

Fyzikální praktikum FJFI ČVUT v Praze
Mechanické pokusy na vzduchové dráze

Číslo úlohy: 3
Jméno: **Vojtěch HORNÝ**
Spolupracoval: Jaroslav Zeman
Datum měření: 30. 11. 2009
Číslo kroužku: pondělí 13:30
Číslo skupiny: 6
Klasifikace:

Zadání

1. Zjistěte, s jakou přesností jste schopni měřit v . Použijte při tom startovacího zařízení, které umožňuje udělit vozíku přesně definovanou počáteční rychlost. Naměřte pro tři různé počáteční rychlosti alespoň 30 hodnot a zkonstruujte závislost relativní a absolutní chyby rychlosti v v závislosti na velikosti rychlosti. Pokuste se popsat tuto závislost polynomem prvního nebo druhého stupně.
2. Na základě předchozího úkolu zjistěte, s jakou přesností můžete měřit hybnosti a energie (přesnost měření hmotností berete dle použitého přístroje.) Určete, jak se vámi změřené celkové hybnosti resp. energie před a po srážce mohou lišit, abyste je v rámci chyby měření mohli prohlásit za shodné.
3. Ověřte zákony zachování při předpokládané elastické srážce dvou těles na vzduchové dráze. Použijte dva vozíky různých hmotností. Jeden z nich ponechte před srážkou v klidu, druhému udělte počáteční rychlost. Proveďte experiment opakovaně, měňte hmotnosti vozíků (alespoň dvě různé kombinace hmotností) i počáteční rychlost. Celkově alespoň 60 měření. Vyneste do grafu závislosti celkové hybnosti po srážce na celkové hybnosti před srážkou a celkové energie po srážce na celkovou energii před srážkou. Proložte graf přímkou a diskutujte rozdíl směrnice k a posunu přímky q oproti ideálnímu případu $k = 1, q = 0$. Pro každou startovací rychlost zvolte události se stejnou hmotností, spočítejte průměr a směrodatnou odchylku hybnosti před a po srážce, spočítejte rozdíl a směrodatnou odchylku rozdílu. Diskutujte, zda je chyba odpovídající hodnotě určené v úkolu 2 a zda se v chybovém intervalu nachází ideální hodnota $\Delta p = 0$.
4. Ověřte zákon zachování hybnosti v situaci, kdy dvěma nehybným vozíkům je dodána energie z vnitřního zdroje (dvoutělesový rozpad). Spojte k sobě dva vozíky nití a pružinou tak, aby pružina byla pod napětím. Nit přepalte nebo přestřihněte, změřte hybnosti obou vozíků a vynesete je do grafu. Na osu x vynášejte hybnost prvního vozíku, na osu y hybnost druhého. Opakujte pokus s různými hmotnostmi vozíku a s různě napjatou pružinou. Body proložte přímkou a diskutujte rozdíl směrnice k a posunu přímky q oproti ideálnímu případu $k = -1, q = 0$. Proveďte alespoň 10 měření.
5. Pomocí tlakového senzoru změřte průběh síly při odrazu vozíku (použijte startovací systém). Vypočtete změnu hybnosti pomocí integrálu průběhu síly a srovnajte ji se změnou hybnosti změřené pohybovým senzorem. Opakujte měření pro každou startovací rychlost alespoň desetkrát. Vyneste do grafu změnu hybnosti naměřenou silovým senzorem v závislosti na změně hybnosti určené pohybovým senzorem. Body proložte přímkou a diskutujte rozdíl směrnice k a posunu přímky q oproti ideálnímu případu $k = 1, q = 0$.

Základní pojmy a vztahy

V izolované soustavě hmotných bodů platí následující zákony:

- Celková hybnost soustavy se zachovává.
- Rychlost těžiště zůstává konstantní.
- Celkový moment hybnosti se zachovává.
- Celková energie se zachovává.

První věta impulsová tvrdí, že časová změna celkové hybnosti soustavy se rovná výslednici externích sil:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}^{(e)} \quad (1)$$

Nepůsobí-li na soustavu žádná vnější síly, pak se hybnost zachovává a získáváme tvrzení zákona zachování hybnosti. Podobně časová změna celkové energie soustavy odpovídá celkovému výkonu externích sil.

$$\frac{dE}{dt} = Q^{(e)} \quad (2)$$

V izolované soustavě platí

$$E = T + U = konst. \quad (3)$$

Impuls síly je definován jako integrál a je roven rozdílu hybností.

$$\vec{I} = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = \int_{t_1}^{t_2} d\vec{p} = \vec{p}_2 - \vec{p}_1 \quad (4)$$

Vzduchová dráha snižuje působení třecí síly, kterou můžeme poté zanedbat.

Pomůcky

Vzduchová dráha s příslušenstvím, digitální váhy, 2x pohybový senzor PASCO, silový senzor PASCO, PC (DataStudio)

Postup měření

1. Pokusili jsme se vyrovnat vzduchovou dráhu tak, aby vozík na ní umístěný nesjížděl na jednu či druhou stranu. Připojili jsme pohybový senzor PASCO k počítači a na vozíku nastavili odraznou plochu kolmo na směr pohybu. Postupně jsme pro tři polohy startovní pružiny provedli po deseti měřeních závislosti polohy na čase. Směrnice lineárního fitu je pak velikost rychlosti.
3. Přidali jsme na vzduchovou dráhu i druhý vozík a nasadili na oba odrazné gumové nástavce. K počítači jsme připojili i druhý pohybový senzor. Jeden vozík jsme umístili přibližně do poloviny dráhy a druhý jsme pomocí startovního zařízení směřovali směrem k prvnímu. Měřili jsme polohu obou vozíků v závislosti polohy na čase.
4. Svázali jsme vozíky nití a vložili mezi ně pružinu. Poté jsme nit přestihli. Měřili jsme opět závislost polohy obou vozíků na čase. Měření jsme opakovali desetkrát.
5. Na vzduchovou dráhu jsme umístili jediný vozík. Vyměnili jsme pohybový senzor za senzor silový. Opakovaně jsme jej nechávali narážet vozík na silový senzor a měřili jsme závislost působící síly na čase.

