

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**



*Tomáš Wilke*

*Pokusy se vzduchovou dráhou*

*Katedra didaktiky fyziky*

Vedoucí diplomové práce: *doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D.*

Studijní program: *Fyzika, učitelství fyziky v kombinaci s druhým aprobačním oborem pro SŠ*

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce *doc. RNDr. Zdeňku Drozdovi, Ph.D.* za trpělivost a hlavně ochotu zodpovídat veškeré moje dotazy. Dále pak *Ing. Ludvíkovi Němcovi* za pomoc při technických problémech a za umožnění přístupu do laboratoře praktika školních pokusů a tím možnost pracovat na mé diplomové práci.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne *14. 4. 2009*

*Tomáš Wilke*



## Obsah

1	Úvod a cíle diplomové práce.....	6
2	Praktikum školních pokusů .....	7
2.1	Seznámení se vzduchovou dráhou .....	8
2.2	Rovnoměrný přímočarý pohyb.....	19
2.2.1	Rovnoměrný přímočarý pohyb - zadání.....	19
2.2.2	Rovnoměrný přímočarý pohyb - vypracování .....	21
2.3	Demonstrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu.....	28
2.3.1	Demonstrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu - zadání.....	28
2.3.2	Demonstrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu - vypracování .....	31
2.4	Ověření II. Newtonova zákona .....	35
2.4.1	Ověření II. Newtonova zákona - zadání .....	35
2.4.2	Ověření II. Newtonova zákona - vypracování.....	37
2.5	Pohyb po nakloněné rovině .....	54
2.5.1	Pohyb po nakloněné rovině - zadání .....	54
2.5.2	Pohyb po nakloněné rovině - vypracování.....	56
2.6	Tryskový vozík .....	68
2.6.1	Tryskový vozík - zadání .....	68
2.6.2	Tryskový vozík - vypracování.....	71
2.7	Pružná srážka dvou vozíků .....	76
2.7.1	Pružná srážka dvou vozíků - zadání .....	76
2.7.2	Pružná srážka dvou vozíků - vypracování.....	78
2.8.	Nepružná srážka dvou vozíků.....	82
2.8.1	Nepružná srážka dvou vozíků - zadání .....	82
2.8.2	Nepružná srážka dvou vozíků - vypracování .....	84
2.9	Zákon zachování hybnosti.....	87
2.9.1	Zákon zachování hybnosti - zadání.....	87
2.9.2	Zákon zachování hybnosti - vypracování .....	89
2.10	Měření rychlosti diabolky .....	90
2.10.1	Měření rychlosti diabolky - zadání.....	90
2.10.2	Měření rychlosti diabolky - vypracování.....	92
2.11	Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil .....	93
2.11.1	Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil - zadání .....	93

2.11.2	Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil -vypracování.....	96
2.12	Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil .....	99
2.12.1	Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil - zadání .....	99
2.12.2	Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil - vypracování.....	102
2.13	Moment setrvačnosti disků.....	105
2.13.1	Moment setrvačnosti disků - zadání.....	105
2.13.2	Moment setrvačnosti disků - vypracování .....	108
2.14	Moment setrvačnosti.....	111
2.14.1	Moment setrvačnosti – zadání .....	111
2.14.2	Moment setrvačnosti - vypracování .....	113
2.15	Ověření Steinerovy věty.....	117
2.15.1	Ověření Steinerovy věty - zadání.....	117
2.15.2	Ověření Steinerovy věty - vypracování .....	119
3	Hodnocení vzduchové dráhy, jako didaktické pomůcky.....	121
4	Video praktika .....	122
5	Závěr .....	124
6	Použitá literatura .....	125

Název práce: *Pokusy se vzduchovou dráhou*

Autor: *Tomáš Wilke*

Katedra (ústav): *Katedra didaktiky fyziky*

Vedoucí diplomové práce: *doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D.*

e-mail vedoucího: *[Zdenek.Drozd@mff.cuni.cz](mailto:Zdenek.Drozd@mff.cuni.cz)*

*Abstrakt: Diplomová práce obsahuje návody k úlohám pro Praktikum školních pokusů I a pro Výběrová praktika školních pokusů. Jedná se o kompletní sadu úloh. Patří sem úlohy studující jevy na lineární vzduchové dráze. Jedná se o rovnoměrný přímočarý pohyb, rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, ověření 2 Newtonova zákona, pohyb po nakloněné rovině téměř bez tření, pružné srážky, nepružné srážky a jejich využití, zákon zachování hybnosti, zrychlený přímočarý pohyb. Další úlohy jsou zaměřeny na jevy na rotační vzduchové dráze. Jedná se o rovnoměrný kruhový pohyb, rovnoměrně zrychlený kruhový pohyb a experimenty momentem setrvačnosti. Úvodní seznamuje čtenáře se složením, ovládním a manipulací se vzduchovou dráhou a čítačem. Každá úloha obsahuje návod a schémata nutná k měření. Diplomová práce dále obsahuje ukázkové vypracování daných úloh včetně grafů, teorie s danou úlohou spojené a didaktických poznámek k měření. V další části je řešena problematika možnosti natočení a kompletace video pokusů, které by umožňovaly virtuální měření. Taktéž je zde uvedeno hodnocení soupravy vzduchové dráhy jako didaktické pomůcky a možnosti jejího využití při výuce fyziky.*

*Klíčová slova: Vzduchová dráha, praktikum školních pokusů, školní pokusy, demonstrační experimenty*

Title: *Experiments with air track*

Author: *Tomáš Wilke*

Department: *Department of physics education*

Supervisor: *doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D.*

Supervisor's e-mail *[Zdenek.Drozd@mff.cuni.cz](mailto:Zdenek.Drozd@mff.cuni.cz)*

*Abstract: The aim of this diploma thesis is to draw up an instruction manual that includes the set of instructions how various experiments with school air track may be performed and how to obtain new findings obtained by the analysis of these experiments. The manual should be used as the supported tutorial material intended for the practicum Practical school experiments I and facultative practicum Practical school experiments III and IV. The design of both, the linear air track and the rotating air track, is described. The diploma thesis deals with fundamental school physics experiments as for instance study of the linear uniform motion, uniformly accelerated motion, verification of the Newton's first and second laws, Newton's third law of motion, measurement of the velocity of the projectile, study of the elastic and inelastic collisions, angular velocity, angular acceleration, rotation with constant angular acceleration, measurement of moment of inertia and so on. Tentative examples of the experiments and their elaboration are shown as the part of diploma thesis. The application of the air track in the physics teaching is discussed.*

*Keywords: Air Track, Practical School Experiments, Physics Teaching*

# 1 Úvod a cíle diplomové práce

Náplní této diplomové práce je dle zadání prozkoumat problematiku soupravy vzduchové dráhy od firmy Phywe. Sestavit úplnou sadu pokusů, které by se dala na této dráze demonstrovat. Popsat metodiku k těmto úlohám, tak aby je bylo možno využít při výuce budoucích učitelů na matematicko-fyzikální fakultě v kurzech praktikum školních pokusů a výběrová školní praktika.

K tomuto vede hlavně absence českého návodu k této soupravě, dále pak možnosti rozšíření či zpestření o další netradiční nebo dosud nezařazené úlohy. Úlohy by pak mohly sloužit posluchačům učitelského studia k prohloubení látky, či jako námět, do jejich budoucí praxe.

U těchto úloh se vždy pokusím co možná nejjednodušeji popsat danou problematiku, tak aby bylo možno naměřit či prokázat danou závislost, či fyzikální jev. Není však cílem zde plně vysvětlovat teoretickou podstatu jevů, jelikož je očekávána od studentů jistá minimální příprava a tudíž znalost problematiky daného jevu.

Dále bude diplomová práce obsahovat podrobně proměřené úlohy, aby byla možnost srovnání. Proměření úloh je důležité také pro odhad jejich časové náročnosti, přínosu pro studenta a doporučení zásad, kterými se řídit. Jedná se hlavně o zásady bezpečnostní či případné typy pro měření tak, aby student snadno dospěl k cíli úlohy a nezdržoval se zbytečně proměřováním částí rozsahu, který by pro danou úlohu neměl ani smysl.

Dalším cílem je prověření možnosti sestavení online či video materiálů, věnovaného experimentům se vzduchovou drahou. Pokud to bude možné sestavit a vyhotovit takovou sadu výukových materiálů, které by mohly sloužit, ať již pro samostudium nebo jako doplňkový materiál pro výuku fyziky. Tyto materiály by měly obsahovat video nahrávky v dostatečném spektru pokusů tak, aby pokud to bude možné, obsáhly co možná nejširší oblast jevů, které lze na vzduchové dráze demonstrovat.

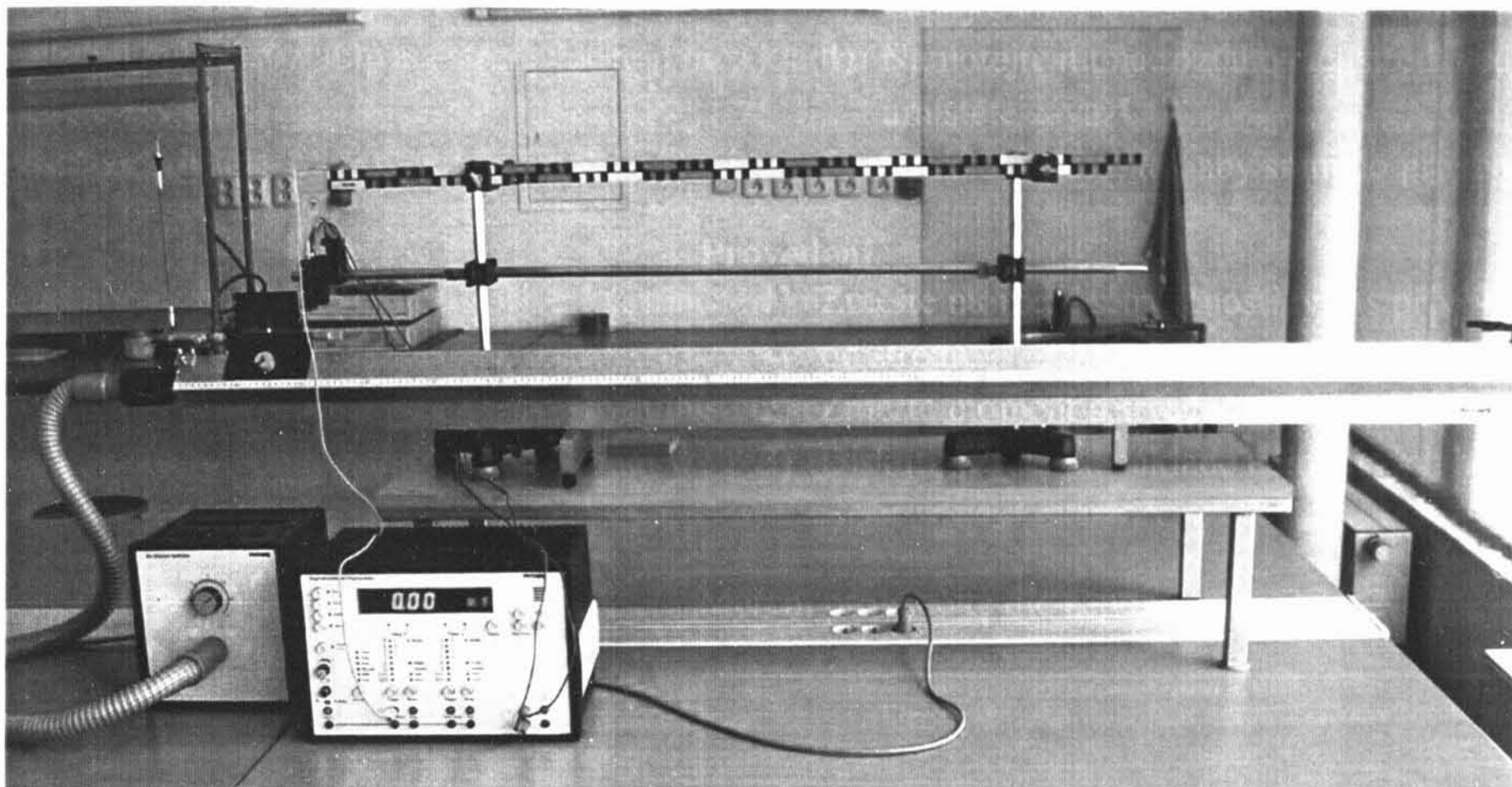
Jako malou kapitolu zde také lze zmínit hodnocení vzduchové dráhy, jako didaktické pomůcky. Zde budou uvedeny převážně subjektivní pocity, které jsem po práci se vzduchovou získal.

## 2 Praktikum školních pokusů

V této části diplomové práce je uvedena sada úloh pro praktikum školních pokusů a výběrová praktika na matematicko-fyzikální fakultě univerzity Karlovy. Tyto předměty jsou určeny budoucím učitelům matematiky a fyziky. Ve zpracování úloh tedy počítám s jistou znalostí problematiky, které se příslušná úloha věnuje.

Jsou zde zmíněny úlohy různé náročnosti, ať již časové z důvodu, že obsahují velké množství měřených dat, případně co se týče složitosti. U každé úlohy je vždy uveden stručný návod, jak úlohu vypracovat, včetně schémat. Každá úloha obsahuje seznam klíčových slov, která by měl posluchač před začátkem práce na úloze znát alespoň zevrubně.

## 2.1 Seznámení se vzduchovou dráhou

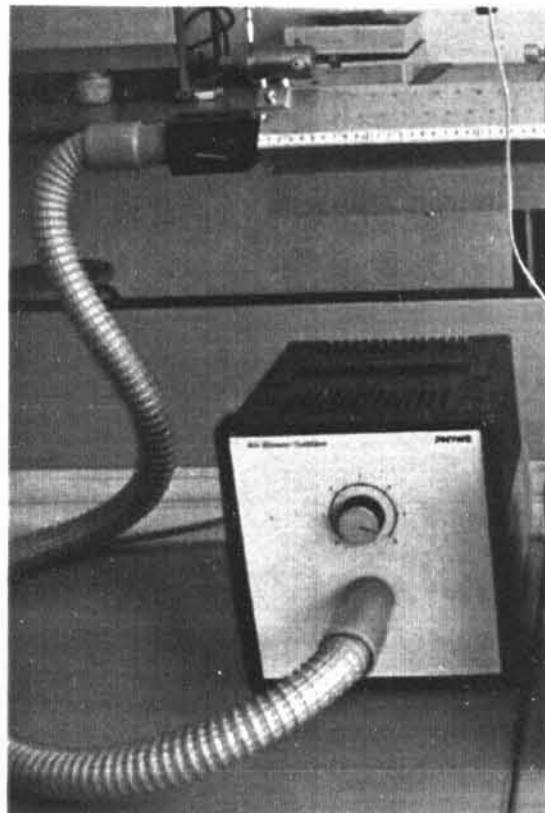


Obr. 2.1-1 Lineární vzduchová dráha

Při praktiku školních pokusů se používá vzduchová dráha s příslušenstvím od firmy Phywe. Tato dráha se skládá z několika částí. Lineární vzduchové dráhy, ke studiu přímočarých pohybů, rotační dráhy, ke studiu rotačních pohybů, čítače s měřicími čidly, dmychadla a příslušenství nutné k měření.



## Dmychadlo



2.1-2 Dmychadlo

Dmychadlo je zdrojem vzduchu pro vzduchové dráhy. Vzduch, který je vyprodukován, slouží k zmírnění tření na vzduchové dráze.

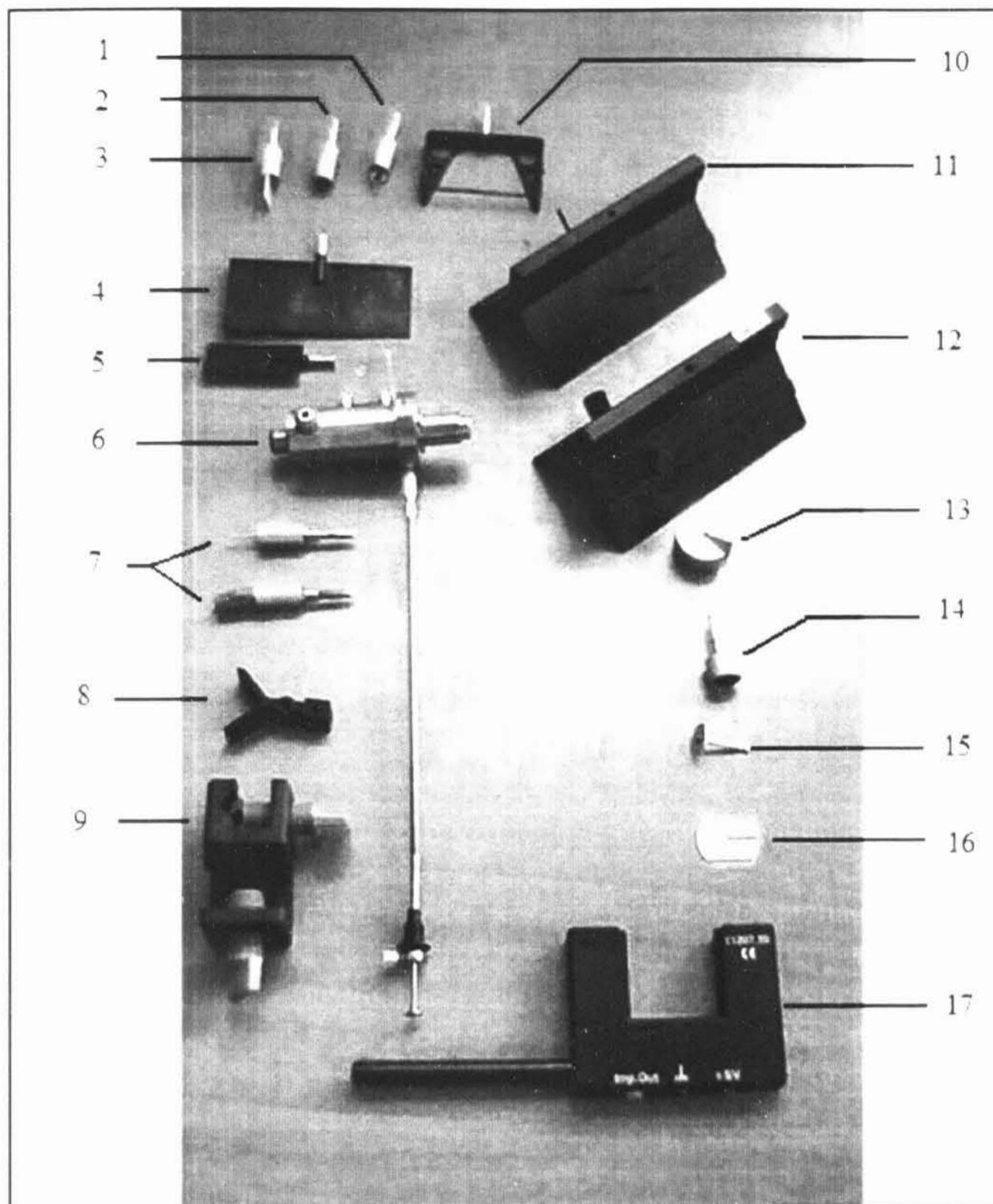
Dmychadlo zapojte do elektrické sítě a zapněte vypínačem na zadní straně. Vzduch ved'te pomocí ohebné trubice ke vzduchové dráze, kde trubici příslušně připojte. Před začátkem měření se vždy ujistěte, že trubice je volně průchozí.

Během měření lze regulovat množství vzduchu ovladačem vpředu. S ovladačem otáčejte pozvolna, aby nedošlo k poškození dmychadla. V případě, že dmychadlo nereaguje, požádejte vyučujícího o kontrolu pojistky.

### **Lineární vzduchová dráha**

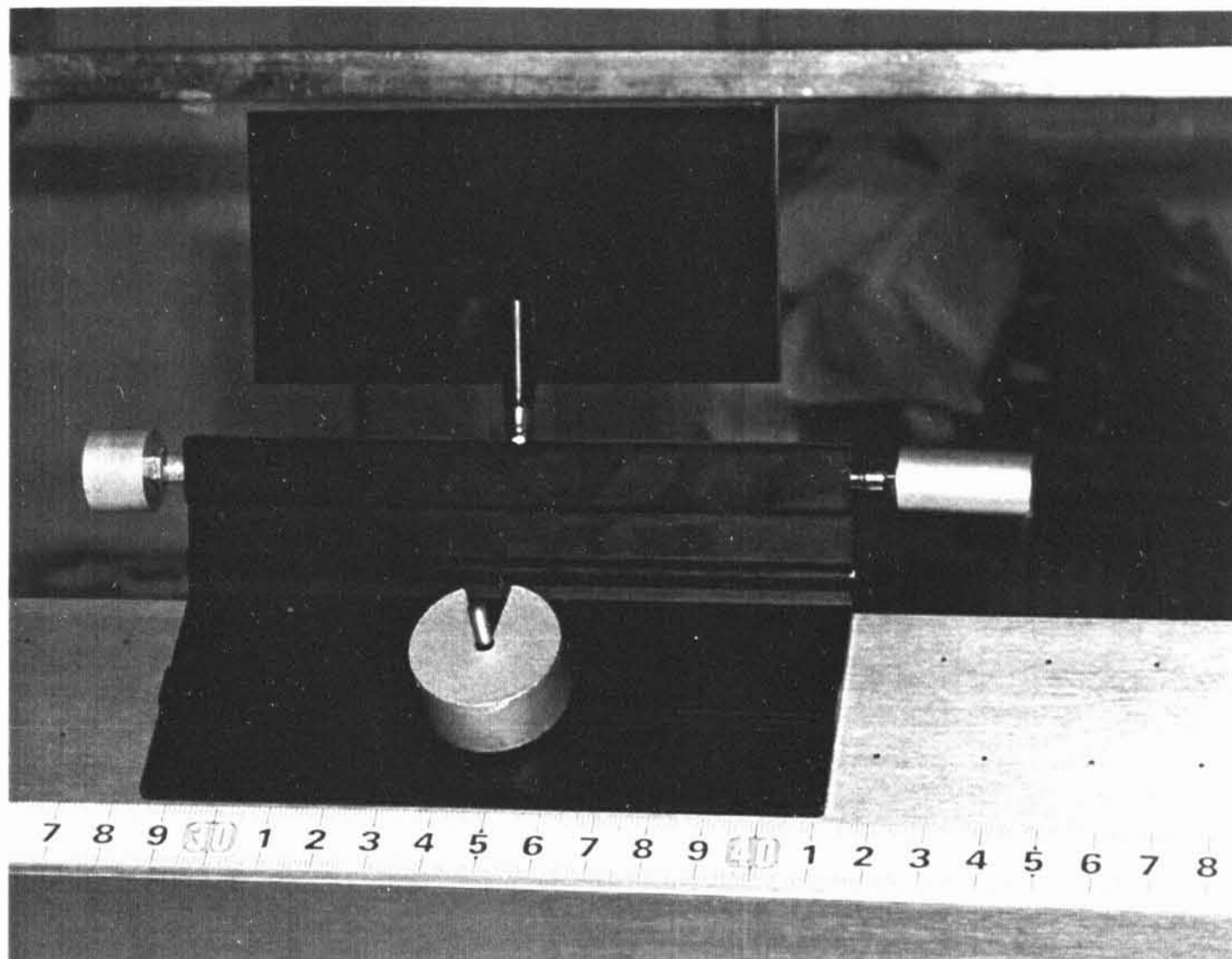
Lineární vzduchová dráha je hliníkový odlitek s otvory. Otvory je vyfukován vzduch, který vytváří vzduchový polštář pod vozíkem. Díky tomuto polštáři je tedy pohyb vozíku téměř bez tření. Lineární vzduchová dráha je umístěna na nastavitelných nohách, které umožňují její vyrovnávání do vodorovné pozice. K lineární vzduchové dráze je přiloženo množství příslušenství.

## Příslušenství lineární vzduchové dráhy



Obr. 2.1-3 Příslušenství lineární vzduchové dráhy

- (1) nástavec s háčkem
- (2) váleček s plastelínou
- (3) plochý nástavec
- (4) křídélko 10cm
- (5) křídélko 2cm
- (6) startovací zařízení
- (7) jehlový nástavec (s korkovým krytem)
- (8) koncová zarážka
- (9) upínací držák
- (10) nástavec s gumou
- (11) vozík
- (12) tryskový vozík
- (13) závaží 50 g
- (14) magnetická přichytka
- (15) držák závaží
- (16) závaží 1 g
- (17) měřicí čidlo



Obr. 2.1-4 Vozík pro lineární vzduchovou dráhu

Vozík pro vzduchovou dráhu je vybaven pěti zdírkami, pro připevnění dalších komponentů (křídélka, magnetické příchytky ...). Dále je zde možnost připevnění závaží po stranách vozíku. Závaží umístěte na vozík vždy symetricky, tak aby byl vyvážen. V případě nevyvážení, by mohlo docházet k nežádoucímu tření při pohybu na vzduchové dráze.

### Tryskový vozík

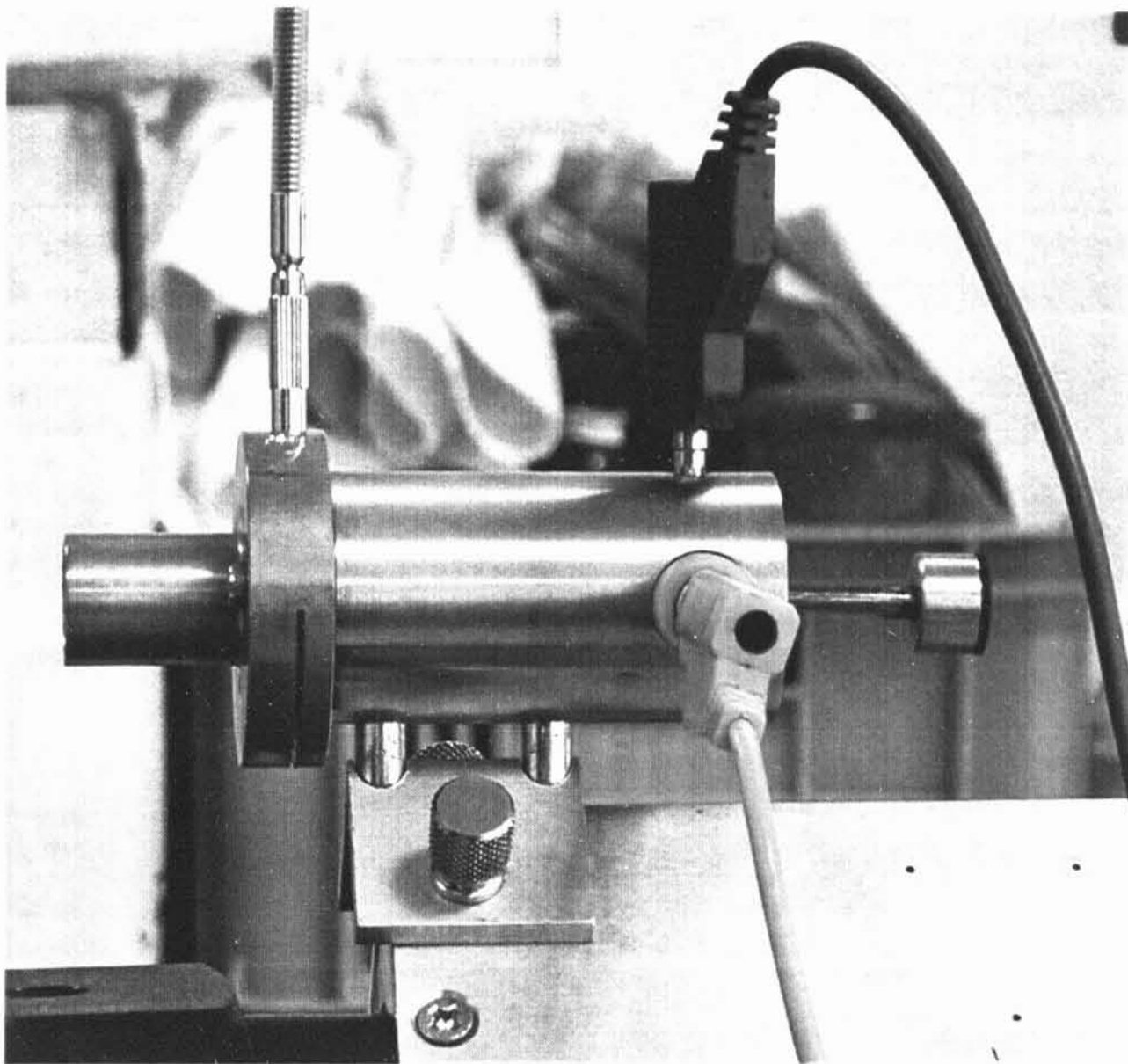
Tryskový vozík je součástí sady vzduchové dráhy. Má na sobě možnost nastavení výfuku, který tento vozík pohání. Je zde možnost nastavení dvou velikostí výfukových otvorů. Při měření je nutno mít nastaveny vždy shodné výfukové otvory na obou stranách vozíku.

### Závaží a držák závaží

Součástí sady pro vzduchovou dráhu jsou různé druhy závaží. Plíšky vážící 1 g, závaží 10 g, závaží 50 g. Držák závaží slouží k připevnění závaží na nit, jeho hmotnost je 1 g.

### Příslušenství vozíku

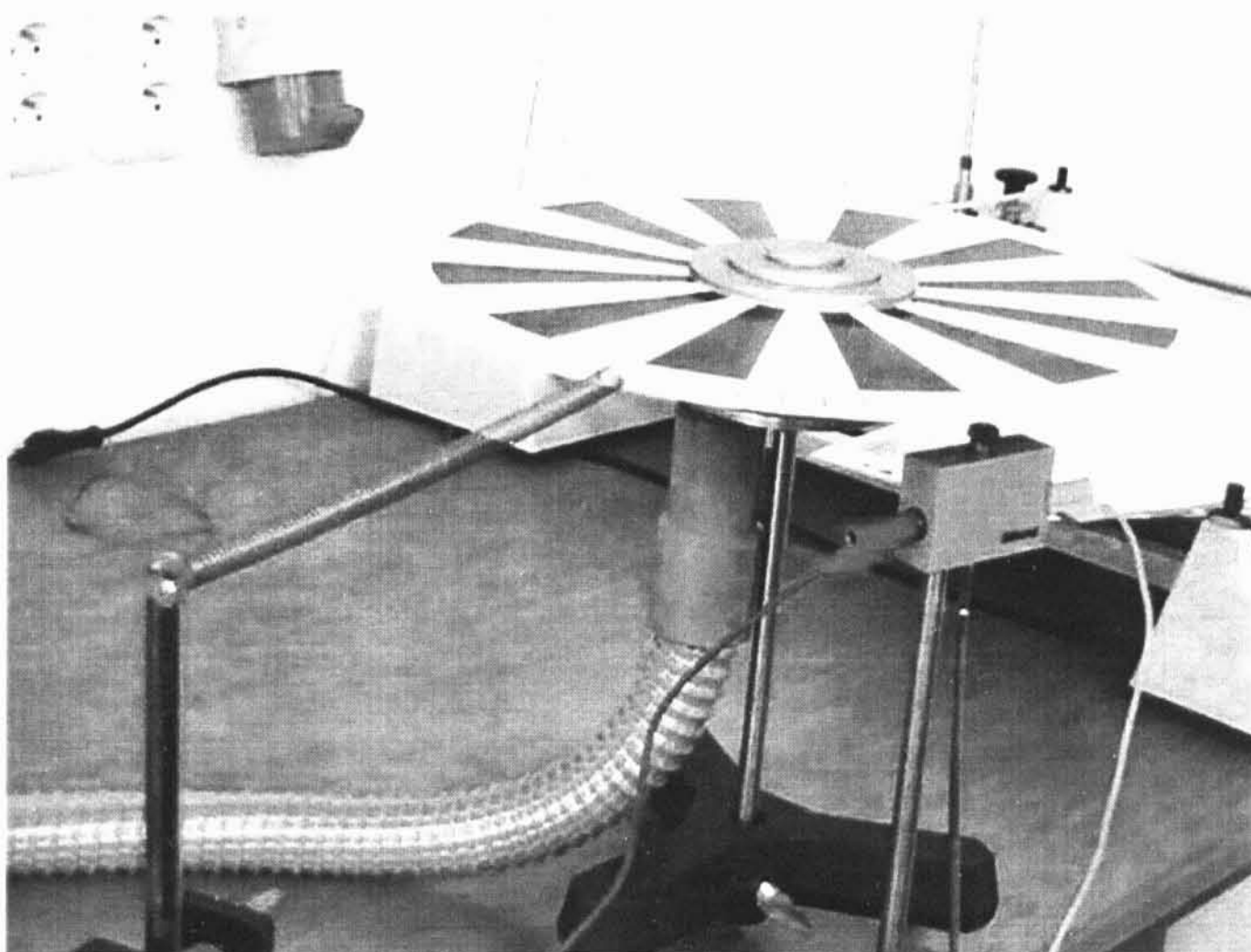
Příslušenstvím vozíku rozumíme komponenty, které na něj lze připevnit. Jsou to nástavec s háčkem, váleček s plastelínou, plochý nástavec, nástavec s gumou, jehlový nástavec. Křídélka o rozměrech 2 cm nebo 10 cm, která se připevní do svrchního otvoru vozíku. Některé z komponentů lze připevnit i do koncové zářezky dle potřeb měření.



Obr 2.1-5 Startovací zařízení

Startovací zařízení připevníte pomocí dvou šroubů na konec vzduchové dráhy. Připevnění lze volit dle potřeb měření. První možnost je připevnění startovacího zařízení jakožto zdroje počátečního impulsu. Druhá možnost je využití jako nezávislého uvolnění. Startovací zařízení ovládejte pomocí ohebné spouště. Spoušť lze utažením šroubu zaaretovat.

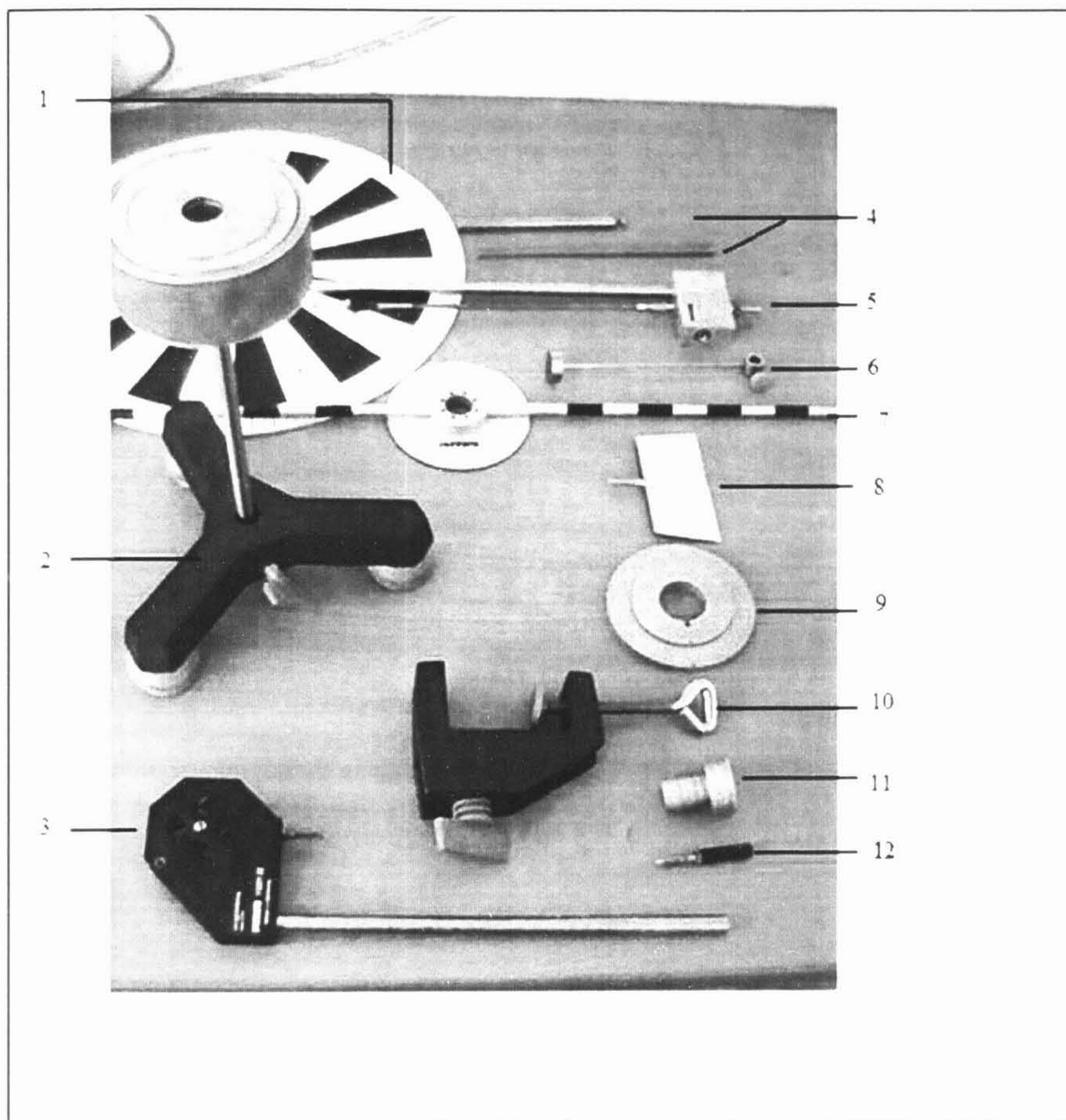
### Rotační vzduchová dráha



Obr 2.1-6 Rotační vzduchová dráha

Rotační vzduchová dráha je tvořena válcem se středovým otvorem, v jehož obvodové štěrbině a v jeho středu je vyfukován vzduch, tak aby při otáčení nedocházelo ke tření. Rotační vzduchová dráha je umístěna na tyči do stojanu s možností trojbodého vyrovnání polohy.

### Příslušenství rotační vzduchové dráhy



Obr. 2.1-7 Příslušenství rotační vzduchové dráhy

- (1) disk
- (2) rotační vzduchová dráha
- (3) kladka
- (4) pružina a držák pružiny
- (5) startovací zařízení
- (6) přívěšek
- (7) tyč
- (8) křidélko
- (9) roztahovací střed
- (10) upínací držák
- (11) střed
- (12) protizávaží

## **Disk**

Disk je kruhová deska s po obvodu vyznačenou úhlovou stupnicí.

## **Startovací zařízení**

Startovací zařízení pevně ukotvíte do držáku a pomocí držáku k desce stolu. Startovací zařízení je vybaveno bodcem, který se po zmáčknutí ohebné spouště vysune. Bodec se používá k přidržení a pozdějšímu odstartování disku, nebo tyče s přívěsky. V případě použití s diskem bodec zasunujte do kruhového otvoru v disku.

## **Detekční křídélka**

Součástí rotační vzduchové dráhy jsou dvě detekční křídélka (v dalším textu budu používat místy i zkrácený název křídélko). Křídélko pro použití na disku, které se připevňuje do zářezu na okraji disku. Křídélko pro tyč s přívěsky se zasunuje nakonec tyče, vždy v kombinaci s protizávažím.

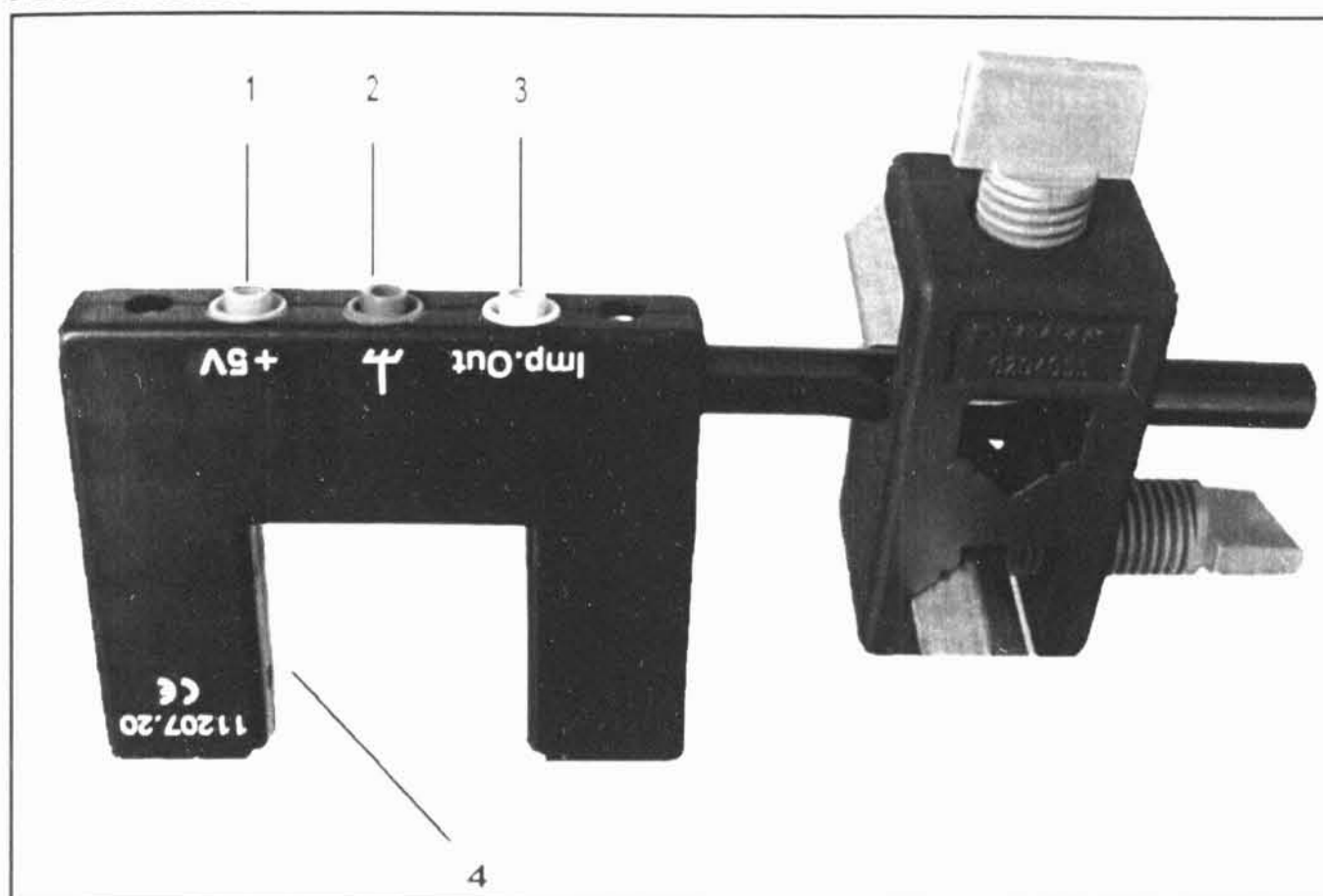
## **Tyč s přívěsky**

Tyč s přívěsky umístěte na rotační vzduchovou dráhu obdobně jako disk. Přívěsky upevněte pomocí šroubů. Přívěsky lze zatížit pomocí závaží. Přívěsky umístějte tak, aby byla tyč vyvážená.

## **Ostatní komponenty**

Střed s roztahovacím středem ukotvuje disk (případně tyč) na vzduchové dráze. Dále je možno pomocí něho a nitě disk (případně tyč) roztahovat. Držák pružiny a pružina sloužící k vytvoření počátečního momentu. Kladka s malým valivým odporem, sloužící k vedení nitě se závažím.

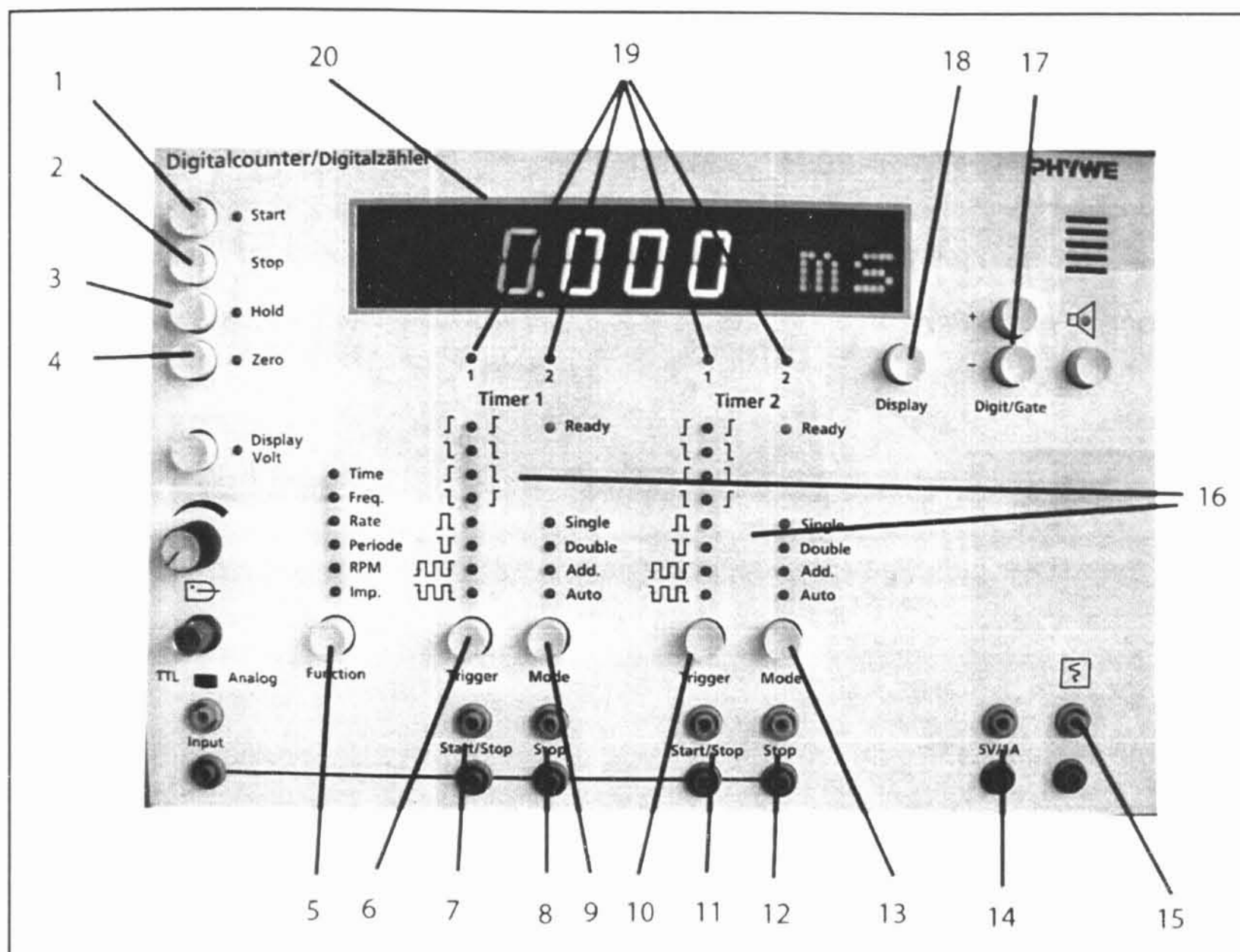
## Měřicí čidla



Obr. 2.1-8 Měřicí čidlo

- (1) napájení +5 V
- (2) napájení - 5 V
- (3) výstup
- (4) snímací čidlo

Měřicí čidla jsou světelné závory, které lze připojit k čítači. Snímací čidlo je umístěno dle obr. 2.1-8. Měřicí čidla zapojujte dle schémat pro danou úlohu. Jako měřicí čidlo lze též použít i startovací zařízení.



Obr. 2.1-9 Čítač

Čítač zapojte do síťové zásuvky a zapněte vypínačem umístěným na zadní straně. Zapojení měřicích čidel provádíme do příslušných zdírek dle popisu.

- (1) spuštění měření
- (2) zastavení měření
- (3) podržení hodnoty (v případě nastavení Auto)
- (4) vynulování
- (5) nastavení funkce
- (6) nastavení druhu snímání prvního časovače
- (7), (8) vstupní zdíčky prvního časovače
- (9) nastavení modu prvního časovače
- (10) nastavení druhu snímání druhého časovače
- (11), (12) vstupní zdíčky druhého časovače
- (13) nastavení druhu snímání druhého časovače
- (14), (15) výstup zdroje napájení
- (16) zobrazení aktuálního nastavení
- (17) přepínání rozsahu
- (18) přepínání mezi naměřenými hodnotami
- (19) indikátor časovače
- (20) display



## Nastavení čítače

### Nastavení Trigger

(1)



Toto nastavení se užívá při zapojení dvou čidel do zdiřek, spouštěcí (start) a vypínací (stop) – přičemž zapnutí i vypnutí časomíry způsobí opětovný průchod světla (změna při opuštění stínítka čidla).

(2)



Toto nastavení se užívá při zapojení dvou čidel do zdiřek, spouštěcí (start) a vypínací (stop) – přičemž zapnutí i vypnutí časomíry způsobí přerušování průchodu světla (změna při vstupu stínítka do čidla).

(3)



Toto nastavení se užívá při zapojení dvou čidel do zdiřek, spouštěcí (start) a vypínací (stop) – přičemž zapnutí časomíry způsobí opětovný průchod světla (změna při opuštění stínítka čidla) a vypnutí časomíry způsobí přerušování průchodu světla (změna při vstupu stínítka do čidla).

(6)



Toto nastavení se užívá při zapojení dvou čidel do zdiřek, spouštěcí (start) a vypínací (stop) – přičemž vypnutí časomíry způsobí přerušování průchodu světla (změna při vstupu stínítka do čidla) a zapnutí časomíry způsobí opětovný průchod světla (změna při opuštění stínítka čidla).

(7)



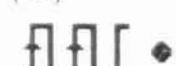
Toto nastavení se užívá při zapojení jedné čidla do zdiřky, přičemž se zde měří interval od opětovného průchodu světla (změna při opuštění stínítka čidla) do přerušování průchodu světla (změna při vstupu stínítka do čidla).

(8)



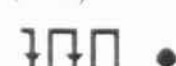
Toto nastavení se užívá při zapojení jedné sondy do zdiřky, přičemž se zde měří interval přerušování průchodu světla (změna při vstupu stínítka do čidla) do opětovného průchodu světla (změna při opuštění stínítka čidla). Toto nastavení odpovídá změření průchodu stínítka skrz čidlo.

(9)



Toto nastavení se užívá při zapojení jedné sondy do zdiřky, jedná se o měření dvou průchodů čidlem (měřeno od opuštění + průchod + volná doba + průchod).

