil); %% prumer stejnosm složka
[hodnota,i]=max((y_fil(bod_i:(nrOfPoints-bod_i)))); %% nalezení maxima
pulperioda = round(vz_fr/fr1/2); %% polovina periody v bodech
maxindexy = [(i+bod_i)]; %% první nalezený index s maximem
maxvalue = [hodnota]; %% první nalezené maximum
nextsearch = maxindexy+pulperioda; %% počátek dalšího hledání
while nextsearch < (nrOfPoints-bod_i-pulperioda*6),
    [nhod,ni] = max(y_fil(nextsearch:(nextsearch+pulperioda*4)));
    ni = ni + nextsearch;
    maxindexy = [maxindexy ni]; %% další nalezený index s maximem - x
    maxvalue = [maxvalue nhod]; %% další nalezené maximum - y
    nextsearch = ni+pulperioda; %% počátek dalšího hledání

end
maxindexy = maxindexy(1:round(length(maxindexy)/3));
maxvalue = maxvalue(1:round(length(maxvalue)/3));
maxvalue = (maxvalue - y_prum);
%%-----
%% nalezení exponenciály metodou nejmenších ?tverc?
maxval_ln = log(maxvalue); %% logaritmické hodnoty y
n=length(maxvalue); %% počet bod? obálky
s_x = sum(maxindexy); %% suma x
s_y = sum(maxval_ln); %% suma y
s_xx = sum(maxindexy.^2); %% suma x^2
s_xy = sum(maxindexy.*maxval_ln); %% suma x*y
%%y(x)=Ak * exp(k*x)
k = (n*s_xy-s_x*s_y)/(n*s_xx-s_x*s_x); %% parametr k
ln_Ak = (s_xx*s_y-s_x*s_xy)/(n*s_xx-s_x*s_x); %%
Ak=exp(ln_Ak);
text = sprintf('Freq= %1.2f: k = %1.4f: log.dekr = %1.4f\n',
fr1,k*vz_fr,k/fr1*vz_fr);
maxvalue = (maxvalue + y_prum);
maxindexy = maxindexy/vz_fr;
end

```

test_HH.m

```

%% test Hilbert-Huang transformace
%% Generování testovacích funkcí
clear all;
f_vz = 30; %% vzorkovací frekvence Hz
poc_bodu = 2000; %% počet vygenerovaných vzorků
x=(0:1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz); %% rozsah generování průběhů
y1=sin(2*pi*1*x).*exp(-x/20); %% jednotlivé funkce
y2=3*sin(2*pi*.5*x+3).*exp(-x/5);
y3=.5*sin(2*pi*3*x+.8).*exp(-x/2);
yy = {y1 y2 y3}; %% pomocné pole pro vykreslení
yf=y1+y2+y3; %% součet funkcí
toler = 0.25; %% tolerance nalezené frekvence
hl_freq = [1 0.5 3]; %% hledané známé frekvence
%%-----

```

```

imf = emd(yf); %% získání HHT.
N = length(yf); %% počet vzorků
f_bin = 1/N*f_vz; %% frekvenční bin
imk(1:length(imf),1:length(yf))=0; %% alokace matice
clf();
for k = 1:length(imf) %% přes všechny nalezené mody
    imk(k,:) = imf{1,k}(:)'; %% rozebrání cell
    ff = fft(imk(k,:)); %% Fourierova transformace
    [hod, index] = max(ff(2:round(N/2))); %% nalezne max v 1/2 FFT (bez SS)
    freq = f_bin*(index+1); %% vypočte frekvenci z nalezeného maxima
    je = 0;
    for i = 1:length(hl_freq) %% přes všechny hledané frekvence
        if and(freq>(hl_freq(i)-toler), freq<(hl_freq(i)+toler))
            je = 1; %% je nalezena hled. frekv. v tolerančním pásmu
            ind = i; %% index nalezené fr.
        end
    end
    if je==1 %% vykreslení nalezených frekvencí a výpočet tlumení
        [Ak ktl y_prum maxindexy maxvalue text] =
najdiUtlum(imk(k,:),6,f_vz,freq);
        %%text = sprintf('k = %i: frekvence = %1.3f',k,freq);
        hold on;
        plot(x,yf,'green',x,yy{1,ind}
(:,),'blue',x,imk(k,:), 'red',maxindexy,maxvalue,'black');
        xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
        plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(ktl*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
        title(strcat('HHT filtr - ', text));
        legend('puv.signal','orig.slozka','filtr.
fce','obálka','exponenciála');
        hold off;
        figure;
        %%yf = yf-imk(k,:);
    end
end
end

```

```

test_Kalman.m

```

```

%% test Kalman filtru

```

```

%% Generování testovacích funkcí

```

```

clear all;
f_vz = 30; %% vzorkovací frekvence Hz
poc_bodu = 2000; %% počet vygenerovaných vzorků
x=(0:1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz); %% rozsah generování průběhů
y1=sin(2*pi*1*x).*exp(-x/20); %% jednotlivé funkce
y2=3*sin(2*pi*.5*x+3).*exp(-x/5);
y3=.5*sin(2*pi*3*x+.8).*exp(-x/2);
yf=y1+y2+y3; %% součet funkcí
%%toler = 0.25; %% tolerance nalezené frekvence
hl_freq = [1 0.5 3]; %% hledané známé frekvence
%% Sestavení matic Kalmanova filtru
h = 1/f_vz; %% perioda vzorkování
omega1 = hl_freq(1)*2*pi; %% definice hledaných kruhových frekvencí
omega2 = hl_freq(2)*2*pi;
omega3 = hl_freq(3)*2*pi;
%% definice bloků stavové matice
A1 = [cos(h*omega1) sin(h*omega1);-sin(h*omega1) cos(h*omega1)];
A2 = [cos(h*omega2) sin(h*omega2);-sin(h*omega2) cos(h*omega2)];
A3 = [cos(h*omega3) sin(h*omega3);-sin(h*omega3) cos(h*omega3)];
%% celkové matice stavové rovnice a počáteční podmínk
E2 =[0 0;0 0];
A = [A1 E2 E2;A2 E2 E2;A3]; %% stavová matice
C = [1 0 1 0 1 0]; %% matice C pro výstup
R = 0.0000001; %% odhad chyby "měření" dat
%%Rd = 0.0001;
%%Rc = Rd^2;

```



```

Gd = 0.0000001; %% odhad stavového šumu
G = [Gd;Gd;Gd;Gd;Gd;Gd]; %% matice stavového šumu Gamma
H = eye(length(hl_freq)*2); %% pomocná matice
P = inv(H)*R* inv(H'); %% počáteční kovariační matice
px = yf(1)/length(hl_freq); %% pomocná proměnná pro odhad poč. stavu
yc(1:(length(yf)+0)) = 0; %% počáteční inicializace y (výstupu)
yc1(1:(length(yf)+0)) = 0; %% počáteční inicializace y1 (výstupu)
yc2(1:(length(yf)+0)) = 0; %% počáteční inicializace y2 (výstupu)
yc3(1:(length(yf)+0)) = 0; %% počáteční inicializace y3 (výstupu)
xs = [px;0;px;0;px;0];
K = (A*P*C'+G*R')*inv(C*P*C'+ R*R'); %% počáteční hodnota Kalmanova zisku
%% Výpočet pomocí Kalmanova filtru
for k = 1:length(yf) %% pro všechny naměřené vzorky
    xs = A*xs + K*(yf(k)-(C*xs)); %% výpočet x(k+1)
    P = A*P*A'+G*G'-K*(C*P*A'+R * G'); %% korekce kovarianční matice
    K = (A*P*C'+G*R')*inv(C*P*C'+ R*R'); %% oprava Kalmanova zisku
    yc(k) =C* xs; %% celkový výstup (pro kontrolu)
    yc1(k)= (xs(1,1)); %% výstup frekvence hl_freq(1)
    yc2(k)= (xs(3,1)); %% výstup frekvence hl_freq(2)
    yc3(k)= (xs(5,1)); %% výstup frekvence hl_freq(3)
end
%%-----
%% výpočet obálky a tlumení
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(yc3,2.0,f_vz,3.0);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
clf();
plot(x,yf,'green',x,y3,'black',x,yc3,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('Kalman filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.slozka','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;
%%-----
%% výpočet obálky a tlumení
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(yc2,2.0,f_vz,0.5);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
figure;
plot(x,yf,'green',x,y2,'black',x,yc2,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('Kalman filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.slozka','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;
%%-----
%% výpočet obálky a tlumení
[Ak k y_prum maxindexy maxvalue text] = najdiUtlum(yc1,2.0,f_vz,1.0);
%%-----
%% Vykreslení průběhu vyfiltrované frekvence + původní + celkové
figure;
plot(x,yf,'green',x,y1,'black',x,yc1,'red',maxindexy,maxvalue,'black');
hold on;
xpl= (maxindexy(1):1/f_vz:(poc_bodu-1)/f_vz);
plot(xpl,(maxvalue(1))*exp(k*(xpl-maxindexy(1))*f_vz),'blue');
title(strcat('Kalman filtr - ', text));
legend('puv.signal','orig.slozka','filtr. fce','obálka','exponenciála');
hold off;

```

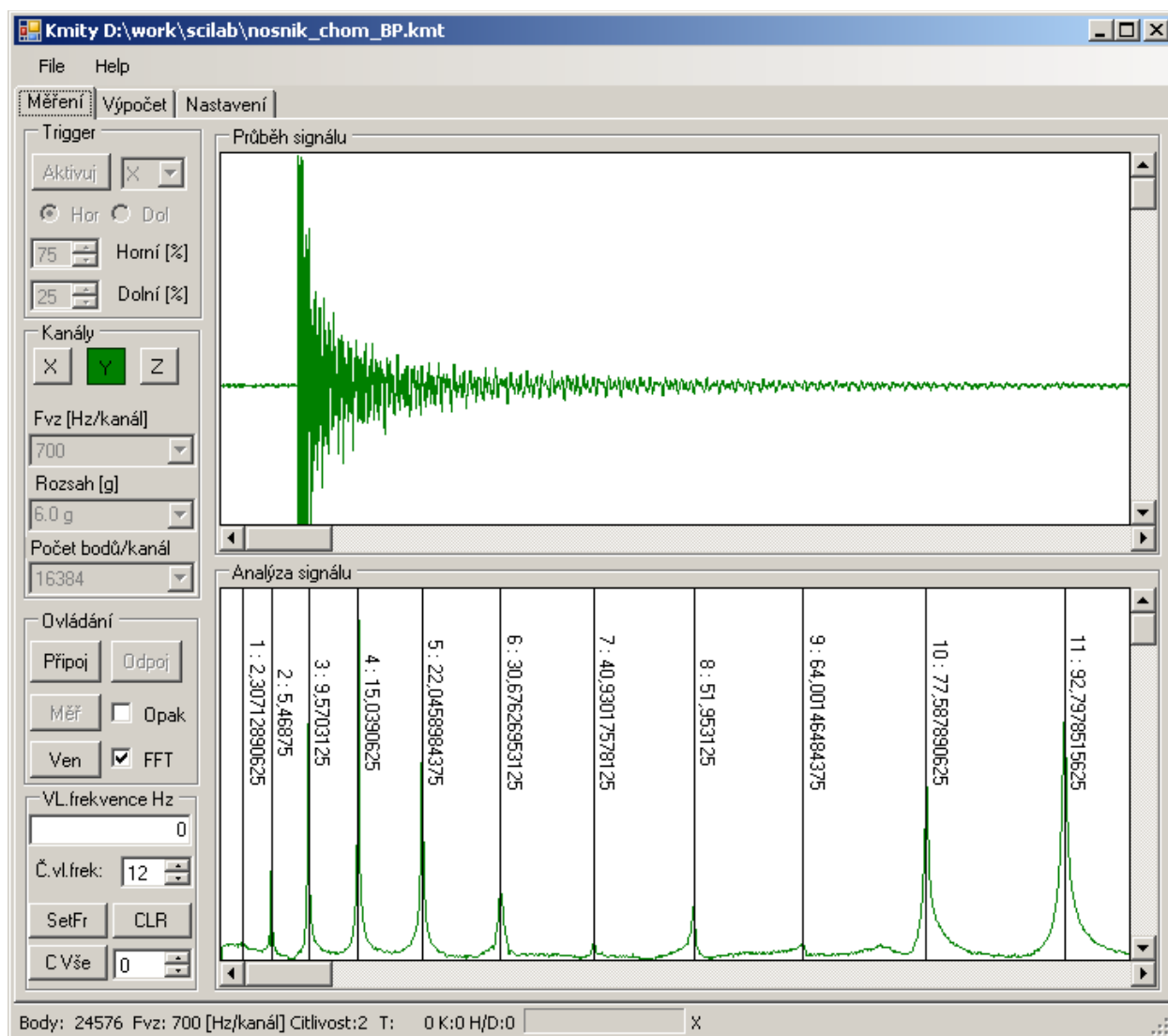
3.8. Filtrace vlastních frekvencí v naměřeném průběhu reálného táhla.

Výše uvedený postup filtrace vlastních frekvencí a výpočet parametru tlumení k byl proveden na akceleroqramu impulsní odezvy reálného táhla.

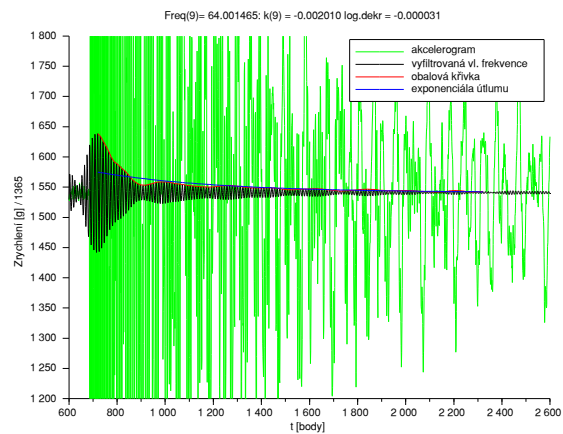
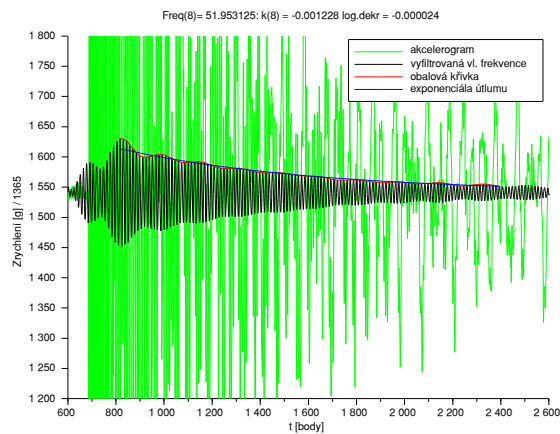
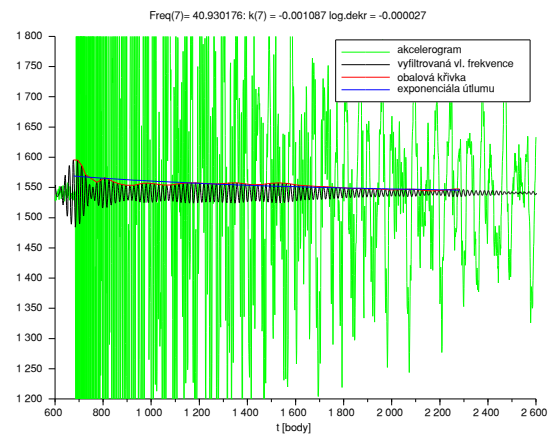
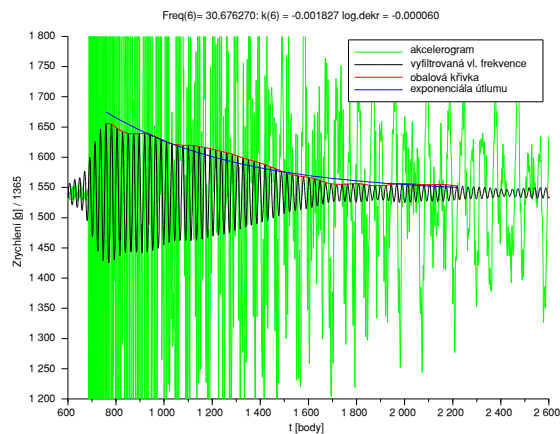
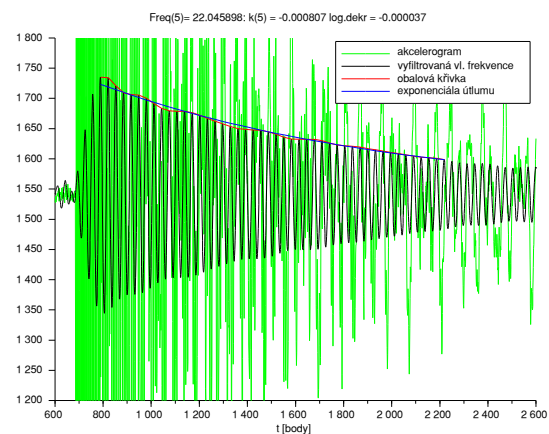
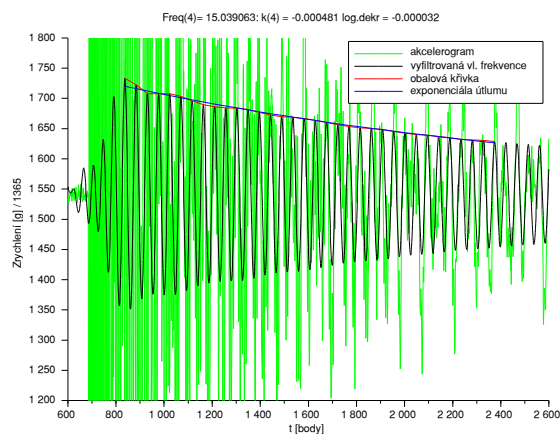
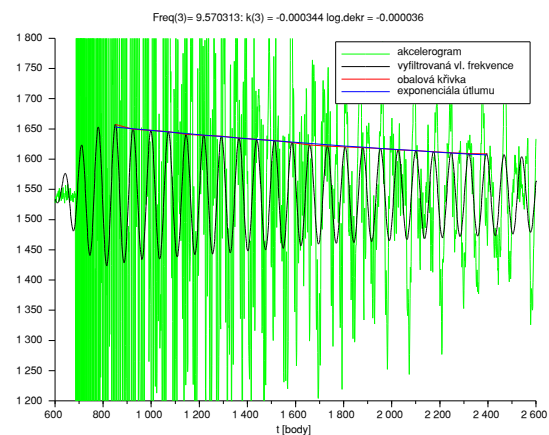
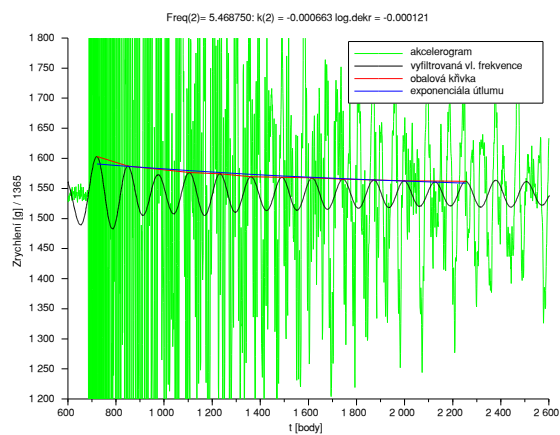
3.8.1 Kotevní táhlo hlavního oblouku ZS Chomutov

Základní parametry táhla :

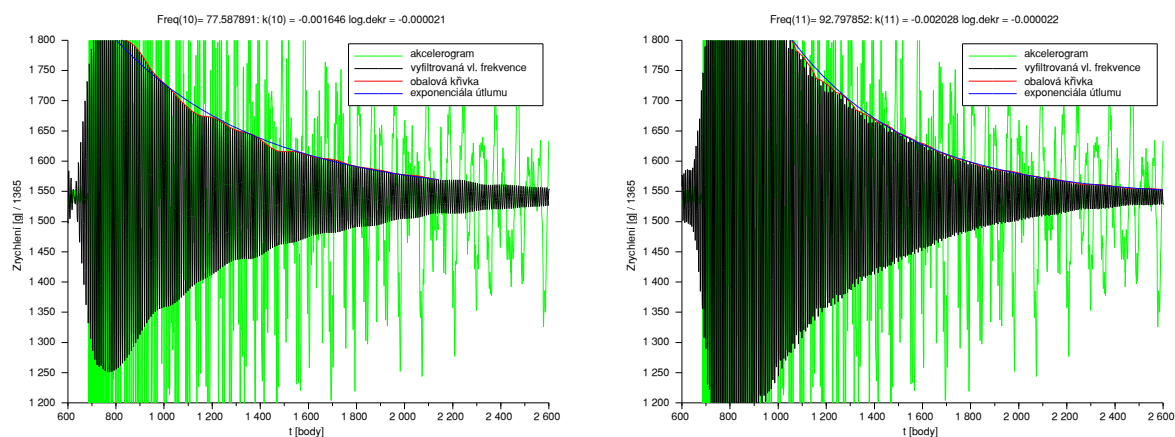
- Průměr $d = 72$ mm
- Délka $l = 14,14$ m
- Hustota $\rho = 7850$ kg/m³
- Tahová síla $F = 80$ kN (měřeno tenzometricky)
- Modul pružnosti $E = 205\,000$ MPa



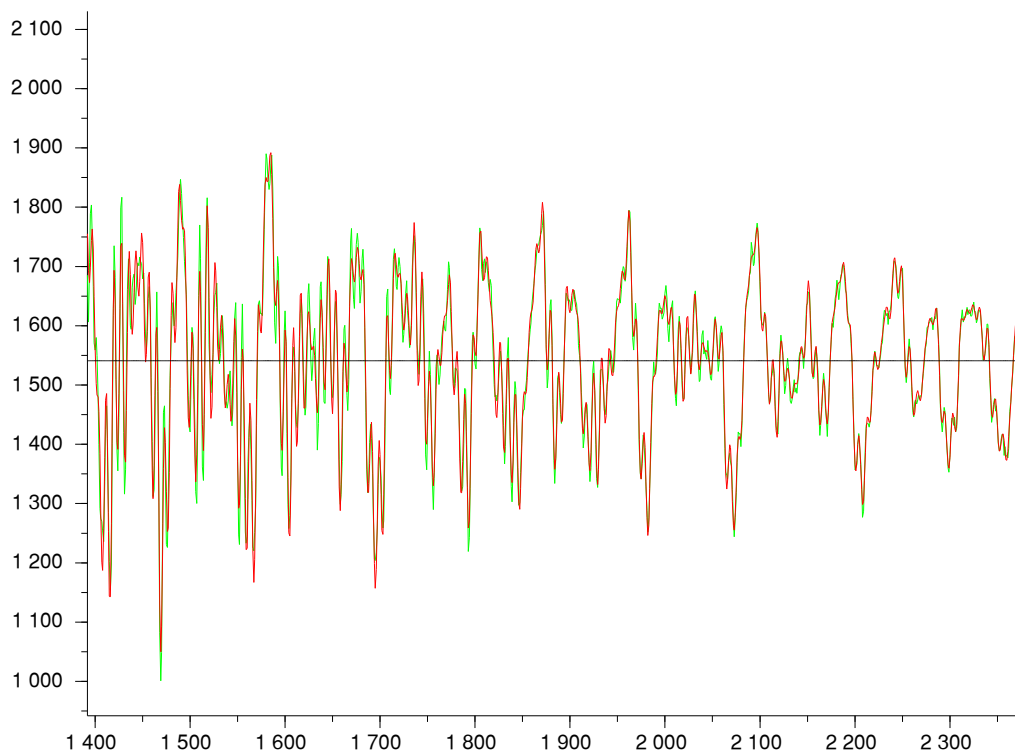
Obr. 3.18 – Akceleroqram a označené vlastní frekvence



Obr. 3.19 – Vlastní frekvence 2 až 9 vč. útlumu



Obr. 3.20 – Vlastní frekvence 10 a 11 vč. útlumu



Obr. 3.21 – Porovnání původního signálu (zelená) a průběhu součtu složek vl. frekvencí 2 až 11

Č. vl.frekv	Vl. frekvence	Okno	$\delta = k$	log.dekr Λ
[-]	[Hz]	[body]	[s ⁻¹]	[-]
2	5,469	23	-0,000663	-0,000121
3	9,570	23	-0,000344	-0,000036
4	15,039	35	-0,000481	-0,000032
5	22,046	47	-0,000807	-0,000037
6	30,676	47	-0,001827	-0,000060
7	40,930	50	-0,001087	-0,000027
8	51,953	50	-0,001228	-0,000024
9	64,001	50	-0,002010	-0,000031
10	77,588	50	-0,001646	-0,000021
11	92,798	50	-0,002028	-0,000022

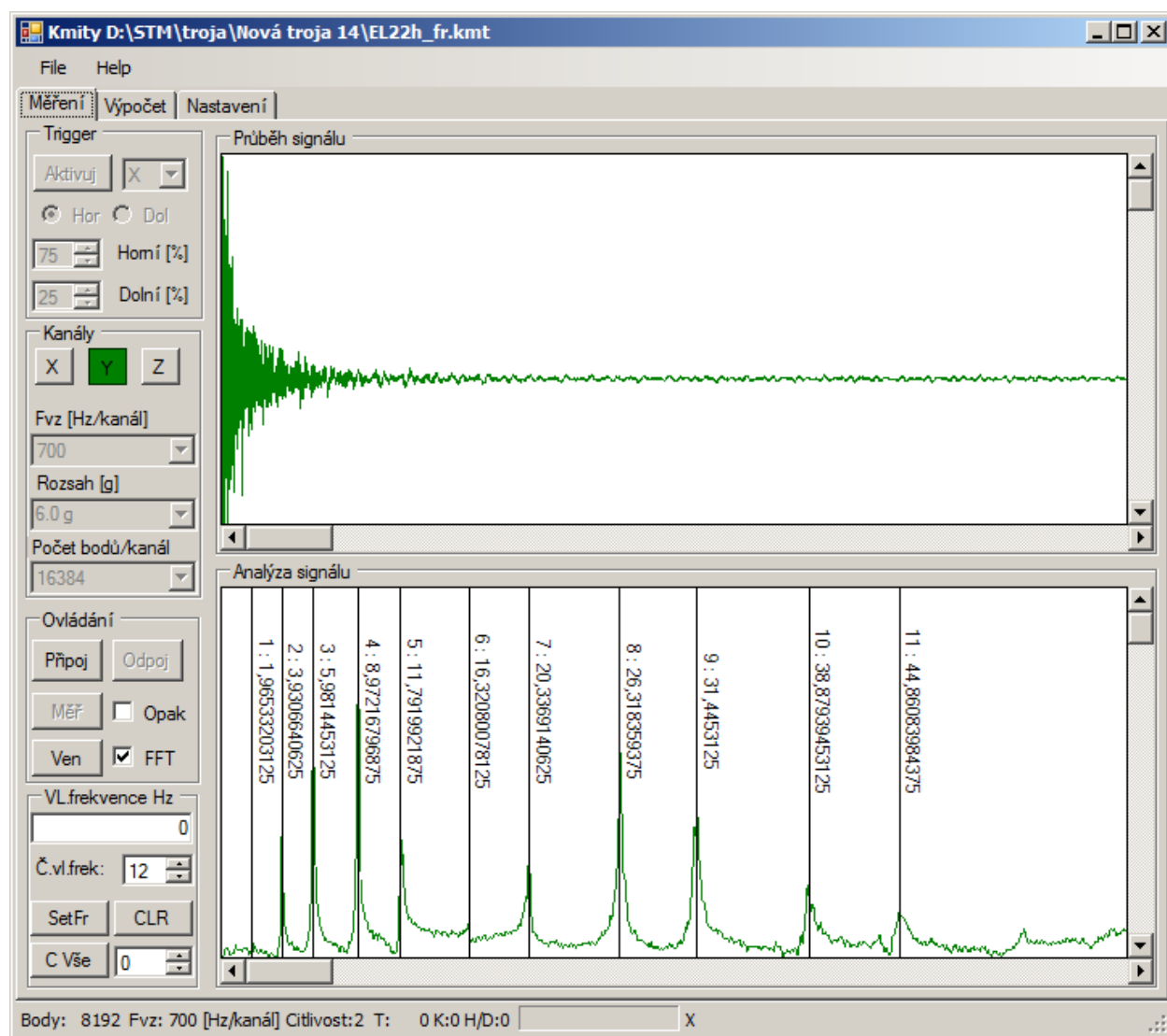
Tab. 3.22 – Přehled vlastních frekvencí a charakteristik útlumu změřeného táhla

Na obrázku 3.18 je zobrazen průběh akcelerogramu a FFT s vyznačenými vlastními frekvencemi. Obrázky 3.19 a 3.20 zobrazují jednotlivé vyfiltrované vlastní frekvence č. 2 až 11, první vlastní frekvence není v průběhu FFT rozeznatelná a byla odhadnuta. Na obrázku 3.21 je porovnán průběh části původního signálu (zeleně) a signálu vzniklého zpětným součtem vyfiltrovaných vlastních frekvencí 2 až 11. Poměrně dobrá shoda obou průběhů ukazuje na správnost principu filtrace vlastních frekvencí. Na porovnání obou průběhů je vidět vliv vyšších vlastních frekvencí než 11, jejichž vliv na celkový signál je zřejmý z nepokrytých zelených špiček původního průběhu signálu.

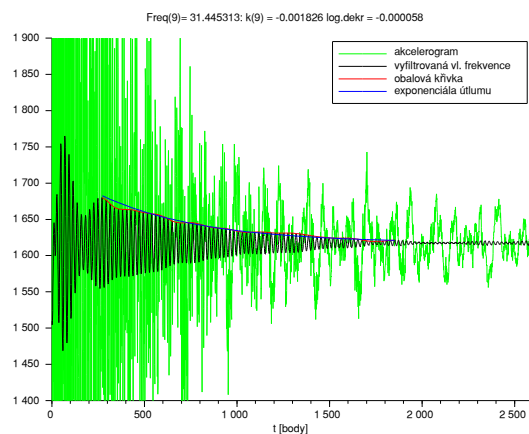
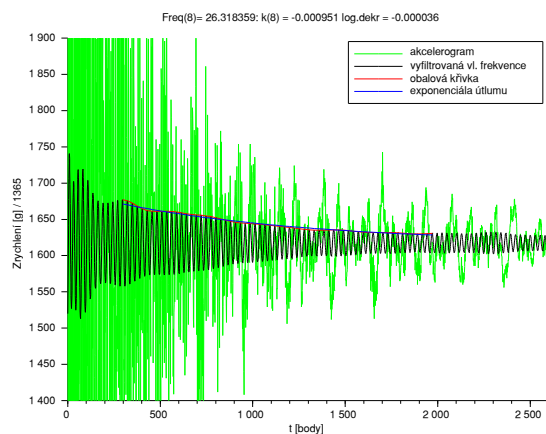
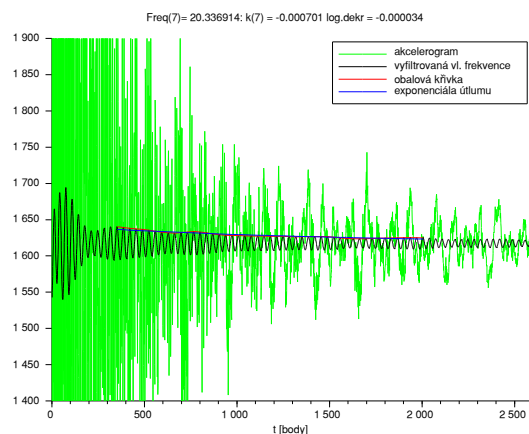
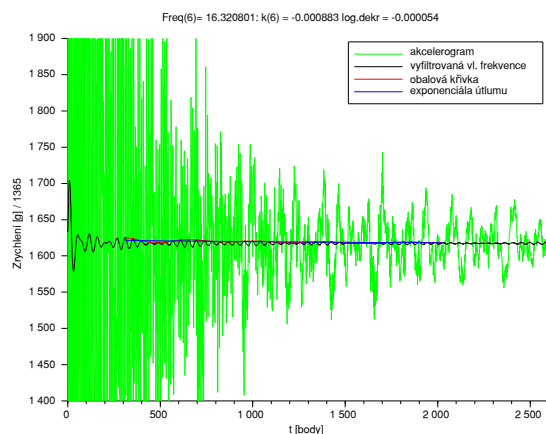
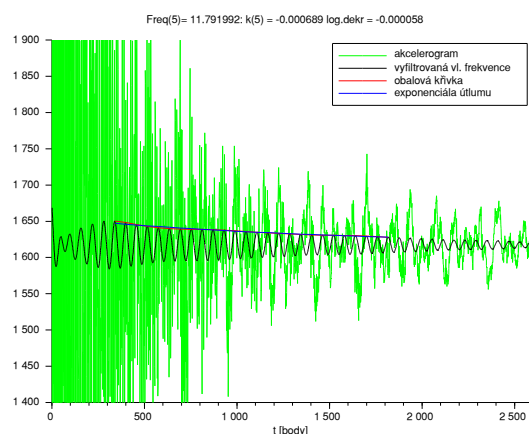
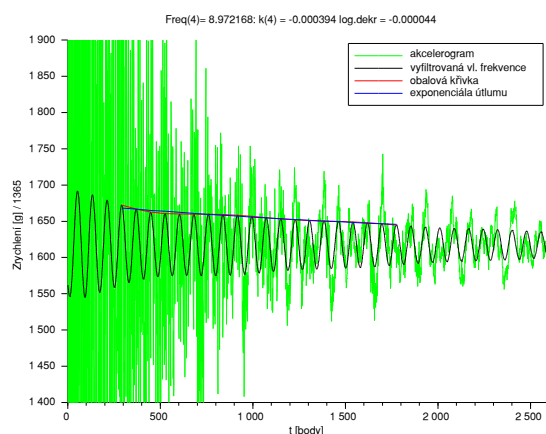
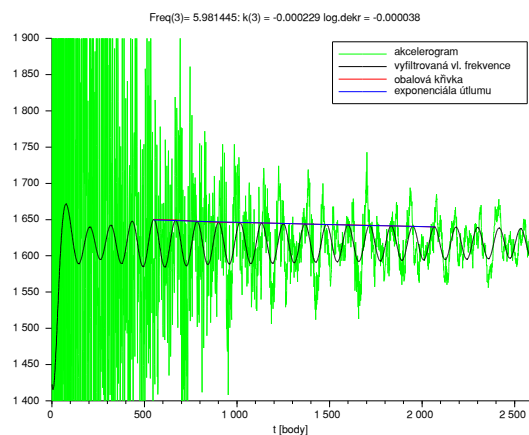
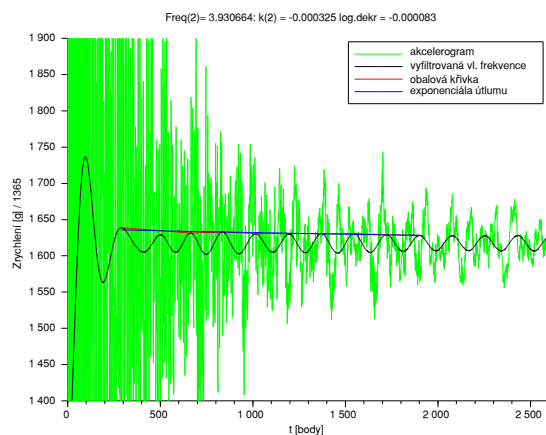
3.8.2 Táhlo EL22 – Trojský most

Základní parametry táhla :

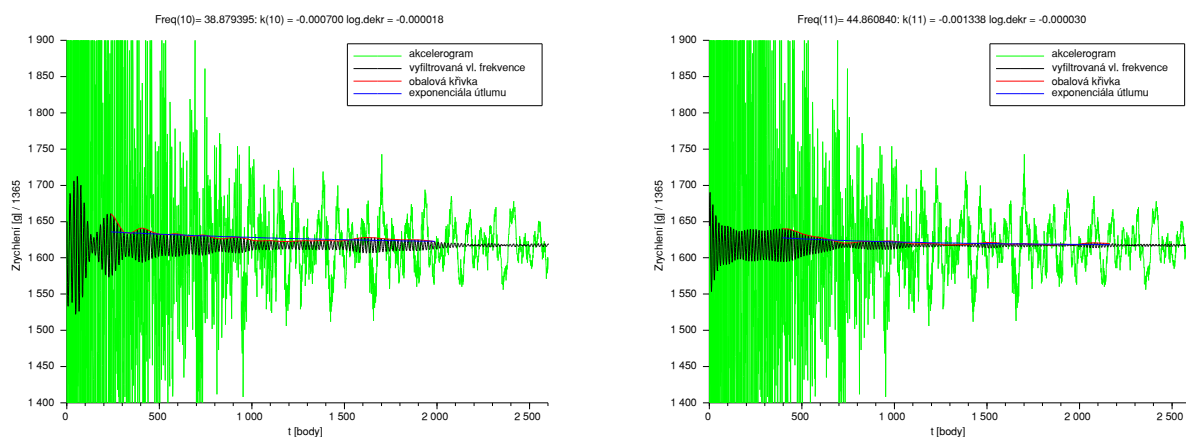
- Průměr $d = 82 \text{ mm}$
- Délka $l = 22,3 \text{ m}$
- Hustota $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Tahová síla $F = 214 \text{ kN}$ (měřeno tenzometricky)
- Modul pružnosti $E = 205\,000 \text{ MPa}$



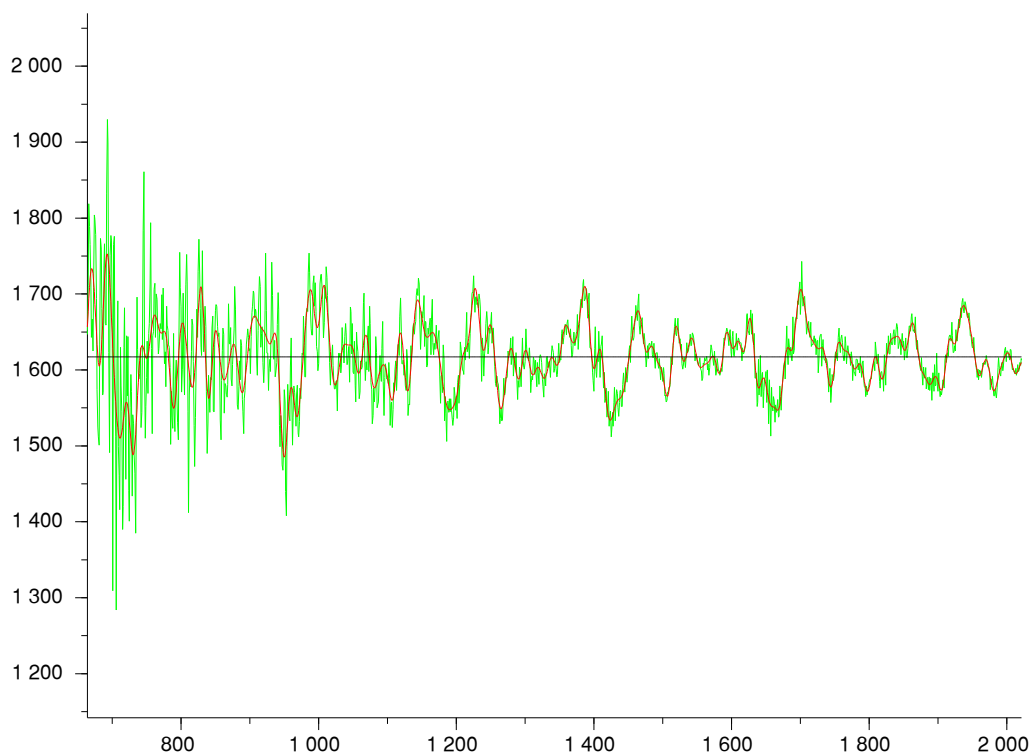
Obr. 3.23 – Akceleroqram a označené vlastní frekvence táhla EL22



Obr. 3.24 – Vlastní frekvence 2 až 9 vč. útlumu



Obr. 3.25 – Vlastní frekvence 10 a 11 vč. útlumu



Obr. 3.26 – Porovnání původního signálu (zelená) a průběhu součtu složek vl. frekvencí 2 až 11

Č. vl.frekv [-]	VI. frekvence [Hz]	Okno [body]	$\delta = k$ [s ⁻¹]	log.dekr Λ [-]
2	3,931	12	-0,000325	-0,000083
3	5,981	12	-0,000229	-0,000038
4	8,972	12	-0,000394	-0,000044
5	11,792	12	-0,000689	-0,000058
6	16,321	23	-0,000883	-0,000054
7	20,337	23	-0,000701	-0,000034
8	26,318	35	-0,000951	-0,000036
9	31,445	35	-0,001826	-0,000058
10	38,879	47	-0,000700	-0,000018
11	44,861	35	-0,001338	-0,000030

Tab. 3.27 – Přehled vlastních frekvencí a charakteristik útlumu změřeného táhla

Na obrázku 3.23 je zobrazen průběh akcelerogramu a FFT s vyznačenými vlastními frekvencemi. Obrázky 3.24 a 3.25 zobrazují jednotlivé vyfiltrované vlastní frekvence č. 2 až 11, první vlastní frekvence není v průběhu FFT rozeznatelná a byla odhadnuta. Na obrázku 3.26 je porovnán průběh části původního signálu (zeleně) a signálu vzniklého zpětným součtem vyfiltrovaných vlastních frekvencí 2 až 11. Zde je vidět výraznější zastoupení vyšších složek vlastních frekvencí oproti táhlu ZS Comutov, kdy průběh složeného signálu z 2 až 11 vlastní frekvence dobře sleduje původní signál, ale nepokrývá špičky vyšších frekvencí.

3.9. Přibližné určení koeficientu tlumení δ přímo z naměřeného akcelerogramu.

Pro orientační hodnotu dynamické charakteristiky táhla by bylo vhodné určit jeden koeficient tlumení δ určený přímo z naměřeného akcelerogramu bez filtrace jednotlivých složek vlastních frekvencí. Tento jeden koeficient útlumu je požadován také pro zadání do dynamických výpočetních systémů pro stavební konstrukce. Vzhledem k tomu, že změřený akcelerogram je součtem mnoha frekvencí s různými koeficienty tlumení δ_i . Jelikož nelze u tohoto záznamu určit jednoznačně periodu T , nelze použít postup pro výpočet δ použitý u jednotlivých vlastních frekvencí.

Pro výpočet přibližného koeficientu tlumení δ byl zvolen následující postup:

- Pro záznam akcelerogramu se vypočte stálá složka signálu f_0 . Vzhledem k symetrii akcelerogramu lze stálou složku aproximovat střední hodnotou celého záznamu.

$$f_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \quad (3.9.1)$$

kde n je počet bodů záznamu a w_i je hodnota bodu záznamu

- Tato stálá složka se odečte od celého záznamu, čímž se osa symetrie posune do osy x , tj. $f_{0n} = 0$.

$$w_{in} = w_i - f_0, i \in \langle 1, n \rangle \quad (3.9.2)$$

kde w_{in} je nová posunutá hodnota záznamu

- Pro hodnoty je w_{in} vypočtena absolutní hodnota, čímž se záporná část záznamu překlápí podle osy x a v kladné polorovině signál „zhoustne“ pro lepší vyhledávání obálky nebo lokálních průměrů signálu.

$$w_{in} = |w_{in}|, i \in \langle 1, n \rangle \quad (3.9.3)$$

- Celý průběh n bodů rozdělíme na stejné úseky po m bodech, tzv. okna. Pro každé okno se vypočítá:
 - a) maximální hodnota průběhu signálu
 - b) průměrná hodnota průběhu signálu
 - c) střední hodnota z obou výše uvedených hodnot a) a b)
- Takto získanou posloupnost bodů proložíme exponenciální křivkou metodou nejmenších čtverců pro exponenciální průběh.

$$\text{exponenciální křivka } f(x) = y(x) = Ae^{kx} \quad (3.9.4)$$

$$\text{po zlogaritmování dostaneme } \ln y(x) = \ln A + kx \quad (3.9.5)$$

pro neznámé parametry $\ln A$ a k platí:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i \ln y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.9.6)$$

$$\ln A = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i \ln y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (3.9.7)$$

Pro otestování funkčnosti byl sestaven program ve výpočetním systému Scilab 5.4.1 dle výše uvedeného postupu.