Numerický model

V programu OpenOffice.org Calc jsem sestrojil model, který imituje chování hmotného bodu o hmotnosti m , na který působí síla o velikost F . Jednotlivé iterační kroky pro časový krok Δt mají tvar:

$$v_{i+1} = v_i + \frac{F}{m} \Delta t$$

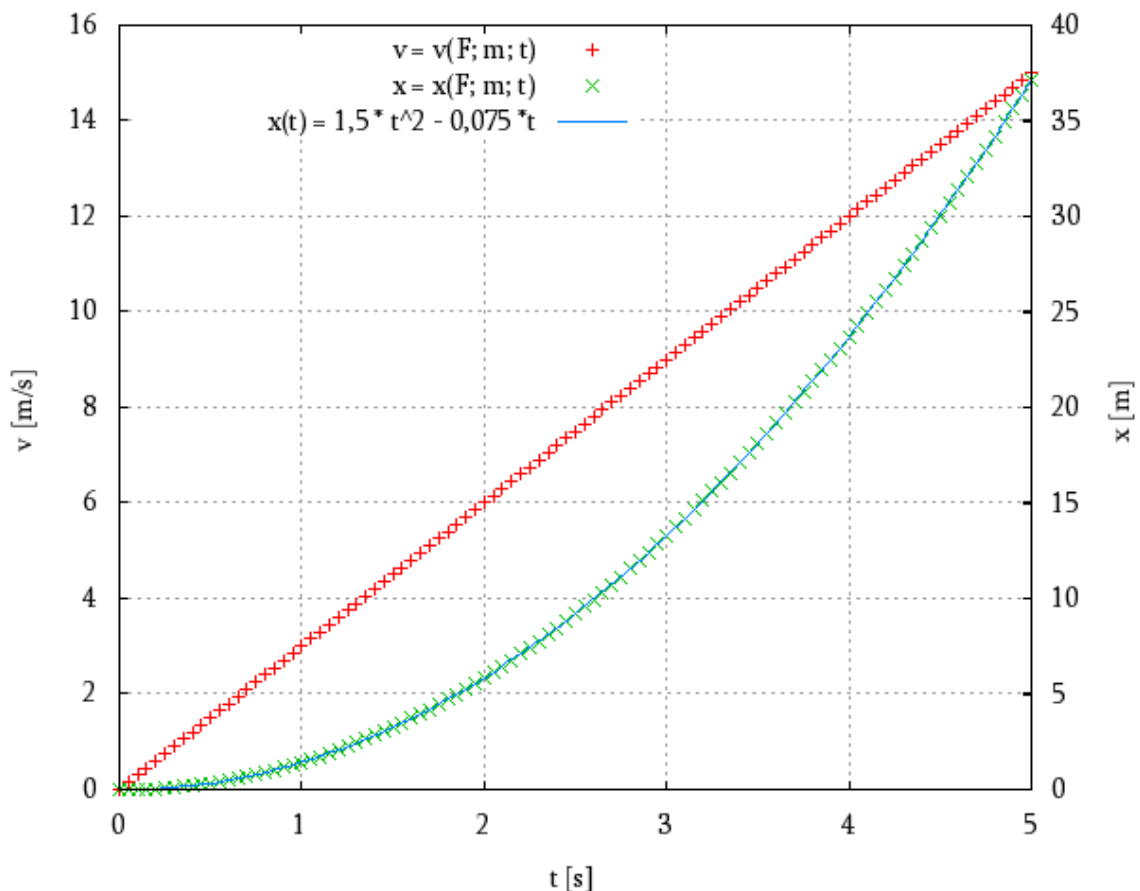
$$x_{i+1} = x_i + v_i \Delta t$$

Zvolil jsem počáteční podmínky

$$x_0 = 0\text{m}$$

$$v_0 = 0\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro hodnoty $F=1,5\text{N}$ a $m = 0,5\text{kg}$ graf 1 ukazuje nasimulované hodnoty v prvních pro prvních pět sekund. Zrychlení je konstantně rovno $3\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.



Graf 1 – Numerický model pro $F=1,5\text{N}$, $m=0,5\text{kg}$, $\Delta t=0,05\text{s}$

Závislost polohy na čase jsem proložil polynomem druhého stupně:

$$x(t) = at^2 + bt + c$$

Získal jsem funkci:

$$x(t) = 1,5t^2 - 0,075t + 0$$

Analytickým řešením ale získávám rovnici:

$$x(t) = 1,5t^2 + 0t + 0$$

Chyba modelu je úměrná $0,075t$ i násobku času.

Experimentální data a výsledky měření

Určení přesnosti měření rychlosti

Nejprve jsme určili přesnost měření rychlosti vozíku. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty rychlosti pro jednotlivé polohy spouštěcí pružiny. V první a třetí poloze je velikost chyby uspokojivá, jinak je tomu ovšem v druhém případě. Prokládat naměřené závislosti polynomem je velice pochybné (graf 2), udělal jsem to jen proto, abych vyhověl zadání úkolu.