(10)



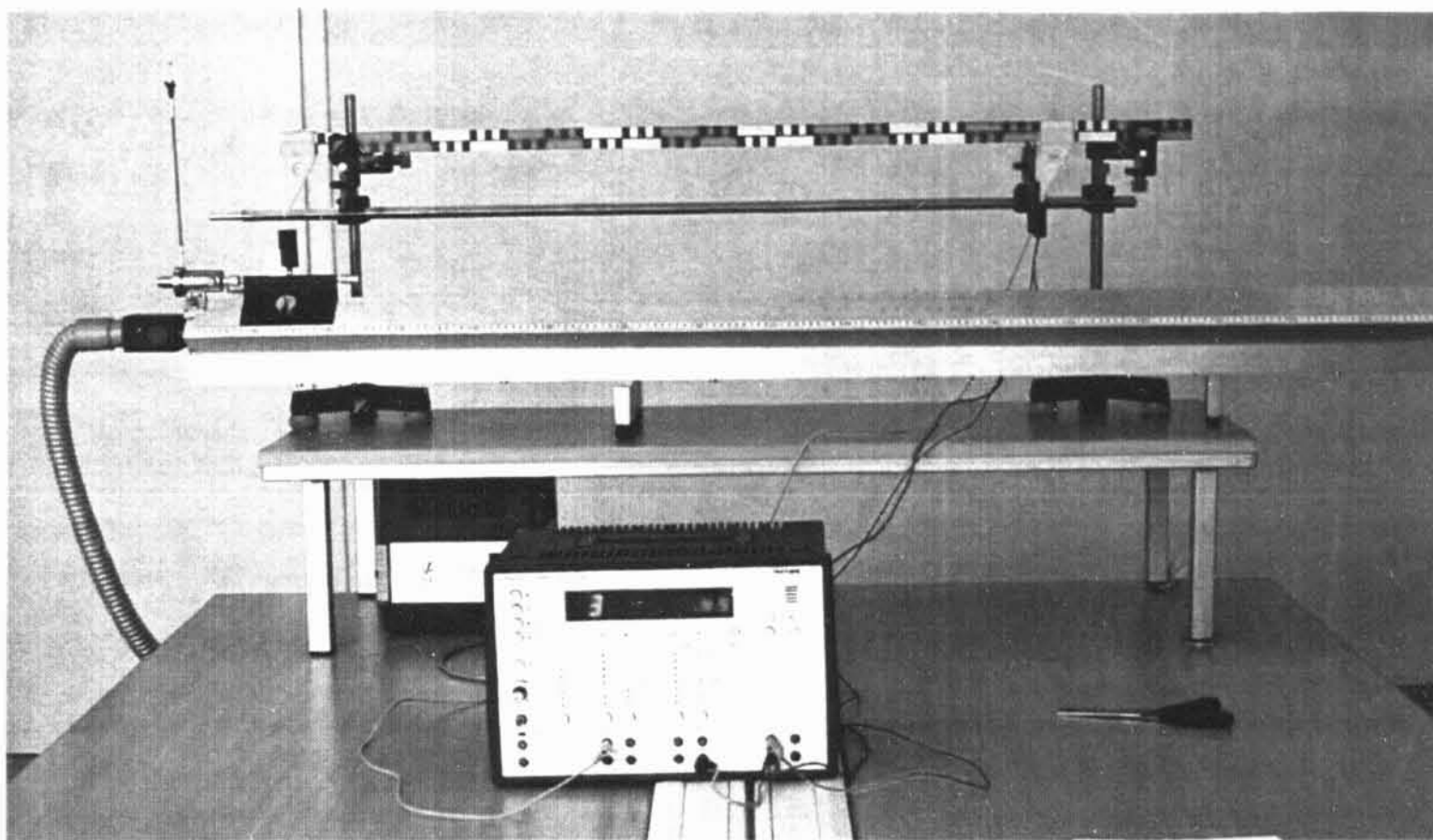
Toto nastavení se užívá při zapojení jedné sondy do zdiřky, jedná se o měření dvou průchodů čidlem (měřeno: průchod + volná doba + průchod + volná doba).

## Mode

- (1) Single: měření pouze jednou časomírou.
- (2) Double: umožní měřit na obou časomírách (pro nastavení druhé platí stejné popisky, jen užíváme zdiřky druhého časovače).
- (3) Add.: přičítá další naměřenou hodnotu k předchozí hodnotě (jinak stejné jako single).

## 2.2 Rovnoměrný přímočarý pohyb

### 2.2.1 Rovnoměrný přímočarý pohyb - zadání



Obr 2.2-1 Lineární vzduchová dráha

#### Úkol

Změřte závislost dráhy na času při rovnoměrném přímočarém pohybu. Ověřte, zda pohyb vozíku na vzduchové dráze odpovídá rovnoměrnému přímočarému pohybu.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, vozík, startovací zařízení, křídélko 10 cm, magnetická přichytka, koncová zarážka, jehlový nástavec, váleček s modelínou, vodiče

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

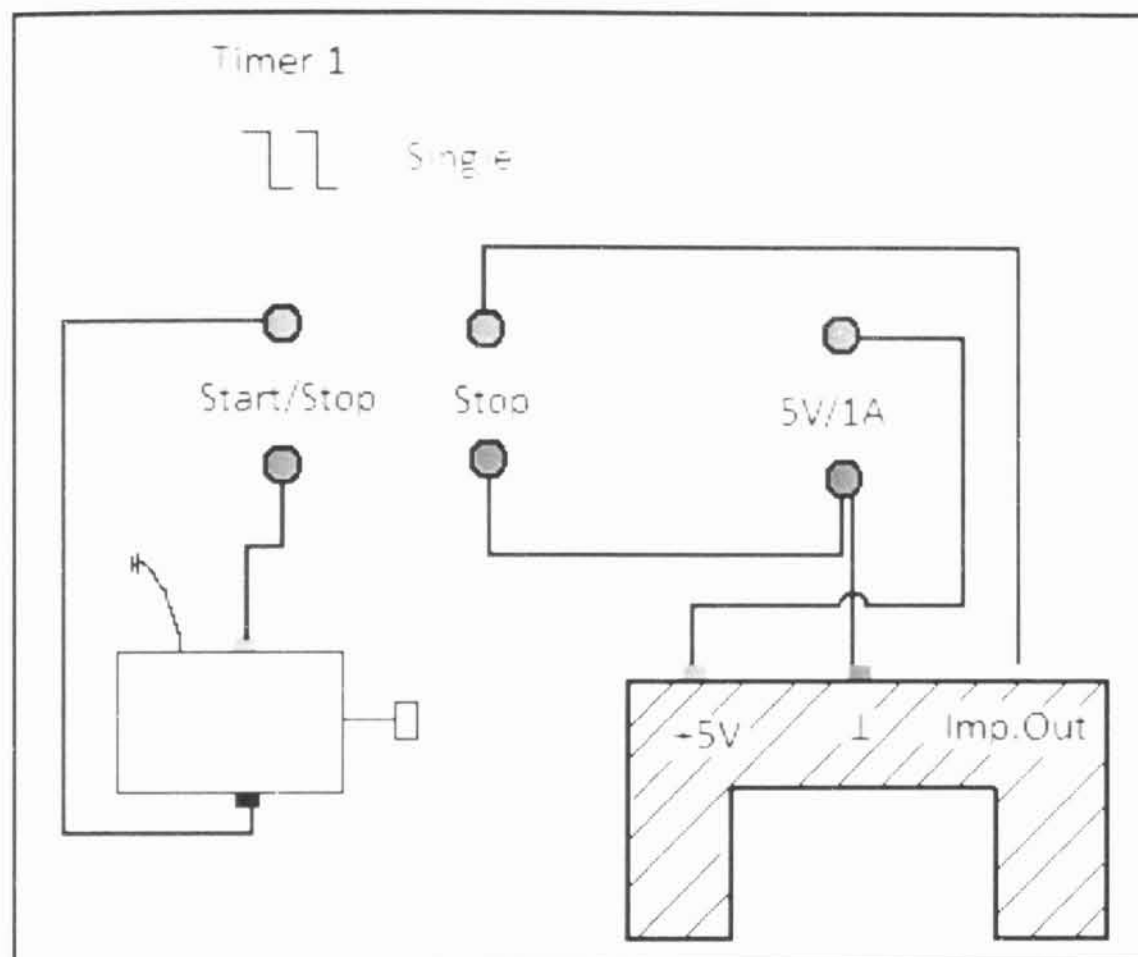
Rovnoměrný přímočarý pohyb, tření, I Newtonův zákon, dráha, průměrná rychlost

#### Příprava

- 1) Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nástavcem.
- 2) Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřící zařízení.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Připravte vozík s křídélkem (vpravo s magnetickou přichytkou, vlevo s válečkem s modelínou).
- 5) Sejměte ochranou korkovou zátku z jehly.
- 6) Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.

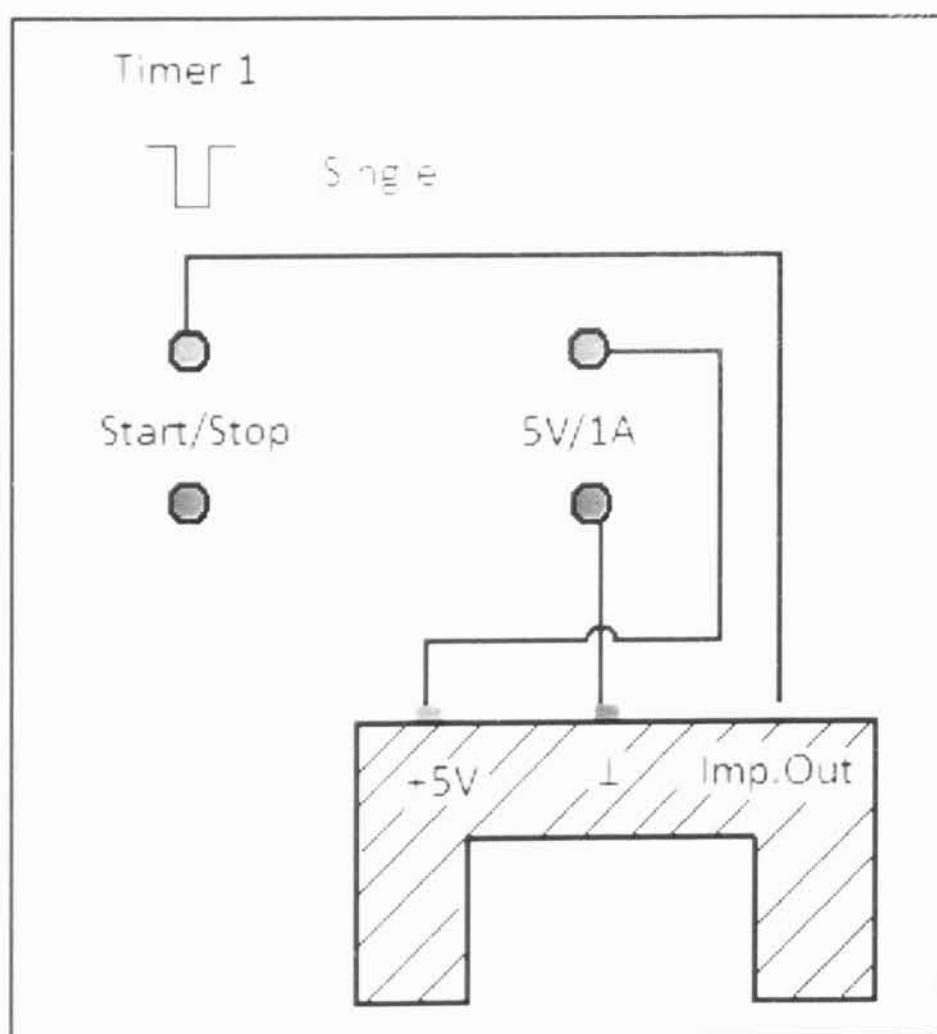
## Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje vozík k uražení vybrané vzdálenosti (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.2-2. Sestrojte graf dráhy vozíku v závislosti na čase.



Obr. 2.2-2

- 2) Změřte rychlost (průměrnou) ve vybraných pozicích na vzduchové dráze (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.2-3.



Obr. 2.2-3

## 2.2.2 Rovnoměrný přímočarý pohyb - vypracování

Jestliže se vozík pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem, urazí stejně dlouhé úseky dráhy za stejně dlouhé časové intervaly. Délka dráhy  $s$  je tedy přímo úměrná době  $t$ , po kterou se hmotný bod pohybuje. Taktéž musí být tedy rychlost konstantní ve všech úsecích dráhy.

V našem případě budeme uvažovat pohyb vozíku na vzduchové dráze a zkoumat, zda se jedná o rovnoměrný přímočarý pohyb.

O přímočarý pohyb se jedná z důvodu konstrukce lineární vzduchové dráhy. Pro ověření dalších vlastností pohybu je třeba proměřit závislost dráhy na čase, rychlosti a času.

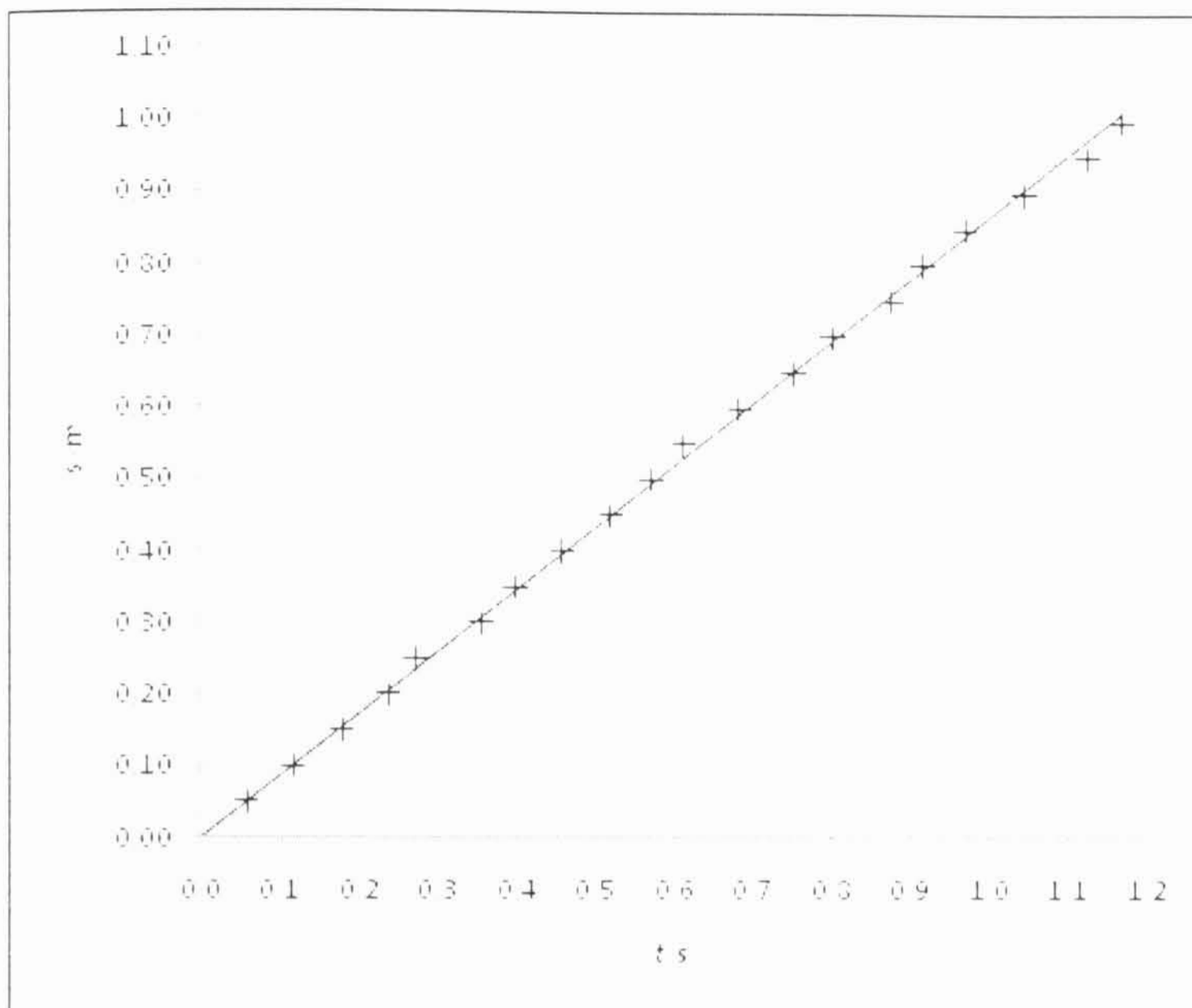
K změření závislosti dráhy na čase potřebujeme změřit čas, který potřebuje vozík k uražení vybraných vzdáleností. Je zde nutno uvědomit si dle zapojení měřícího čidla, kde se nalézá uvažovaná vzdálenost (dráha). Při uváděném zapojení dráhu měříme vždy jako vzdálenost středu měřícího čidla a k němu bližšímu okraji křídélka.

Tabulky 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 uvádějí v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka.

Tab. 2.2.1 Rovnoměrný přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	0,057	0,058	0,058	0,058	0,057	0,057	0,057	0,058	0,057	0,057	0,0574	0,0005
0,10	0,115	0,116	0,114	0,117	0,114	0,115	0,114	0,116	0,117	0,116	0,1154	0,0011
0,15	0,177	0,179	0,176	0,179	0,179	0,179	0,174	0,176	0,175	0,178	0,1772	0,0018
0,20	0,236	0,238	0,233	0,236	0,235	0,236	0,233	0,233	0,239	0,239	0,236	0,002
0,25	0,270	0,273	0,268	0,268	0,268	0,273	0,272	0,274	0,271	0,272	0,271	0,002
0,30	0,353	0,352	0,357	0,353	0,354	0,353	0,353	0,350	0,358	0,355	0,354	0,002
0,35	0,396	0,400	0,393	0,402	0,395	0,395	0,397	0,401	0,395	0,397	0,397	0,003
0,40	0,455	0,460	0,459	0,457	0,456	0,450	0,454	0,451	0,459	0,460	0,456	0,003
0,45	0,518	0,512	0,524	0,523	0,520	0,517	0,510	0,512	0,523	0,519	0,518	0,005
0,50	0,570	0,576	0,574	0,569	0,565	0,561	0,569	0,575	0,561	0,564	0,568	0,005
0,55	0,612	0,615	0,606	0,612	0,605	0,607	0,604	0,619	0,607	0,614	0,610	0,005
0,60	0,677	0,686	0,687	0,685	0,677	0,682	0,684	0,673	0,685	0,674	0,681	0,005
0,65	0,748	0,746	0,751	0,739	0,751	0,755	0,749	0,755	0,754	0,759	0,751	0,005
0,70	0,800	0,806	0,811	0,798	0,793	0,797	0,790	0,807	0,789	0,800	0,799	0,007
0,75	0,872	0,862	0,877	0,866	0,879	0,875	0,877	0,874	0,873	0,883	0,874	0,006
0,80	0,910	0,914	0,923	0,912	0,922	0,920	0,914	0,906	0,901	0,908	0,913	0,007
0,85	0,970	0,977	0,984	0,972	0,957	0,968	0,959	0,960	0,968	0,964	0,968	0,008
0,90	1,041	1,042	1,031	1,048	1,057	1,057	1,052	1,036	1,035	1,028	1,043	0,010
0,95	1,124	1,114	1,123	1,115	1,132	1,134	1,116	1,109	1,131	1,127	1,123	0,008
1,00	1,164	1,181	1,154	1,175	1,166	1,172	1,176	1,152	1,154	1,169	1,166	0,010

Tabulka 2.2.1 Vozík o hmotnosti 207 g.



Graf 2.2.1 Závislost dráhy na čase vozíku o hmotnosti 207 g

V grafu 2.2.1 je použita lineární spojnice:

$$d = 0,8672 t$$

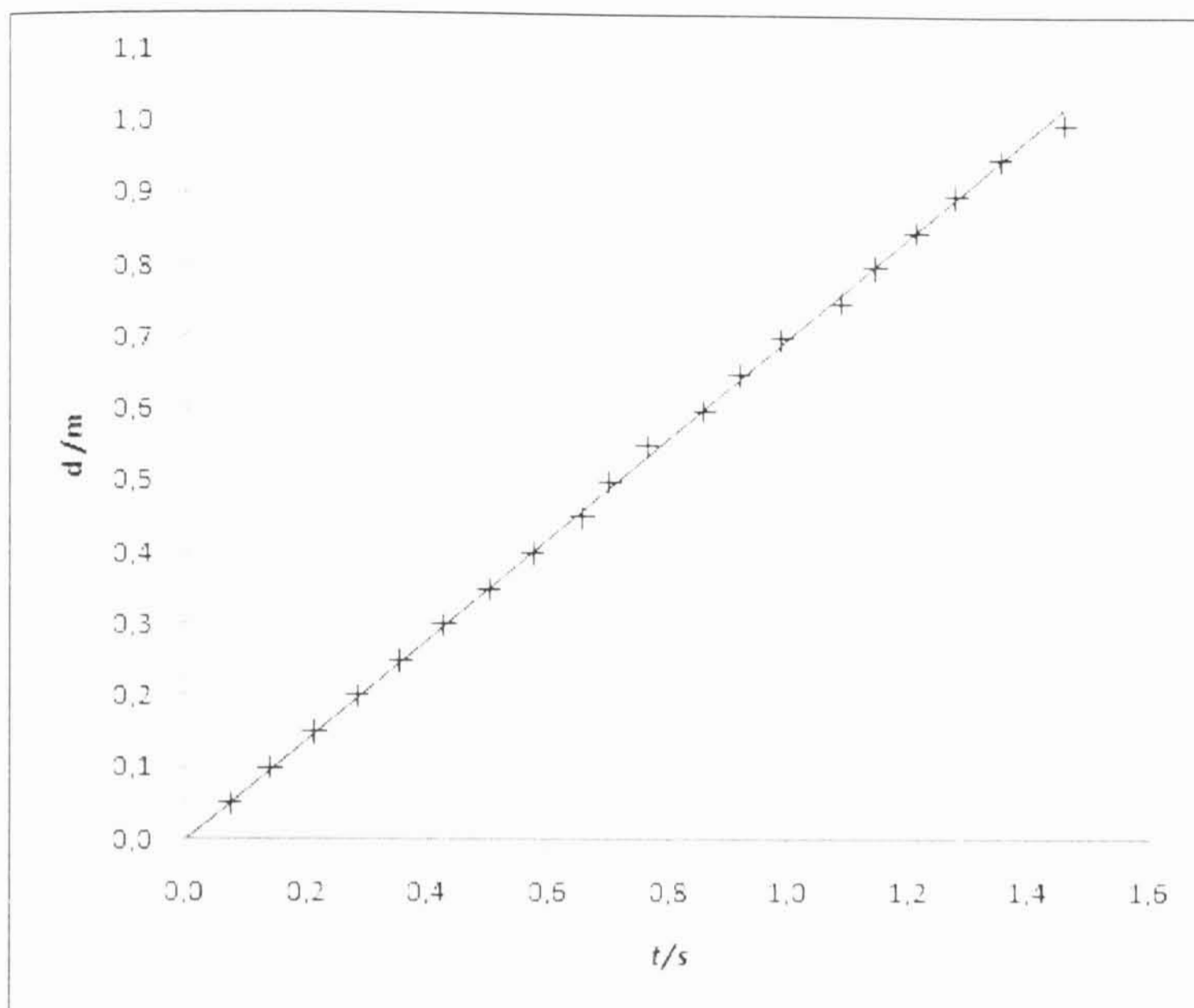
Tato spojnice má spolehlivost:

$$R^2 = 0,9988$$

Tab. 2.2.2 Rovnoměrný přímočarý pohyb závislost dráha - čas

s / m	t1 / s	t2 / s	t3 / s	t4 / s	t5 / s	t6 / s	t7 / s	t8 / s	t9 / s	t10 / s	t / s	dt / s
0,05	0,071	0,070	0,072	0,071	0,071	0,070	0,071	0,071	0,071	0,071	0,0709	0,0005
0,10	0,137	0,137	0,137	0,136	0,138	0,139	0,136	0,137	0,136	0,136	0,1369	0,0009
0,15	0,210	0,208	0,208	0,209	0,211	0,210	0,209	0,211	0,208	0,211	0,2095	0,0012
0,20	0,280	0,278	0,284	0,279	0,280	0,282	0,281	0,281	0,283	0,276	0,280	0,002
0,25	0,352	0,350	0,347	0,349	0,350	0,356	0,357	0,356	0,348	0,355	0,352	0,004
0,30	0,421	0,423	0,418	0,426	0,422	0,420	0,424	0,423	0,424	0,427	0,423	0,003
0,35	0,501	0,497	0,497	0,497	0,499	0,496	0,500	0,503	0,501	0,496	0,499	0,002
0,40	0,570	0,567	0,571	0,569	0,570	0,572	0,572	0,574	0,575	0,572	0,571	0,002
0,45	0,650	0,651	0,656	0,655	0,644	0,657	0,659	0,656	0,652	0,657	0,654	0,004
0,50	0,698	0,706	0,706	0,698	0,692	0,700	0,697	0,696	0,689	0,706	0,699	0,006
0,55	0,762	0,770	0,751	0,757	0,769	0,766	0,754	0,763	0,751	0,770	0,761	0,007
0,60	0,856	0,844	0,858	0,858	0,865	0,862	0,859	0,853	0,863	0,844	0,856	0,007
0,65	0,914	0,906	0,924	0,907	0,904	0,920	0,902	0,927	0,917	0,919	0,914	0,008
0,70	0,986	0,974	0,986	0,983	0,982	0,972	1,000	0,982	0,995	0,993	0,985	0,008
0,75	1,086	1,096	1,083	1,071	1,074	1,073	1,077	1,098	1,101	1,074	1,083	0,011
0,80	1,143	1,146	1,128	1,128	1,139	1,134	1,150	1,153	1,152	1,145	1,142	0,009
0,85	1,212	1,224	1,196	1,220	1,209	1,220	1,209	1,205	1,196	1,213	1,210	0,009
0,90	1,274	1,288	1,290	1,282	1,276	1,262	1,289	1,284	1,255	1,266	1,277	0,012
0,95	1,350	1,335	1,335	1,358	1,340	1,347	1,352	1,365	1,369	1,358	1,351	0,011
1,00	1,458	1,442	1,456	1,455	1,458	1,465	1,445	1,476	1,455	1,469	1,458	0,010

Tabulka 2.2.2 Vozík o hmotnosti o hmotnosti 307 g



Graf 2.2.2 Závislost dráhy na čase vozíku o hmotnosti 307 g

V grafu 2.2.2 je použita lineární spojnice:

$$d = 0,7014 t$$

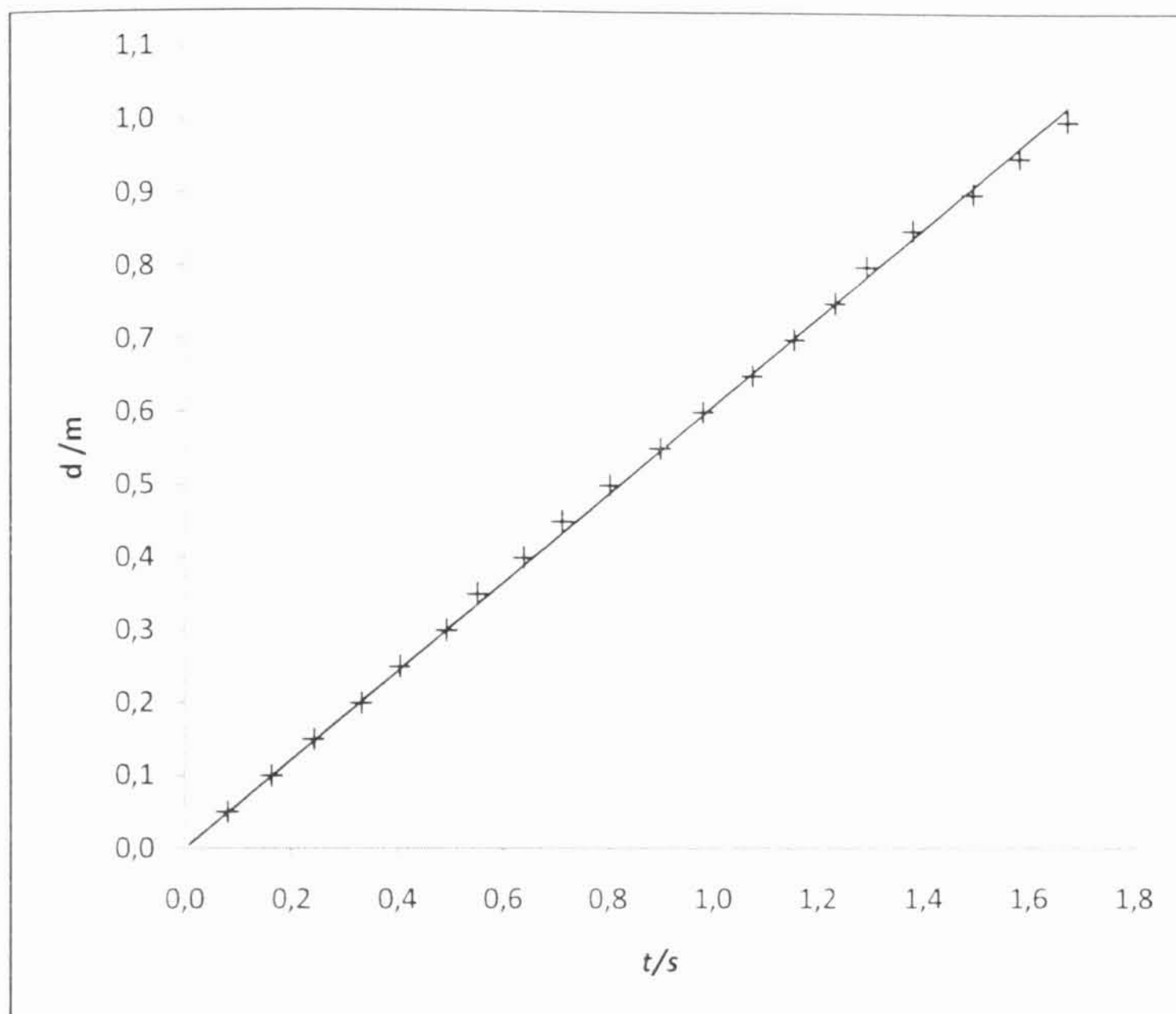
Tato spojnice má spolehlivost:

$$R^2 = 0,9992$$

Tab. 2.2.3 Rovnoměrný přímočarý pohyb závislost dráha - čas

s / m	t1 /s	t2 /s	t3 /s	t4 /s	t5 /s	t6 /s	t7 /s	t8 /s	t9 /s	t10/s	t /s	d t /s
0.05	0.080	0,079	0,081	0,082	0,080	0,078	0,081	0,081	0,082	0,080	0,0804	0,0012
0.10	0.164	0,165	0,163	0,164	0,167	0,162	0,165	0,164	0,166	0,162	0,1642	0,0015
0.15	0.243	0,240	0,245	0,243	0,242	0,244	0,241	0,244	0,241	0,246	0,2429	0,0018
0.20	0.332	0,336	0,333	0,331	0,336	0,333	0,331	0,331	0,335	0,332	0,333	0,002
0.25	0.405	0,407	0,410	0,401	0,406	0,408	0,404	0,403	0,409	0,402	0,406	0,003
0.30	0.495	0,489	0,501	0,491	0,497	0,498	0,490	0,492	0,497	0,494	0,494	0,004
0.35	0.552	0,557	0,547	0,558	0,553	0,553	0,556	0,549	0,550	0,553	0,553	0,003
0.40	0.640	0,634	0,646	0,638	0,639	0,645	0,643	0,641	0,637	0,645	0,641	0,004
0.45	0.713	0,717	0,720	0,707	0,709	0,719	0,715	0,711	0,709	0,716	0,714	0,004
0.50	0.803	0,812	0,810	0,798	0,801	0,805	0,800	0,809	0,805	0,803	0,805	0,004
0.55	0.900	0,903	0,906	0,907	0,901	0,892	0,895	0,898	0,897	0,904	0,900	0,005
0.60	0.980	0,973	0,991	0,977	0,986	0,988	0,976	0,978	0,985	0,990	0,982	0,006
0.65	1,074	1,083	1,068	1,079	1,068	1,080	1,081	1,077	1,067	1,082	1,076	0,006
0.70	1,154	1,167	1,171	1,148	1,152	1,163	1,150	1,149	1,161	1,148	1,156	0,008
0.75	1,234	1,241	1,228	1,237	1,229	1,240	1,231	1,227	1,239	1,235	1,234	0,005
0.80	1,295	1,282	1,306	1,301	1,291	1,287	1,298	1,286	1,302	1,290	1,294	0,007
0.85	1,384	1,380	1,397	1,371	1,376	1,387	1,380	1,375	1,379	1,394	1,382	0,008
0.90	1,491	1,502	1,482	1,483	1,506	1,506	1,499	1,479	1,508	1,509	1,496	0,011
0.95	1,583	1,579	1,596	1,580	1,568	1,596	1,585	1,602	1,579	1,590	1,586	0,010
1.00	1,679	1,686	1,702	1,659	1,701	1,676	1,666	1,667	1,681	1,659	1,678	0,015

Tabulka 2.2.3 Vozík o hmotnosti o hmotnosti 406 g



Graf 2.2.3 Závislost dráhy na čase vozíku o hmotnosti 406 g

V grafu 2.2.2 je použita lineární spojnice:

$$d = 0,6076 t$$

Tato spojnice má spolehlivost:

$$R^2 = 0,9993$$

Jak je patrné z grafů 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 je závislost takřka lineární. Nelinearita je způsobena odporem vzduchu, který vozíku uděluje malé záporné zrychlení. Jak je však patrné tento vliv lze takřka zanedbat a závislost prohlásit za lineární. Z této závislosti již lze usuzovat, že se jedná o rovnoměrný přímočarý pohyb, který je dán dle vztahu  $s = v \cdot t$ . Rychlost  $v$  můžeme odečíst tedy jako směrnici grafu. Tímto měřením lze taktéž odvodit vztah dráhy na čase a zavést pojem rychlosti.

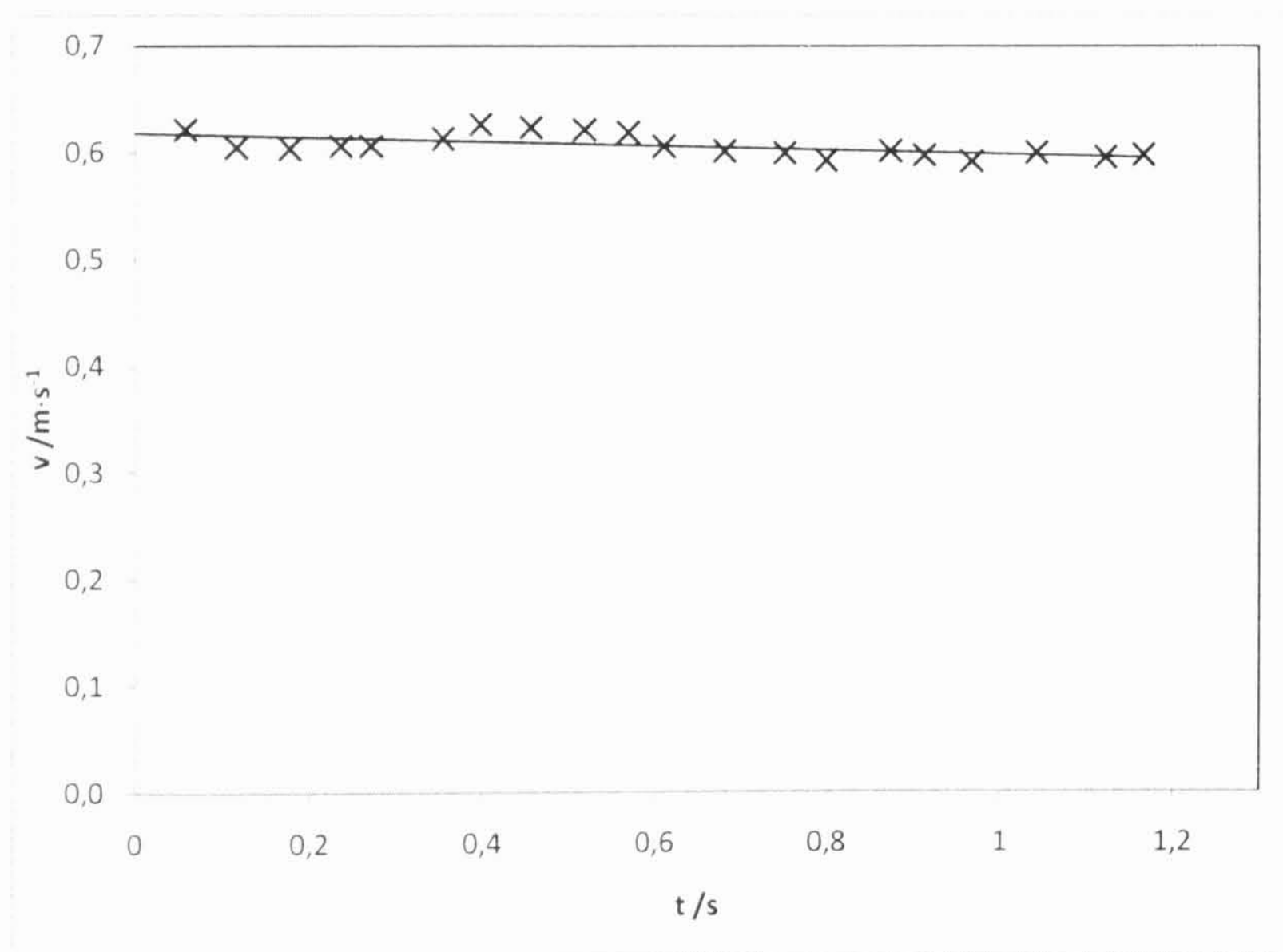
V případě demonstrace žákům je dobré přesvědčit se i o konstantnosti rychlosti.

Tabulky 2.2.4, 2.2.5, 2.2.6 uvádějí v prvním sloupci pozici měřícího čidla  $s$ ,  $t_1 - t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby byla určena průměrná rychlost tohoto průchodu  $v$ . Dále  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti.



s / m	t1 /ms	t2 /ms	t3 /ms	t4 /ms	t5 /ms	t6 /ms	t7 /ms	t8 /ms	t9 /ms	t10/ms	t /ms	$\delta t$ /ms	v /m.s <sup>-1</sup>	$\delta v$ /m.s <sup>-1</sup>
0,05	116,98	117,19	116,18	116,36	116,77	117,50	118,61	116,90	115,82	116,10	116,8	0,8	0,856	0,006
0,10	116,57	115,75	117,87	117,17	115,76	117,25	118,32	115,69	117,18	116,06	116,8	0,9	0,856	0,007
0,15	118,49	117,42	118,22	117,35	118,84	116,74	119,86	116,90	118,98	119,72	118,3	1,1	0,846	0,008
0,20	117,03	115,81	118,62	118,67	117,36	115,93	115,95	118,46	117,65	117,32	117,3	1,1	0,853	0,008
0,25	116,89	117,72	115,16	115,66	116,77	117,00	117,28	117,72	115,99	116,78	116,7	0,8	0,857	0,006
0,30	117,95	118,08	118,59	118,41	119,30	119,37	118,01	118,55	117,41	117,58	118,3	0,6	0,845	0,004
0,35	115,98	115,52	114,99	116,57	117,64	115,66	117,16	114,49	116,77	114,99	116,0	1,0	0,862	0,007
0,40	116,48	117,31	116,79	115,27	115,35	114,81	118,07	116,35	114,93	114,74	116,0	1,1	0,862	0,008
0,45	116,46	117,56	116,06	117,13	117,33	116,77	116,71	116,21	116,08	115,76	116,6	0,6	0,858	0,004
0,50	116,83	115,95	116,09	116,14	115,52	116,71	116,78	116,34	116,06	117,78	116,4	0,6	0,859	0,004
0,55	115,88	114,20	114,32	115,01	114,91	114,69	114,67	117,24	114,45	115,31	115,1	0,9	0,869	0,007
0,60	116,69	115,39	115,71	116,30	115,74	115,43	115,55	117,58	117,63	115,60	116,2	0,8	0,861	0,006
0,65	119,19	120,90	117,80	117,61	119,20	120,69	118,05	120,94	118,14	117,82	119,0	1,3	0,840	0,009
0,70	118,06	116,37	116,44	119,15	119,69	119,82	117,75	119,43	119,76	117,01	118,3	1,3	0,845	0,009
0,75	120,19	118,82	120,82	120,44	119,57	119,30	121,52	119,76	120,20	119,81	120,0	0,7	0,833	0,005
0,80	117,47	118,56	116,38	116,28	117,07	115,89	118,10	116,49	115,73	118,21	117,0	1,0	0,855	0,007
0,85	117,91	118,92	118,29	117,43	119,26	116,24	119,09	118,90	117,41	117,64	118,1	0,9	0,847	0,007
0,90	119,57	119,60	120,70	119,44	118,12	120,70	117,98	120,46	118,70	119,48	119,5	0,9	0,837	0,007
0,95	118,40	119,35	118,91	118,51	117,59	116,66	119,10	119,12	117,29	119,64	118,5	0,9	0,844	0,007
1,00	120,19	120,93	119,15	120,60	121,31	119,37	120,09	121,38	121,33	118,68	120,3	0,9	0,831	0,006

Tabulka 2.2.4 Vozík o hmotnosti o hmotnosti 207 g



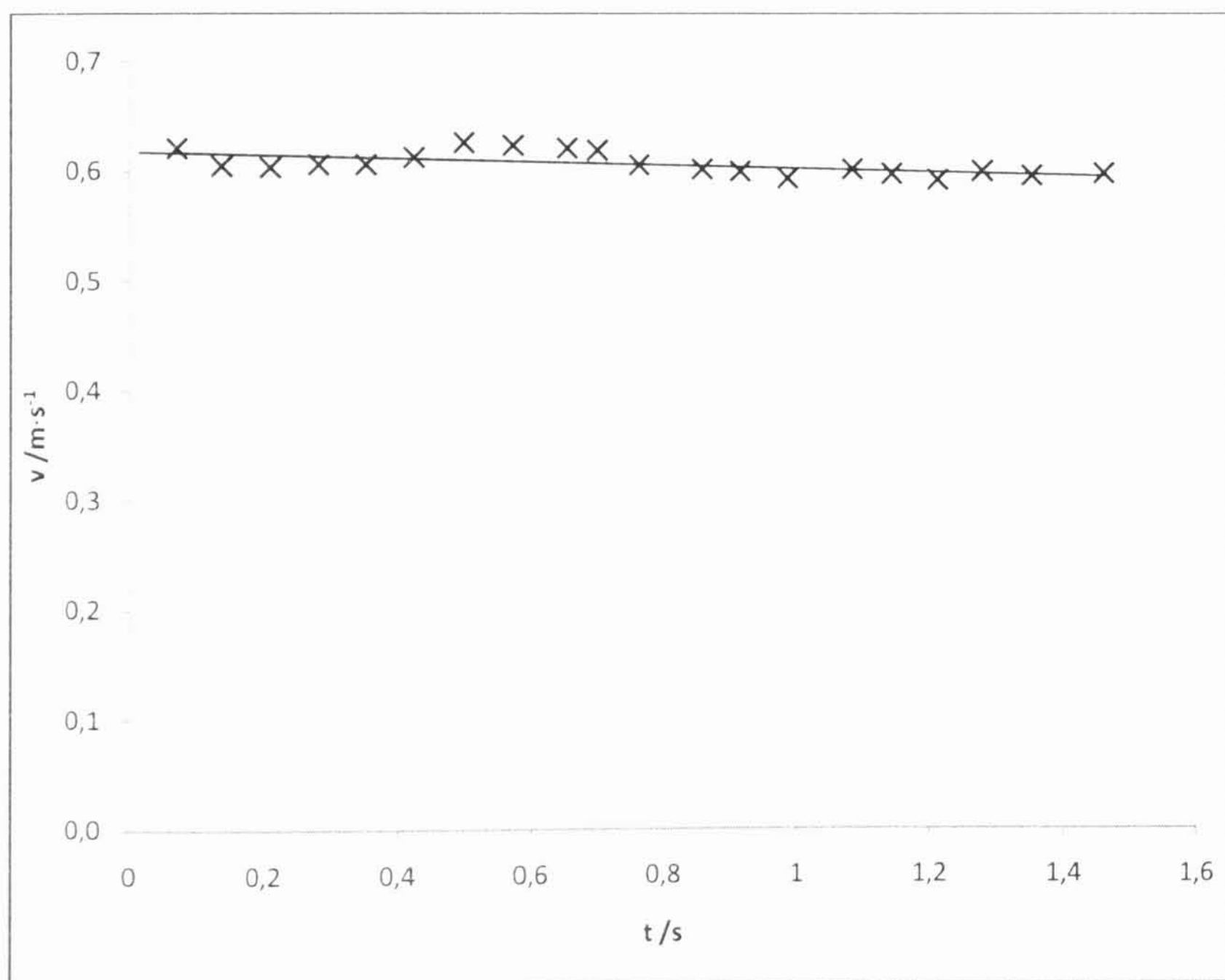
Graf 2.2.4 Závislost rychlosti na čase vozíku o hmotnosti 207 g

V grafu 2.2.4 je použita lineární spojnice

Tab. 2.2.5 Rovnoměrný přímočarý pohyb závislost rychlost - čas

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	$v / m.s^{-1}$	$\delta v / m.s^{-1}$
0,05	140,88	140,43	139,61	138,97	140,44	141,03	140,53	142,13	140,56	139,87	140,4	0,8	0,712	0,004
0,10	140,64	142,48	142,12	140,33	140,64	142,71	140,29	141,33	141,04	142,57	141,4	0,9	0,707	0,005
0,15	142,36	141,26	140,40	144,22	142,25	143,29	142,12	144,49	141,67	142,76	142,5	1,2	0,702	0,006
0,20	144,70	144,15	144,07	146,49	143,61	142,53	144,55	145,50	144,78	146,46	144,7	1,2	0,691	0,006
0,25	141,13	143,13	141,15	141,67	140,24	142,67	141,21	140,62	142,63	139,26	141,4	1,1	0,707	0,006
0,30	142,26	142,04	142,06	143,69	143,74	140,59	141,30	141,30	142,47	141,19	142,1	1,0	0,704	0,005
0,35	144,96	146,11	143,32	142,86	146,05	146,41	146,98	143,01	144,24	145,21	144,9	1,4	0,690	0,007
0,40	142,95	144,53	142,40	144,24	143,91	141,68	141,19	142,87	140,93	142,14	142,7	1,2	0,701	0,006
0,45	145,28	144,86	143,15	146,12	145,89	147,10	146,21	145,94	143,38	145,67	145,4	1,2	0,688	0,006
0,50	142,52	141,32	142,93	140,78	143,66	140,94	143,03	143,23	142,43	142,02	142,3	0,9	0,703	0,005
0,55	144,62	144,55	145,81	146,48	143,22	145,43	145,56	146,24	142,45	144,87	144,9	1,2	0,690	0,006
0,60	144,29	144,76	143,90	145,96	142,64	144,32	144,11	145,30	144,73	144,13	144,4	0,8	0,692	0,004
0,65	144,17	144,79	145,23	142,02	145,49	145,27	144,16	142,50	144,39	143,61	144,2	1,1	0,694	0,005
0,70	145,73	146,16	145,83	147,85	146,13	146,81	146,57	146,20	143,98	146,16	146,1	0,9	0,684	0,004
0,75	147,19	145,57	149,15	145,22	148,77	145,40	147,94	145,17	147,34	147,90	147,0	1,4	0,680	0,007
0,80	145,10	146,45	144,37	147,02	143,97	143,16	146,65	146,85	146,06	144,85	145,4	1,3	0,688	0,006
0,85	146,09	148,15	145,81	144,39	147,28	144,17	144,61	144,29	146,12	147,23	145,8	1,4	0,686	0,006
0,90	146,65	148,42	147,47	146,17	148,80	147,88	147,29	144,58	145,42	148,70	147,1	1,3	0,680	0,006
0,95	146,99	147,82	147,57	147,54	148,60	147,16	145,28	146,13	148,20	146,93	147,2	0,9	0,679	0,004
1,00	146,82	148,13	146,78	148,25	147,66	148,80	148,29	146,59	146,69	146,85	147,5	0,8	0,678	0,004

Tabulka 2.2.5 Vozík o hmotnosti o hmotnosti 307 g



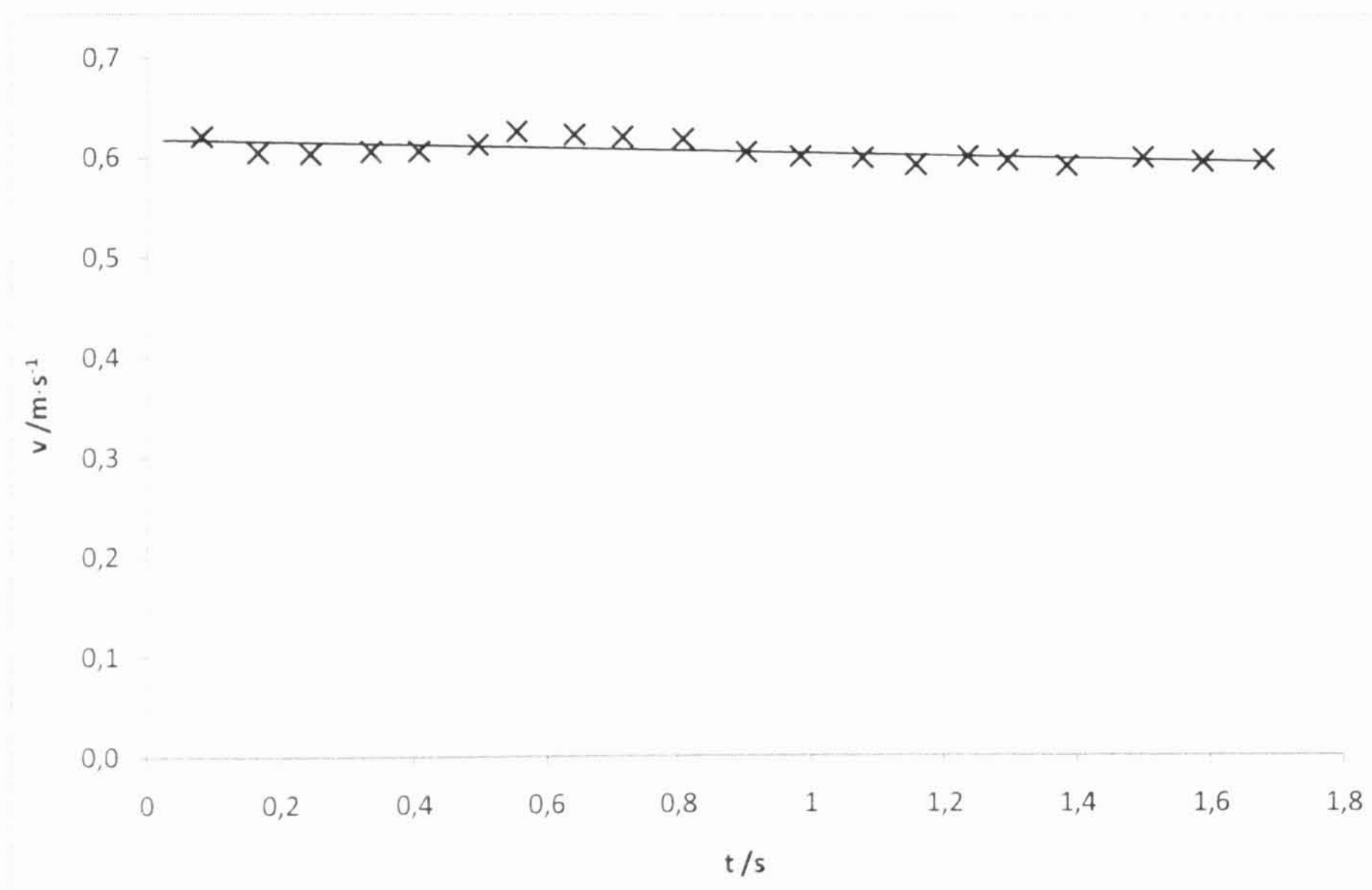
Graf 2.2.5 Závislost rychlosti na čase vozíku o hmotnosti 307 g

