

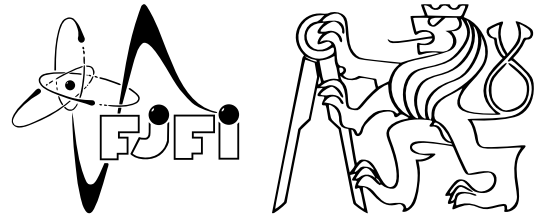
Datum měření: 25.10.2013

Skupina: 7

Jméno: David Roesel

Kroužek: ZS 5

Spolupracovala: Tereza Schönfeldová Klasifikace:



Část I

Lineární harmonický oscilátor

1 Pracovní úkoly

1. Změřte tuhost pružiny statickou metodou a vypočtěte vlastní úhlovou frekvenci pro dvě různá závaží.
2. Změřte časový průběh tlumených kmitů pro dvě závaží, ověřte platnost rovnice (14) v [1] proložením dat a z parametrů proložení vypočtěte vlastní frekvenci volného oscilátoru.
3. Změřte závislost amplitudy vynucených kmitů na frekvenci vnější síly v okolí rezonance pro dvě závaží a proložením dat ověřte platnost vztahu (19) v [1], z parametrů proložení vypočtěte vlastní frekvenci volného oscilátoru.
4. Porovnejte výsledky vlastní frekvence ze všech tří předchozích úkolů.

2 Vypracování

2.1 Použité přístroje

Experimentální stojan s pružinou, závažím a motorkem, tlumící magnety, rotační pohybové senzory Pasco, sada závaží, regulovatelný zdroj 0-20 V, PC, program *DataStudio* a *GNUplot*, laserový otáčkoměr.

2.2 Teoretický úvod

2.2.1 Potenciál harmonického oscilátoru

Potenciál lineárního harmonického oscilátoru má tvar

$$U(x) = \frac{1}{2}kx^2. \quad (1)$$

V našem případě půjde o pružinu se zavěšeným závažím a konstanta k tak bude odpovídat tuhosti pružiny v Hookově zákonu

$$F = -kx, \quad (2)$$

kde x je prodloužení pružiny vyvolané působením síly F .

2.2.2 Netlumené kmity

Pohybová rovnice pro těleso o hmotnosti m příslušná potenciálu (1) má tvar

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3)$$

Obecné řešení této rovnice je v určitém tvaru

$$x(t) = a \cdot \cos(\omega t + \alpha), \quad (4)$$

kde a je amplituda oscilací, α počáteční fáze a ω úhlová frekvence. V případě parabolického potenciálu (1) úhlová frekvence nezávisí na počátečních podmínkách a je dána výhradně vlastnostmi oscilátoru.

2.2.3 Tlumené kmity

Z platnosti základní pohybové rovnice pro tření, zavedení dekrementu útlumu δ a frekvence volného oscilátoru bez tření ω_0 podle vztahů

$$m\ddot{x} = -kx - h\dot{x}, \quad 2\delta = \frac{h}{m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad (5)$$

dostaneme pohybovou rovnici tlumeného oscilátoru ve tvaru

$$\ddot{x} = 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (6)$$

Obecné řešení této rovnice má tvar

$$x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}, \quad \lambda_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}. \quad (7)$$

Rozlišujeme tři případy.

1. Slabý útlum ($\delta < \omega_0$): Řešení (6) nabývá tvaru

$$x(t) = a \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (8)$$

kde $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ a a a α jsou reálné konstanty. V systému tak dochází k tlumeným periodickým kmitům s exponenciálně klesající amplitudou a sníženou frekvencí.

2. Silný útlum ($\delta > \omega_0$): ... (viz [1]).
3. Kritický útlum ($\delta = \omega_0$): Jedná se o zvláštní případ aperiodického tlumení a řešení (6) nabývá tvaru

$$x(t) = (c_1 + c_2 t) e^{-\delta t}, \quad (9)$$

2.2.4 Vynucené kmity s tlumením

Přidáním vnější periodické síly $F(t) = f \cos(\gamma t)$ do rovnice (6) dostáváme pohybovou rovnici

$$\ddot{x} = 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{f}{m} \cos(\gamma t). \quad (10)$$

Úpravou podle [1] dostáváme pro amplitudu

$$b(\gamma) = \frac{f}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \gamma^2)^2 + 4\delta^2\gamma^2}}, \quad \xi = \arctan \frac{2\delta\gamma}{\gamma^2 - \omega_0^2}. \quad (11)$$

Finální tvar řešení je potom

$$x(t) = b \cos(\gamma t + \xi). \quad (12)$$

Při rezonanci nabývá amplituda b maxima, ale není nekonečná - její maximum je v bodě $\gamma = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$.

2.3 Postup měření

Aparaturu jsme sestavili podle Obr. 2 v [1]. Obsahovala dva senzory na měření výchylky, pružinku s proměnným závažím a motorek, který dodával případnou vnější budící sílu. Tlumení zařizovaly magnety, které indukovaly vířivé proudy v hliníkovém tělese použitém jako závaží. Senzor S1 (ten níže položený) měřil časový průběh vnější síly a senzor S2 (výše umístěný) oscilace. Senzory byly připojeny k počítači a data z nich zobrazoval program *DataStudio*.

2.3.1 Měření tuhosti pružiny statickou metodou

Ze senzoru S2 určíme prodloužení pružinky x po přidání závaží o hmotnosti m . Z toho pomocí vztahu $mg = -kx$ určíme tuhost pružiny k (g je tíhové zrychlení).

2.3.2 Měření časového průběhu tlumených kmitů

1. Nejdříve umístíme na držák zvolené závaží.
2. Vynulujeme senzory.
3. Zapneme ukládání dat.
4. Závaží udělíme počáteční výchylku a necháme ho kmitat do zastavení.
5. Vypneme ukládání dat a vymažeme nepotřebné části.

2.3.3 Měření časového průběhu kmitů s vnější budící silou

Měnili jsme napětí na zdroji a hledali, kdy zhruba nastává rezonance. V okolí tohoto místa jsme potom provedli měření pro několik různých hodnot napětí podle následujícího postupu.

1. Nejdříve umístíme na držák zvolené závaží.
2. Vynulujeme senzory a nastavíme napětí na zdroji.
3. Závaží rozkmitáme a počkáme, než se částečně ustálí amplituda.
4. Zapneme ukládání dat a zaznamenáme 20 period kmitů. Během toho měříme frekvenci budící síly laserovým otáčkoměrem.
5. Vypneme ukládání dat a vymažeme nepotřebné části.