Rychlost vozíku v jednotlivých polohách [m/s]			
	poloha 1	poloha 2	poloha 3
1	0,401	0,626	0,828
2	0,392	0,567	0,821
3	0,371	0,532	0,847
4	0,400	0,518	0,832
5	0,401	0,586	0,821
6	0,399	0,597	0,820
7	0,401	0,587	0,842
8	0,402	0,604	0,846
9	0,401	0,606	0,833
10	0,393	0,601	0,889
	0,396	0,582	0,838

$$v_1 = (3,96 \pm 0,03) dm \cdot s^{-1}$$

$$v_2 = (5,82 \pm 0,11) dm \cdot s^{-1}$$

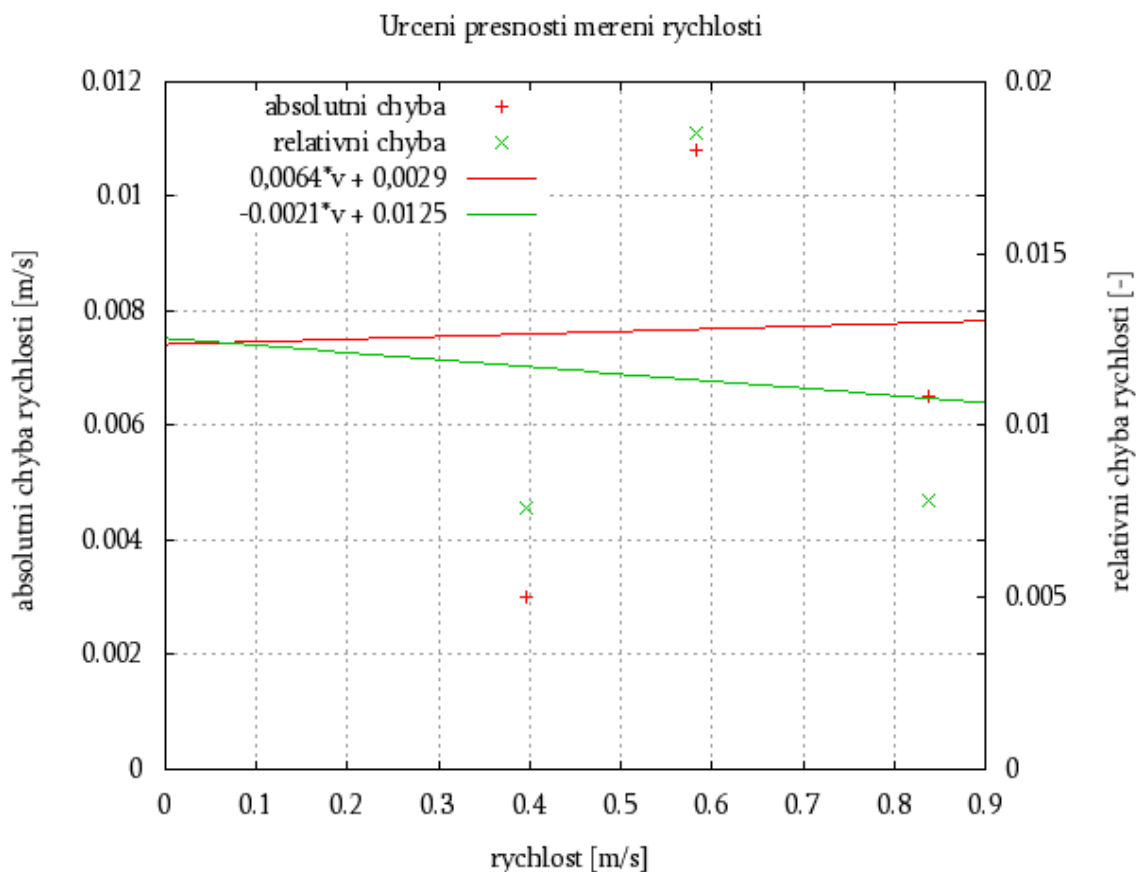
$$v_3 = (8,38 \pm 0,07) dm \cdot s^{-1}$$

$$\frac{\Delta v_1}{v_1} = 0,76\%$$

$$\frac{\Delta v_2}{v_2} = 1,85\%$$

$$\frac{\Delta v_3}{v_3} = 0,78\%$$

Tabulka 1 – Určení přesnosti měření rychlosti



Graf 2 – Určení chyby měření rychlosti

Rozhodl jsem se pro fitování naměřených závislostí přímkou. Rovnice jsou uvedeny v legendě grafu. Logicky by měla relativní chyba určení rychlosti při zvýšení rychlosti klesnout. Absolutní chyba by měla naopak přirozeně stoupnout. Naše měření to bohužel přesvědčivě nepotvrzuje. Pro naše měření jsem se rozhodl vzít chybu určení rychlosti jako 1,5%.

Chyba hybnosti a energie

Hybnost a energie se vypočítá podle vztahů

$$\vec{p} = m\vec{v}, \text{ resp. } p = mv$$

$$E = \frac{1}{2}mv^2.$$

Maximální chyba měření hmotnosti je v našem případě 0,25%. Elektrické váhy měří dle údajů na nich uvedených přesněji, ale pro stejné závaží ukazují dvě různé váhy rozdílnou hmotnost. Chyba určení hmotnosti není ale v našem případě kruciólní. Chyba určení rychlosti je totiž řádově větší.