V grafu 2.2.5 je použita lineární spojnice

Tab. 2.2.6 Rovnoměrný přímočarý pohyb závislost rychlost - čas

s / m	t1 /ms	t2 /ms	t3 /ms	t4 /ms	t5 /ms	t6 /ms	t7 /ms	t8 /ms	t9 /ms	t10 /ms	t /ms	$\delta t$ /ms	$v$ /m.s <sup>-1</sup>	$\delta v$ /m.s <sup>-1</sup>
0,05	160,20	159,69	161,71	162,27	161,65	162,50	160,15	162,10	157,97	162,08	161,0	1,4	0,621	0,005
0,10	165,61	163,98	164,15	166,64	165,79	167,87	166,16	163,28	163,54	166,74	165,4	1,5	0,605	0,005
0,15	165,90	166,36	164,90	168,28	165,92	164,57	167,99	165,58	163,56	164,23	165,7	1,5	0,603	0,005
0,20	165,11	167,09	164,57	164,01	165,71	162,66	167,33	164,19	163,01	166,35	165,0	1,5	0,606	0,006
0,25	164,84	162,53	166,26	167,17	163,39	162,70	167,11	164,13	165,64	166,04	165,0	1,6	0,606	0,006
0,30	163,79	161,50	164,20	162,43	163,56	163,63	163,15	164,76	161,78	163,38	163,2	1,0	0,613	0,004
0,35	159,67	160,40	160,69	158,68	160,27	157,75	161,73	160,62	158,89	158,95	159,8	1,1	0,626	0,004
0,40	160,05	162,08	158,25	159,57	161,61	160,29	162,16	159,91	159,30	161,12	160,4	1,2	0,623	0,005
0,45	160,62	161,08	161,79	159,00	161,13	160,36	163,00	159,40	161,61	162,27	161,0	1,2	0,621	0,005
0,50	161,68	163,81	160,92	163,35	161,00	160,74	161,71	160,72	162,02	160,57	161,7	1,1	0,619	0,004
0,55	165,02	165,42	167,02	162,60	164,73	166,09	165,28	163,90	164,04	167,47	165,2	1,4	0,605	0,005
0,60	165,99	165,67	166,82	166,40	166,30	167,91	165,65	166,90	167,84	163,89	166,3	1,1	0,601	0,004
0,65	166,79	165,30	165,46	169,03	166,04	168,40	166,30	166,94	165,96	167,64	166,8	1,2	0,600	0,004
0,70	167,83	169,33	169,22	170,21	170,01	168,40	168,66	169,37	166,88	166,96	168,7	1,1	0,593	0,004
0,75	166,38	167,64	167,49	165,61	164,27	168,76	164,46	165,00	165,07	168,46	166,3	1,6	0,601	0,006
0,80	167,68	166,38	167,10	168,14	169,29	166,58	169,74	166,48	165,66	167,14	167,4	1,2	0,597	0,004
0,85	168,55	169,39	169,94	167,94	168,55	170,09	168,57	168,72	169,19	168,68	169,0	0,6	0,592	0,002
0,90	167,16	167,89	166,50	166,38	164,85	165,62	166,39	169,16	167,46	165,64	166,7	1,2	0,600	0,004
0,95	168,15	166,73	166,98	170,58	167,59	167,69	169,82	167,24	165,84	167,97	167,9	1,3	0,596	0,005
1,00	167,42	168,12	166,25	165,13	167,19	166,32	168,84	166,31	167,25	169,91	167,3	1,3	0,598	0,005

Tabulka 2.2.6 Vozík o hmotnosti o hmotnosti 406 g



Graf 2.2.6 Závislost rychlosti na čase vozíku o hmotnosti 406 g

V grafu 2.2.6 je použita lineární spojnice

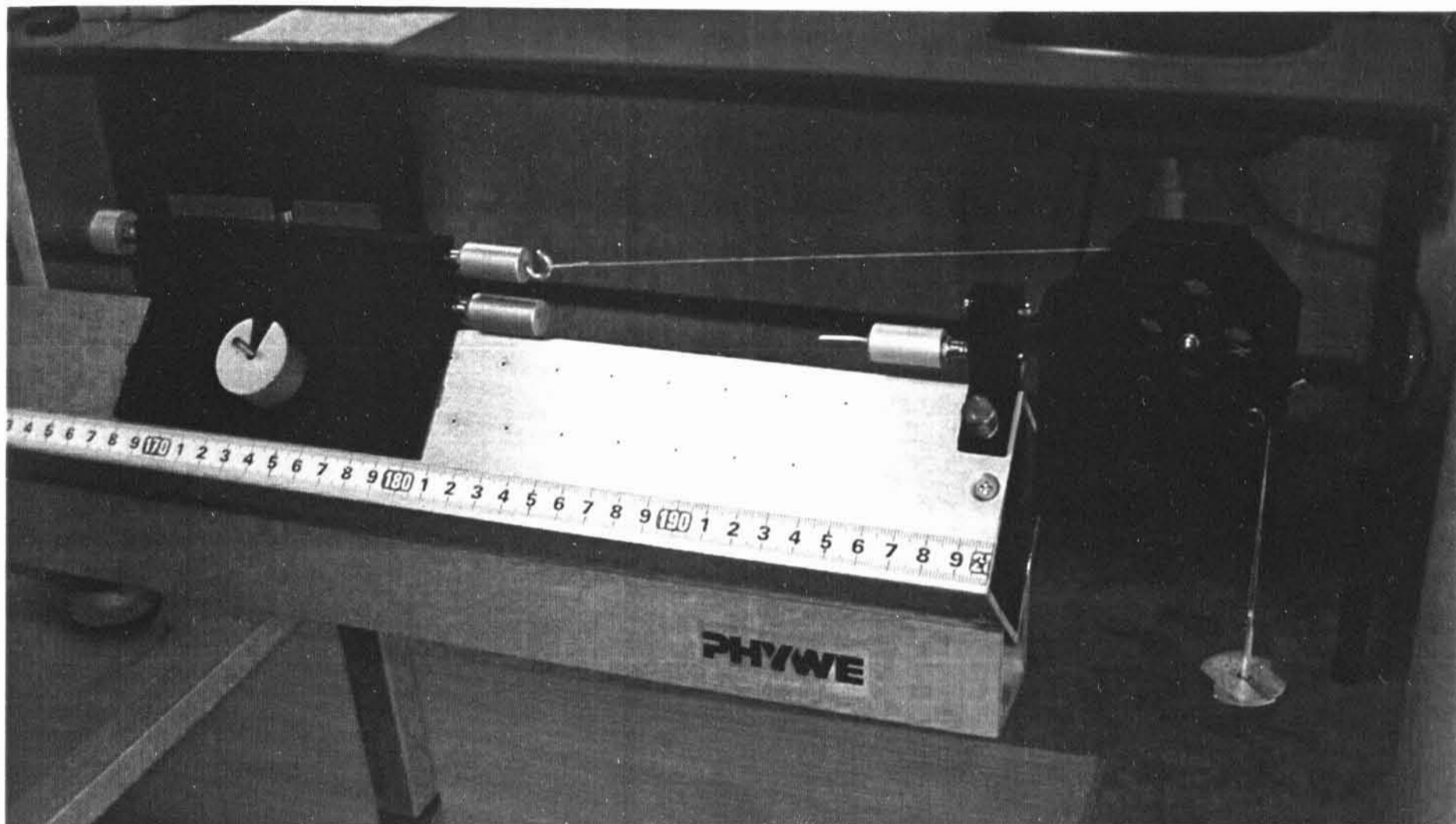
Grafy 2.2.4, 2.2.5, 2.2.6 jsou závislosti průměrné rychlosti na čase (čas je brán z první části úlohy) Taktěž zde je patrný vliv odporu vzduchu.

Se žáky by bylo vhodné během demonstrace volit i křídélko 2cm a ukázat, že volba křídélka výsledky tohoto pokusu neovlivní.

Dále se na těchto pokusech dá demonstrovat jaký význam má hmotnost vozíku. Jedná se o „neochotu“ se rozpohybovat při konstantní síle a tím žákům zavést pojem hybnosti.

## 2.3 Demontrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu

### 2.3.1 Demontrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu - zadání



Obr. 2.3-1 Vozík se závažím

#### Úkol

Změřte závislost dráhy na čase při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu. Ověřte, zda pohyb vozíku na vzduchové dráze odpovídá rovnoměrně zrychlenému přímočarému pohybu.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, vozík, startovací zařízení, křídélko 2 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče, závaží, kladka.

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, zrychlení, dráha, průměrná rychlost, okamžitá rychlost

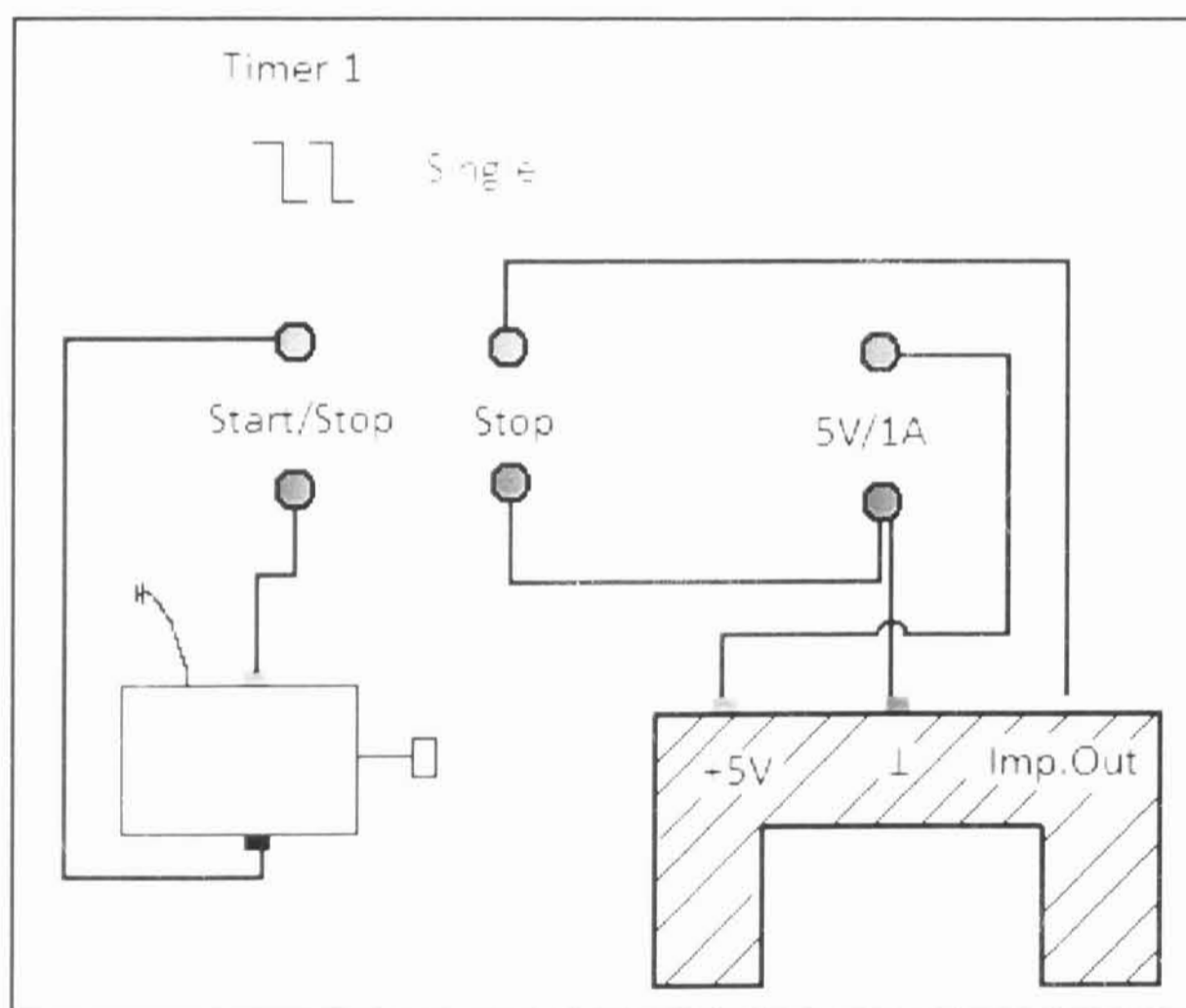
## Příprava

1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a kladku
2. Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřicí zařízení.
3. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
4. Připravte vozík s křídélkem (vpravo s magnetickou přichytkou, vlevo s háčkem).
5. Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.
6. K vozíku připevněte nit, ved'te ji přes kladku a na její druhý konec zavěste závaží 1 g (lze volit i jiná závaží).

(pozor: Při měření vždy vozík ručně zastavujte, tak aby nenarážel do koncové zarážky z důvodu jejího možného poničení.)

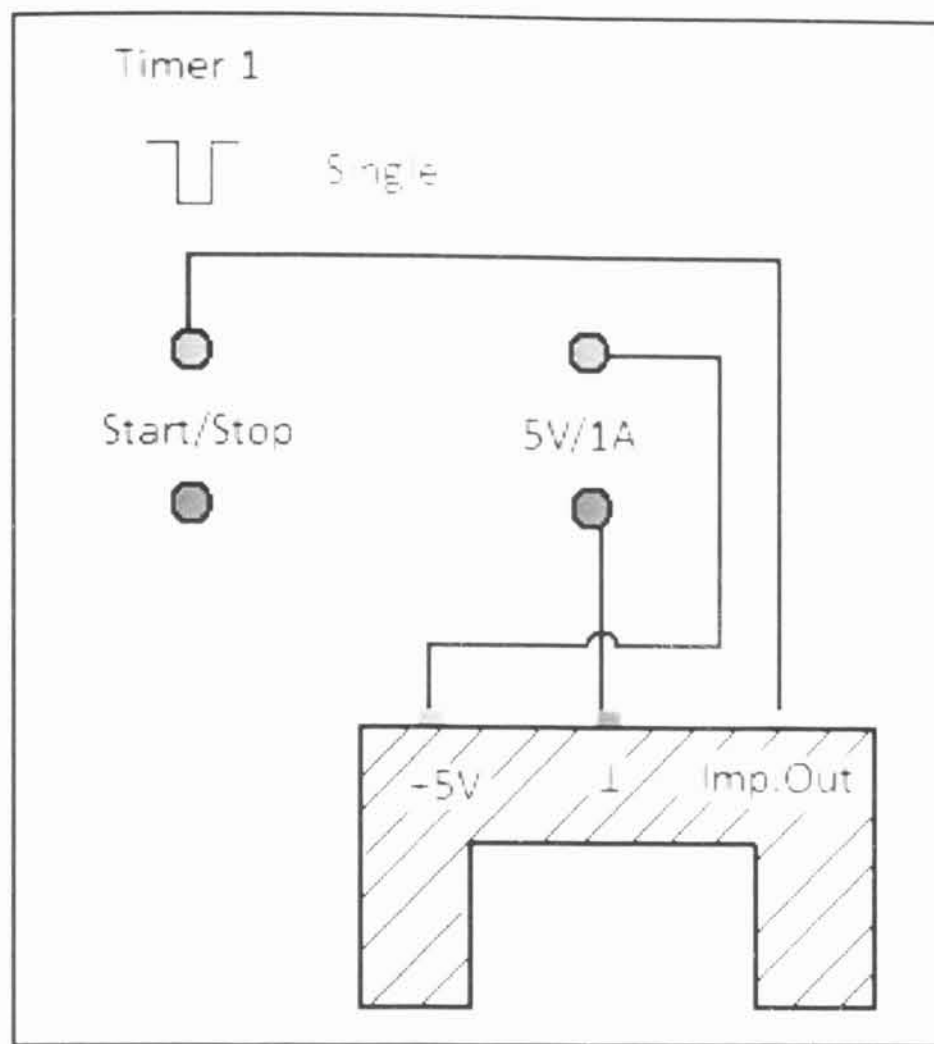
## Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje vozík k uražení vybrané vzdálenosti (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.3-2. Sestrojte graf dráhy vozíku v závislosti na čase.



Obr 2.3-2

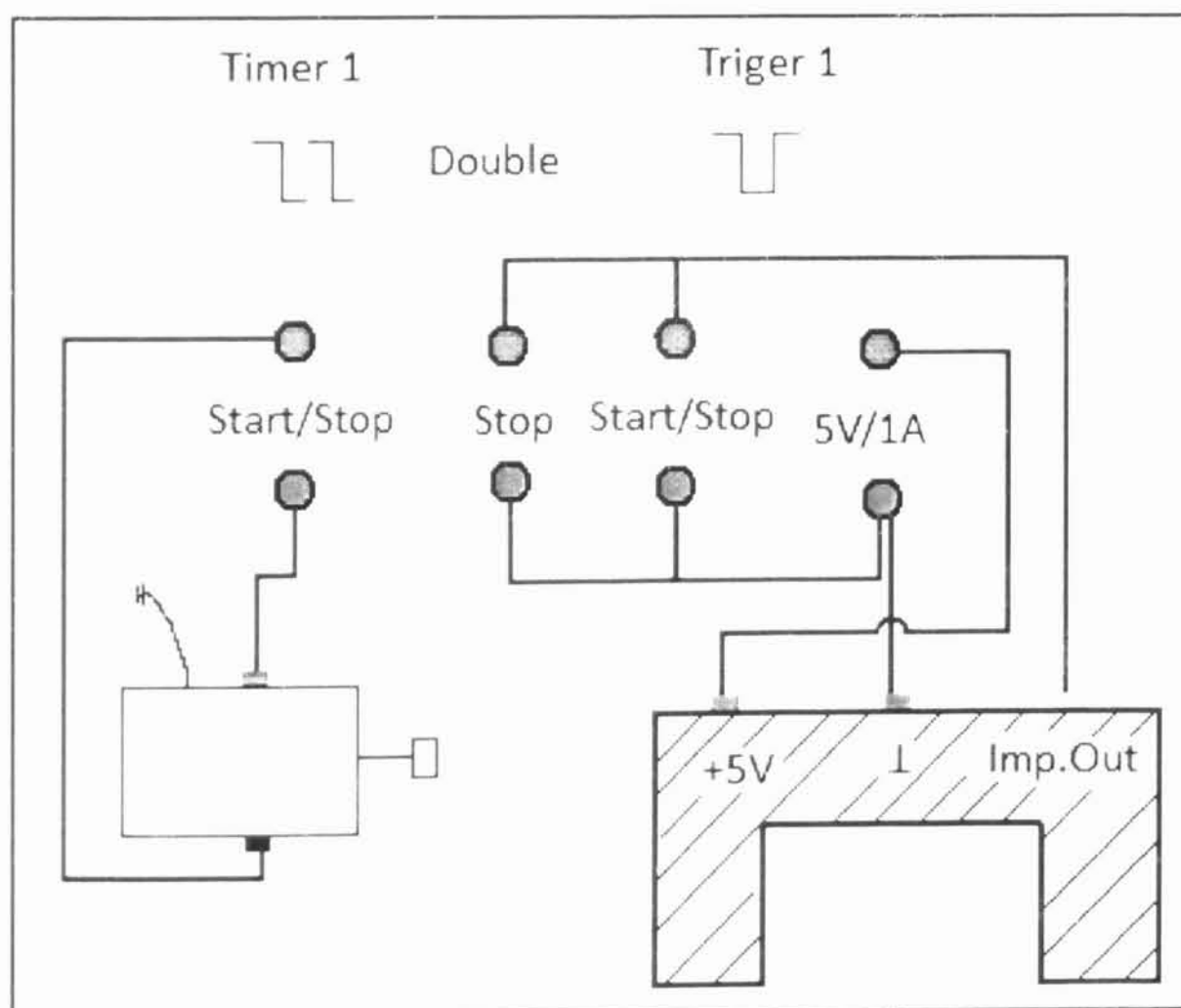
- 2) Změřte rychlost („skoro okamžitou“) ve vybraných pozicích na vzduchové dráze (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.3-3.



**Obr 2.3-3**

- 3) Sestrojte graf závislosti „skoro okamžitě“ rychlosti v závislosti na čase. Určete, počáteční rychlost  $v_0$  z grafu.
- 4) Diskutujte, jak byste s žáky demonstrovali rovnoměrně zrychlený pohyb bez měření rychlosti.

Tip: měření lze provádět pro úsporu času i zároveň při využití zapojení dle obr. 2.3-4.



Obr. 2.3-4

### 2.3.2 Demonstrace rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu - vypracování

Demonstraci rovnoměrně zrychleného pohybu provádíme na lineární vzduchové dráze, pomocí roztahování vozíku závažím. Závaží nám zde zajišťuje konstantní urychlující sílu (hmotnost nitě lze zanedbat a tak se uvažuje konstantní hmotnost závaží).

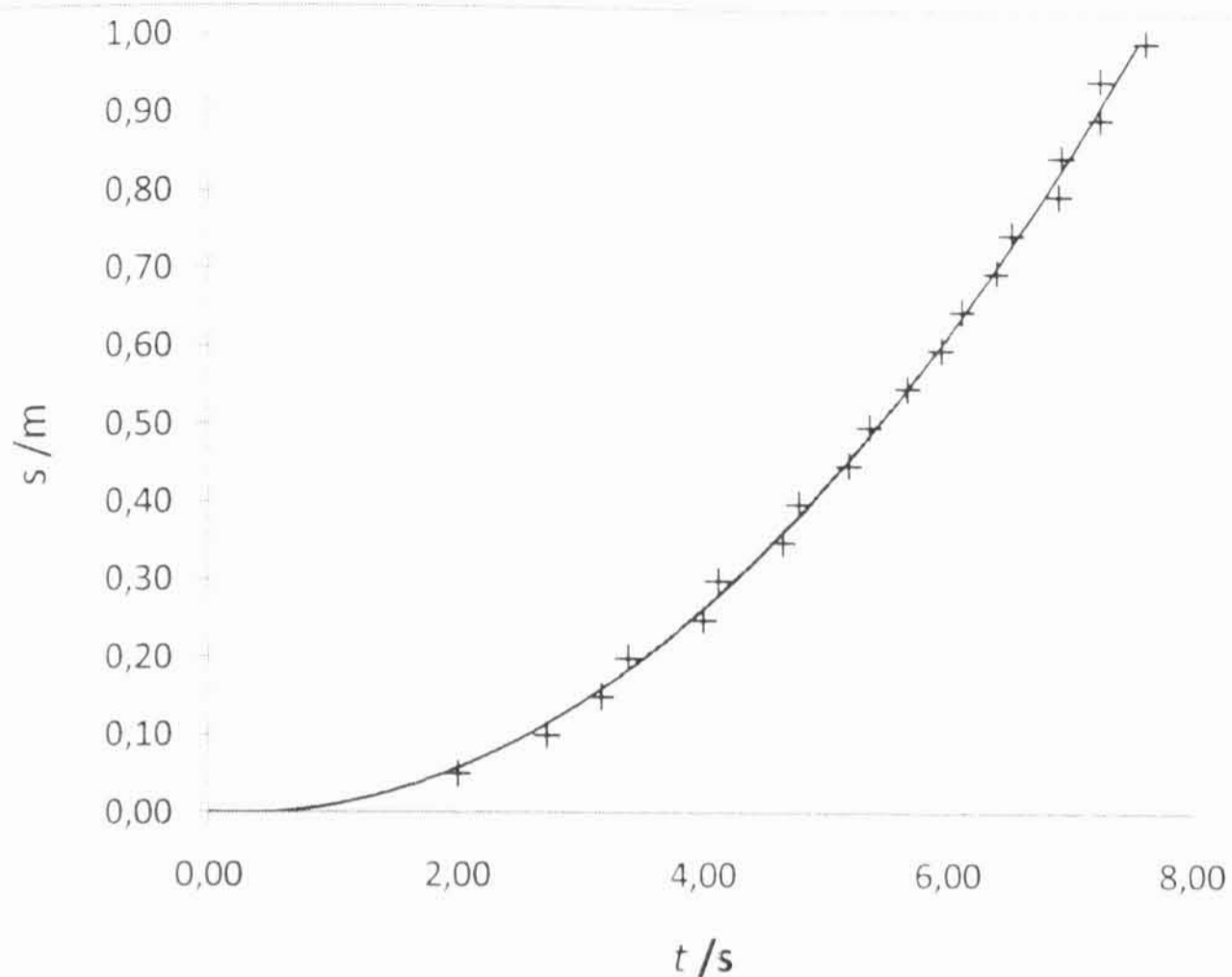
Při demonstraci zjišťujeme závislost dráhy na čase. K změření závislosti dráhy na čase potřebujeme změřit čas, který potřebuje vozík k uražení vybraných vzdáleností. Je zde nutno uvědomit si dle zapojení měřicího čidla, kde se nalézá uvažovaná vzdálenost (dráha). Při uváděném zapojení dráhu měříme vždy jako vzdálenost středu měřicího čidla a k němu bližšímu okraji křídélka.

V tabulce 2.3.1 jsou uvedeny v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka.

Tab. 2.3.1 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0.05	2,010	1,987	2,028	2,012	2,034	1,991	1,981	2,001	2,008	2,009	2,01	0,02
0.10	2,729	2,703	2,766	2,710	2,729	2,729	2,750	2,734	2,759	2,728	2,73	0,02
0.15	3,171	3,151	3,194	3,198	3,164	3,205	3,147	3,160	3,179	3,148	3,17	0,02
0.20	3,383	3,398	3,365	3,366	3,379	3,426	3,372	3,379	3,419	3,431	3,39	0,02
0.25	3,989	3,991	3,991	3,932	4,036	3,998	3,986	4,028	4,048	4,040	4,00	0,03
0.30	4,126	4,157	4,122	4,080	4,108	4,145	4,105	4,087	4,183	4,099	4,12	0,03
0.35	4,640	4,607	4,708	4,592	4,683	4,693	4,609	4,631	4,682	4,694	4,65	0,04
0.40	4,789	4,722	4,828	4,844	4,787	4,819	4,717	4,853	4,738	4,723	4,78	0,05
0.45	5,194	5,266	5,125	5,121	5,271	5,153	5,183	5,226	5,156	5,232	5,19	0,05
0.50	5,342	5,303	5,394	5,407	5,410	5,308	5,307	5,336	5,399	5,405	5,36	0,04
0.55	5,684	5,696	5,684	5,607	5,709	5,668	5,730	5,635	5,656	5,663	5,67	0,03
0.60	5,956	5,921	6,012	5,946	5,968	5,896	5,921	6,029	5,913	5,915	5,95	0,04
0.65	6,127	6,194	6,111	6,114	6,085	6,156	6,075	6,094	6,111	6,089	6,12	0,03
0.70	6,413	6,381	6,436	6,396	6,337	6,417	6,456	6,393	6,330	6,431	6,40	0,04
0.75	6,533	6,528	6,460	6,478	6,566	6,615	6,618	6,455	6,557	6,458	6,53	0,06
0.80	6,903	6,994	6,909	6,837	6,990	6,830	6,951	6,913	6,978	6,818	6,91	0,06
0.85	6,911	6,932	6,995	6,926	6,839	6,891	7,001	7,003	6,916	6,933	6,93	0,05
0.90	7,224	7,297	7,230	7,276	7,239	7,308	7,305	7,251	7,210	7,187	7,25	0,04
0.95	7,265	7,223	7,178	7,192	7,368	7,275	7,255	7,335	7,163	7,233	7,25	0,06
1.00	7,635	7,619	7,667	7,631	7,663	7,586	7,733	7,560	7,567	7,632	7,63	0,05

Tabulka 2.3.1 je měřena s vozíkem o hmotnosti 207 g při použití roztahovacího závaží 1 g



Graf 2.2.1 Závislost dráhy na čase vozíku o hmotnosti 207 g při použití roztahovacího závaží 1 g

Graf je prokládán polynomickou závislostí druhého stupně procházející bodem [0,0] s rovnicí:

$$s = 0,0173t^2 - 0,0086t$$

Jelikož vycházíme z předpokladu, že se jedná o rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, který se pohybuje dle rovnice:

$$s = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + s_0$$

Jelikož jsme volili soustavu souřadnic tak aby bylo  $s_0 = 0$ , byla spojnice volena procházející bodem [0,0]. Z přítomnosti lineárního členu polynomické závislosti spojnice lze usuzovat na nenulovou počáteční rychlost.

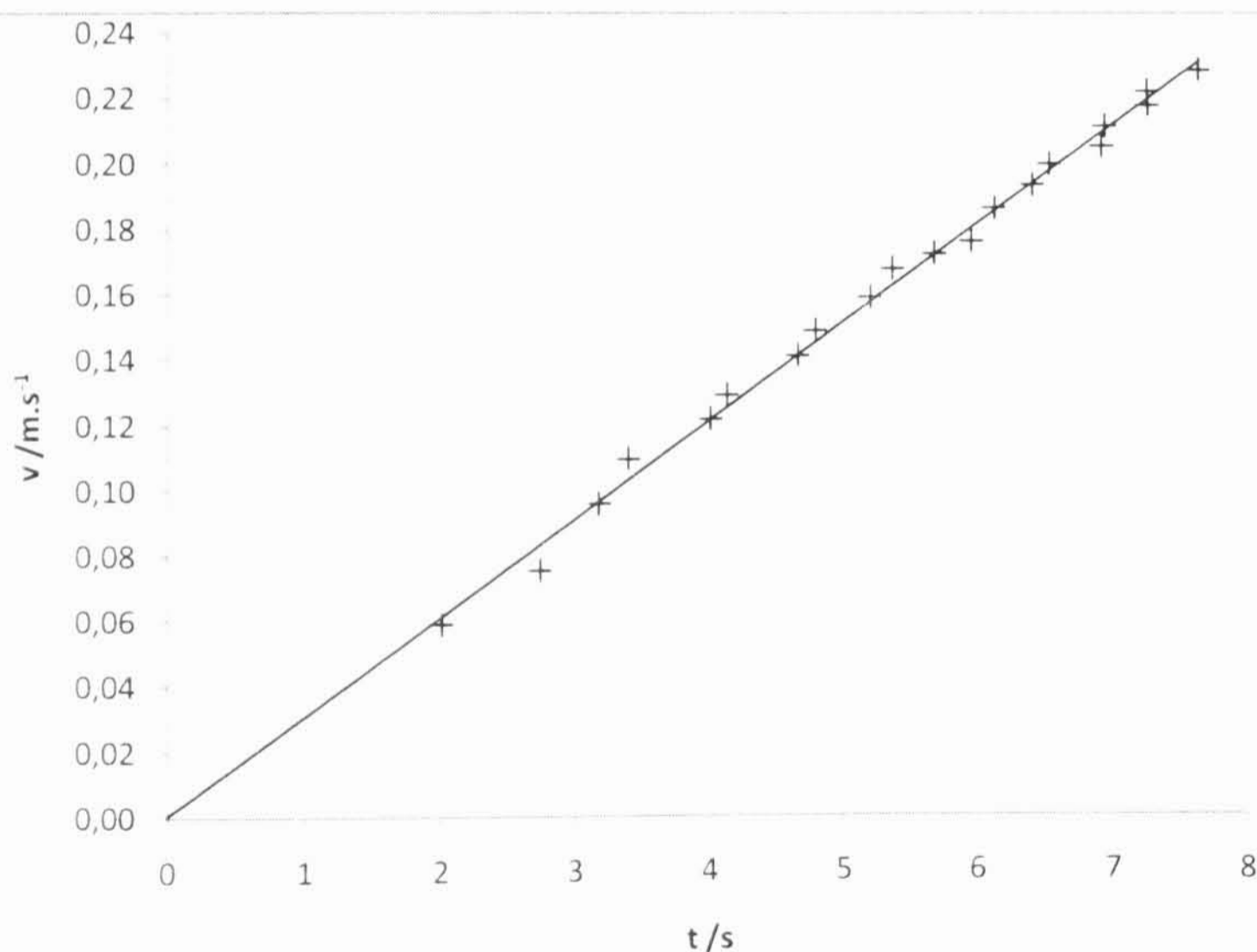
Dále provedeme měření závislosti „skoro okamžité“ rychlosti na čase. Pojem „skoro okamžité rychlosti“ používal *Doc. RNDr. Milan Rojko, CSc.*, jako pojem pro průměrnou rychlost na velmi krátkém úseku. Tento pojem tedy budu nadále používat, jelikož přesně vystihuje situaci. Měření „skoro okamžité“ rychlosti lze provést měření průchodu úzkého křídélka (2cm) skrz měřicí čidlo. V případě demonstrace žákům lze připomenout, že se jedná o průměrnou rychlost na velmi krátkém úseku.

V tabulce 2.3.2 jsou uvedeny v prvním sloupci pozice měřicího čidla  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby je určena „skoro okamžitá“ rychlost tohoto průchodu  $v$ ,  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti.



s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	Δt / ms	v / m.s <sup>-1</sup>	Δv / m.s <sup>-1</sup>
0,05	329,32	332,85	334,24	333,09	331,11	329,80	332,57	327,53	333,39	333,27	331,7	2,1	0,0603	0,0004
0,10	265,75	264,09	265,94	267,10	263,37	261,88	266,03	264,19	264,27	263,95	264,7	1,5	0,0756	0,0004
0,15	207,55	209,37	205,88	210,50	206,78	205,49	210,16	206,45	207,81	208,40	207,8	1,7	0,0962	0,0008
0,20	178,13	180,39	176,09	178,76	175,63	178,05	180,08	179,41	175,46	180,18	178,2	1,8	0,1122	0,0011
0,25	164,67	166,04	166,23	162,78	165,41	163,21	166,70	166,95	163,30	165,74	165,1	1,4	0,1211	0,0011
0,30	151,26	149,72	150,47	149,25	152,46	150,91	149,54	151,25	149,85	152,73	150,7	1,1	0,1327	0,0010
0,35	141,39	140,79	141,89	140,46	140,62	142,29	141,90	141,00	139,47	140,23	141,0	0,8	0,1418	0,0008
0,40	132,42	132,07	133,42	133,79	133,73	132,85	132,07	134,06	132,38	131,06	132,8	0,9	0,1506	0,0010
0,45	126,18	126,55	126,23	126,64	125,19	127,86	127,34	127,98	127,22	126,62	126,8	0,8	0,1578	0,0010
0,50	118,55	119,13	118,72	116,80	119,67	117,53	117,65	118,47	120,01	119,96	118,6	1,0	0,1686	0,0015
0,55	115,21	113,74	116,35	113,49	116,51	115,13	114,05	116,68	114,63	116,40	115,2	1,2	0,1736	0,0017
0,60	112,67	111,89	111,42	111,13	113,93	114,32	112,33	112,81	112,46	113,69	112,7	1,0	0,1775	0,0016
0,65	106,81	107,61	105,24	106,95	105,67	107,57	108,08	105,94	105,47	107,01	106,6	0,9	0,1876	0,0017
0,70	103,56	102,80	104,54	104,90	105,05	103,25	104,69	104,84	102,49	102,87	103,9	1,0	0,1925	0,0018
0,75	100,11	98,97	100,67	101,23	98,75	100,61	99,89	100,39	100,86	98,63	100,0	0,9	0,2000	0,0018
0,80	97,66	97,96	97,70	96,51	96,82	97,76	98,75	97,29	96,43	98,66	97,6	0,8	0,2050	0,0016
0,85	94,59	95,59	95,02	93,24	95,10	95,73	94,80	93,65	94,46	93,85	94,6	0,8	0,2114	0,0017
0,90	91,63	92,52	92,86	92,99	90,26	92,69	91,64	91,89	91,91	90,44	91,9	0,9	0,2177	0,0021
0,95	89,94	89,45	89,26	90,20	90,59	90,69	89,52	89,22	90,51	91,05	90,0	0,6	0,2221	0,0015
1,00	87,15	87,51	86,61	87,24	87,33	86,85	87,59	85,93	87,34	87,58	87,1	0,5	0,2296	0,0013

Tabulka 2.3.2 Vozík o hmotnosti 207 g při použití roztahovacího závaží 1 g



Graf 2.3.2 Závislost skoro okamžité rychlosti na čase

V grafu 2.2.2 je použita lineární spojnice:

$$v = 0,0303t + 0,0005$$

Tato spojnice má spolehlivost:

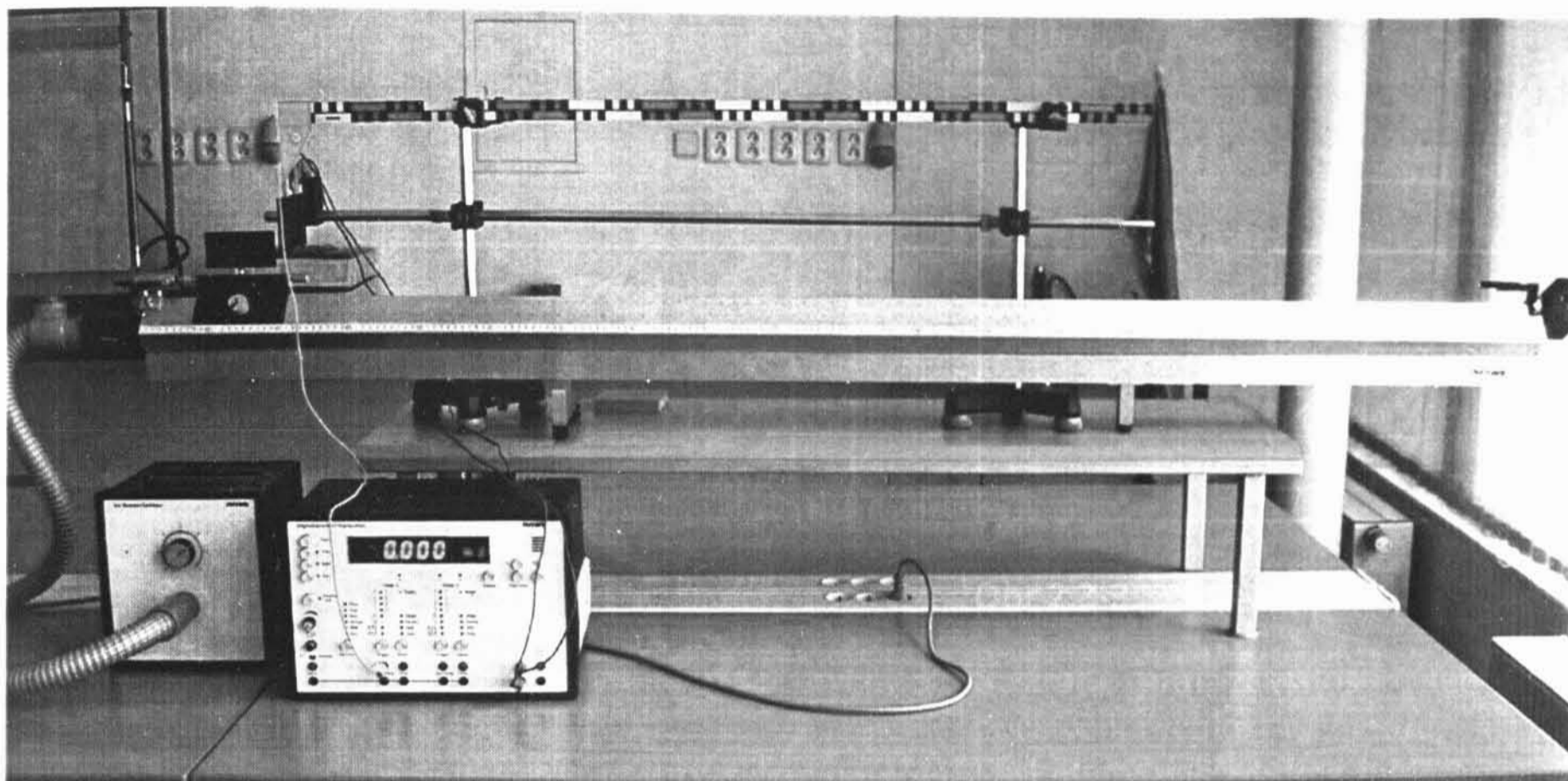
$$R^2 = 0,9953$$

Graf 2.3.2 je závislostí „skoro okamžité“ rychlosti na čase, který je brán z první části úlohy. Jak je patrné jedná se o lineární závislost. Záměrně nebyl volen průchod spojnice bodem [0,0] z důvodu nenulové počáteční rychlosti  $v_0$ . Počáteční rychlost je způsobena zpětným couvnutím, způsobeným přitažením magnetu startéru. V případě pokud bychom startér

nenatahovali do krajní pozice, ale do střední pozice, efektu nenulové počáteční rychlosti bychom se nevyvarovali. Přitahování magnetu spolu s odrazem od startovacího zařízení by způsobilo kladnou počáteční rychlost, což by v případě demonstrace studentům nemuselo být z počátku zřejmé a tudíž méně názorné. Efekt počáteční rychlosti je v řádu chyb tudíž je možno tuto hodnotu zanedbat a brát pohyb vozíku jako rovnoměrně zrychlený pohyb s nulovou počáteční rychlostí.

## 2.4 Ověření II. Newtonova zákona

### 2.4.1 Ověření II. Newtonova zákona - zadání



Obr. 2.4-1 Ověření II. Newtonova zákona

#### Úkol

Využijte vzduchovou dráhu k demonstraci II. Newtonova zákona a jeho ověření.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmyhadlo, čítač, měřící čidlo, vozík, startovací zařízení, křídélko 2 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče, závaží, kladka.

#### Časová náročnost

20 minut varianta

#### Klíčová slova

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, zrychlení, dráha, průměrná rychlost, okamžitá rychlost, tíhová síla, II. Newtonův zákon

#### Příprava

1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmyhadlo. Připevněte startovací zařízení a kladku
2. Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřící zařízení.
3. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
4. Připravte vozík s křídélkem (vpravo s magnetickou příchytkou, vlevo s háčkem).
5. Zapněte dmyhadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.

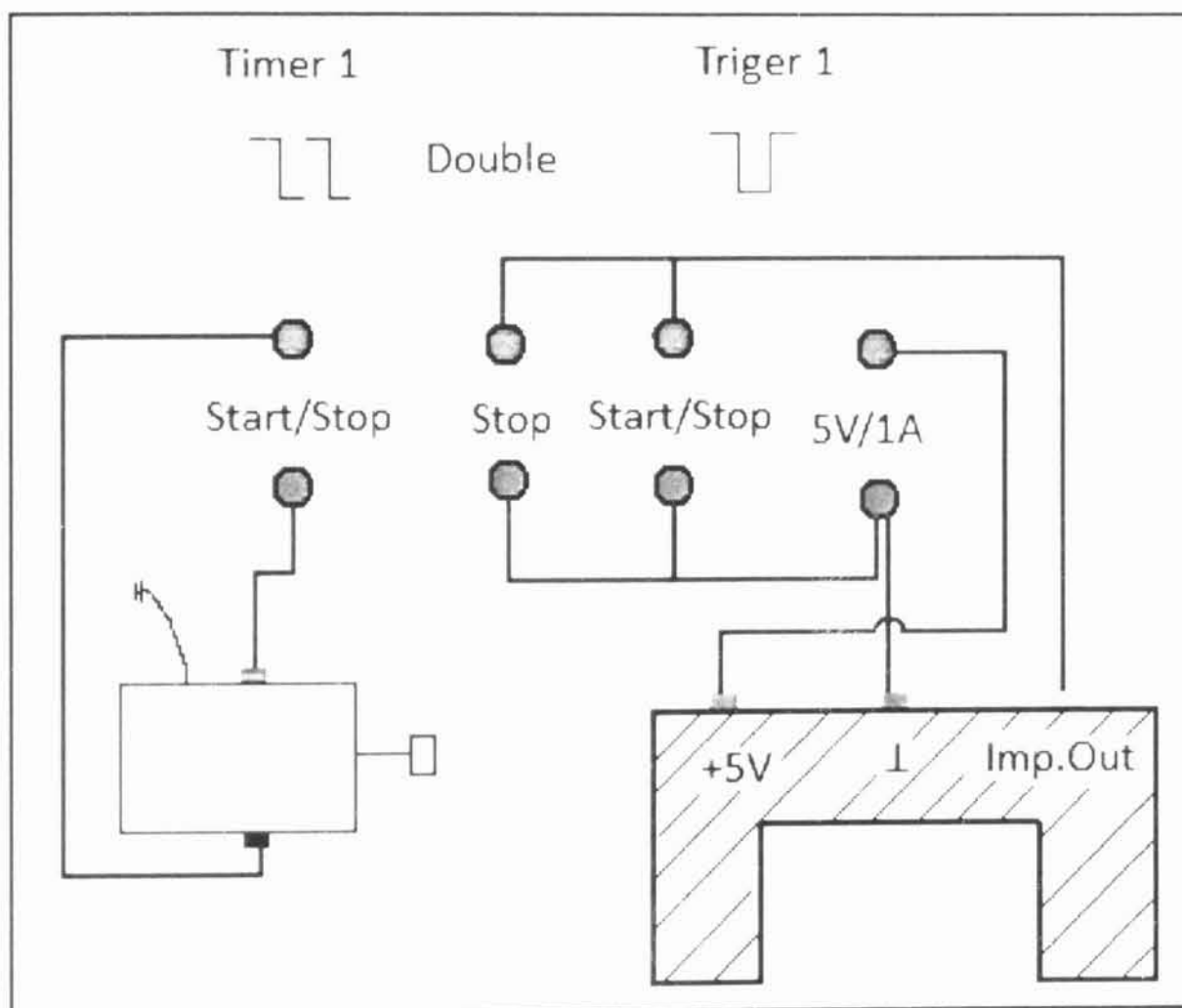
6. K vozíku připevněte nit, ved'te ji přes kladku a na její druhý konec zavěste závaží 1 g (závaží budete měnit dle potřeby úlohy).

(pozor: Při měření vždy vozík ručně zastavujte, tak aby nenarážel do koncové zarážky z důvodu jejího možného poničení.)

### Provedení

1. Proměřte závislost „skoro okamžitě“ rychlosti na čase při různé roztahovací síle a sestrojte graf této závislosti.
2. Proměřte závislost „skoro okamžitě“ rychlosti na čase při různé hmotnosti vozíku a sestrojte graf této závislosti.
3. Porovnejte grafy s teoretickými hodnotami. A jak byste s žáky na základě naměřených hodnot odvodili II. Newtonův zákon.

Měření provádějte se zapojením dle obr. 2.4-2.



Obr. 2.4-2

## 2.4.2 Ověření II. Newtonova zákona - vypracování

V této úloze demonstrujeme ověření II. Newtonova zákona na základě znalosti rovnoměrného přímočarého pohybu, který je zde reprezentován roztahováním vozíku pomocí závaží. Závaží zde poskytuje konstantní sílu (hmotnost nitě zanedbáváme) dle vzorce:

$$F_g = mg$$

Síla je zde tedy tíhová síla závaží, která je rovna součinu hmotnosti závaží  $m$  a tíhového zrychlení  $g$ . Tato síla je urychlující silou pro celou soustavu. Tudiž musí platit dle II. Newtonova zákona:

$$mg = (m + M)a$$

Kde  $M$  je hmotnost vozíku,  $a$  je zrychlení soustavy.

V našem případě je hmotnost vozíku řádově větší, než hmotnost závaží, proto můžeme hmotnost závaží zanedbat. Dopouštíme se zde řádové chyby v procentech. V případě, že by však bylo závaží srovnatelné, musíme s jeho hmotností již počítat. Dokonce pokud by nastal případ, že by závaží bylo řádově větší než hmotnost vozíku, soustava by se chovala takřka jako volný pád samotného závaží. Proto dále budeme již uvažovat, v našem případě, že můžeme přibližně počítat se vztahem:

$$mg = Ma$$

Jestliže využijeme vztahu pro rovnoměrně zrychlený pohyb:

$$v = at + v_0$$

Můžeme se pokusit ověřit II. Newtonův zákon. V prvním případě budeme uvažovat různou roztahovací sílu, tj. budeme používat různou hmotnost závaží. Ze směrnice grafu závislosti „skoro okamžité“ rychlosti na čase můžeme určit zrychlení. Zrychlení by se mělo měnit v závislosti na použitém závaží.

Tabulky 2.4.1. až 2.4.10. uvádějí v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka, při použití závaží 1 g až 10 g.

V tabulkách 2.4.11. až 2.4.20. jsou uvedeny v prvním sloupci pozice měřicího čidla  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby je určena „skoro okamžitá“ rychlost tohoto průchodu  $v$ ,  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti, při použití závaží 1 g až 10 g.