2.4 Naměřené hodnoty

2.4.1 Měření tuhosti pružiny statickou metodou

Naměřené hodnoty jsou v Tab. 1. Při hliníkovém závaží na stojanu o hmotnosti $m_z = 21,84$ g a tuhosti pružiny $k = (13,3 \pm 0,2)$ N/m nám pro závaží o hmotnosti $m = 20$ g a $m = 40$ g vyšly podle (3) vlastní frekvence

$$\omega_{20} = (17,8 \pm 0,2) \text{ rad/s}, \quad \omega_{40} = (14,7 \pm 0,1) \text{ rad/s}. \quad (13)$$

2.4.2 Měření časového průběhu tlumených kmitů

Průběh tlumených kmitů je vyneseno do grafů na Obr. 1 a Obr. 2 pro obě hmotnosti. Z proložení získáváme vlastní úhlové frekvence pro obě závaží jako

$$\omega_{20} = (16,27 \pm 0,01) \text{ rad/s}, \quad \omega_{40} = (13,59 \pm 0,02) \text{ rad/s}. \quad (14)$$

2.4.3 Měření časového průběhu kmitů s vnější budící silou

Naměřené hodnoty jsou vyneseny v Tab. 2 a Tab. 3, stejně tak potom v grafech na Obr. 3 a Obr. 4. Frekvence f_t je počítána z napětí podle závislosti získané lineárním proložením $f(U) = (0,222 \pm 0,002) U - (0,15 \pm 0,02) \text{ Hz}$. Z proložení zmíněných dvou grafů získáváme vlastní úhlové frekvence pro obě závaží jako

$$\omega_{20} = (19,58 \pm 0,06) \text{ rad/s}, \quad \omega_{40} = (12,82 \pm 0,06) \text{ rad/s}. \quad (15)$$

2.5 Diskuse

Ač jsou výsledky zatíženy různými systematickými chybami a každá ze tří metod je jinak přesná, všechny jsou vzájemně konzistentní a poměr dvou měřených frekvencí ω_{20} a ω_{40} se příliš nemění.

2.5.1 Měření tuhosti pružiny statickou metodou

Tuhost pružiny nám vyšla $k = (13,3 \pm 0,2) \text{ N/m}$. Chyba tohoto výsledku by šla zmenšit, pokud bychom použili závaží o přesněji známé hmotnosti, nebo námi použité závaží převážili. Při jiné konfiguraci pokusu by také bylo možné závažíčka kombinovat do větších hmotností a naměřit tak více hodnot. Velikost chyby tuhosti se následně přenáší i do výpočtu vlastní frekvence LHO, jejíž výsledky se zdají být pro dvě různá závaží v pořádku, ale jejich systematická chyba je pravděpodobně větší, než chyba statistická.

2.5.2 Měření časového průběhu tlumených kmitů

Vlastní frekvence jsme v tomto případě počítali pomocí fitování v programu *GNUplot*. Chyby fitu určil program o řád menší než v předchozím případě a jedná se tak o přesnější výsledek (nejen proto, že nezávisí explicitně na hmotnosti). Vzhledem k tomu, jak dobře je na fitu vidět přesnost tohoto paramteru, můžeme říct, že se jedná o nejpresnější měření, které jsme udělali a velmi dobře potvrzuje platnost rovnice (8).

2.5.3 Měření časového průběhu kmitů s vnější budící silou

Měření vlastních frekvencí pomocí hledání rezonance bylo zatíženo velkou systematickou chybou vzhledem k malým rozdílům hladin v programu *DataStudio* a její výsledky jsou tak nejméně přesné ze všech tří metod. Při pohledu na proložení v grafech na Obr. 3 a 4 vidíme, že ač je u parametrů uvedena velmi malá chyba, proložení není příliš přesné. Na to, abychom potvrdili platnost rovnice (11) nám ale data stačí. Měření by šlo zpřesnit v případě, že bychom dovolili větší amplitudu, nebo měřili průběh kontinuálně během jednoho měření místo deseti měření prováděných zvlášť.

3 Závěr

Úspěšně jsme změřili tuhost pružiny statickou metodou a vypočetli z ní vlastní úhlovou frekvenci pro dvě různá závaží. Změřili jsme časový průběh tlumených kmitů pro dvě závaží, ověřili dobře platnost vztahu (14) z [1] a vypočetli s dobrou přesností vlastní frekvenci volného oscilátoru. S menší jistotou jsme pak ověřili také vztah (19) z [1] a do třetice, byť s menší přesností, jsme změřili vlastní frekvence pro obě závaží.

Část II

Pohlovo torzní kyvadlo

4 Pracovní úkoly

1. Změřte tuhost pružiny Pohlova kyvadla.
2. Naměřte časový vývoj výchylky kmitů kyvadla pro netlumené kmity. Za použití výsledku tohoto a minulého úkolu vypočítejte moment setrvačnosti kyvadla I .
3. Změřte koeficient útlumu pro několik zvolených hodnot tlumícího proudu. Závislost vyneste do grafu.
4. Extrapolací určete hodnotu tlumícího proudu, při kterém dochází ke kritickému tlumení. Nastavte tuto hodnotu, změřte průběh při rychlostní a polohové počáteční podmínce a ověřte, že je kyvadlo skutečně kriticky tlumeno.

5 Vypracování

5.1 Použité přístroje

Pohlovo kyvadlo, sada závaží, senzor PASCO, program DataStudio, PC.

5.2 Teoretický úvod

V Pohlově kyvadle je zabudovaná pružina i možnost tlumení. Celkový moment sil bude součtem momentů sil dodávaných pružinou N_P a těch generovaných vířivými proudy indukovanými cívkami N_T . Pro vyřešení pohybové rovnice musíme předpokládat,

- že moment sil generovaných pružinou je přímo úměrný odpovídajícímu úhlu pootočení kyvadla φ

$$N_P = -D\varphi, \quad (16)$$

kde $D > 0$ se nazývá tuhost pružiny torzního kyvadla a platí

$$D = \frac{mgr^2}{l}, \quad (17)$$

- a že moment tlumících sil při pohybu kyvadla je přímo úměrný odpovídající úhlové rychlosti kyvadla

$$N_T = -C\dot{\varphi}(t), \quad \text{kde } C \geq 0. \quad (18)$$

Pohybovou rovnici pak můžeme zapsat jako

$$\ddot{\varphi}(t) + 2\delta\dot{\varphi}(t) + \omega_0^2\varphi(t) = 0, \quad \delta = \frac{C}{2I} \quad \omega_0^2 = \frac{D}{I}. \quad (19)$$

Řešení, stejně jako v předchozí části, závisí na vztahu ω_0 a δ . Rozlišujeme tři případy:

1. Pro malý útlum ($\omega_0 > \delta \geq 0$) platí

$$\varphi(t) = \varphi_{max}e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi_0), \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}. \quad (20)$$

2. Pro kritický útlum ($\omega_0 = \delta$) platí

$$\varphi(t) = \varphi_0(1 + \delta t)e^{-\delta t} \quad \text{při počáteční polohové podmínce a} \quad (21)$$

$$\varphi(t) = \Omega_0 t e^{-\delta t} \quad \text{při počáteční rychlostní podmínce.} \quad (22)$$

3. Pro silný útlum ($\omega_0 < \delta$) při $d = \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}$ platí

$$\varphi(t) = \varphi_0 e^{-\delta t} \left[\cosh(dt) + \frac{\delta}{d} \sinh(dt) \right] \quad \text{při počáteční polohové podmínce a} \quad (23)$$

$$\varphi(t) = \frac{\Omega_0}{d} e^{-\delta t} \sinh(dt) \quad \text{při počáteční rychlostní podmínce.} \quad (24)$$

5.3 Postup měření

5.3.1 Měření tuhosti pružiny Pohlova kyvadla

Přes kladku jsme na kyvadlo zavěsili nejdříve jedno závaží na napnutý provázku a poté 3 různá závaží. Při tom jsme odečítali aktuální výchylku.

5.3.2 Měření průběhu pro netlumené kmity

Za pomoci počáteční výchylky jsme rozkmitali kyvadlo a přes senzor zaznamenávali průběh pomocí programu *DataStudio*. Na místě jsme pomocí programu *GNUplot* zjistili parametr ω_0 .