S využitím zdroje [4] získáváme pro relativní chyby rychlosti a hybnosti vztahy

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta v}{v}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta m}{m} + 2\frac{\Delta v}{v}$$

Po dosazení pak získáváme

$$\frac{\Delta p}{p} \approx 1,75\%$$

$$\frac{\Delta E}{E} \approx 3,25\%$$

Zákon zachování hybnosti a energie

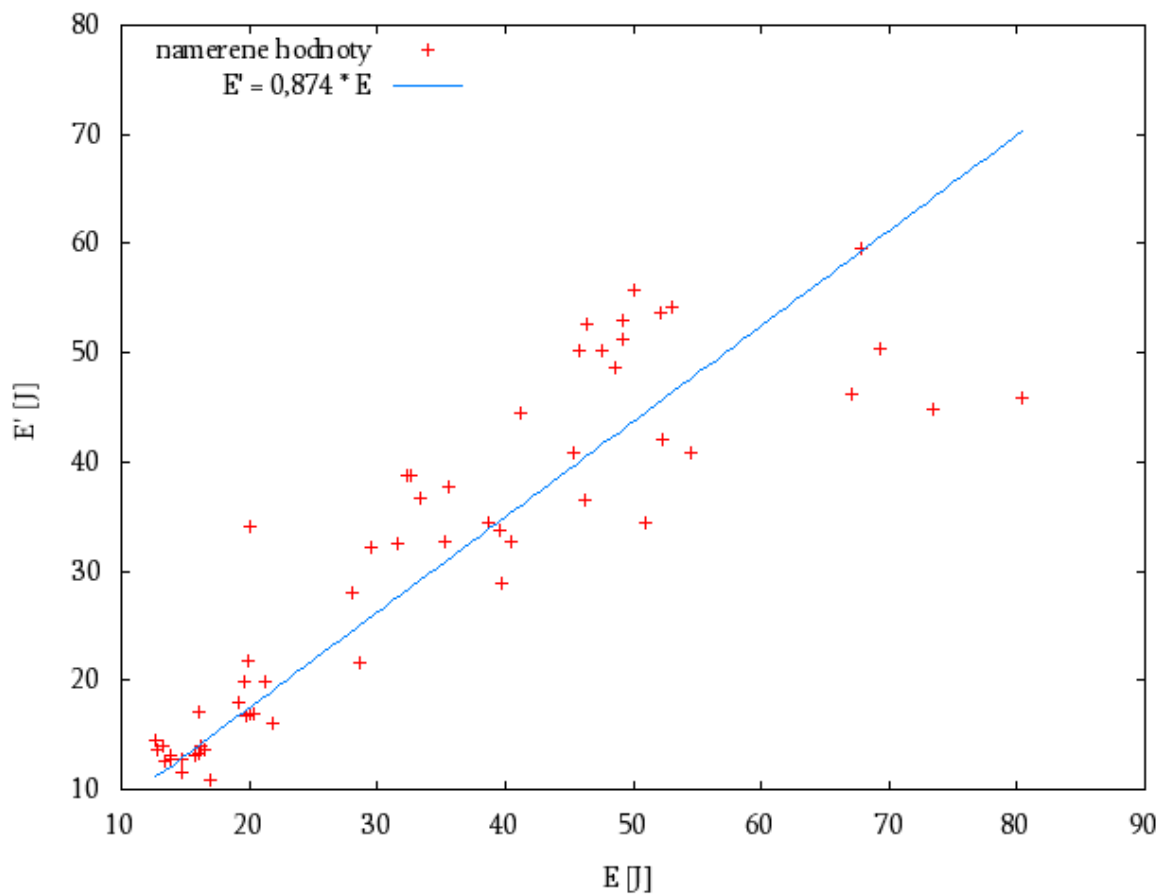
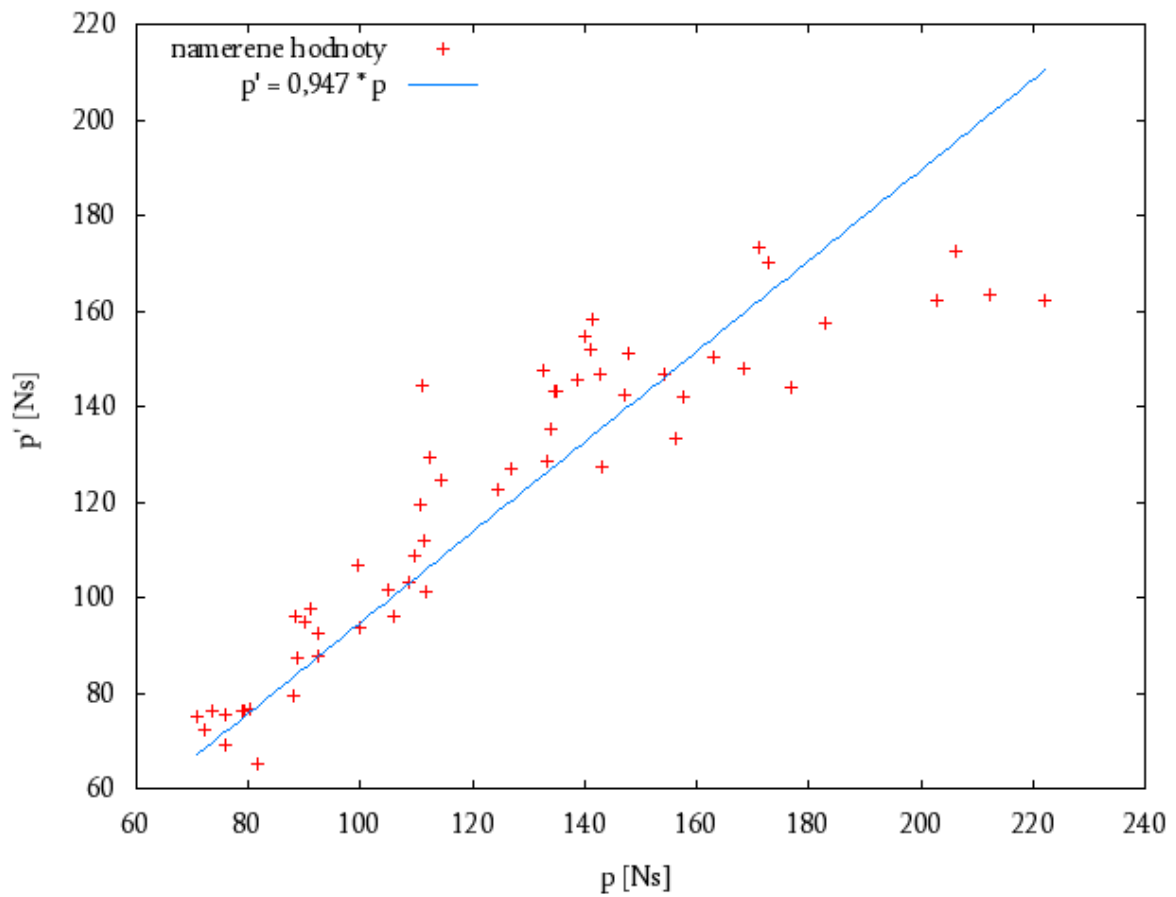
Z časových důvodů jsme naměřili pouze 56 hodnot. V prvních třiceti měřeních jsme zvolili výchozí hmotnosti $m_1=(196 \pm 0,5)\text{g}$ a $m_2=(307 \pm 0,5)\text{g}$. Ve zbývajících měřeních byly vozíčky vyměněny. Jeden vozíček jsme vždy umístili doprostřed dráhy a proti němu vysílali druhý vozíček. Naměřené hodnoty naleznete v tabulce č. 2. Písmena označená čarou představují veličiny měřené po srážce, bez čáry před srážkou.