Tab. 2.4.1 Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	2,010	1,987	2,028	2,012	2,034	1,991	1,981	2,001	2,008	2,009	2,01	0,02
0,10	2,729	2,703	2,766	2,710	2,729	2,729	2,750	2,734	2,759	2,728	2,73	0,02
0,15	3,171	3,151	3,194	3,198	3,164	3,205	3,147	3,160	3,179	3,148	3,17	0,02
0,20	3,383	3,398	3,365	3,366	3,379	3,426	3,372	3,379	3,419	3,431	3,39	0,02
0,25	3,989	3,991	3,991	3,932	4,036	3,998	3,986	4,028	4,048	4,040	4,00	0,03
0,30	4,126	4,157	4,122	4,080	4,108	4,145	4,105	4,087	4,183	4,099	4,12	0,03
0,35	4,640	4,607	4,708	4,592	4,683	4,693	4,609	4,631	4,682	4,694	4,65	0,04
0,40	4,789	4,722	4,828	4,844	4,787	4,819	4,717	4,853	4,738	4,723	4,78	0,05
0,45	5,194	5,266	5,125	5,121	5,271	5,153	5,183	5,226	5,156	5,232	5,19	0,05
0,50	5,342	5,303	5,394	5,407	5,410	5,308	5,307	5,336	5,399	5,405	5,36	0,04
0,55	5,684	5,696	5,684	5,607	5,709	5,668	5,730	5,635	5,656	5,663	5,67	0,03
0,60	5,956	5,921	6,012	5,946	5,968	5,896	5,921	6,029	5,913	5,915	5,95	0,04
0,65	6,127	6,194	6,111	6,114	6,085	6,156	6,075	6,094	6,111	6,089	6,12	0,03
0,70	6,413	6,381	6,436	6,396	6,337	6,417	6,456	6,393	6,330	6,431	6,40	0,04
0,75	6,533	6,528	6,460	6,478	6,566	6,615	6,618	6,455	6,557	6,458	6,53	0,06
0,80	6,903	6,994	6,909	6,837	6,990	6,830	6,951	6,913	6,978	6,818	6,91	0,06
0,85	6,911	6,932	6,995	6,926	6,839	6,891	7,001	7,003	6,916	6,933	6,93	0,05
0,90	7,224	7,297	7,230	7,276	7,239	7,308	7,305	7,251	7,210	7,187	7,25	0,04
0,95	7,265	7,223	7,178	7,192	7,368	7,275	7,255	7,335	7,163	7,233	7,25	0,06
1,00	7,635	7,619	7,667	7,631	7,663	7,586	7,733	7,560	7,567	7,632	7,63	0,05

Tab. 2.4.1. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 1$  g

Tab. 2.4.2. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	1,393	1,388	1,413	1,400	1,407	1,398	1,406	1,387	1,400	1,404	1,400	0,008
0,10	1,826	1,825	1,830	1,800	1,826	1,845	1,809	1,815	1,845	1,849	1,827	0,015
0,15	2,173	2,147	2,143	2,174	2,185	2,142	2,146	2,160	2,205	2,178	2,165	0,020
0,20	2,384	2,409	2,393	2,392	2,397	2,401	2,358	2,410	2,400	2,365	2,391	0,016
0,25	2,700	2,672	2,723	2,663	2,674	2,701	2,695	2,701	2,684	2,719	2,693	0,019
0,30	2,881	2,920	2,853	2,870	2,865	2,857	2,842	2,910	2,894	2,904	2,880	0,025
0,35	3,114	3,077	3,087	3,137	3,158	3,132	3,150	3,075	3,093	3,141	3,116	0,030
0,40	3,261	3,239	3,229	3,271	3,267	3,270	3,216	3,218	3,213	3,231	3,242	0,022
0,45	3,465	3,473	3,513	3,446	3,423	3,491	3,432	3,466	3,445	3,427	3,458	0,028
0,50	3,624	3,599	3,587	3,582	3,650	3,594	3,609	3,661	3,669	3,617	3,619	0,030
0,55	3,774	3,721	3,784	3,808	3,764	3,718	3,722	3,770	3,773	3,806	3,764	0,032
0,60	3,950	3,922	3,892	3,980	3,965	3,948	3,972	3,991	4,002	3,997	3,962	0,033
0,65	4,051	4,041	4,001	4,035	4,045	4,009	4,097	4,033	4,050	4,016	4,038	0,026
0,70	4,209	4,214	4,170	4,181	4,158	4,155	4,226	4,208	4,149	4,210	4,188	0,027
0,75	4,305	4,277	4,283	4,307	4,345	4,259	4,299	4,265	4,367	4,321	4,303	0,033
0,80	4,475	4,470	4,457	4,418	4,454	4,417	4,505	4,540	4,509	4,518	4,476	0,039
0,85	4,540	4,604	4,489	4,571	4,575	4,587	4,566	4,520	4,566	4,603	4,562	0,035
0,90	4,684	4,661	4,729	4,703	4,676	4,672	4,679	4,624	4,702	4,729	4,686	0,030
0,95	4,760	4,720	4,741	4,781	4,722	4,738	4,739	4,733	4,743	4,699	4,738	0,021
1,00	4,860	4,839	4,796	4,814	4,800	4,862	4,841	4,869	4,890	4,805	4,838	0,031

Tab. 2.4.2. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 2$  g

Tab. 2.4.3. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	1,052	1,051	1,051	1,037	1,061	1,052	1,041	1,037	1,043	1,042	1,047	0,007
0,10	1,391	1,394	1,406	1,382	1,380	1,375	1,381	1,384	1,393	1,403	1,389	0,010
0,15	1,668	1,677	1,647	1,657	1,679	1,673	1,679	1,671	1,659	1,647	1,666	0,012
0,20	1,818	1,822	1,803	1,807	1,793	1,814	1,836	1,816	1,810	1,791	1,811	0,013
0,25	2,102	2,090	2,130	2,111	2,129	2,077	2,110	2,084	2,110	2,103	2,105	0,017
0,30	2,216	2,214	2,218	2,210	2,199	2,228	2,240	2,193	2,247	2,237	2,220	0,017
0,35	2,448	2,436	2,478	2,479	2,456	2,416	2,433	2,440	2,459	2,431	2,448	0,019
0,40	2,568	2,582	2,586	2,548	2,585	2,559	2,597	2,584	2,605	2,575	2,579	0,016
0,45	2,743	2,730	2,726	2,748	2,727	2,778	2,781	2,719	2,742	2,751	2,745	0,020
0,50	2,874	2,855	2,897	2,872	2,895	2,836	2,875	2,838	2,903	2,914	2,876	0,025
0,55	3,004	3,008	3,003	3,021	2,996	2,972	3,043	3,039	2,965	3,032	3,008	0,025
0,60	3,103	3,094	3,110	3,072	3,061	3,097	3,064	3,077	3,112	3,088	3,088	0,018
0,65	3,240	3,205	3,240	3,202	3,245	3,220	3,219	3,196	3,193	3,239	3,220	0,019
0,70	3,372	3,409	3,386	3,364	3,372	3,401	3,384	3,411	3,323	3,363	3,379	0,025
0,75	3,457	3,425	3,450	3,411	3,439	3,434	3,454	3,434	3,444	3,422	3,437	0,014
0,80	3,608	3,644	3,577	3,661	3,608	3,582	3,604	3,589	3,585	3,573	3,603	0,028
0,85	3,658	3,638	3,668	3,668	3,659	3,693	3,698	3,666	3,646	3,713	3,671	0,022
0,90	3,815	3,861	3,774	3,849	3,806	3,821	3,854	3,825	3,807	3,866	3,828	0,028
0,95	3,847	3,801	3,864	3,880	3,814	3,865	3,902	3,877	3,904	3,842	3,860	0,032
1,00	4,014	3,983	4,027	3,990	3,988	3,998	4,029	4,022	3,996	4,038	4,009	0,019

Tab. 2.4.3. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 3$  g

Tab. 2.4.4. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,879	0,876	0,890	0,873	0,889	0,877	0,873	0,886	0,867	0,889	0,880	0,008
0,10	1,177	1,187	1,183	1,168	1,169	1,167	1,174	1,163	1,166	1,177	1,173	0,007
0,15	1,442	1,437	1,455	1,438	1,429	1,447	1,456	1,461	1,454	1,427	1,445	0,011
0,20	1,600	1,601	1,582	1,607	1,580	1,608	1,615	1,615	1,621	1,612	1,604	0,013
0,25	1,815	1,825	1,798	1,800	1,829	1,814	1,827	1,822	1,807	1,841	1,818	0,013
0,30	1,935	1,906	1,947	1,947	1,961	1,906	1,918	1,962	1,936	1,936	1,935	0,019
0,35	2,113	2,103	2,130	2,127	2,083	2,126	2,125	2,126	2,100	2,126	2,116	0,015
0,40	2,208	2,188	2,215	2,240	2,205	2,229	2,223	2,199	2,181	2,223	2,211	0,018
0,45	2,366	2,378	2,365	2,389	2,397	2,357	2,375	2,396	2,400	2,350	2,377	0,017
0,50	2,468	2,433	2,462	2,483	2,465	2,467	2,446	2,494	2,458	2,492	2,467	0,018
0,55	2,590	2,586	2,620	2,574	2,563	2,601	2,608	2,585	2,600	2,614	2,594	0,017
0,60	2,690	2,721	2,660	2,676	2,704	2,718	2,695	2,687	2,705	2,671	2,693	0,019
0,65	2,792	2,807	2,760	2,813	2,826	2,822	2,831	2,798	2,800	2,822	2,807	0,020
0,70	2,895	2,863	2,886	2,925	2,882	2,865	2,923	2,899	2,927	2,881	2,895	0,023
0,75	2,978	3,014	2,971	2,948	2,995	2,943	2,982	2,936	2,937	2,993	2,970	0,026
0,80	3,085	3,080	3,082	3,103	3,079	3,071	3,076	3,049	3,076	3,051	3,075	0,015
0,85	3,151	3,128	3,120	3,190	3,138	3,190	3,143	3,129	3,153	3,173	3,152	0,024
0,90	3,241	3,248	3,242	3,255	3,230	3,201	3,261	3,235	3,210	3,202	3,233	0,020
0,95	3,313	3,309	3,307	3,264	3,301	3,326	3,337	3,290	3,266	3,312	3,303	0,022
1,00	3,422	3,460	3,393	3,432	3,385	3,445	3,453	3,419	3,402	3,471	3,428	0,028

Tab. 2.4.4. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 4$  g

Tab. 2.4.5. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,766	0,777	0,765	0,765	0,775	0,768	0,760	0,776	0,769	0,777	0,770	0,006
0,10	1,027	1,036	1,018	1,034	1,034	1,032	1,017	1,019	1,028	1,037	1,028	0,007
0,15	1,248	1,263	1,250	1,254	1,254	1,251	1,247	1,246	1,252	1,252	1,252	0,005
0,20	1,393	1,391	1,410	1,373	1,389	1,376	1,401	1,373	1,394	1,410	1,391	0,013
0,25	1,585	1,608	1,589	1,564	1,584	1,589	1,584	1,599	1,593	1,593	1,589	0,011
0,30	1,704	1,713	1,707	1,720	1,689	1,729	1,723	1,719	1,685	1,719	1,711	0,014
0,35	1,856	1,880	1,882	1,862	1,868	1,833	1,857	1,859	1,843	1,862	1,860	0,014
0,40	1,948	1,936	1,959	1,962	1,932	1,966	1,948	1,974	1,948	1,923	1,950	0,015
0,45	2,087	2,070	2,096	2,110	2,085	2,100	2,084	2,057	2,109	2,091	2,089	0,016
0,50	2,195	2,198	2,226	2,199	2,195	2,224	2,178	2,187	2,179	2,198	2,198	0,015
0,55	2,293	2,289	2,327	2,308	2,316	2,278	2,318	2,272	2,271	2,296	2,297	0,019
0,60	2,395	2,400	2,366	2,361	2,393	2,366	2,422	2,387	2,418	2,420	2,393	0,022
0,65	2,479	2,482	2,446	2,508	2,485	2,455	2,499	2,496	2,447	2,480	2,478	0,021
0,70	2,570	2,579	2,595	2,552	2,559	2,595	2,590	2,547	2,578	2,532	2,570	0,021
0,75	2,651	2,633	2,687	2,664	2,656	2,671	2,670	2,687	2,637	2,640	2,660	0,019
0,80	2,744	2,705	2,726	2,769	2,749	2,752	2,753	2,735	2,721	2,764	2,742	0,019
0,85	2,811	2,831	2,832	2,852	2,832	2,827	2,837	2,787	2,787	2,831	2,823	0,020
0,90	2,921	2,889	2,907	2,897	2,924	2,905	2,910	2,943	2,918	2,901	2,912	0,015
0,95	2,961	2,961	2,965	2,945	2,937	2,932	2,957	2,946	2,978	2,934	2,952	0,014
1,00	3,071	3,044	3,045	3,091	3,100	3,068	3,093	3,078	3,063	3,078	3,073	0,018

Tab. 2.4.5. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 5$  g

Tab. 2.4.6. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,695	0,694	0,695	0,704	0,698	0,699	0,690	0,696	0,700	0,686	0,696	0,005
0,10	0,932	0,931	0,923	0,934	0,941	0,927	0,934	0,942	0,942	0,935	0,934	0,006
0,15	1,135	1,138	1,149	1,122	1,125	1,142	1,131	1,132	1,119	1,136	1,133	0,009
0,20	1,279	1,263	1,265	1,285	1,266	1,287	1,275	1,279	1,269	1,288	1,276	0,009
0,25	1,441	1,445	1,438	1,456	1,430	1,423	1,457	1,457	1,440	1,426	1,441	0,012
0,30	1,545	1,567	1,546	1,552	1,547	1,566	1,523	1,554	1,561	1,532	1,549	0,013
0,35	1,687	1,662	1,678	1,679	1,674	1,678	1,709	1,697	1,675	1,663	1,680	0,014
0,40	1,780	1,774	1,795	1,777	1,776	1,782	1,767	1,791	1,793	1,769	1,780	0,009
0,45	1,897	1,882	1,874	1,901	1,880	1,883	1,880	1,904	1,909	1,877	1,889	0,012
0,50	1,991	2,007	2,010	1,981	1,979	1,971	1,963	1,991	1,980	1,963	1,984	0,015
0,55	2,083	2,069	2,092	2,072	2,083	2,105	2,058	2,095	2,092	2,054	2,080	0,016
0,60	2,174	2,194	2,176	2,145	2,196	2,157	2,190	2,174	2,203	2,191	2,180	0,017
0,65	2,252	2,229	2,223	2,261	2,238	2,233	2,272	2,266	2,279	2,223	2,248	0,020
0,70	2,338	2,323	2,360	2,339	2,348	2,317	2,360	2,328	2,318	2,342	2,337	0,015
0,75	2,408	2,419	2,442	2,422	2,412	2,419	2,374	2,415	2,380	2,408	2,410	0,019
0,80	2,493	2,524	2,470	2,514	2,498	2,462	2,525	2,529	2,467	2,500	2,498	0,024
0,85	2,553	2,516	2,587	2,556	2,524	2,589	2,529	2,521	2,588	2,560	2,552	0,027
0,90	2,639	2,645	2,620	2,668	2,676	2,620	2,678	2,647	2,628	2,655	2,648	0,020
0,95	2,689	2,703	2,693	2,650	2,728	2,671	2,657	2,707	2,656	2,694	2,685	0,024
1,00	2,781	2,818	2,741	2,741	2,813	2,753	2,817	2,760	2,787	2,743	2,775	0,030

Tab. 2.4.6. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 6$  g



Tab. 2.4.7. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t1/s$	$t2/s$	$t3/s$	$t4/s$	$t5/s$	$t6/s$	$t7/s$	$t8/s$	$t9/s$	$t10/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,631	0,627	0,627	0,636	0,634	0,631	0,634	0,639	0,623	0,631	0,631	0,004
0,10	0,855	0,867	0,854	0,855	0,859	0,853	0,844	0,859	0,858	0,850	0,855	0,006
0,15	1,039	1,028	1,030	1,054	1,041	1,028	1,047	1,040	1,025	1,029	1,036	0,009
0,20	1,168	1,162	1,184	1,182	1,175	1,163	1,173	1,159	1,155	1,151	1,167	0,011
0,25	1,324	1,337	1,325	1,334	1,317	1,328	1,310	1,338	1,332	1,329	1,327	0,008
0,30	1,421	1,409	1,417	1,412	1,433	1,415	1,422	1,411	1,427	1,438	1,421	0,009
0,35	1,553	1,569	1,542	1,571	1,531	1,565	1,574	1,558	1,548	1,557	1,557	0,013
0,40	1,643	1,623	1,660	1,649	1,667	1,630	1,636	1,629	1,666	1,632	1,644	0,015
0,45	1,749	1,745	1,735	1,727	1,734	1,734	1,758	1,765	1,738	1,726	1,741	0,012
0,50	1,833	1,844	1,820	1,851	1,833	1,831	1,838	1,859	1,836	1,813	1,836	0,013
0,55	1,923	1,930	1,908	1,924	1,924	1,950	1,915	1,903	1,948	1,905	1,923	0,016
0,60	2,008	1,978	1,997	2,019	2,022	1,995	2,029	1,993	1,996	2,004	2,004	0,015
0,65	2,082	2,111	2,074	2,099	2,051	2,111	2,105	2,060	2,059	2,076	2,083	0,021
0,70	2,158	2,175	2,138	2,159	2,188	2,160	2,187	2,166	2,170	2,132	2,163	0,017
0,75	2,228	2,207	2,231	2,217	2,195	2,237	2,201	2,243	2,229	2,230	2,222	0,015
0,80	2,309	2,285	2,301	2,295	2,315	2,315	2,318	2,308	2,328	2,336	2,311	0,014
0,85	2,364	2,395	2,335	2,338	2,399	2,398	2,385	2,362	2,334	2,341	2,365	0,026
0,90	2,446	2,459	2,457	2,414	2,445	2,427	2,456	2,425	2,467	2,466	2,446	0,017
0,95	2,491	2,486	2,491	2,503	2,507	2,514	2,517	2,513	2,495	2,472	2,499	0,014
1,00	2,583	2,596	2,552	2,607	2,569	2,576	2,587	2,568	2,585	2,558	2,578	0,016

Tab. 2.4.7. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 7$  g

Tab. 2.4.8. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t1/s$	$t2/s$	$t3/s$	$t4/s$	$t5/s$	$t6/s$	$t7/s$	$t8/s$	$t9/s$	$t10/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,655	0,659	0,657	0,656	0,657	0,656	0,658	0,658	0,662	0,645	0,656	0,004
0,10	0,794	0,782	0,786	0,803	0,799	0,803	0,799	0,783	0,784	0,798	0,793	0,008
0,15	0,997	0,983	1,009	1,007	0,983	1,004	0,989	1,010	0,990	0,995	0,997	0,010
0,20	1,086	1,091	1,074	1,089	1,073	1,083	1,084	1,089	1,071	1,093	1,083	0,008
0,25	1,257	1,256	1,254	1,250	1,273	1,254	1,240	1,242	1,251	1,251	1,253	0,009
0,30	1,328	1,338	1,345	1,329	1,344	1,325	1,325	1,337	1,310	1,327	1,331	0,010
0,35	1,461	1,475	1,441	1,449	1,471	1,470	1,479	1,480	1,480	1,448	1,465	0,014
0,40	1,524	1,504	1,517	1,539	1,518	1,528	1,510	1,544	1,507	1,517	1,521	0,012
0,45	1,635	1,631	1,615	1,635	1,658	1,649	1,619	1,615	1,654	1,650	1,636	0,015
0,50	1,707	1,732	1,683	1,686	1,683	1,707	1,700	1,716	1,687	1,694	1,700	0,015
0,55	1,789	1,786	1,780	1,810	1,783	1,788	1,770	1,800	1,790	1,789	1,789	0,010
0,60	1,855	1,857	1,852	1,878	1,883	1,841	1,836	1,831	1,846	1,880	1,856	0,018
0,65	1,927	1,949	1,943	1,936	1,934	1,935	1,908	1,898	1,929	1,918	1,928	0,015
0,70	2,009	2,002	2,005	1,988	1,999	1,982	1,982	2,029	2,018	1,997	2,001	0,014
0,75	2,055	2,033	2,084	2,045	2,037	2,047	2,059	2,058	2,076	2,063	2,056	0,015
0,80	2,145	2,155	2,119	2,174	2,115	2,131	2,126	2,137	2,149	2,115	2,137	0,018
0,85	2,173	2,198	2,193	2,196	2,184	2,191	2,205	2,188	2,187	2,142	2,186	0,017
0,90	2,270	2,303	2,301	2,261	2,241	2,272	2,289	2,301	2,270	2,279	2,279	0,019
0,95	2,284	2,281	2,306	2,288	2,313	2,284	2,267	2,271	2,275	2,314	2,288	0,016
1,00	2,405	2,376	2,423	2,393	2,400	2,439	2,434	2,402	2,390	2,438	2,410	0,021

Tab. 2.4.8. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 8$  g

Tab. 2.4.9. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,627	0,621	0,628	0,621	0,630	0,630	0,621	0,621	0,627	0,627	0,625	0,004
0,10	0,862	0,858	0,850	0,850	0,851	0,863	0,849	0,863	0,854	0,864	0,856	0,006
0,15	0,975	0,964	0,961	0,988	0,966	0,981	0,977	0,982	0,975	0,968	0,974	0,008
0,20	1,015	1,026	1,022	1,027	1,013	1,019	1,002	1,029	1,016	1,018	1,019	0,008
0,25	1,216	1,232	1,227	1,233	1,229	1,232	1,221	1,218	1,219	1,204	1,223	0,009
0,30	1,255	1,257	1,245	1,266	1,273	1,259	1,238	1,268	1,270	1,273	1,260	0,011
0,35	1,404	1,391	1,408	1,397	1,423	1,396	1,384	1,395	1,400	1,417	1,402	0,011
0,40	1,433	1,440	1,423	1,452	1,436	1,449	1,448	1,430	1,434	1,428	1,437	0,009
0,45	1,563	1,551	1,567	1,576	1,578	1,552	1,565	1,583	1,563	1,546	1,564	0,012
0,50	1,609	1,626	1,599	1,622	1,597	1,602	1,618	1,622	1,600	1,602	1,610	0,011
0,55	1,702	1,722	1,709	1,719	1,684	1,707	1,690	1,687	1,688	1,700	1,701	0,013
0,60	1,765	1,791	1,746	1,766	1,764	1,773	1,741	1,771	1,747	1,750	1,761	0,015
0,65	1,828	1,803	1,825	1,804	1,839	1,804	1,816	1,810	1,810	1,809	1,815	0,011
0,70	1,900	1,926	1,889	1,890	1,907	1,884	1,878	1,887	1,927	1,920	1,901	0,017
0,75	1,943	1,926	1,940	1,919	1,944	1,962	1,944	1,953	1,915	1,940	1,939	0,014
0,80	2,032	2,010	2,042	2,020	2,006	2,011	2,027	2,035	2,042	2,061	2,029	0,016
0,85	2,049	2,078	2,056	2,038	2,029	2,053	2,070	2,054	2,071	2,019	2,052	0,018
0,90	2,157	2,151	2,165	2,172	2,144	2,160	2,142	2,126	2,173	2,174	2,156	0,015
0,95	2,149	2,128	2,135	2,149	2,157	2,162	2,156	2,146	2,163	2,172	2,152	0,013
1,00	2,270	2,237	2,273	2,255	2,248	2,295	2,261	2,300	2,270	2,280	2,269	0,019

Tab. 2.4.9. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 9$  g

Tab. 2.4.10. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_3/s$	$t_4/s$	$t_5/s$	$t_6/s$	$t_7/s$	$t_8/s$	$t_9/s$	$t_{10}/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,580	0,574	0,587	0,577	0,582	0,585	0,587	0,585	0,578	0,583	0,582	0,004
0,10	0,811	0,820	0,815	0,822	0,813	0,801	0,815	0,822	0,815	0,810	0,814	0,006
0,15	0,914	0,924	0,901	0,914	0,903	0,913	0,905	0,907	0,926	0,901	0,911	0,009
0,20	0,957	0,947	0,956	0,956	0,969	0,952	0,950	0,957	0,953	0,947	0,954	0,006
0,25	1,141	1,156	1,127	1,132	1,137	1,127	1,150	1,145	1,140	1,149	1,140	0,009
0,30	1,179	1,168	1,183	1,164	1,173	1,165	1,183	1,185	1,176	1,175	1,175	0,007
0,35	1,321	1,335	1,332	1,341	1,305	1,336	1,309	1,335	1,307	1,308	1,323	0,014
0,40	1,367	1,375	1,349	1,373	1,383	1,381	1,350	1,361	1,359	1,350	1,365	0,012
0,45	1,474	1,459	1,468	1,483	1,461	1,473	1,479	1,491	1,454	1,458	1,470	0,011
0,50	1,532	1,534	1,529	1,516	1,530	1,516	1,540	1,515	1,544	1,513	1,527	0,011
0,55	1,608	1,610	1,618	1,619	1,616	1,594	1,619	1,589	1,615	1,591	1,608	0,011
0,60	1,672	1,696	1,679	1,655	1,686	1,648	1,665	1,675	1,676	1,682	1,673	0,014
0,65	1,729	1,725	1,730	1,706	1,710	1,745	1,747	1,738	1,744	1,706	1,728	0,015
0,70	1,803	1,778	1,823	1,818	1,798	1,790	1,782	1,781	1,779	1,783	1,794	0,016
0,75	1,840	1,825	1,860	1,861	1,855	1,845	1,815	1,847	1,854	1,827	1,843	0,015
0,80	1,926	1,913	1,904	1,913	1,923	1,900	1,897	1,899	1,951	1,949	1,918	0,019
0,85	1,943	1,916	1,923	1,953	1,955	1,951	1,925	1,918	1,970	1,960	1,941	0,018
0,90	2,036	2,059	2,039	2,031	2,006	2,047	2,023	2,034	2,058	2,041	2,037	0,015
0,95	2,040	2,052	2,039	2,034	2,060	2,056	2,030	2,047	2,037	2,044	2,044	0,009
1,00	2,143	2,163	2,126	2,158	2,131	2,140	2,117	2,140	2,126	2,115	2,136	0,015

Tab. 2.4.10. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tab. 2.4.11. Rovnomerné zrýchlený prímočary pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	v / m.s <sup>-1</sup>	$\delta v / m.s^{-1}$
0,05	329,32	333,11	328,38	331,42	332,58	333,14	333,16	332,49	324,82	327,52	330,6	2,8	0,0605	0,0005
0,10	265,75	262,00	267,41	269,13	267,04	265,73	263,58	264,27	266,40	266,98	265,8	2,0	0,0752	0,0006
0,15	207,55	208,82	204,97	206,20	207,14	208,93	204,73	210,20	207,73	206,24	207,2	1,7	0,0965	0,0008
0,20	178,13	178,95	180,08	176,75	176,89	180,24	180,28	178,70	180,06	175,50	178,6	1,6	0,1120	0,0010
0,25	164,67	166,19	164,03	166,22	163,75	163,54	162,50	166,96	163,10	162,53	164,3	1,5	0,1217	0,0011
0,30	151,26	152,07	151,24	153,23	150,53	149,16	150,95	150,26	150,69	153,05	151,2	1,2	0,1322	0,0010
0,35	141,39	142,99	140,13	143,15	141,91	142,33	141,48	140,70	140,76	141,14	141,6	0,9	0,1412	0,0009
0,40	132,42	132,54	134,30	131,06	133,41	134,14	133,73	132,45	132,92	132,66	133,0	0,9	0,1504	0,0010
0,45	126,18	126,53	126,14	125,68	125,88	126,59	126,70	126,10	126,24	127,47	126,4	0,5	0,1583	0,0006
0,50	118,55	119,84	119,29	117,22	117,37	119,28	117,23	120,05	119,82	120,07	118,9	1,1	0,1682	0,0016
0,55	115,21	115,19	115,34	116,69	113,51	114,75	115,05	114,09	116,84	113,97	115,1	1,0	0,1738	0,0016
0,60	112,67	111,67	112,16	111,99	113,65	111,15	111,95	112,51	111,30	111,67	112,1	0,7	0,1785	0,0011
0,65	106,81	106,65	106,82	107,34	106,63	107,78	107,79	105,52	108,32	107,04	107,1	0,7	0,1868	0,0013
0,70	103,56	104,52	104,66	104,12	103,73	104,83	102,98	104,32	102,05	104,55	103,9	0,8	0,1924	0,0015
0,75	100,11	99,75	99,56	100,07	101,39	101,44	100,55	99,17	100,83	100,29	100,3	0,7	0,1994	0,0014
0,80	97,66	98,19	99,12	96,95	96,97	99,10	99,08	96,67	96,88	97,77	97,8	0,9	0,2044	0,0020
0,85	94,59	93,57	95,42	94,51	95,58	95,97	94,43	93,80	93,30	94,72	94,6	0,8	0,2114	0,0019
0,90	91,63	90,99	90,85	90,80	92,18	92,70	91,58	91,89	91,70	91,35	91,6	0,6	0,2184	0,0014
0,95	89,94	88,80	90,78	90,93	90,94	89,35	89,70	90,87	88,97	89,98	90,0	0,8	0,2222	0,0019
1,00	87,15	87,82	87,88	85,96	86,88	86,34	87,52	86,67	86,12	88,00	87,0	0,7	0,2298	0,0019

Tab. 2.4.11. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 1$  g

Tab. 2.4.12. Rovnomerné zrýchlený prímočary pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	v / m.s <sup>-1</sup>	$\delta v / m.s^{-1}$
0,05	237,23	240,24	235,95	236,26	238,41	240,01	238,18	234,72	235,12	237,99	237,4	1,8	0,0842	0,0006
0,10	179,86	179,99	177,49	179,91	180,15	179,59	180,60	178,38	180,01	182,32	179,8	1,2	0,1112	0,0007
0,15	146,87	147,94	145,49	145,01	147,16	146,88	144,79	147,23	146,01	146,01	146,3	1,0	0,1367	0,0009
0,20	131,42	133,10	132,23	131,43	129,74	130,06	130,18	132,03	131,09	131,31	131,3	1,0	0,1524	0,0012
0,25	115,58	114,85	114,51	114,01	117,02	114,08	116,83	115,16	116,61	114,71	115,3	1,1	0,1734	0,0016
0,30	108,11	106,58	108,01	109,27	106,70	107,46	108,20	106,59	107,11	107,52	107,6	0,8	0,1860	0,0014
0,35	98,71	97,54	99,66	98,75	99,46	97,70	99,09	99,31	99,17	99,71	98,9	0,7	0,2022	0,0015
0,40	94,09	94,67	94,98	95,44	93,13	95,02	93,31	93,46	92,84	95,13	94,2	0,9	0,2123	0,0020
0,45	87,73	87,69	88,36	87,95	88,87	87,68	88,77	88,09	86,60	86,62	87,8	0,7	0,2277	0,0019
0,50	84,63	84,96	85,12	85,46	85,21	83,46	85,84	83,68	84,55	84,52	84,7	0,7	0,2360	0,0020
0,55	79,85	79,41	78,68	80,83	80,21	80,64	79,08	79,90	79,53	78,88	79,7	0,7	0,2509	0,0022
0,60	76,96	76,30	75,97	76,71	76,78	77,74	76,60	76,38	77,76	77,06	76,8	0,6	0,2603	0,0019
0,65	73,83	73,38	74,16	73,80	74,70	74,42	73,97	73,36	73,44	74,19	73,9	0,4	0,2705	0,0016
0,70	71,22	71,32	70,33	71,44	71,70	70,66	71,95	71,12	70,89	71,24	71,2	0,5	0,2809	0,0018
0,75	69,04	70,03	69,30	68,42	69,37	70,03	68,48	68,82	68,61	69,71	69,2	0,6	0,2891	0,0024
0,80	66,38	65,72	66,63	66,47	66,89	66,87	67,35	66,28	65,64	67,23	66,5	0,5	0,3005	0,0025
0,85	65,11	64,56	64,19	65,67	64,81	65,01	64,68	64,86	66,07	64,59	65,0	0,5	0,3079	0,0025
0,90	62,67	63,03	62,10	62,27	62,94	62,51	63,59	61,83	63,25	62,12	62,6	0,5	0,3193	0,0027
0,95	61,80	61,79	60,89	62,34	61,18	62,07	62,32	62,45	61,27	62,12	61,8	0,5	0,3235	0,0027
1,00	58,84	58,58	58,52	58,96	58,08	58,59	59,56	59,60	58,46	59,62	58,9	0,5	0,3397	0,0030

Tab. 2.4.12. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 2$  g

Tab. 2.4.13. Rovnomerné zrýchlený prímočary pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	$v / m.s^{-1}$	$\delta v / m.s^{-1}$
0.05	193.55	193.54	192.34	195.07	196.08	193.98	194.41	191.46	195.99	194.83	194.1	1.4	0.1030	0.0007
0.10	145.62	144.10	146.29	143.46	145.03	145.76	145.91	145.82	146.95	145.42	145.4	1.0	0.1375	0.0009
0.15	118.63	119.60	119.63	117.55	119.84	120.23	119.29	120.10	117.80	117.12	119.0	1.1	0.1681	0.0015
0.20	104.27	102.90	104.00	104.77	105.66	103.96	102.71	103.17	103.79	103.77	103.9	0.8	0.1925	0.0015
0.25	93.52	93.52	94.65	94.28	94.13	92.94	92.82	94.11	92.51	92.86	93.5	0.7	0.2138	0.0016
0.30	86.55	87.39	86.71	86.69	85.63	85.81	85.37	85.79	86.38	86.30	86.3	0.6	0.2319	0.0016
0.35	79.97	79.83	79.30	79.09	79.66	81.00	80.35	79.15	79.41	80.46	79.8	0.6	0.2506	0.0019
0.40	75.68	75.83	75.16	75.90	75.24	74.85	75.42	75.36	75.82	75.25	75.5	0.3	0.2651	0.0011
0.45	71.14	71.53	71.07	71.51	70.12	71.38	71.17	71.53	70.50	71.59	71.2	0.5	0.2811	0.0018
0.50	68.14	67.53	69.09	67.63	68.06	67.83	68.47	68.07	68.41	67.79	68.1	0.4	0.2937	0.0019
0.55	64.79	64.12	65.35	65.24	63.91	65.34	64.81	64.44	65.14	65.47	64.9	0.5	0.3084	0.0025
0.60	62.30	62.27	61.52	62.70	61.80	63.02	62.69	61.91	61.60	62.20	62.2	0.5	0.3215	0.0025
0.65	59.95	59.21	60.77	59.62	59.93	59.90	59.95	59.52	59.27	60.59	59.9	0.5	0.3341	0.0027
0.70	57.64	57.02	57.24	57.12	58.37	58.39	57.18	56.99	57.18	58.28	57.5	0.6	0.3476	0.0033
0.75	56.08	56.85	55.28	55.43	55.64	56.18	55.83	55.90	56.87	56.56	56.1	0.5	0.3568	0.0034
0.80	54.22	53.81	55.00	54.09	54.60	54.94	54.59	54.88	54.24	54.08	54.4	0.4	0.3673	0.0027
0.85	52.91	53.68	52.16	52.26	53.18	53.29	53.49	53.08	53.40	53.10	53.1	0.5	0.3770	0.0034
0.90	51.22	51.42	50.57	50.55	50.79	50.82	50.66	51.75	51.66	50.56	51.0	0.4	0.3922	0.0034
0.95	50.24	49.93	50.77	50.54	49.73	50.56	50.53	50.08	49.71	50.46	50.3	0.4	0.3980	0.0028
1.00	48.52	48.82	48.88	48.03	49.03	48.28	48.68	49.25	48.39	48.24	48.6	0.4	0.4114	0.0031

Tab. 2.4.13. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 3$  g

Tab. 2.4.14. Rovnomerné zrýchlený prímočary pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	$v / m.s^{-1}$	$\delta v / m.s^{-1}$
0.05	167.40	165.88	165.54	168.24	169.35	166.72	165.06	169.53	167.66	168.26	167.4	1.5	0.1195	0.0010
0.10	125.83	126.40	126.42	125.89	127.47	125.18	127.19	124.60	124.09	124.71	125.8	1.1	0.1590	0.0014
0.15	102.99	102.52	103.11	102.71	102.20	102.52	104.03	102.84	101.47	101.97	102.6	0.7	0.1949	0.0013
0.20	91.97	90.91	92.17	90.79	91.24	93.29	90.74	90.87	93.12	91.07	91.6	0.9	0.2183	0.0022
0.25	81.01	82.12	80.81	81.47	80.25	80.45	81.11	82.02	81.25	80.22	81.1	0.6	0.2467	0.0019
0.30	75.58	75.17	75.63	76.17	75.18	74.64	75.74	76.60	76.50	75.13	75.6	0.6	0.2644	0.0021
0.35	69.16	70.07	70.13	69.46	69.04	68.86	68.72	68.36	68.32	68.95	69.1	0.6	0.2894	0.0025
0.40	65.94	65.99	65.19	66.46	66.33	66.73	65.02	66.91	65.40	65.62	66.0	0.6	0.3032	0.0028
0.45	61.45	62.37	61.08	61.82	61.63	61.91	60.95	62.16	61.35	60.68	61.5	0.5	0.3250	0.0027
0.50	58.82	58.50	58.65	59.31	59.58	58.10	58.06	58.17	58.97	57.96	58.6	0.5	0.3412	0.0031
0.55	55.92	55.42	56.13	56.67	55.16	56.22	56.30	55.31	56.69	56.31	56.0	0.5	0.3571	0.0033
0.60	54.08	53.62	53.62	54.47	54.68	54.07	54.50	53.60	53.75	54.10	54.0	0.4	0.3700	0.0026
0.65	51.70	51.80	51.20	51.09	51.45	52.29	51.80	51.29	51.22	51.91	51.6	0.4	0.3878	0.0028
0.70	49.83	50.15	50.57	50.50	49.69	50.36	49.22	50.34	49.79	50.08	50.1	0.4	0.3996	0.0032
0.75	48.34	48.83	48.08	48.08	49.02	48.23	47.75	48.85	48.59	48.76	48.5	0.4	0.4128	0.0034
0.80	46.02	45.48	46.66	45.73	45.97	46.56	45.61	45.48	46.32	45.65	45.9	0.4	0.4353	0.0039
0.85	45.58	46.15	45.74	46.00	45.33	45.06	45.14	45.88	45.66	45.05	45.6	0.4	0.4390	0.0036
0.90	44.01	44.22	43.70	44.07	44.47	44.20	43.98	44.01	44.62	44.42	44.2	0.3	0.4528	0.0027
0.95	43.25	42.94	43.45	43.32	42.68	43.19	43.75	43.69	43.53	43.73	43.4	0.3	0.4613	0.0036
1.00	41.62	41.54	41.18	41.82	41.95	41.61	41.63	41.35	41.15	41.91	41.6	0.3	0.4811	0.0031

Tab. 2.4.14. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 4$  g

Tab. 2.4.15. Rovnomerné zrychlený prímočarý pohyb skoro okamžitá rýchlosť

$s/m$	$t1/ms$	$t2/ms$	$t3/ms$	$t4/ms$	$t5/ms$	$t6/ms$	$t7/ms$	$t8/ms$	$t9/ms$	$t10/ms$	$t/ms$	$\delta t/ms$	$v/m.s^{-1}$	$\delta v/m.s^{-1}$
0,05	150,01	148,01	149,34	148,41	149,09	151,74	150,09	148,20	149,51	148,89	149,3	1,1	0,1339	0,0009
0,10	112,23	112,47	110,75	112,10	112,06	113,18	111,33	110,58	112,09	111,76	111,9	0,7	0,1788	0,0012
0,15	91,87	92,01	92,53	91,61	93,19	92,94	92,31	92,36	91,00	91,36	92,1	0,7	0,2171	0,0015
0,20	81,65	80,72	80,46	80,79	81,58	81,56	82,43	81,29	82,76	82,34	81,6	0,7	0,2452	0,0022
0,25	72,33	71,48	71,64	73,26	72,32	72,05	72,11	73,10	71,87	72,16	72,2	0,5	0,2769	0,0021
0,30	66,77	66,86	66,72	66,08	67,38	66,44	66,91	67,57	66,63	66,43	66,8	0,4	0,2995	0,0019
0,35	61,79	60,92	60,91	61,93	62,61	61,97	62,09	62,07	61,97	61,64	61,8	0,5	0,3237	0,0026
0,40	58,61	59,29	58,31	58,91	57,84	58,86	59,40	59,32	59,43	59,47	58,9	0,5	0,3393	0,0030
0,45	54,94	55,48	54,31	54,58	54,13	54,33	54,88	55,65	55,32	55,61	54,9	0,5	0,3642	0,0036
0,50	52,43	52,12	52,27	51,99	52,92	52,46	51,85	53,09	52,04	51,70	52,3	0,4	0,3825	0,0031
0,55	50,01	49,36	49,42	50,20	49,36	50,55	49,69	50,48	49,69	49,84	49,9	0,4	0,4011	0,0034
0,60	48,04	47,80	48,44	47,91	47,49	47,38	47,75	47,93	48,28	48,05	47,9	0,3	0,4175	0,0027
0,65	46,25	46,58	45,96	46,89	46,44	45,72	46,25	45,79	46,61	45,83	46,2	0,4	0,4326	0,0035
0,70	44,61	44,45	44,30	44,80	44,44	44,50	45,22	45,15	44,63	44,31	44,6	0,3	0,4480	0,0031
0,75	43,26	43,40	43,46	42,85	43,32	42,76	43,42	43,04	43,87	43,10	43,2	0,3	0,4625	0,0033
0,80	41,43	41,87	41,15	40,87	41,37	41,10	41,40	40,89	41,38	41,29	41,3	0,3	0,4846	0,0033
0,85	40,79	40,62	40,97	41,03	40,35	40,60	40,79	40,35	40,43	41,09	40,7	0,3	0,4914	0,0032
0,90	39,52	39,84	39,02	39,92	40,05	40,02	39,15	39,74	40,10	39,02	39,6	0,4	0,5046	0,0052
0,95	38,73	38,26	38,82	39,12	39,08	38,32	38,27	38,68	38,16	38,70	38,6	0,3	0,5180	0,0044
1,00	37,39	37,46	37,66	36,93	37,18	37,40	36,96	37,79	37,43	36,87	37,3	0,3	0,5361	0,0043

Tab. 2.4.15. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 5$  g

Tab. 2.4.16. Rovnomerné zrychlený prímočarý pohyb skoro okamžitá rýchlosť

$s/m$	$t1/ms$	$t2/ms$	$t3/ms$	$t4/ms$	$t5/ms$	$t6/ms$	$t7/ms$	$t8/ms$	$t9/ms$	$t10/ms$	$t/ms$	$\delta t/ms$	$v/m.s^{-1}$	$\delta v/m.s^{-1}$
0,05	137,06	138,99	137,27	135,38	137,42	135,01	137,51	138,59	135,67	136,91	137,0	1,2	0,1460	0,0013
0,10	102,61	103,38	102,32	102,62	102,54	103,69	102,62	102,68	103,06	102,98	102,9	0,4	0,1945	0,0008
0,15	84,03	83,21	83,06	83,39	84,86	83,25	83,12	84,34	83,54	83,10	83,6	0,6	0,2393	0,0017
0,20	74,68	74,63	74,64	74,03	75,29	75,48	74,24	75,55	74,76	74,91	74,8	0,5	0,2673	0,0017
0,25	66,15	65,61	66,53	65,66	65,76	65,53	65,92	66,30	66,53	66,72	66,1	0,4	0,3027	0,0019
0,30	61,56	60,77	60,76	60,83	60,86	61,76	61,13	61,96	61,97	60,92	61,3	0,5	0,3265	0,0026
0,35	56,50	55,72	55,71	55,72	56,17	56,12	56,70	56,13	57,00	56,87	56,3	0,5	0,3555	0,0029
0,40	53,67	54,23	54,28	53,36	53,00	53,69	53,37	53,70	53,24	54,26	53,7	0,4	0,3726	0,0030
0,45	50,23	50,87	50,70	50,23	49,54	49,61	49,76	50,50	49,79	50,43	50,2	0,4	0,3987	0,0035
0,50	47,91	48,57	48,16	48,58	48,27	48,46	48,19	48,55	47,47	47,28	48,1	0,4	0,4154	0,0038
0,55	45,72	46,32	45,99	45,32	46,39	45,73	46,36	46,09	46,30	45,27	45,9	0,4	0,4353	0,0038
0,60	43,88	43,49	43,33	43,76	43,96	44,13	44,40	43,88	43,31	43,54	43,8	0,3	0,4570	0,0035
0,65	42,28	41,81	41,94	42,70	42,72	42,74	42,28	42,19	42,75	42,44	42,4	0,3	0,4719	0,0036
0,70	40,68	40,27	40,78	41,03	41,22	40,97	41,12	40,81	41,07	41,00	40,9	0,3	0,4891	0,0031
0,75	39,54	40,02	39,53	39,06	39,30	39,90	39,81	39,63	39,03	39,14	39,5	0,3	0,5064	0,0043
0,80	38,18	38,12	38,63	38,47	38,25	38,18	37,66	38,29	38,07	38,20	38,2	0,2	0,5235	0,0033
0,85	37,28	37,48	37,15	37,35	36,89	37,68	37,33	37,12	37,47	36,93	37,3	0,2	0,5367	0,0034
0,90	36,02	35,98	35,99	36,40	35,84	35,79	36,14	36,34	36,31	36,01	36,1	0,2	0,5543	0,0030
0,95	35,39	34,95	35,12	34,87	35,18	35,56	35,81	35,77	35,46	34,94	35,3	0,3	0,5665	0,0052
1,00	34,06	34,46	34,12	34,07	33,68	34,16	33,57	33,80	33,58	34,31	34,0	0,3	0,5886	0,0051

Tab. 2.4.16. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 6$  g

Tab. 2.4.17. Rovnomerné zrýchlenie priamočarý pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t$ / ms	v / m.s <sup>-1</sup>	$\delta v$ / m.s <sup>-1</sup>
0,05	127,33	129,19	128,63	125,91	127,12	128,08	128,52	128,01	127,68	126,88	127,7	0,9	0,1566	0,0011
0,10	95,08	96,48	94,06	95,40	95,33	93,73	94,68	95,38	96,04	95,51	95,2	0,8	0,2102	0,0017
0,15	77,64	77,96	78,29	77,10	78,70	77,70	78,67	76,93	77,38	77,59	77,8	0,6	0,2571	0,0019
0,20	68,76	68,82	68,80	69,71	67,87	69,74	68,94	68,89	68,18	69,77	68,9	0,6	0,2901	0,0026
0,25	61,10	60,42	62,00	61,81	60,53	60,32	60,55	60,65	60,79	60,26	60,8	0,6	0,3288	0,0032
0,30	56,66	56,82	55,88	56,76	56,74	55,85	55,91	57,35	56,73	57,48	56,6	0,5	0,3532	0,0034
0,35	52,18	51,99	51,55	52,41	52,17	52,76	52,21	52,17	52,48	51,72	52,2	0,3	0,3834	0,0025
0,40	49,19	48,46	49,93	49,34	49,02	48,91	49,88	49,77	49,66	49,75	49,4	0,5	0,4049	0,0038
0,45	46,38	46,92	46,81	46,75	47,03	46,61	46,97	46,22	46,25	46,91	46,7	0,3	0,4284	0,0026
0,50	44,32	44,43	44,34	43,94	44,05	43,76	43,78	44,70	44,38	44,31	44,2	0,3	0,4525	0,0030
0,55	42,21	42,12	42,62	42,26	42,33	42,00	42,46	41,89	42,47	41,90	42,2	0,2	0,4736	0,0027
0,60	40,62	41,08	40,81	40,01	40,77	40,63	40,85	40,14	41,01	40,67	40,7	0,3	0,4913	0,0039
0,65	39,03	39,14	39,50	38,57	38,69	39,00	39,13	39,49	38,84	38,66	39,0	0,3	0,5128	0,0040
0,70	37,73	38,17	37,66	37,19	37,58	37,75	37,70	37,36	38,14	37,46	37,7	0,3	0,5309	0,0041
0,75	36,50	36,75	36,92	36,66	37,03	36,36	36,73	36,05	36,43	36,81	36,6	0,3	0,5461	0,0041
0,80	35,35	35,75	35,48	35,27	35,18	35,00	35,14	35,09	35,78	35,55	35,4	0,3	0,5656	0,0042
0,85	34,42	33,98	34,87	34,64	34,81	34,60	34,31	33,92	34,19	34,82	34,5	0,3	0,5805	0,0056
0,90	33,33	33,69	33,59	32,89	33,45	33,25	33,48	33,79	33,51	33,02	33,4	0,3	0,5988	0,0048
0,95	32,67	32,82	32,62	32,96	32,92	33,14	33,12	32,93	33,03	32,53	32,9	0,2	0,6084	0,0037
1,00	31,60	31,37	31,95	31,69	31,47	31,25	31,62	31,43	31,39	31,41	31,5	0,2	0,6345	0,0039

Tab. 2.4.17. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 7$  g

Tab. 2.4.18. Rovnomerné zrýchlenie priamočarý pohyb skoro okamžitá rýchlosť

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t$ / ms	v / m.s <sup>-1</sup>	$\delta v$ / m.s <sup>-1</sup>
0,05	144,40	145,57	145,02	142,44	144,00	143,67	146,51	146,35	143,73	142,83	144,5	1,3	0,1385	0,0013
0,10	89,04	89,24	87,71	89,41	87,73	88,32	89,96	90,12	89,46	89,86	89,1	0,8	0,2245	0,0021
0,15	77,14	76,57	76,65	77,53	76,86	76,45	77,15	77,85	77,67	76,35	77,0	0,5	0,2597	0,0017
0,20	65,21	64,38	64,29	64,78	65,62	64,44	64,79	65,68	65,23	65,58	65,0	0,5	0,3077	0,0024
0,25	59,47	58,66	60,22	59,78	60,02	59,84	59,58	59,27	59,84	59,99	59,7	0,4	0,3352	0,0024
0,30	53,35	53,81	53,38	52,83	53,99	53,34	53,02	53,72	52,98	53,02	53,3	0,4	0,3749	0,0026
0,35	50,10	49,91	49,41	50,14	50,03	49,79	49,69	49,50	49,86	50,39	49,9	0,3	0,4009	0,0023
0,40	46,47	46,07	46,97	46,54	46,30	46,42	46,06	46,57	46,05	47,09	46,5	0,3	0,4305	0,0032
0,45	44,08	44,59	44,63	43,59	44,61	43,46	44,57	43,70	43,87	44,05	44,1	0,4	0,4534	0,0045
0,50	41,60	42,18	41,89	41,75	42,21	41,00	41,25	41,70	41,43	41,90	41,7	0,4	0,4797	0,0042
0,55	39,79	39,97	40,30	40,14	40,10	40,05	39,29	39,64	39,86	39,59	39,9	0,3	0,5016	0,0036
0,60	38,15	38,63	37,62	37,71	38,14	37,72	38,36	38,05	38,00	37,75	38,0	0,3	0,5262	0,0042
0,65	36,55	36,31	36,06	36,60	36,58	36,36	35,63	37,06	36,96	36,61	36,6	0,3	0,5469	0,0042
0,70	35,18	35,04	35,35	35,40	35,06	35,24	35,23	35,69	35,69	35,51	35,3	0,2	0,5660	0,0036
0,75	33,98	34,43	33,99	33,50	33,50	34,39	34,42	33,59	34,05	33,50	33,9	0,4	0,5894	0,0065
0,80	32,98	32,67	32,95	32,80	32,75	33,29	32,85	33,21	32,98	32,75	32,9	0,2	0,6075	0,0035
0,85	31,88	31,93	32,13	32,04	31,62	31,45	31,57	31,81	31,74	31,86	31,8	0,2	0,6289	0,0040
0,90	31,18	31,52	30,83	31,55	31,63	31,04	30,83	30,80	31,11	31,65	31,2	0,3	0,6408	0,0067
0,95	30,12	30,27	30,14	29,80	30,50	30,21	30,02	30,22	30,09	30,38	30,2	0,2	0,6628	0,0040
1,00	30,13	30,23	29,72	29,95	30,31	30,04	29,69	29,94	30,33	30,54	30,1	0,3	0,6647	0,0057

Tab. 2.4.18. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnosť závaží  $m = 8$  g

Tab. 2.4.19. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb skoro okamžitá rychlost