5.3.3 Tlumené kmity

Za pomoci počáteční výchylky jsme rozkmitali kyvadlo a přes senzor jsme zaznamenávali průběh pomocí programu *DataStudio*. Nastavovali jsme různé proudy a závisle na nich měřili dekrement útlumu. Tyto hodnoty jsme poté vynesli do grafu a extrapolací zjistili hodnotu tlumícího proudu v bodě $\delta = \omega_0$. Tu jsme poté nastavili a při rychlostní i polohové podmínce ověřili, že bylo kyvadlo skutečně kriticky tlumeno.

5.4 Naměřené hodnoty

5.4.1 Měření tuhosti pružiny Pohlova kyvadla

Naměřené hodnoty jsou v Tab. 4. Jako poloměr pružiny jsme brali hodnotu $r = (9,39 \pm 0,01)$ cm.

5.4.2 Měření průběhu pro netlumené kmity

Průběh netlumených kmitů je vyneseno do grafu na Obr. 5. Z proložení získáváme vlastní úhlovou frekvenci ω_0 a ze vzorce (19) moment setrvačnosti kyvadla I jako

$$\omega_0 = (3,538 \pm 0,001) \text{ rad/s}, \quad I = (0,0024 \pm 0,0001) \text{ kg} \cdot \text{m}^2. \quad (25)$$

5.4.3 Tlumené kmity

Průběh tlumených kmitů je vyneseno ilustračně do grafů na Obr. 6, 7 a 8. Pomocí jejich proložení jsme pro několik proudů spočítali dekrementy útlumu. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5. Z těchto hodnot jsme následně extrapolací odhadli, že ke kritickému útlumu dochází při proudu $I = (1,5 \pm 0,2)$ A a náš odhad jsme v grafu na Obr. 9 ověřovali.

5.5 Diskuse

Velký problém během celého pokusu jsme měli s lepenkou, která byla nalepená na kyvadle a omezovala tak rozsah, do kterého šlo kyvadlo vychýlit. V druhém směru pak v jednom místě nedovolila provázku, aby se dále odvíjel.

5.5.1 Měření tuhosti pružiny Pohlova kyvadla

Tuhost pružiny torzního kyvadla nám vyšla $D = (0,030 \pm 0,002)$ N/m. Chyba tohoto výsledku by šla zmenšit stejně jako v první části, pokud bychom použili závaží o přesněji známé hmotnosti, nebo námi použité závaží převážili. Vzhledem k limitovanému rozsahu jsme měření udělali pouze pro tři hodnoty a to není dostatečně velký vzorek pro smysluplnou statistickou chybu. Přesnost našeho výsledku je tedy nejistá.

5.5.2 Měření průběhu pro netlumené kmity

Měření cívkami netlumených kmitů Pohlova kyvadla proběhlo i přes zmenšený rozsah dobře a podařilo se ho i obstojně proložit funkcí pro tlumené kmity, vzhledem k nezanedbatelnému tření. Hodnota vlastní úhlové frekvence ω_0 je tak změřená relativně přesně, na rozdíl od momentu setrvačnosti kyvadla I , na jehož hodnotu se přenáší chyba z tuhosti pružiny D .

5.5.3 Tlumené kmity

Měření časového průběhu různě tlumených kmitů proběhlo dobře a i podle grafů na Obr. 6, 7 a 8 je vidět, že se kmity tlumí více se vzrůstajícím proudem. Z extrapolace na Obr. 11 jsme určili, že bude ke kritickému útlumu docházet přibližně při hodnotě tlumícího proudu $I = (1,5 \pm 0,2)$ A. Když jsme ale pro tuto hodnotu provedli měření (viz Obr. 9), bylo evidentní, že v tomto bodě ke kritickému útlumu nedochází. Provedli jsme poté tedy velmi rychle několik dalších měření a zjistili jsme, že ke kritickému útlumu dochází ve skutečnosti někde mezi 1,7 a 1,8 A. Tento interval má neprázdný průnik s chybovým intervalem naší hodnoty a extrapolaci tak můžeme označit za relativně úspěšnou. Fitování exponenciální závislosti na základě prvních členů je však extrémně nepřesné, vzhledem k tomu, že na tomto úseku hodnotám mnohem více vyhovuje lineární závislost.

6 Závěr

Úspěšně jsme změřili tuhost pružiny Pohlova kyvadla. Naměřili jsme časový vývoj výchylky kmitů pro netlumené kmity. Pomocí výsledků těchto úkolů jsme následně úspěšně spočítali moment setrvačnosti kyvadla. Dále se nám podařilo změřit dekrement útlumu pro několik hodnot tlumícího proudu a závislosti jsme vynesli do grafů. Extrapolací jsme určili hodnotu tlumícího proudu pro kritický útlum a ověřili, zda (popřípadě kde) je kyvadlo skutečně kriticky tlumeno.

Reference

- [1] Kolektiv KF, *Návod k úloze: Lineární harmonický oscilátor* [Online], [cit. 9. února 2014]
http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/129/mod_resource/content/4/10-LHO-2012-09.pdf
- [2] Kolektiv KF, *Návod k úloze: Pohlovo torzní kyvadlo* [Online], [cit. 9. února 2014]
http://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/130/mod_resource/content/5/10-TK-2012-09.pdf
- [3] Kolektiv KF, *Chyby měření* [Online], [cit. 9. února 2014]
<http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf>

Část III

Přílohy

6.1 Domácí příprava

Domácí příprava je přiložena k protokolu.

6.2 Statistické zpracování dat

Pro statistické zpracování využíváme aritmetického průměru:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (26)$$

jehož chybu spočítáme jako

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (27)$$

kde x_i jsou jednotlivé naměřené hodnoty, n je počet měření, \bar{x} aritmetický průměr a σ_0 jeho chyba [3].

Při nepřímém měření počítáme hodnotu s chybou dle následujících vztahů:

$$u = f(x, y, z, \dots) \quad (28)$$

$$x = (\bar{x} \pm \sigma_x), \quad y = (\bar{y} \pm \sigma_y), \quad z = (\bar{z} \pm \sigma_z), \quad \dots,$$

kde u je veličina, kterou určujeme nepřímo z měřených veličin x, y, z, \dots

Pak

$$\begin{aligned} \bar{u} &= f(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}, \dots) \\ \sigma_u &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots} \\ u &= (\bar{u} \pm \sigma_u), \end{aligned} \quad (29)$$

6.3 Tabulky

| m [g] | x [mm] | k [N/m] | Δ_k^2 [N/m] |
|--------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| 10 | 7,075 | 13,87 | 0,29 |
| 20 | 15,075 | 13,01 | 0,10 |
| 30 | 21,963 | 13,40 | 0,01 |
| 40 | 30,113 | 13,03 | 0,09 |
| $\bar{k} \pm \sigma_{\bar{k}}$ | | 13,3 | 0,2 |

Tab. 1: Měření tuhosti pružiny statickou metodou; m je hmotnost přidaného závaží, x naměřené prodloužení, k z toho spočítaná tuhost dle vzorce (2) a Δ_k^2 její kvadratická odchylka. Aritmetický průměr tuhostí je \bar{k} a jeho chyba $\sigma_{\bar{k}}$ (27).

| f_t [Hz] | A_{max} [mm] |
|------------|----------------|
| 2,869 | 0,486 |
| 2,958 | 0,489 |
| 3,002 | 0,563 |
| 3,047 | 0,600 |
| 3,091 | 0,676 |
| 3,136 | 0,713 |
| 3,180 | 0,675 |
| 3,224 | 0,600 |
| 3,269 | 0,562 |
| 3,358 | 0,525 |

Tab. 2: Měření kmitů s budící silou v okolí rezonance pro závaží o hmotnosti $m = 20$ g; f_t je frekvence budící síly, A_{max} maximální naměřená amplituda.

| f_t [Hz] | A_{max} [mm] |
|------------|----------------|
| 1,626 | 0,338 |
| 1,715 | 0,525 |
| 1,804 | 0,563 |
| 1,892 | 0,675 |
| 1,981 | 0,783 |
| 2,070 | 0,788 |
| 2,159 | 0,638 |
| 2,248 | 0,563 |
| 2,336 | 0,413 |
| 2,425 | 0,313 |

Tab. 3: Měření kmitů s budící silou v okolí rezonance pro závaží o hmotnosti $m = 40$ g; f_t je frekvence budící síly, A_{max} maximální naměřená amplituda.