```
//-----
// sript nosnik_EL22_utlum_celk.sce
//-----
// Funkce pro nalezení exponenciály metodou nejmenších čtverců
function [k_utlum, Ak]=regr(x_vec, y_vec)
    y_ln = log(y_vec); // logaritmické hodnoty y
    n=length(y_vec); // počet bodů obálky
    s_x = sum(x_vec); // suma x
    s_y = sum(y_ln); // suma y
    s_xx = sum(x_vec.^2); // suma x^2
    s_xy = sum(x_vec.*y_ln); // suma x*y
    //y(x)=Ak * exp(k*x)
    k_utlum = (n*s_xy-s_x*s_y)/(n*s_xx-s_x*s_x); // parametr k
    ln_Ak = (s_xx*s_y-s_x*s_xy)/(n*s_xx-s_x*s_x); //
    Ak=exp(ln_Ak);
endfunction
//-----
if~(exists('A')) then // načtení dat z csv
    A=read_csv('EL22_data.csv',';');
end
nrOfPoints = 8192; // počet naměřených bodů
vz_fr=700; // vzorkovací frekvence 700 Hz
x = [1:nrOfPoints];
At=A';
y = eval(At(2,:)); // převádí hodnoty z csv na čísla
y_prum=mean(y); // průměr - stejnosm složka
y_upr = abs(y-y_prum); // odečte střední hodnotu a vypočte abs hodnotu
clf();
plot2d(x,y_upr,style=color("green")); // vykreslení naměřeného průběhu
poc_orez = 10; // počáteční bod výpočtu (vynechání přech.jevu)
okno = 81; // velikost okna
fr_ln= vz_fr / okno; // zdánlivá frekvence pro průměrování hodnot
akcelerogramu
pocet_hodnot = round((nrOfPoints-poc_orez)/okno -1); // počet bodů pro
integraci a maxima
y_loc_max = [1:pocet_hodnot]; // vektor lokálních maxim
x_loc_max = [1:pocet_hodnot]; // vektor indexů lokálních maxim
y_loc_mean = [1:pocet_hodnot]; // vektor lokálních průměrů
x_loc_mean = [1:pocet_hodnot]; // vektor indexů lokálních průměrů
y_loc_p = [1:pocet_hodnot]; // vektor průměrů z obou
x_loc_p = [1:pocet_hodnot]; // vektor indexů průměrů

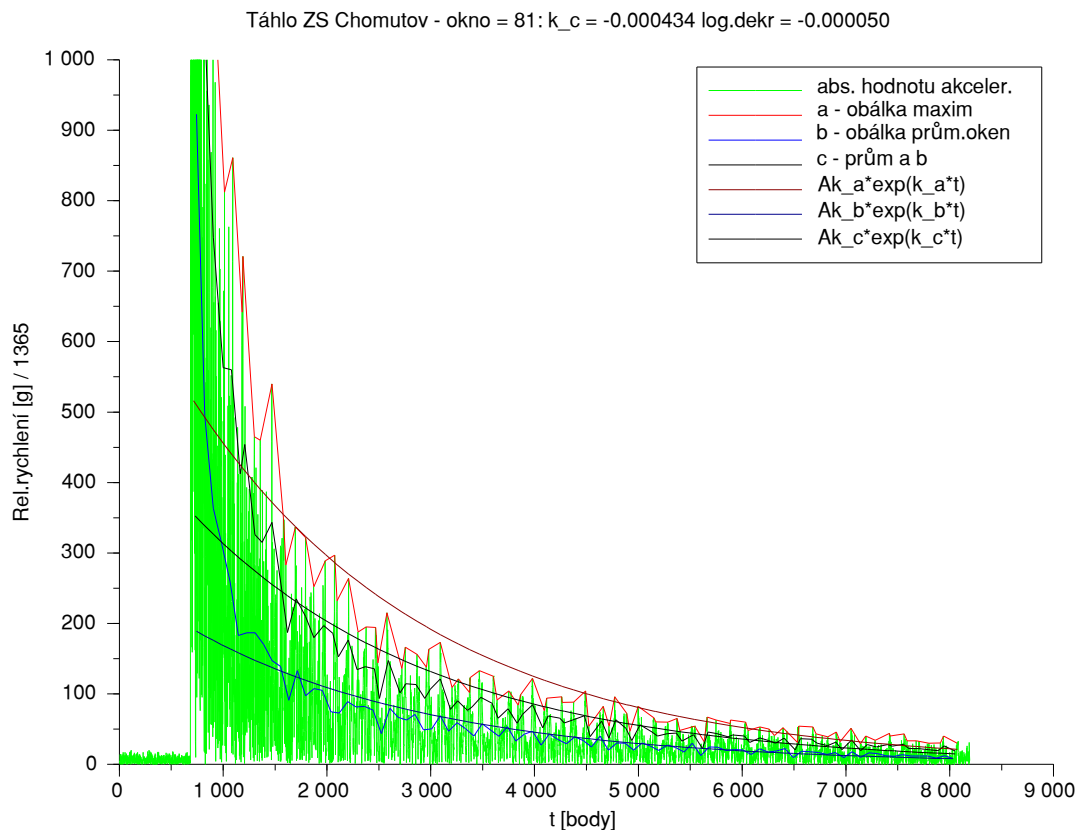
for b_i=1:pocet_hodnot, // cyklus přes všechna okna
    [hodnota,i]=max(y_upr((poc_orez+b_i*okno -okno+1):(poc_orez+b_i*okno))); //
    nalezení maxima a)
    y_loc_max(b_i)=hodnota;
```

```

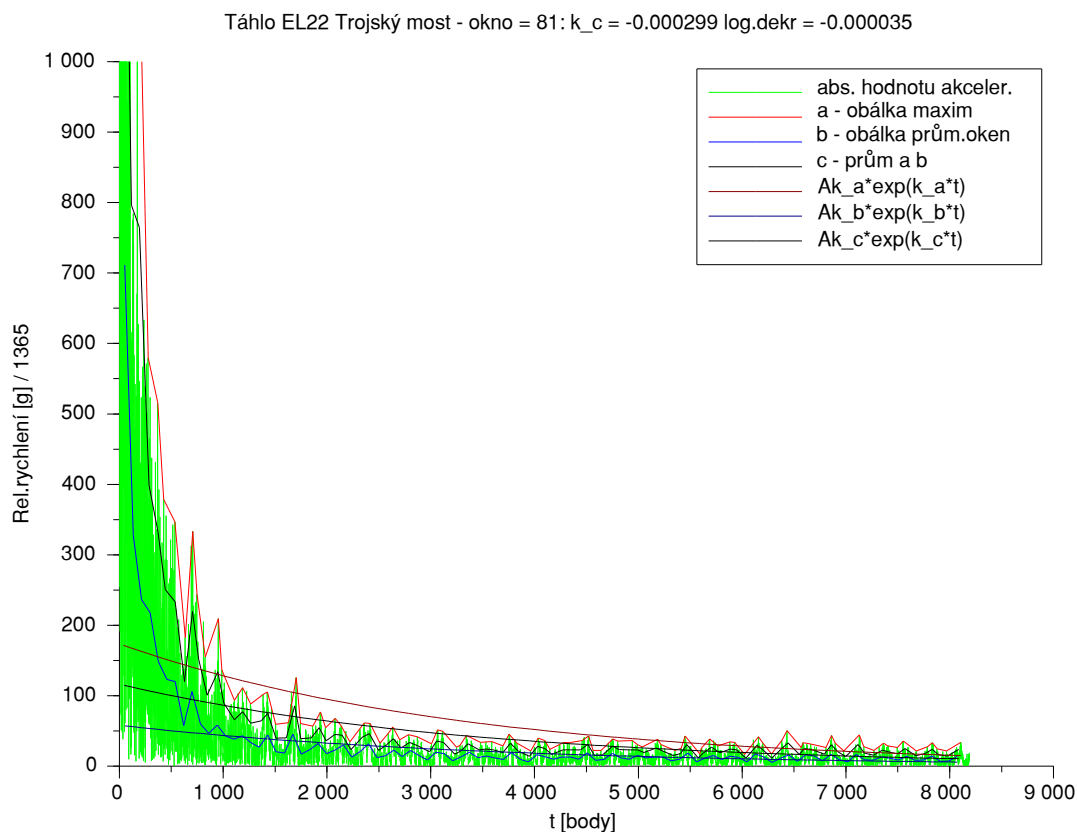
x_loc_max(b_i)=i+(poc_orez+b_i*okno -okno+1);
okno_mean=mean(y_upr((poc_orez+b_i*okno -okno+1):(poc_orez+b_i*okno)));//
nalezení průměru b)
y_loc_mean(b_i)=okno_mean;
x_loc_mean(b_i)=round(okno/2)+(poc_orez+b_i*okno -okno+1); // výpočet křivky
c)
y_loc_p(b_i)=(okno_mean+hodnota)/2;
x_loc_p(b_i)=round((x_loc_max(b_i)+x_loc_mean(b_i))/2);
end
plot2d(x_loc_max,y_loc_max,style=color("red"));
plot2d(x_loc_mean,y_loc_mean,style=color("blue"));
plot2d(x_loc_p,y_loc_p,style=color("black"));
[k,Ak]=regr(x_loc_max,y_loc_max);
printf('Max hodnoty: k = %f log. dekr = %f Ak = %f\n',k,k/fr_ln,Ak);
plot2d(x_loc_max,Ak*exp(k*x_loc_max)+0,style=color("darkred")); // vykreslení
[k,Ak]=regr(x_loc_mean,y_loc_mean);
printf('Max hodnoty: k = %f log. dekr = %f Ak = %f\n',k,k/fr_ln,Ak);
plot2d(x_loc_mean,Ak*exp(k*x_loc_mean)+0,style=color("darkblue")); //
vykreslení
[k,Ak]=regr(x_loc_p,y_loc_p);
printf('Max hodnoty: k = %f log. dekr = %f Ak = %f\n',k,k/fr_ln,Ak);
plot2d(x_loc_p,Ak*exp(k*x_loc_p)+0,style=color("black")); // vykreslení
a=get("current_axes");//ukazatel na osy v grafu
a.data_bounds=[0,0;8500,1000]; //rozsah vykreslených dat
hl=legend(['abs. hodnotu akceler.','a - obálka maxim','b - obálka prům.oken',
'c - prům a b','Ak_a*exp(k_a*t)','Ak_b*exp(k_b*t)','Ak_c*exp(k_c*t)']);
str=msprintf('Táhlo EL22 Trojský most - okno = %i: k_c = %f log.dekr = %f\n',
'okno,k,k/fr_ln);
xtitle(str,"t [body]","Rel.rychlení [g] / 1365 ");