$s/m$	$t_1/ms$	$t_2/ms$	$t_3/ms$	$t_4/ms$	$t_5/ms$	$t_6/ms$	$t_7/ms$	$t_8/ms$	$t_9/ms$	$t_{10}/ms$	$t/ms$	$\delta t/ms$	$v/m.s^{-1}$	$\delta v/m.s^{-1}$
0,05	136,08	135,92	137,29	135,17	137,23	135,96	137,76	135,43	135,78	135,01	136,2	0,9	0,1469	0,0010
0,10	101,35	100,30	101,36	100,40	102,40	102,74	100,14	101,00	102,06	101,68	101,3	0,9	0,1473	0,0017
0,15	75,72	76,82	76,17	76,47	76,80	76,63	75,34	76,85	76,03	75,88	76,3	0,5	0,2622	0,0017
0,20	61,40	60,93	61,33	61,82	61,81	61,70	61,75	61,47	61,45	60,92	61,5	0,3	0,3254	0,0017
0,25	57,57	57,01	58,42	58,41	57,87	58,02	57,60	57,48	57,22	56,79	57,6	0,5	0,3470	0,0031
0,30	49,89	49,30	50,57	50,20	50,05	49,16	49,77	49,88	49,35	49,66	49,8	0,4	0,4018	0,0033
0,35	48,06	48,68	47,39	48,55	47,65	47,59	48,35	47,38	47,67	47,40	47,9	0,5	0,4178	0,0041
0,40	43,68	43,93	43,88	43,44	43,99	43,57	44,33	44,13	43,38	43,05	43,7	0,4	0,4573	0,0038
0,45	42,00	41,51	42,32	41,66	41,42	42,61	41,97	41,72	41,66	42,51	41,9	0,4	0,4769	0,0045
0,50	39,16	39,03	39,32	38,91	39,72	39,17	38,93	39,43	39,57	39,22	39,2	0,3	0,5096	0,0033
0,55	37,71	37,37	37,69	37,52	37,24	37,61	37,67	37,32	37,31	38,16	37,6	0,3	0,5325	0,0037
0,60	35,81	35,66	35,93	35,85	36,12	35,79	35,55	36,04	35,58	36,16	35,8	0,2	0,5579	0,0032
0,65	34,48	33,99	34,64	34,64	34,06	34,14	34,28	34,69	34,92	34,89	34,5	0,3	0,5801	0,0054
0,70	33,31	33,76	32,99	32,93	33,07	32,93	33,63	32,88	33,22	33,10	33,2	0,3	0,6027	0,0052
0,75	31,93	32,34	31,98	32,35	32,16	31,94	32,24	31,79	32,13	31,76	32,1	0,2	0,6238	0,0039
0,80	31,26	31,54	31,10	31,33	31,50	31,30	31,18	31,65	30,91	31,67	31,3	0,2	0,6381	0,0047
0,85	29,86	29,60	29,49	29,75	29,57	29,48	29,78	30,04	29,76	29,89	29,7	0,2	0,6729	0,0039
0,90	29,42	29,42	29,61	29,22	29,05	29,21	29,13	29,44	29,50	29,35	29,3	0,2	0,6818	0,0039
0,95	28,13	28,23	28,40	27,73	27,96	28,15	28,01	28,04	28,30	28,01	28,1	0,2	0,7119	0,0046
1,00	28,03	28,04	28,10	28,27	28,29	28,01	27,86	27,90	27,70	28,11	28,0	0,2	0,7135	0,0044

Tab. 2.4.19. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 9$  g

Tab. 2.4.20. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb skoro okamžitá rychlost

$s/m$	$t_1/ms$	$t_2/ms$	$t_3/ms$	$t_4/ms$	$t_5/ms$	$t_6/ms$	$t_7/ms$	$t_8/ms$	$t_9/ms$	$t_{10}/ms$	$t/ms$	$\delta t/ms$	$v/m.s^{-1}$	$\delta v/m.s^{-1}$
0,05	128,77	127,03	127,18	127,62	127,66	129,06	128,99	127,63	129,24	130,32	128,3	1,0	0,1558	0,0012
0,10	95,98	96,43	96,47	94,80	96,35	96,87	97,27	95,87	96,41	96,70	96,3	0,6	0,2077	0,0014
0,15	72,02	71,71	71,45	71,69	71,41	70,98	72,25	72,39	72,22	72,38	71,8	0,5	0,2784	0,0018
0,20	58,86	59,44	58,50	59,72	57,99	59,60	59,40	59,44	59,17	58,35	59,0	0,6	0,3387	0,0032
0,25	54,75	54,18	55,49	54,54	55,24	54,37	54,59	54,29	54,70	54,07	54,6	0,4	0,3662	0,0029
0,30	48,19	48,31	48,37	48,38	47,94	47,92	48,89	48,12	48,49	48,23	48,3	0,3	0,4142	0,0023
0,35	45,71	46,07	46,08	45,08	45,95	45,84	45,67	46,27	46,29	45,65	45,9	0,3	0,4361	0,0033
0,40	41,72	42,34	42,05	41,10	41,94	42,15	41,16	41,26	42,29	42,18	41,8	0,5	0,4783	0,0052
0,45	39,94	40,51	39,37	39,59	39,63	40,48	39,75	39,45	39,79	39,47	39,8	0,4	0,5025	0,0049
0,50	37,36	37,24	37,15	37,18	36,99	37,58	37,27	37,04	37,67	37,06	37,3	0,2	0,5368	0,0031
0,55	35,87	35,39	35,87	35,64	36,34	36,08	35,75	35,38	35,94	36,13	35,8	0,3	0,5581	0,0046
0,60	34,08	33,65	33,63	34,49	34,32	34,11	34,29	33,79	34,36	34,13	34,1	0,3	0,5868	0,0049
0,65	32,79	32,98	32,79	32,51	32,90	32,63	32,23	32,45	33,12	32,90	32,8	0,2	0,6092	0,0044
0,70	31,62	31,17	31,39	31,63	31,44	31,36	31,45	31,49	31,43	31,64	31,5	0,1	0,6357	0,0028
0,75	30,37	30,33	30,67	30,22	30,03	30,55	30,08	30,41	30,29	30,04	30,3	0,2	0,6601	0,0044
0,80	29,67	29,63	29,79	29,63	29,25	29,94	29,95	29,67	29,27	29,25	29,6	0,3	0,6755	0,0058
0,85	28,40	28,65	28,77	28,74	28,19	28,05	28,34	28,24	28,03	28,58	28,4	0,3	0,7043	0,0065
0,90	28,00	27,76	27,95	28,22	28,03	27,78	28,35	28,00	28,32	28,15	28,1	0,2	0,7129	0,0049
0,95	26,75	26,94	26,50	27,08	26,73	26,73	26,78	26,86	27,14	27,03	26,9	0,2	0,7447	0,0051
1,00	26,58	26,65	26,48	26,73	26,21	26,68	26,21	26,40	26,28	26,22	26,4	0,2	0,7563	0,0056

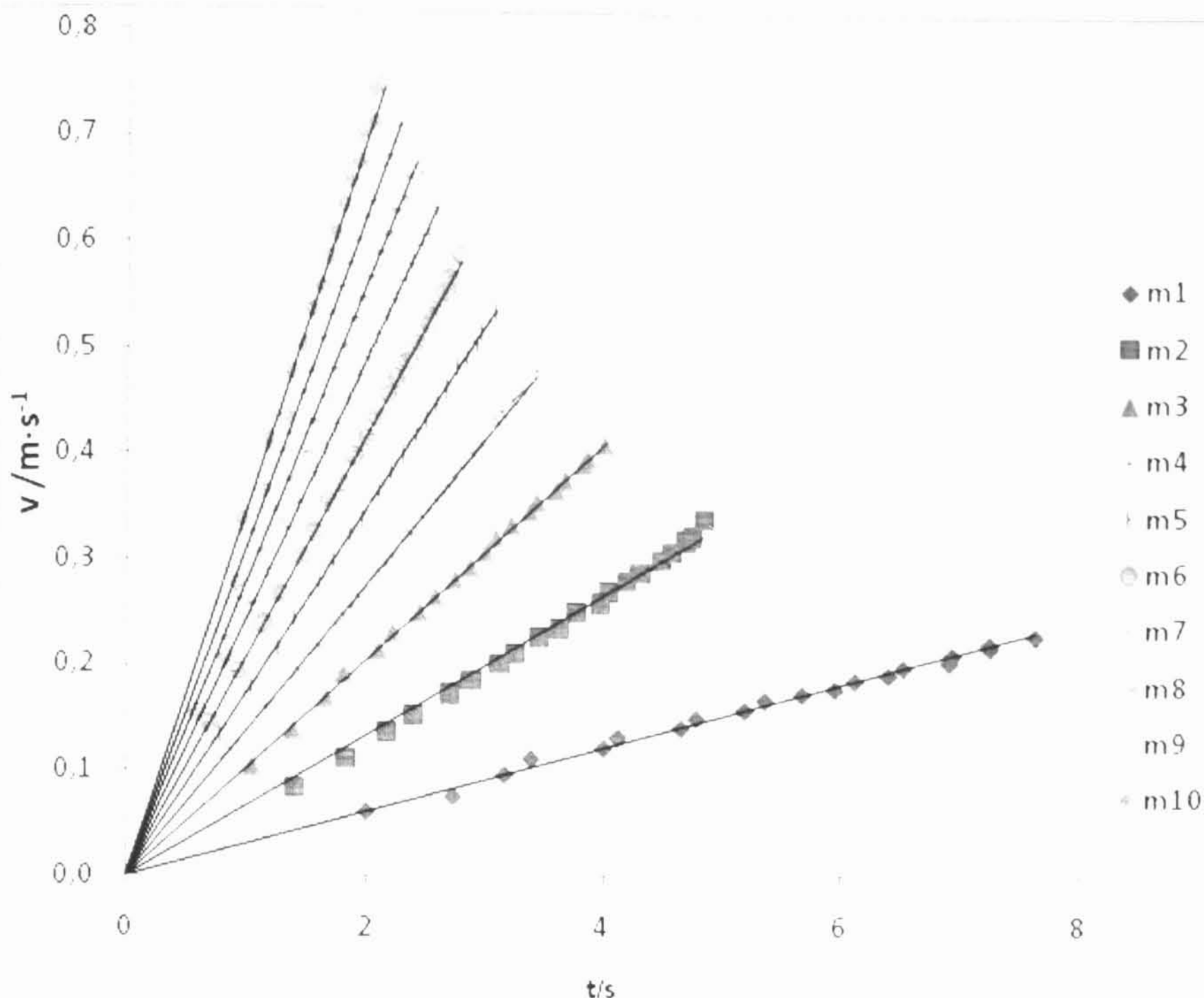
Tab. 2.4.20. Vozík o hmotnosti  $M = 206$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tabulka 2.4.21. uvádí souhrnně průměrné hodnoty časů a „skoro okamžité“ rychlosti ze všech předcházejících tabulek přehledně dohromady. V prvním řádku je uvedena pozice měřící sondy a tím i odpovídající úsek dráhy  $s$ . Dále jsou zde uvedeny po dvojicích příslušné „skoro okamžité“ rychlosti  $v$  a doba  $t$  k příslušnému závaží. Hodnoty  $v_1, t_1$  odpovídá závaží 1 g, hodnoty  $v_2, t_2$  odpovídá závaží 2 g, atd.

Tab. 2.4.21. Souhrnná tabulka při použití různé roztahovací síly

2.4.21. Overeni 2. Newtonova zákona - různá síla																				
s / m	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
t1 /s	2,006	2,734	3,172	3,392	4,004	4,121	4,654	4,782	5,193	5,361	5,673	5,948	6,116	6,399	6,527	6,912	6,935	7,253	7,249	7,629
v1 /m.s <sup>-1</sup>	0,0605	0,0752	0,0965	0,1120	0,1217	0,1322	0,1412	0,1504	0,1583	0,1682	0,1738	0,1785	0,1868	0,1924	0,1994	0,2044	0,2114	0,2184	0,2222	0,2298
t2 /s	1,400	1,827	2,165	2,391	2,693	2,880	3,116	3,242	3,458	3,619	3,764	3,962	4,038	4,188	4,303	4,476	4,562	4,686	4,738	4,838
v2 /m.s <sup>-1</sup>	0,0842	0,1112	0,1367	0,1524	0,1734	0,1860	0,2022	0,2123	0,2277	0,2360	0,2509	0,2603	0,2705	0,2809	0,2891	0,3005	0,3079	0,3193	0,3235	0,3397
t3 /s	1,047	1,389	1,666	1,811	2,105	2,220	2,448	2,579	2,745	2,876	3,008	3,088	3,220	3,379	3,437	3,603	3,671	3,828	3,860	4,009
v3 /m.s <sup>-1</sup>	0,1030	0,1375	0,1681	0,1925	0,2138	0,2313	0,2506	0,2651	0,2811	0,2937	0,3084	0,3215	0,3341	0,3476	0,3568	0,3673	0,3770	0,3922	0,3980	0,4114
t4 /s	0,880	1,173	1,445	1,604	1,818	1,935	2,116	2,211	2,377	2,467	2,594	2,693	2,807	2,895	2,970	3,075	3,152	3,233	3,303	3,428
v4 /m.s <sup>-1</sup>	0,1195	0,1590	0,1949	0,2183	0,2467	0,2644	0,2894	0,3032	0,3250	0,3412	0,3571	0,3700	0,3878	0,3996	0,4128	0,4253	0,4390	0,4528	0,4613	0,4811
t5 /s	0,770	1,028	1,252	1,391	1,589	1,711	1,860	1,950	2,089	2,198	2,297	2,393	2,478	2,570	2,660	2,742	2,823	2,912	2,952	3,073
v5 /m.s <sup>-1</sup>	0,1339	0,1788	0,2171	0,2452	0,2769	0,2995	0,3237	0,3393	0,3642	0,3825	0,4011	0,4175	0,4326	0,4430	0,4625	0,4846	0,4914	0,5046	0,5180	0,5361
t6 /s	0,696	0,934	1,133	1,276	1,441	1,549	1,680	1,780	1,889	1,984	2,080	2,180	2,248	2,337	2,410	2,498	2,552	2,648	2,685	2,775
v6 /m.s <sup>-1</sup>	0,1460	0,1945	0,2393	0,2673	0,3027	0,3265	0,3555	0,3726	0,3987	0,4154	0,4353	0,4570	0,4719	0,4891	0,5064	0,5235	0,5367	0,5543	0,5665	0,5886
t7 /s	0,631	0,855	1,036	1,167	1,327	1,421	1,557	1,644	1,741	1,836	1,923	2,004	2,083	2,163	2,222	2,311	2,365	2,446	2,499	2,578
v7 /m.s <sup>-1</sup>	0,1566	0,2102	0,2571	0,2901	0,3288	0,3532	0,3834	0,4049	0,4284	0,4525	0,4736	0,4919	0,5128	0,5309	0,5461	0,5656	0,5805	0,5988	0,6084	0,6345
t8 /s	0,656	0,793	0,997	1,083	1,253	1,331	1,465	1,521	1,636	1,700	1,789	1,856	1,928	2,001	2,056	2,137	2,186	2,279	2,288	2,410
v8 /m.s <sup>-1</sup>	0,1385	0,2245	0,2597	0,3077	0,3352	0,3749	0,4009	0,4305	0,4534	0,4797	0,5016	0,5262	0,5469	0,5660	0,5894	0,6075	0,6289	0,6408	0,6628	0,6647
t9 /s	0,625	0,856	0,974	1,019	1,223	1,260	1,402	1,437	1,564	1,610	1,701	1,761	1,815	1,901	1,939	2,029	2,052	2,156	2,152	2,269
v9 /m.s <sup>-1</sup>	0,1469	0,1973	0,2622	0,3254	0,3470	0,4018	0,4178	0,4573	0,4769	0,5096	0,5325	0,5579	0,5801	0,6027	0,6238	0,6381	0,6729	0,6818	0,7119	0,7135
t10/s	0,582	0,814	0,911	0,954	1,140	1,175	1,323	1,365	1,470	1,527	1,608	1,673	1,728	1,794	1,843	1,918	1,941	2,037	2,044	2,136
v10 /m.s <sup>-1</sup>	0,1558	0,2077	0,2784	0,3387	0,3662	0,4142	0,4361	0,4783	0,5025	0,5368	0,5581	0,5868	0,6092	0,6357	0,6601	0,6755	0,7043	0,7129	0,7447	0,7563





Graf 2.4.1 Závislost dráhy na čase při různé roztahovací síle.

V grafu jsou vyneseny závislosti „skoro okamžité“ rychlosti na čase. Závislosti jsou proloženy lineární spojnicí vedenou počátkem. Vedení počátkem bylo voleno jako přiblížení rovnoměrně zrychleného přímočarého pohybu s nulovou počáteční rychlostí. Jak je patrné z grafu, je velikost zrychlení závislé na hmotnosti závaží a to přibližně přímo úměrně. Při zdvojnásobení hmotnosti závaží dochází ke dvojnásobení směrnice dané závislosti a tudíž i zrychlení. Můžeme tedy usuzovat, že zrychlení je přímo úměrné hmotnosti závaží, což je ve shodě s předpokladem.

Tabulky 2.4.22. a 2.4.23. uvádějí v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka, vozíku o hmotnostech  $M$  306 g a 407 g.

V tabulkách 2.4.24. až 2.4.25. jsou uvedeny v prvním sloupci pozice měřícího čidla  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby je určena „skoro okamžitá“ rychlost tohoto průchodu  $v$ .  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti, vozíku o hmotnostech  $M$  306 g a 407 g.

Tab. 2.4.22. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t1/s$	$t2/s$	$t3/s$	$t4/s$	$t5/s$	$t6/s$	$t7/s$	$t8/s$	$t9/s$	$t10/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,669	0,665	0,662	0,669	0,666	0,671	0,665	0,667	0,664	0,667	0,667	0,003
0,10	0,926	0,934	0,928	0,917	0,922	0,932	0,938	0,937	0,921	0,938	0,929	0,007
0,15	1,042	1,035	1,033	1,042	1,037	1,034	1,034	1,032	1,037	1,052	1,038	0,006
0,20	1,118	1,113	1,112	1,113	1,113	1,111	1,114	1,132	1,104	1,107	1,114	0,007
0,25	1,304	1,315	1,285	1,314	1,296	1,301	1,324	1,319	1,308	1,293	1,306	0,012
0,30	1,342	1,332	1,355	1,342	1,334	1,330	1,326	1,347	1,332	1,352	1,339	0,009
0,35	1,511	1,499	1,502	1,530	1,496	1,493	1,494	1,498	1,490	1,513	1,503	0,012
0,40	1,547	1,553	1,524	1,551	1,568	1,542	1,569	1,550	1,530	1,562	1,550	0,014
0,45	1,688	1,685	1,686	1,712	1,668	1,707	1,682	1,701	1,699	1,688	1,692	0,012
0,50	1,730	1,749	1,715	1,755	1,743	1,742	1,721	1,749	1,723	1,751	1,738	0,014
0,55	1,843	1,816	1,868	1,850	1,839	1,831	1,848	1,816	1,854	1,819	1,838	0,017
0,60	1,893	1,871	1,873	1,889	1,911	1,881	1,907	1,900	1,870	1,907	1,890	0,015
0,65	1,984	1,985	1,964	1,993	1,962	2,001	2,006	1,961	2,001	1,968	1,983	0,017
0,70	2,042	2,043	2,061	2,021	2,047	2,034	2,069	2,053	2,026	2,011	2,041	0,017
0,75	2,112	2,104	2,089	2,110	2,113	2,094	2,143	2,094	2,143	2,119	2,112	0,018
0,80	2,180	2,177	2,182	2,171	2,148	2,203	2,172	2,156	2,197	2,192	2,178	0,016
0,85	2,232	2,261	2,211	2,222	2,263	2,263	2,252	2,211	2,253	2,215	2,238	0,021
0,90	2,316	2,350	2,300	2,347	2,295	2,310	2,335	2,326	2,333	2,287	2,320	0,021
0,95	2,344	2,349	2,365	2,347	2,342	2,357	2,350	2,342	2,336	2,343	2,348	0,008
1,00	2,442	2,411	2,457	2,430	2,435	2,457	2,408	2,472	2,432	2,462	2,441	0,020

Tab. 2.4.22. Hmotnost vozíku  $M = 306$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tab. 2.4.23. Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb závislost dráha - čas

$s/m$	$t1/s$	$t2/s$	$t3/s$	$t4/s$	$t5/s$	$t6/s$	$t7/s$	$t8/s$	$t9/s$	$t10/s$	$t/s$	$\delta t/s$
0,05	0,820	0,811	0,829	0,829	0,813	0,829	0,827	0,817	0,822	0,824	0,822	0,006
0,10	1,145	1,155	1,137	1,145	1,148	1,143	1,133	1,142	1,140	1,140	1,143	0,006
0,15	1,285	1,296	1,267	1,280	1,294	1,296	1,298	1,297	1,274	1,286	1,287	0,010
0,20	1,346	1,356	1,346	1,362	1,342	1,362	1,346	1,346	1,337	1,330	1,347	0,010
0,25	1,600	1,590	1,606	1,600	1,603	1,582	1,606	1,584	1,589	1,620	1,598	0,011
0,30	1,656	1,669	1,675	1,643	1,632	1,643	1,638	1,654	1,650	1,666	1,653	0,013
0,35	1,849	1,861	1,849	1,859	1,823	1,844	1,836	1,860	1,873	1,839	1,849	0,014
0,40	1,898	1,874	1,882	1,914	1,882	1,917	1,896	1,905	1,922	1,916	1,901	0,016
0,45	2,060	2,057	2,074	2,030	2,059	2,074	2,051	2,078	2,043	2,046	2,057	0,015
0,50	2,129	2,157	2,120	2,112	2,157	2,116	2,103	2,158	2,097	2,139	2,129	0,022
0,55	2,246	2,224	2,231	2,235	2,235	2,213	2,278	2,244	2,261	2,244	2,241	0,017
0,60	2,332	2,317	2,361	2,360	2,358	2,336	2,345	2,313	2,351	2,339	2,341	0,016
0,65	2,413	2,417	2,440	2,422	2,395	2,422	2,437	2,415	2,396	2,410	2,417	0,014
0,70	2,512	2,541	2,482	2,547	2,482	2,510	2,539	2,544	2,539	2,535	2,523	0,024
0,75	2,566	2,555	2,586	2,531	2,571	2,571	2,581	2,545	2,553	2,591	2,565	0,018
0,80	2,688	2,720	2,706	2,677	2,667	2,656	2,657	2,655	2,680	2,672	2,678	0,021
0,85	2,708	2,693	2,697	2,692	2,701	2,727	2,720	2,740	2,706	2,687	2,707	0,016
0,90	2,839	2,852	2,857	2,811	2,851	2,867	2,865	2,871	2,818	2,834	2,847	0,020
0,95	2,841	2,883	2,854	2,799	2,853	2,879	2,803	2,857	2,843	2,856	2,847	0,026
1,00	3,004	3,022	3,021	3,045	3,042	3,047	2,963	3,029	3,036	3,017	3,023	0,024

Tab. 2.4.23. Hmotnost vozíku  $M = 407$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tab. 2.4.24. Rovnomerné zrychleny pri močary ponyb skoro okamžité rychlost

s / m	t1 /ms	t2 /ms	t3 /ms	t4 /ms	t5 /ms	t6 /ms	t7 /ms	t8 /ms	t9 /ms	t10 /ms	t /ms	δ t /ms	v /m.s <sup>-1</sup>	δ v /m.s <sup>-1</sup>
0.05	157,16	158,48	158,76	155,50	155,77	156,30	157,83	157,35	155,35	158,26	157,1	1,2	0,1273	0,0010
0.10	117,44	117,90	118,18	115,85	116,90	115,75	118,44	117,09	118,40	116,31	117,2	1,0	0,1706	0,0014
0.15	87,52	87,98	86,76	88,11	86,84	87,07	87,47	88,28	87,27	86,34	87,4	0,6	0,2289	0,0016
0.20	71,43	71,08	71,20	72,29	71,46	71,86	72,17	70,58	71,23	70,65	71,4	0,5	0,2801	0,0021
0.25	66,44	66,08	66,39	65,52	67,36	66,36	65,70	66,41	67,41	66,79	66,4	0,6	0,3010	0,0027
0.30	57,95	57,19	57,20	57,90	57,59	58,18	58,44	57,70	58,66	58,15	57,9	0,5	0,3455	0,0028
0.35	55,41	54,79	56,09	56,23	55,44	55,25	54,80	55,02	55,94	55,54	55,4	0,5	0,3607	0,0032
0.40	50,48	50,42	51,13	50,19	50,59	50,77	50,65	50,93	51,12	51,24	50,8	0,3	0,3941	0,0025
0.45	48,38	48,04	47,90	48,18	48,37	48,94	48,95	48,00	48,73	48,52	48,4	0,4	0,4132	0,0031
0.50	45,16	44,62	44,82	45,34	44,92	44,92	45,57	45,03	45,44	45,33	45,1	0,3	0,4433	0,0028
0.55	43,42	43,58	42,98	43,59	43,49	43,63	43,25	43,04	43,33	43,81	43,4	0,3	0,4607	0,0027
0.60	41,48	41,49	41,71	41,18	41,71	41,98	41,86	41,41	40,96	41,94	41,6	0,3	0,4811	0,0037
0.65	39,68	39,47	39,37	39,77	39,26	39,27	39,52	39,65	40,08	40,08	39,6	0,3	0,5049	0,0036
0.70	38,35	38,53	37,87	38,38	38,40	38,22	38,76	38,63	38,15	38,75	38,4	0,3	0,5208	0,0036
0.75	36,73	36,99	37,22	36,39	37,19	36,20	37,26	36,55	36,81	36,71	36,8	0,3	0,5434	0,0050
0.80	35,95	35,97	35,53	35,90	36,24	35,65	36,44	35,79	35,46	36,11	35,9	0,3	0,5571	0,0046
0.85	34,33	34,41	34,07	34,08	34,65	34,47	34,50	34,74	34,45	34,43	34,4	0,2	0,5812	0,0034
0.90	33,94	34,15	34,37	33,90	33,75	34,10	34,43	34,23	34,13	34,23	34,1	0,2	0,5861	0,0034
0.95	32,33	31,96	32,75	31,88	32,24	32,76	31,93	32,20	32,24	32,29	32,3	0,3	0,6200	0,0056
1.00	32,16	32,41	32,09	31,78	32,36	31,71	31,96	32,29	32,31	32,33	32,1	0,2	0,6223	0,0046

Tab. 2.4.24. Hmotnost vozíku  $M = 306$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tab. 2.4.25. Rovnomerné zrychleny pri močary ponyb skoro okamžité rychlost

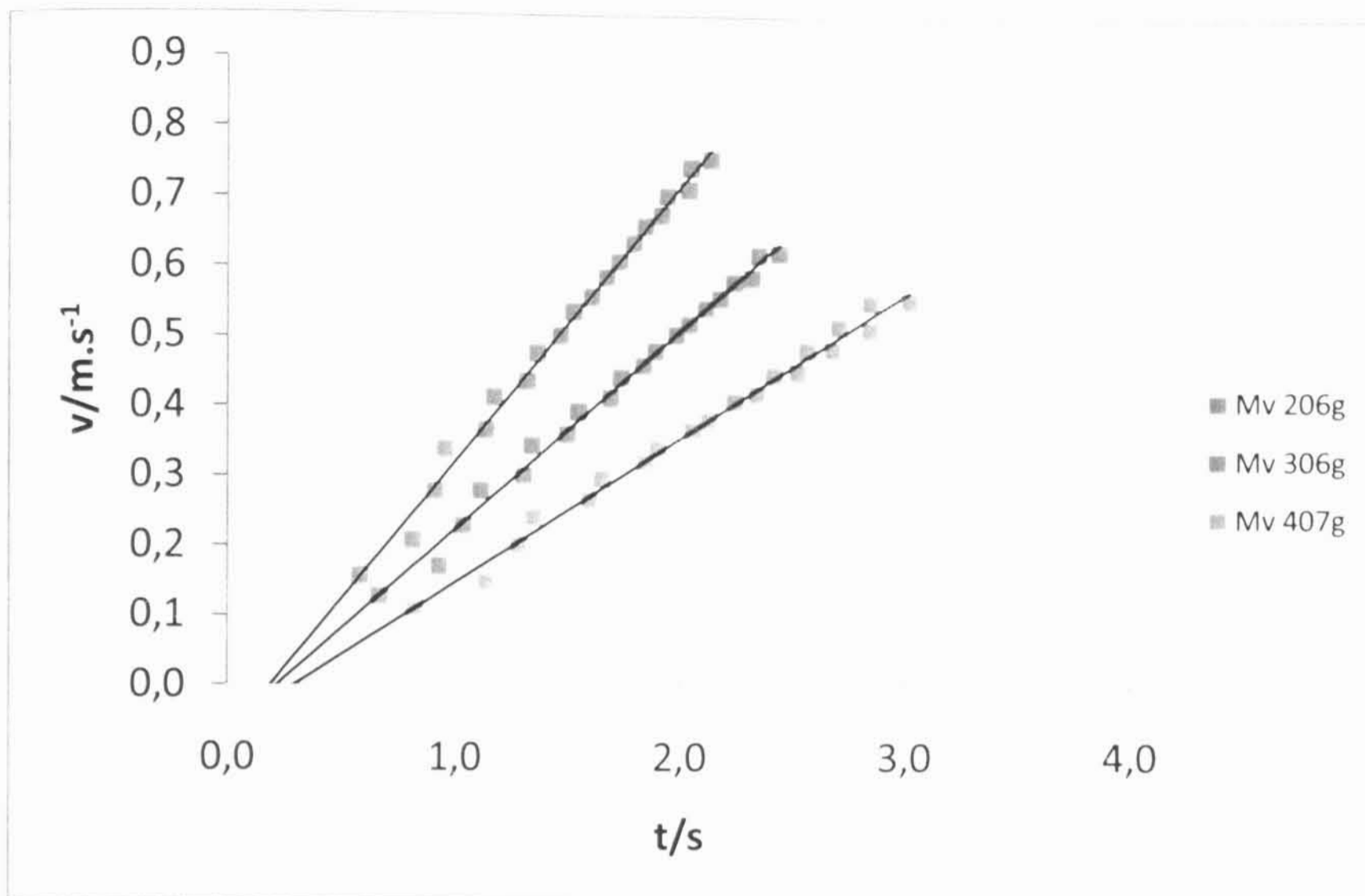
s / m	t1 /ms	t2 /ms	t3 /ms	t4 /ms	t5 /ms	t6 /ms	t7 /ms	t8 /ms	t9 /ms	t10 /ms	t /ms	δ t /ms	v /m.s <sup>-1</sup>	δ v /m.s <sup>-1</sup>
0.05	181,37	181,26	179,60	180,37	180,93	178,66	182,63	181,40	183,67	180,87	181,1	1,3	0,1105	0,0008
0.10	136,05	134,14	134,04	137,57	137,31	138,06	135,98	134,81	134,91	135,11	135,8	1,4	0,1473	0,0015
0.15	98,79	98,63	100,21	97,32	99,11	98,71	98,57	97,52	99,59	99,05	98,7	0,8	0,2025	0,0017
0.20	82,10	83,28	82,61	81,53	83,32	82,70	82,95	81,10	82,72	82,28	82,5	0,7	0,2425	0,0020
0.25	74,86	74,09	74,25	75,32	75,78	73,77	75,07	75,29	75,33	74,69	74,8	0,6	0,2672	0,0022
0.30	66,99	66,55	67,73	67,94	67,74	66,00	66,79	67,04	67,21	67,61	67,2	0,6	0,2978	0,0026
0.35	62,36	61,74	62,56	62,43	63,22	61,84	61,65	62,51	61,61	62,75	62,3	0,5	0,3212	0,0026
0.40	58,15	58,65	58,90	58,75	58,68	58,26	58,52	57,92	58,15	58,92	58,5	0,3	0,3419	0,0019
0.45	54,41	53,78	54,43	54,84	53,94	54,61	54,70	53,88	54,20	54,61	54,3	0,4	0,3681	0,0024
0.50	52,23	52,59	52,84	52,30	51,70	52,19	52,93	52,30	52,55	51,83	52,3	0,4	0,3821	0,0027
0.55	48,79	48,83	48,69	48,82	48,10	48,67	48,94	48,97	49,51	48,53	48,8	0,3	0,4100	0,0029
0.60	47,81	47,15	48,28	47,66	47,19	47,61	47,45	47,45	47,26	48,24	47,6	0,4	0,4201	0,0034
0.65	44,56	44,75	44,11	45,17	44,53	44,27	44,44	44,87	44,63	44,84	44,6	0,3	0,4483	0,0029
0.70	44,22	44,26	44,11	44,08	44,59	43,79	43,99	44,75	44,60	44,79	44,3	0,3	0,4513	0,0033
0.75	41,23	40,92	41,71	41,36	41,39	41,20	41,26	41,22	41,79	41,59	41,4	0,2	0,4835	0,0029
0.80	41,36	41,03	40,77	41,96	41,31	41,94	40,98	41,56	41,28	41,37	41,4	0,4	0,4836	0,0043
0.85	38,52	38,94	37,96	38,59	38,79	38,14	38,74	38,80	38,25	39,04	38,6	0,3	0,5184	0,0046
0.90	39,00	38,74	38,49	39,25	38,71	38,77	39,38	39,34	39,31	39,57	39,1	0,3	0,5121	0,0045
0.95	36,26	36,09	36,55	36,12	36,16	35,95	36,12	36,40	36,48	35,95	36,2	0,2	0,5524	0,0030
1.00	36,25	36,40	36,11	35,80	35,87	36,01	36,34	35,72	36,30	36,07	36,1	0,2	0,5542	0,0034

Tab. 2.4.25. Hmotnost vozíku  $M = 407$  g, hmotnost závaží  $m = 10$  g

Tabulka 2.4.26. uvádí souhrnně průměrné hodnoty časů a „skoro okamžité“ rychlosti. Hodnoty  $v_1, t_1$  odpovídá hmotnosti vozíku 206 g, veličina  $v_2, t_2$  odpovídá hmotnosti vozíku 306 g, veličina  $v_3, t_3$  odpovídá hmotnosti vozíku 407 g,

Tab. 2.4.25. Souhrnná tabulka při použití různé hmotnosti vozíku

2.4.2a. Ověření 2. Newtonova zákona - různá hmotnost vozíku																				
$s / m$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$t1 / s$	0,582	0,814	0,911	0,954	1,140	1,175	1,323	1,365	1,470	1,527	1,608	1,673	1,728	1,794	1,843	1,918	1,941	2,037	2,044	2,136
$v1 / m \cdot s^{-1}$	0,1558	0,2077	0,2784	0,3387	0,3662	0,4142	0,4361	0,4783	0,5025	0,5368	0,5521	0,5868	0,6092	0,6357	0,6601	0,6755	0,7043	0,7129	0,7447	0,7563
$t2 / s$	0,667	0,929	1,038	1,114	1,306	1,339	1,503	1,550	1,692	1,738	1,838	1,890	1,983	2,041	2,112	2,178	2,238	2,320	2,348	2,441
$v2 / m \cdot s^{-1}$	0,1273	0,1706	0,2289	0,2801	0,3010	0,3455	0,3607	0,3941	0,4132	0,4433	0,4607	0,4811	0,5049	0,5208	0,5434	0,5571	0,5812	0,5861	0,6200	0,6223
$t3 / s$	0,822	1,143	1,287	1,347	1,598	1,653	1,849	1,901	2,057	2,129	2,241	2,341	2,417	2,523	2,565	2,678	2,707	2,847	2,847	3,023
$v3 / m \cdot s^{-1}$	0,1105	0,1473	0,2025	0,2425	0,2672	0,2978	0,3212	0,3419	0,3681	0,3821	0,4100	0,4201	0,4483	0,4513	0,4835	0,4836	0,5184	0,5121	0,5524	0,5542

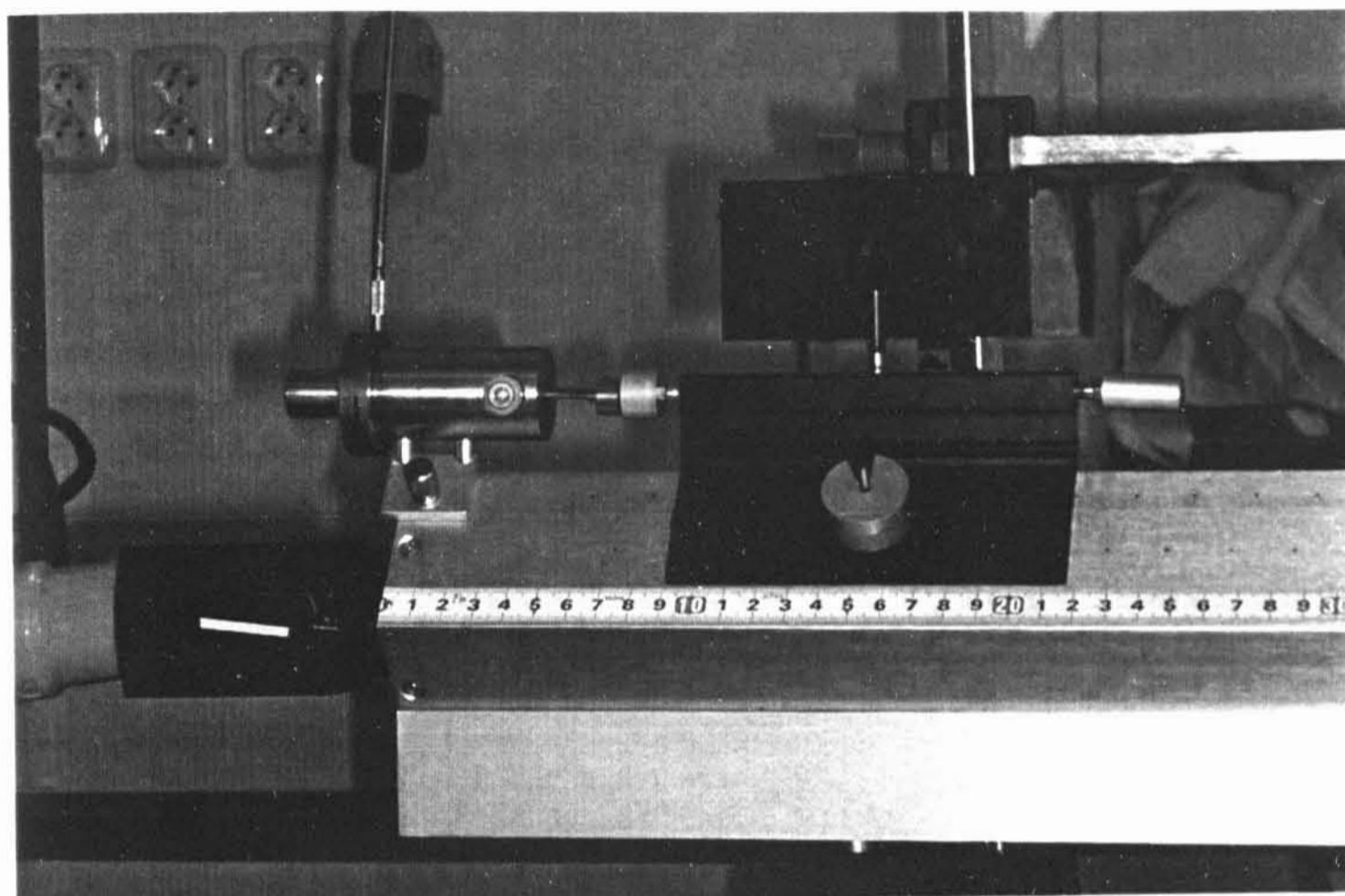


Graf 2.4.2 Závislost dráhy na čase při různé hmotnosti vozíku.

V grafu 2.4.2. jsou vyneseny závislosti „skoro okamžité“ rychlosti na čase. Závislosti jsou proloženy lineární spojnicí. Jak je patrné z grafu, je velikost zrychlení závislé na hmotnosti vozíku. Při zdvojnásobení hmotnosti závaží dochází zmenšení směrnice dané závislosti přibližně na polovinu a tudíž i zrychlení. Což je ve shodě s předpokladem.

## 2.5 Pohyb po nakloněné rovině

### 2.5.1 Pohyb po nakloněné rovině - zadání



Obr. 2.5-1 Vozík na nakloněné rovině

#### Úkol

Změřte závislost dráhy na čase při pohybu vozíku po nakloněné rovině. Ověřte, o jaký typ pohybu se jedná. Pokuste se určit tíhové zrychlení.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřicí čidlo, vozík, startovací zařízení, křídélko 2 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče, jehlový nástavec, váleček s modelínou, desky.

#### Časová náročnost

15 minut varianta

#### Klíčová slova

Rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, zrychlení, dráha, průměrná rychlost, okamžitá rychlost, tíhová síla, tíhové zrychlení, nakloněná rovina.

#### Příprava

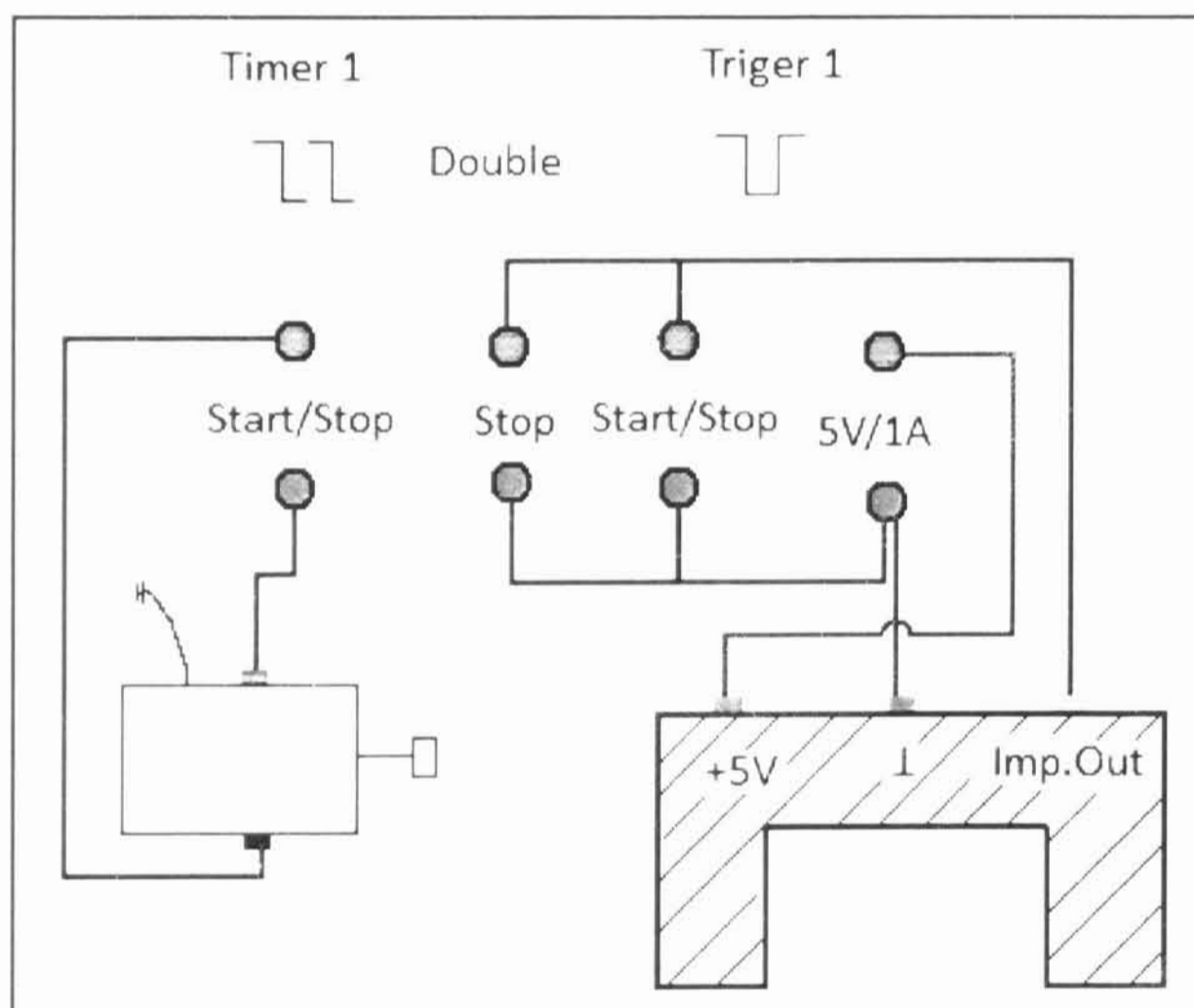
1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nástavcem.
2. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.

3. Připravte vozík s křídélkem (vpravo s magnetickou příchýtkou, vlevo s válečkem s modelínou).
4. Dráhu podložte deskou (desky lze měnit dle potřeb úlohy).
5. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nastavcem.
6. Připevněte na tyč nad dráhou měřicí zařízení. Tyč je nutno nastavit, tak aby byla vždy rovnoběžné se vzduchovou dráhou.

### Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje vozík k uražení vybrané vzdálenosti (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Sestrojte graf dráhy vozíku v závislosti na čase. Proměřte pro různé desky.
- 2) Změřte rychlost („skoro okamžitou“) ve vybraných pozicích na vzduchové dráze (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Proměřte pro různé desky.
- 3) Z naměřených hodnot sestavte grafy závislosti skoro okamžité rychlosti na čase. Na základě grafů diskutujte, o jaký typ pohybu se jedná
- 4) Z naměřených hodnot spočítejte hodnotu tíhového zrychlení.

Měření provádějte se zapojením dle obr. 2.5-2.



Obr. 2.5-2

## 2.5.2 Pohyb po nakloněné rovině - vypracování

V této úloze se zabýváme studiem pohybu po nakloněné rovině. Jedná se o pohyb bez tření. Tento typ pohybu je druhem rovnoměrného přímočarého pohybu. Zkusíme si, na čem může tento pohyb záviset.

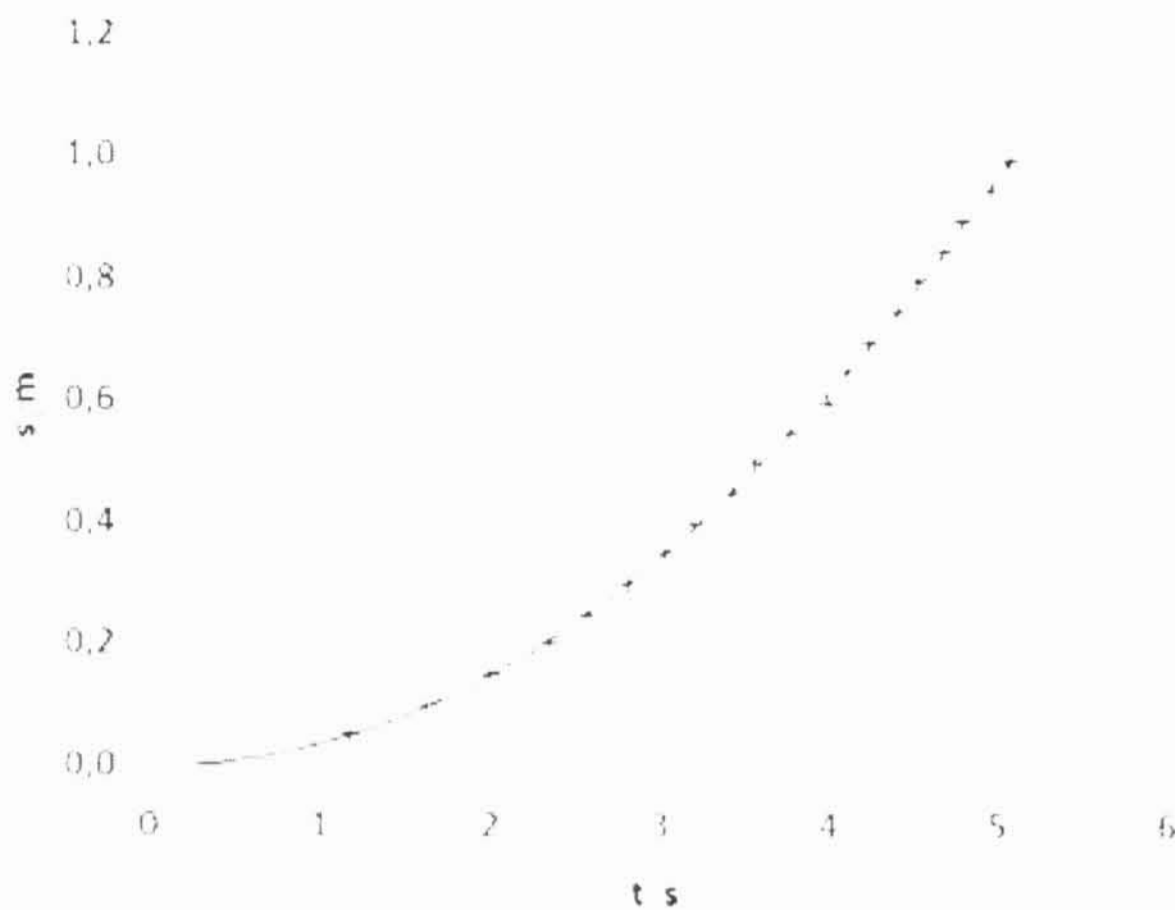
V prvním případě zkoumejme závislost dráhy na čase, která by měla odpovídat rovnoměrnému přímočarému pohybu.

Tabulky 2.5.1. až 2.5.4. uvádějí v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka, při použití různých desek výšky  $d$  (9 mm, 18 mm, 30 mm, 38 mm).