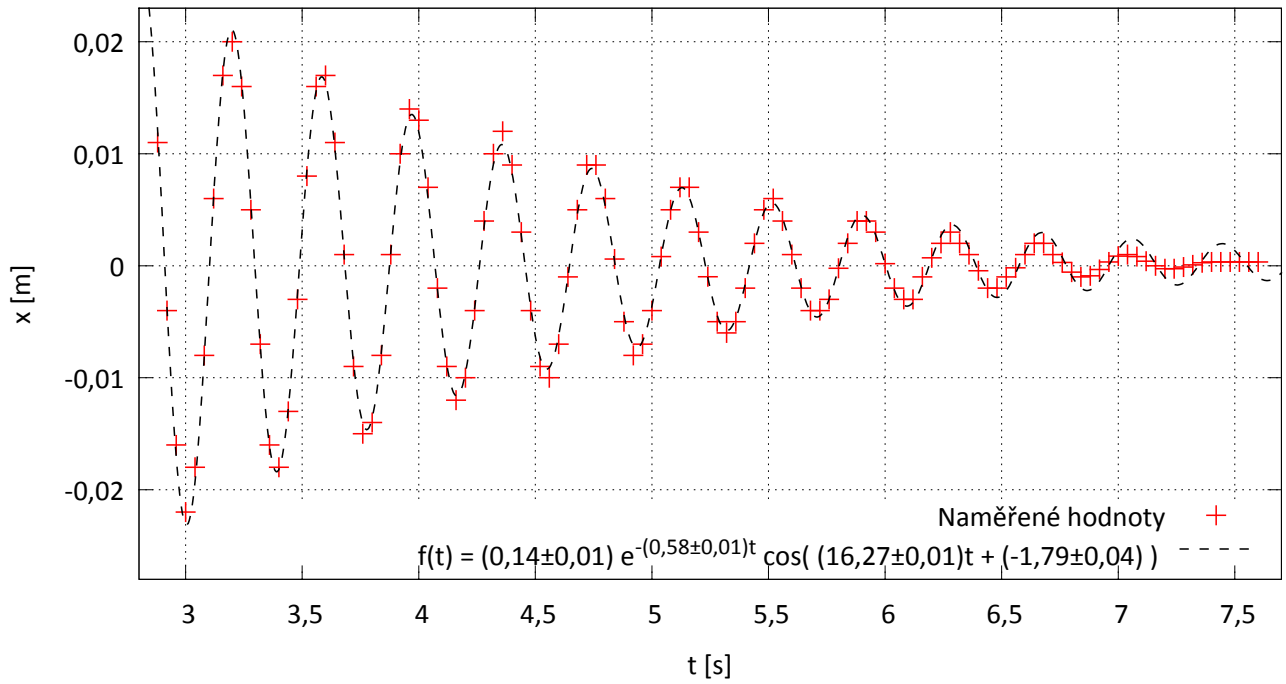
| m [g] | x [mm] | D [N/m] | Δ_D^2 [N/m] |
|--------------------------------|----------|-----------|--------------------|
| 30 | 80 | 0,032 | 0,0000064 |
| 50 | 162 | 0,027 | 0,0000103 |
| 70 | 198 | 0,031 | 0,0000005 |
| $\bar{D} \pm \sigma_{\bar{D}}$ | | 0,030 | 0,002 |

Tab. 4: Měření tuhosti pružiny Pohlova kyvadla statickou metodou; m je hmotnost zavěšených závaží, x naměřené prodloužení, D z toho spočítaná tuhost pružiny torzního kyvadla podle (17) a Δ_D^2 její kvadratická odchylka. Aritmetický průměr tuhostí je \bar{D} a jeho chyba $\sigma_{\bar{D}}$ (27).

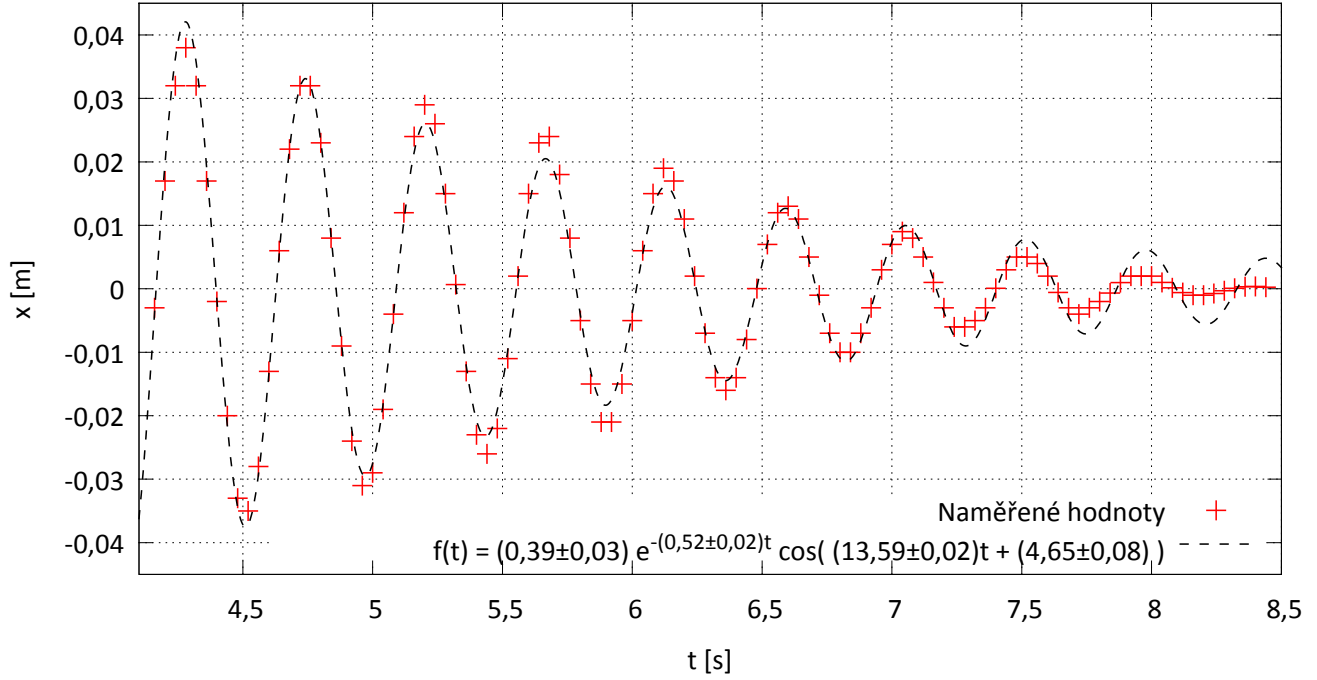
| I [A] | δ [rad/s] | σ_δ [rad/s] |
|---------|------------------|-------------------------|
| 0,2 | 0,108 | 0,001 |
| 0,3 | 0,151 | 0,001 |
| 0,4 | 0,228 | 0,001 |
| 0,5 | 0,312 | 0,002 |
| 0,6 | 0,419 | 0,002 |
| 0,7 | 0,524 | 0,002 |
| 0,8 | 0,642 | 0,002 |
| 1,0 | 0,975 | 0,006 |
| 1,2 | 1,693 | 0,005 |

Tab. 5: Měření koeficientů útlumu u Pohlova kyvadla; I je velikost tlumícího proudu, δ hodnota dekrementu útlumu podle fitu a σ_δ její chyba.