//-----

```



Obr. 3.28 – Táhlo ZS Chomutov – křivky tlumení a, b, c



Obr. 3.29 – Táhlo EL22 Trojský most – křivky tlumení a, b, c

Jak je vidět na grafech 3.28 a 3.29, tak exponenciální průběh tlumení má přibližně $\frac{3}{4}$ záznamu akcelerogramu. Na začátek záznamu má vliv přechodový děj – skládání podélných odražených vln ve stojaté vlnění a zřejmá saturace rozsahu akcelerometru.

Pro určení celkového tlumení je vhodná taková křivka, která přibližně kopíruje průběh celkového signálu po odeznění přechodového děje a zároveň hodnota parametru útlumu se pohybuje v intervalu hodnot parametru útlumu určených pro jednotlivé vlastní frekvence. Tyto požadavky asi nejlépe splňuje křivka c.

Pro opakovatelné určení parametru útlumu je nutné určení velikost okna pro výpočet dle výše uvedeného postupu. Pro porovnání vlivu velikosti okna na výsledek určení parametru útlumu byly spočteny tyto parametry pro velikosti okna $n/n = 1, n/10$ a $n/100$, kde n je počet bodů.

Táhlo	δk		
ZS Chomutov	Okno = 1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	-0.000439	-0.000433	-0.000560
Křivka b	-0.000439	-0.000437	-0.000476
Křivka c	-0.000439	-0.000434	-0.000545
	logaritmický dekrement		
	Okno = 1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	-0.000001	-0.000050	-0.000656
Křivka b	-0.000001	-0.000051	-0.000557
Křivka c	-0.000001	-0.000050	-0.000638
	Ak		
	Okno = 1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	181.342742	703.507221	1390.52445
Křivka b	181.342742	261.005974	310.621342
Křivka c	181.342742	483.669508	905.587546

Tab. 3.30 – Táhlo ZS Chomutov – vliv okna na parametr útlumu

Táhlo	δk		
EL22	Okno =1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	-0.000281	-0.000302	-0.000414
Křivka b	-0.000281	-0.000287	-0.000342
Křivka c	-0.000281	-0.000299	-0.000418
	logaritmický dekrement		
	Okno =1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	-0.000001	-0.000035	-0.000484
Křivka b	-0.000001	-0.000033	-0.000400
Křivka c	-0.000001	-0.000035	-0.000490
	Ak		
	Okno =1	Okno = n/100	Okno = n/10
Křivka a	39.804830	173.655228	424.884156
Křivka b	39.804830	57.981489	73.810915
Křivka c	39.804830	116.304739	269.844520

Tab. 3.31 – Táhlo EL22 Trojský most – vliv okna na parametr útlumu

V tab. 3.30 a 3.31 jsou přehledně zobrazeny parametry útlumu δ (v grafech označován k), logaritmický dekrement A a hodnota $Ak = A$ z rovnice exponenciály $y(x) = Ae^{kx}$. Logaritmický dekrement je závislý na frekvenci (periodě), proto byl vyčíslen pro „pseudofrekvenci“ pro kterou byla definována perioda $T_p = m T_i$, kde m je počet bodů okna a T_i je perioda vzorkování. Z tabulky vyplývá, že velikost okna mezi 1 až $n/100$ bodů nemá zásadní vliv na výsledný parametr útlumu, rozdíl je do 10% hodnoty. Zároveň se pro zvětšující se okno zvyšují rozdíly mezi průběhy křivek a , b a c .

Pro reálné měření, tj. měření posunů vlastních frekvencí a útlumu v čase životnosti konstrukce, vyplývá z výše uvedených postupů a výsledků jako nejvhodnější používat exponenciální křivku útlumu c a okno o velikosti cca $1/100$ celkového počtu bodů. Jak je vidět v přehledu tlumení u jednotlivých vlastních frekvencí, je pro tyto parametry výsledný celkový parametr tlumení v intervalu naměřených parametrů tlumení jednotlivých vlastních frekvencí.

Zároveň pro opakovatelnost měření je nutné zaznamenat při prvním měření vzorkovací frekvenci, počet bodů záznamu, velikost okna, citlivost akcelerometru a umístění akcelerometru na měřeném táhle.

4. Měřicí přípravek

4.1 Volba hardware

Při výběru vhodného základu měřícího přípravku byly stanoveny tyto požadavky:

- kompletnost periférií – tj. integrace akcelerometru, procesoru a USB rozhraní
- příznivá cena - vzhledem k tomu, že přípravek je namáhán vibracemi a nepředpokládá se dlouhá životnost. S tím souvisí nutnost rychle nahradit nefunkční hardware.
- programování firmware bez nutnosti použití externího programátoru
- sw podpora výrobce pro jednotlivé periferie – dispozice knihoven a ovladačů pro podporu vývoje firmware
- možnost připojení modulu pro bezdrátový přenos dat

Výše uvedené podmínky splňuje STM32F4 Discovery kit s akcelerometrem LIS302DL v ceně 330,- Kč s DPH (www.farnell.com).

Vzhledem k praktickým zkušenostem z měření vlastních frekvencí na stavbách by bylo vhodné měřicí přípravek oddělit od PC a data přenášet bezdrátově. Pro bezdrátový přenos dat byly na základě zkušeností z reálných aplikací na stavbách stanoveny následující požadavky:

- dostatečná přenosová rychlost – min. 115200 Baud
- dosah spojení – min. 50 m na přímou viditelnost
- možnost využití standardních periférií PC (notebooku)
- snadná hardwarová i softwarová implementace na straně PC

Z výše uvedených požadavků se jako nejvhodnější jevila technologie založená na standardu Bluetooth. Vzhledem k tomu, že dnes každé přenosné zařízení (notebook, PDA, tablet, mobilní telefony atd.) je vybavené technologií Bluetooth, bude možné v budoucnu využít pro sběr naměřených dat na stavbách využít i tyto zařízení po portaci obslužného software na tyto zařízení.

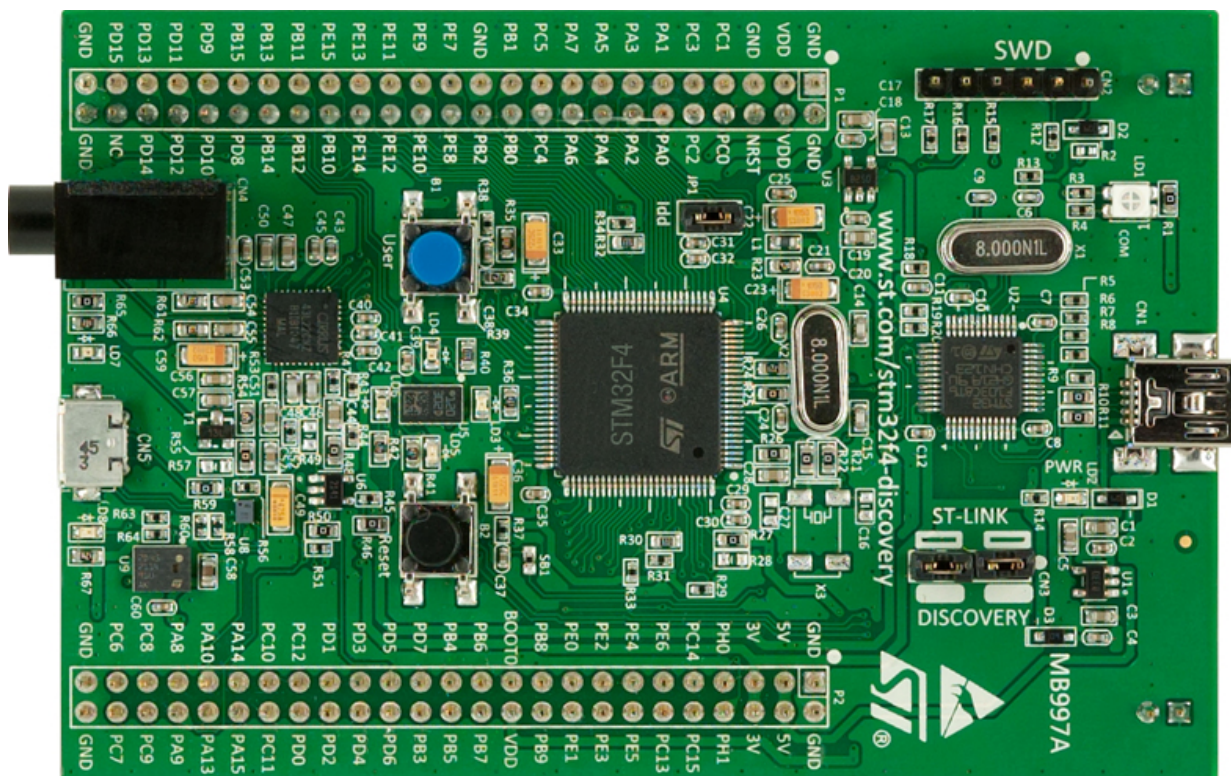
Výše uvedené parametry splňuje i technologie WiFi, ale jelikož standardním protokolem není u WiFi sérový port jako u Bluetooth, byl zvolen Bluetooth modul ConnectBlue OBS411x s procesorem STM32F103RC, ST-Ericsson STLC2500DB chipsetem Bluetooth a externí anténou v ceně 990,- Kč bez DPH (www.spezial.cz)

4.2 STM32F4 Discovery Kit

Základ STM32F4 Discovery kitu tvoří procesor STM32F407VGT6 s jádrem ARM Cortex-M4F 32 bitů, paměť Flash 1 MB a 192 kB RAM v pouzdru LQFP 100. Frekvence procesoru je 168 Mhz.

Na základní desce je rozhraní ST-LINK/V2 pro programování a debugování procesoru. Zároveň lze toto rozhraní používat samostatně pro programování externích procesorů pomocí konektoru SWD a nastavení jumperů CN3.

Napájení kitu je možné z USB (CN1) nebo externě 5V. Na desce je vyvedeno napájení 3V a 5V pro napájení externích periférií s maximální proudovou spotřebou 100 mA.



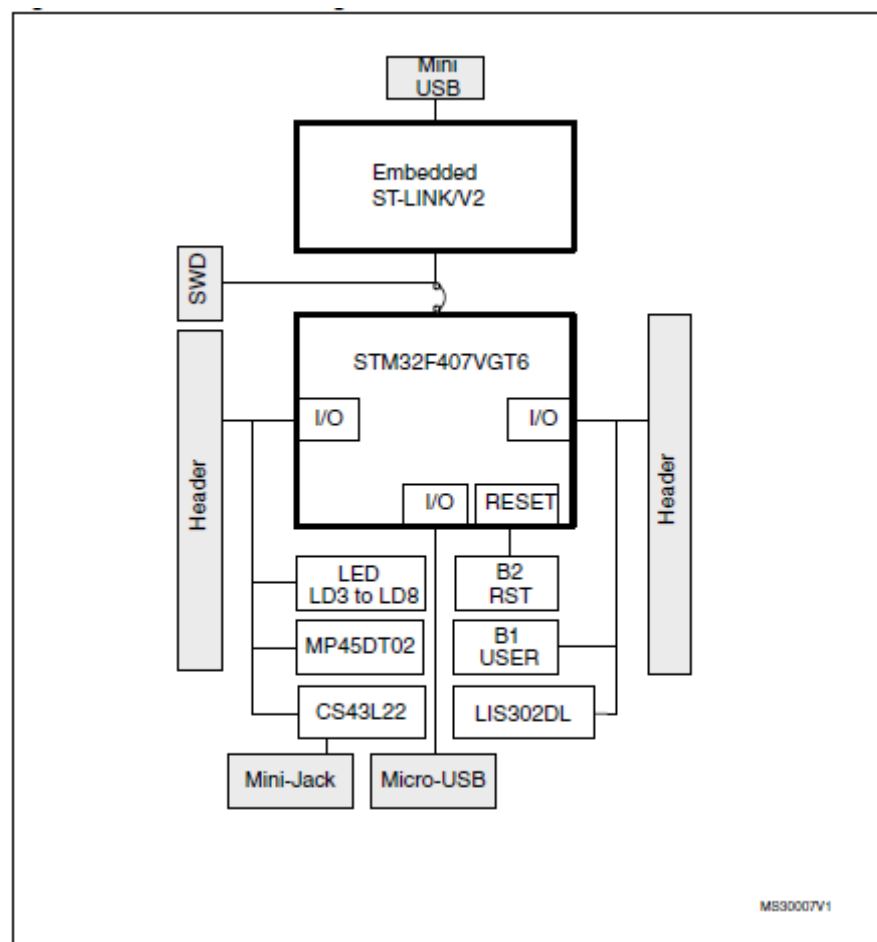
Obr. 4.1. STM32F4 Discovery Kit

Na základní desce jsou integrovaná tato periferní zařízení:

- LIS302DL, ST MEMS pohybový senzor, tří osý akcelerometr s digitálním výstupem
- MP45DT02, ST MEMS zvukový senzor, všesměrový digitální mikrofón
- CS43L22, audio DAC (digitálně / analogový převodník s integrovaným stereo zesilovačem třídy D
- 4 LED diody pro všeobecné použití
- Dva mikrospínače – uživatelský a reset
- USB OTG řadič s micro AB konektorem (CN5)
- Rozšiřující konektory B1 a B2 s vyvedenými kontakty pouzdra LQFP 100 procesoru STM32F407VGT6

4.3 Procesor STM32F407VGT6

Tento procesor je nejrychlejší z řady procesorů STM 32 s jádrem ARM Cortex. Má bohatou výbavu periférií, je vhodný pro většinu moderních aplikací zejména v průmyslových aplikacích jako řídicí jednotka PLC, měničů, řadičů pohonných jednotek. Dále se uplatňuje v PC tiskárnách, skenerech, v zabezpečovací technice, ve video systémech, lékařské technice apod. Blokové schéma procesoru STM32F407VGT6 je na obrázku 4.3



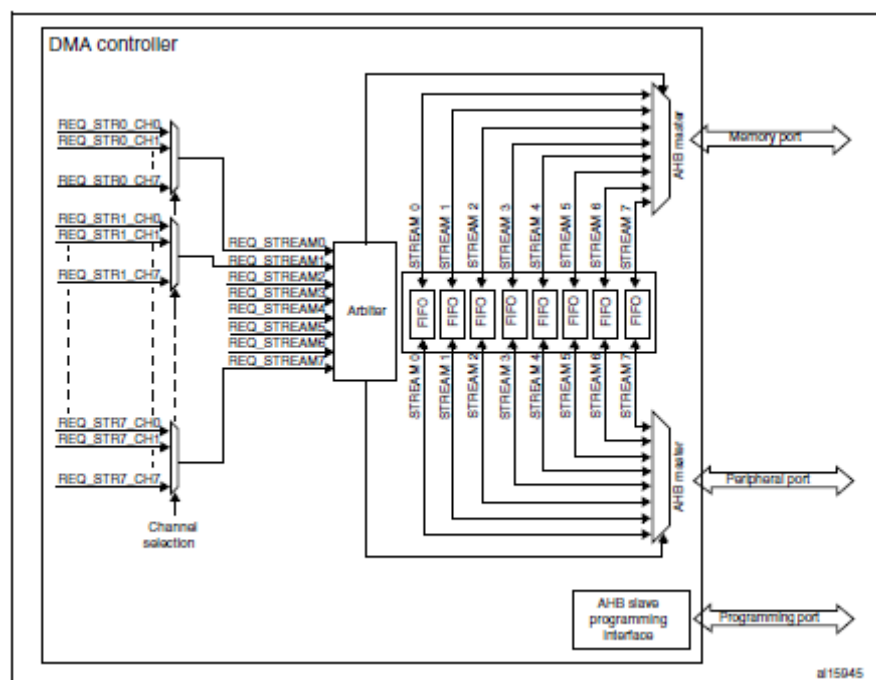
Obr 4.2 Blokové schema STM32F4 Discovery kitu

Základní vlastnosti procesoru STM32F407VGT6 jsou uvedeny v následujícím přehledu:

- Jádru ARM 32-bit Cortex -M4 CPU s FPU (jednotka pro práci s čísly s pohyblivou řádovou čárkou), s adaptivním akcelerátorem v reálném čase umožňujícím provádění instrukcí z FLASH paměti bez čekacích cyklů
- Frekvence jádra je 168MHz, výpočetní výkon se udává 210 DMIPS nebo 1,25 DMIPS / Mhz dle testu Dhrystone 2.1. V jádru jsou obsaženy instrukce pro přímé zpracování signálu – DSP.
- Programovatelná instrukční paměť FLASH 1MB, datová paměť SRAM má velikost 196 kbyťů. Na procesoru je integrovaný řadič pro statickou externí paměť podporující paměti Compact Flash, SRAM, PSRAM, NOR a NAND.
- Procesor má interface pro LCD display kompatibilní s modelem 8080/6800.
- Režimy snížené spotřeby – Sleep, Stop a Standby, možnost zálohování hodin reálného času a 4 kb SRAM paměti pomocí externí záložní baterií.
- Pro zpracování analogových signálů jsou na procesoru integrovány tři 12-ti bitové A/D převodníky s max. rychlostí 2,4 MSPS. Signál pro tyto převodníky lze přivádět z 24 multiplexovaných kanálů.
- Analogový výstup zajišťují dva 12-ti bitové digitálně-analogové převodníky.
- Je k dispozici 16 univerzálních řadičů DMA pro přímý přístup k paměti.
- Na procesoru je možné využít až 17 časovačů, dva jsou 32-bitové ostatní jsou 16-ti bitové.

- 10/100 Mbit Ethernet řadič s vyhrazeným DMA kanálem, podporuje standard IEEE1588 v2.
- Je možné připojit 8 až 14-ti bitové paralelní rozhraní kamery s rychlostí přenosu až 54 Mbyt/s.
- V procesoru je možné využít True Random generátor náhodných čísel, výpočetní jednotku CRC, 96-ti bitový unikátní identifikátor a hodiny reálného času RTC včetně kalendáře s přesností na zlomky sekund.

Pro komunikaci procesoru s modulem ConnectBlue OBS411x byl zvolen seriový port USART3 s řadičem DMA. Řadič DMA byl použit pro jednodušší obsluhu přerušení při příjmu dat po seriové lince, jelikož umožňuje vyvolat přerušení až po příjmu definovaného počtu bytů a pro řízení zpracování dat hlavní smyčkou stačí v přerušení DMA zkopírovat přijaté 3 byty do řídicích stavových proměnných. Blokové schéma zapojení řadiče DMA je na obrázku 4.4. Pro USART3 přísluší dle [08] DMA1, Stream 1, Channel 4, velikost DMA bufferu v paměti je 3 byty.



Obr.4.4 Blokové schéma zapojení DMA procesoru STM32F407VGT6

4.4 MEMS akcelerometr LIS302DL

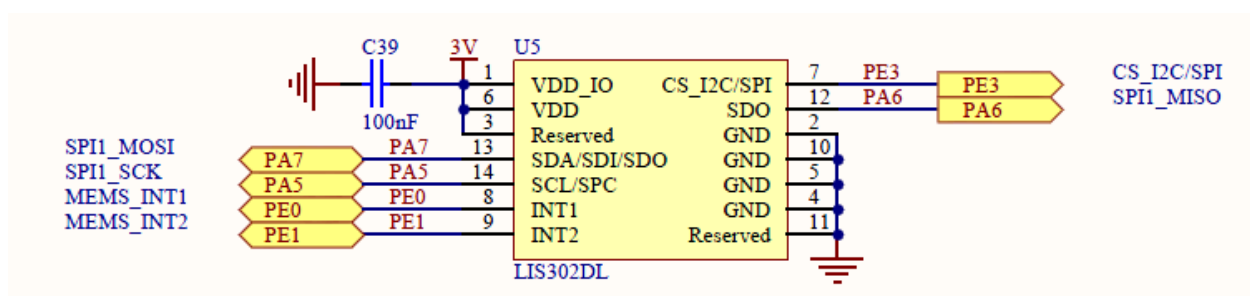
Akcelerometr LIS302DL je tříosý miniaturní digitální senzor s nízkou spotřebou pod 1 mW. Komunikace probíhá po sběrnici I²C nebo SPI, typ sběrnice je určen pinem CS. Komunikační protokol je založen na stavových registrech ze kterých lze vyčíst stav senzoru, připravenost dat včetně samotných dat. Nastavení vzorkovací frekvence, externích triggerů, citlivosti a ostatních vlastností se provádí pomocí příslušných registrů. Přehled registrů je na obr. 4.5. Schema zapojení v STM32F4 Discovery kitu je na obrázku 4.6. Blokové schéma je na obrázku 4.7.

Základní parametry akcelerometru jsou:

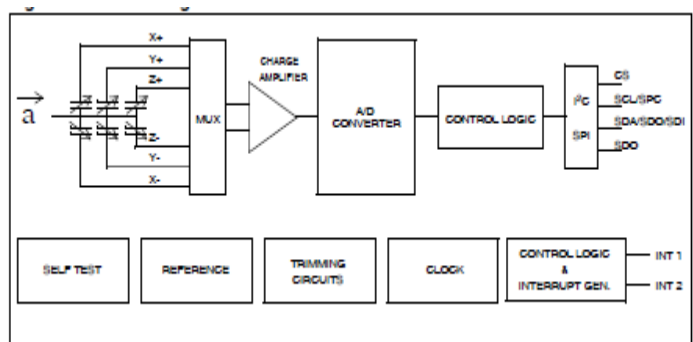
- Rozsahy: $\pm 2g/\pm 8g$
- Citlivost: 19,8/79,2 mg/bit
- Vzorkovací frekvence: 100/400 Hz

Name	Type	Register address		Default	Comment
		Hex	Binary		
Reserved (Do not modify)		00-0E			Reserved
Who_Am_I	r	0F	000 1111	00111011	Dummy register
Reserved (Do not modify)		10-1F			Reserved
Ctrl_Reg1	rw	20	010 0000	00000111	
Ctrl_Reg2	rw	21	010 0001	00000000	
Ctrl_Reg3	rw	22	010 0010	00000000	
HP_filter_reset	r	23	010 0011	dummy	Dummy register
Reserved (Do not modify)		24-26			Reserved
Status_Reg	r	27	010 0111	00000000	
--	r	28	010 1000		Not Used
OutX	r	29	010 1001	output	
--	r	2A	010 1010		Not Used
OutY	r	2B	010 1011	output	
--	r	2C	010 1100		Not Used
OutZ	r	2D	010 1101	output	
Reserved (Do not modify)		2E-2F			Reserved
FF_WU_CFG_1	rw	30	011 0000	00000000	
FF_WU_SRC_1(ack1)	r	31	011 0001	00000000	
FF_WU_THS_1	rw	32	011 0010	0000000x	
FF_WU_DURATION_1	rw	33	011 0011	00000000	
FF_WU_CFG_2	rw	34	011 0100	00000000	
FF_WU_SRC_2 (ack2)	r	35	011 0101	00000000	
FF_WU_THS_2	rw	36	011 0110	00000000	
FF_WU_DURATION_2	rw	37	011 0111	00000000	
CLICK_CFG	rw	38	011 1000	00000000	
CLICK_SRC (ack)	r	39	011 1001	00000000	
--		3A			Not Used
CLICK_THSY_X	rw	3B	011 1011	00000000	

Obr.4.5 Přehled registrů senzoru LIS302DL



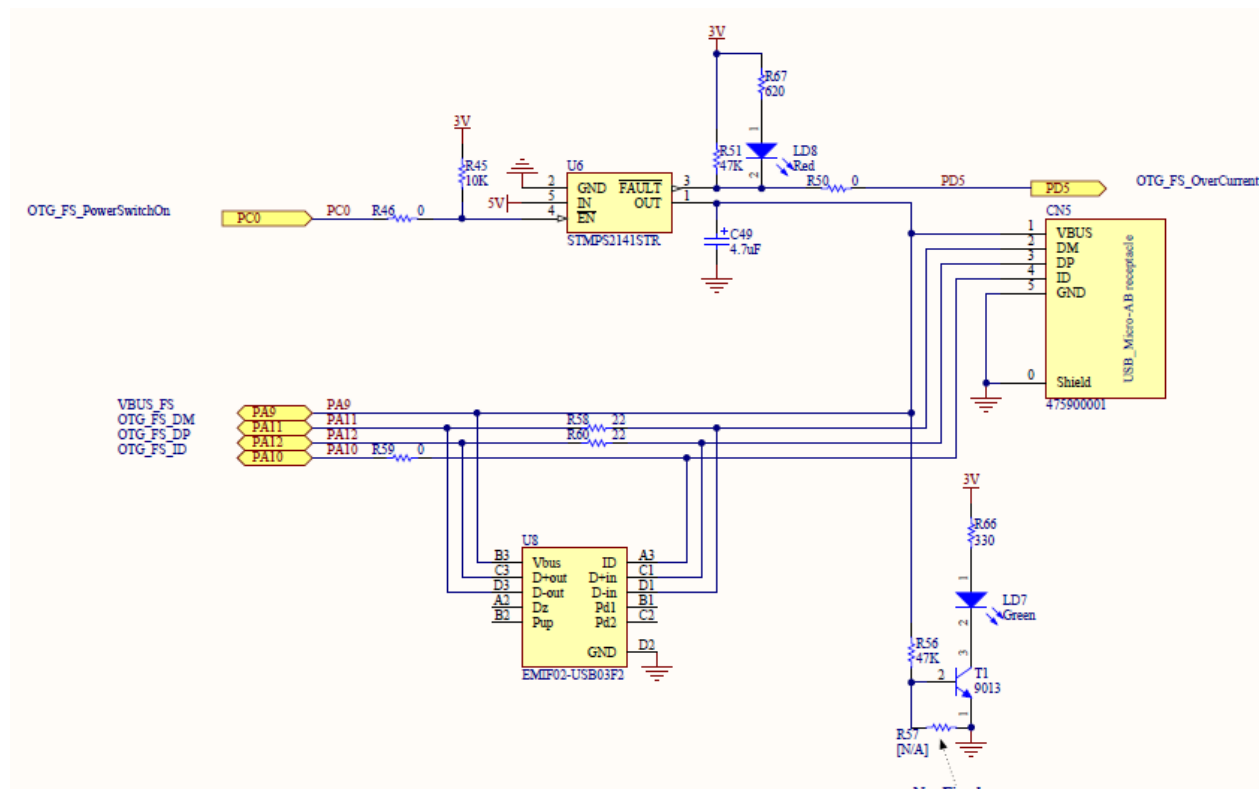
Obr.4.6 Zapojení senzoru LIS302DL



Obr.4.7 Blokové schéma senzoru LIS302DL

4.5 USB on-the-go řadič full speed (OTG FS)

Procesor STM32F407VGT6 má integrovaný řadič USB OTG full speed, který podporuje standard USB 2.0 a OTG 1.0. Řadič USB umožňuje programovou definici endpointů a podporuje komunikační stavy suspend a resume. USB OTG FS řadič vyžaduje pro svojí činnost vyhrazený hodinový signál o frekvenci 48 Mhz, který je generován pomocí PLL z HSE oscilátoru. Připojení konektoru micro AB k řadiči je na obrázku 4.8. Ze zapojení je zřejmé řešení nadproudové a přepětové ochrany se signalizací pomocí integrovaného obvodu STMP2141STR.



Obr.4.8 Připojení konektoru micro AB k řadiči USB OTG

ESD ochrana a EMI filtrace je řešena integrovaným obvodem EMIF02-USB03F2. Přítomné normální napětí na signalizuje zelená LED dioda LD7, proudové přetížení nebo přepětí signalizuje červená LED dioda LD8. Pro možnost napájení kitu z micro AB konektoru CN5 byla do přípravku doplněna Schottkyho dioda mezi pinem PA9 a napájecím pinem 5V, která umožňuje díky svému nízkému úbytku napětí v propustném směru (cca.0,4V) napájení kitu a zároveň zabráňuje opačnému toku proudu při současném zapojení obou konektorů USB. Toto řešení je možné pouze v režimu kitu jako USB Device, v režimu USB Host/OTG je nutné diodu odstranit a zajistit externí napájení, které je pomocí pinu PC0- USB_OTGPowerSwitchOn spínáno dle potřeby připojeného externího napájení.

Hlavní vlastnosti USB OTG řadiče jsou:

- Kombinovaný Rx a Tx FIFO buffer o velikosti 325 x 35 bitů s dynamickou velikostí FIFO