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0.05	1.163	1.152	1.169	1.179	1.172	1.157	1.180	1.146	1.169	1.158	1.165	0,011
0.10	1.619	1.601	1.600	1.607	1.609	1.613	1.619	1.605	1.608	1.623	1.610	0,007
0.15	1.995	2.014	1.980	1.991	1.995	1.995	1.994	1.999	2.006	1.968	1.994	0,012
0.20	2.341	2.365	2.317	2.357	2.366	2.323	2.334	2.376	2.339	2.334	2.345	0,019
0.25	2.565	2.545	2.574	2.569	2.552	2.592	2.565	2.527	2.562	2.588	2.564	0,018
0.30	2.808	2.833	2.780	2.789	2.820	2.845	2.826	2.775	2.780	2.829	2.809	0,024
0.35	3.026	3.027	2.992	3.013	3.064	3.009	2.990	3.039	3.048	3.060	3.027	0,025
0.40	3.200	3.247	3.205	3.233	3.167	3.175	3.158	3.216	3.161	3.236	3.200	0,031
0.45	3.424	3.415	3.440	3.416	3.435	3.433	3.471	3.388	3.437	3.399	3.426	0,022
0.50	3.578	3.525	3.580	3.564	3.528	3.556	3.544	3.527	3.530	3.616	3.555	0,028
0.55	3.779	3.730	3.766	3.791	3.774	3.733	3.725	3.801	3.789	3.790	3.768	0,027
0.60	4.004	4.001	3.959	3.973	3.950	4.046	4.053	4.042	3.954	3.987	3.997	0,037
0.65	4.102	4.099	4.125	4.159	4.095	4.097	4.052	4.128	4.074	4.075	4.101	0,029
0.70	4.245	4.217	4.197	4.186	4.302	4.250	4.220	4.200	4.197	4.289	4.230	0,038
0.75	4.401	4.422	4.336	4.399	4.399	4.456	4.379	4.443	4.457	4.379	4.407	0,036
0.80	4.516	4.557	4.567	4.489	4.485	4.480	4.559	4.558	4.528	4.493	4.523	0,033
0.85	4.681	4.617	4.645	4.655	4.676	4.736	4.715	4.636	4.682	4.633	4.668	0,036
0.90	4.799	4.803	4.730	4.796	4.746	4.762	4.854	4.750	4.795	4.745	4.778	0,036
0.95	4.944	4.903	4.981	4.963	4.933	4.965	4.982	4.916	4.962	4.994	4.954	0,028
1.00	5.088	5.164	5.076	5.066	5.014	5.054	5.033	5.079	5.085	5.061	5.072	0,038

Tab. 2.5.1. Závislost dráhy na čase, deska 9 mm



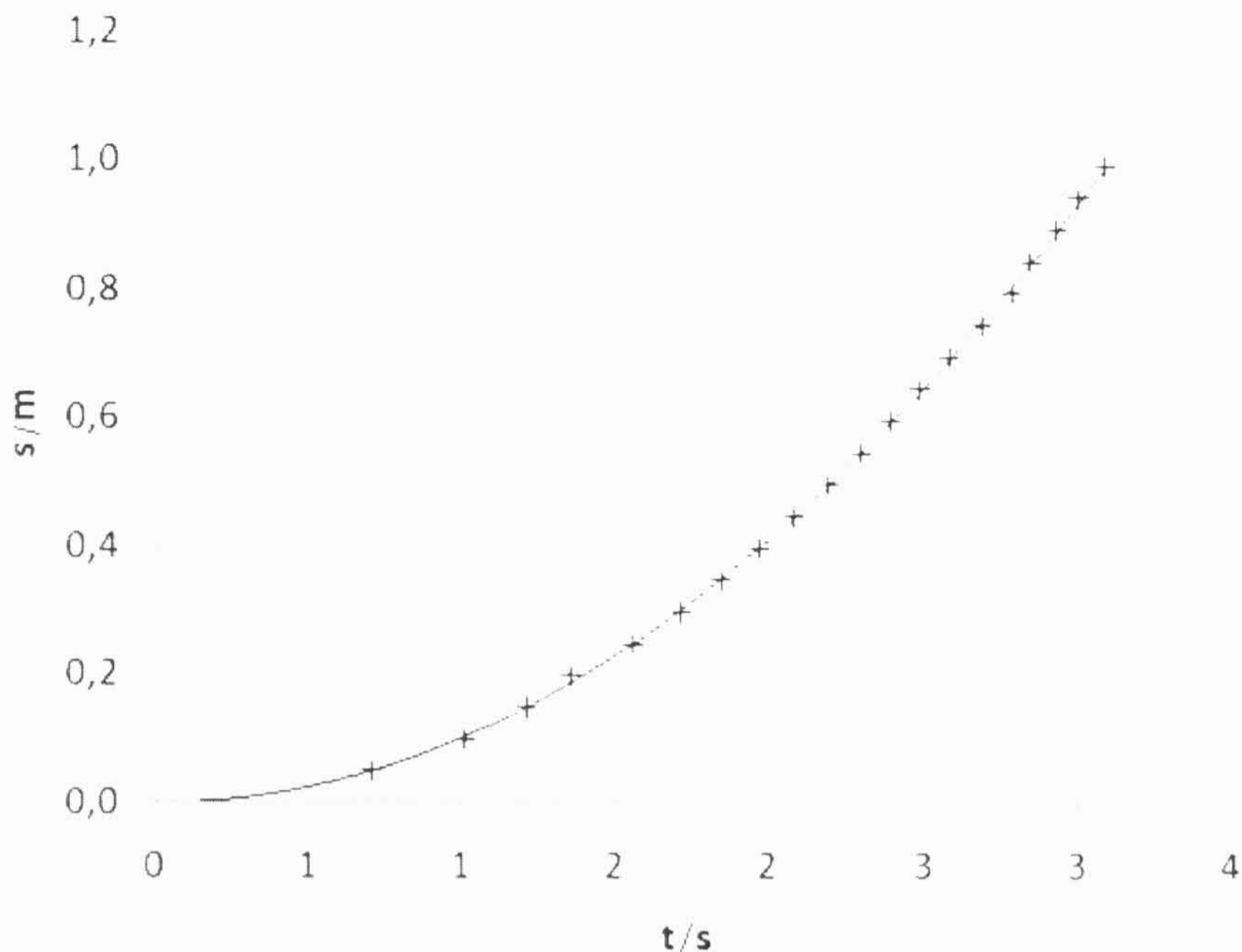


Graf 2.5.1. Závislost dráhy na čase, deska 9 mm

Tab. 2.5.2. Pomyb po nakloněné rovině závislost dráha - čas

s / m	t1 /s	t2 /s	t3 /s	t4 /s	t5 /s	t6 /s	t7 /s	t8 /s	t9 /s	t10/s	t /s	δ t /s
0.05	0.698	0.699	0.699	0.695	0.707	0.693	0.704	0.695	0.698	0.688	0.698	0,005
0.10	1.000	1.005	0.994	1.010	1.007	0.994	1.013	1.001	1.014	1.003	1.004	0,007
0.15	1.204	1.200	1.208	1.209	1.192	1.190	1.202	1.206	1.215	1.212	1.204	0,008
0.20	1.346	1.350	1.363	1.326	1.345	1.351	1.358	1.345	1.330	1.340	1.345	0,011
0.25	1.551	1.571	1.549	1.529	1.574	1.572	1.535	1.558	1.548	1.538	1.553	0,015
0.30	1.711	1.690	1.696	1.711	1.708	1.723	1.716	1.694	1.723	1.721	1.709	0,012
0.35	1.833	1.841	1.835	1.851	1.858	1.821	1.845	1.851	1.824	1.838	1.840	0,011
0.40	1.961	1.960	1.990	1.961	1.975	1.966	1.969	1.939	1.958	1.968	1.965	0,012
0.45	2.076	2.091	2.049	2.058	2.076	2.095	2.056	2.080	2.101	2.067	2.075	0,017
0.50	2.197	2.180	2.178	2.189	2.217	2.190	2.216	2.171	2.181	2.175	2.189	0,015
0.55	2.293	2.276	2.260	2.302	2.320	2.272	2.288	2.309	2.312	2.319	2.295	0,020
0.60	2.395	2.363	2.398	2.387	2.364	2.380	2.377	2.412	2.429	2.392	2.390	0,019
0.65	2.491	2.498	2.515	2.465	2.491	2.457	2.481	2.463	2.495	2.459	2.482	0,019
0.70	2.590	2.568	2.573	2.562	2.554	2.618	2.554	2.586	2.588	2.596	2.579	0,019
0.75	2.675	2.670	2.687	2.703	2.657	2.711	2.714	2.698	2.671	2.649	2.684	0,021
0.80	2.764	2.787	2.789	2.798	2.789	2.779	2.798	2.764	2.755	2.801	2.782	0,015
0.85	2.846	2.823	2.834	2.826	2.875	2.875	2.805	2.872	2.826	2.850	2.843	0,023
0.90	2.926	2.885	2.966	2.942	2.898	2.895	2.942	2.926	2.937	2.965	2.928	0,027
0.95	3.007	3.034	3.045	2.966	2.996	3.003	2.963	2.988	2.982	2.987	2.997	0,025
1.00	3.085	3.066	3.060	3.050	3.086	3.051	3.121	3.118	3.112	3.090	3.084	0,025

Tab. 2.5.2. Závislost dráhy na čase, deska 19 mm

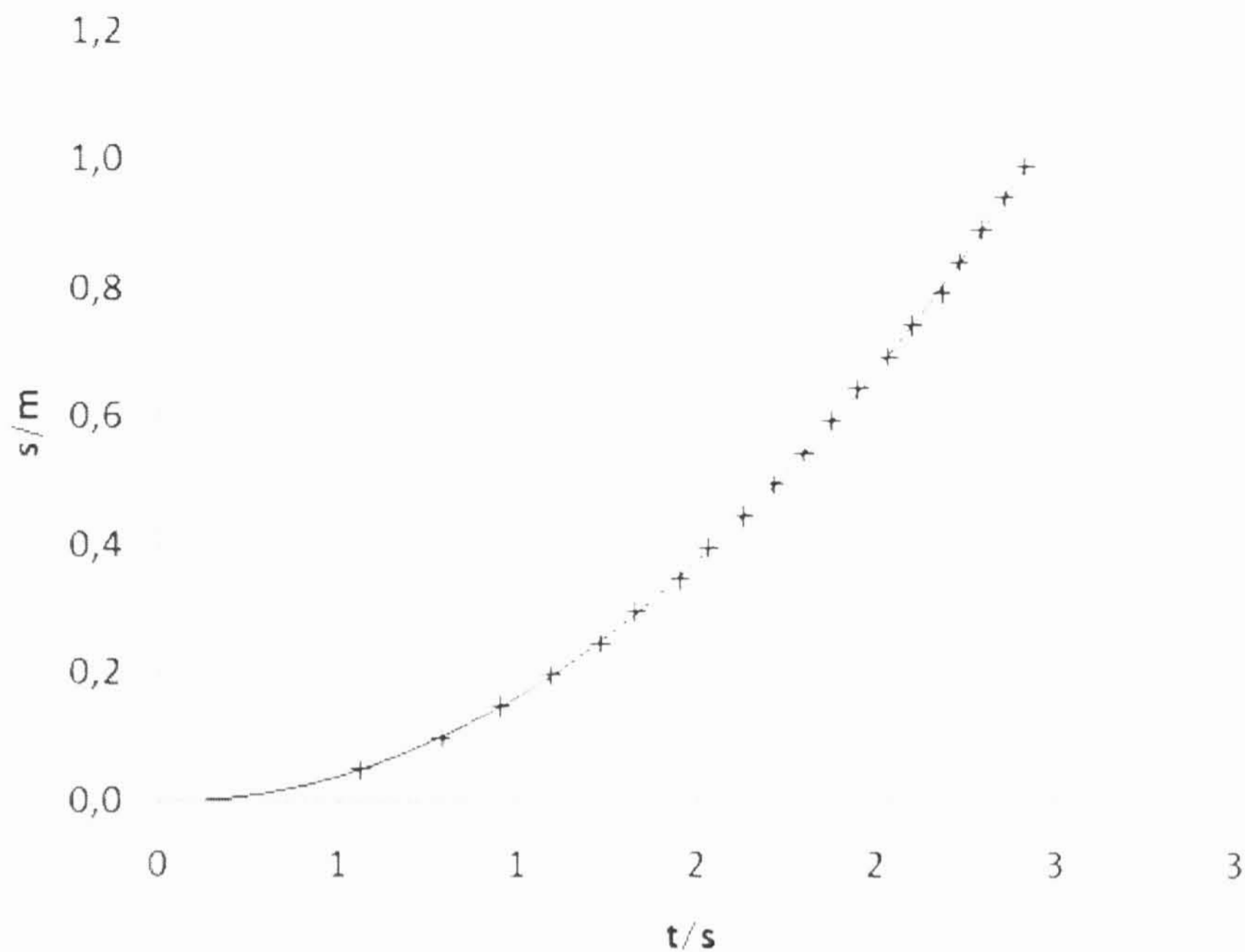


Graf 2.5.2. Závislost dráhy na čase, deska 19 mm

Tab. 2.5.3. Pohyb po nakloněné rovině závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	0,552	0,557	0,546	0,552	0,558	0,557	0,558	0,560	0,557	0,555	0,555	0,005
0,10	0,783	0,785	0,784	0,782	0,772	0,792	0,788	0,774	0,792	0,784	0,784	0,007
0,15	0,948	0,952	0,951	0,950	0,953	0,956	0,936	0,943	0,937	0,951	0,948	0,008
0,20	1,086	1,101	1,085	1,090	1,083	1,074	1,092	1,085	1,096	1,097	1,089	0,011
0,25	1,220	1,223	1,232	1,226	1,222	1,228	1,233	1,235	1,219	1,229	1,227	0,015
0,30	1,327	1,311	1,331	1,325	1,330	1,343	1,343	1,311	1,313	1,315	1,325	0,012
0,35	1,439	1,457	1,454	1,432	1,443	1,459	1,429	1,454	1,460	1,460	1,449	0,011
0,40	1,533	1,523	1,523	1,544	1,543	1,522	1,515	1,536	1,529	1,515	1,528	0,012
0,45	1,629	1,613	1,631	1,633	1,616	1,610	1,629	1,649	1,620	1,629	1,626	0,017
0,50	1,715	1,740	1,738	1,697	1,697	1,726	1,699	1,701	1,701	1,696	1,711	0,015
0,55	1,798	1,790	1,780	1,800	1,789	1,819	1,800	1,801	1,793	1,775	1,795	0,020
0,60	1,877	1,895	1,854	1,874	1,855	1,852	1,886	1,893	1,852	1,868	1,871	0,019
0,65	1,952	1,944	1,950	1,956	1,941	1,931	1,981	1,926	1,927	1,932	1,944	0,019
0,70	2,034	2,005	2,027	2,023	2,060	2,059	2,022	2,026	2,043	2,008	2,031	0,019
0,75	2,094	2,083	2,092	2,072	2,111	2,088	2,085	2,101	2,112	2,106	2,094	0,021
0,80	2,170	2,151	2,189	2,201	2,178	2,182	2,150	2,195	2,184	2,168	2,177	0,015
0,85	2,227	2,238	2,199	2,224	2,244	2,216	2,232	2,257	2,201	2,220	2,226	0,023
0,90	2,282	2,281	2,300	2,284	2,302	2,280	2,309	2,300	2,274	2,261	2,287	0,027
0,95	2,352	2,381	2,363	2,359	2,352	2,367	2,321	2,335	2,318	2,370	2,352	0,025
1,00	2,419	2,388	2,389	2,446	2,386	2,418	2,400	2,455	2,405	2,402	2,411	0,025

Tab. 2.5.3. Závislost dráhy na čase, deska 30 mm

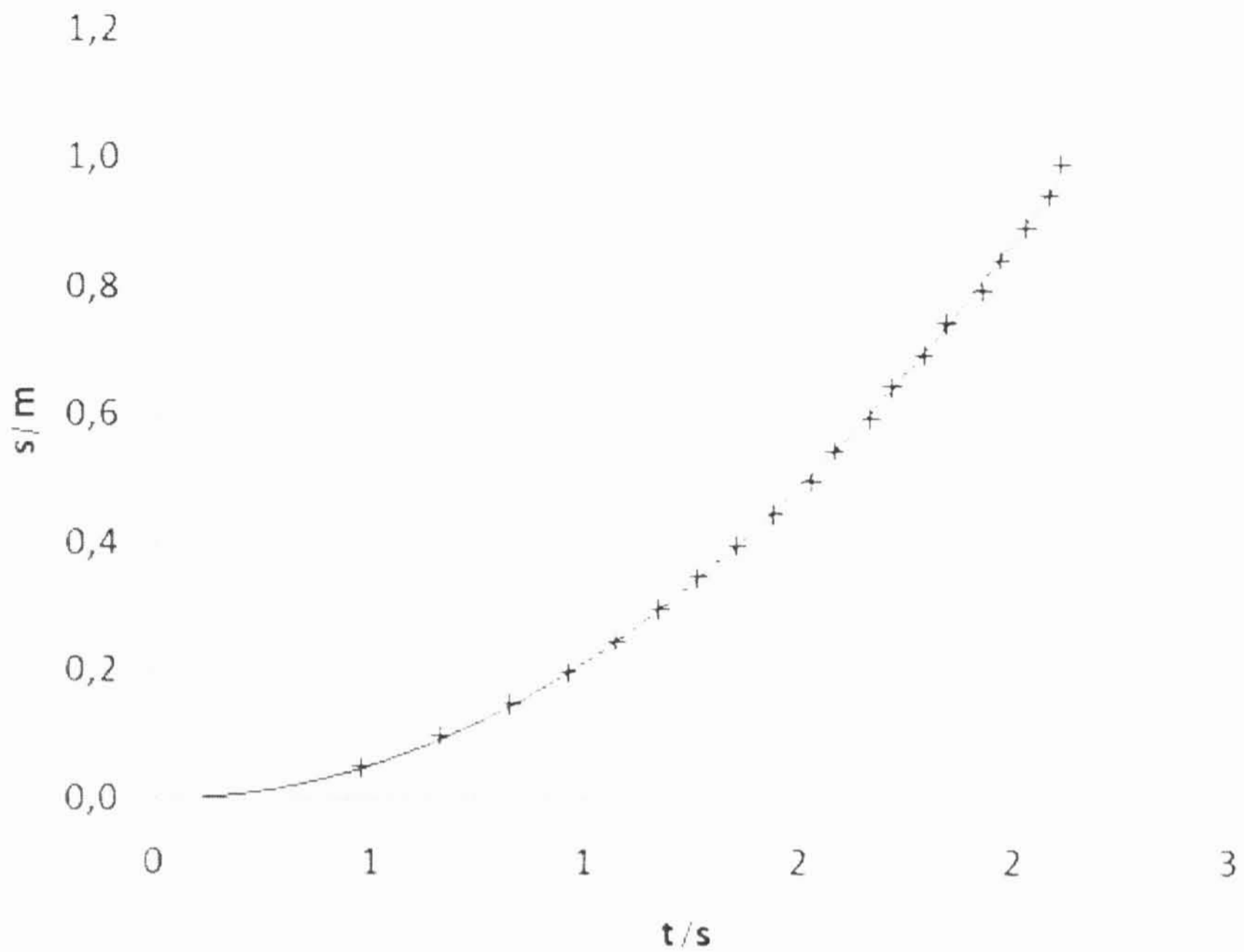


Graf 2.5.3. Závislost dráhy na čase, deska 30 mm

Tab. 2.5.4. Pohyb po nakloněné rovině závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	0,473	0,469	0,478	0,470	0,472	0,475	0,468	0,479	0,477	0,470	0,473	0,004
0,10	0,663	0,662	0,655	0,659	0,654	0,658	0,661	0,670	0,657	0,656	0,660	0,005
0,15	0,822	0,810	0,826	0,831	0,814	0,833	0,811	0,828	0,821	0,829	0,823	0,008
0,20	0,959	0,966	0,945	0,954	0,950	0,949	0,964	0,950	0,971	0,949	0,956	0,008
0,25	1,063	1,067	1,059	1,079	1,077	1,060	1,077	1,071	1,077	1,055	1,069	0,008
0,30	1,167	1,180	1,165	1,176	1,168	1,180	1,165	1,163	1,178	1,154	1,170	0,008
0,35	1,259	1,263	1,258	1,271	1,259	1,264	1,256	1,250	1,274	1,250	1,260	0,007
0,40	1,348	1,355	1,368	1,350	1,337	1,355	1,359	1,358	1,347	1,330	1,351	0,010
0,45	1,429	1,447	1,434	1,429	1,450	1,448	1,428	1,423	1,427	1,439	1,435	0,009
0,50	1,519	1,534	1,530	1,529	1,520	1,540	1,501	1,531	1,507	1,532	1,524	0,012
0,55	1,580	1,570	1,563	1,573	1,588	1,561	1,590	1,561	1,602	1,586	1,577	0,013
0,60	1,656	1,678	1,653	1,655	1,634	1,648	1,676	1,678	1,674	1,658	1,661	0,014
0,65	1,719	1,705	1,714	1,697	1,729	1,704	1,707	1,705	1,715	1,709	1,710	0,009
0,70	1,785	1,795	1,778	1,804	1,809	1,777	1,762	1,763	1,786	1,788	1,785	0,015
0,75	1,847	1,838	1,837	1,824	1,827	1,825	1,841	1,866	1,821	1,830	1,836	0,013
0,80	1,913	1,915	1,918	1,936	1,917	1,935	1,912	1,922	1,930	1,922	1,922	0,008
0,85	1,967	1,938	1,976	1,953	1,968	1,951	1,957	1,989	1,941	1,986	1,963	0,017
0,90	2,026	2,047	2,052	2,011	2,020	2,018	1,998	2,040	2,012	2,000	2,022	0,018
0,95	2,081	2,066	2,077	2,084	2,095	2,057	2,066	2,068	2,096	2,063	2,075	0,013
1,00	2,104	2,093	2,110	2,095	2,112	2,092	2,096	2,096	2,106	2,134	2,104	0,012

Tab. 2.5.4. Závislost dráhy na čase, deska 38 mm



Graf 2.5.4. Závislost dráhy na čase, deska 38 mm

Jak se ukazuje z grafů, závislost dráhy na čase odpovídá rovnoměrně zrychlenému přímočarému pohybu. Shoda s teoretickou křivkou je poměrně značná.

V dalším měření se zaměříme na závislost „skoro okamžité“ rychlosti na čase při různých výškách  $d$  desek.

V tabulkách 2.5.5. až 2.5.9. jsou uvedeny v prvním sloupci pozice měřícího čidla  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby je určena „skoro okamžitá“ rychlost tohoto průchodu  $v$ .  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti, při použití různých desek výšky  $d$  (9 mm, 18 mm, 30 mm, 38 mm).

Tab. 2.5.5. Pohyb po nakloněné rovině závislost rychlost - čas

s/m	t1/ms	t2/ms	t3/ms	t4/ms	t5/ms	t6/ms	t7/ms	t8/ms	t9/ms	t10/ms	t/ms	Δt/ms	v/m.s <sup>-1</sup>	Δv/m.s <sup>-1</sup>
0.05	245,24	243,19	246,39	246,40	248,67	248,44	247,39	247,16	242,51	245,52	246,1	1,9	0,0813	0,0006
0.10	177,33	177,04	179,35	174,78	177,81	177,78	179,65	179,39	178,00	177,66	177,9	1,4	0,1124	0,0009
0.15	145,69	146,83	147,36	143,71	145,97	144,73	146,78	146,78	145,37	146,96	146,0	1,1	0,1370	0,0010
0.20	126,72	125,13	125,53	128,25	127,81	127,35	124,92	125,52	127,63	126,39	126,5	1,1	0,1581	0,0014
0.25	114,36	113,82	113,59	116,05	115,63	114,55	113,96	113,30	114,59	114,01	114,4	0,8	0,1748	0,0013
0.30	104,30	105,14	104,81	105,83	105,28	102,82	104,05	103,75	104,07	103,37	104,3	0,9	0,1917	0,0016
0.35	97,50	98,94	98,12	96,97	96,13	96,43	96,91	97,29	96,75	98,56	97,4	0,9	0,2054	0,0018
0.40	91,85	91,27	91,06	93,04	92,83	91,40	91,79	91,27	91,73	90,87	91,7	0,7	0,2181	0,0016
0.45	86,55	87,30	86,39	85,80	87,28	85,71	85,26	86,07	87,15	87,17	86,5	0,7	0,2313	0,0019
0.50	82,43	81,55	81,77	81,72	83,66	82,40	83,46	82,03	81,27	82,74	82,3	0,8	0,2420	0,0022
0.55	78,70	78,47	77,75	77,80	77,89	78,78	79,01	77,85	78,34	78,74	78,3	0,5	0,2553	0,0015
0.60	75,59	74,49	75,91	74,90	74,95	76,58	76,00	75,25	74,83	76,30	75,5	0,7	0,2650	0,0023
0.65	72,71	72,60	73,41	71,73	73,78	73,43	72,61	72,26	73,54	73,15	72,9	0,6	0,2743	0,0023
0.70	70,52	70,36	71,32	70,07	69,72	70,65	70,93	71,36	70,36	69,83	70,5	0,5	0,2836	0,0022
0.75	67,94	68,45	67,77	68,45	68,47	67,03	67,41	67,65	67,60	68,11	67,9	0,5	0,2946	0,0020
0.80	65,73	66,61	65,80	66,64	64,98	65,03	65,87	64,92	65,55	65,42	65,7	0,6	0,3046	0,0027
0.85	64,03	63,98	63,57	63,19	64,19	63,47	64,72	64,79	63,33	64,46	64,0	0,5	0,3126	0,0027
0.90	62,11	62,21	62,70	61,95	62,21	62,25	61,37	61,54	62,27	62,11	62,1	0,4	0,3222	0,0019
0.95	60,74	60,80	61,37	60,04	61,28	61,05	60,62	59,88	59,87	60,34	60,6	0,5	0,3300	0,0029
1.00	59,58	59,90	59,24	58,88	58,76	59,52	59,87	59,24	59,75	58,77	59,4	0,4	0,3370	0,0024

Tab. 2.5.5. Závislost rychlosti na čase, deska 9 mm

Tab. 2.5.6. Pohyb po nakloněné rovině závislost rychlost - čas

s/m	t1/ms	t2/ms	t3/ms	t4/ms	t5/ms	t6/ms	t7/ms	t8/ms	t9/ms	t10/ms	t/ms	Δt/ms	v/m.s <sup>-1</sup>	Δv/m.s <sup>-1</sup>
0.05	165,81	166,21	165,60	163,66	167,57	165,91	167,03	166,09	167,75	167,48	166,3	1,2	0,1203	0,0008
0.10	116,08	117,43	116,68	116,35	117,40	116,99	114,34	115,59	116,21	117,36	116,4	0,9	0,1718	0,0014
0.15	96,36	97,31	95,36	95,41	95,06	97,12	96,17	96,81	95,54	95,93	96,1	0,7	0,2081	0,0016
0.20	86,01	85,68	85,55	86,37	85,67	86,27	85,75	87,01	86,18	86,78	86,1	0,5	0,2322	0,0013
0.25	74,87	75,20	75,07	74,82	74,81	74,09	75,91	75,96	74,58	73,91	74,9	0,6	0,2669	0,0023
0.30	68,14	68,82	67,71	67,32	67,17	68,66	68,23	68,09	68,18	67,82	68,0	0,5	0,2941	0,0022
0.35	63,40	63,09	62,82	64,25	64,30	63,70	63,52	63,39	62,52	63,02	63,4	0,5	0,3155	0,0027
0.40	59,35	59,86	60,17	59,24	59,97	58,78	60,00	59,56	58,89	59,75	59,6	0,5	0,3358	0,0026
0.45	56,00	55,32	55,52	55,75	55,94	55,46	56,04	56,28	55,46	56,68	55,8	0,4	0,3581	0,0026
0.50	52,98	53,68	52,40	52,99	53,33	53,40	53,01	52,31	52,88	53,55	53,1	0,4	0,3770	0,0031
0.55	50,72	51,11	51,44	49,98	51,45	51,06	49,96	51,11	50,66	50,00	50,7	0,6	0,3941	0,0043
0.60	48,51	48,18	48,47	49,06	48,59	48,96	48,65	49,10	47,93	48,35	48,6	0,4	0,4117	0,0031
0.65	46,70	46,20	46,20	46,34	46,79	46,89	46,17	46,92	46,37	46,41	46,5	0,3	0,4301	0,0026
0.70	45,07	45,65	44,67	45,61	45,15	45,12	45,11	45,56	45,57	44,53	45,2	0,4	0,4424	0,0037
0.75	43,51	43,67	44,13	43,45	43,38	43,93	43,07	43,65	43,96	43,49	43,6	0,3	0,4585	0,0032
0.80	42,11	41,55	42,40	41,88	41,63	42,67	41,78	42,25	42,39	42,27	42,1	0,3	0,4751	0,0039
0.85	40,90	40,58	40,71	40,68	41,43	40,45	40,84	41,10	40,94	41,37	40,9	0,3	0,4890	0,0037
0.90	39,83	40,19	39,64	40,08	40,31	40,04	39,51	39,24	39,52	40,10	39,8	0,3	0,5019	0,0042
0.95	38,72	39,21	39,11	38,92	38,28	39,12	39,01	38,31	38,28	39,26	38,8	0,4	0,5152	0,0050
1.00	37,75	37,97	37,50	37,44	38,13	38,09	37,99	37,85	37,77	37,38	37,8	0,3	0,5293	0,0036

Tab. 2.5.6. Závislost rychlosti na čase, deska 19 mm

Tab. 2.5.7. Pohyb po nakloněné rovině závislost rychlosti - čas

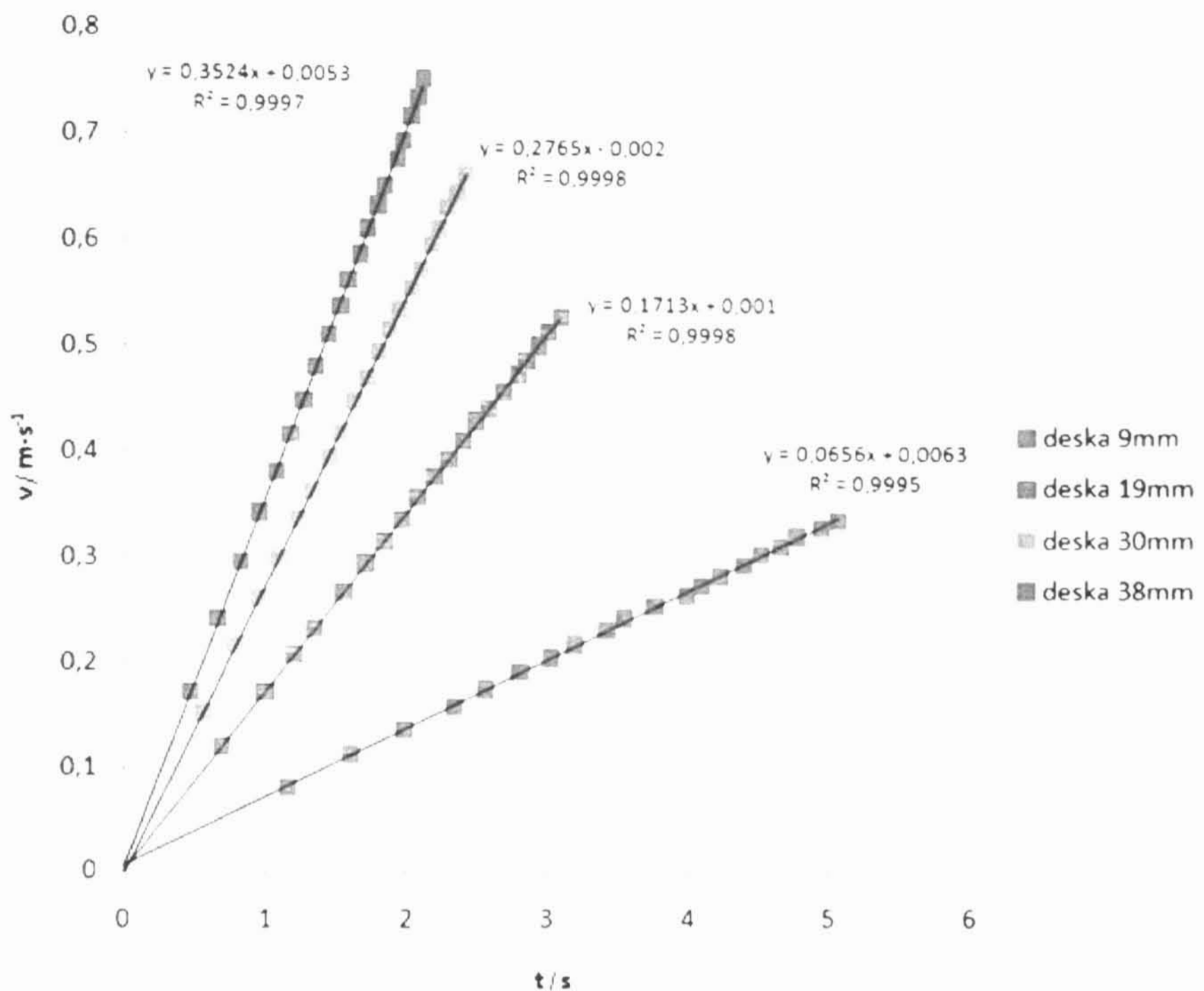
s/m	t1/ms	t2/ms	t3/ms	t4/ms	t5/ms	t6/ms	t7/ms	t8/ms	t9/ms	t10/ms	v/ms	Δt/ms	v/m.s <sup>-1</sup>	Δv/m.s <sup>-1</sup>
0,05	131,46	130,84	130,86	131,20	132,46	131,61	131,63	131,81	129,98	133,14	131,5	0,8	0,1521	0,0010
0,10	92,37	92,56	92,11	91,77	93,66	91,88	91,83	93,01	91,85	93,45	92,4	0,7	0,2163	0,0016
0,15	76,57	76,62	76,43	77,63	77,43	77,44	75,75	77,60	75,60	76,02	76,7	0,7	0,2607	0,0025
0,20	66,78	66,59	66,95	66,36	66,38	66,66	67,66	67,18	67,65	67,77	67,0	0,5	0,2985	0,0023
0,25	59,55	59,38	59,09	60,44	59,32	59,02	60,10	59,94	58,74	59,77	59,5	0,5	0,3359	0,0028
0,30	54,99	55,68	54,59	54,48	54,83	55,55	54,98	55,38	55,50	54,23	55,0	0,5	0,3635	0,0031
0,35	50,47	51,13	50,56	50,82	50,98	50,18	50,41	50,57	50,16	50,92	50,6	0,3	0,3950	0,0024
0,40	47,74	47,75	47,65	48,10	47,57	47,40	47,67	47,92	48,00	47,04	47,7	0,3	0,4184	0,0026
0,45	44,60	44,51	44,03	44,98	44,06	44,27	44,87	44,12	44,84	44,49	44,5	0,3	0,4497	0,0034
0,50	42,54	42,00	42,47	42,28	42,28	42,51	42,86	42,69	42,05	42,71	42,4	0,3	0,4713	0,0030
0,55	40,40	40,55	40,46	40,43	40,18	40,08	39,96	40,17	40,46	40,36	40,3	0,2	0,4962	0,0023
0,60	38,75	38,25	39,29	38,59	38,84	38,66	38,52	38,61	38,24	38,40	38,6	0,3	0,5179	0,0039
0,65	37,22	37,22	37,26	37,75	37,09	36,95	37,29	37,31	37,44	37,46	37,3	0,2	0,5362	0,0030
0,70	35,98	35,60	36,37	35,84	36,35	35,69	35,45	36,07	36,46	35,65	35,9	0,3	0,5564	0,0052
0,75	34,69	34,52	34,97	34,94	34,73	35,19	34,86	34,52	34,81	34,33	34,8	0,2	0,5755	0,0040
0,80	33,53	33,64	33,85	33,28	33,70	33,04	33,41	33,42	33,42	33,22	33,5	0,2	0,5979	0,0041
0,85	32,61	32,56	32,61	32,54	33,07	32,24	32,71	32,32	32,57	32,70	32,6	0,2	0,6136	0,0040
0,90	31,55	31,75	31,23	31,89	31,32	31,42	31,09	31,77	31,88	31,61	31,6	0,3	0,6339	0,0053
0,95	30,88	31,01	31,24	30,75	30,81	30,81	31,32	30,75	30,70	30,72	30,9	0,2	0,6473	0,0044
1,00	29,92	30,31	29,89	30,00	30,24	30,27	29,64	30,17	29,54	30,28	30,0	0,3	0,6661	0,0058

Tab. 2.5.7. Závislost rychlosti na čase, deska 30 mm

Tab. 2.5.8. Pohyb po nakloněné rovině závislost rychlosti - čas

s/m	t1/ms	t2/ms	t3/ms	t4/ms	t5/ms	t6/ms	t7/ms	t8/ms	t9/ms	t10/ms	v/ms	Δt/ms	v/m.s <sup>-1</sup>	Δv/m.s <sup>-1</sup>
0,05	116,27	115,98	116,24	115,61	114,59	116,41	117,01	115,86	117,77	117,20	116,3	0,8	0,1720	0,0013
0,10	82,88	82,45	82,87	82,82	83,21	83,65	83,49	81,73	82,74	83,57	82,9	0,6	0,2411	0,0016
0,15	67,58	68,48	67,61	68,07	68,03	68,21	67,22	66,95	67,21	68,33	67,8	0,5	0,2951	0,0022
0,20	58,29	57,84	59,00	58,07	57,92	59,01	57,87	58,83	58,95	58,35	58,4	0,5	0,3424	0,0027
0,25	52,50	52,73	52,56	51,86	53,00	52,84	51,94	52,12	53,21	52,58	52,5	0,4	0,3807	0,0031
0,30	47,90	48,62	47,48	48,43	47,89	48,24	48,08	47,99	47,44	47,77	48,0	0,4	0,4168	0,0031
0,35	44,46	44,37	44,94	44,78	44,14	44,48	44,15	45,02	44,70	44,43	44,5	0,3	0,4490	0,0029
0,40	41,53	41,67	42,05	41,83	41,91	41,67	41,09	41,11	42,03	41,09	41,6	0,4	0,4808	0,0042
0,45	39,27	38,86	39,49	38,82	38,79	39,52	38,72	39,38	38,87	39,49	39,1	0,3	0,5112	0,0042
0,50	37,11	37,38	37,65	37,00	37,11	37,10	36,72	37,45	36,58	37,41	37,2	0,3	0,5383	0,0046
0,55	35,57	35,84	35,49	35,11	35,92	35,43	35,76	35,11	35,94	35,15	35,5	0,3	0,5629	0,0050
0,60	34,05	33,82	33,69	34,20	34,54	34,54	33,75	34,13	33,90	34,02	34,1	0,3	0,5871	0,0049
0,65	32,75	33,05	32,55	32,30	32,62	32,61	32,71	32,62	32,72	32,62	32,7	0,2	0,6123	0,0033
0,70	31,55	31,90	31,42	31,31	31,91	31,81	31,79	31,25	31,15	31,46	31,6	0,3	0,6339	0,0054
0,75	30,51	30,43	30,79	30,47	30,67	30,83	30,96	30,60	30,74	30,31	30,6	0,2	0,6530	0,0041
0,80	29,53	29,66	29,27	29,89	29,32	29,80	29,41	29,78	29,53	29,21	29,5	0,2	0,6771	0,0052
0,85	28,68	28,89	28,96	28,88	28,44	28,59	28,82	28,91	28,92	28,37	28,7	0,2	0,6958	0,0049
0,90	27,82	27,47	27,44	28,16	27,83	27,94	27,81	28,08	27,88	27,96	27,8	0,2	0,7184	0,0057
0,95	27,15	27,55	27,43	26,87	27,04	27,08	27,51	26,88	27,13	27,07	27,2	0,2	0,7361	0,0063
1,00	26,52	26,19	26,80	26,56	26,26	26,71	26,37	26,43	26,82	26,54	26,5	0,2	0,7541	0,0058

Tab. 2.5.8. Závislost rychlosti na čase, deska 38 mm



Graf 2.5.5. Závislost skoro okamžité rychlosti na čase, při použití různých desek

Jak je z grafu patrné, má výška desky  $d$  vliv na zrychlení vozíku při pohybu na vzduchové dráze. Z grafu je patrné, že hodnota zrychlení je úměrná výšce desky.

Z naměřených údajů a ze znalosti, o jaký typ pohybu se jedná, určíme hodnotu tíhového zrychlení. Hodnota tíhové síly je určena dle vzorce:

$$F_g = Mg$$

Zrychlení vozíku je dáno dle II. Newtonova zákona:

$$F = aM$$

Pro pohyb na nakloněné rovině platí:

$$\sin\alpha = \frac{F}{F_g}$$

Tento vztah lze snadno odvodit z rozkladu sil na nakloněné rovině.

Nakloněná rovina svírá s vodorovnou rovinou úhel:

$$\sin\alpha = \frac{d}{l}$$

Kde  $d$  je výška desky a  $l$  je délka nakloněné roviny. Tyto úhly jsou sobě rovny, a proto platí:

$$\frac{d}{l} = \frac{F}{F_g}$$

Snadnou úpravou se dostáváme ke vztahu:

$$g = \frac{al}{d}$$

Hodnotu zrychlení  $a$  odečteme z grafu 2.5.5.

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty  $d$ ,  $a$ ,  $g$ , ve všech případech byla délka nakloněné roviny  $l = 1$  m (jedná se o vzdálenost podpěr vzduchové dráhy).

$d/m$	$a/m.s^{-2}$	$g/m.s^{-2}$
0,038	0,352	9,274
0,030	0,277	9,217
0,018	0,171	9,517
0,009	0,066	7,289

Tab.2.5.9. Výpočet tíhového zrychlení

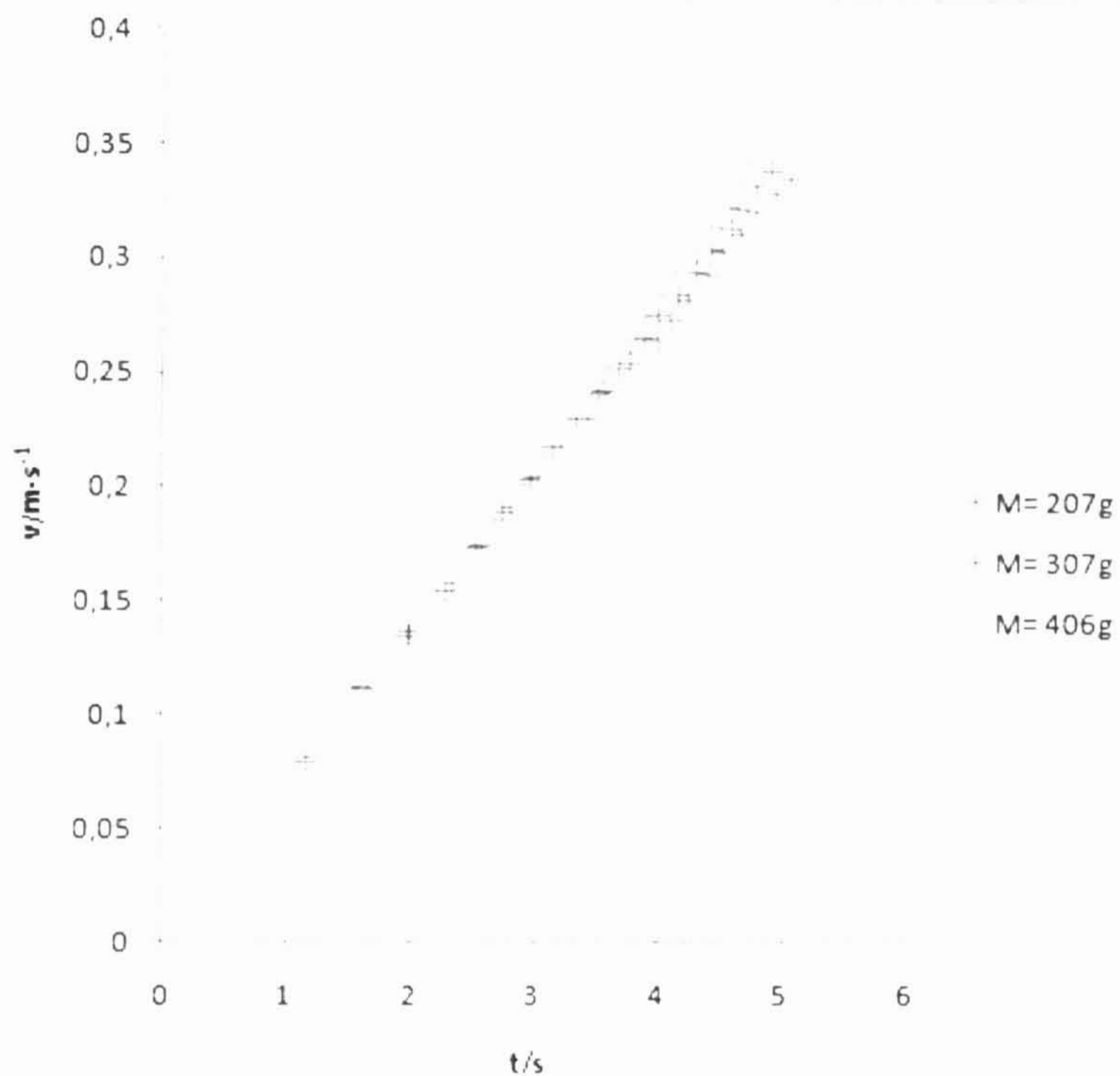
U desky 9 mm je chyba určení tíhového zrychlení největší z důvodu měření výšky desky s přesností na mm. Jak je patrné toto měření dává celkem dobrý odhad velikosti tíhového zrychlení. Jak bylo patrné z úvah v předchozí části úlohy, velikost zrychlení není závislá na hmotnosti vozíku. Ověříme, zda na hmotnosti vozíku opravdu nezáleží.

Tabulky 2.5.10. a 2.5.11. jsou tabulky s použitím vozíku 307g, první popisuje závislost dráhy na čase, druhá průběh „skoro okamžité“ rychlosti. Tabulky 2.5.12. a 2.5.13. jsou tabulky s použitím vozíku 406 g, první popisuje závislost dráhy na čase, druhá průběh „skoro okamžité“ rychlosti.







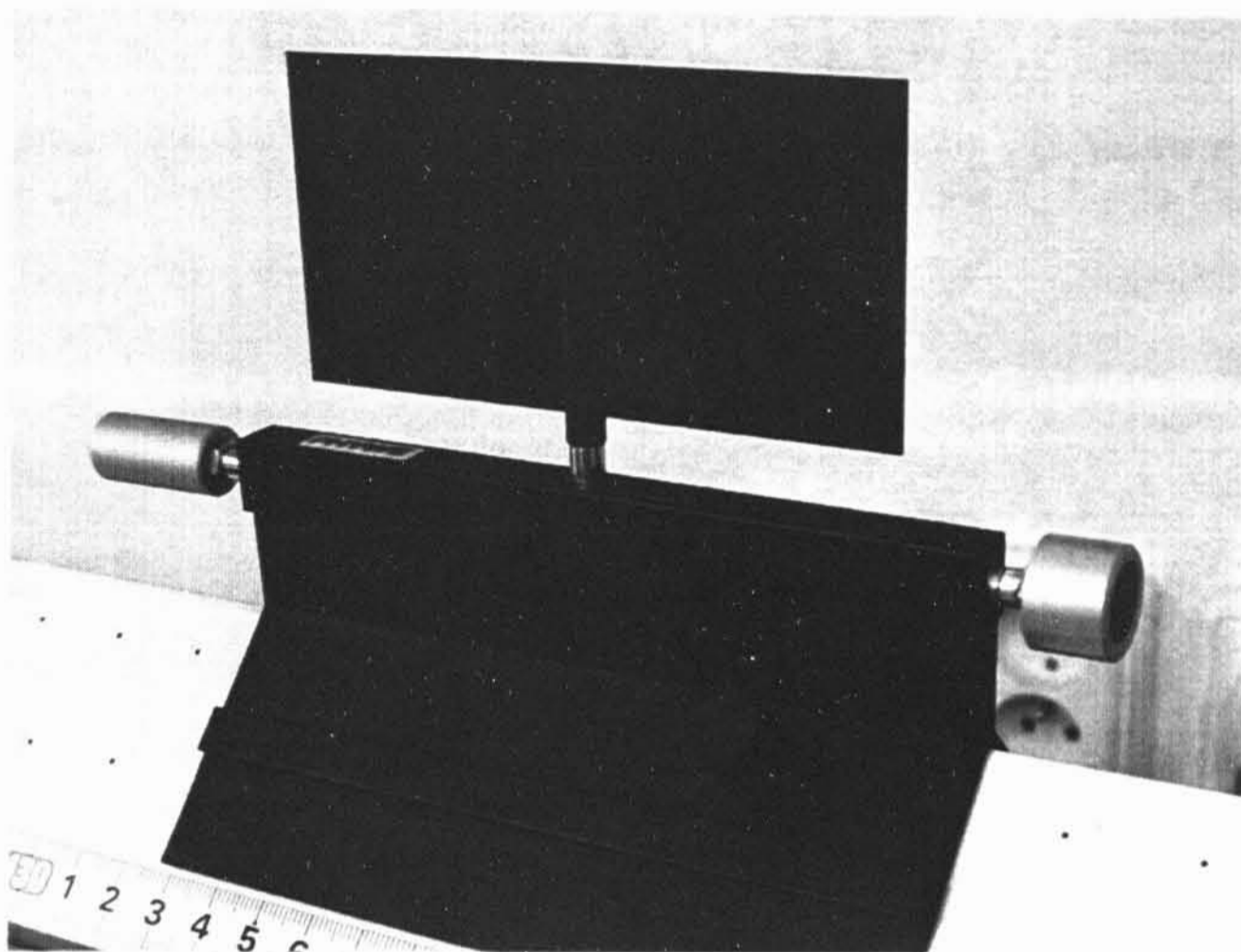


Graf 2.5.6. Závislost skoro okamžité rychlosti na čase, při použití vozíků různé hmotnosti

Jak je patrné z grafu, jsou hodnoty jednotlivých závislostí „skoro okamžité“ rychlosti na čase při použití různě hmotných vozíků velmi blízké. Závislosti tedy můžeme prohlásit za shodné.

## 2.6 Tryskový vozík

### 2.6.1 Tryskový vozík - zadání



Obr. 2.6-1 Tryskový vozík

#### Úkol

Změřte závislost dráhy na čase, při pohybu tryskového vozíku na lineární vzduchové dráze. Změřte průběh rychlosti tryskového vozíku.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, tryskový vozík, startovací zařízení, křídélko 2 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče.

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

Zrychlený přímočarý pohyb, zrychlení, dráha, průměrná rychlost, okamžitá rychlost.

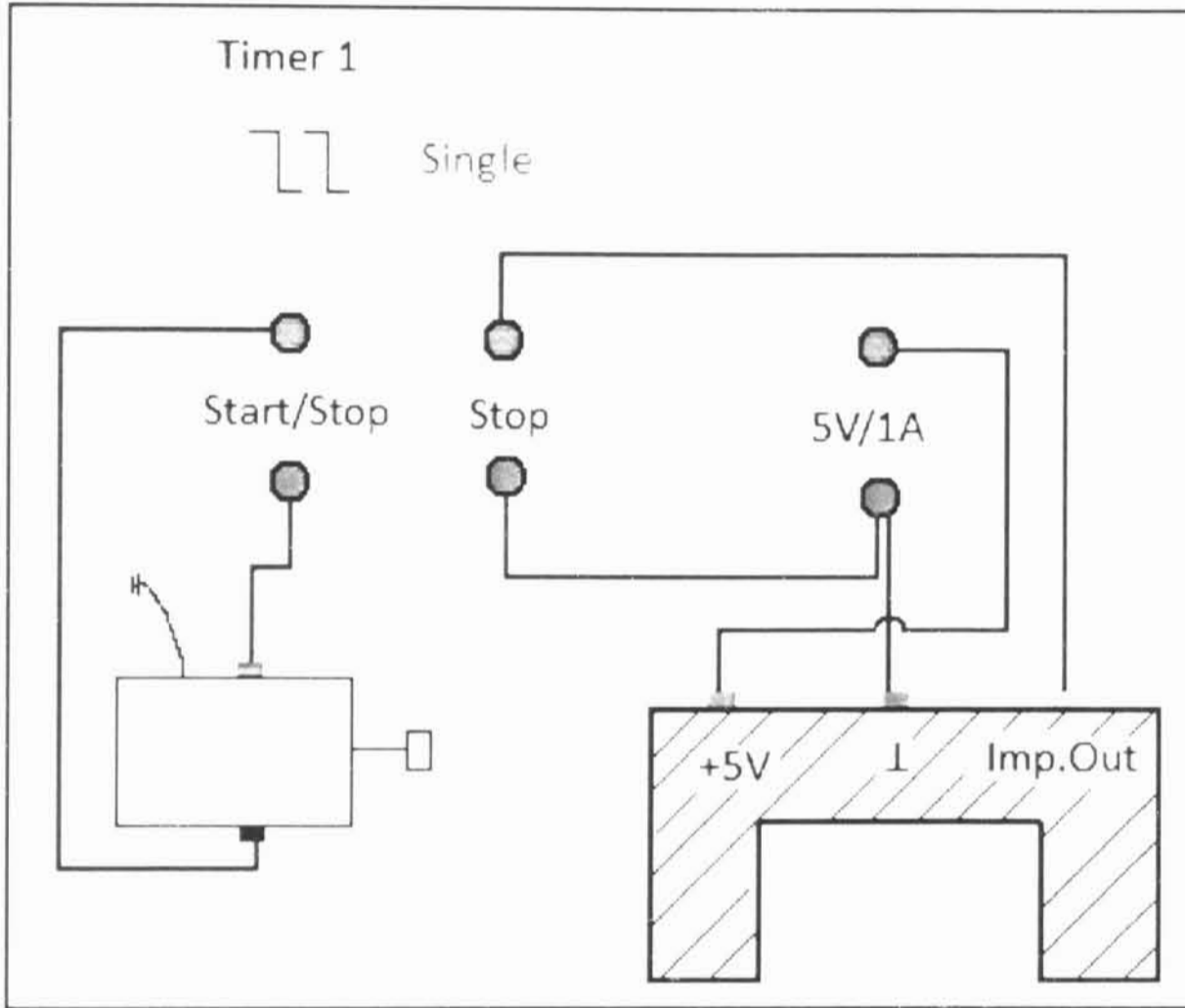
#### Příprava

- 1) Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nástavcem.
- 2) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.