#	v_1 [m·s ⁻¹]	v_1' [m·s ⁻¹]	v_2' [m·s ⁻¹]	p_1 [Ns]	$p_1 + p_2'$ [Ns]	E_1 [J]	$E_1 + E_2'$ [J]	p'/p	E'/E
1	0,832	-0,182	0,606	163,1	150,4	67,8	59,6	0,92	0,88
2	0,715	-0,138	0,592	140,1	154,7	50,1	55,7	1,10	1,11
3	0,735	-0,139	0,583	144,1	151,7	52,9	54,1	1,08	1,02
4	0,574	-0,115	0,494	112,5	129,1	32,3	38,8	1,15	1,20
5	0,708	-0,136	0,568	138,8	147,7	49,1	51,3	1,11	1,04
6	0,683	-0,177	0,554	133,9	135,4	45,7	50,2	1,01	1,10
7	0,648	-0,168	0,521	127,0	127,0	41,2	44,4	1,00	1,08
8	0,729	-0,157	0,578	142,9	146,7	52,1	53,7	1,03	1,03
9	0,708	-0,157	0,574	138,8	145,4	49,1	53,0	1,05	1,08
10	0,688	-0,164	0,571	134,8	143,2	46,4	52,7	1,06	1,14
11	0,583	-0,116	0,480	114,3	124,6	33,3	36,7	1,09	1,10
12	0,465	-0,061	0,357	91,1	97,6	21,2	19,9	1,07	0,94
13	0,540	-0,087	0,369	105,8	96,2	28,6	21,6	0,91	0,76
14	0,472	-0,056	0,321	92,5	87,6	21,8	16,1	0,95	0,74

15	0,375	-0,055	0,284	73,5	76,4	13,8	12,7	1,04	0,92
16	0,453	-0,068	0,327	88,8	87,2	20,1	16,9	0,98	0,84
17	0,635	-0,099	0,462	124,5	122,4	39,5	33,7	0,98	0,85
18	0,730	-0,149	0,510	143,1	127,4	52,2	42,1	0,89	0,81
19	0,680	-0,134	0,504	133,3	128,5	45,3	40,8	0,96	0,90
20	0,568	-0,131	0,448	111,3	111,9	31,6	32,5	1,00	1,03
21	0,535	-0,131	0,415	104,9	101,7	28,1	28,1	0,97	1,00
22	0,449	-0,098	0,321	88,0	79,3	19,8	16,8	0,90	0,85
23	0,404	-0,065	0,290	79,2	76,3	16,0	13,3	0,96	0,83
24	0,387	-0,062	0,285	75,9	75,4	14,7	12,8	0,99	0,88
25	0,361	-0,075	0,293	70,8	75,2	12,8	13,7	1,06	1,08
26	0,369	-0,072	0,281	72,3	72,2	13,3	12,6	1,00	0,95
27	0,410	-0,069	0,293	80,4	76,5	16,5	13,6	0,95	0,83
28	0,416	-0,074	0,259	81,5	65,0	17,0	10,8	0,80	0,64
29	0,387	-0,067	0,268	75,9	69,1	14,7	11,5	0,91	0,78
30	0,402	-0,063	0,289	78,8	76,4	15,8	13,2	0,97	0,83
31	0,288	0,074	0,374	88,4	96,0	12,7	14,5	1,09	1,14
32	0,360	0,098	0,456	110,5	119,3	19,9	21,8	1,08	1,10
33	0,324	0,092	0,401	99,5	106,7	16,1	17,0	1,07	1,06
34	0,481	0,105	0,607	147,7	151,2	35,5	37,8	1,02	1,06
35	0,361	0,103	0,575	110,8	144,3	20,0	34,0	1,30	1,70
36	0,439	0,112	0,556	134,8	143,4	29,6	32,2	1,06	1,09
37	0,461	0,126	0,609	141,5	158,0	32,6	38,8	1,12	1,19
38	0,557	0,117	0,700	171,0	173,1	47,6	50,1	1,01	1,05
39	0,563	0,113	0,690	172,8	169,9	48,7	48,6	0,98	1,00
40	0,596	0,111	0,630	183,0	157,6	54,5	40,8	0,86	0,75
41	0,357	0,073	0,440	109,6	108,7	19,6	19,8	0,99	1,01
42	0,293	0,075	0,366	90,0	94,7	13,2	14,0	1,05	1,06
43	0,479	0,105	0,562	147,1	142,4	35,2	32,6	0,97	0,93
44	0,509	0,096	0,529	156,3	133,2	39,8	28,8	0,85	0,73
45	0,672	0,114	0,702	206,3	172,6	69,3	50,3	0,84	0,73
46	0,724	0,099	0,673	222,3	162,3	80,5	45,9	0,73	0,57
47	0,661	0,096	0,676	202,9	162,0	67,1	46,2	0,80	0,69
48	0,692	0,109	0,662	212,4	163,2	73,5	44,8	0,77	0,61
49	0,576	0,099	0,580	176,8	144,1	50,9	34,5	0,81	0,68
50	0,549	0,100	0,598	168,5	147,9	46,3	36,6	0,88	0,79
51	0,325	0,069	0,369	99,8	93,5	16,2	14,1	0,94	0,87
52	0,354	0,069	0,419	108,7	103,3	19,2	17,9	0,95	0,93
53	0,364	0,071	0,406	111,7	101,3	20,3	16,9	0,91	0,83
54	0,502	0,110	0,577	154,1	146,9	38,7	34,5	0,95	0,89
55	0,513	0,103	0,563	157,5	142,0	40,4	32,7	0,90	0,81
56	0,301	0,075	0,354	92,4	92,3	13,9	13,1	1,00	0,94
								0,980	0,936