- Podporuje session request protocol (SRP) a host negotiation protocol (HNP)
- Podporuje až 4 obousměrné endpointy a 8 kanálů typu Host s podporou periodického zasílání OUT paketů.

4.6 Základní popis systému Bluetooth

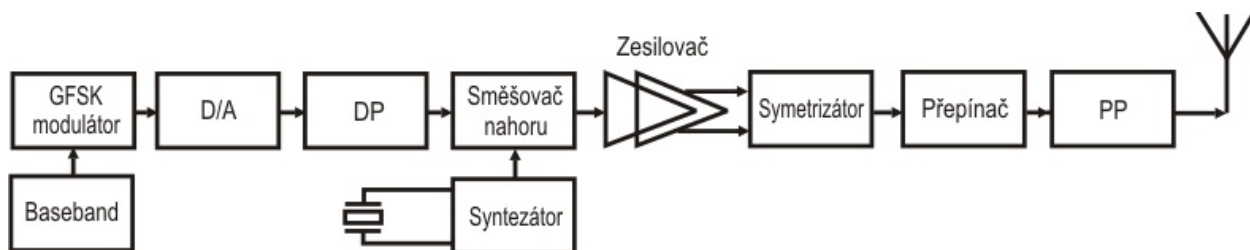
Bluetooth je rádiová technologie pro komunikaci ve velmi krátké vzdálenosti řádově desítky metrů. Bluetooth pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4GHz. Toto pásmo je využíváno i jinými bezdrátovými technologiemi, zejména WLAN (IEEE 802.11), proto bylo nutné snížit vzájemné rušení různých technologií v daném pásmu. Technologie Bluetooth využívá nízký výkon a frekvenční přeskoky nosné v rozprostřeném spektru (FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum). Dle definice je počet přeskoků 1600 s^{-1} a jsou řízeny adresou a synchronizačním signálem. Data se přenášejí v krátkých časových intervalech metodou časového duplexu TDD.

Šířka pásma na frekvenci 2,4GHz (ISM - Industrial Scientific Medicine) je 2400MHz až 2483,5 MHz. Pro toto pásmo je k dispozici 79 kanálů, pro jejichž nosné frekvence platí :

$$f = 2402 + k \text{ [MHz]}, \text{ kde } k = 0, \dots, 78. \quad (4.6.1)$$

Pro ochranu mimo vyhrazené pásmo jsou definována ochranná pásma – horní 3,5MHz, dolní 2 MHz. Výše uvedené kanály jsou platné pro Evropu a většinu států vyjma Francie a Španělska, kde je pásmo zúžené na 23 kanálů a obě ochranná pásma jsou 7,5MHz.

Rádiová část je většinou řešena specializovaným integrovaným modulem, ve kterém je vysílací i přijímací modul většinou se společnou přepínanou anténou. Anténa je většinou všesměrová úzkopásmová. Ve specifikaci Bluetooth [16] není přesně specifikováno řešení vysílací a přijímací části, na obr. 4.9 je blokové schéma možného řešení vysílací části dle [15].



Obr.4.9 Blokové schéma vysílače Bluetooth [15]

V bloku Baseband se provádí zpracování dat do paketů, kanálové kódování, chybová korekce, šifrování atd. Takto upravený datový tok se dále klíčuje s gaussovskou předmodulační filtrací v modulátoru GFSK. Dále se v D/A převodníku datový tok převádí do analogové podoby. Filtr typu dolní propust omezí nežádoucí vyšší složky frekvence po převodu v D/A převodníku. Směšovač nahoru (up converter) vytváří na výstupu signál s frekvencí v pásmu 2402 - 2480 MHz. Pro zvýšení odolnosti proti zrcadlovým frekvencím se používají dva směšovače zapojené paralelně přičemž se jejich výstupy sčítají nebo odečítají. Směšovač je řízený napětově řízeným kmitočtovým syntezátorem se smyčkou fázového závěsu umožňujícím rychlé přeladění frekvencí. Signál za směšovačem se výkonově zesílí ve výkonovém zesilovači s řízením zisku dle příslušné výkonové třídy. Výstup výkonového zesilovače bývá symetrický z důvodu potlačení rušivých napětí. Kvůli anténnímu konektoru je použit symetrizační člen. koncového stupně je společná pro vysílač i přijímač. Vysílaný signálu se od přijímaného odděluje pomocí automatického přepínače, který je přepínán na základě číslování time slotů. Signál je před vstupem do antény opět frekvenčně omezen pomocí pásmové propusti PP.

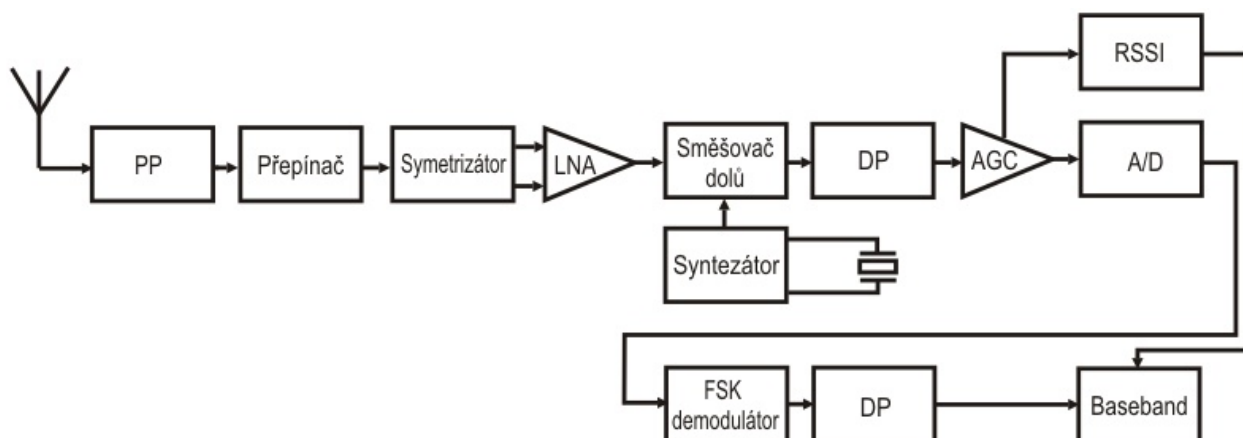
Pro výstupní signál jsou definovány výkonové třídy vztažené k výstupnímu konektoru antény. Zařízení třídy 1, s maximálním vysílacím výkonem 20 dBm (100 mW), musí umožňovat

řízení vlastního vysílacího výkonu až k úrovni 4 dBm (2,5 mW) a menší. Optimalizace výstupního výkonu se provádí na základě informace v řídicím paketu. Výkonové třídy a jim odpovídající výkonové úrovně jsou uvedeny v tab. 4.10.

Výkonová třída	Minimální výstupní výkon	Maximální výstupní výkon	Nominální výstupní výkon
1	1 mW (0 dBm)	100 mW (20 dBm)	-
2	0,25 mW (-6 dBm)	2,5 mW (4 dBm)	1 mW (0 dBm)
3	-	1 mW (0 dBm)	-

Tab.4.10. Výkonové třídy vysílače Bluetooth [15]

Pro příjem Bluetooth rádiového signálu se používají digitální nebo analogové přijmače. V Bluetooth digitálním přijímači se provádí zpracování mezifrekvenčního signálu v digitální oblasti, zatímco analogový přijímač řeší zpracování mezifrekvenčního signálu v analogové oblasti.

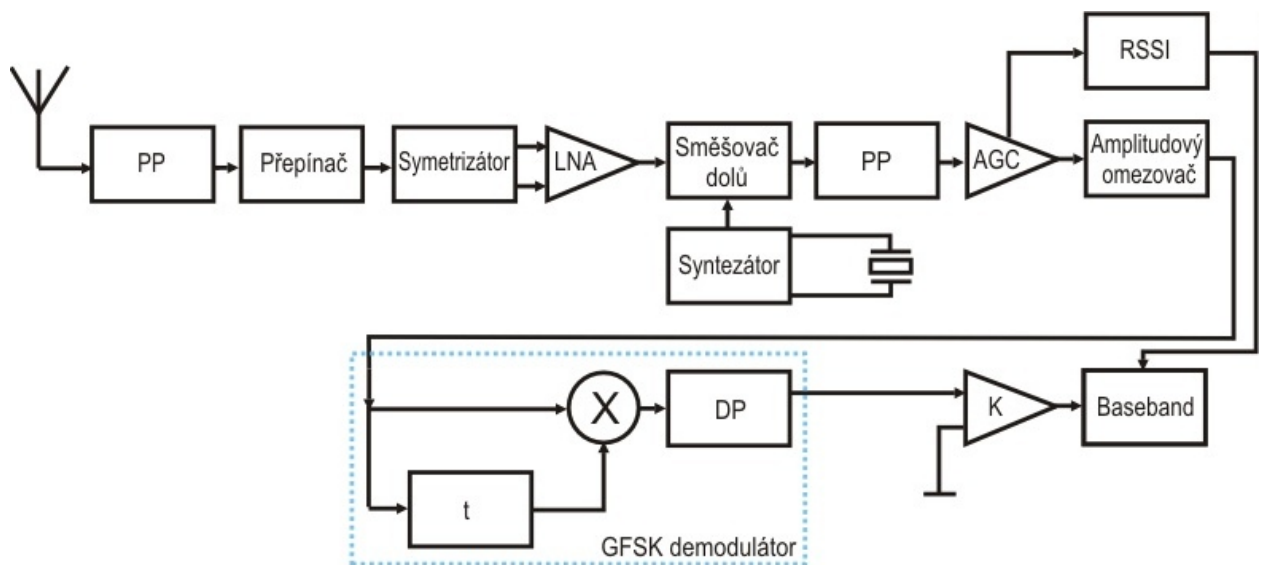


Obr.4.11. Blokové schéma digitálního přijímače Bluetooth [15]

Vysokofrekvenční signál přijatý anténou, která je společná pro příjem i vysílání, je nejdříve frekvenčně omezen pásmovou propustí PP na oblast příslušného kmitočtového pásma a poté přiveden na symetrizační člen. Pásmová propust, automatický přepínač a symetrizační člen jsou společné s vysílací částí. Dále se signál zesiluje v nízkošumovém zesilovači LNA z rozdílovým vstupem, který slouží k potlačení rušivých napětí. Zesílený signál je dále frekvenčně upraven ve směšovači směrem dolů. Směšovače pracují v paralelním zapojení obdobně jako u vysílací části. Frekvence na výstupu směšovače je obvykle v rozsahu 1 MHz až 5 MHz dle odpovídající nosné frekvence v GFSK modulátoru.

Signál ze směšovače je frekvenčně omezen dolní propustí DP, přičemž se částečně potlačí další možné interference. Za dolní propustí je signál dále zesílen v kaskádě zesilovačů s automatickým řízením zisku AGC (Automatic Gain Control). Součástí této kaskády zesilovačů bývá také indikátor síly přijímaného signálu RSSI (Received Signal Strength Indicator), který generuje signál RSSI pro linkový protokol LMP. RSSI je funkce, která umožňuje maximální možné snížení vysílacího výkonu. Výkon signálu za kaskádou zesilovačů musí vyhovovat dynamickému rozsahu A/D převodníku. Výstupní digitální signál za převodníkem se demoduluje v digitálním FSK demodulátoru, nežádoucí složky vzniklé při demodulaci jsou potlačeny v DP filtru.

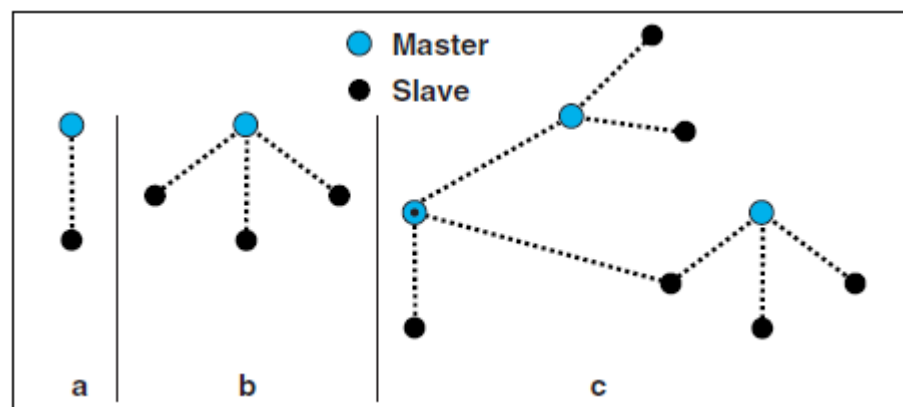
Toto řešení umožňuje dobrou integraci modulu, klade ale vysoké nároky na A/D převodník s nízkým kvantizačním zkreslením.



Obr.4.12. Blokové schéma analogového přijímače Bluetooth [15]

Na obr.4.12 je možné schéma analogového přijímače Bluetooth. Až po kaskádu AGC zesilovačů je blokové schéma obdobné. Analogový demodulátor GFSK může být řešen asynchronním demodulátorem nebo fázovým závěsem PLL. Dolní propust DP pak upravuje spektrum demodulovaného signálu. Za GFSK demodulátorem je jednoduchý komparátor, který funguje jako 1-bitový A/D převodník. Na jeho výstupu dostáváme digitální signál, který se dále zpracovává v základním pásmu. Výhodou tohoto typu přijímače je odstranění analogově-digitálního převodu, kdy před zpracováním signálu v základním pásmu se k úpravě tvaru signálu po demodulaci používá pouze jednoduchý komparátor. Pro odstranění interferencí z mezifrekvenčního signálu je zapotřebí velmi přesný automaticky laditelný analogový filtr typu pásmová propust. Vzhledem k obtížnější možnosti integrovatelnosti se spíše využívá v dostupných modulech digitální přijímač.

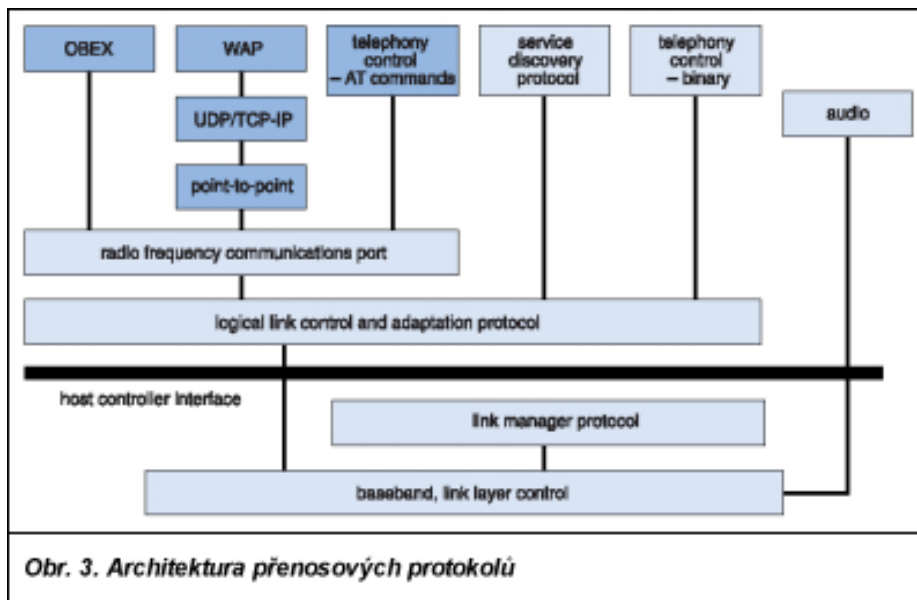
Komunikovat může současně 2 až 8 zařízení v tzv. síti piconet. Jedna buňka je vždy typu master a řídí komunikaci, ostatní jsou typu slave. Je možná i komunikace mezi různými sítěmi piconet tzv. scatternet, kdy jedna slave buňka komunikuje s více master buňkami na bázi časového multiplexu. Master buňka může být také zároveň slave buňkou v jiné síti piconet. Základní typy topologie piconetu je na obr. 4.13.



Obr.4.13. Síť piconet a) s jedním slave, b) s více slave, c) scatternet [16]

Data jsou vysílána v krátkých paketech. Pro přenos dat jsou definovány dva základní modulační módy – Basic Rate se základní přenosovou rychlostí 1Mbps a Enhanced Data Rate (EDR) s primární přenosovou rychlostí 2Mbps a sekundární 3Mbps.

Standard Bluetooth umožňuje využívat dva typy komunikačních kanálů, které se diametrálně liší přenosovými schopnostmi: asynchronní (ACL, Asynchronous Connectionless) a synchronní (SCO, Synchronous Connection Oriented). Oba je možné využít k zajištění přenosů dat podle požadavků jednotlivých jednotek. Pro zajištění komplikovanějších přenosů, kombinujících oba typy kanálů, je možné v průběhu spojení měnit typ kanálu.



Obr.4.14. Architektura přenosových protokolů dle standardu Bluetooth [16]

Na obrázku 4.14 je znázorněna architektura přenosových protokolů dle standardu Bluetooth :

- **Baseband, link layer control** - umožňují realizovat fyzické propojení s dalšími jednotkami v rámci buňky piconet. Starají se o základní synchronizaci a řídí komunikaci pomocí algoritmu pseudonáhodné přeskokové sekvence.
- **Link manager protocol (LMP)** - navazuje spojení mezi jednotkami Bluetooth. Řídí a sestavuje komunikaci vč. délky paketů používaných ke komunikaci. Tato vrstva také řídí napájecí módy a spotřebu. Dále řídí výměnu šifrovacích klíčů pro autentifikaci a šifrování.
- **Host controller interface (HCI)** - poskytuje jednotné rozhraní a metodu přístupu k hardwaru Bluetooth. Obsahuje příkazové rozhraní, správu kanálu, monitor stavu hardwaru, řídicí registry a registry událostí.
- **Logical link control and adaptation protocol (L2CAP)** - poskytuje služby vyšším vrstvám pro spojované (connection-oriented) a nespojované (connectionless-oriented) datové přenosy. Zejména zodpovídá za:
 - Multiplexing – multiplexování různých typů protokolů
 - Segmentation and Reassembly - rozdělení a opětovné složení datových paketů přesahujících maximální přípustnou délku
 - Quality of Services - zajišťuje předem dohodnuté a definované parametry, zejména přenosová rychlost a zpoždění
 - Groups - implementace práv pro mapování skupin jednotek do buňky piconet
- **Radio frequency communications port (RFCOMM)** - emulace protokolu sériového portu. Protokol poskytuje služby vyšším vrstvám, které používají pro přenos dat sériovou linku.

- **Service discovery protocol (SDP)** – definuje vyhledávání využitelných služeb serverů Bluetooth bez apriorní znalosti o jejich existenci. Součástí služeb je detekce nově dostupných služeb v síti a také detekce ukončených služeb.
- **Telephony control – binary (TCS Binary)** - je protokol definující řízení, sestavení přenosové linky a přenos hlasu a dat mezi jednotkami Bluetooth.
- **Audio** - definuje služby pro přenos zvuku mezi jednou nebo více jednotkami Bluetooth. Přenos zvuku nevyužívá služby vrstvy L2CAP, ale je po otevření a sestavení přenosové linky zajišťován přímo.

Standard Bluetooth definuje také vyšší vrstvy nezávislé na přenosových protokolech:

- **Telephony control – AT commands** - definuje skupinu servisních příkazů AT, obvykle využívaných pro řízení a konfiguraci sériových telefonních modemů a umožňuje komunikaci s jednotkou Bluetooth pomocí textových příkazů.
- **Point-to-point (PPP)** - paketově orientovaný protokol. Je součástí např. TCP/IP, kde se využívá k přenosu paketů IP přes sériové rozhraní RS-232, potažmo pro přenos paketů IP v rámci komutovaných linek přes modem, přičemž využívá služby vrstvy RFCOMM.
- **Protokoly TCP-IP** - protokoly TCP/IP slouží k propojení jednotky Bluetooth se zařízeními na internetu. Aplikace využívající k přenosu dat protokol IP je přenášejí přes protokol PPP, který je dále předává vrstvě RFCOMM.
- **Wireless application protocol (WAP)** - protokol pro bezdrátovou komunikaci, určený ke zpřístupnění internetových služeb. V kontextu Bluetooth se počítá s využitím protokolu WAP k předávání lokálních dat do přenosných zařízení v případě přihlášení klientské stanice do zóny spravované řídicí jednotkou.
- **Protokol OBEX (Object EXchange)** - volitelný protokol aplikační vrstvy navržený k výměně dat a řídicích informací pro jednotky podporující komunikaci prostřednictvím IrDa. Protokol využívá architekturu klient-server a je nezávislý na transportním mechanismu a přenosovém programovém rozhraní. OBEX používá RFCOMM jako hlavní transportní protokol.

Pro vzájemnou komunikaci mezi jednotkami jsou definovány standardní služby, které nabízejí zařízení Bluetooth. Tyto služby jsou definovány v tzv. profilech, které jsou specifikovány ve standardu Bluetooth. Základní přehled tradičních profilů je v tabulce 4.15.

Profil	Název	P
3DS	3D Synchronization Profile	1
A2DP	Advanced Audio Distribution Profile	1
AVRCP	A/V Remote Control Profile	1
BIP	Basic Imaging Profile	1
BPP	Basic Printing Profile	1
DI	Device ID Profile	1

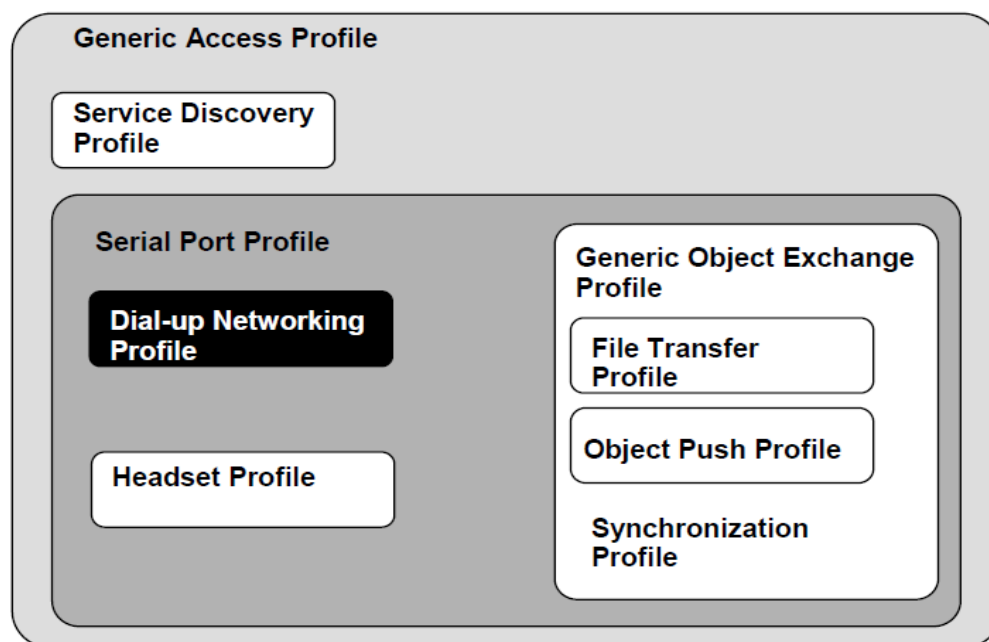
DUN	Dial-Up Networking Profile	1
FTP	File Transfer Profile	1
GAVDP	Generic A/V Distribution Profile	1
GOEP	Generic Object Exchange Profile	1
GNSS	Global Navigation Sat. System Profile	1
HCRP	Hardcopy Cable Replacement Profile	1
HDP	Health Device Profile	1
HFP	Hands-Free Profile	1
HSP	Headset Profile	1
HID	Human Interface Device Profile	1
MAP	Message Access Profile	1
OPP	Object Push Profile	1
PAN	Personal Area Networking Profile	1
PBAP	Phone Book Access Profile	1
SAP	SIM Access Profile	1
SDAP	Service Discovery Application Profile	1
SPP	Serial Port Profile	1
SYNCH	Synchronization Profile	1
VDP	Video Distribution Profile	1

Tab.4.15. Tabulka komunikačních profilů dle standardu Bluetooth [16]

V použitém Bluetooth modulu OBS411x je nastaven automaticky profil SPP – Serial Port Profile, proto bude dále popsán pouze tento profil.

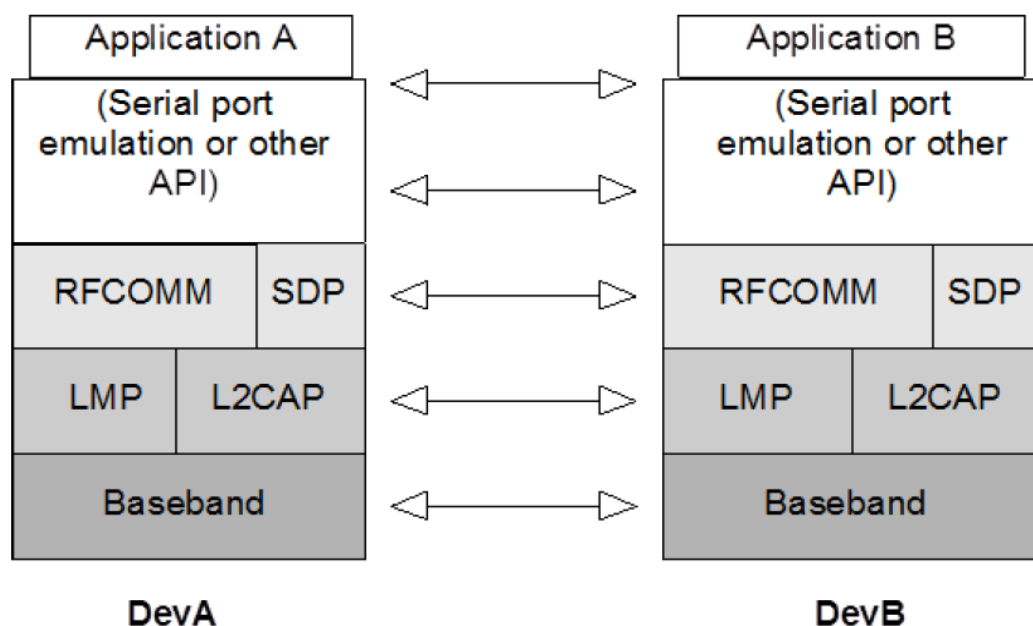