- 3) Připravte tryskový vozík s křídélkem (vpravo s magnetickou přichytkou, vlevo s válečkem s modelínou). Nastavte shodný výfukový otvor.
- 4) Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nastavcem.
- 5) Připevněte na tyč nad dráhou měřicí zařízení.

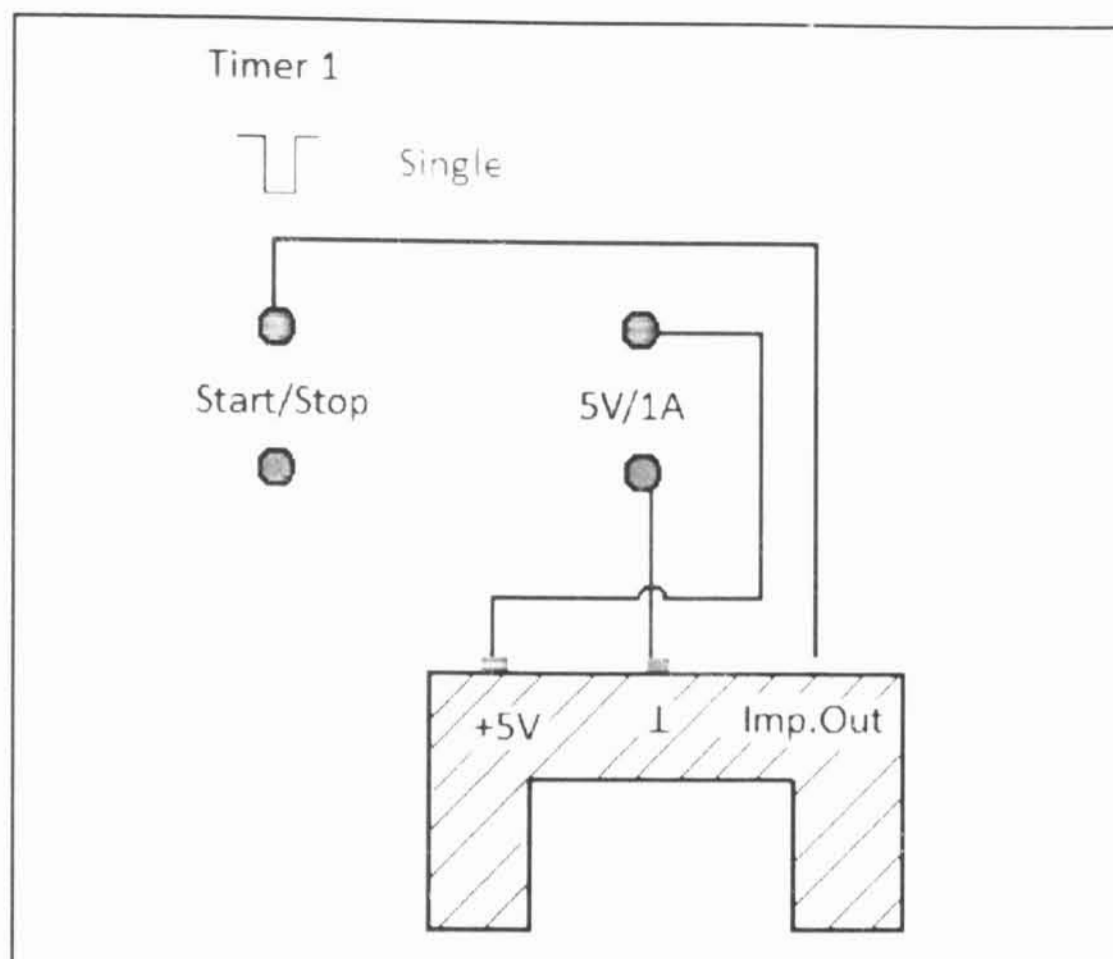
## Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje vozík k uražení vybrané vzdálenosti (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.6-2. Sestrojte graf dráhy vozíku v závislosti na čase.



Obr 2.6-2

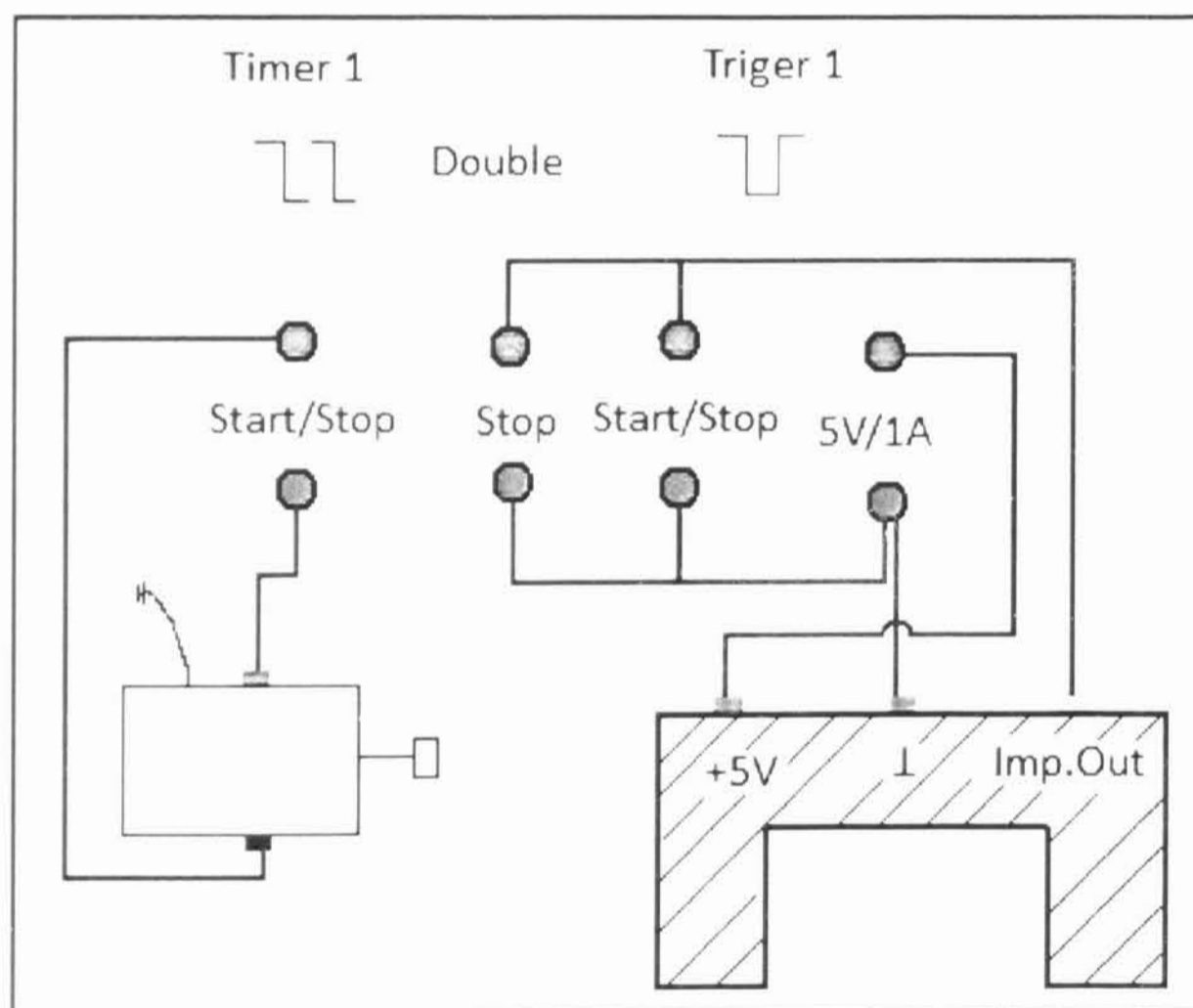
- 2) Změřte rychlost („skoro okamžitou“) ve vybraných pozicích na vzduchové dráze (např. 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.6-3.



Obr. 2.6-3.

- 3) Sestrojte graf závislosti „skoro okamžitě“ rychlosti v závislosti na čase.
- 4) Měření zopakujte pro druhou velikost výfukového otvoru.

Tip: měření lze provádět pro úsporu času i zároveň při využití zapojení dle obr. 2.6-4.



Obr. 2.6-4

## 2.6.2 Tryskový vozík - vypracování

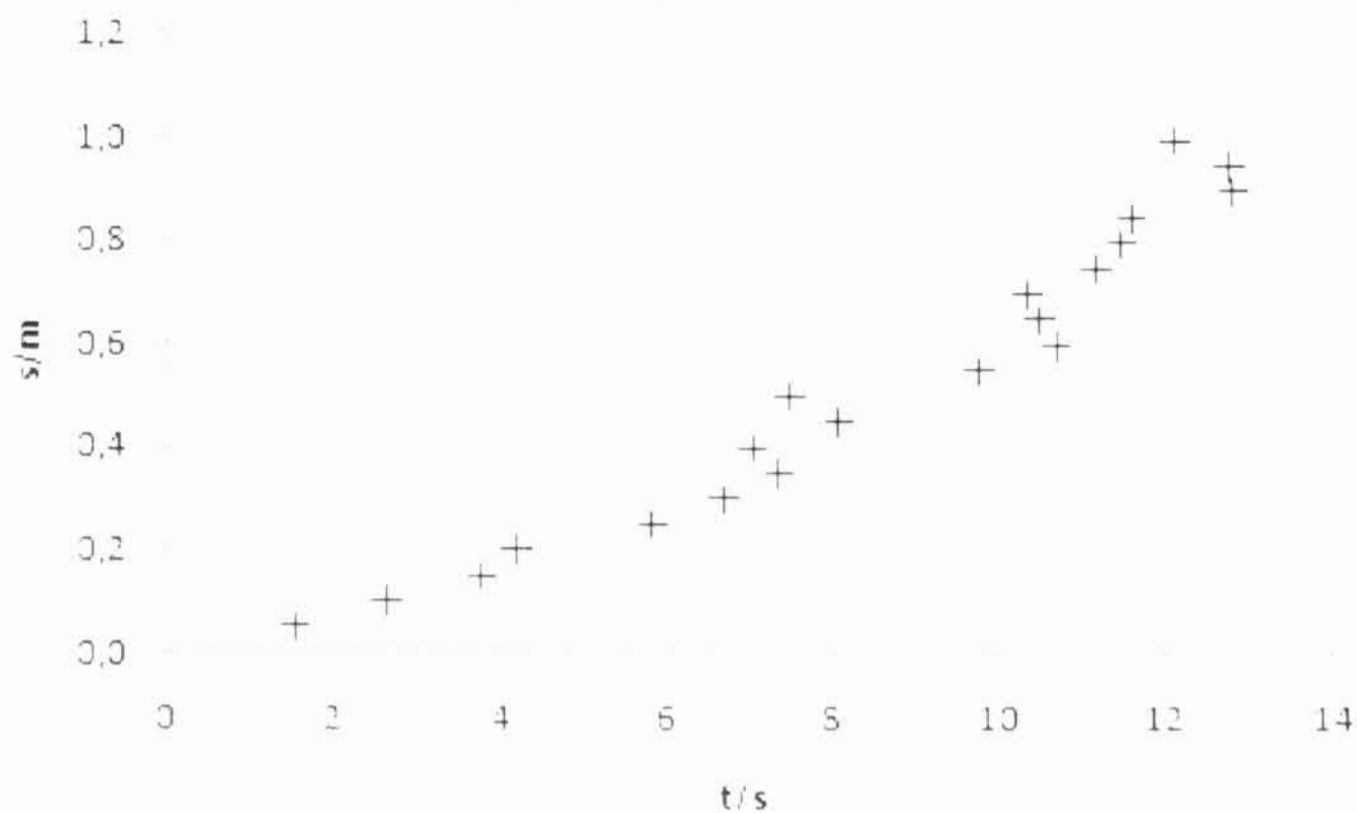
V této úloze prozkoumáme pohyb tryskového vozíku na lineární vzduchové dráze a pokusíme se určit, o jaký druh pohybu se jedná. Vozík je urychlován výfukem vzduchu skrze nastavitelné otvory. lze tedy předpokládat, že se bude jednat o jistý druh zrychleného přímočarého pohybu.

Tabulky 2.6.1. a 2.6.2. uvádějí v prvním sloupci délku dráhy  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka, při použití nastavení malého nebo velkého výfukového otvoru.

Tab. 2.6.1. Tryskový vozík závislost dráha - čas

$s / m$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
0,05	1,516	1,470	1,405	1,444	1,615	1,556	1,604	1,536	1,478	1,621	1,52	0,07
0,10	2,603	2,726	2,712	2,802	2,413	2,497	2,609	2,615	2,755	2,512	2,62	0,12
0,15	3,866	3,823	4,019	3,670	3,687	3,565	3,758	3,928	3,761	3,579	3,77	0,14
0,20	4,224	4,485	4,289	3,948	4,314	4,043	4,072	4,119	4,240	4,063	4,18	0,15
0,25	5,848	5,451	5,681	6,065	5,524	5,688	5,508	6,256	6,034	6,200	5,83	0,28
0,30	6,596	6,697	6,669	6,906	6,972	7,123	6,415	6,275	6,744	6,517	6,69	0,25
0,35	7,214	7,162	7,766	7,384	7,431	7,066	7,032	7,335	7,418	7,757	7,36	0,24
0,40	7,179	7,334	7,156	7,143	7,155	7,071	6,887	6,655	6,973	6,754	7,03	0,20
0,45	8,027	8,589	8,418	7,836	8,055	8,445	8,461	7,529	7,852	7,594	8,08	0,36
0,50	7,415	7,941	7,248	7,657	7,958	7,979	7,137	7,157	7,332	6,960	7,48	0,36
0,55	9,605	9,569	9,852	10,208	9,028	10,161	10,290	9,376	10,193	9,404	9,77	0,41
0,60	10,595	10,886	11,076	10,920	10,248	10,379	9,812	10,802	11,140	11,076	10,69	0,41
0,65	10,480	11,290	11,260	11,282	10,065	10,217	9,850	9,806	10,492	10,150	10,49	0,56
0,70	10,331	11,060	9,743	11,020	10,219	11,070	10,605	9,758	9,531	10,142	10,35	0,55
0,75	10,888	10,952	11,713	11,614	11,481	11,254	10,553	11,570	11,139	10,654	11,18	0,39
0,80	11,453	11,648	11,867	11,244	11,936	10,747	11,906	11,380	10,701	11,936	11,48	0,45
0,85	11,766	12,121	12,104	11,017	11,988	11,102	11,497	11,572	11,783	11,109	11,61	0,40
0,90	12,996	12,165	12,134	12,818	13,826	13,037	12,528	12,914	13,122	12,727	12,83	0,47
0,95	12,769	12,368	13,129	12,948	11,925	13,639	13,246	12,378	11,900	13,538	12,78	0,59
1,00	12,257	12,483	11,377	11,634	12,310	12,723	12,678	12,779	11,752	11,285	12,13	0,54

Tab. 2.6.1. Tryskový vozík dráha - čas, malý otvor



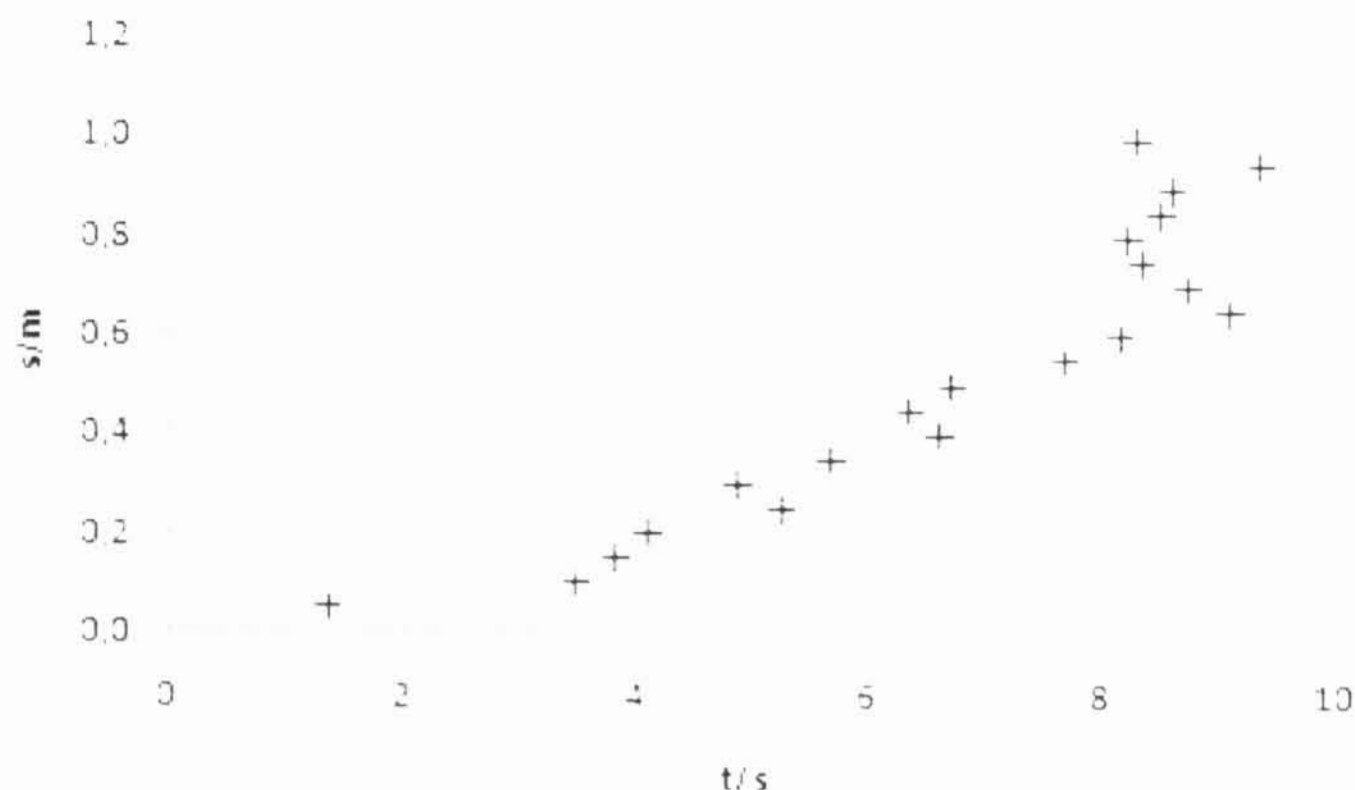
Graf. 2.6.1. Tryskový vozík dráha - čas, malý otvor

Tab. 2.6.2. Tryskový vozík závislost dráha - čas

s / m	t1 / s	t2 / s	t3 / s	t4 / s	t5 / s	t6 / s	t7 / s	t8 / s	t9 / s	t10 / s	t / s	δ t / s
0,05	1,319	1,412	1,405	1,374	1,345	1,354	1,268	1,353	1,420	1,355	1,36	0,04
0,10	3,556	3,292	3,460	3,544	3,302	3,317	3,639	3,534	3,519	3,772	3,49	0,15
0,15	3,767	3,788	3,894	3,784	3,926	4,018	3,691	4,018	3,701	3,701	3,83	0,12
0,20	4,093	3,768	3,837	3,910	4,356	4,285	4,418	4,370	3,827	4,192	4,11	0,24
0,25	5,297	5,651	4,988	5,637	5,015	5,448	5,365	5,042	5,019	5,125	5,26	0,25
0,30	4,928	4,948	4,787	5,097	4,798	4,629	4,766	5,014	4,842	4,940	4,87	0,13
0,35	5,709	5,637	5,581	5,558	5,792	5,986	5,852	5,942	5,434	5,308	5,68	0,21
0,40	6,417	6,585	6,683	6,681	6,778	6,839	6,292	5,923	6,923	6,927	6,60	0,30
0,45	6,348	6,012	6,552	6,575	5,852	5,908	6,443	6,527	6,646	6,715	6,36	0,30
0,50	6,730	6,924	6,501	6,946	6,308	7,157	6,661	6,880	6,242	6,805	6,72	0,28
0,55	7,831	8,094	7,654	8,096	8,201	7,447	7,426	7,214	7,251	7,570	7,68	0,34
0,60	8,301	8,374	8,088	7,934	7,820	7,654	7,662	8,437	8,638	8,796	8,17	0,38
0,65	9,036	9,293	8,689	9,113	9,687	9,206	8,636	8,851	9,458	9,135	9,11	0,31
0,70	8,755	9,134	9,102	8,084	9,249	8,622	9,070	8,309	8,315	8,834	8,75	0,38
0,75	8,405	8,162	8,081	7,912	9,053	7,863	8,564	8,823	8,779	7,898	8,35	0,41
0,80	8,319	8,817	8,530	8,030	8,661	8,064	8,009	8,274	7,797	7,837	8,23	0,33
0,85	8,606	8,537	8,214	8,821	9,213	8,091	8,982	7,927	8,401	8,386	8,52	0,38
0,90	8,682	8,216	8,656	9,212	8,777	8,011	8,444	8,723	8,532	8,795	8,60	0,31
0,95	9,308	8,930	8,916	9,308	10,018	9,697	9,291	9,258	9,769	9,243	9,37	0,34
1,00	8,212	8,344	8,680	8,541	8,562	8,325	8,467	7,690	8,319	7,965	8,31	0,28

Tab. 2.6.2. Tryskový vozík dráha - čas, velký otvor





Graf. 2.6.2. tryskový vozík dráha - čas, velký otvor

Měření jsou neprůkazná, nelze z naměřených hodnot jednoznačně určit, o jaký druh pohybu se jedná jak je patrné z grafu 2.6.1. a 2.6.2. Chyby měření jsou v této úloze značné, některá měření bylo dokonce nutno opakovat, jelikož se tryskový vozík ani neodpoutal od startovacího zařízení. Důvodem je slabá výfuková síla, jenž vozík urychluje. Zaměříme se tedy na zkoumání závislosti „skoro okamžité“ rychlosti na čase.

V tabulkách 2.6.3. až 2.6.4. jsou uvedeny v prvním sloupci pozice měřicího čidla  $s$ ,  $t_1-t_{10}$  jsou časy odpovídající průchodu křídélka příslušných sad měření,  $t$  je průměrná hodnota času,  $\delta t$  je směrodatná odchylka času průchodu. Z této doby je určena „skoro okamžitá“ rychlost tohoto průchodu  $v$ ,  $\delta v$  je směrodatná odchylka rychlosti, při použití nastavení malého nebo velkého výfukového otvoru.

Tab. 2.6.3. Tryskový vozík skoro okamžitá rychlost

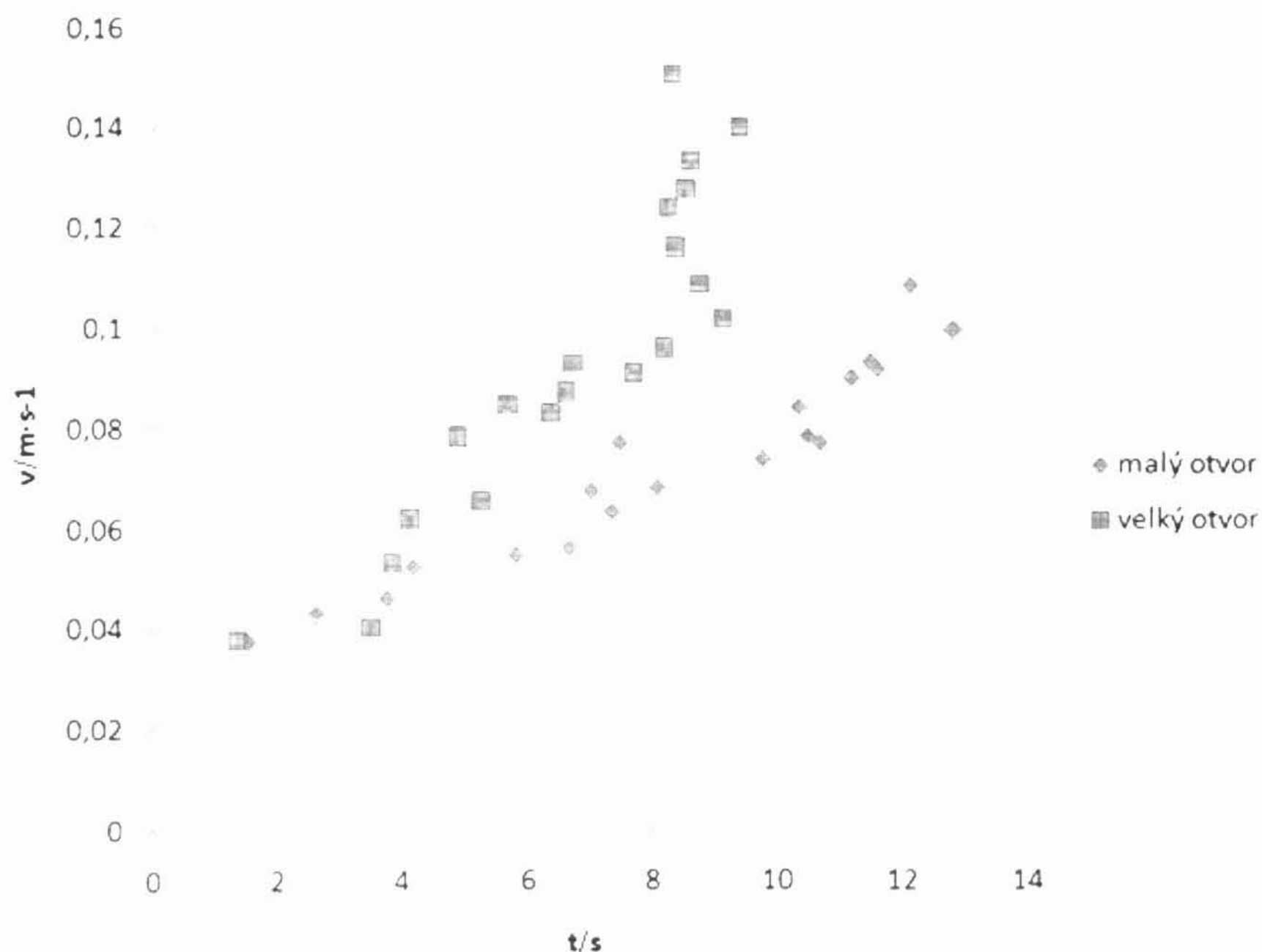
$s / m$	$t_1 / ms$	$t_2 / ms$	$t_3 / ms$	$t_4 / ms$	$t_5 / ms$	$t_6 / ms$	$t_7 / ms$	$t_8 / ms$	$t_9 / ms$	$t_{10} / ms$	$t / ms$	$\delta t / ms$	$v / m.s^{-1}$	$\delta v / m.s^{-1}$
0.05	540,57	546,79	509,08	535,58	554,04	519,78	525,26	505,91	514,82	548,69	530	17	0,0377	0,0012
0.10	469,58	469,39	435,72	458,64	453,20	440,48	441,05	483,05	502,20	464,96	462	20	0,0433	0,0018
0.15	422,50	406,62	448,85	444,41	431,35	440,37	436,84	434,41	446,77	417,78	433	13	0,0462	0,0014
0.20	377,58	356,71	367,47	381,45	378,78	406,38	398,42	371,37	384,11	388,47	381	14	0,0525	0,0019
0.25	367,26	367,76	359,84	352,65	389,07	368,45	351,59	356,64	355,19	376,57	365	11	0,0549	0,0017
0.30	351,34	354,13	375,73	371,51	353,77	351,77	335,24	378,12	365,86	323,24	356	17	0,0562	0,0026
0.35	315,17	293,30	338,29	316,61	317,09	323,71	305,87	297,40	332,03	316,02	316	13	0,0634	0,0027
0.40	293,05	284,36	303,51	284,93	292,09	282,02	313,52	299,02	303,16	305,81	296	10	0,0675	0,0023
0.45	291,29	307,57	284,22	283,08	281,44	292,25	309,07	302,14	285,88	296,35	293	10	0,0682	0,0022
0.50	260,76	273,28	240,18	256,06	274,21	247,64	246,78	263,48	277,89	251,61	259	12	0,0772	0,0037
0.55	268,95	278,88	280,00	259,65	273,06	258,99	276,50	284,04	268,32	261,15	271	9	0,0738	0,0023
0.60	260,87	253,97	276,53	280,34	249,46	251,37	257,91	256,46	268,80	240,57	260	12	0,0770	0,0035
0.65	254,86	239,97	257,14	255,36	259,03	274,31	248,70	259,24	238,04	264,87	255	10	0,0784	0,0032
0.70	236,52	230,37	231,06	241,34	250,28	246,54	235,66	241,06	231,93	231,43	238	7	0,0842	0,0023
0.75	226,21	214,29	211,33	229,74	231,83	213,66	221,90	230,13	229,83	214,21	222	8	0,0900	0,0031
0.80	214,51	200,32	229,85	231,02	212,16	229,02	198,95	205,09	225,70	198,59	215	13	0,0932	0,0056
0.85	216,72	226,19	214,02	230,34	213,04	212,78	216,33	212,51	205,02	233,11	218	8	0,0917	0,0036
0.90	206,75	203,68	195,23	209,56	200,29	192,99	192,93	209,71	195,63	202,91	201	6	0,0995	0,0031
0.95	200,21	215,26	200,76	201,39	187,58	209,04	196,61	194,26	190,55	215,14	201	9	0,0995	0,0045
1.00	185,85	175,24	176,49	172,19	183,74	194,25	198,36	184,72	193,06	180,46	184	8	0,1084	0,0048

Tab. 2.6.3. Tryskový vozík průběh skoro okamžité rychlosti, malý otvor

Tab. 2.6.4 Tryskový vozík skoro okamžitá rychlost

s / m	t1 / ms	t2 / ms	t3 / ms	t4 / ms	t5 / ms	t6 / ms	t7 / ms	t8 / ms	t9 / ms	t10 / ms	t / ms	$\delta t / ms$	$v / m.s^{-1}$	$\delta v / m.s^{-1}$
0.05	520.88	486.33	555.14	549.83	535.64	553.11	508.57	500.27	534.81	517.44	526	22	0.0380	0.0016
0.10	498.30	462.55	484.43	517.13	506.44	494.05	461.83	468.75	528.40	526.48	495	24	0.0404	0.0019
0.15	379.37	409.41	356.02	369.21	400.49	379.40	369.11	352.25	372.55	385.68	377	17	0.0530	0.0024
0.20	327.11	304.88	306.20	313.65	328.11	316.10	339.52	340.00	316.84	338.33	323	13	0.0619	0.0024
0.25	304.30	310.26	297.52	326.25	283.10	303.65	315.70	300.18	291.84	323.64	306	13	0.0654	0.0028
0.30	259.93	242.11	242.38	255.82	245.25	265.18	244.77	265.75	257.32	274.05	255	11	0.0784	0.0033
0.35	244.30	241.66	236.97	227.73	242.53	228.46	235.78	243.85	234.17	226.63	236	6	0.0847	0.0023
0.40	235.43	221.57	217.19	230.15	228.33	236.86	222.25	229.40	227.97	239.78	229	7	0.0874	0.0026
0.45	234.37	233.36	250.71	248.61	236.89	244.24	248.49	225.69	236.51	249.09	241	8	0.0831	0.0028
0.50	219.26	214.51	218.32	210.39	210.08	201.82	229.04	225.05	215.78	205.13	215	8	0.0931	0.0035
0.55	219.61	216.85	236.17	203.35	213.55	202.52	235.06	228.72	214.70	224.75	220	11	0.0911	0.0046
0.60	207.66	194.85	200.73	204.57	208.41	194.37	219.10	217.97	211.04	224.19	208	10	0.0960	0.0044
0.65	198.54	198.41	191.71	205.51	206.28	196.47	188.69	184.41	189.99	201.11	196	7	0.1020	0.0036
0.70	183.37	181.33	171.21	186.61	184.17	190.27	193.20	176.43	193.31	173.36	183	7	0.1091	0.0044
0.75	172.37	171.55	166.65	172.70	167.71	185.77	178.96	159.06	176.38	171.29	172	7	0.1161	0.0046
0.80	160.49	164.01	172.59	162.65	149.57	161.25	152.35	164.81	173.06	148.54	161	8	0.1243	0.0063
0.85	156.09	151.66	164.14	147.72	154.08	160.24	162.79	150.24	151.35	167.73	157	6	0.1277	0.0052
0.90	149.26	157.90	140.36	155.89	153.02	156.16	138.11	148.00	154.64	145.01	150	7	0.1335	0.0058
0.95	143.72	146.41	144.28	134.62	143.63	146.72	146.80	139.57	139.75	141.31	143	4	0.1402	0.0036
1.00	129.70	134.68	134.39	138.83	130.76	123.21	139.79	125.96	138.82	130.46	133	5	0.1508	0.0061

Tab. 2.6.4. Tryskový vozík průběh skoro okamžité rychlosti, velký otvor



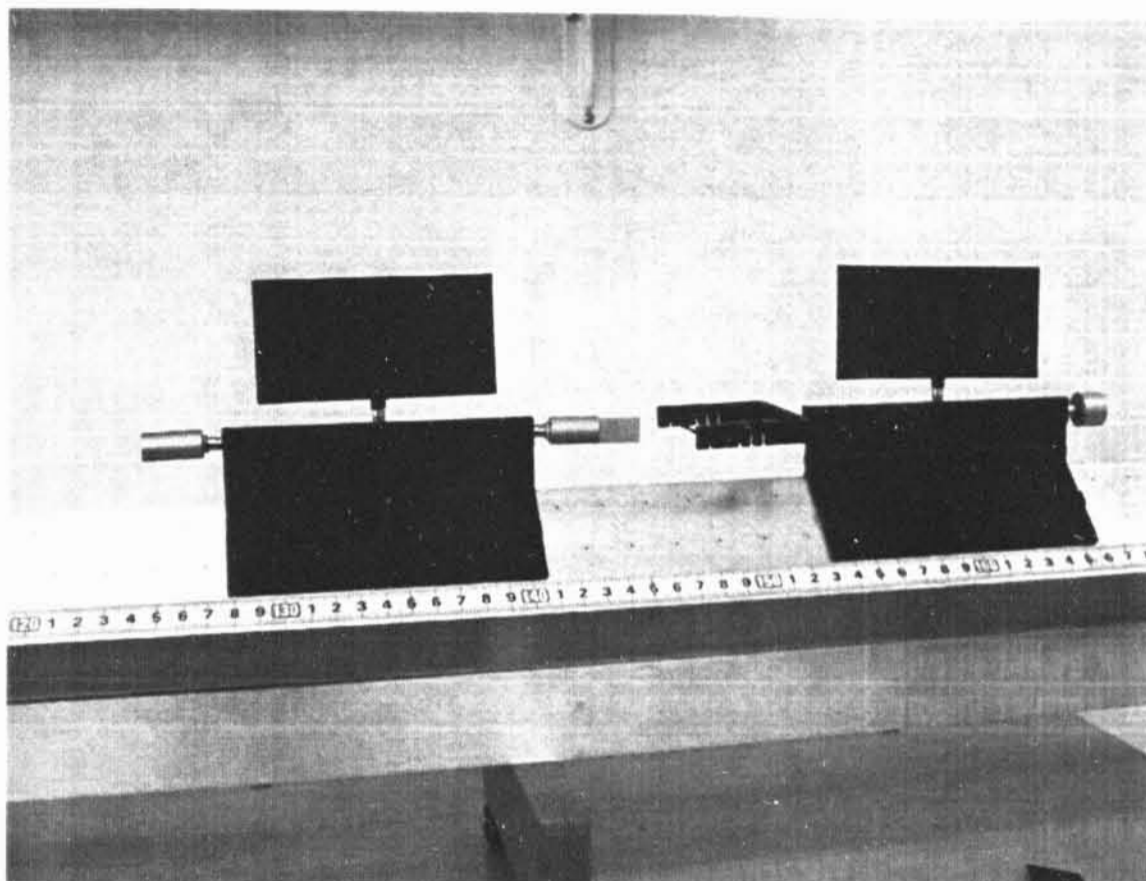
Graf. 2.6.3. Tryskový vozík závislost „skoro okamžitá“ rychlosti na čase, srovnání otvorů

Toto měření již přináší lepší popis situace, z grafu 2.6.3. je patrné, že u obou nastavení výfukového otvoru se jedná o zrychlený přímočarý pohyb. Dále lze z grafu rozpoznat, že pokud je vozíku nastaven větší výfukový otvor, je urychlování více. Není však možno směrodatně rozhodnout, zda se jedná o rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, či nikoliv, případně jaká je závislost „skoro okamžité“ rychlosti na čase, proto jsem ani v grafu 2.6.3. hodnoty neprokládal spojnicí.

Velký vliv na toto měření má také výkon dmyhadla, v této úloze je potřeba ohlídat si, aby bylo nastaveno dmyhadlo na stále stejný výkon, což je, z důvodu jeho konstrukce, poměrně obtížné dosáhnout. Nastavení pomocí otočného regulátoru není dostatečně přesné a také proud vzduchu není stále konstantní.

## 2.7 Pružná srážka dvou vozíků

### 2.7.1 Pružná srážka dvou vozíků - zadání



Obr. 2.7-1. Pružná srážka

#### Úkol

Demonstrujte pružnou srážku dvou vozíků na vzduchové dráze.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidla, vozíky, startovací zařízení, křídélka 10 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče, jehlový nástavec, váleček s modelínou, závaží, plochý nástavec, nástavec s gumou.

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

Srážka, pružná srážka, zákon zachování hybnosti, hybnost

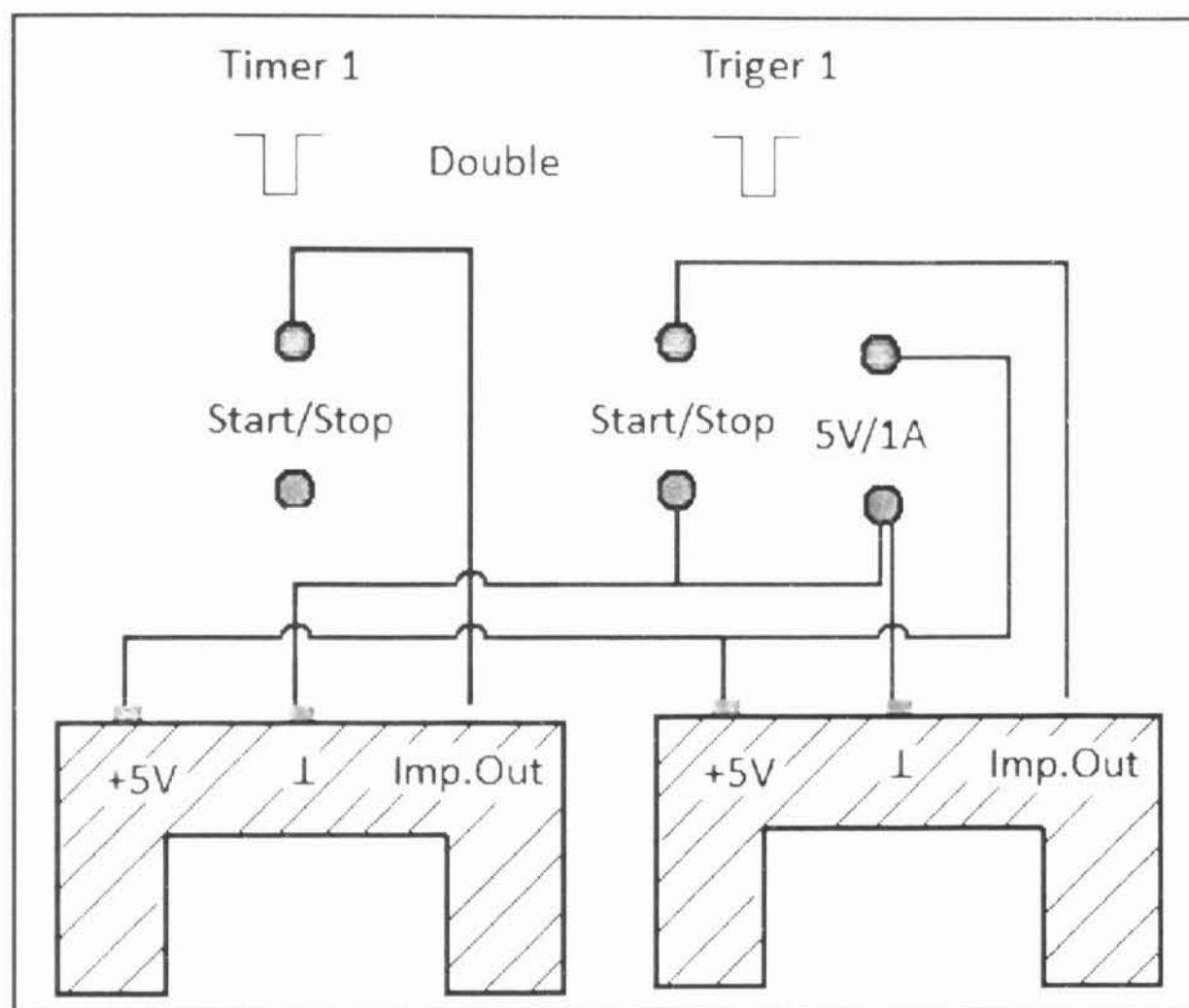
#### Příprava

1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nástavcem
2. Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřící zařízení.
3. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
4. Připravte vozíky s křídélky (první vpravo s magnetickou příchytkou, vlevo plochým nástavcem, druhý vpravo s nástavcem s gumou a vlevo s válečkem s plastelínou).
5. Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.
6. Sejměte ochranou korkovou zátku z jehly.

## Provedení

- 1) Změřte rychlosti vozíků při pružné srážce (volte nulovou počáteční rychlost druhého vozíku)
- 2) Diskutujte jaké poměry hmotnosti vozíků jsou zajímavé.
- 3) Diskutujte chybu měření.

Měření provádějte zapojením dle obr. 2.7-2.



Obr. 2.7-2.

## 2.7.2 Pružná srážka dvou vozíků - vypracování

V této úloze se budeme zabývat pružnou srážkou dvou vozíků na lineární vzduchové dráze. Pružná srážka je zde uskutečňována odrazem plochého nástavce od nástavce s gumou. U gumy dochází v daném případě o pružnou deformaci, a tudíž nedochází k přeměně kinetické energie na jiný druh energie, tudíž platí zákon zachování energie. Stejně tak platí zákon zachování hybnosti soustavy.

Budeme zkoumat různé poměry hmotností jednotlivých vozíků. Hmotnost vozíku A, který budeme vystřelovat, označíme  $M1$ , tento vozík bude mít tedy nenulovou počáteční rychlost a tím i hybnost. Hmotnost vozíku B označíme  $M2$ , který z důvodu lepšího přiblížení bude mít nulovou počáteční rychlost, a tím i nulovou hybnost před srážkou. Toto uspořádání lze volit bez újmy na obecnosti, jelikož ostatní případy, kdy by vozík B měl nenulovou počáteční rychlost, lze vhodnou volbou vztažné soustavy převést na tento případ.

Pro zkoumání pružné srážky změříme vždy rychlost pohybujících se vozíků. Z naměřené rychlosti určíme hybnost vozíku, dle vztahu:

$$p = mv$$

V následujících tabulkách 2.7.1. až 2.7.9. jsou uváděny doby průchodu křídélka (10cm), přičemž doba  $t_1$  odpovídá průchodu křídélka vozíku A po vystřelení. Doba  $t_2$  odpovídá průchodu křídélka vozíku A po srážce v případě jeho návratu. Doba  $t_3$  odpovídá průchodu křídélka vozíku B po srážce. Doba  $t_4$  odpovídá průchodu křídélka vozíku A v případě, že pokračuje po srážce v původním směru. Pokud vozík A daným měřicím čidlem po srážce neprocházel, je u doby buňka proškrtnuta. Budeme tedy prověřovat, zda skutečně platí pro daný případ zákon zachování hybnosti.

V prvním případě budeme uvažovat stejnou hmotnost vozíků:

$$M1=210,5 \text{ g}, M2=210,8 \text{ g}$$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	119,716	119,596	119,609	117,043	120,657	117,23	117,656	121,193	122,513	119,351	119,5	1,7
t2/ms												
t3/ms	147,528	146,041	151,026	149,818	151,505	151,97	152,631	147,985	145,316	150,509	149,4	2,4
t4/ms												

Tab. 2.7.1.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,176 \pm 0,002) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,141 \pm 0,002) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 19,94%

$$M1=309,7 \text{ g}, M2=310,1 \text{ g}$$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	142,504	142,561	142,47	143,759	145,07	145,437	145,997	140,238	140,427	142,653	143,1	1,9
t2/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t3/ms	155,495	156,986	156,707	152,729	150,625	152,839	156,23	160,205	152,067	155,4	155,9	2,8
t4/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2.7.2.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,216 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,200 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 8,10%

$M1 = 309,7 \text{ g}$ ,  $M2 = 310,1 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	163,843	164,033	164,345	168,739	162,848	164,277	159,816	168,508	161,691	163,574	164,2	2,6
t2/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t3/ms	173,617	174,183	174,432	173,874	171,687	177,685	171,472	174,655	171,025	170,006	173,3	2,1
t4/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2.7.3.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,294 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,235 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 5,57%

Ve všech případech se nám vozík A zastavil, což bylo ve shodě s teoretickou předpovědí.

Dále vyzkoušíme případy kdy  $M1$  je větší než  $M2$ .

$M1 = 309,7 \text{ g}$ ,  $M2 = 210,8 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	146,85	142,894	143,279	144,495	142,242	147,184	143,401	146,046	142,571	143,332	144,2	1,7
t2/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t3/ms	132,318	129,098	129,001	131,957	131,678	131,187	131,07	127,649	130,046	128,584	130,3	1,5
t4/ms	826,322	866,183	840,483	866,92	840,348	859,323	837,736	831,763	835,251	852,067	845,6	13,8

Tab. 2.7.4.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,215 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,198 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 5,58%

$M1 = 408,8 \text{ g}$ ,  $M2 = 208,7 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	165,065	164,214	164,936	166,608	161,613	160,668	160,477	167,853	164,845	164,518	164,1	2,3
t2/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t3/ms	131,187	130,927	130,759	127,148	129,682	132,536	131,926	132,755	131,394	127,401	130,6	1,9
t4/ms	530,955	525,746	526,108	531,6	543,288	531,424	521,253	529,249	535,419	538,923	531,4	6,2

Tab. 2.7.5.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,249 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,237 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 4,97%

$M1=408,8 \text{ g}$ ,  $M2=308,2 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	165,527	166,414	164,475	166,69	170,115	162,839	160,839	166,457	161,093	164,995	164,9	2,7
t2/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t3/ms	153,479	154,52	152,567	149,133	151,5	149,221	157,913	155,424	154,944	156,082	153,5	2,7
t4/ms	1350,5	1344	1137,1	1322,042	1285,319	1318,329	1295,549	1329,854	1315,543	1261,525	1301,0	45,7

Tab. 2.7.6.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,248 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,232 \pm 0,005) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 6,30%

Zde při srážce docházelo k pokračování vozíku A v původním směru. Toto je ve shodě s teorií.

Dále vyzkoušíme případy kdy  $M2$  je větší než  $M1$ .

$M1=210,5 \text{ g}$ ,  $M2=310,0 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	121,83	120,158	120,35	120,249	118,984	123,61	121,384	121,404	117,727	121,542	120,7	1,5
t2/ms	599,471	555,92	536,594	556,044	563,317	580,678	570,032	548,719	575,248	580,727	566,7	17,4
t3/ms	174,536	175,841	178,396	181,415	176,408	171,407	177,777	176,65	180,889	174,335	176,8	2,9
t4/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2.7.7.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,174 \pm 0,002) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,138 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 20,73%

$M1=210,5 \text{ g}$ ,  $M2=409,7 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	120,357	121,177	120,926	117,628	122,231	122,816	117,513	120,214	118,264	122,606	120,4	1,9
t2/ms	412,466	421,457	419,704	415,531	427,689	416,776	429,767	425,981	415,223	415,224	420,0	5,7
t3/ms	203,514	199,373	199,856	200,037	204,554	206,922	206,193	203,635	197,795	197,902	202,0	3,2
t4/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2.7.8.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,175 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,153 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 12,67%

$M1=309,7 \text{ g}$ ,  $M2=409,8 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	146,265	149,161	147,487	144,1	148,171	151,825	150,449	147,955	147,127	151,319	148,4	2,3
t2/ms	1068,6	1153,1	1015,8	1106,954	1047,56	1080,909	1094,772	1067,955	1086,501	1076,933	1079,9	34,3
t3/ms	185,637	188,626	187,213	187,212	190,527	188,381	183,136	191,15	191,543	190,541	188,4	2,5
t4/ms	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Tab. 2.7.9.



Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,209 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,189 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 9,52%

Při srážce došlo k odrazu vozíku A zpět směrem, ze které byl vystřelen.

Při srážce došlo pokaždé k úbytku hybnosti tudíž, lze usuzovat, že se nejednalo o izolovanou soustavu. Při bližším pohledu na vozíky během srážky, bylo patrné, že se vychýlily a zavadily o vzduchovou dráhu. Největší rozdíl oproti teoretickým hodnotám nastával v případech, kdy byl první vozík A s nejnižší hmotností.

Pokud si vyjádříme ze zákona zachování hybnosti a zákona zachování energie vztahy pro výslednou rychlost vozíků dostáváme za předpokladu, že volíme nulovou počáteční rychlost vozíku B:

$$v_1 = \frac{(M_1 - M_2)u}{M_1 + M_2}$$

$$v_2 = \frac{2uM_1}{M_1 + M_2}$$

Kde  $u$  je počáteční rychlost vozíku A,  $v_1$  je rychlost prvního vozíku A po srážce,  $v_2$  je rychlost druhého vozíku B po srážce, z těchto vztahů můžeme odvodit zajímavé případy v závislosti na poměru hmotností vozíků.