Tabulka 2 – ověření zákona zachování hybnosti a energie při konfiguraci:

1. $m_1=(196\pm 0,5)\text{g}$, $m_2=(307\pm 0,5)\text{g}$ v měřeních 1 – 30
2. $m_1=(307\pm 0,5)\text{g}$, $m_2=(196\pm 0,5)\text{g}$ v měřeních 31 – 56



Grafy 3 a 4 – Závislosti celkové hybnosti, resp. energie, po srážce na celkové hybnosti, resp. energii, před srážkou

V některých případech jsme naměřili vyšší hybnost po srážce (např. měření 4, 10), jindy se příliš mnoho hybnosti ztratilo (např. měření 28). Graf 3, resp. 4, ukazuje závislost celkové hybnosti, resp. energie, po srážce na hodnotách před srážkou. Data jsem fitoval závislostí $x' = kx$. Tato závislost se ukázala pro účel fitování vhodnější než závislost $x' = kx + q$. Hodnota q , která by měla mít pouze regulační charakter a která by měla být vůči naměřeným hodnotám zanedbatelná, totiž dosahovala nesmyslně vysokých hodnot, například v případě hybnosti $q=55,07$. To by znamenalo, že nehybné vozíky by po „srážce“ dosáhly hybnosti 55Ns, což nedává fyzikálně smysl. Naopak přímky uvedené v legendách grafů jsou věrohodné.

Můžeme si všimnout, že při vyšších hodnotách rychlosti se naměřené body nacházejí pod regresní přímkou. Při vyšších rychlostech se tedy ztrácelo více hybnosti i energie. Všimnul jsem si, že po srážce ve vyšších rychlostech původně nehybný vozík mírně nadskočil a při dopadu zpět na dráhu se o ni jemně otřel. Tuto skutečnost jsme zaznamenali i v grafu závislost polohy na čase během měření. Na krátký okamžik se rychlost malinko skokově zmenšila, po chvíli ale opět vzrostla.

Rychlost průměrně klesla o 2,0%, energie o 4,6%. Je to o něco více, než by se dalo vysvětlit chybou měření. Přesto to ale není ztráta velká. Je třeba si uvědomit, že ačkoli se tření minimalizuje, přesto vliv odporových sil zcela nevymizí. Vzhledem k tomuto tedy můžeme považovat zákony zachování hybnosti a energie za *experimentálně ověřené*.

Dvoutělesový rozpad

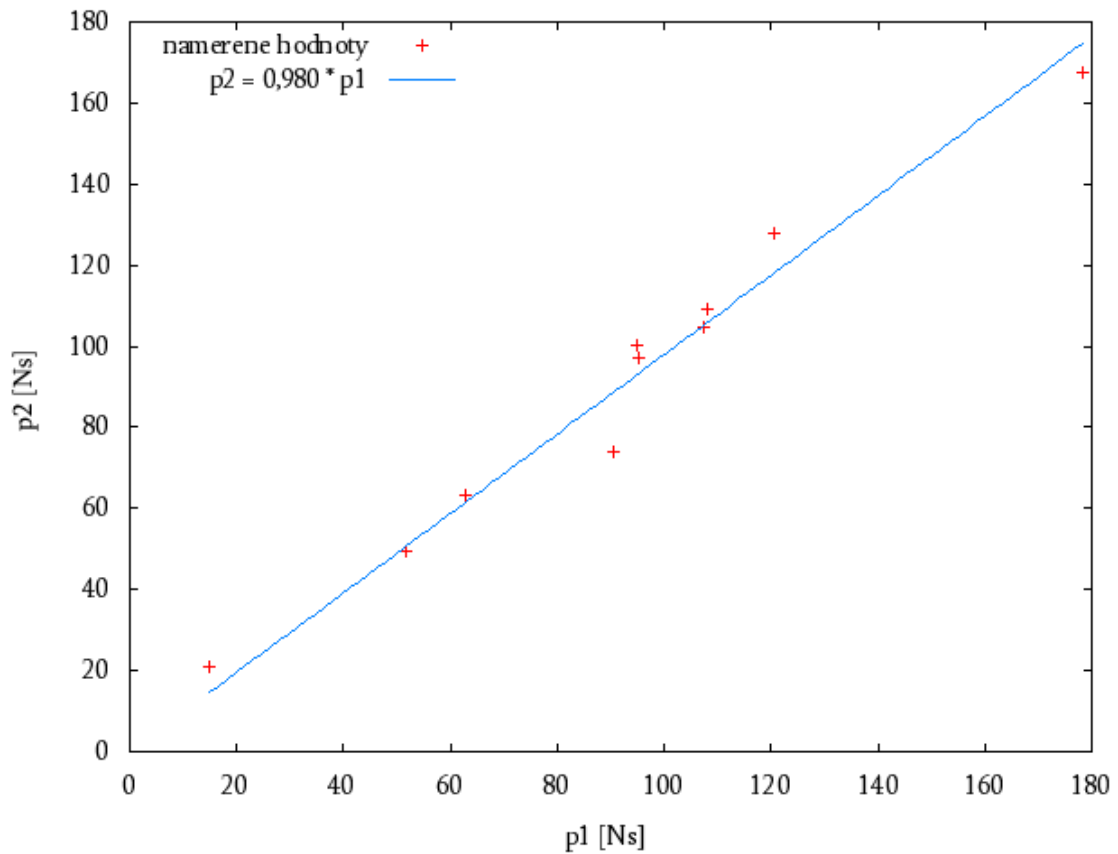
V tabulce 3 jsou vedeny naměřené hodnoty pro dvoutělesový rozpad. Měřili jsme s vozíky o hmotnostech $m_1=(307 \pm 0,5)\text{g}$ a $m_2=(196 \pm 0,5)\text{g}$. Experimenty jsme prováděli pro různě napnutou pružinu.