Serál Port Profile definuje protokoly a procedury, které umožňují používat Bluetooth technologii jako bezdrátovou náhradu RS232 sériového kabelu. Protokol SPP není samostatný profil, ale využívá ke své činnosti některé další moduly a profily. Závislost na jiných profilech je znázorněna na obr. 4.16.

Tento profil byl zaveden do standardu Bluetooth zejména pro využití staršími aplikacemi, které většinou mají jednu z komunikačních možností sériový port, který býval na všech starších PC. Proto je součástí instalace standardních ovladačů Bluetooth i virtuální COM port, který se vůči aplikaci tváří jako standardní COM port. Obdobným způsobem je řešena i komunikace přes USB – Virtual Serial Port. Těto skutečnosti je využito v návrhu měřicího přípravku, kdy komunikační kanál (Bluetooth nebo USB) je volen pouze výběrem COM portu při inicializaci komunikace v aplikaci. Toto řešení umožnilo navrhnout přípravek tak, aby nebylo nutné použít jediný mechanický přepínací prvek, který by mohl být při dynamickém namáhání přípravku zdrojem záskmitů a rušení.



Obr.4.16. Závislost SPP profilu na ostatních profilech [16]

Na obrázku 4.17 je znázorněn model protokolu, ze kterého je zřejmé, že SPP protokol využívá Baseband, LMP a L2CAP vrstvy 1 a 2 OSI modelu. Dále je využívána vrstva RFCOMM, která je převzata z definice GSM. Vrstva SDP - Service Discovery Protokol zajišťuje vyhledávání odpovídající služby ostatních připojených Bluetooth modulů.



Obr.4.17. Model protokolů SPP profilu [16]

Při sestavení spojení dvou Bluetooth bodů se SPP profilem probíhají následující kroky:

- Pomocí SDP vyšle master dotaz na RFCOMM číslo kanálu na kterém se případně nachází požadovaná aplikace na straně slave. Pokud jsou potřebné další údaje, tak je získá pomocí asociovaných Server Class ID identifikátorů
- Pokud je potřeba, tak se provede autentizace uzlů a dohodne případné šifrování
- Vyžádá se nový L2CAP kanál u vzdálené RFCOMM entity
- Na tomto kanálu se iniciuje nová RFCOMM session

- Na dohodnutém kanálu se zahájí přenos dat přes ustanovenou RFCOMM session

Po úspěšném provedení výše uvedených kroků mohou aplikace na obou stranách komunikovat přes sériovou linku.

4.7 Bluetooth modul CB-OBS411i

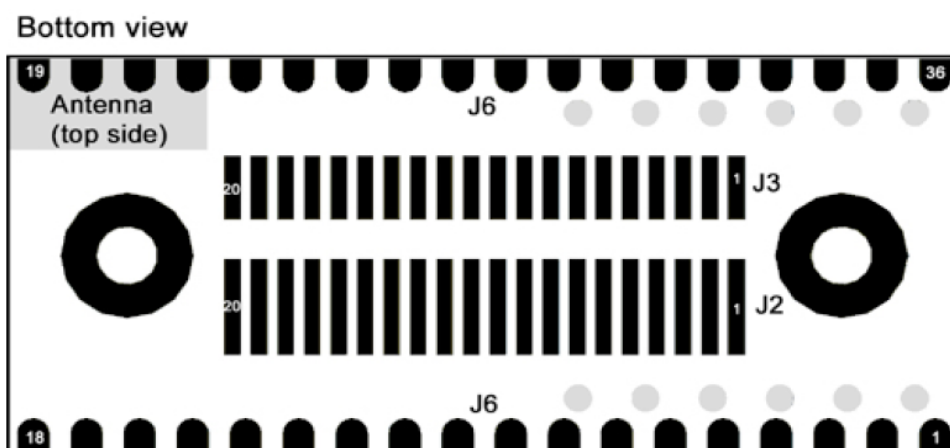
Modul CB-OBS411i je OEM Bluetooth modul malých rozměrů s SPP profilem pro transparentní, bezpečnou a rychlou sériovou komunikaci firmy connectBlue AB.



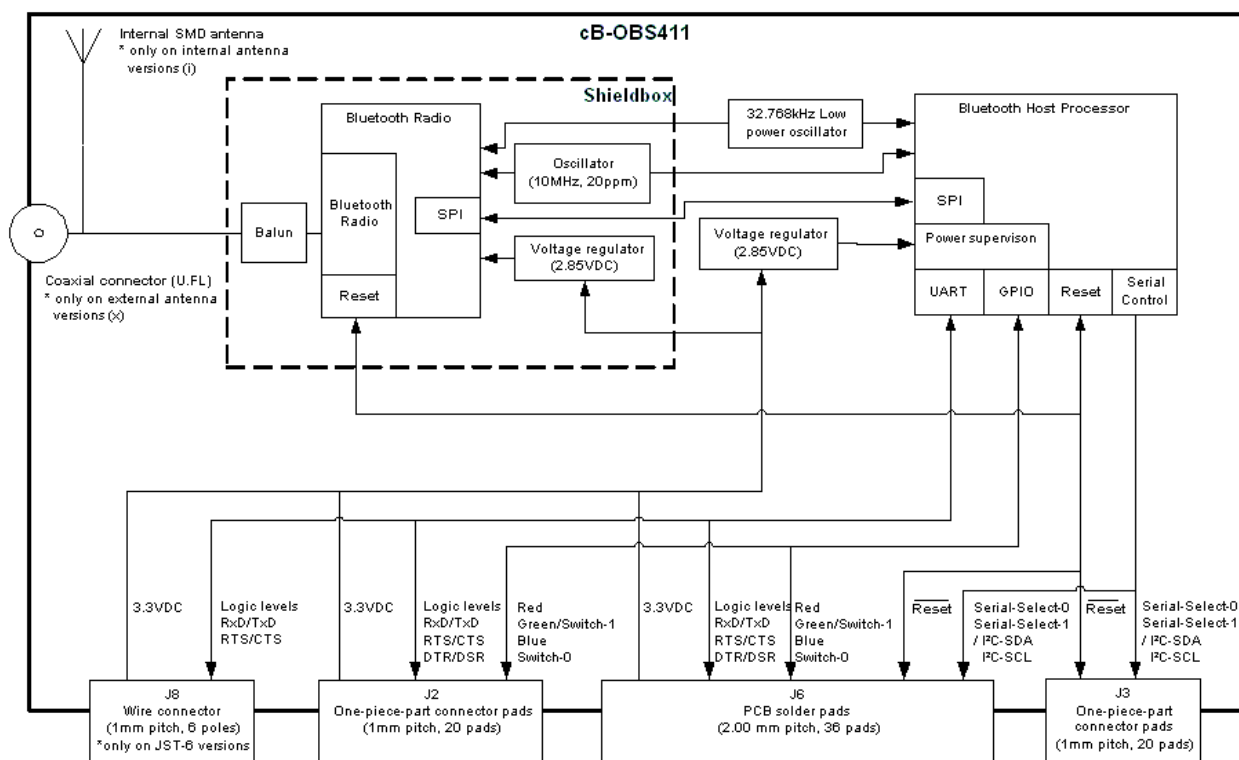
Obr.4.18. Modul CB-OBS411i [17]

Modul CB-OBS411i (obr. 4.18) má tyto základní vlastnosti:

- **Rozměry** – 16 x 36 x 3 mm
- **Bluetooth standard** - 2.1 + EDR (přípr. na Bluetooth 3.0)
- **RF část** – externí anténa, výst. výkon 4dBm (2,5mW), třída 1, dosah 150m
- **Rozhraní** – UART (Logic level 3V), RS232, RS485/422 (s převodníkem úrovně), 16x digital I/O, 4x 10-bit A/D (s BTIO firmware)
- **Přenosová rychlost** - 1200 bit/s - 1.36 Mbit/s
- **Interní technologie** - ST-Ericsson STLC2500DB a STMicroelectronics STM32F103RC
- **Napájení** - 3,0 - 6,0 V; 0,6 mA Power Save, 25,1 mA @ Tx 115,2 kbps
- **Provozní teplota** - -30°C až +85°C
- **Bluetooth profily** - SPP PAN (&NAP) DUN GAP SDP (OBEX)
- **Připojovací konektory** – J6 - 36 pájecích plošek na hranách PCB (viz. Obr. 4.19), J2 a J3 board-to-board konektor, možnost instalace JST konektoru J8

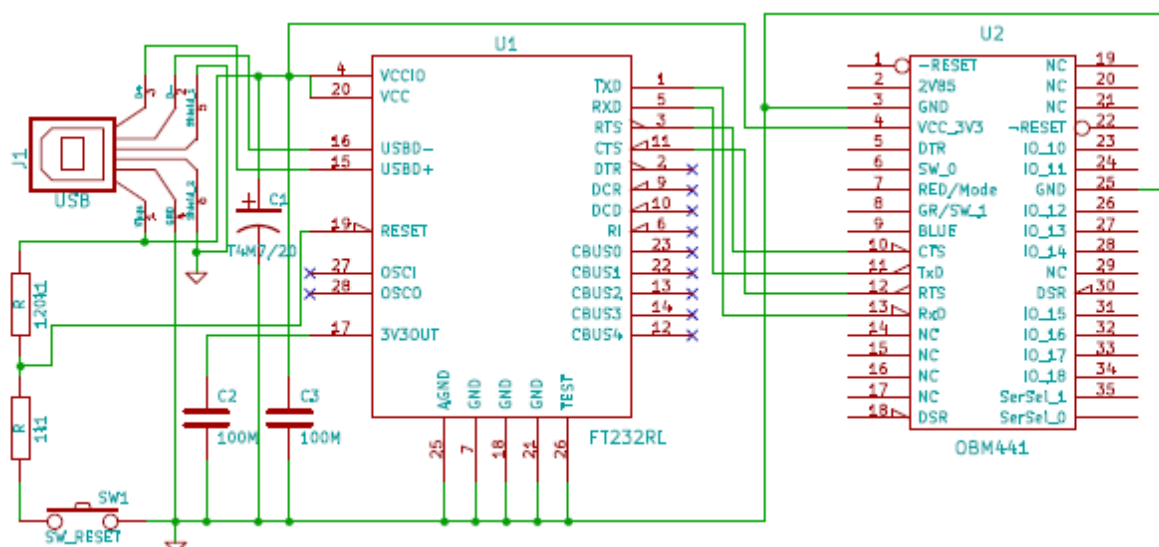


Obr.4.19. Konektory a piny modulu CB-OBS411i [17]



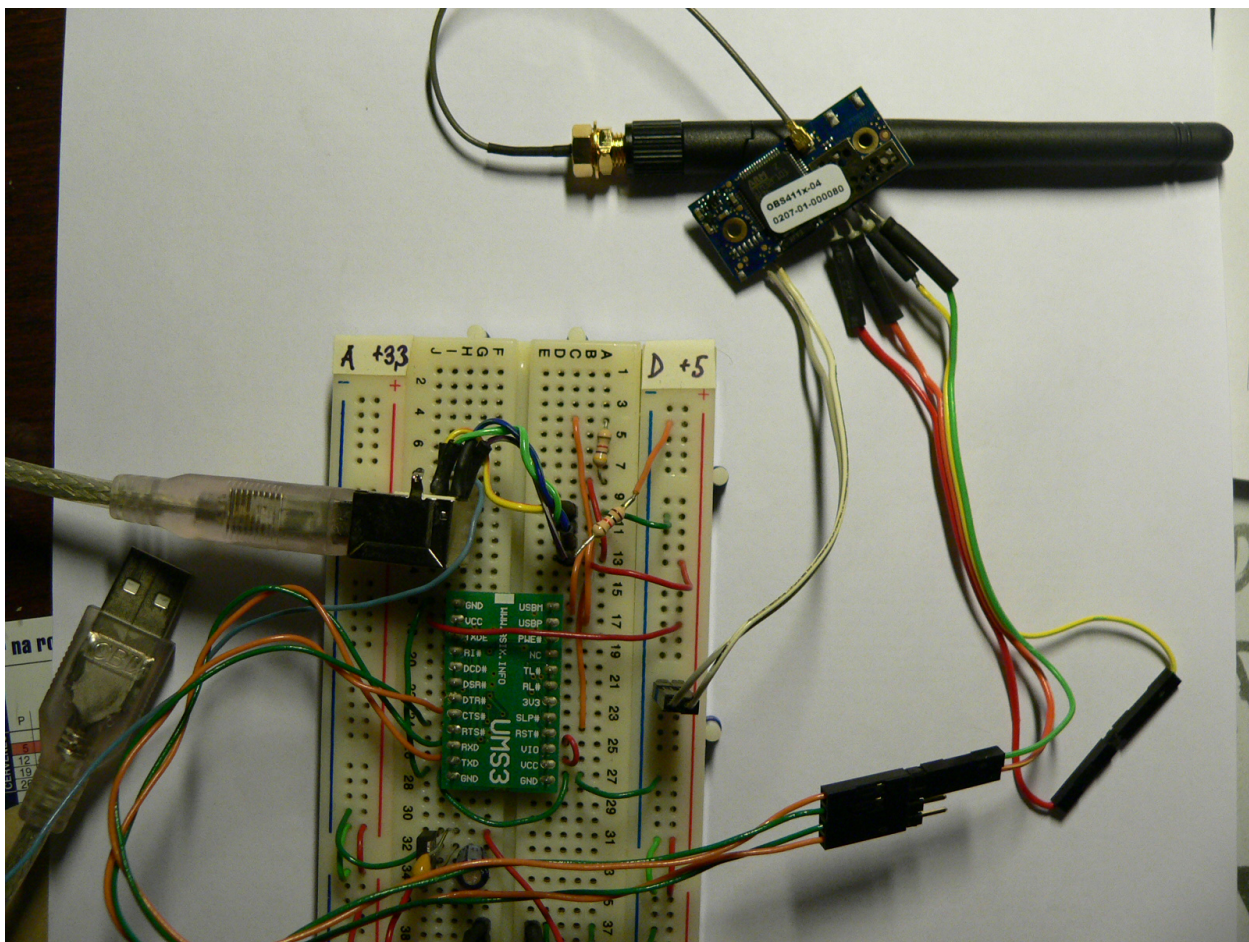
Obr.4.20. Blokové schéma modulu CB-OBS411i [17]

Před použitím modulu CB-OBS411i je nutné provést základní konfiguraci pomocí dodávaného firemního development kitu cB-ACC-34 OEM USB Module Adapter. Vzhledem k tomu, že z datasheetu byla zřejmá funkce kitu na základě chipu FTDI FT232R, byla zhotovena jeho náhrada založená na stejném chipu v modulu UMS3 firmy ASIX s.r.o. Schéma zapojení je na obrázku 4.21. Ve schématu nejsou z důvodu úspory místa zakresleny ochranné rezistory 100 Ω na vývodech 10,11,12 a 13 modulu U2 – CB-OBS411i.



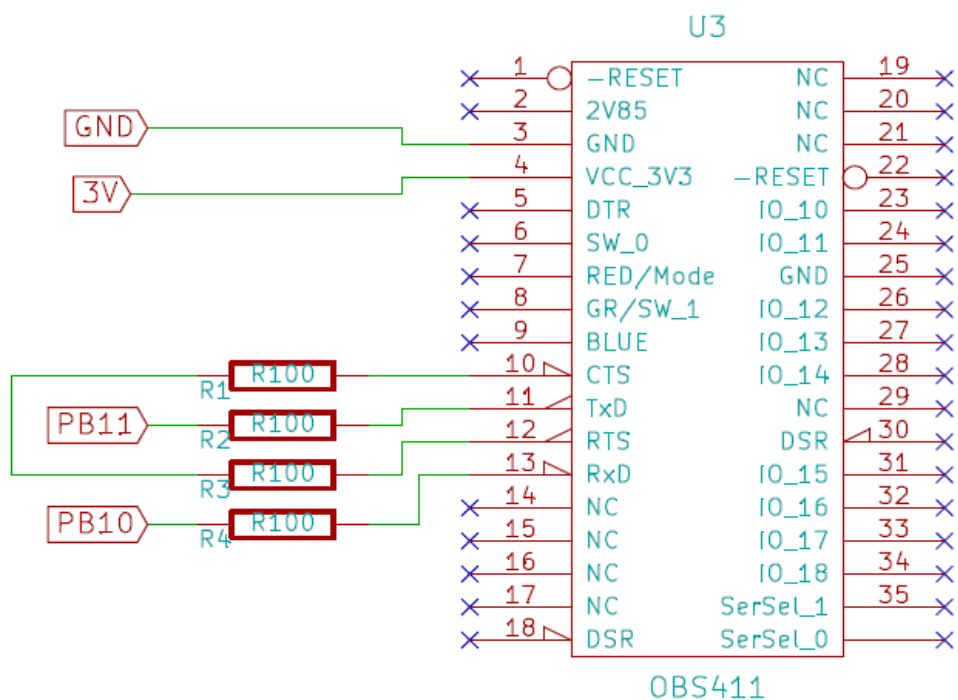
Obr.4.21. Schéma zapojení UMS3 (FT232RL) a CB-OBS411i

Konfigurace se provádí AT příkazy nebo konfiguračním SW SPA Toolbox, který je ke stažení na support.connectblue.com. V konfiguračních parametrech byla nastavena rychlost komunikace 115200 baud, nastaveno trvalé připojení po spárování Bluetooth zařízení, PIN kód byl nastaven na „0“ a změněn standardní popis zařízení. Modul CB-OBS411i s konfiguračním kitem na nepájivém poli je na obr. 4.22.



Obr.4.22. Zapojení UMS3 (FT232RL) a CB-OBS411i na nepájivém poli.

Modul CB-OBS411i je k STM32F4 Discovery kitu připojen pouze čtyřmi vodiči: GND pin3, napájení 3V pin 4, PB11 pin 11 – TxD a PB10 pin13 – RxD. Piny 10 a 12 (CTS a RTS) jsou přes ochranné rezistory propojeny pro případné použití v konfiguračním kitu. Schéma zapojení je na obrázku 4.23.



Obr.4.23. Připojení CB-OBS411i k STM32F4 Discovery kitu.

Pro signalizaci stavů přípravku byla využita čtveřice barevných LED diod Discovery kitu. Ve firmware jim byly přiřazeny následující funkce:

- Červená LED – signalizuje úspěšné připojení a inicializaci USB Virtual COM portu.
- Modrá LED – signalizuje komunikaci přes Bluetooth modul, volba komunikačního kanálu se určí volbou virtuálního COM portu v obslužné aplikaci.
- Oranžová LED – signalizuje aktivní měření, tj, je právě odečítáno definované množství hodnot v určené frekvenci. Tento údaj je potřebný pro obsluhu přípravku, během měření nesmí zasahovat do volného kmitání měřeného táhla.
- Zelená LED – signalizuje aktivní trigger, je to signál pro obsluhu pro vybuzení kmitání úderem, po úspěšném spuštění triggeru zelená LED vypíná a rozsvítí se oranžová LED.

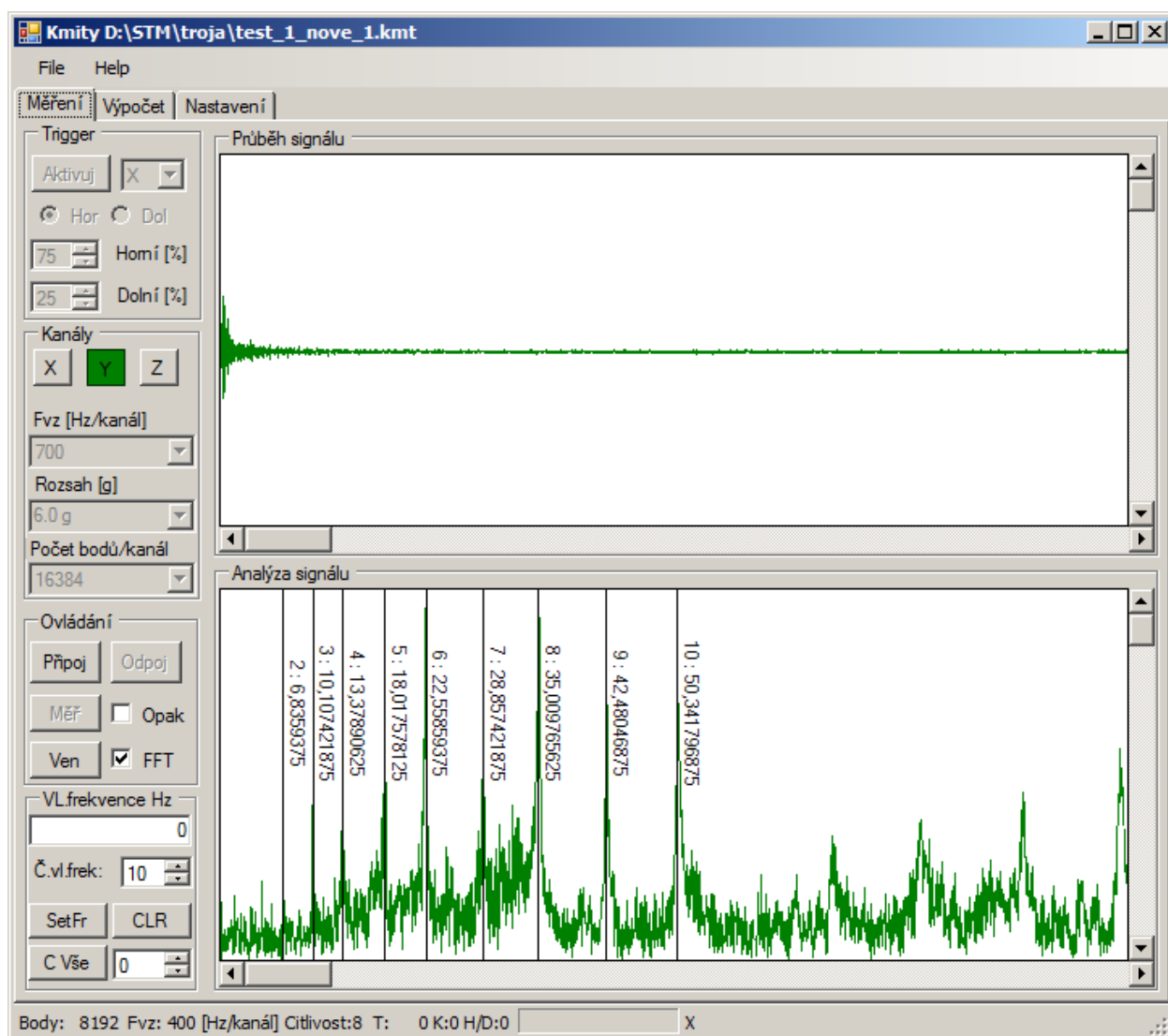
Pro otestování funkce přípravku byl Discovery kit a modul CB-OBS411i byla zhotovena krabice s průhledným víkem a magnetickým držákem. Použita byla krabice BK 1131 TR výrobce A&A, výroba, obchod a servis, s.r.o. (www.krabicky.cz). Výsledné provedení je na obrázku 4.24.



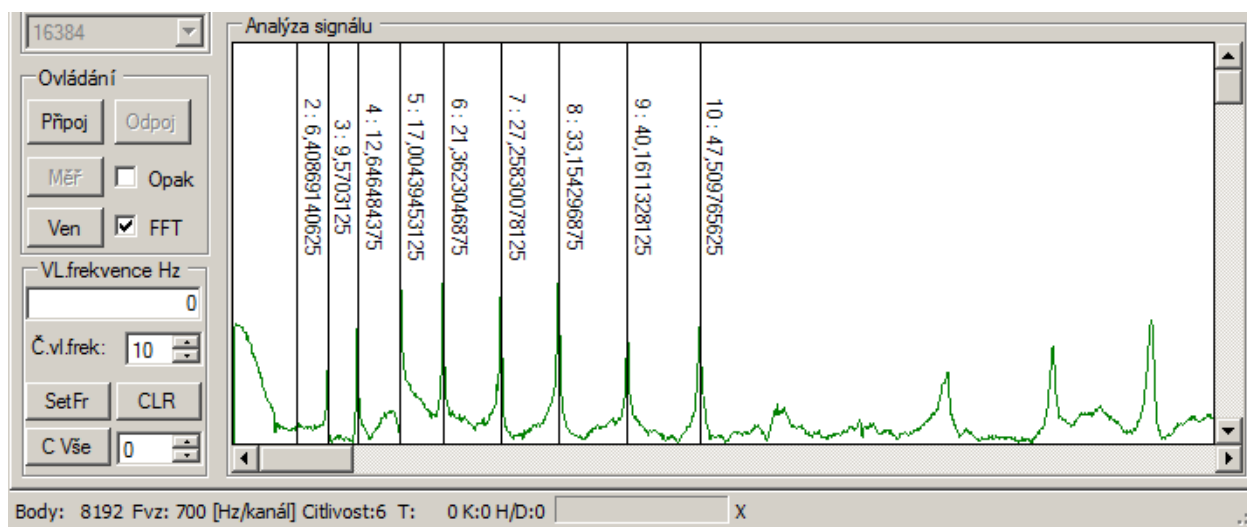
Obr.4.24. Měřicí přípravek při testech na táhle Trojského mostu.

Měřicí přípravek byl otestován na probíhající stavbě Trojského mostu na středním táhle o $\varnothing$ 76mm. Testovaný přípravek byl porovnán s obdobným přípravkem dle [09] s analogovým akcelerometrem MMA7260Q a 12-ti bitovým převodem dat. Test probíhal tak, že se umístily oba přípravky na stejné místo na táhle, nastaveny na obou spouštěcí triggeru a současně spuštěny

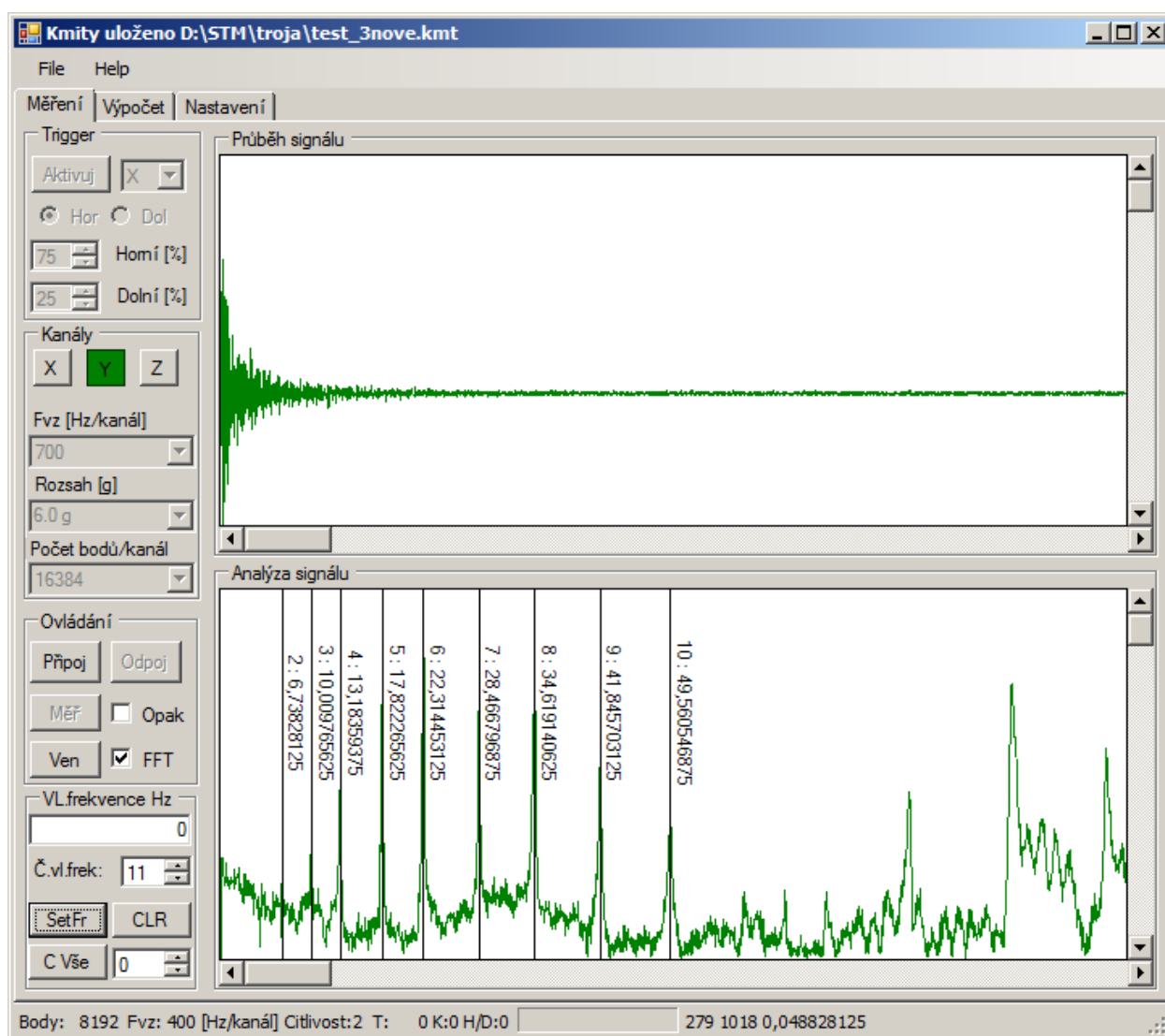
jedním úderem na měřené táhlo. Bylo provedeno několik testů s různě nastavenými parametry. Naměřené vlastní frekvence jsou na obr. 4.25. až 4.28.



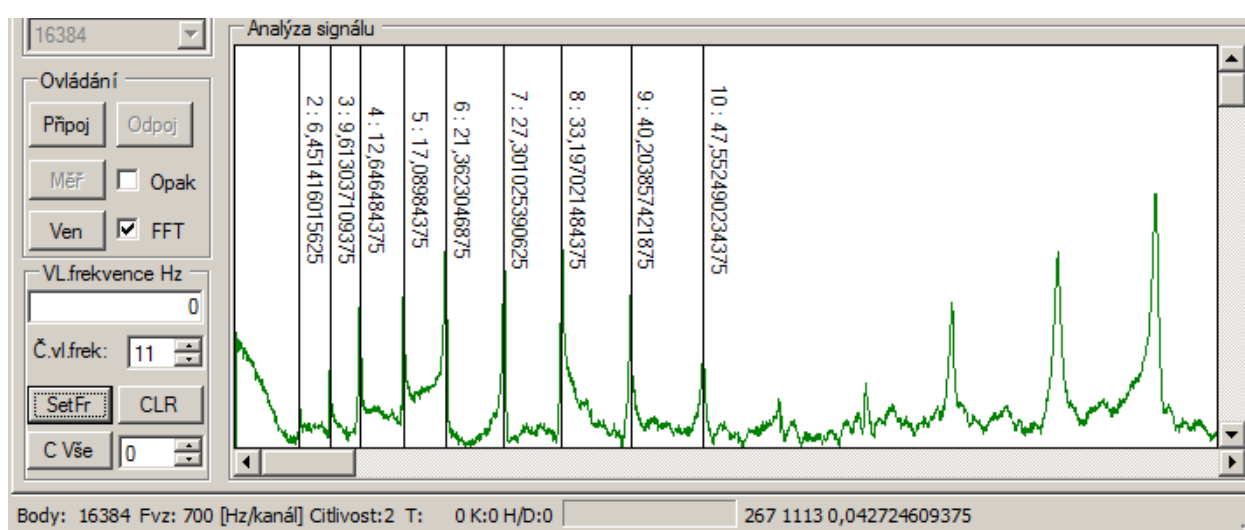
Obr.4.25. Měřící přípravek s LIS302DL, rozsah 8g, vz. frekvence 400 Hz, počet bodů 8192.



Obr.4.26. Měřící přípravek s MMA7260Q, rozsah 6g, vz. frekvence 700 Hz, počet bodů 8192.



Obr.4.27. Měřicí přípravek s LIS302DL, rozsah 2g, vz. frekvence 400 Hz, počet bodů 8192.



Obr.4.28. Měřicí přípravek s MMA7260Q, rozsah 2g, vz. frekvence 700 Hz, počet bodů 16384.

Rozlišovací schopnost – frekvenční bin $\Delta f = f_s / N$, kde f_s je vzorkovací frekvence, N je počet bodů. Pro $f_s = 400$ Hz a 8192 bodů je 0,0488 Hz. Porovnávací měření s MMA7260Q bylo provedeno s $f_s = 700$ Hz, 8192 bodů ($\Delta f = 0,0854$ Hz) a 16384 bodů ($\Delta f = 0,0427$ Hz). Porovnání změřených vlastních frekvencí je v tabulce 4.29 a 4.30.

Test 1				
č. frekvence	LIS302DL	MMA7260Q	Rozdíl	Rozdíl
[-]	v. frekv [Hz]	v. frekv [Hz]	[Hz]	[%]
2	6,836	6,409	0,427	6,250
3	10,107	9,570	0,537	5,314
4	13,379	12,646	0,732	5,475
5	18,018	17,004	1,013	5,623
6	22,559	21,362	1,196	5,303
7	28,857	27,258	1,599	5,541
8	35,010	33,154	1,855	5,300
9	42,480	40,161	2,319	5,460
10	50,342	47,510	2,832	5,626

Tab.4.29. Test 1 – rozsah 8g.

Test 2				
č. frekvence	LIS302DL	MMA7260Q	Rozdíl	Rozdíl
[-]	v. frekv [Hz]	v. frekv [Hz]	[Hz]	[%]
2	6,738	6,451	0,287	4,257
3	10,010	9,613	0,397	3,963
4	13,184	12,646	0,537	4,074
5	17,822	17,090	0,732	4,110
6	22,314	21,362	0,952	4,267
7	28,467	27,301	1,166	4,095
8	34,619	33,197	1,422	4,108
9	41,846	40,204	1,642	3,924
10	49,561	47,552	2,008	4,052

Tab.4.30. Test 2 – rozsah 2g.

Rozdíly v naměřených frekvencích jsou větší než frekvenční bin Δf , pro rozsah 8g je rozdíl v naměřených vlastních frekvencích cca 5,3%, pro rozsah 2g je rozdíl cca 4 %. Vzhledem k tomu, že nelze jednoznačně určit které měření je přesnější, nelze na základě hodnot vlastních frekvencí rozhodnout, zda je měření pomocí LIS302DL dostatečně přesné. Toto by bylo možné ověřit na měřící vibrační stolici. Hlavním kritériem pro posouzení přesnosti měření je přesnost určení síly v táhlech na základě změřených vlastních frekvencí a vhodného modelu. Při měření pomocí jiných metod (tenzometrie, měření tlaku v napínavých lisech atd ...) se nedosahuje lepší nejistoty měření než 15% naměřené hodnoty.

Jelikož akcelerometr má pouze osmibitový AD převodník, lze zvýšit přesnost měření doplněním přípravku akcelerometrem s analogovým výstupem (např. MMA7260Q) a využít přesný časovač a 12-ti bitový převodník procesoru STM32F407VGT6. Jako alternativu lze také uvažovat akcelerometr s digitálním výstupem minimálně 12 bitů a vyšší vzorkovací frekvencí. (např. ADXL 345 fy. Analog Devices)

5. Software měřicího přípravku

5.1 Komunikace s PC

Pro komunikaci STM32F4 Discovery kitu s PC byl využit řadič USB OTG, USB Virtual COM device library a Bluetooth COM port. Komunikace po virtuálním sériovém portu je vzhledem ke vzorkovací frekvenci pro tento přenos dat dostačující. Při měření průběhu dynamické odezvy se naměřené hodnoty přenášejí on-line přes USB nebo Bluetooth virtual COM port do PC bez ukládání do mezipaměti. Pro každý naměřený bod se přenášejí dva byte:

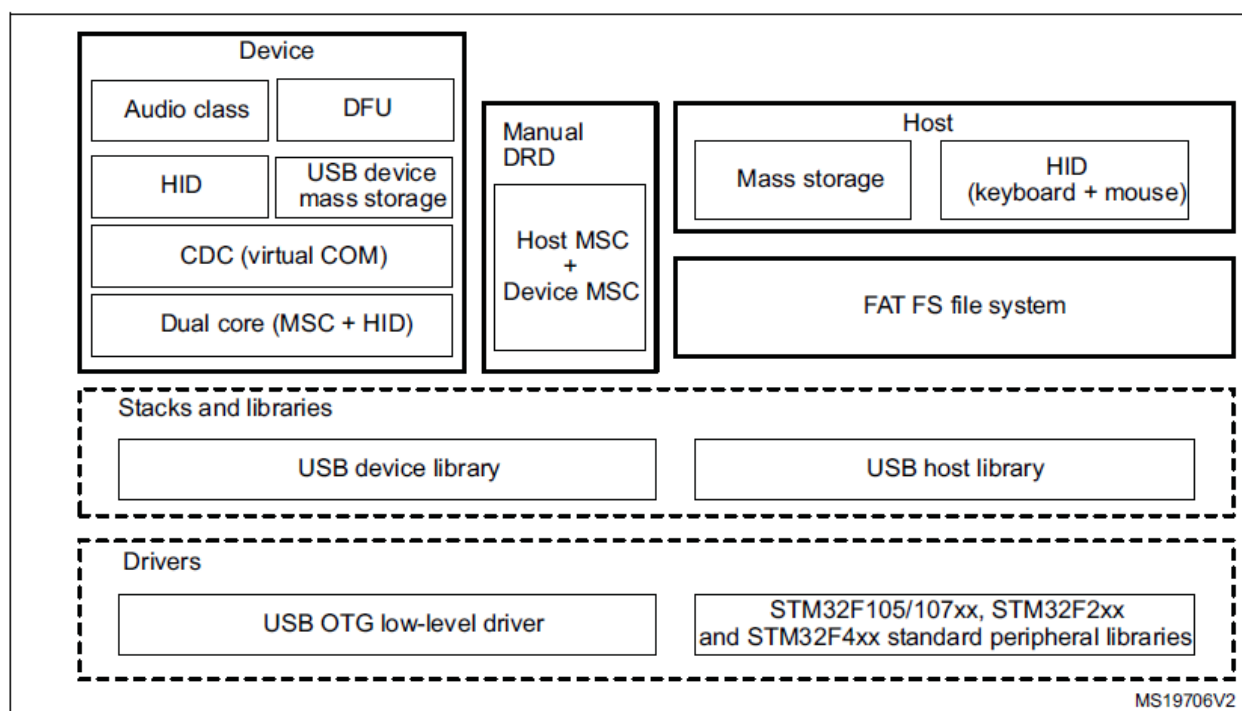
- 1. byte přenáší dolních 8 bitů naměřené hodnoty
- 2. byte přenáší ve dolních 4 bitech přenáší horní 4 bity naměřené hodnoty v případě 12-ti bitového převodníku a v horních 4 bitech se přenáší číslo měřeného kanálu

Tato definice přenosu naměřených dat umožní v dalších verzích připojit externí akcelerometry pro současné měření a využít 12-ti bitového AD převodníku.

Maximální vzorkovací frekvence akcelerometru LIS302DL je 400Hz. Z těchto údajů lze určit minimální nutnou přenosovou rychlost:

- $f_{vz} = 400\text{Hz}$ (3 kanály x 2 byte)
- Vzorkovací perioda $T_{vz} = 1/f_{vz} = 1/400 = 0,0025\text{ s}$
- Za T_{vz} se musí přenést 6 byte – $6 \times (8 \text{ bitů} + \text{startbit} + \text{stopbit})$. Minimální baudrate je $6 \times 10 / 0,0025 = 24000\text{ Baud}$
- Vzhledem k možnosti připojení externích akcelerometrů s vyšší vzorkovací frekvencí byla zvolena rychlost 115200 Baud
- Doba přenesení $6 \times 10 \text{ bitů} = 60 / 115200 = 0,5208\text{ ms} < 2,5\text{ ms}$

Komunikační firmware kitu je součástí USB host and device library dodávané firmou STMicroelectronics. Organizace knihovny je na obr. 5.1.



Obr. 5.1. Přehled organizace USB host and device library [13]

USB knihovna je řešená jako systém vrstev a ovladačů které jsou plně konfigurovatelné ve zdrojových souborech v jazyku C. Pro komunikaci s PC byla zvolena třída zařízení CDC (virtual COM). Při testování funkčnosti zkompilevané třídy CDC probíhal přenos dat v pořádku, bohužel virtuální hardwarové linky pro řízení komunikace RTS a DTR nefungovaly.

Nejdříve byla prostudována definice USB CDC class v [14], kde bylo zjištěno, že stavy linek RTS a DTR by měly být řešeny v *Communication Interface Class Messages* a to zprávou *SetControlLineState*. Definice zprávy (Request) je následující tabulce:

bmRequestType	bRequest	wValue	wIndex	WLength	Data
00100001B	SET_CONTROL_LINE_STATE	Control Signal Bitmap	Interface	Zero	None

Tab. 5.2. Request *SetControlLineState* [14]

Definice stavu linek se přenáší v dolních dvou bitech hodnoty *wValue* a jsou definovány následovně:

Bit position	Description
D15..D2	RESERVED (Reset to zero)
D1	Carrier control for half duplex modems. This signal corresponds to V.24 signal 105 and RS-232 signal RTS. 0 - Deactivate carrier 1 - Activate carrier The device ignores the value of this bit when operating in full duplex mode.
Bit position	Description
D0	Indicates to DCE if DTE is present or not. This signal corresponds to V.24 signal 108/2 and RS-232 signal DTR. 0 - Not Present 1 - Present

Tab 5.3 Definice stavu linek RTS a DTR ve *wValue* [14]

Po detailním prozkoumání zdrojových souborů USB knihovny bylo zjištěno, že autoři při dekódování USB zpráv do vyšší vrstvy předávali pouze hodnoty v položce *Data*, v případě nulové délky *wLength* se nepředávala data žádná.

Vzhledem k tomu, že nebylo v časových možnostech zkontrolovat implementaci všech příslušných definovaných zpráv (Request), bylo zvoleno řešení jen pro potřebnou zprávu *SetControlLineState*.

V místě dekódování zpráv byl implementován test na zprávu *SetControlLineState*, u které byla hodnota *wValue* zkopírována do položky *Data* a hodnota 0 v proměnné *wLength* byla změněna na hodnotu 1. Takto upravená zpráva se předala standardní cestou ke zpracování nadřazené funkci v souboru `usbd_cdc_vcp.c`:

```
static uint16_t VCP_Ctrl (uint32_t Cmd, uint8_t* Buf, uint32_t Len)
{
...
    case SET_CONTROL_LINE_STATE:
        /* Set status RTS and DTR lines */
        RTS = Buf[0] & 0x02;
        DTR = Buf[0] & 0x01;
        Break;
...
}
```

Globální proměnné RTS a DTR jsou označeny jako *volatile* a jsou součástí stavových proměnných které řídí hlavní smyčku programu.

Implementace výjimky pro zprávu *SetControlLineState* v souboru *usbd_cdc_core.c*:

```
static uint8_t usbd_cdc_Setup (void *pdev, USB_SETUP_REQ *req)
{
....
    case USB_REQ_TYPE_CLASS :
    ....
    else /* No Data request */
    {
        if(req->bRequest == SET_CONTROL_LINE_STATE) //opr. přenosu stavu
                                                    RTS a DTR
        {
            CmdBuff[0]= req->wValue; // vypučen k tomu buffer
            APP_FOPS.pIf_Ctrl(req->bRequest, CmdBuff, 1); // stav RTS a
                                                    DTR je v CmdBuff[0]
        }
        else
            /* Transfer the command to the interface layer */
            APP_FOPS.pIf_Ctrl(req->bRequest, NULL, 0);
    }
}
```

Komunikace Bluetooth modulu OBS411x je navržena tak, aby komunikace ze softwarového hlediska probíhala obdobně jako USB komunikace, kdy po vyvolaném přerušení jsou k dispozici 3 byte přijatého příkazu. Toto řešení umožňuje použít stejné funkce ve vyšších vrstvách software Discovery kitu, kdy se příslušné funkce řídí pouze stavovou proměnnou *inp_chan*, která určuje kterým kanálem probíhá komunikace s PC. (USB = 0, Bluetooth = 1) Tato stavová proměnná se nastavuje při prvním vyvolaném komunikačním přerušení dle zařízení které toto přerušení vyvolalo. Toto řešení bylo zvoleno proto, aby na přípravku nebyly žádné mechanické ovládací prvky, které by mohly být při otřesech zdrojem nežádoucích rušení a zákmitů.

Komunikace mezi modulem OBS411x a Discovery kitem probíhá přes USART3, komunikační parametry jsou stejné jako u Virtual COM přes USB.

5.2 Aplikační komunikační protokol

Komunikační protokol je založený na principu master – slave, kdy měřicí přípravek čeká na pokyny nadřazeného PC. Komunikace ze strany PC probíhá pomocí 3 bytových příkazů, kde 1. byte definuje příkaz, 2. a 3. byte jsou parametry příkazu. Vysílají se vždy všechny 3 byte bez ohledu na počet parametrů z důvodu snadné implementace a kontroly přenosu dat. Na každý příkaz je definována ve firmware příslušná odezva, konkrétně je to nastavení stavových proměnných, nebo zahájení měření a přenosu definovaného počtu dat. Po většině příkazů se do PC přenesou zpět výpis stavových proměnných a je provedena následná kontrola požadovaných změn. Tento způsob komunikace byl převzatý z [09] kvůli zachování kompatibility s předchozím přípravkem.

Definované příkazy vč. hex. kódu jsou:

MEAS_START	0x73
NR_OF_POINTS	0x72 // POINTH, POINTL
GET_MEMORY	0x71
TIMER_SET	0x69 // TMR0H, TMR0L
ACCEL_SENS_SET	0x68 // SENS
TRIG_LEVEL_SET	0x67 // TRIGH, TRIGL
TRIG_TYPE_SET	0x66 // TRIGD

Příkaz	Par.1	Par.2	Popis	Odezva
73h	-	-	Start měření	Vysílá definovaný počet naměř. bodů
72h	POINTH	POINTL	Počet naměř. bodů	Nastaví počet bodů pro jedno měření
71h	-	-	Výpis paměti	Odešle obsah paměti RAM proc. do PC
69h	TMR0H	TMR0L	Nastavení vzorkovací frekv.	Nastaví 100 nebo 400
68h	SENS	-	Nastavení citlivosti akceler.	Nastaví rozsah (1 nebo 4 = 2/8g)
67h	TRIGH	TRIGL	Nastaví úroveň triggeru	Nastaví spouštěcí úroveň 0 až 256
66h	TRIGD	-	Nastaví typ a kanál triggeru	Horní 4 bity – č.kanálu, dolní – druh.trig.

Tab.5.4 Měřicí přípravek – přehled příkazů, převzato z [09]

Struktura příkazů je definována tak, aby je bylo možné v budoucnu libovolně rozšiřovat např. při rozšíření typu nebo množství akcelerometrů, komunikace s teplotním čidlem atd.

Tok dat je řízen linkovým signálem RTS, kterým potvrzuje nadřazené PC odeslání dat a povoluje jejich zpracování firmwarem kitu. U modulu OBS411x se nepodařilo samostatně řídit signál RTS, proto byla zvolena jeho emulace, kdy je tento signál zapnut ihned po obdržení signálu přerušení z DMA paměti a uvolněn až po úspěšném načtení všech tří byte do stavových proměnných. Řešení komunikace s modulem OBS411x je souborech `blueTooth.c` a `blueTooth.h` na příloženém CD v projektu firmware přípravku.

5.3 Firmware procesoru STM32F407VGT6

Firmware je postavené nad standardními knihovnami pro USB, akcelerometr LIS302DL a STM32F4 Discovery kit. Tyto knihovny jsou součástí bohaté podpory firmy STMicroelectronics pro Discovery kit.

V inicializační části programu jsou inicializovány globální stavové proměnné, knihovny používaných periférií a samotné periferie. Proběhne proces enumerace a identifikace USB device, správné připojení k hostu je signalizováno červenou LED diodou LD5.

Hlavní smyčka je řešená jako stavový automat, kdy ze základního stavu čekání na příkaz přejde program po obdržení relevantních dat a povolení mastera do stavu vykonání příkazu. Po vykonání příkazu se program vrací do stavu čekání na příkaz.

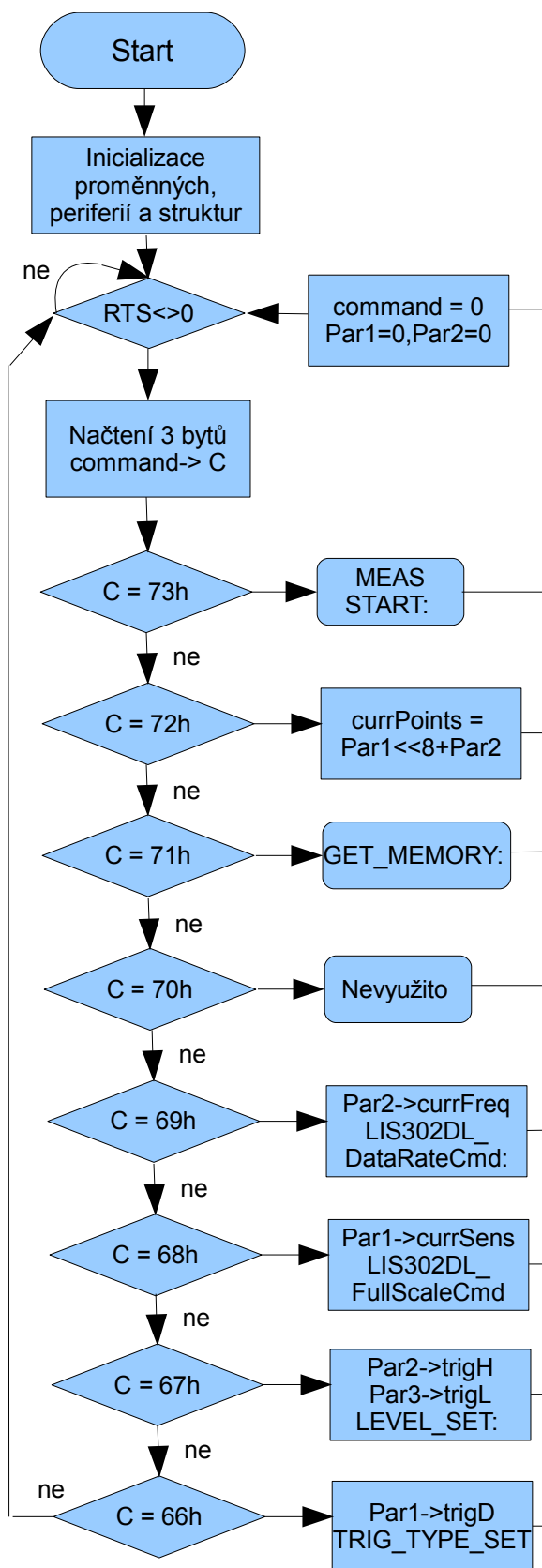
Vzhledem k tomu, že komunikace z PC probíhá asynchronně v přerušení, jsou stavové proměnné čteny v cyklu vždy jen jednou aby se celý cyklus dokončil se správnými hodnotami stavových proměnných. Čtení relevantních parametrů je zajištěno signálem RTS, kterým master při zasílání dat pozastaví hlavní smyčku zpracování dat až do ukončení přenosu všech tří bytů. Tím je zabezpečen bezkonfliktní běh programu.

Vyčítání naměřených dat z akcelerometru probíhá pasivním způsobem tak, že při aktivním příkazu měření (MEAS_START 0x73) se v cyklu testuje registr 27h, ve kterém je údaj zda jsou připravena nová data na kanálech XYZ. Poté jsou data načtena a poslána do PC, kde jsou zobrazena na spodní liště okna pro uživatelskou kontrolu.

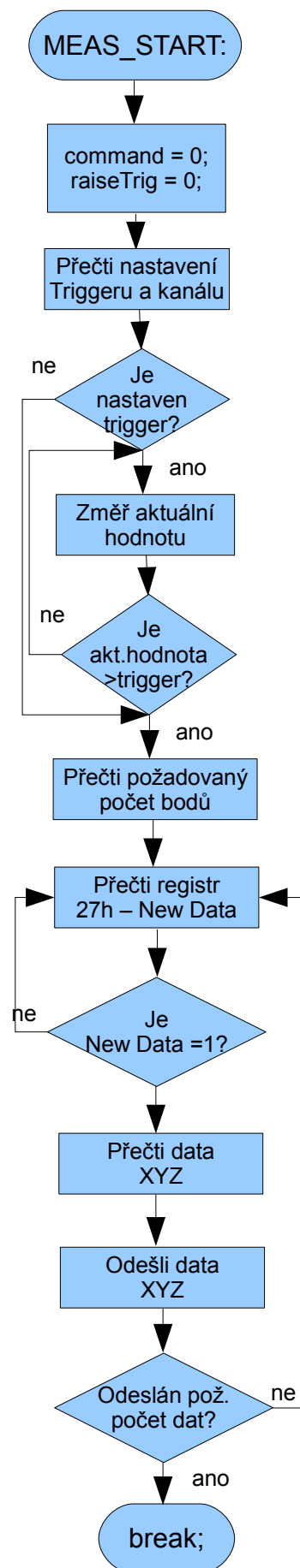
Vývojové diagramy hlavní smyčky a měřicího cyklu jsou na obr. 5.5 a 5.6.

Vývoj firmware probíhal v integrovaném Open Source prostředí CoCoX CoIDE (www.cocox.org) s integrovaným ARM GCC compileru verze 4.6.

V projektu jsou použity standardní knihovny pro USB CDC (virtual COM), akcelerometr LIS302DL (SPI komunikace) a STM32F4 Discovery kit dle dokumentace a vzorových příkladů obsažených v uživatelských příručkách - [10], [12] a [13].



Obr.5.5 Hlavní smyčka programu



Obr.5.6 Podprogram spouštění měření

5.4 Uživatelská aplikace v PC

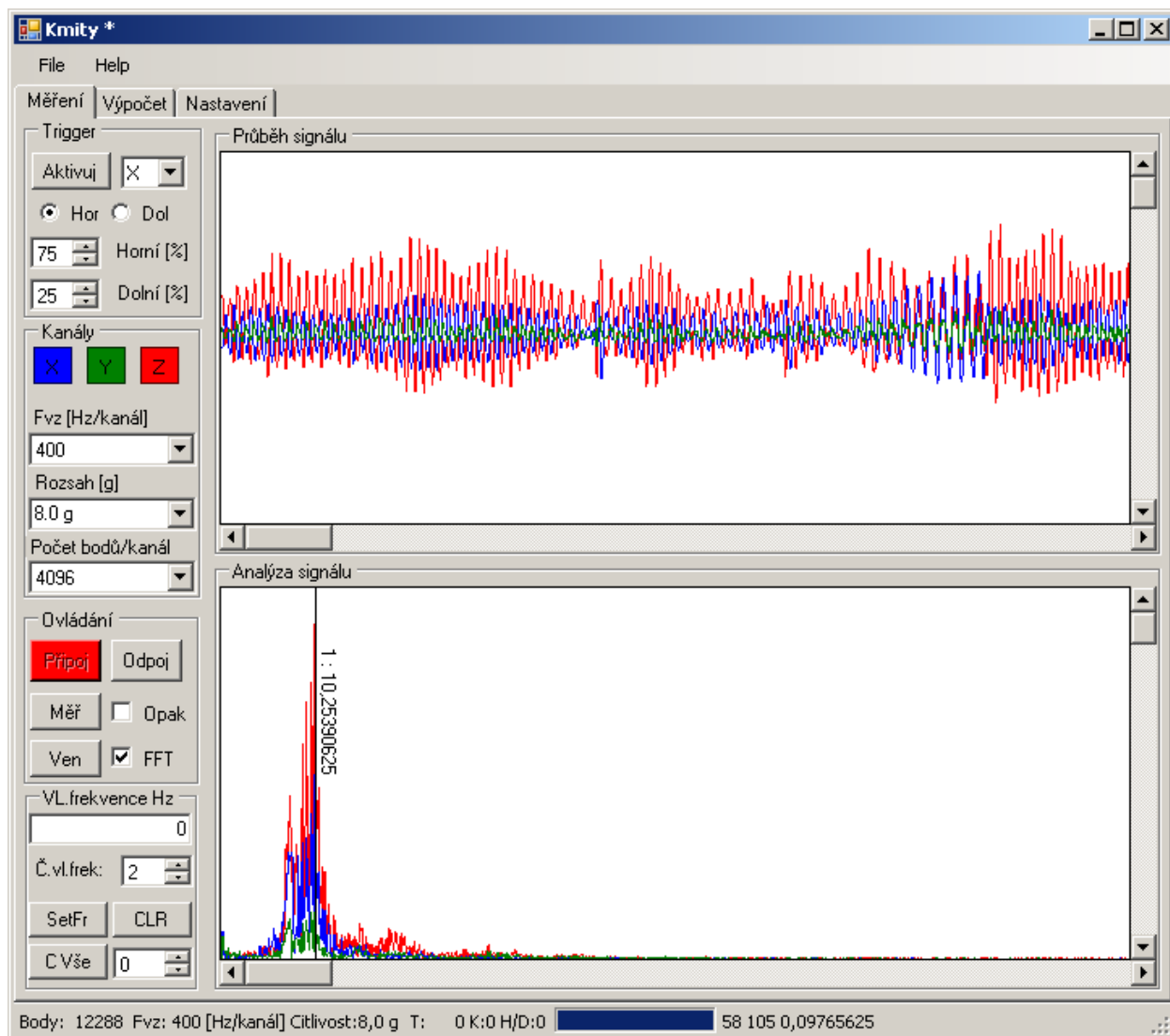
Uživatelská aplikace byla vyvinuta v rámci [09] a upravena pro STM32F4 Discovery kit. Vyvinuta byla v jazyku C# v Microsoft Visual Studiu 2008. Program je rozčleněn na tyto hlavní třídy:

- FormKmity.cs – hlavní třída, která zajišťuje komunikaci s uživatelem
- Fourier.cs – třída pro výpočet Fourierovy transformace
- FourierDirection.cs – třída pro určení přímé nebo zpětné Fourierovy transformace
- Complex.cs a ComplexF.cs – třídy pro výpočty a uložení komplexních čísel

Třídy Fourier.cs, FourierDirection.cs, Complex.cs a ComplexF.cs byly převzaty z [102] a byly rozšířeny pro maximální počet bodů 16384.

Sériovou komunikaci přes virtuální COM port zajišťuje .NET komponenta SerialPort běžící ve vlastním vláknu. Odesílání a příjem dat probíhá asynchronně ve vláknu komponenty. Pro zpracování přijatých dat je nutné zaregistrovat pomocí příslušného delegáta obslužnou funkci pro událost přijetí dat.

Tato funkce po přijetí požadovaného počtu naměřených dat roztrídí data po příslušných kanálech X, Y a Z. Poté se pro každý kanál vypočte Fourierova transformace a vše se uloží v ArrayListu pro zobrazení v hlavní třídě programu.



Obr.5.7 Okno hlavní aplikace

Hlavní okno aplikace je rozdělené na tři části.(obr.5.7) V levé části je panel pro nastavování parametrů měření a komunikace, v horní části je panel pro zobrazení naměřených dat a ve spodní části je panel pro zobrazení FFT.

V panelu Trigger se aktivuje automatické spouštění měření tlačítkem Aktivuj. Při aktivaci má tlačítko zelenou barvu, která emuluje signální podsvětlení tlačítek v reálných měřicích přístrojích. Lze zvolit úroveň spouštění a to jak při překročení nastavené horní úrovně, tak při podkročení dolní úrovně spouštění. Velikost obou úrovní lze odděleně nastavit. Spouštěcí úroveň se nastavuje procenty z rozsahu AD převodníku, takže není hodnota spouště závislá na konkrétním hardware.

V panelu Kanály se zapíná a vypíná zobrazení průběhu jednotlivých kanálů. Aktivované kanály jsou signalizovány podsvícením tlačítka v barvě zobrazení kanálu. Pro zamezení chybovosti obsluhy se interně zpracovávají a ukládají vždy veškeré kanály bez ohledu na zapnuté zobrazení. V panelu Kanály se v rozvíjecím seznamu nastavuje vzorkovací frekvence, citlivost akcelerometru a počet měřených vzorků na kanál.

Panel Ovládání umožňuje připojit nebo odpojit měřící přípravek, zahájit měření, zvolit opakované měření a vypínat výpočet FFT.

Označovat interaktivně frekvence lze v panelu Vl. frekvence Hz. Označování probíhá tak, že se v panelu FFT myší označí přibližně poloha výsledné vlastní frekvence a je zobrazena její orientační hodnota. Po potvrzení tlačítkem SetFr se v okolí bodu označeném myší nalezne lokální maximum, vykreslí se jeho poloha a vypíše jeho číselná hodnota. Zároveň se inkrementuje číslo vlastní frekvence pro označení další frekvence. V případě nezřetelné nějaké vlastní frekvence nebo při označování v jiném pořadí lze číslo vlastní frekvence nastavit ručně v editačním poli Č.vl.frek:. Vymazat poslední označenou frekvenci lze tlačítkem CLR. Tlačítkem CVše lze vymazat označení všech frekvencí. Označené vlastní frekvence se ukládají spolu s daty do souboru pro možné další zpracování.

Naměřený průběh zrychlení lze uložit do souboru s koncovkou *.kmt a znova otevřít pro zobrazení a další zpracování. Zároveň s naměřenými daty se ukládají tyto konfigurační parametry:

- Vzorkovací frekvence
- Citlivost akcelerometru
- Počet bodů v jednom odběru

Pokud jsou označeny vlastní frekvence v grafu FFT tak se ukládají také a při načtení souboru *.kmt se znova automaticky označí. Veškeré údaje uložené v souboru *.kmt lze exportovat funkcí „Export“ do textového formátu *.csv pro další zpracování v externím software.

Aplikace byla zkompileována pro OS Windows XP SP3 a Windows 7 SP1. Pro běh aplikace je nutné prostředí .NET Framework 3.5. Pro komunikace po virtuálním COM portu je nutné mít nainstalované ovladače Virtual COM Port Driver v. 1.3.1 STMicroelectronics [I03]. Hlavní aplikace se neinstaluje, stačí zkopírovat a spustit pouze příslušný exe soubor.

6. Teoretické modely kmitajícího táhla

6.1 Účel modelů a jejich hodnocení

Určení dynamického modelu kmitajícího táhla má sloužit k vyhodnocení změn vlastních frekvencí a útlumu v průběhu životnosti konstrukce. Pro posouzení těchto změn je nutné znát alespoň přibližně převod těchto změn frekvence na napětí, resp. tahovou sílu. Tahové štíhlé tahové prvky – táhla jsou vždy navrhována na tah s tím, že po celou dobu životnosti stavby neklesne tato tahová síla pod minimální bezpečnou hodnotu. Zároveň je možný i opačný stav, kdy např. vlivem dosedání základů stavby může dojít k přerozdělení sil v celé konstrukci a tím i překročení návrhové únosnosti některých táhel. Táhla jsou navrhována s rektifikačním prvkem - napínáky, které umožňují vnést počáteční předpětí a případně korigovat tahovou sílu v průběhu životnosti konstrukce.

Modely jsou sestaveny dle geometrických, materiálových a silových charakteristik jednotlivých táhel. Porovnávány jsou vypočtené vlastní frekvence a změřené na konkrétním táhle. Tahová síla je určena pomocí tenzometrického měření. Pro konkrétní porovnání jsou použita měření ze stejných reálných táhel jako v kapitole 3. - hlavní táhlo ZS Chomutov a táhlo EL22 z Trojského mostu.

Pro klasifikaci jednotlivých modelů je vhodné navrhnout číselné vyjádření porovnání vypočtených a změřených vlastních frekvencí. Zde se nabízí klasický test dvou výběrových souborů – párový t-test.

Pro porovnání vypočteme rozdíly párových hodnot u výběrového souboru (n - počet párů) a ze zjištěných rozdílů vypočítáme aritmetický průměr $\bar{x}$ a směrodatnou odchylku s . Pro

tyto hodnoty vypočteme testovací kritérium t :

$$t = \frac{|\bar{x}|}{\sqrt{\frac{s^2}{n}}} \quad (6.1.1)$$

kde $\bar{x}$ je aritmetický průměr rozdílů frekvencí

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (fv_i - fn_i) \quad (6.1.2)$$

a s je směrodatná odchylka

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((fv_i - fn_i) - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.1.3)$$

Ve vzorcích 6.1.2 a 6.1.3 je fv_i frekvence vypočtená a fn_i je odpovídající naměřená vlastní frekvence.

6.2 Model 1 – příčně kmitající struna bez vlivu tlumení

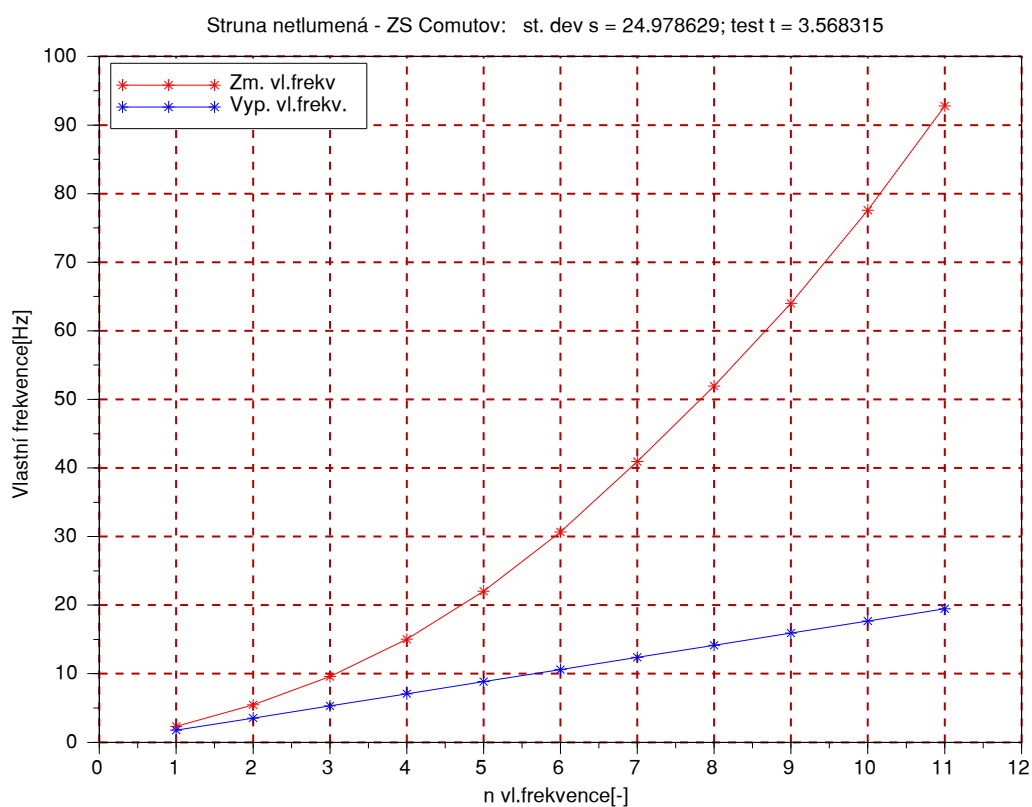
Dle [01] str.196 je vztah pro vlastní frekvence v závislosti na tahové síle (diskutováno v [09]):

$$\omega_n = \frac{n \pi c_s}{l} \quad (6.2.1)$$

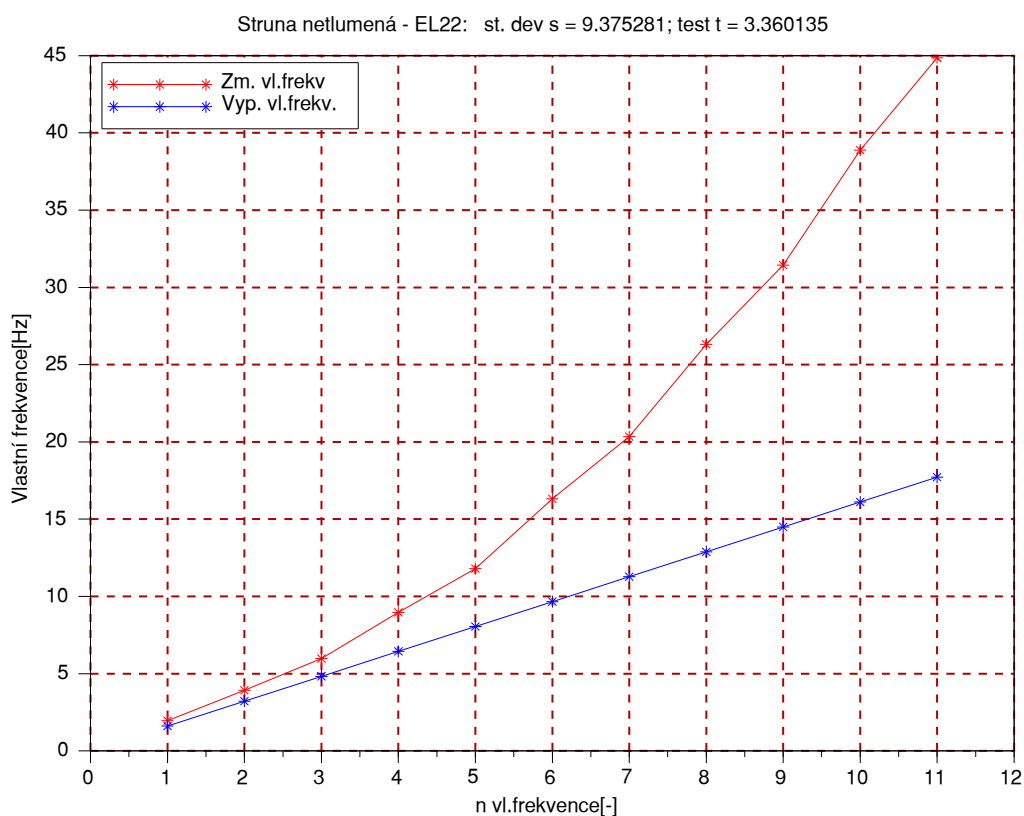
kde $c_s = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ je fázová rychlost vlnění ve struně, $\omega_n = 2 \pi f_n$, po úpravě dostaneme

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}, n=1,2,3,4 \dots \quad (6.2.1)$$

kde předpínací síla je F , délka je l , jedn. hmotnost je $\mu = \rho A$, hustota je ρ , plocha průřezu je A .



Obr.6.1 Táhlo ZS Chomutov – model netlumené struny



Obr.6.2 Táhlo EL22 – model netlumené struny

Fyzikální parametry a osová síla pro jednotlivá táhla jsou uvedeny v kapitole 3, odstavce 3.8.1 a 3.8.2. Přehled změřených a vypočtených vlastních frekvencí je v tabulce 6.3.

Táhlo ZS Chomutov			Táhlo EL22	
Č. vl.frekv	VI. frekv.změř	VI. frekv.vyp	VI. frekv.změř	VI. frekv.vyp
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	2,307	1,769	1,965	1,611
2	5,469	3,538	3,931	3,222
3	9,570	5,307	5,981	4,833
4	15,039	7,076	8,972	6,444
5	22,046	8,846	11,792	8,055
6	30,676	10,615	16,321	9,666
7	40,930	12,384	20,337	11,277
8	51,953	14,153	26,318	12,887
9	64,001	15,922	31,445	14,498
10	77,588	17,691	38,879	16,109
11	92,798	19,460	44,861	17,720

Směrod. odchylka s =	24,9876		9,3753
Test t =	3,5683		3,3601

Tab.6.3 Model netlumené struny – porovnání frekvencí

6.3 Model 2 – příčně kmitající struna s vlivem tlumení

Vliv tlumení je uvažován exponenciálním průběhem – viskózní tlumení. Dle [01] str.203 dochází vlivem útlumu k poklesu kruhové frekvence $\omega_i = \sqrt{\omega^2 - \delta^2}$, kde δ je součinitel tlumení, v grafech označován jako k a ω je kruhová frekvence bez vlivu tlumení. Pro porovnání vlastních frekvencí se nabízí opačný přístup, kdy u změřených vlastních frekvencí táhel jsou známé součinitele tlumení δ pro každou vlastní frekvenci (viz. kapitola 3, tab. 3.22 a 3.27) a lze tedy dopočítat vlastní frekvence bez vlivu tlumení. Tyto frekvence se porovnají s modelem pro netlumené kmitání. Pro výpočet netlumených frekvencí z naměřených platí:

$$\omega = \sqrt{\omega_i^2 + \delta^2} \quad (6.3.1)$$

$$\text{Po úpravách a dosazení dostaneme} \quad f = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_i^2 + \delta^2}{4\pi^2}} \quad (6.3.2)$$

kde f_i je frekvence změřená s vlivem tlumení a f je odpovídající frekvence bez vlivu tlumení.

Táhlo ZS Chomutov				Táhlo EL22 Trojský most			
Č. vl.frekv	VI.fr. f_t	$\delta = k$	VI.fr.netlum f	Č. vl.frekv	VI.fr. f_t	$\delta = k$	VI.fr.netlum f
[-]	[Hz]	[s ⁻¹]	[Hz]	[-]	[Hz]	[s ⁻¹]	[Hz]
1	2,30700000	-0,001312	2,30700001	1	1,96533000	-0,003778	1,96533009
2	5,46875000	-0,000663	5,46875000	2	3,93066400	-0,000325	3,93066400
3	9,57031300	-0,000344	9,57031300	3	5,98144500	-0,000229	5,98144500
4	15,03906300	-0,000481	15,03906300	4	8,97216800	-0,000394	8,97216800
5	22,04589800	-0,000807	22,04589800	5	11,79199200	-0,000689	11,79199200
6	30,67627000	-0,001827	30,67627000	6	16,32080100	-0,000883	16,32080100
7	40,93017600	-0,001087	40,93017600	7	20,33691400	-0,000701	20,33691400
8	51,95312500	-0,001228	51,95312500	8	26,31835900	-0,000951	26,31835900
9	64,00146500	-0,002010	64,00146500	9	31,44531300	-0,001826	31,44531300
10	77,58789100	-0,001646	77,58789100	10	38,87939500	-0,000700	38,87939500
11	92,79785200	-0,002028	92,79785200	11	44,86084000	-0,001338	44,86084000

Tab.6.4 Vliv tlumení na vlastní frekvence