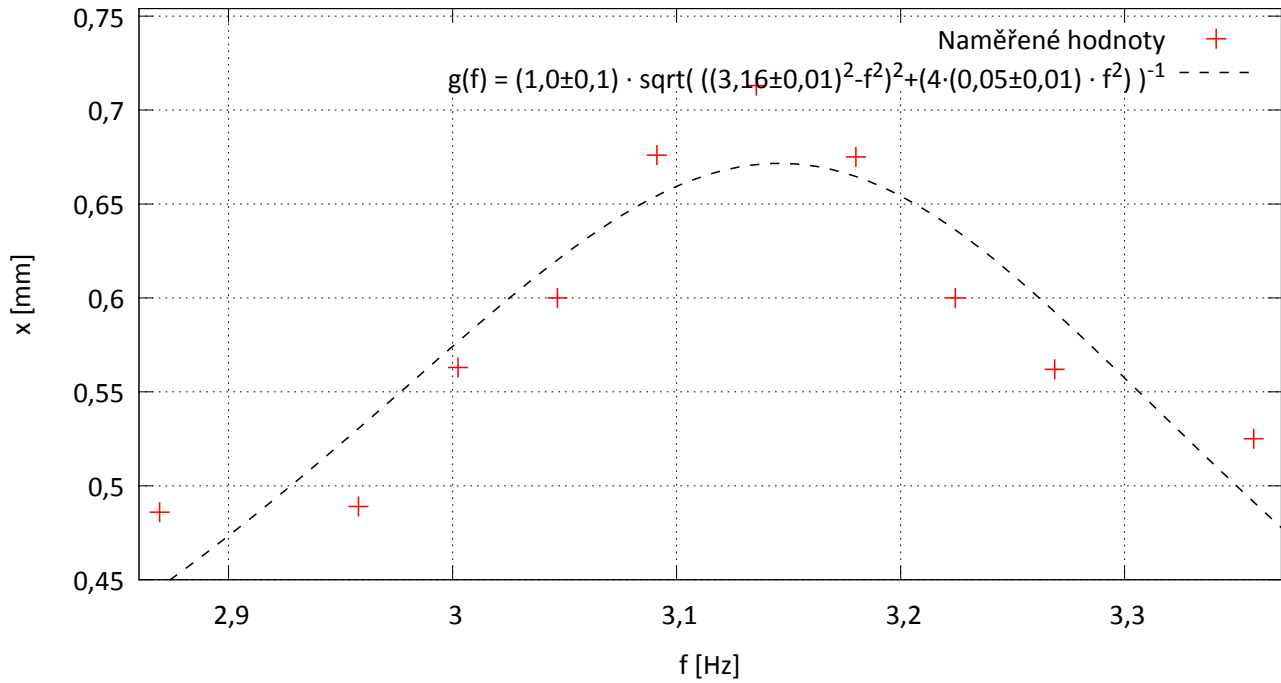
6.4 Grafy



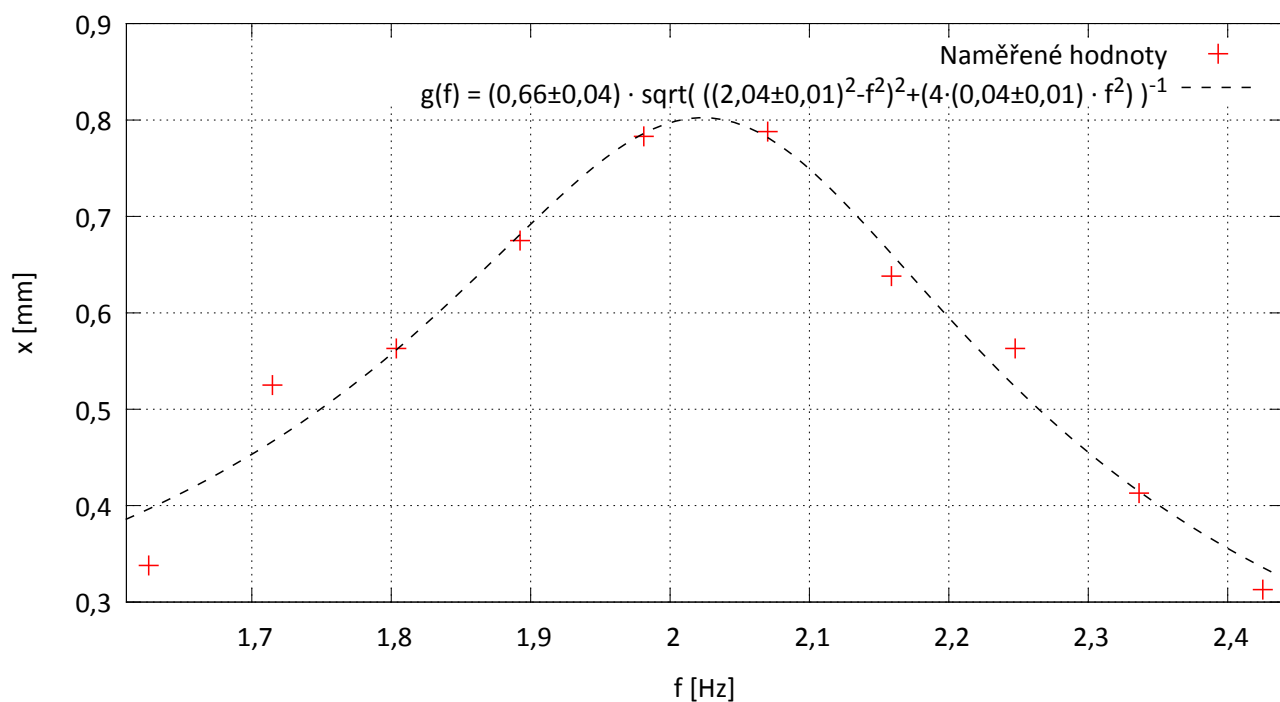
Obr. 1: Graf časového průběhu tlumených kmitů LHO pro závaží o hmotnosti $m = 20$ g; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