#	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	p_1 [Ns]	p_2 [Ns]	p_2/p_1
1	0,05	0,11	14,83	20,78	1,40
2	0,30	0,38	90,57	74,09	0,82
3	0,35	0,53	107,45	104,66	0,97
4	0,31	0,51	94,86	100,16	1,06
5	0,21	0,32	62,94	63,11	1,00
6	0,39	0,65	120,65	127,79	1,06
7	0,31	0,50	95,17	97,02	1,02
8	0,17	0,25	51,58	49,39	0,96
9	0,35	0,56	108,06	108,98	1,01
10	0,58	0,86	178,37	167,58	0,94

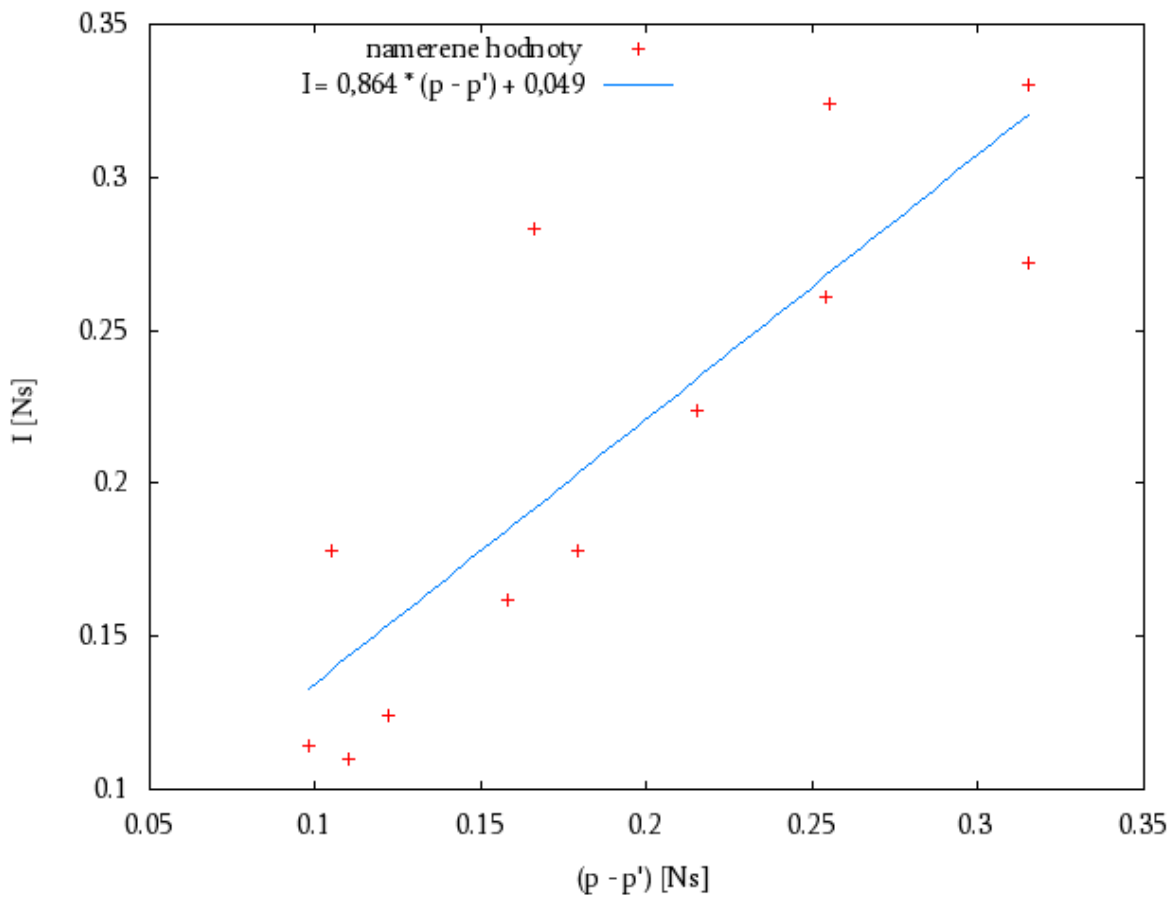
Tabulka 3 – Dvoutělesový rozpad

Graficky zpracované hodnoty jsou znázorněny v grafu 5. Fitovací závislost jsem opět zvolil $p_2 = kp_1$ opět ze stejných důvodů. Hodnota směrnice je 0,980, což leží v povolené oblasti.

Zákon zachování hybnosti při dvoutělesovém rozpadu byl tedy potvrzen.