Z výsledné tabulky 6.4 je zřejmé, že vliv tlumení na vlastní frekvence je zanedbatelný a případně se projevuje se pouze u nízkých frekvencí. V dalších testovaných modelech vliv tlumení již nebude vyhodnocován.

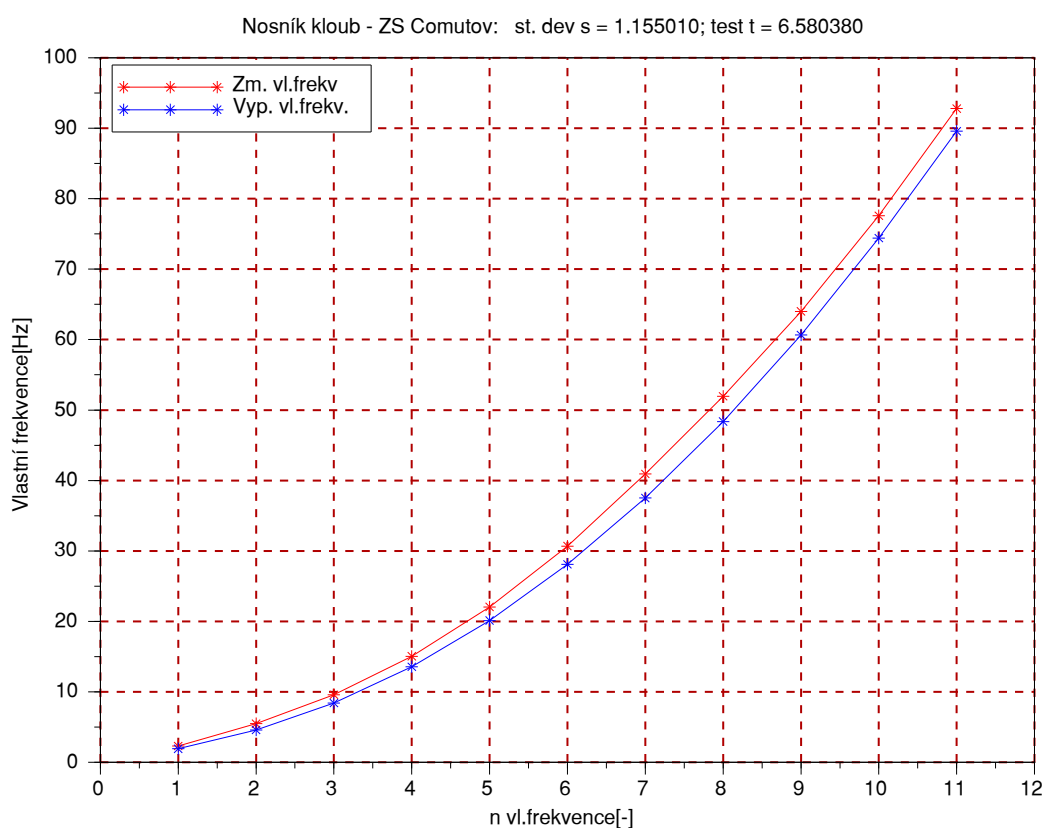
6.3 Model 3 – příčně kmitající nosník kloubově uložený

Pro vlastní frekvence příčně kmitajícího prizmatického nosníku platí dle [01] str.253 (diskutován byl v BP [09], zde uveden pouze výsledek):

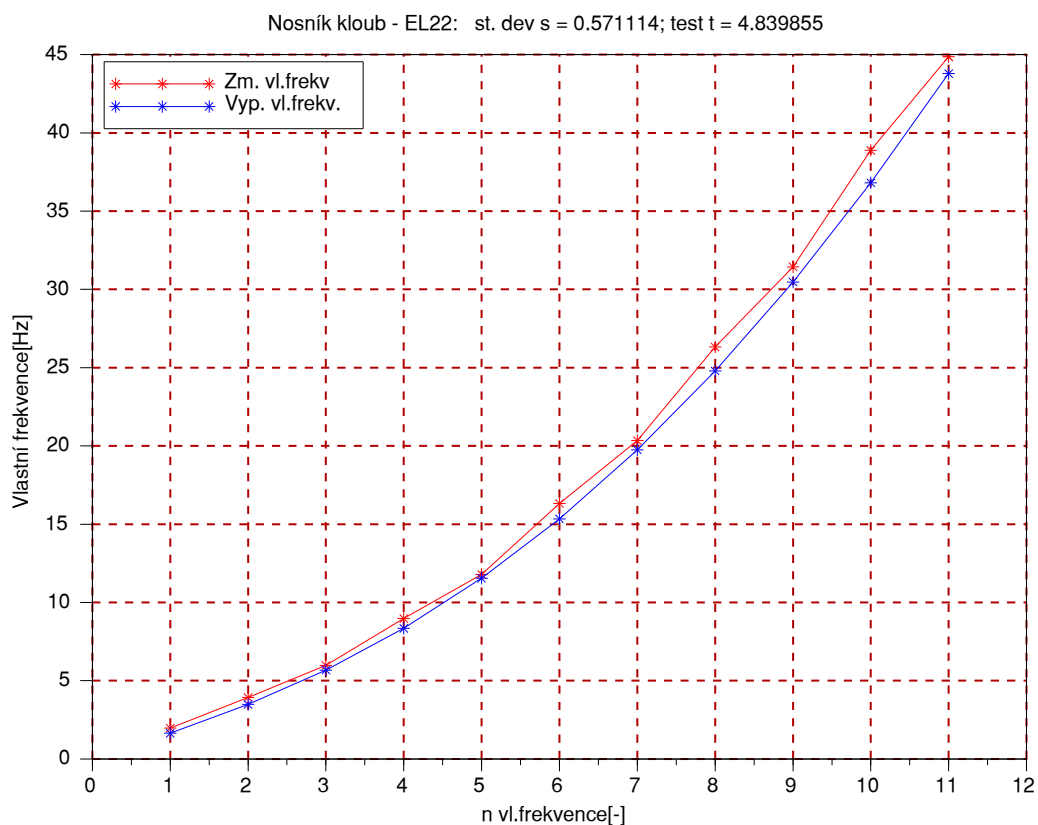
$$\omega_n = \frac{n\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \sqrt{1 + \frac{EJ}{F} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \quad (6.3.1)$$

kde předpínací síla je F , délka je l , jedn. hmotnost je $\mu = \rho A$, hustota je ρ , plocha průřezu je A , E je modul pružnosti materiálu táhla, J je kvadratický moment průřezu, $J = \pi d^4/64$ pro kruhový průřez a n je pořadové číslo vlastní frekvence. Po dosazení za $\omega_n = 2\pi f_n$ přejde rovnice 6.3.1 na tvar:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \sqrt{1 + \frac{EJ}{F} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2} \quad (6.3.2)$$



Obr.6.5 Táhlo ZS Chomutov – model kloubově uloženého nosníku



Obr.6.6 Táhlo EL22 – model kloubově uloženého nosníku

	Táhlo ZS Chomutov		Táhlo EL22	
Č, vl,frekv	VI, frekv,změř	VI, frekv,vyp	VI, frekv,změř	VI, frekv,vyp
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	2,307	1,911	1,965	1,645
2	5,469	4,569	3,931	3,483
3	9,570	8,395	5,981	5,677
4	15,039	13,556	8,972	8,340
5	22,046	20,116	11,792	11,546
6	30,676	28,098	16,321	15,341
7	40,930	37,513	20,337	19,750
8	51,953	48,367	26,318	24,791
9	64,001	60,662	31,445	30,473
10	77,588	74,400	38,879	36,804
11	92,798	89,581	44,861	43,786

Směrod, odchylka s =	1,15501		0,57111
Test t =	6,58038		4,83986

Tab.6.7 Model nosníku kloubově uloženého – porovnání frekvencí

6.4 Model 4 – příčně kmitající nosník na koncích vetknutý

Pro vlastní frekvence příčně kmitajícího prismatického nosníku platí vztah dle [01] získaný obdobným způsobem (diskutován byl v BP [09], zde uveden pouze výsledek):

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{EJ}{F l^2}} + \left(4 + \frac{n^2 \pi^2}{2} \right) \frac{EJ}{F l^2} \right) \quad (6.4.1)$$

kde předpínací síla je F , délka je l , jedn. hmotnost je $\mu = \rho A$, hustota je ρ , plocha průřezu je A , E je modul pružnosti materiálu táhla, J je kvadratický moment průřezu, $J = \pi d^4/64$ pro kruhový průřez a n je pořadové číslo vlastní frekvence f_n .

Vzorce 6.3.2 a 6.4.1 byly odvozeny stejným způsobem, liší se pouze okrajovými podmínkami.

Okrajové podmínky pro nosník kloubově uložený :

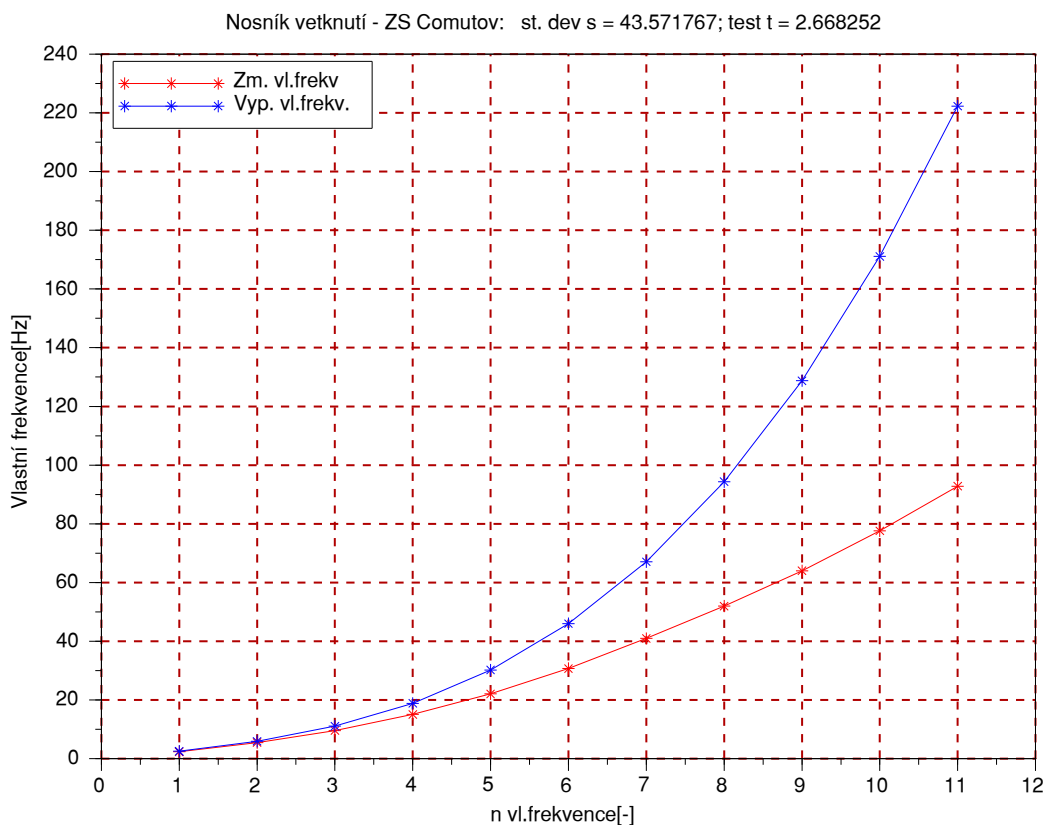
$$\text{pro } x=0: w_0(0)=0, \frac{\partial^2 w_0(0)}{\partial x^2}=0 \quad (6.4.2)$$

$$\text{pro } x=l: w_0(l)=0, \frac{\partial^2 w_0(l)}{\partial x^2}=0 \quad (6.4.3)$$

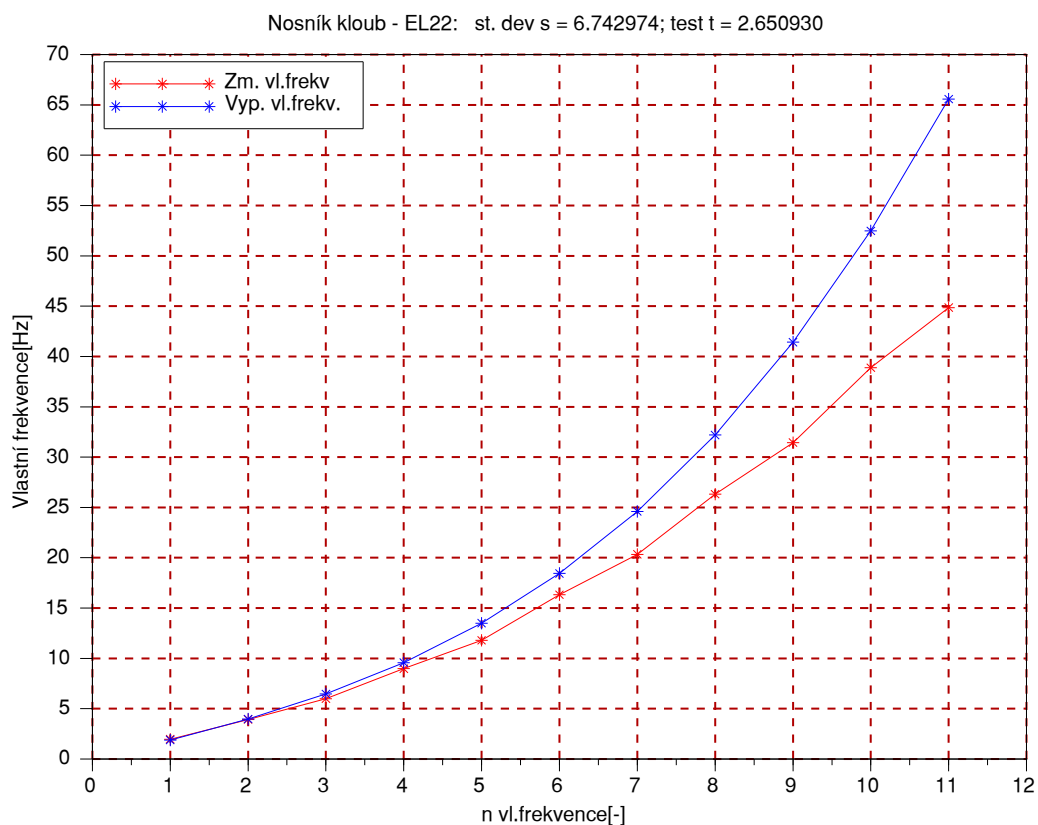
Okrajové podmínky pro nosník na koncích vetknutý:

$$\text{pro } x=0: w_0(0)=0, \frac{\partial w_0(0)}{\partial x}=0 \quad (6.4.4)$$

$$\text{pro } x=l: w_0(l)=0, \frac{\partial w_0(l)}{\partial x}=0 \quad (6.4.5)$$



Obr.6.8 Táhlo ZS Chomutov – model nosníku na koncích vetknutého



Obr.6.9 Táhlo EL22 – model nosníku na koncích vetknutého

Č, vl.frekv [-]	Táhlo ZS Chomutov		Táhlo EL22	
	VI, frekv,změř [Hz]	VI, frekv,vyp [Hz]	VI, frekv,změř [Hz]	VI, frekv,vyp [Hz]
1	2,307	2,496	1,965	1,883
2	5,469	5,878	3,931	3,970
3	9,570	11,032	5,981	6,465
4	15,039	18,842	8,972	9,572
5	22,046	30,194	11,792	13,494
6	30,676	45,975	16,321	18,436
7	40,930	67,069	20,337	24,601
8	51,953	94,362	26,318	32,194
9	64,001	128,740	31,445	41,418
10	77,588	171,089	38,879	52,478
11	92,798	222,293	44,861	65,576

Směrod, odchylka s =	43,57177		6,74297
Test t =	2,66825		2,65093

Tab.6.10 Model nosníku vetknutého – porovnání frekvencí

6.5 Metoda konečných prvků – MKP

Výše diskutované modely kmitajícího táhla nejsou dostatečně přesné, je nutné hledat přesnější modely. Pro další postup při zjišťování vlivu dalších fyzikálních parametrů (např. pružné uložení styčníků, vliv dodatečné hmotnosti z napínákových matic atd.). Pro prověření těchto vlivů byla zvolena metoda konečných prvků (MKP), konkrétně statický a dynamický software FEAT 2000 verze 3.0 – 13.04.00.[I04]

Výpočet vlastních frekvencí v systému FEAT 2000 probíhá dle následujícího postupu (převzato z [18] část 2, str. 3):

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad \text{je statická soustavu rovnic rovnováhy} \quad (6.5.1)$$

kde značí :

$\mathbf{K}$ - matice tuhosti konstrukce,

$\mathbf{u}$ - vektor (zobecněných) posunutí, resp. vektor neznámých v soustavě rovnic,

$\mathbf{R}$ - vektor zatížení, resp. vektor pravých stran.

V dynamice je nutno přičíst k silám statickým navíc síly setrvačné, čili podmínka rovnováhy vypadá takto:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{R} \quad (6.5.2)$$

kde značí :

$\mathbf{M}$ - matice hmotnosti konstrukce,

$\ddot{\mathbf{u}} = \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$ - vektor zrychlení = vektor druhých derivací posunutí podle času.

Jestliže konstrukce kmitá harmonicky s frekvencí ω , tzn. že všechna posunutí (jednotlivé prvky vektoru posunutí) se v čase mění s frekvencí ω , tzn. $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \sin(\omega t)$, je vektor zrychlení roven :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{u}_0 \sin(\omega t) \quad (6.5.3)$$

Takže pro případ dynamiky lze zapsat podmínku rovnováhy jako součet elastických sil, setrvačných sil a zatížení. Podmínka rovnováhy zapsaná v okamžiku nulové amplitudy, tzn. pro čas v němž je $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \sin(\omega t) = 0$, má tvar :

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} - \omega^2 \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (6.5.4)$$

Po úpravě lze stejnou rovnicí zapsat ve tvaru :

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{R} \quad (6.5.5)$$

Výraz v závorce na levé straně rovnice $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})$ je matice tuhosti s uvažováním setrvačných vlastností konstrukce a bývá označována jako matice dynamické tuhosti. Úloha výpočtu vlastních tvarů kmitání je hledání vlastní frekvence, pro niž má soustava rovnic

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (6.5.6)$$

nenulové řešení. Tento problém je úloha řešení vlastních čísel, kdy pro každou vlastní frekvenci ω existuje vektor posunutí $\mathbf{u}$ odpovídající tvaru kmitání při frekvenci ω a nazývá se vlastním tvarem kmitání. Vlastní tvary se obvykle normují, přičemž výsledné vlastní tvary spočtené programem FEAT jsou normované tak, že splňují podmínku:

$$\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{u} = 1 \quad (6.5.7)$$

Takto formulovaný problém vlastních čísel má tolik řešení (tolik frekvencí a jim odpovídajících vlastních tvarů, resp. vlastních vektorů), kolik je v matici hmotnosti nenulových diagonálních členů, čili kolik má konstrukce hmotných stupňů volnosti.

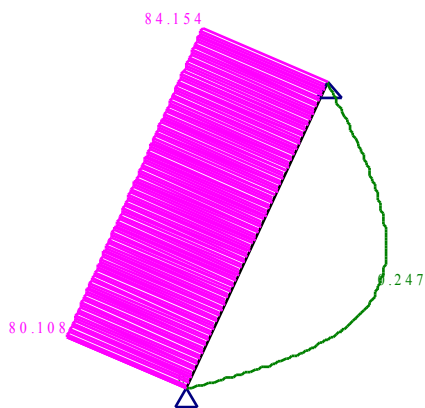
Pro řešení problému vlastních čísel byla použita metoda iterace podprostoru. Tato metoda počítá zvolený počet nejnižších vlastních tvarů kmitání (s nejnižší frekvencí). Metoda iterace podprostoru je naprogramována tak, že proces iterací se z důvodu rychlosti vnitřně provádí na o něco větším počtu vlastních vektorů než kolik jich je požadováno.

Počet vlastních tvarů kmitání není omezen. Jelikož v metodě iterace podprostoru nelze vždy předem zaručit, že vypočtené vlastní tvary budou právě ty nejnižší, je program vybaven Sturmovou kontrolou, která ověří, že spočtené vlastní tvary jsou od prvního ty nejnižší (s nejnižší frekvencí kmitání) a že žádný vlastní tvar nebyl vynechán. U běžných konstrukcí vynechání některého vlastního tvaru nenastává, pouze k tomu může dojít v některých velmi speciálních případech. Jelikož Sturmova kontrola není nijak náročná na výpočtový čas ve srovnání s časem potřebným pro vyřešení problému vlastních čísel, je vždy zařazena do výpočtu.

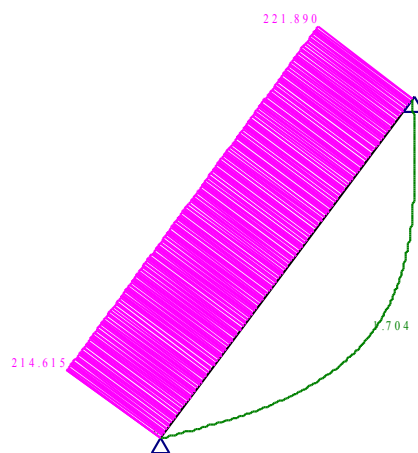
Bohužel výpočetní systém FEAT (a většina obdobných systémů) neumí přímo řešit inverzní úlohu kdy je známá vnitřní síla a neznámé je vnější zatížení, je nutné výpočet rozdělit na následující dílčí úlohy:

- Zadání geometrického a fyzikálního modelu
- Zadání vlastní hmotnosti a případných dodatečných setrvačných hmot
- Virtuálním ochlazováním se iteračně vnese takové předpětí, které spolu s vlastní hmotností způsobí stejnou tahovou vnitřní sílu, která odpovídá síle naměřené tenzometrem v místě jeho aplikace.
- Zatěžovací stav vypočtený v předchozím bodě je pak vstupem pro dynamický výpočet vlastních frekvencí, které jsou spočteny výše popsaným principem.

Před testováním vlivů dalších parametrů na vlastní frekvence táhel je vhodné ověřit modely zadané v systému FEAT na shodu vlastních frekvencí s výše diskutovaným modelem 3, tj. s modelem nosníku kloubově uloženého.



Obr.6.11 Táhlo T11 ZS Chomutov – předpětí a průhyb



Obr.6.12 Táhlo EL22 – předpětí a průhyb

	ZS Chomutov T11 – kloub		Táhlo EL22 – kloub	
Č, vl, frekv	Model 3	MKP FEAT	Model 3	MKP FEAT
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	1,911	1,932	1,645	1,663
2	4,569	4,604	3,483	3,519
3	8,395	8,435	5,677	5,728
4	13,556	13,596	8,340	8,406
5	20,116	20,148	11,546	11,626
6	28,098	28,114	15,341	15,433
7	37,513	37,502	19,750	19,853
8	48,367	48,313	24,791	24,903
9	60,662	60,547	30,473	30,591
10	74,400	74,201	36,804	36,923
11	89,581	89,269	43,786	43,902

Tab.6.12 Porovnání vl. frekvencí modelu 3 a MKP FEAT

Tabulka 6.12 ukazuje poměrně dobrou shodu výpočtu vlastních frekvencí v MKP systému FEAT s modelem 3 – nosík kloubově uložený. Rozdíly frekvencí jsou do 1% a jsou způsobeny rozdílem tahové síly v průběhu délky táhla vzniklým ze započtením vlivu tíhového zrychlení na táhlo vzhledem k jeho skutečné poloze, viz. obr. 6.11 a 6.12

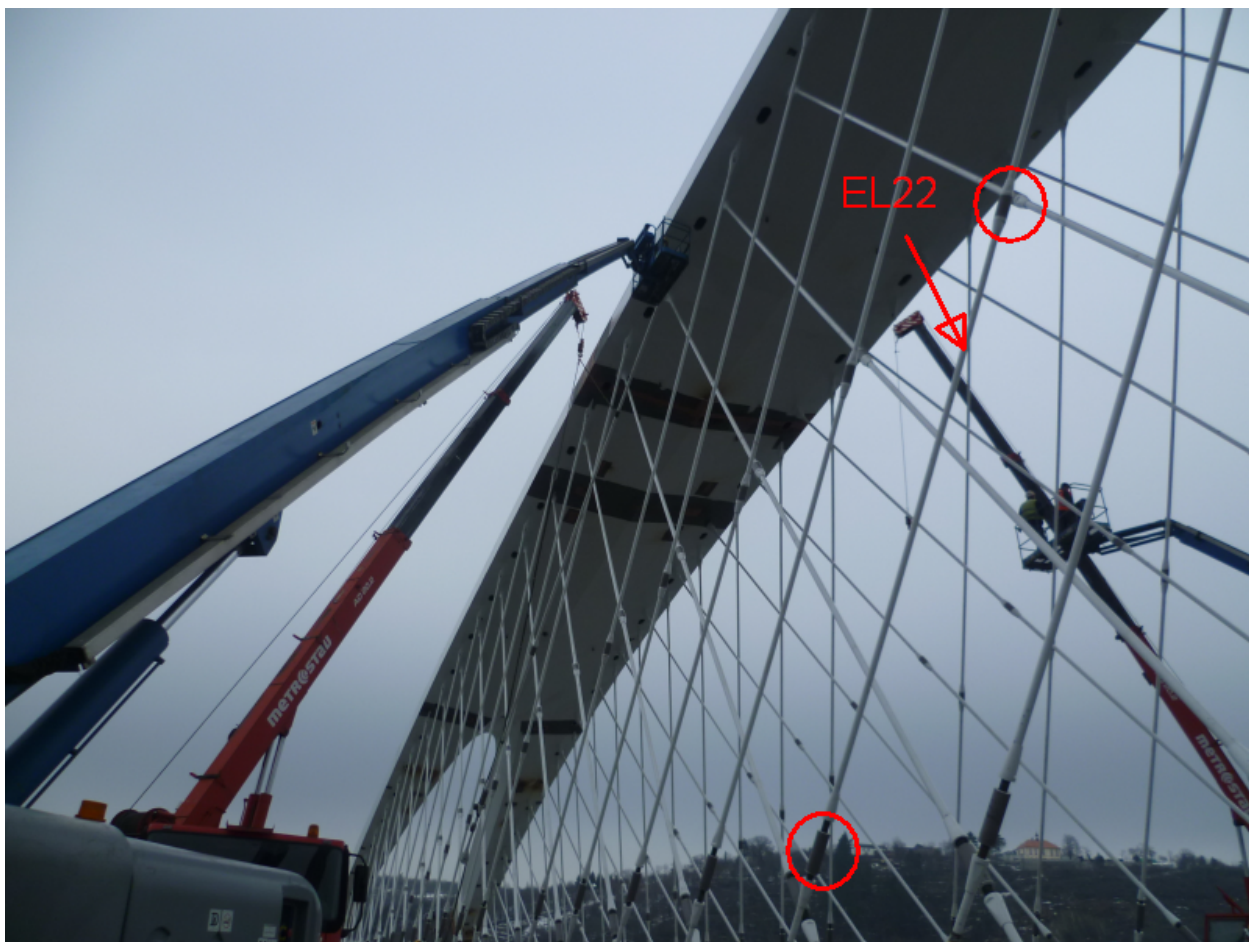
6.6 Vliv dodatečných setrvačných hmot napínákových matic

Napínákové matice jsou umístěny v těchto polohách:

- Táhlo T11 ZS Chomutov – 2,43 m od spodního styčnicku, hmotnost 22 kg
- Táhlo EL 22 Trojský most - 2,10 m od spodního styčnicku, hmotnost 54 kg (prodloužená napínáková matice) a 10,87 m od spodního styčnicku, hmotnost 33 kg



Obr.6.13 Táhlo T11 ZS Chomutov, napínáková matice označena kroužkem



Obr.6.14 Táhlo EL22 Trojský most, napínákové matice označeny kroužkem

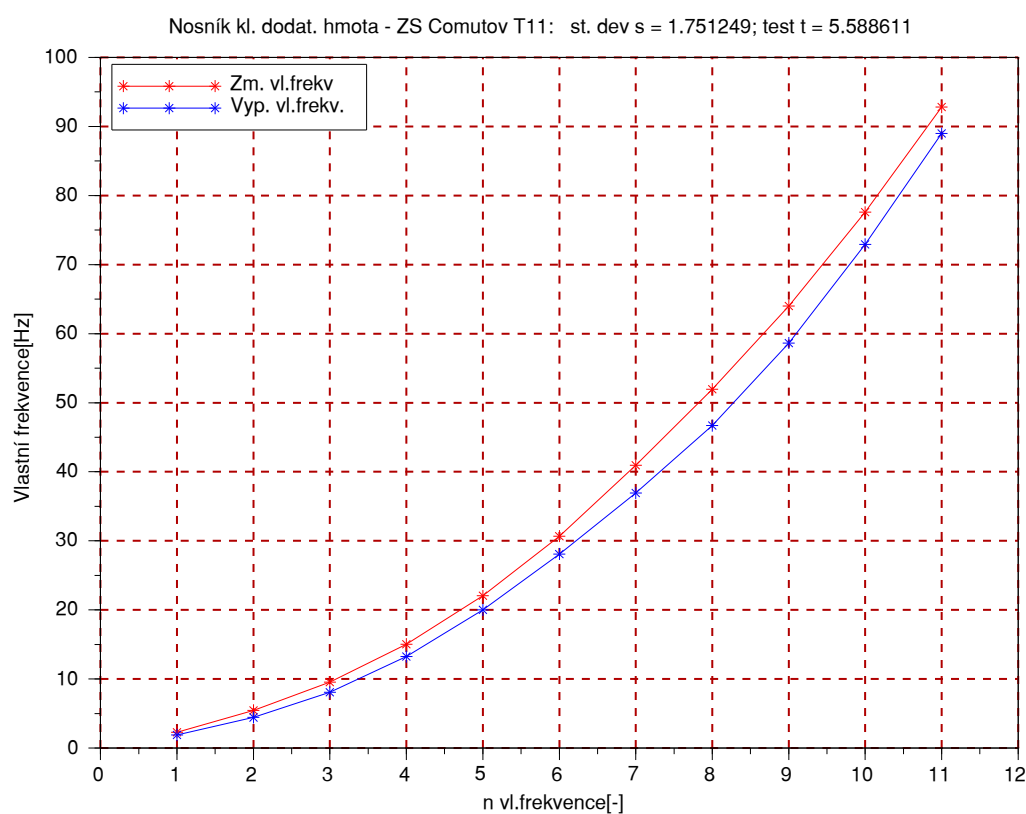
Výše uvedené hmoty byly přidány do modelu jednotlivých prutů v programu FEAT. Pro konkrétní představu byly doplněny obr. 6.13 a 6.14, kde jsou zobrazeny výše diskutovaná táhla s vyznačenými polohami napínákových matic.

Č, vl, frekv	Táhlo ZS Chomutov		Táhlo EL22	
	VI, frekv, změř	VI, frekv, vyp	VI, frekv, změř	VI, frekv, vyp
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	2,307	1,907	1,965	1,598
2	5,469	4,436	3,931	3,451
3	9,570	8,084	5,981	5,352
4	15,039	13,243	8,972	8,019
5	22,046	20,012	11,792	10,760
6	30,676	28,102	16,321	14,852
7	40,930	36,920	20,337	18,739
8	51,953	46,688	26,318	24,482
9	64,001	58,635	31,445	29,563
10	77,588	72,927	38,879	36,758
11	92,798	88,963	44,861	42,905

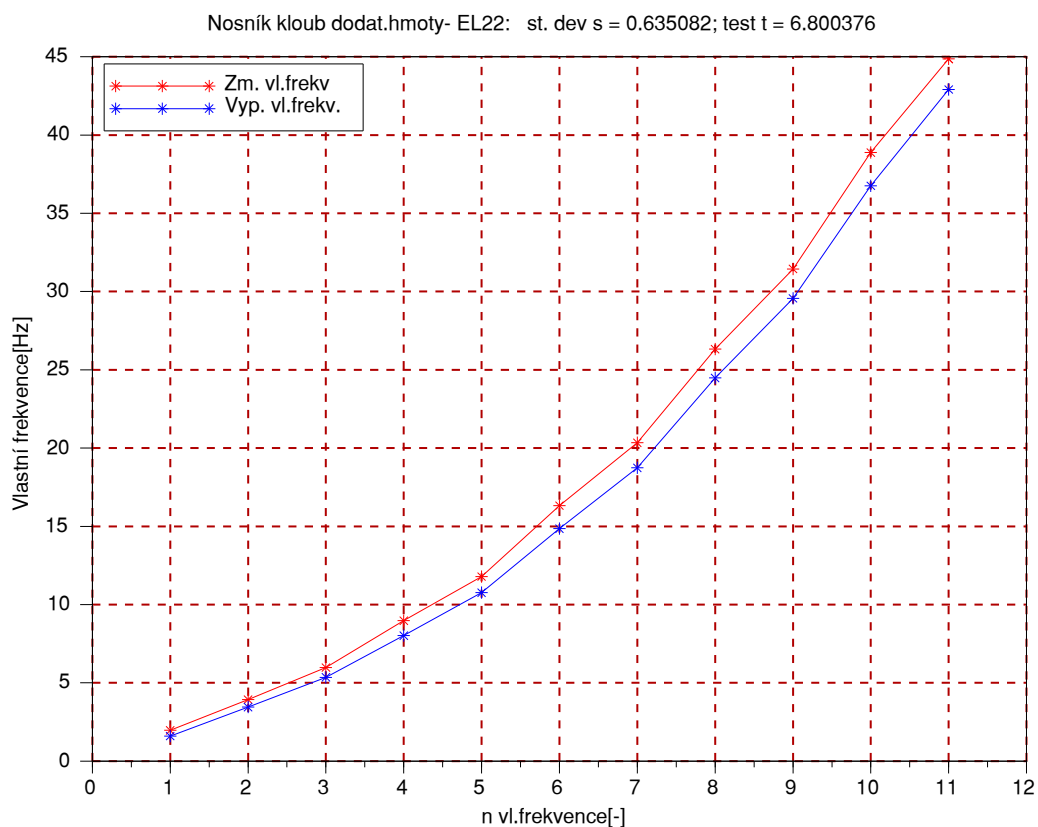
Směrod, odchylka s =	1,75125		0,63508
Test t =	5,58861		6,80040

Tab.6.15 Porovnání vl. frekvencí změřených a MKP FEAT - vliv. dodatečných hmot

Dle očekávání se po započtení dynamických dodatečných hmot vypočtené vlastní frekvence mírně posunuly dolů. Jak je ale vidět z obr. 6.17, je tento posun u některých frekvencí jiný než u ostatních a zřetelně kopíruje průběh změřených vlastních frekvencí. V dalších variantách MKP modelu proto bude nadále s dodatečnými hmotami počítáno.



Obr.6.16 Táhlo ZS Chomutov T11 – model nosníku FEAT s dodatečnými hmotami



Obr.6.17 Táhlo EL22 Trojský most – model nosníku FEAT s dodatečnými hmotami

6.7 Vliv pružného uložení podpor modelu táhel (posun svislý)

Táhlo T11 ZS Chomutov je uložené ve spodním styčnicku do betonové patky, horní styčník je spojen s hlavním obloukem (viz. obr. 6.13). Spodní styčník je nadále uvažován jako nepružný, svislá tuhost horního styčnicku byla stanovena $k_p = 1.0 \times 10^5$ kN/m. Tuhost byla stanovena na vyžádání autorem statického modelu ZS Chomutov Ing. Jindřichem Beranem.

Táhlo EL22 je v horním styčnicku uložené do ocelového oblouku, spodní styčník je ukotven do železobetonové mostní konstrukce. Svislá tuhost horního styčnicku byla vypočtena $k_p = 8,3 \times 10^4$ kN/m, spodní svislá tuhost je $3,7 \times 10^5$ kN/m. Tuhosti byly stanoveny autorem statického výpočtu Trojského mostu Ing. Vladimírem Janatou, CSc.

	Táhlo ZS Chomutov		Táhlo EL22	
Č, vl, frekv	VI, frekv, změř	VI, frekv, vyp	VI, frekv, změř	VI, frekv, vyp
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1	2,307	1,907	1,965	1,597
2	5,469	4,436	3,931	3,447
3	9,570	8,084	5,981	5,347
4	15,039	13,243	8,972	8,012
5	22,046	20,011	11,792	10,753
6	30,676	28,101	16,321	14,844
7	40,930	36,918	20,337	18,729
8	51,953	46,685	26,318	24,470
9	64,001	58,628	31,445	29,549
10	77,588	72,916	38,879	36,741
11	92,798	88,945	44,861	42,883

Směrod, odchylka s =	1,75465		0,64063
Test t =	5,58518		6,79184

Tab.6.18 Porovnání vl. frekvencí změřených a MKP FEAT - vliv pružného uložení

Z tabulky 6.18 je zřejmé, že vliv svislého pružného uložení s tuhostí v obdobných řádech ($k_p = 1.0 \times 10^5$ kN/m) je zanedbatelný. Při porovnání s výslednými vl. frekvencemi z tab. 6.15 dostaneme rozdíly menší než je frekvenční bin změřených frekvencí. Grafické znázornění průběhu vl. frekvencí nebude uvedeno, jelikož je téměř shodné s průběhem na obr. 6.16, resp. 6.17. V dalším zpřesnění modelu přesto bude tento vliv uvažován, jelikož u některých konstrukcí může být tuhost uložení nižší a tím vliv na vlastní frekvence zanedbatelný.

6.8 Vliv pružného uložení podpor modelu táhel (rotační pružnost)

Rotační tuhost styčnicku nelze nijak zjistit z modelu konstrukce nebo jiným exaktním způsobem. Velikost rotační tuhosti lze odhadnout z předchozího dynamického modelu táhla tak, že pro známou vnitřní tahovou sílu se odhadne iteračně hodnota rotační tuhosti taková, pro kterou se nejméně odchylují vypočtené frekvence od změřených. Odhad je možné provést dle minimálního součtu čtverců rozdílů frekvencí, nebo dle parametru t párového t-testu.

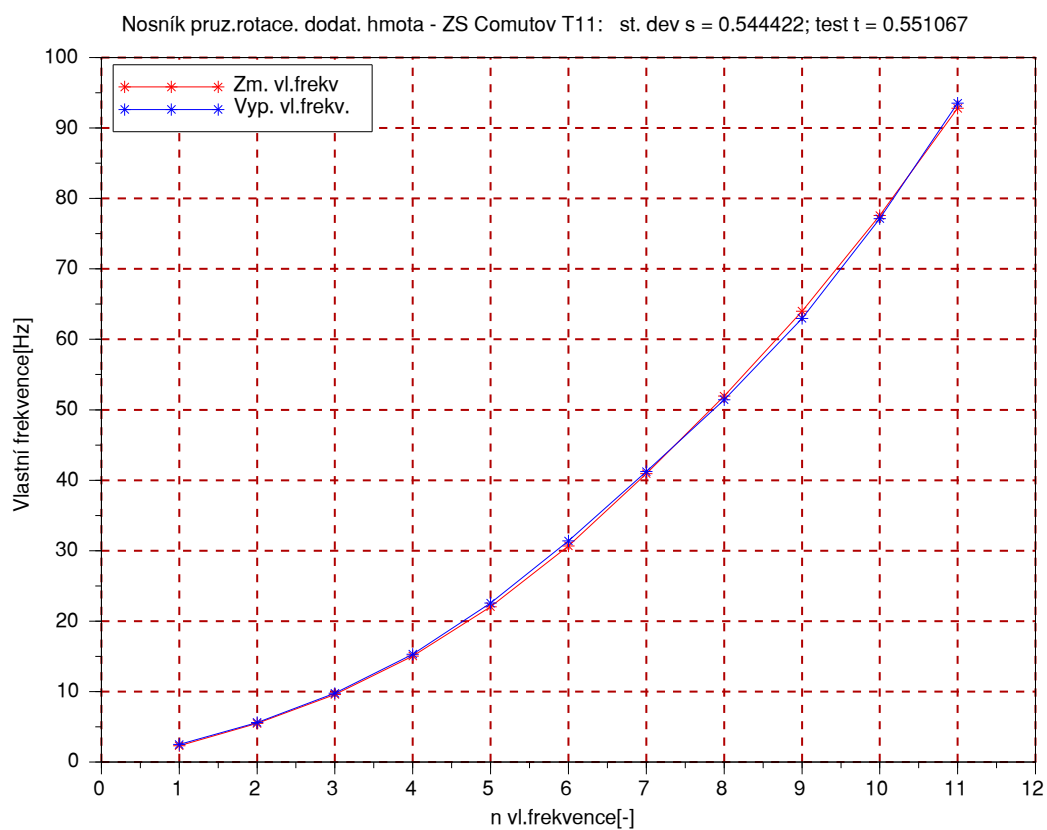
Z tabulek 6.19 a 6.20 je zřejmé, že lze nalézt takovou rotační tuhost k_r , pro kterou je rozdíl naměřených a vypočtených frekvencí minimální. Pro táhlo T11 ZS Chomutov je optimální rotační tuhost $k_r = 35$ kNm/deg a pro táhlo EL22 je optimální rotační tuhost styčnicků $k_r = 70$ kNm/deg. Porovnání průběhu frekvencí je na obr. 6.21 a 6. 22 ze kterých je vidět velmi dobrá shoda změřených a vypočtených frekvencí.

Změř. vl. frek	Vypočtené – vliv pružného kloubu s konstantou K =							
	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]
	1	10	15	20	30	40	50	100
[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
2,307	2,038	2,367	2,414	2,441	2,472	2,489	2,499	2,521
5,469	4,661	5,333	5,443	5,509	5,584	5,626	5,652	5,708
9,570	8,354	9,295	9,471	9,579	9,705	9,776	9,822	9,920
15,039	13,536	14,684	14,922	15,071	15,249	15,350	15,416	15,560
22,046	20,335	21,722	22,034	22,235	22,477	22,618	22,710	22,913
30,676	28,482	30,232	30,653	30,930	31,269	31,469	31,600	31,893
40,930	37,363	39,594	40,177	40,569	41,060	41,353	41,548	41,986
51,953	47,106	49,441	50,122	50,599	51,218	51,600	51,858	52,455
64,001	58,989	61,065	61,704	62,162	62,770	63,154	63,418	64,039
77,588	73,255	75,240	75,864	76,315	76,920	77,304	77,569	78,197
92,798	89,304	91,439	92,123	92,622	93,294	93,725	94,023	94,733
Rozdíl mezi změřenými a vypočtenými vl. frekvencemi								
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
	0,269	-0,060	-0,107	-0,134	-0,165	-0,182	-0,192	-0,214
	0,808	0,136	0,026	-0,040	-0,115	-0,157	-0,183	-0,239
	1,216	0,275	0,099	-0,009	-0,135	-0,206	-0,252	-0,350
	1,503	0,355	0,117	-0,032	-0,210	-0,311	-0,377	-0,521
	1,711	0,324	0,012	-0,189	-0,431	-0,572	-0,664	-0,867
	2,194	0,444	0,023	-0,254	-0,593	-0,793	-0,924	-1,217
	3,567	1,336	0,753	0,361	-0,130	-0,423	-0,618	-1,056