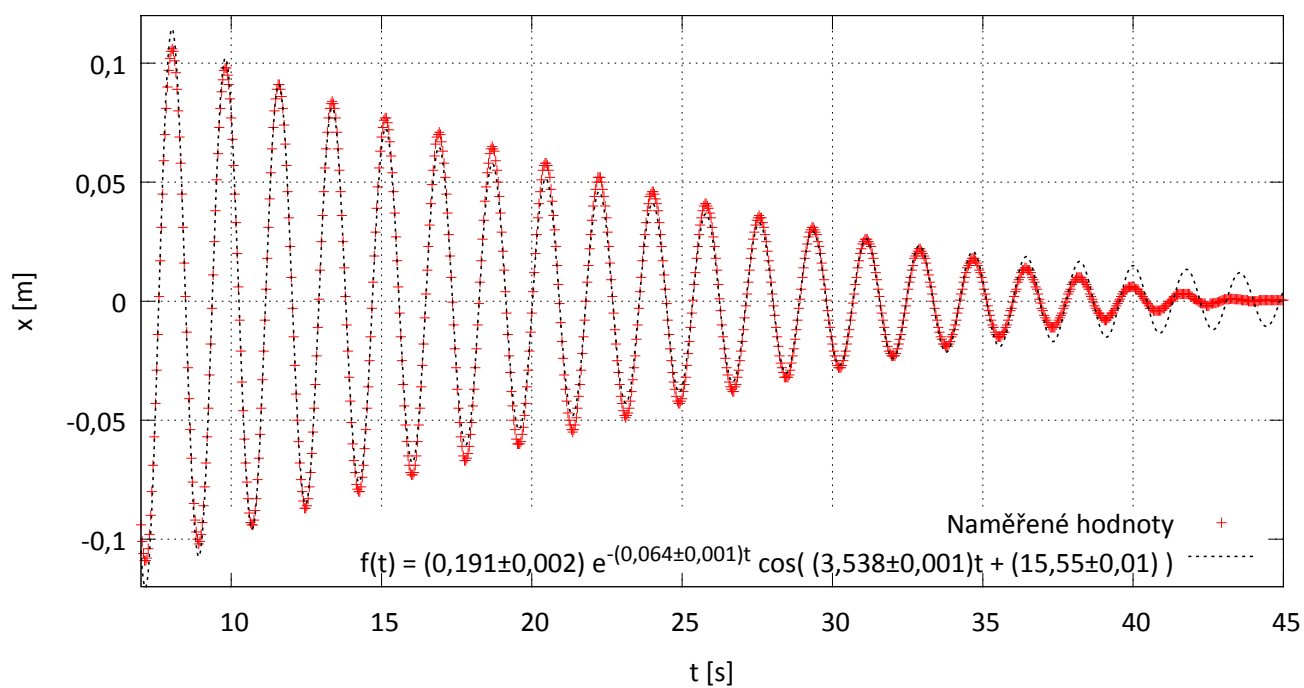
Obr. 2: Graf časového průběhu tlumených kmitů LHO pro závaží o hmotnosti $m = 40$ g; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



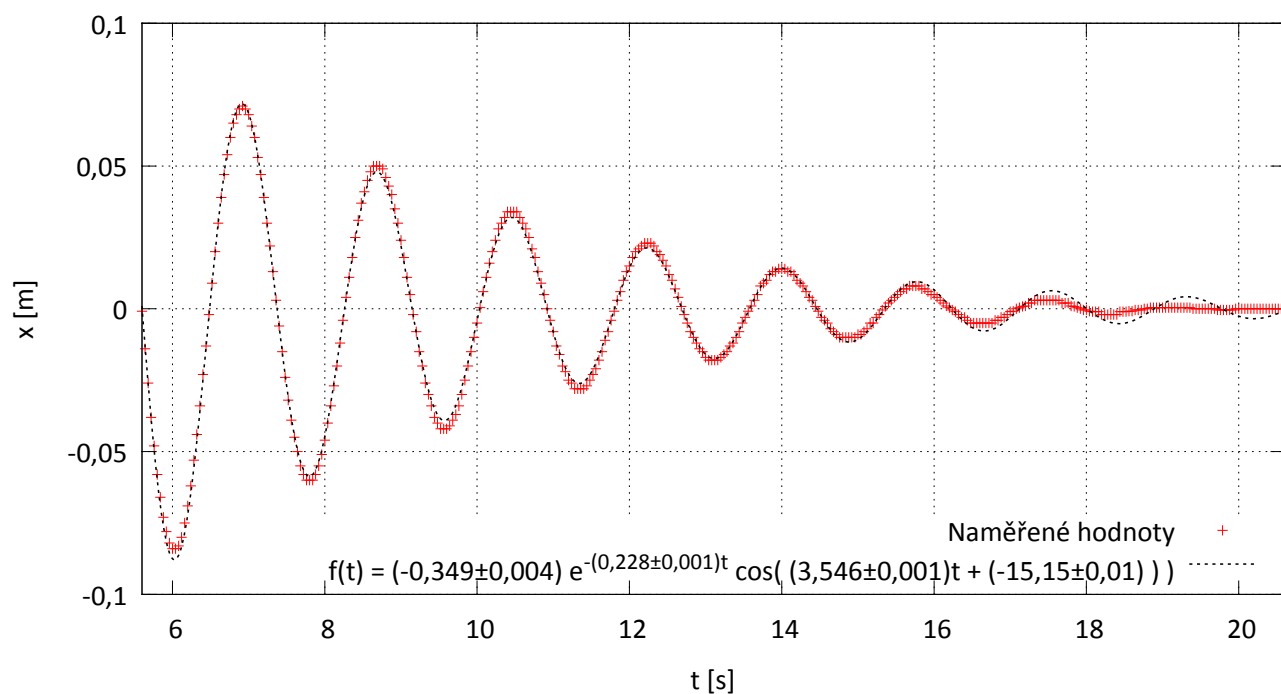
Obr. 3: Graf závislosti maximální amplitudy x na frekvenci f budící síly v okolí rezonance pro závaží o hmotnosti $m = 20$ g. Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (11).



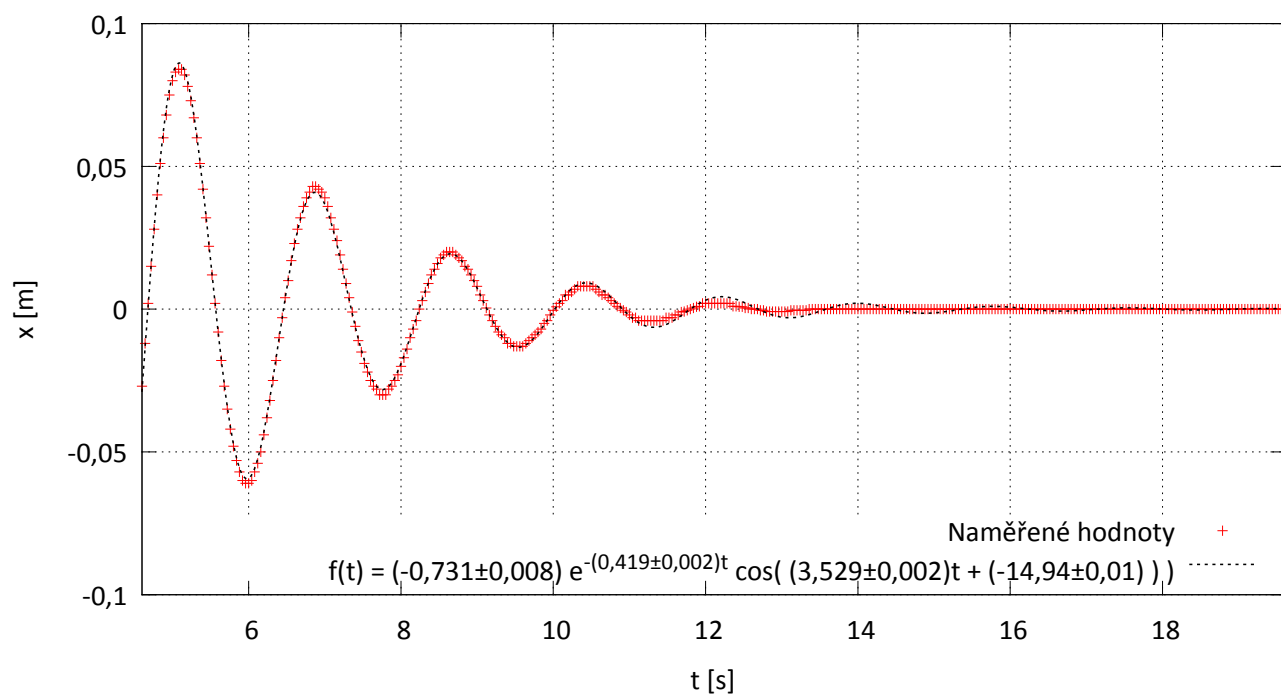
Obr. 4: Graf závislosti maximální amplitudy x na frekvenci f budící síly v okolí rezonance pro závaží o hmotnosti $m = 40$ g. Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (11).