Graf 5 – poměr hybností dvou vozíků při dvoutělesovém rozpadu



Graf 6 – Závislost impulsu síly na rozdílu hybností před srážkou a po srážce

Impuls síly

V posledním úkolu jsme srovnali naměřenou hodnotu impulsu síly a rozdíl hybností před a po srážce. Naměřená data jsou uvedena v tabulce 4 a graficky v grafu 6. Impuls síly jsem počítal jako obsah plochy pod křivkou závislosti $I = I(t)$ v programu OpenOffice.org Calc. Bohužel jsme stihli naměřit pouze 12 hodnot.

Prokládat tuto závislost je opět velice pochybné. Vztah, který metodou nejmenších čtverců vyšel, je na první pohled velice uspokojivý. Nicméně nemůžeme stanovit relevantní závěr, protože měření proběhlo příliš málo. Rozptyl naměřených hodnot je velice vysoký.

#	v [m/s]	v' [m/s]	p [Ns]	p' [Ns]	p - p' [Ns]	I [Ns]	I / (p - p')
1	0,701	0,099	0,139	0,020	0,158	0,162	1,025
2	1,070	0,211	0,212	0,042	0,254	0,261	1,028
3	1,300	0,290	0,257	0,057	0,315	0,330	1,047
4	0,644	0,196	0,128	0,039	0,166	0,283	1,700
5	0,395	0,136	0,078	0,027	0,105	0,178	1,689
6	0,378	0,116	0,075	0,023	0,098	0,114	1,169
7	0,935	0,355	0,185	0,070	0,255	0,324	1,268
8	1,170	0,423	0,232	0,084	0,315	0,272	0,864
9	0,668	0,236	0,132	0,047	0,179	0,178	0,993
10	0,784	0,302	0,155	0,060	0,215	0,224	1,041
12	0,399	0,157	0,079	0,031	0,110	0,110	0,997

Tabulka 4 – Impuls síly jako rozdíl hybností

Závěr

Naším cílem bylo ověřit zákony zachování pro volný pohyb hmotného bodu bez působení odporových sil, k čemuž měla dopomoci vzduchová dráha, po které se hmotné body pohybovali.

Numerický model

Sestrojil jsem numerický model pro pohyb hmotného bodu při působení konstantní síly. Využil jsem iterační metody, kdy jsem ze znalosti hodnot velikosti rychlosti a okamžité polohy v čase t_i vypočítal rychlost a polohu v čase t_{i+1} . Chyba pro určení polohy v závislosti na čase je v případě počátečních podmínek $x(0)=0\text{m}$, $v(0)=0\text{m/s}$, $F=1,5\text{N}$ a $m=0,5\text{kg}$ úměrná $0,075t_i$ násobku času.

Určení přesnosti měření rychlosti

Provedl jsem celkem třicet měření závislosti polohy na čase pro tři různé polohy spouštěcí pružiny. Vypočítal jsem relativní a absolutní chybu každé sady měření. Získané závislosti nejdou smysluplně proložit polynomem do druhého stupně.

Pro účel dalšího měření jsem určil relativní chybu měření rychlosti na 1,5%.

Určení přesnosti měření rychlosti a energie

Hybnost jsme určovali s přesností 1,75% a energii s přesností 3,25%.

Zákon zachování hybnosti a energie

Z důvodu časové nouze jsme provedli pouze 56 měření, nikoli požadovaných 60. Měření jsme prováděli pro dvě konfigurace hmotností a pro různé počáteční rychlosti prvního vozíku. Druhý vozík byl zpočátku v klidu.

Naměřené závislosti $p'(p)$ a $E'(E)$ jsou znázorněny v grafech 3 a 4. Metodou nejmenších čtverců jsem je proložil funkcemi:

$$p' = 0,947p$$
$$E' = 0,874E$$

Je tedy patrné, že během srážky dochází k ztrátě hybnosti i energie. Vzduchová dráha dokonale neeliminuje vliv třecí síly, zvláště krátce po srážce jsem pozoroval tření vozíku o dráhu. Dále patrně nemůžeme považovat srážku za dokonale pružnou. S ohledem na chybu měření a na ztráty považuji tedy zákony zachování hybnosti i celkové energie za experimentálně ověřené, ačkoli změny hybnosti a energie nejsou v odvozeném intervalu.

Dvoutělesový rozpad

Potvrdili jsme zákon zachování hybnosti při dvoutělesovém rozpadu. Naměřili jsme deset hodnot pro různě stlačenou pružinu. Poměr hybností jednoho vozíku vůči druhému je 98:100, jak plyne z grafu 5.

Impuls síly

Pro patnáct případů jsme naměřili hybnost před a po náraze do silového senzoru polohovým senzorem a také impuls síly jako obsah plochy pod grafem $F(t)$. Výsledky tohoto měření nejsou uspokojivé, přestože lze proložit závislost I na Δp přímkou

$$I = 0,864\Delta p + 0,049,$$

což znamená významnou ztrátu hybnosti při nárazu. Patrně byla hybnosti předána stojanu. Chyba mohla být částečně způsobena také nepřesností silového senzoru.

Použitá literatura

- [1] **FJFI ČVUT**, *Vzduchová dráha – ZZE, srážky, impuls síly* [online], [cit. 5. prosince 2009], <http://fyzika.fjfi.cvut.cz/Praktika/VzdDraha/vzduchPRA.pdf>
- [2] **Feynmann, R. P., Leighton, R. B., Sands, M.**, *Feynmannovy přednášky z fyziky 1*, Havlíčkův Brod: Fragment, 2001
- [3] **Štoll, I., Tolar J.**, *Teoretická fyzika, Praha*: Vydavatelství ČVUT, 1999
- [4] **FJFI ČVUT**, *Chyby měření a zpracování naměřených výsledků* [online], [cit. 25. listopadu 2009], <http://praktika.fjfi.cvut.cz/ProvPokyny/chybynav/CHYBY1n.pdf>