	4,847	2,512	1,831	1,354	0,735	0,353	0,095	-0,502
	5,012	2,936	2,297	1,839	1,231	0,847	0,583	-0,038
	4,333	2,348	1,724	1,273	0,668	0,284	0,019	-0,609
	3,494	1,359	0,675	0,176	-0,496	-0,927	-1,225	-1,935
Průměr x =	2,63226	1,08781	0,67735	0,39508	0,03272	-0,18965	-0,33974	-0,68610
Sm.odch s =	1,68267	1,07646	0,87266	0,73503	0,58259	0,52142	0,50329	0,55089
Test t =	5,18833	3,35160	2,57436	1,78270	0,18626	1,20629	2,23881	4,13069
Sum x*x =	104,53060	24,60420	12,66220	7,11969	3,40588	3,11440	3,80267	8,21281

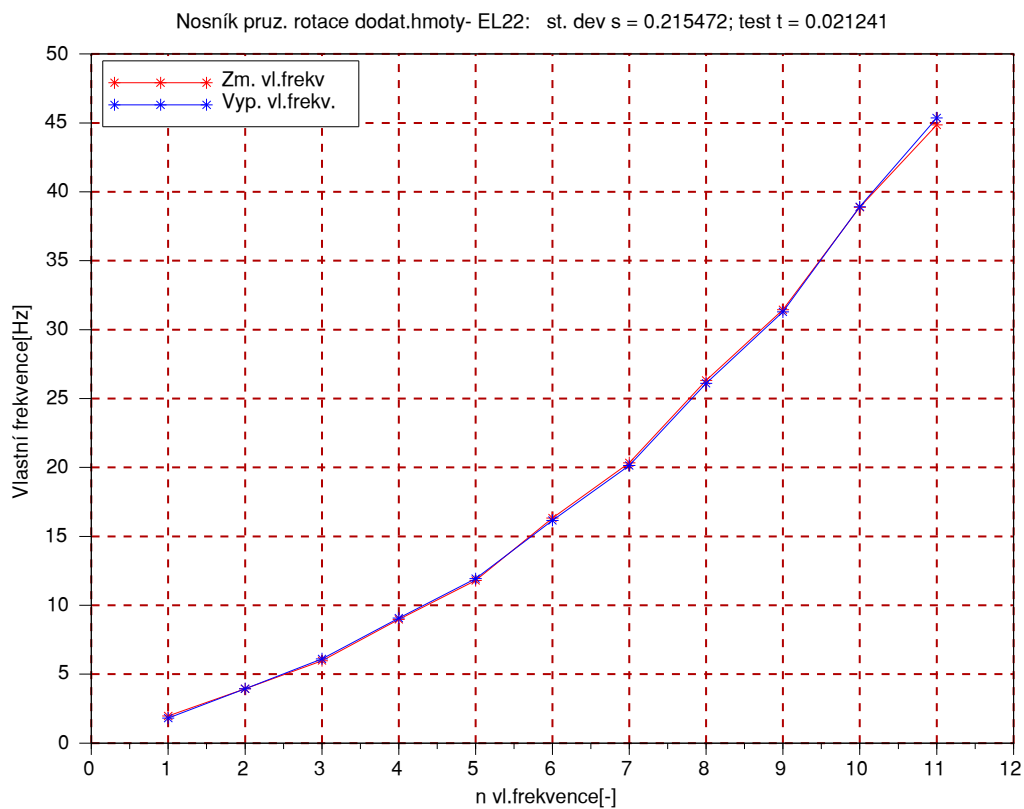
Tab.6.19 Táhlo T11 ZS Chomutov – vliv rotační tuhosti uložení a nalezení optimální hodnoty

Změř. vl. frek	Vypočtené – vliv pružného kloubu s konstantou K =									
	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]	[kN/deg]
	1	10	15	20	35	40	50	60	70	80
[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
1,965	1,628	1,739	1,761	1,774	1,795	1,799	1,805	1,809	1,812	1,814
3,931	3,514	3,767	3,820	3,853	3,905	3,915	3,930	3,940	3,948	3,953
5,981	5,437	5,812	5,896	5,951	6,038	6,055	6,080	6,098	6,111	6,121
8,972	8,118	8,608	8,729	8,810	8,944	8,971	9,011	9,039	9,060	9,076
11,792	10,861	11,391	11,531	11,626	11,787	11,819	11,868	11,903	11,930	11,950
16,321	14,954	15,526	15,685	15,795	15,985	16,024	16,083	16,126	16,158	16,183
20,337	18,840	19,439	19,612	19,733	19,945	19,988	20,055	20,103	20,140	20,168
26,318	24,591	25,264	25,465	25,607	25,860	25,912	25,993	26,051	26,096	26,131
31,445	29,672	30,371	30,586	30,740	31,018	31,077	31,167	31,232	31,282	31,322
38,879	36,888	37,743	38,014	38,211	38,570	38,646	38,764	38,850	38,916	38,968
44,861	43,054	44,039	44,347	44,570	44,975	45,061	45,194	45,291	45,365	45,423
Rozdíl mezi změřenými a vypočtenými vl. frekvencemi										
	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
	0,337	0,226	0,204	0,191	0,170	0,166	0,160	0,156	0,153	0,151
	0,417	0,164	0,111	0,078	0,026	0,016	0,001	-0,009	-0,017	-0,022
	0,544	0,169	0,085	0,030	-0,057	-0,074	-0,099	-0,117	-0,130	-0,140
	0,854	0,364	0,243	0,162	0,028	0,001	-0,039	-0,067	-0,088	-0,104
	0,931	0,401	0,261	0,166	0,005	-0,027	-0,076	-0,111	-0,138	-0,158
	1,367	0,795	0,636	0,526	0,336	0,297	0,238	0,195	0,163	0,138
	1,497	0,898	0,725	0,604	0,392	0,349	0,282	0,234	0,197	0,169
	1,727	1,054	0,853	0,711	0,458	0,406	0,325	0,267	0,222	0,187
	1,773	1,074	0,859	0,705	0,427	0,368	0,278	0,213	0,163	0,123
	1,991	1,136	0,865	0,668	0,309	0,233	0,115	0,029	-0,037	-0,089
	1,807	0,822	0,514	0,291	-0,114	-0,200	-0,333	-0,430	-0,504	-0,562
Průměr x =	1,20420	0,64584	0,48702	0,37574	0,18011	0,13965	0,07756	0,03284	-0,00135	-0,02780
Sm.odch s =	0,60801	0,38504	0,31445	0,26840	0,21087	0,20607	0,20498	0,20942	0,21546	0,22177
Test t =	6,56880	5,56301	5,13670	4,64304	2,83282	2,24765	1,25498	0,52002	0,02072	0,41577
Sum x*x =	19,64778	6,07072	3,59786	2,27342	0,80148	0,63919	0,48635	0,45044	0,46426	0,50032

Tab.6.20 Táhlo EL22 Trojský most – vliv rotační tuhosti uložení a nalezení optimální hodnoty



Obr.6.21 Táhlo ZS Chomutov T11 – model nosníku FEAT s $k_r = 35 \text{ kNm/deg}$



Obr.6.22 Táhlo EL22 Trojský most – model nosníku FEAT s $k_r = 70 \text{ kNm/deg}$

6.10 Porovnání výsledků aplikace modelu na souboru táhel

Pro určité zobecnění předchozích výsledků je potřebné provést aplikaci výše diskutovaného modelu na více táhlech. Jak vyplývá z předchozího modelu, pro vyhodnocení vlivu posunu frekvencí po dobu životnosti konstrukce je důležité umět správně odhadnout aktuální rotační tuhost k_r uložení koncových styčníků táhla.

V tabulce 6.23 je přehled základních parametrů a výsledků pro model v MKP FEAT s dosaženým nejlepšími parametry. Pro porovnání jsou využita měření na táhlech na Trojském mostě, kde se podařilo provést dvojí měření některých táhel a to po iniciálním předpětí a po odstranění provizorních pilířů, takže je možné porovnávat dynamickou odezvu na stejných táhlech při výrazně rozdílném zatížení. Jednotlivé iterační tabulky jsou uloženy na přiloženém CD. Pro případnou klasifikaci táhel a definování pro jaká táhla platí zkoumaný model je doplněna obecná charakteristika táhel – štíhlost λ :

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{J}{A}}} = \frac{L}{\sqrt{\frac{4\pi d^4}{64\pi d^2}}} = \frac{4L}{d} \quad (6.10.1)$$

Táhlo	Délka	Průměr	dZ	dY	Osová síla F	Rot. tuhost kr	Sm.odch – s	Test - t	Štíhlost λ
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kNm/deg]	[-]	[-]	[-]
EL22	22266	82	17883	13265	214	70	0,21546	0,02072	1086
EL22	22266	82	17883	13265	610	40	0,18005	0,33947	1086
EL26	21282	72	18286	10887	153	90	0,75593	0,06678	1182
EL26	21282	72	18286	10887	491	25	0,43082	0,07254	1182
EL12	21213	97	13868	16052	324	30	0,42286	0,24293	875
EL12	21213	97	13868	16052	825	25	0,53062	0,10616	875
EL16	22392	82	15987	15678	212	23	0,19038	0,31132	1092
EL16	22392	82	15987	15678	589	25	0,12776	0,34523	1092
EL04	13263	102	7059	11228	572	80	0,76611	0,15829	520
EL04	13263	102	7059	11228	1747	80	1,10466	0,04561	520
EL25	21577	72	18245	11519	129	10	0,26465	0,20228	1199
EL25	21577	72	18245	11519	461	10	0,23973	0,56334	1199
EL13	21630	82	14461	16085	266	*1)	0,58052	4,70527	1055
EL13	21630	82	14461	16085	645	*1)	0,40317	2,9042	1055
EL18	22561	82	16799	15061	146	1000 *2)	0,09417	0,48502	1101
EL18	22561	82	16799	15061	479	55	0,09500	0,15187	1101
EL24	21842	72	18163	12132	129	30	0,25723	0,18057	1213
EL24	21842	72	18163	12132	456	4	0,23165	0,1582	1213

Tab.6.23 Porovnání odhadů rotační tuhosti jednotlivých táhel

Z tabulky 6.23 vyplývá, že pro každé táhlo lze najít takový parametr rotační tuhosti k_r , pro který se vypočtené vlastní frekvence přibližují změřeným vlastním frekvencím. Vzhledem ke způsobu výpočtu (dvojitá ruční iterace) a rozdílné přesnosti určení jednotlivých k_r , nelze prozatím o parametru rotační tuhosti k_r činit žádné závěry. Zároveň není nic známo o nejistotách měření sil v táhlech, jelikož od dodavatele tenzometrického měření na Trojském mostě nebylo dosud možné tyto údaje získat. Z těchto důvodů bude možné činit další závěry až po zpracování rozsáhlého vzorku měření jednotným automatickým výpočtem a získání doplňujících údajů o tenzometrickém měření.

Poznámka *1): Pro táhlo EL13 se nepodařilo najít vhodný parametr k_r , ani pro jedno z nezávislých měření provedených s měsíčním odstupem. Vzhledem k tomu, že parametr k_r neleží mezi kloubovým uložením ($k_r = 0$) a vetknutím ($k_r \rightarrow \infty$), je nejspíš chyba v určení síly z tenzometrického měření. Jedna z možných příčin je chybné zadání kalibrační nulové hodnoty tenzometru do měřicího systému.

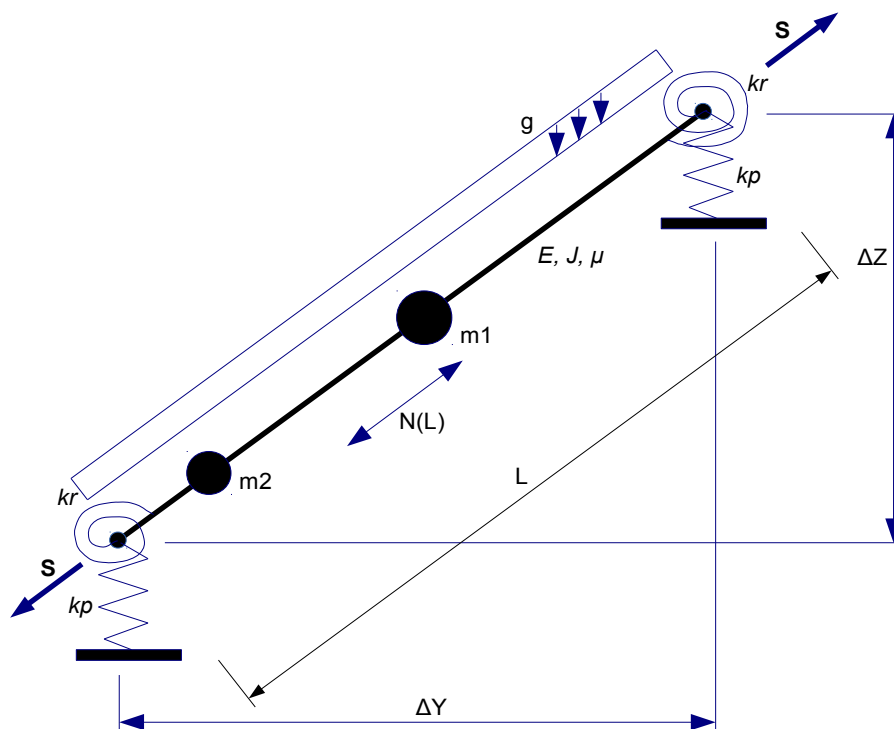
Poznámka *2): Vzhledem k tomu, že nelze již zpětně zkontrolovat změřené frekvence a zaznamenanou tenzometrickou sílu, nelze určit příčinu anomální hodnoty. Řešením obdobných situací je zautomatizovat celý výpočet a vyhodnocení parametrů modelu kontrolovat přímo při měření, kdy lze na místě z větší pravděpodobností nalézt příčinu.

6.11 Shrnutí výsledků – rekapitulace vhodného modelu

Z výsledků porovnání jednotlivých modelů lze shrnout vlastnosti vhodného modelu kmitajícího táhla:

- Základem modelu je nosník kmitající dle Bernouliho-Eulerovy teorie
- Zohledňuje vliv předpínací osové síly
- Zohledňuje vliv působení vl. tíhy po délce táhla – proměnná normálová síla v závislosti na směrové poloze táhla
- Zohledňuje vliv dodatečných osamělých hmot – vliv spojovacích a napínákových matic
- Zohledňuje vliv pružného uložení konců táhla, zejména rotační tuhost uložení.

Celkové schema modelu je znázorněno na obr. 6.24:



Obr.6.24 Schema modelu táhla

Vyjádření modelu diferenciální rovnicí dle [01] lze provést za těchto podmínek:

- Hmoty $m1$ a $m2$ se „rozpusť“ do náhradní jednotkové hmotnosti μ_n . Pro výpočet náhradní spojité jednotkové hmotnosti existuje několik postupů, pro náš případ použijeme rovnoměrné rozdělení osamělých hmot po délce táhla $\mu_n = \mu + (m1 + m2)/L$
- Pro průběh normálové síly platí: $N(x) = S_0 - \mu_n g (L - x) \sin \alpha$, (6.11.1)
kde S_0 je předpínací síla, g je tíhové zrychlení, L je délka táhla, x je proměnná délky táhla ve směru táhla s počátkem v nižším styčniku a α je úhel odklonu táhla od vodorovné roviny.

Dle [01] str.252 je pro řešení modelu výchozí rovnice:

$$\mu_n \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (6.11.2)$$

Po dosazení za normálovou sílu N z rovnice (6.11.1):

$$\mu_n \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(S_0 - \mu_n g (L-x) \sin \alpha) \frac{\partial w}{\partial x} \right] , \text{ po úpravách} \quad (6.11.3)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -c_0^2 j^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{S_0}{\mu_n} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - g \frac{\partial}{\partial x} \left[((L-x) \sin \alpha) \frac{\partial w}{\partial x} \right] , \text{ kde}$$

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ je rychlost podélných vln v táhle,}$$

$$j = \sqrt{\frac{J}{A_n}} \text{ je kvadratický poloměr průřezu táhla a pro úpravy rovnice uvažujeme}$$

jednotkovou hmotnost $\mu_n = A_n \rho$.

Pro ustálené kmitání se předpokládá výchylka střednice průřezu ve tvaru:

$$w(x, t) = w_0(x) e^{i\omega t} = w_0(x) (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \quad (6.11.4)$$

Po dosazení rovnice (6.11.4):

$$\begin{aligned} -\omega^2 w_0(x) &= -c_0^2 j^2 \frac{\partial^4 w_0(x)}{\partial x^4} + \frac{S_0}{\mu_n} \frac{\partial^2 w_0(x)}{\partial x^2} - g \sin \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left[(L-x) \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \right] \text{ po úpravě} \\ \frac{\partial^4 w_0(x)}{\partial x^4} - \frac{S_0}{\mu_n c_0^2 j^2} \frac{\partial^2 w_0(x)}{\partial x^2} + \frac{g \sin \alpha}{c_0^2 j^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[(L-x) \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \right] - \frac{\omega^2}{c_0^2 j^2} w_0(x) &= 0 \end{aligned} \quad (6.11.5)$$

Pružné uložení konců popisují následující okrajové podmínky (dle [01] str. 237):

$$-EJ \frac{\partial^3 w_0(0)}{\partial x^3} = k_{p1} w_0(0) , \quad (6.11.6)$$

$$-EJ \frac{\partial^3 w_0(L)}{\partial x^3} = k_{p2} w_0(L) \text{ a} \quad (6.11.7)$$

$$EJ \frac{\partial^2 w_0(0)}{\partial x^2} = k_r \frac{\partial w_0(0)}{\partial x} , \quad (6.11.8)$$

$$EJ \frac{\partial^2 w_0(L)}{\partial x^2} = k_r \frac{\partial w_0(L)}{\partial x} . \quad (6.11.9)$$

Rovnice 6.11.5 je lineární s proměnnými koeficienty, není řešitelná v uzavřeném tvaru. K nalezení vlastních frekvencí se musí použít numerické řešení.

7. Závěr

Tato práce měla za cíl ověřit možnosti sledování změn tahových sil v táhlech předpjatých ocelových konstrukcí pomocí změn vlastních frekvencí. Hlavní myšlenka byla prověřit možnost navržení levného prostředku pro měření vlastních frekvencí. Dále bylo cílem nalézt vhodný dynamický model kmitajícího předpjatého táhla na základě znalosti sil z tenzometrického měření a stanovit jaké parametry modelu je třeba určit pro vyhodnocení změn vlastních frekvencí v průběhu životnosti konstrukce.

Diplomová práce částečně navazuje na mojí předchozí bakalářskou práci [09], která měla odlišný cíl – určit tahovou sílu ze změřených vlastních frekvencí. Tento cíl se ale nepodařilo uspokojivě dosáhnout, naopak z výsledků vyplynulo mnoho dalších otázek, z nichž většina je řešena v této diplomové práci.

V této práci bylo vytvořeno programové vybavení pro měření vlastních frekvencí předpjatých táhel pro STM32F4 Discovery kit s integrovaným akcelerometrem LIS302DL. Toto programové vybavení bylo vyzkoušeno na funkčním vzorku s modulem Bluetooth pro bezdrátový přenos dat do měřicího PC. Měřicí sw pro PC vyvinutý v rámci bakalářské práce [09] byl upraven pro komunikaci s STM32F4 Discovery kitem a doplněn o další funkcionalitu. Doplněna byla funkce pro automatické rozpoznávání připojeného přípravku a způsobu komunikace, funkce pro ukládání vyhodnocených vl. frekvencí, export naměřených dat do csv formátu a projekt byl zkompileován pro běh na 64 bitových Windows.

Byly teoreticky porovnány metody filtrace jednotlivých vlastních frekvencí pro výpočet útlumu jednotlivých složek změřeného spektra. Princip filtrace a výpočtu útlumu byl ověřen na vygenerovaném vzorku dat v prostředí MATLAB. V prostředí Scilab byly odladěny funkce pro automatické výpočty útlumu jednotlivých vlastních frekvencí z naměřených dat. Pro filtraci průběhů signálu jednotlivých složek vl. frekvencí byla použita vlastní metoda, která nebyla nalezena v dostupné literatuře.

V kapitole 6 byl nalezen uspokojivý dynamický model kmitajícího táhla a ověřen metodou konečných prvků na vzorku táhel. Pro každé táhlo lze přibližně získat potřebné parametry modelu při znalosti změřené tahové síly, zejména rotační tuhost uložení konců táhla, která má významný vliv na přesnost výsledného modelu pro každé táhlo.

Pro další vyhodnocení většího množství táhel bude nutné vytvořit programové prostředky pro automatickou identifikaci modelu táhla, jelikož dostupné programy MKP neumožňují řešit přímo požadovanou inverzní úlohu a získání potřebných parametrů modelu každého táhla vyžaduje pracnou dvojí ruční iteraci.

Zároveň výsledky této práce ukazují, že případná znalost parametrů modelu z velkého vzorku změřených táhel by mohla vést k možnosti určení tahové síly pouze ze změřených vlastních frekvencí.

Závěrem se domnívám, že zadání samostatné práce bylo splněno a prokázala se možnost použití STM32F4 Discovery kitu pro měření vlastních frekvencí stavebních táhel a prověřila možnost sledovat předpjaté stavební konstrukce v průběhu celé životnosti stavby pomocí měření vlastních frekvencí.

Výsledky z této práce se již promítly do projektu údržby a sledování konstrukce nového Trojského mostu, kde je jako jedna z metod navrženo dlouhodobé sledování vlastních frekvencí nosných táhel.

8. Seznam literatury a zdrojů

Seznam literatury

- [01] BREPTA, Rudolf; PŮST Ladislav; TUREK František. *Technický průvodce, mechanické kmitání*. SOBOTÁLES 1994, ISBN 80-901684-8-5
- [02] HUANG, Norden E.: *Introduction to the Hilbert Huang Transform and its Related Mathematical Problems*. Článek k Toolboxu Hilbert Huang transformace, www.mathworks.com
- [03] HLAVÁČ, Václav; SEDLÁČEK, Miloš. *Zpracování signálů a obrazů*. Skriptum, ČVUT Praha 2007
- [04] GEIER, Roman; DE ROECK, Guido; PETZ, Johannes. *Cable Force Determination for the Danube Channel Bridge in Vienna*. Structural Engineering International 3/2005
- [05] SOVKA, P., ČMEJLA, R.: *Úvod do číslicového zpracování signálů - cvičení*. Vydavatelství ČVUT 2006
- [06] LIŠKA, J.: *Zpracování signálů pro diagnostiku a jeho aplikace – učební texty k semináři*. Ústav automatizace a měřicí techniky VUT v Brně 2010
- [07] KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN 2006
- [08] STM: *STM32Fxx – Reference manual, advanced ARM -based 32-bit MCU*. STM 2012
- [09] NEČAS M. *Měření napětí v táhlech pomocí vlastních frekvencí*. Bakalářská práce, 2009
- [10] STM: *STM32F407xx – data sheet*. STM 2012
- [11] MAIN, I.G.: *Kmitý a vlny ve fyzice*. Academia Praha 1990
- [12] STM: *LIS302DL – MEMS motion sensor accelerometer*. STM 2008
- [13] STM: *UM1021 – User manual On-The-Go host and device library*. STM 2012
- [14] USB.org: *USB Class Definitions for Communication Devices*. USB Implementers' Forum 1996-1999
- [15] MIKESKA, Z.: *Specifikace rádiové části systému Bluetooth*. Elektrotechnika 2004/3
- [16] BLUETOOTH.com: *BLUETOOTH SPECIFICATION Version 2.1 + EDR [vol 0]*. Bluetooth SIG, Inc.
- [17] connectBlue: *CB-OBS411i data sheet*. connectBlue, AB.
- [18] BLAŽEK, R.: *FEAT` 98 Teoretický manuál*. SMARTsoft, s.r.o 2000

Seznam zdrojů

- [I01] *Systém táhel Macalloy*, firemní web českého distributora www.tension.cz
- [I02] *Exocortex.DSP. v.2.0. An open source C# Complex Number and FFT library for Microsoft .NET*. BSD Licence: Copyright (c) 2001, 2002 Ben Houston [ben@exocortex.org], Exocortex Technologies [www.exocortex.org]
- [I03] *Ovladače Virtual COM Port driver*. Verze V1.3.1 COPYRIGHT 2010 STMicroelectronics, www.stm.com
- [I04] *FEAT 2000 pro Windows*. Verze 3.0 – 13.04.00. COPYRIGHT 2000 SMARTsoft, s.r.o,