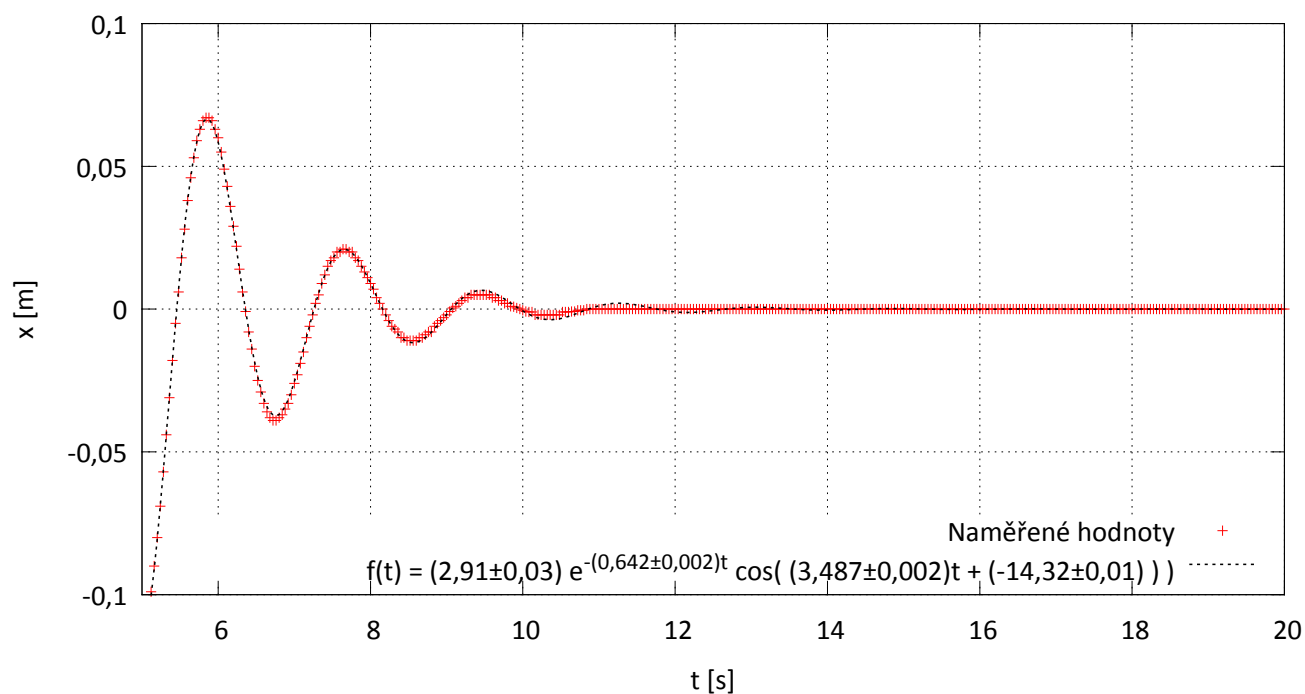
Obr. 5: Graf časového průběhu netlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



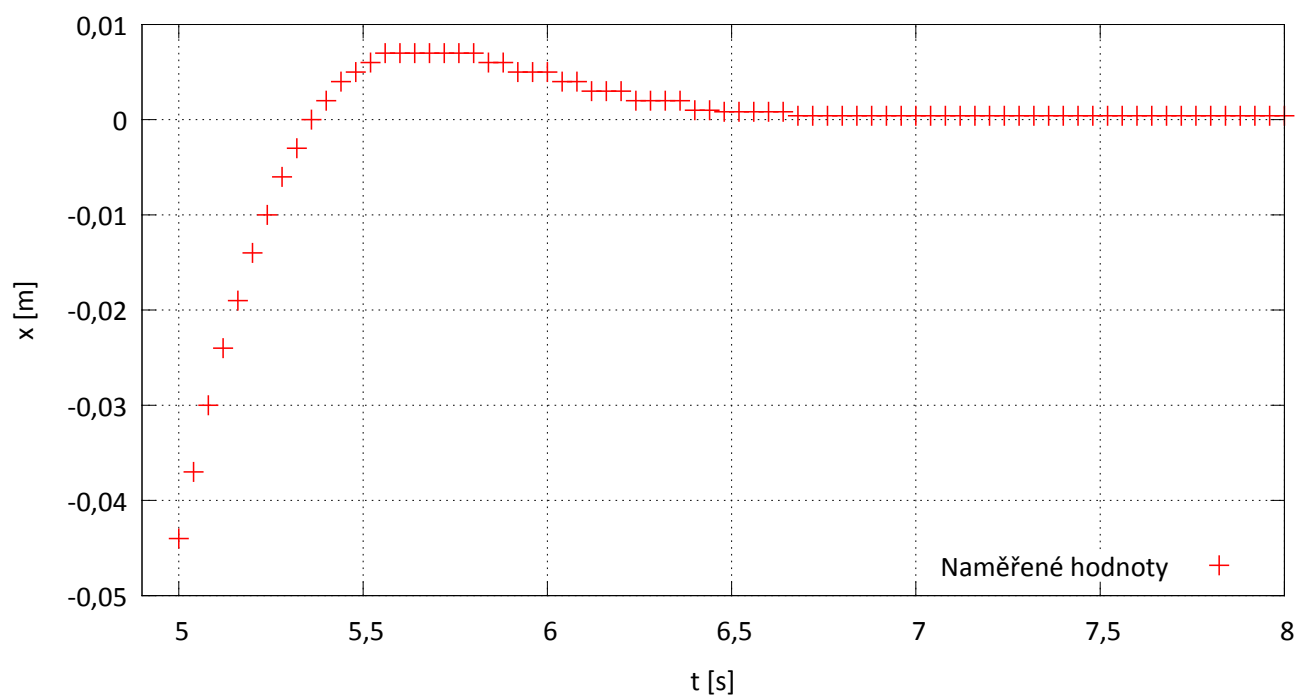
Obr. 6: Graf časového průběhu tlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g a tlumícího proudu $I = 0,4$ A; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



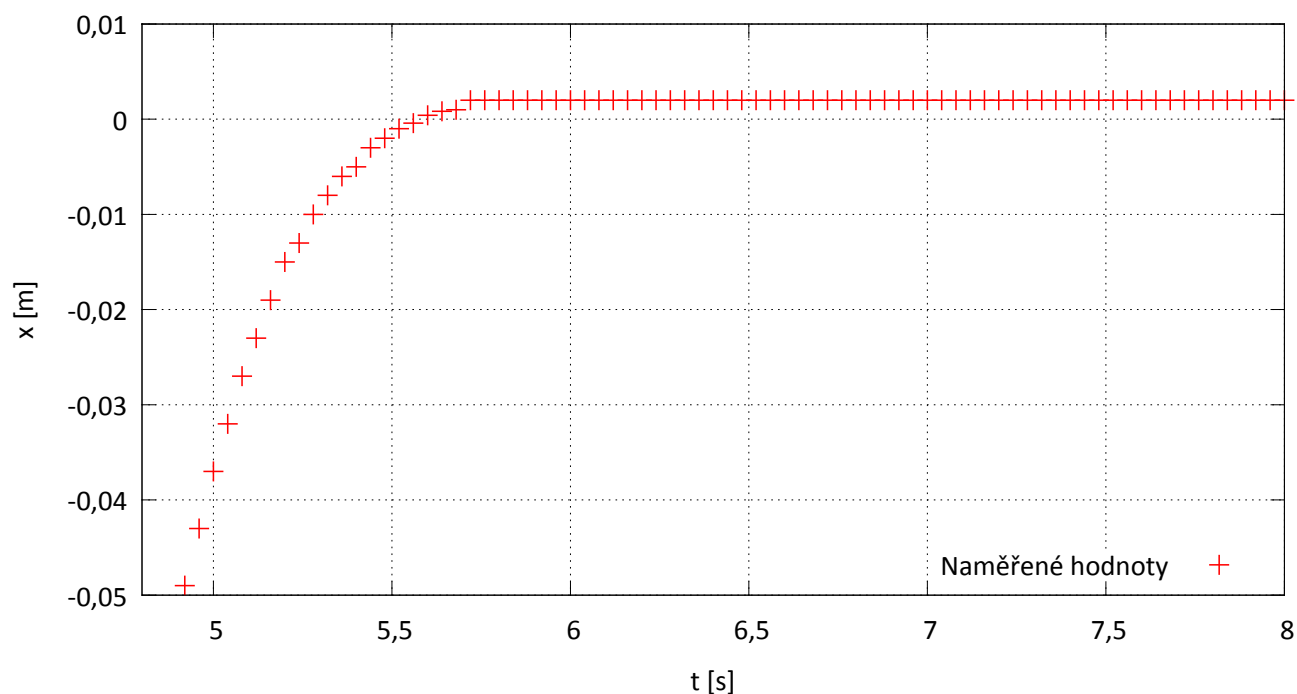
Obr. 7: Graf časového průběhu tlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g a tlumícího proudu $I = 0,6$ A; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



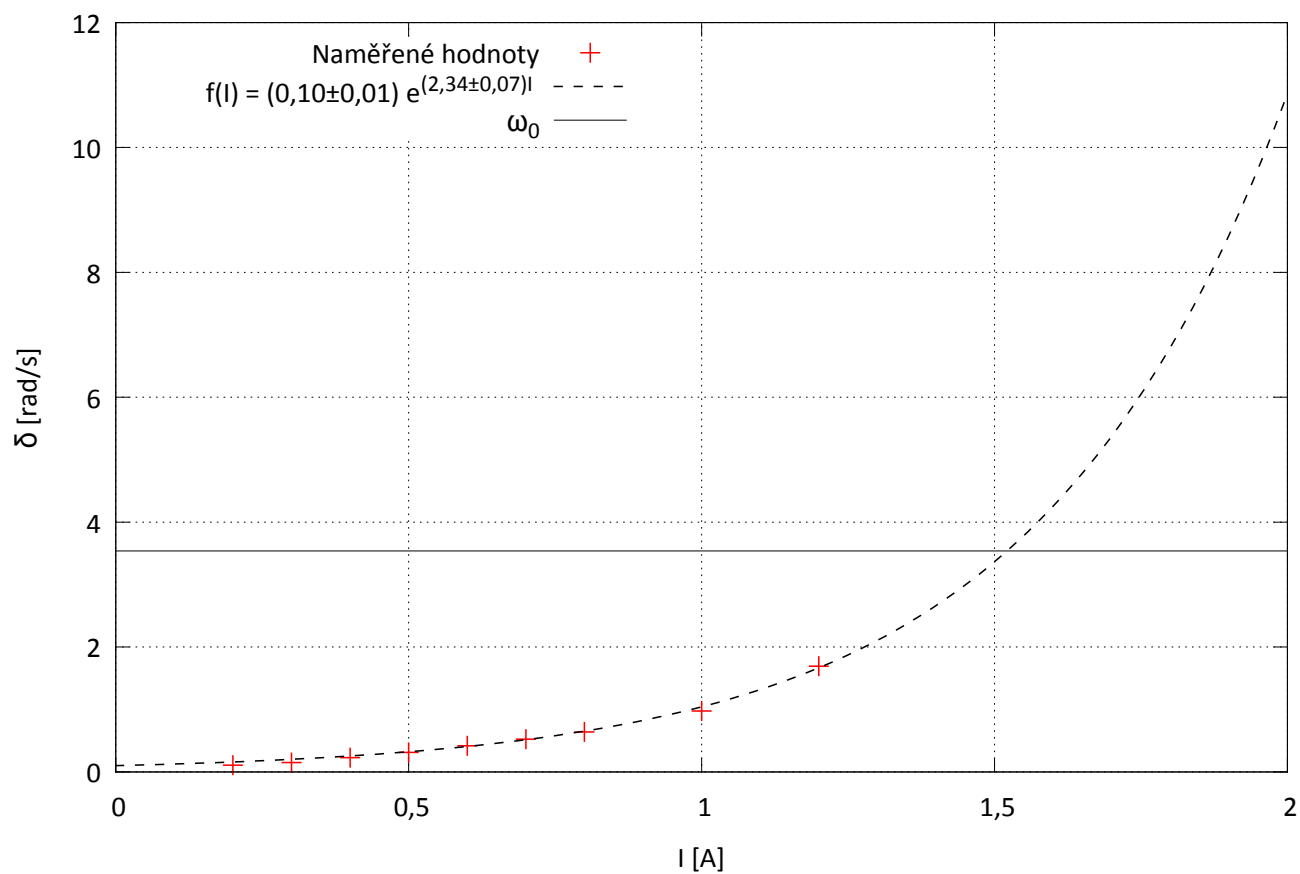
Obr. 8: Graf časového průběhu tlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g a tlumícího proudu $I = 0,8$ A; x je poloha v závislosti na čase t . Naměřené hodnoty jsme proložili podle rovnice (8).



Obr. 9: Graf časového průběhu tlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g a tlumícího proudu $I = 1,5$ A; x je poloha v závislosti na čase t .



Obr. 10: Graf časového průběhu tlumených kmitů Pohlova kyvadla pro závaží o hmotnosti $m = 10$ g a tlumícího proudu $I = 1,8$ A; x je poloha v závislosti na čase t .



Obr. 11: Graf závislosti dekrementu útlumu δ na velikosti tlumícího proudu I na cívkách Pohlova kyvadla. Naměřené hodnoty jsme proložili odpovídající funkcí.