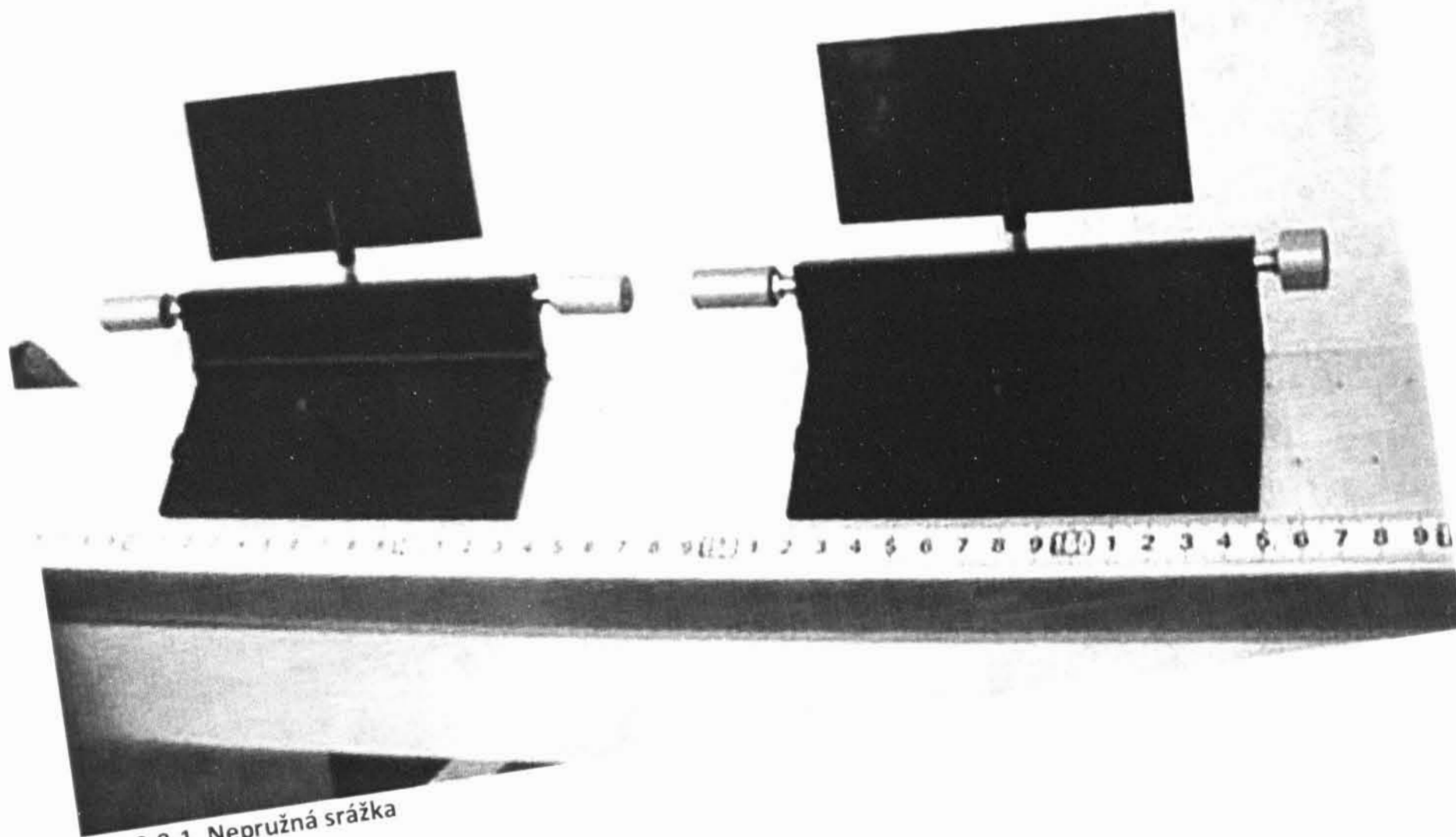
V případě, že jsou jejich hmotnosti shodné, dojde při srážce k zastavení prvního vozíku a druhý bude pokračovat původní rychlostí vozíku A.

V případě, že je poměr hmotností  $M_1:M_2 = 1:3$  budou se od sebe vozíky vzdalovat rychlostí rovné původní rychlosti vozíku A.

Při našem měření se mi však podařilo prokázat pouze jednu část z prvního případu.

## 2.8 Nepružná srážka dvou vozíků

### 2.8.1 Nepružná srážka dvou vozíků - zadání



Obr. 2.8-1. Nepružná srážka

#### Úkol

Demonstrujte nepružnou srážku dvou vozíků na vzduchové dráze.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřicí čidla, vozíky, startovací zařízení, křídélka 10 cm, magnetická příchytka, koncová zarážka, vodiče, jehlový nástavec, váleček s modelínou, závaží.

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

Srážka, nepružná srážka, zákon zachování hybnosti, hybnost

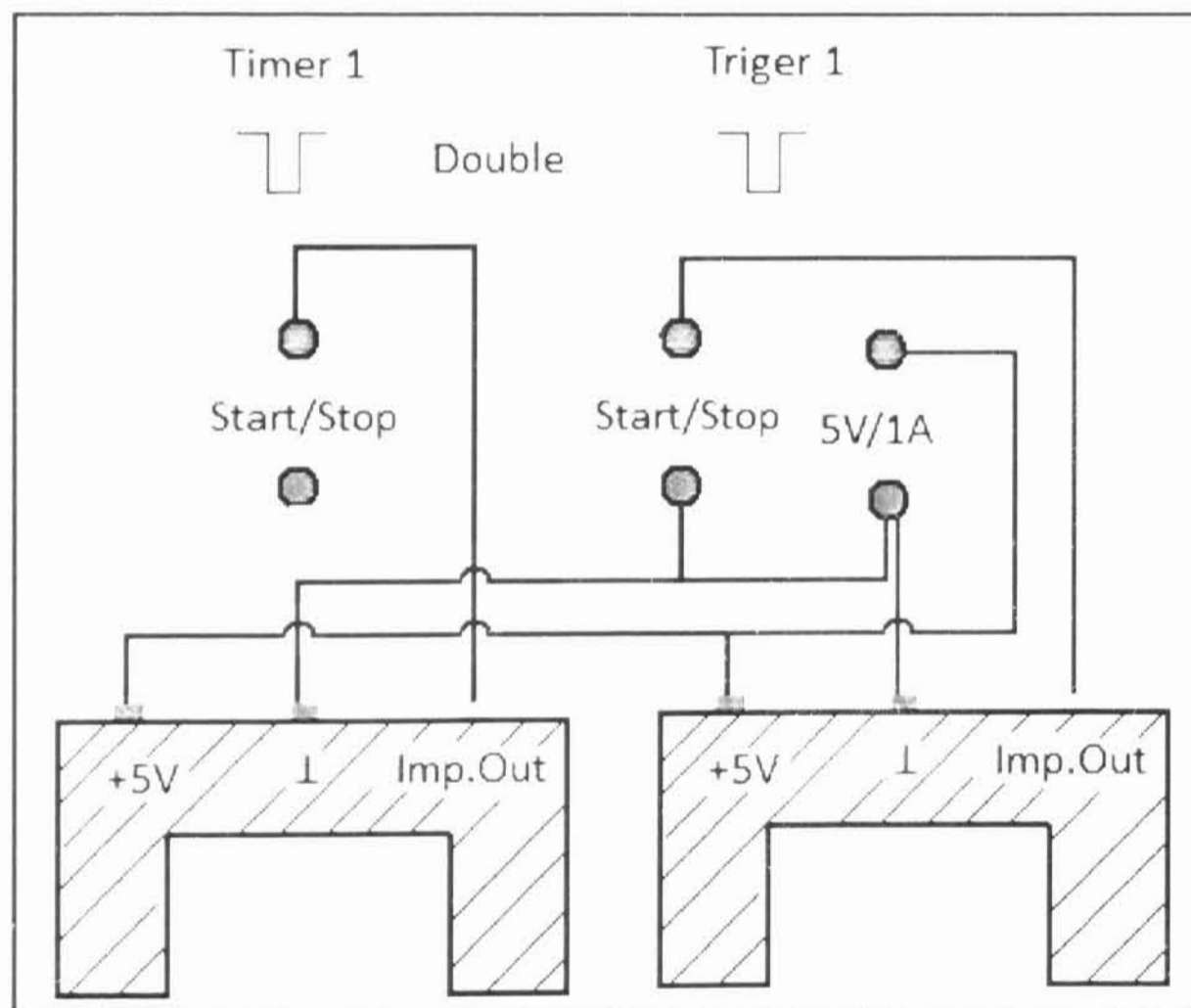
## Příprava

1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte startovací zařízení a zarážku s jehlovým nastavcem
2. Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřicí zařízení.
3. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
4. Připravte vozíky s křídélky (první vpravo s magnetickou příchytkou, vlevo s válečkem s plastelínou, druhý vpravo s jehlovým nastavcem a vlevo s válečkem s plastelínou).
5. Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.
6. Sejměte ochranou korkovou zátku z jehel.

## Provedení

- 1) Změřte rychlosti vozíků při nepružné srážce (volte nulovou počáteční rychlost druhého vozíku)
- 2) Diskutujte k čemu je možné tyto pokusy využít při výuce fyziky.
- 3) Diskutujte chybu měření.

Měření provádějte zapojením dle obr. 2.8-2.



Obr. 2.8-2.

## 2.8.2 Nepružná srážka dvou vozíků - vypracování

Nepružnou srážku v našem případě demonstrujeme vystřelením vozíku, s válečkem s plastelinou, který se spojí s druhým vozíkem během srážky za pomoci jehlového nástavce.

V případě nepružné srážky můžeme uvažovat pouze zákon zachování hybnosti soustavy. Nelze použít zákon zachování mechanické energie, jelikož tato se může při plastické deformaci, ke které při nepružné srážce dochází, přeměňovat na vnitřní energii (teplo). Vyjdeme-li tedy z předpokladu, že při našem pokusu se jedná o dokonale nepružnou srážku, budeme tedy zkoumat, zda hybnost vozíku před srážkou odpovídá hybnosti vozíků spojených po srážce.

Budeme zkoumat různé poměry hmotnosti jednotlivých vozíků. Hmotnost vozíku A, který budeme vystřelovat, označíme  $M1$ , tento vozík bude mít tedy nenulovou počáteční rychlost a tím i hybnost. Hmotnost vozíku B označíme  $M2$ , který z důvodu lepšího přiblížení bude mít nulovou počáteční rychlost, a tím i nulovou hybnost před srážkou. Toto uspořádání lze volit bez újmy na obecnosti, jelikož ostatní případy, kdy by vozík B měl nenulovou počáteční rychlost, lze vhodnou volbou vztažné soustavy převést na tento případ.

Pro zkoumání nepružné srážky změříme rychlost vystřeleného vozíku  $t_1$  a rychlost spojených vozíků (tj. spojené soustavy) po srážce. Z naměřené rychlosti určíme hybnost vozíku, dle vztahu:

$$p = mv$$

V následujících tabulkách 2.8.1. až 2.8.9. jsou uváděny doby průchodu křídélka (10 cm), přičemž doba  $t_1$  odpovídá průchodu křídélka vozíku A po vystřelení. Doba  $t_2$  odpovídá průchodu křídélka spojené soupravy vozíků po srážce. Budeme tedy prověřovat, zda skutečně platí pro daný případ zákon zachování hybnosti.

$M1=210,6$  g,  $M2=209,4$  g

Tab. 2.8.1. nepružná srážka												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/ms$	119,645	122,028	121,939	122,171	123,626	122,465	119,379	123,507	122,797	118,931	121,6	1,6
$t_2/ms$	264,446	288,628	275,574	276,783	278,574	275,256	272,512	276,626	278,589	278,856	276,6	5,7

Tab. 2.8.1.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,173 \pm 0,002) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,152 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 12,29%

$M1=210,6$  g,  $M2=308,7$  g

Tab. 2.8.2. nepružná srážka												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/ms$	119,98	121,636	121,512	124,257	125,484	124,829	119,547	118,625	124,211	122,273	122,2	2,3
$t_2/ms$	368,005	374,508	357,475	350,818	364,3	365,708	358,695	361,324	349,407	348,907	359,9	8,1

Tab. 2.8.2.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,172 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,144 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 16,26%

$M1=210,6 \text{ g}$ ,  $M2=408,4 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/\text{ms}$	121,267	121,101	120,226	118,994	124,215	123,012	118,838	118,126	121,017	119,967	120,7	1,8
$t_2/\text{ms}$	472,344	447,192	401,154	432,46	434,944	428,681	428,476	446,086	435,107	450,375	437,7	17,5

Tab. 2.8.3.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,175 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,141 \pm 0,006) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 18,96%

$M1=309,6 \text{ g}$ ,  $M2=209,4 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/\text{ms}$	142,962	145,438	146,444	144,224	148,949	143,905	142,419	144,704	142,763	142,655	144,4	1,9
$t_2/\text{ms}$	282,094	262,246	278,135	270,814	277,595	268,236	279,065	269,298	282,104	274,646	274,4	6,2

Tab. 2.8.4.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,214 \pm 0,003) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,189 \pm 0,004) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 11,76%

$M1=309,6 \text{ g}$ ,  $M2=308,6 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/\text{ms}$	145,888	144,314	143,356	143,742	149,981	138,109	152,243	142,982	139,874	143,432	144,4	4,0
$t_2/\text{ms}$	346,408	357,25	342,618	325,425	345,877	340,263	364,938	359,649	322,771	334,138	343,9	13,3

Tab. 2.8.5.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,214 \pm 0,006) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,180 \pm 0,007) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 16,17%

$M1=309,6 \text{ g}$ ,  $M2=408,3 \text{ g}$

č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\delta$
$t_1/\text{ms}$	144,617	142,932	144,24	142,267	140,502	151,683	144,275	136,122	149,495	140,122	143,6	4,3
$t_2/\text{ms}$	458,847	352,308	395,009	387,665	380,248	393,967	370,752	418,631	391,54	377,073	392,6	27,6

Tab. 2.8.6.

Hybnost před srážkou  $p_1=(0,216 \pm 0,006) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2=(0,183 \pm 0,013) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 15,17%

$M1=408,9 \text{ g}$ ,  $M2=209,4 \text{ g}$

Tab. 2.8.7. nepružná srážka												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	166,679	164,71	161,613	154,28	156,551	166,971	160,141	156,037	157,136	154,283	159,8	4,7
t2/ms	282,467	277,12	271,877	294,414	265,501	270,338	289,848	268,652	273,208	269,68	276,3	9,1

Tab. 2.8.7.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,256 \pm 0,008) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,224 \pm 0,007) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 12,53%

$M1 = 408,9 \text{ g}$ ,  $M2 = 308,7 \text{ g}$

Tab. 2.8.8. nepružná srážka												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	165,524	171,034	159,596	168,078	159,014	171,411	165,038	162,669	160,671	154,638	163,8	5,2
t2/ms	343,799	334,695	329,749	342,981	352,415	350,109	321,596	327,623	319,191	359,086	338,1	12,9

Tab. 2.8.8.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,250 \pm 0,008) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Hybnost po srážce  $p_2 = (0,212 \pm 0,008) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 15,00%

$M1 = 408,9 \text{ g}$ ,  $M2 = 408,4 \text{ g}$

Tab. 2.8.9. nepružná srážka												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	δ
t1/ms	159,924	163,986	159,39	169,445	151,059	157,554	168,051	172,218	168,805	164,326	163,5	6,2
t2/ms	409,007	436,422	408,237	391,744	441,243	417,038	385,195	389,51	419,17	427,194	412,5	18,5

Tab. 2.8.9.

Hybnost před srážkou  $p_1 = (0,250 \pm 0,009) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

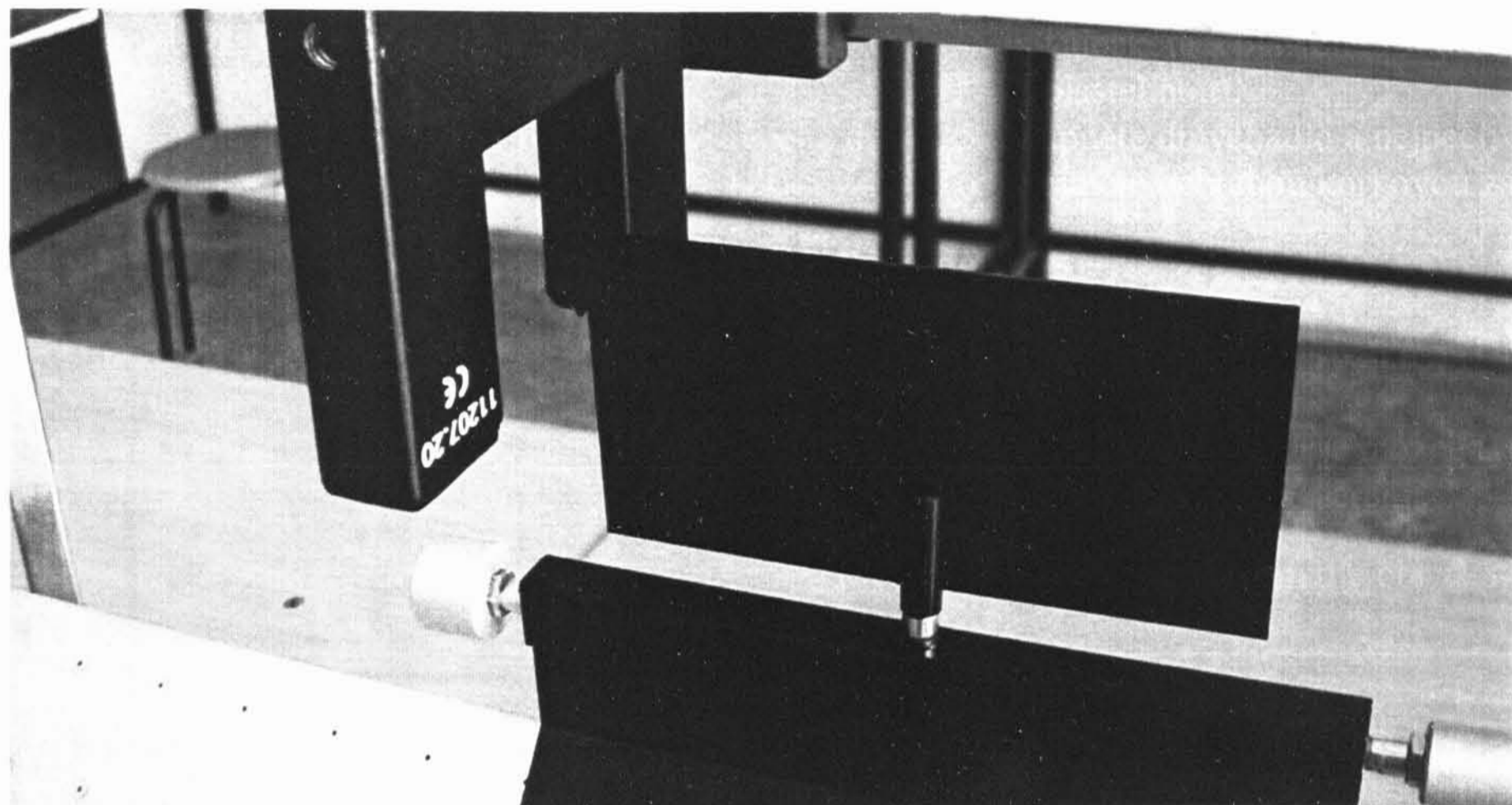
Hybnost po srážce  $p_2 = (0,198 \pm 0,009) \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Rozdíl oproti teorii je tedy 20,78%

Ve všech případech nenastala naprostá shoda hybnosti po srážce s hybností před srážkou, z čehož by na první pohled mohlo být patrné, že nedochází k zachování hybnosti. Při bližším pohledu během měření lze však zjistit, že se vozíky při srážce jakoby vztyčí, čímž zavadí o vzduchovou dráhu a přijdou o část hybnosti. Další chybu zde vnáší odpor vzduchu, který je však v porovnání s chybou, kterou způsobil dotyk vozíku takřka zanedbatelný. V některých případech přisuzují chybu i nastavení vyvážení dráhy, případně jejímu znečištění.

## 2.9 Zákon zachování hybnosti

### 2.9.1 Zákon zachování hybnosti - zadání



Obr. 2.9-1. Zákon zachování hybnosti

#### Úkol

Demonstrujte na lineární vzduchové dráze zákon zachování hybnosti a III. Newtonova zákona.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidla, vozíky, křidélka 10 cm, magnetická přichytka, koncová zarážka, vodiče, jehlový nástavec, váleček s modelínou, závaží.

#### Časová náročnost

5 minut

#### Klíčová slova

Zákon zachování hybnosti, hybnost, síla, III. Newtonův zákon.

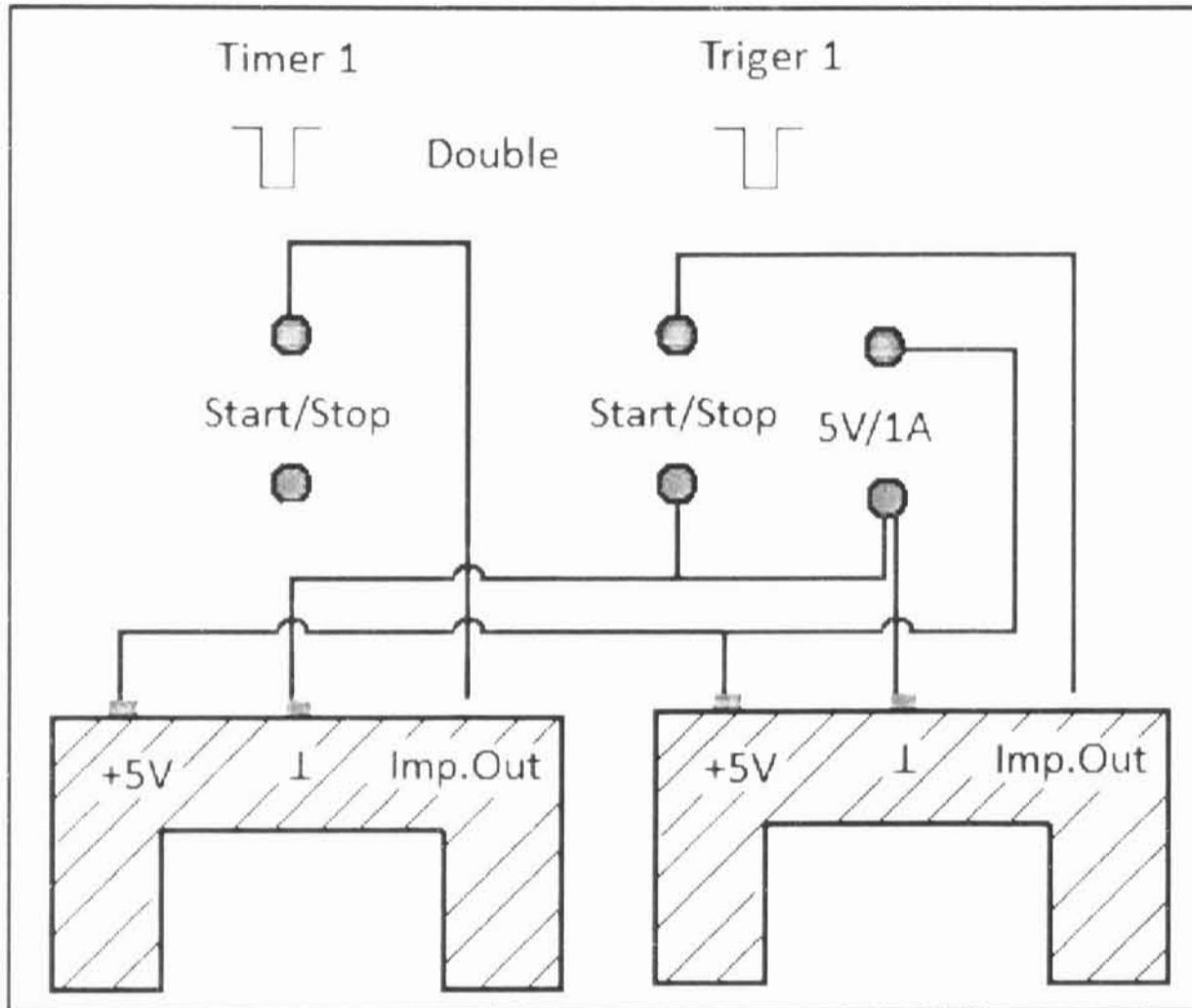
#### Příprava

- 1) Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte na oba konce zarážku s jehlovým nástavcem.
- 2) Připevněte na vodorovnou tyč nad dráhou měřící zařízení.
- 3) Zapojte čítač dle schématu.

- 4) Připravte vozíky s křídélky (první vlevo s magnetickou přichytkou, vpravo s válečkem s plastelínou, druhý vlevo s magnetickou přichytkou a vpravo s válečkem s plastelínou).
- 5) Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.
- 6) Sejměte ochranou korkovou zátku z jehel.
- 7) Spojte vozíky nití, tak aby mezi magnety, byla mezera přibližně 1 mm.

### Provedení

- 1) Změřte rychlosti obou vozíků, po přepálení nitě. Měření provádějte dle schématu obr. 2.9-2.



Obr. 2.9-2.

- 2) Na základě naměřených hodnot diskutujte platnosti III. Newtonova zákona a zákona zachování hybnosti.
- 3) Popište, jak byste s žáky na základě této úlohy, odvodili zákon zachování hybnosti.



## 2.9.2. Zákon zachování hybnosti - vypracování

V této úloze si demonstrujeme možnost ověření zákona zachování hybnosti a s ní spojenou ukázkou III. Newtonova zákona.

Na začátku pokusu budeme mít dva stejně hmotné vozíky (206 g), které jsou k sobě umístěny magnetickými příchytkami stejné polaroty, které se navzájem odpuzují. Vozíky drží pohromadě nit. Vozíky jsou na počátku v klidu.

Přepálíme nit a změříme rychlost obou vozíků dle tab.2.9.1. na základě měření doby průchodu křídélka (10 cm) skrz měřicí čidlo a poté spočítáme hybnosti vozíků.

Tab. 2.9.1. zákon zachování hybnosti												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	průměr	$\bar{\sigma}$
t1/ms	173,833	171,69	176,627	172,488	171,225	170,309	177,729	168,954	172,913	174,858	173,1	2,6
t2/ms	172,5	171,609	171,976	173,237	178,679	178,41	171,899	171,264	175,748	178,555	174,4	3,0

Tab. 2.9.1.

Hybnost prvního vozíku  $p_1=(0,1190 \pm 0,0018) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Hybnost druhého vozíku  $p_2=(0,118 \pm 0,002) \text{ kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

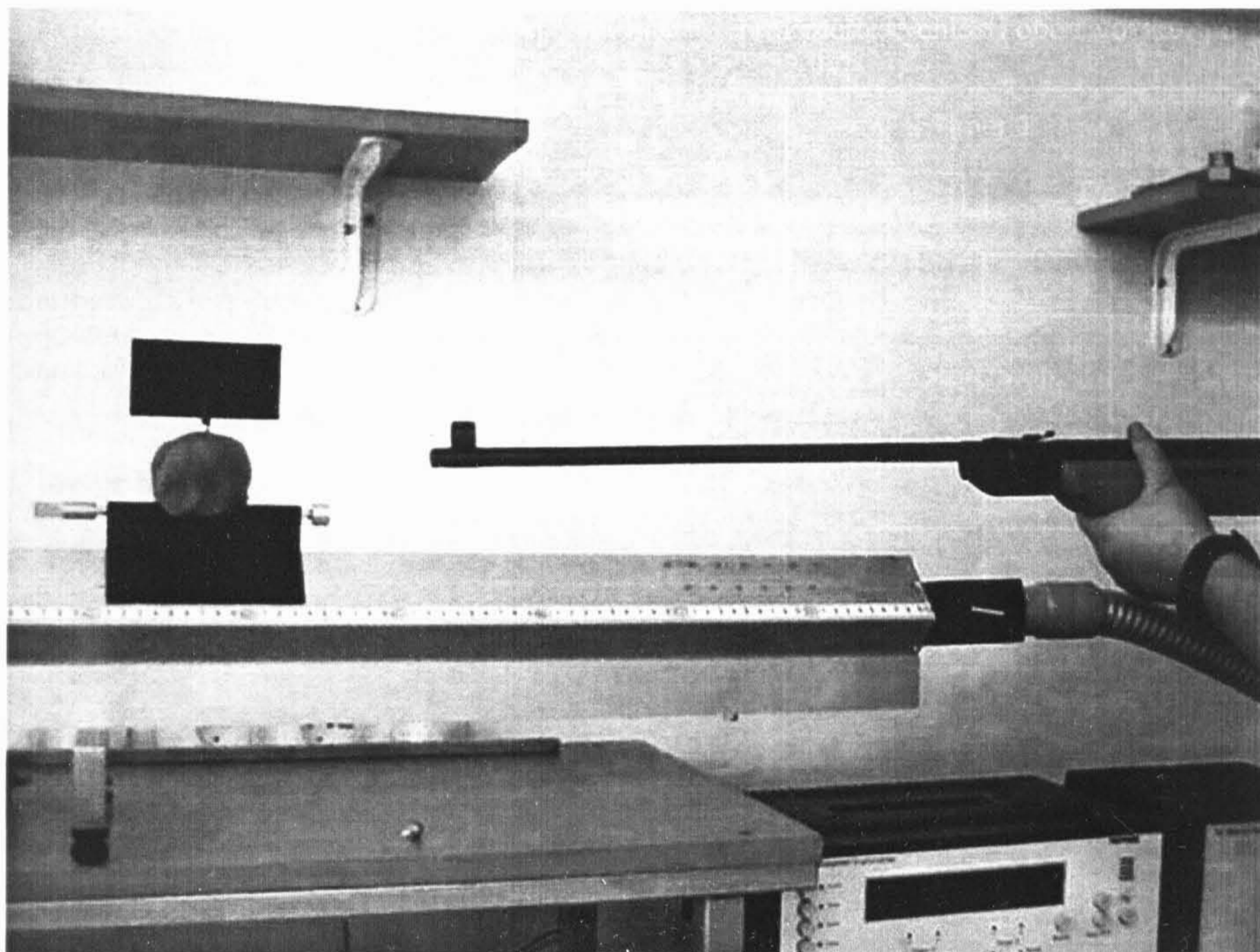
Rozdíl oproti teorii je tedy 0,8%

Jak je patrné, hybnosti obou vozíků jsou si co do velikosti velmi podobné, jsou však orientovány opačně. Tyto naměřené hodnoty jsou v souladu s teorií, jelikož aby platil zákon zachování hybnosti, musí být součet hybnosti stejný i po přepálení nitě, tj. musí být nulový. Jestliže bychom tento experiment prováděli s žáky, je dobré volit i různou hmotnost vozíků.

Na této úloze je patrné, že zde je uplatněn důsledek III. Newtonova zákona, jelikož aby se vozíky rozjely se stejnou (opačně orientovanou) rychlostí, bylo třeba, aby síla, kterou působil první vozík na druhý, byla shodná se silou, kterou působil druhý vozík na první. Tato úloha ukazuje názorně takzvaný zpětný ráz při střelbě.

## 2.10 Měření rychlosti diabolky

### 2.10.1 Měření rychlosti diabolky - zadání



Obr. 2.10-1. Měření rychlosti diabolky

#### Úkol

Změřte rychlost diabolky vystřelené ze vzduchovky.

#### Pomůcky

Lineární vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, vozík, křídélko 10 cm, koncová zarážka, jehlový nástavec, váleček s modelínou, vodiče, vzduchovka, digitální váhy, diabolky, modelína

#### Časová náročnost

5 minut

## Klíčová slova

Zákon zachování hybnosti, ústředí rychlost, nepružná srážka

## Příprava

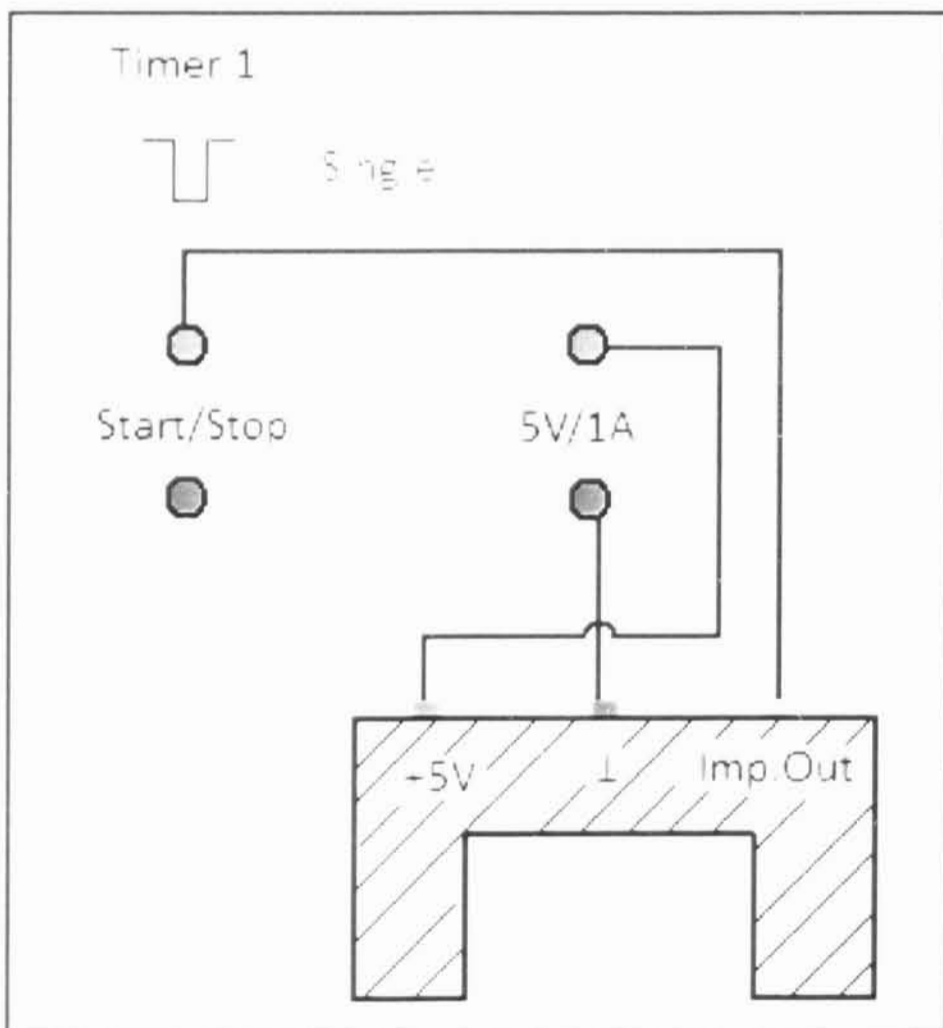
1. Zkompletujte lineární vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo. Připevněte s jehlovým nastavcem.
2. Připevněte na vodorovnou tyč nad drahou měřící zařízení.
3. Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
4. Připravte vozík, na který umístěte hroudu modelíny, do které zabodnete křídélko (vlevo s válečkem s modelínou).
5. Sejměte ochranou korkovou zátku z jehly.
6. Zapněte dmychadlo a nejpečlivěji vyrovnejte dráhu.

**Pozor pokus provádějte pouze za dohledu vyučujícího! Se vzduchovou pistolí manipulujte opatrně.**

## Provedení

1. Určete hmotnost diabolky.
2. Změřte dobu průchodu křídélka.
3. Ze změřené doby spočítejte za pomoci zákona zachování hybnosti rychlost diabolky.
4. Diskutujte chyby měření. Diskutujte o vzdálenosti, ze které je nutno střílet.
5. Navrhněte jiné metody změření rychlosti diabolky

Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.10-2.



Obr. 2.10-2.

## 2.10.2 Měření rychlosti diabolky - vypracování

V této úloze se budeme věnovat praktickému využití nepružné srážky. K měření rychlosti diabolky.

K určení rychlosti diabolky budeme muset znát její hmotnost, zvážíme tedy diabolky. Pro přesnější měření nevážíme diabolky jednotlivě, ale zvážíme více kusů najednou a vydělíme jejich počtem. Získáme tím přesnější hodnotu, z důvodu omezené přesnosti vah (většina vah váží s přesností na 1 g, případně 0,1 g). Hmotnost diabolky takto změřené nám vyjde  $m = 0,5$  g.

Někteří žáci při této úloze začnou nesprávně uvažovat, z důvodu měření rychlosti o využití zákona o zachování energie, tato úvaha je však milná. Měření provádíme tak, že vystřelíme diabolku ze vzduchovky do hroudy plastelíny umístěné na vozíku. Při zásahu se diabolka zavrtává do plastelíny a tím ji plasticky deformuje. Měření by tedy muselo zahrnovat také změření energie uvolněné při tomto zavrtávání ve formě tepla. Neplatí zde čistě zákon zachování mechanické energie.

Budeme tedy uvažovat měření za využití nepružné srážky a s tím spojený zákon zachování hybnosti. Hybnost se v daném případě zachovává. Hybnost střely  $p_d$  určíme dle vztahu:

$$p_d = mv$$

Hybnost po srážce určíme dle vztahu:

$$p_s = Mv_s$$

Kde  $p_s$  je hybnost soustavy,  $M$  je hmotnost celé soustavy, soustavou rozumíme vozík s plastelínou, křídélkem a vystřelenou diabolkou. Rychlost  $v_s$  lze určit, jakožto rychlost průchodu křídélka skrz měřicí čidlo. Na základě zákona zachování hybnosti platí:

$$mv = Mv_s$$

Z tohoto vztahu lze již snadno, na základě naměřených hodnot, vypočítat rychlost diabolky  $v$ . V tabulce 2.10.1. je naměřeno 10 měření hmotnosti soustavy  $M$ , doby průchodu křídélka  $t$  a je zde vypočítána příslušná hodnota rychlosti diabolky  $v$ .

2.10.1. Vypočet rychlosti diabolky										
č.m.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t/s$	560,182	520,405	541,617	589,565	514,677	543,449	538,269	559,565	560,196	509,862
$M/g$	428,22	428,74	429,26	429,78	430,3	416,083	407,135	417,76	440,993	415,773
$v/m.s^{-1}$	147	158	152	140	161	147	145	144	151	157

Tab. 2.10.1.

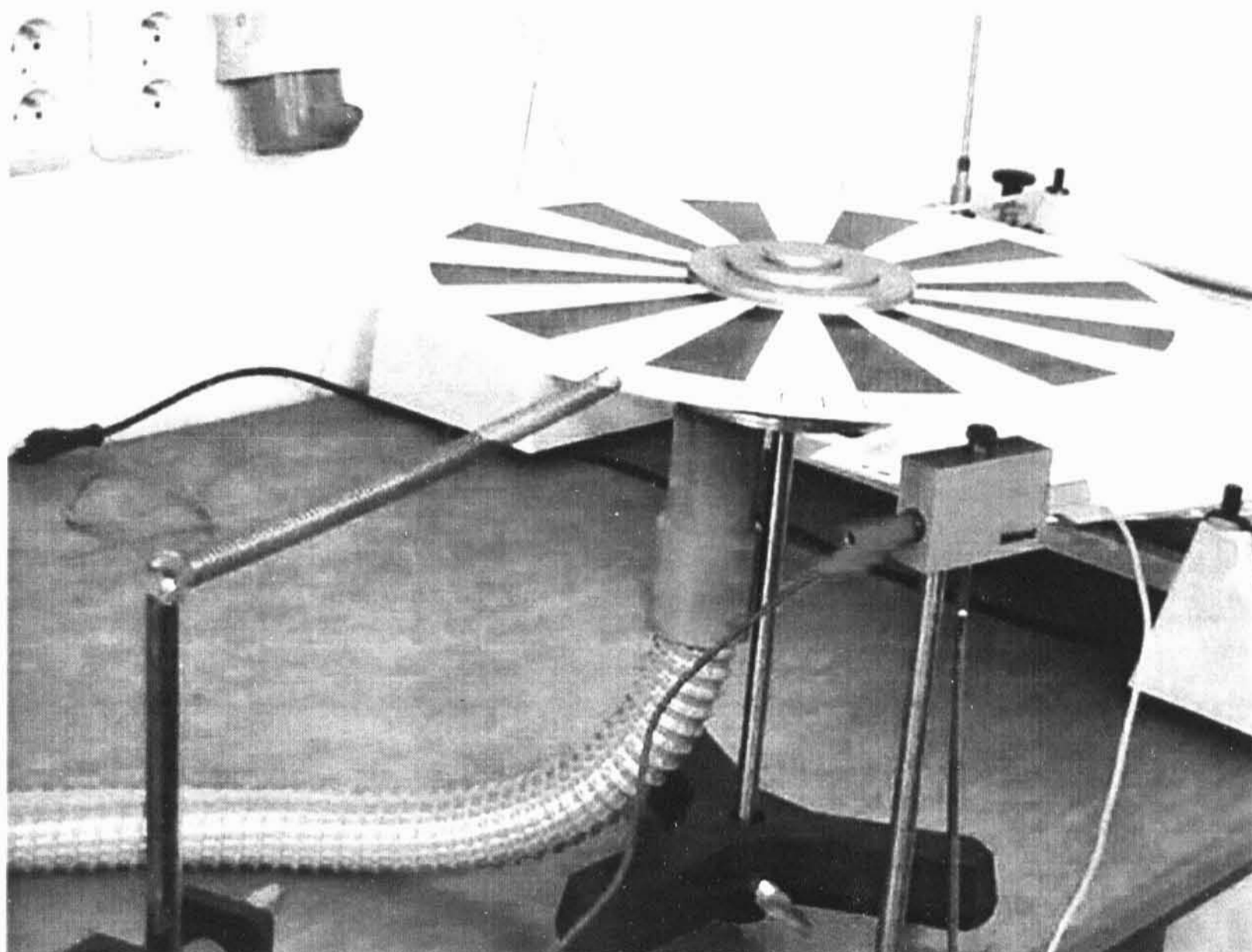
Na základě těchto naměřených hodnot lze stanovit průměrnou rychlost diabolky  $v$  a její směrodatnou odchylku.

$$v = (150 \pm 6) m \cdot s^{-1}$$

Tato hodnota byla měřena při výstřelech ze vzdálenosti 20 až 40 cm ústí hlavně od plastelíny. Tato vzdálenost mi přijde optimální pro střelbu, jelikož rychlost soustavy neovlivní zbylý výfukový plyn z hlavně a je zde velká šance k trefení a nedochází ještě ke ztrátě rychlosti z důvodu tření diabolky o vzduch, tudíž lze takto naměřenou hodnotu považovat jako hodnotu ústovou.

## 2.11 Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil

### 2.11.1 Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil - zadání



Obr. 2.11-1. Rotační vzduchová dráha

#### Úkol

Změřte závislost úhlu a času při rovnoměrném kruhovém pohybu. Ověřte, zda rotace kotouče odpovídá rovnoměrnému kruhovému pohybu.

#### Pomůcky

Rotační vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, disk, startovací zařízení, detekční křídélko, pružina, nit, vodiče, roztahovací střed.

#### Časová náročnost

8 minut

#### Klíčová slova

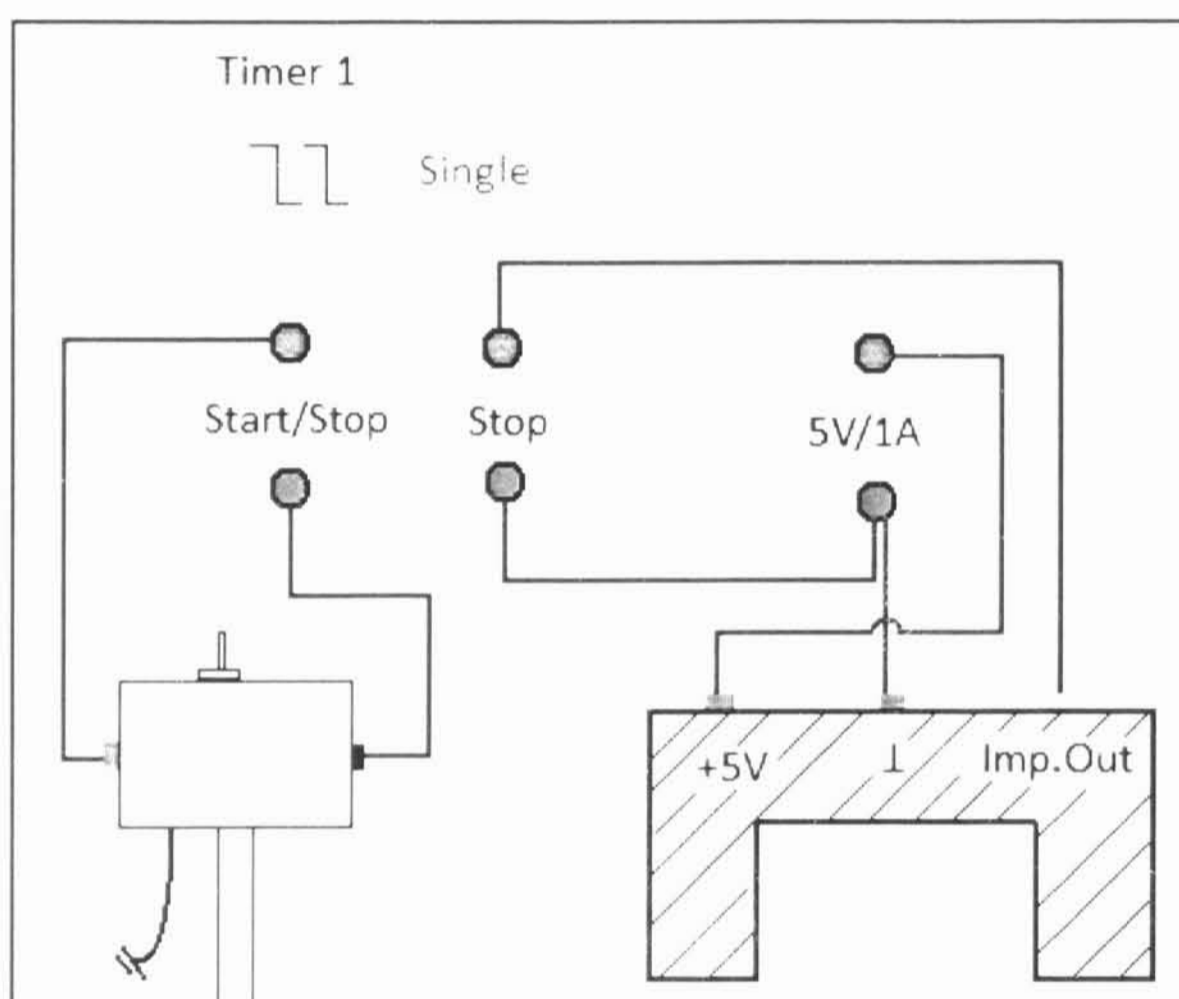
Moment sil, rovnoměrný kruhový pohyb, úhlová rychlost

## Příprava

- 1) Zkompletujte rotační vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo.
- 2) Připevněte startovací zařízení, tak aby jeho hrot nezavazal pohybu kotouče.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Připevněte nit k pružině a její druhý konec uchyťte na roztahovací střed, tak aby se nit uvolnila po roztočení disku.
- 5) Umístěte čidlo do vhodné vzdálenosti, aby snímalo pohyb křídélka a nevadilo jeho průchodu.

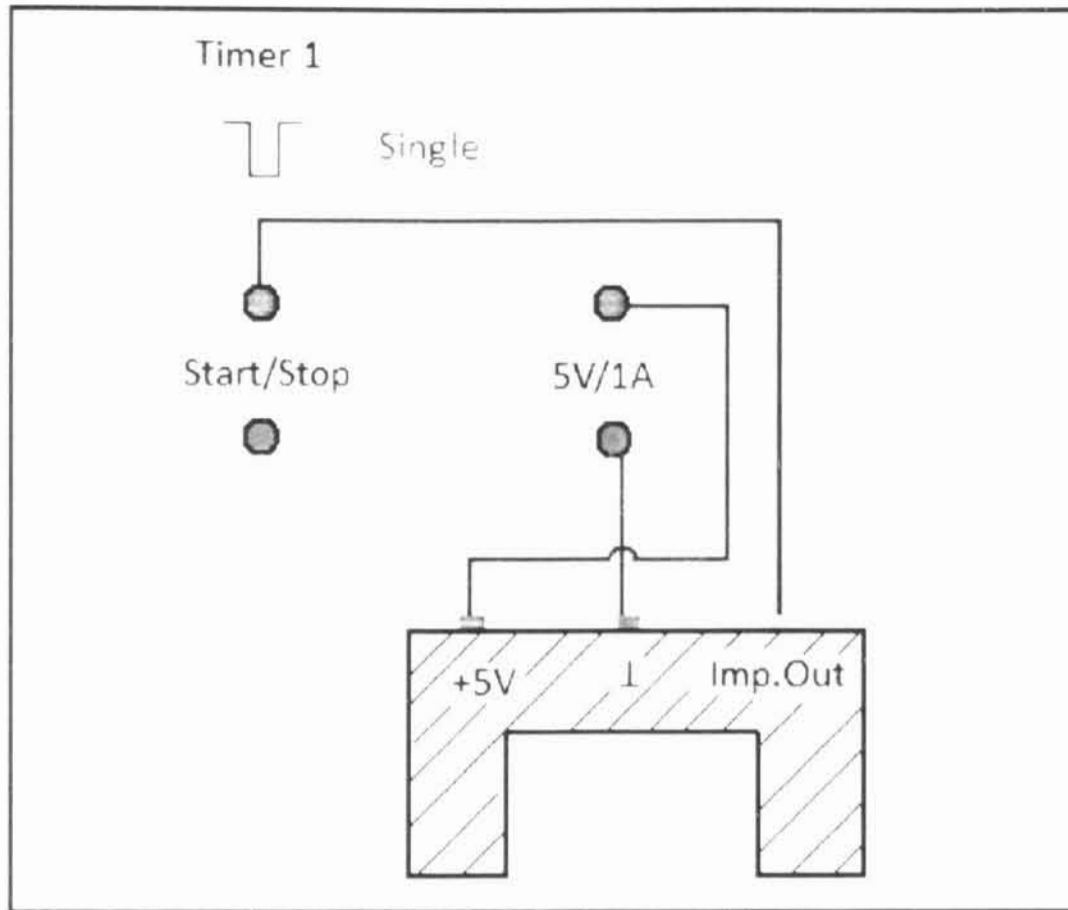
## Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje disk k otočení o vybraný úhel ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ). Měření provádějte dle zapojení obr. 2.11-2. Sestrojte graf úhlu v závislosti na čase.



Obr. 2.11-2.

- 2) Změřte úhlovou rychlost ve vybraných úhlech ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.11-3. Sestrojte graf závislosti úhlové rychlosti na čase.



Obr. 2.11-3.

3) Na základě naměřených hodnot diskutujte, o jaký typ pohybu se jedná

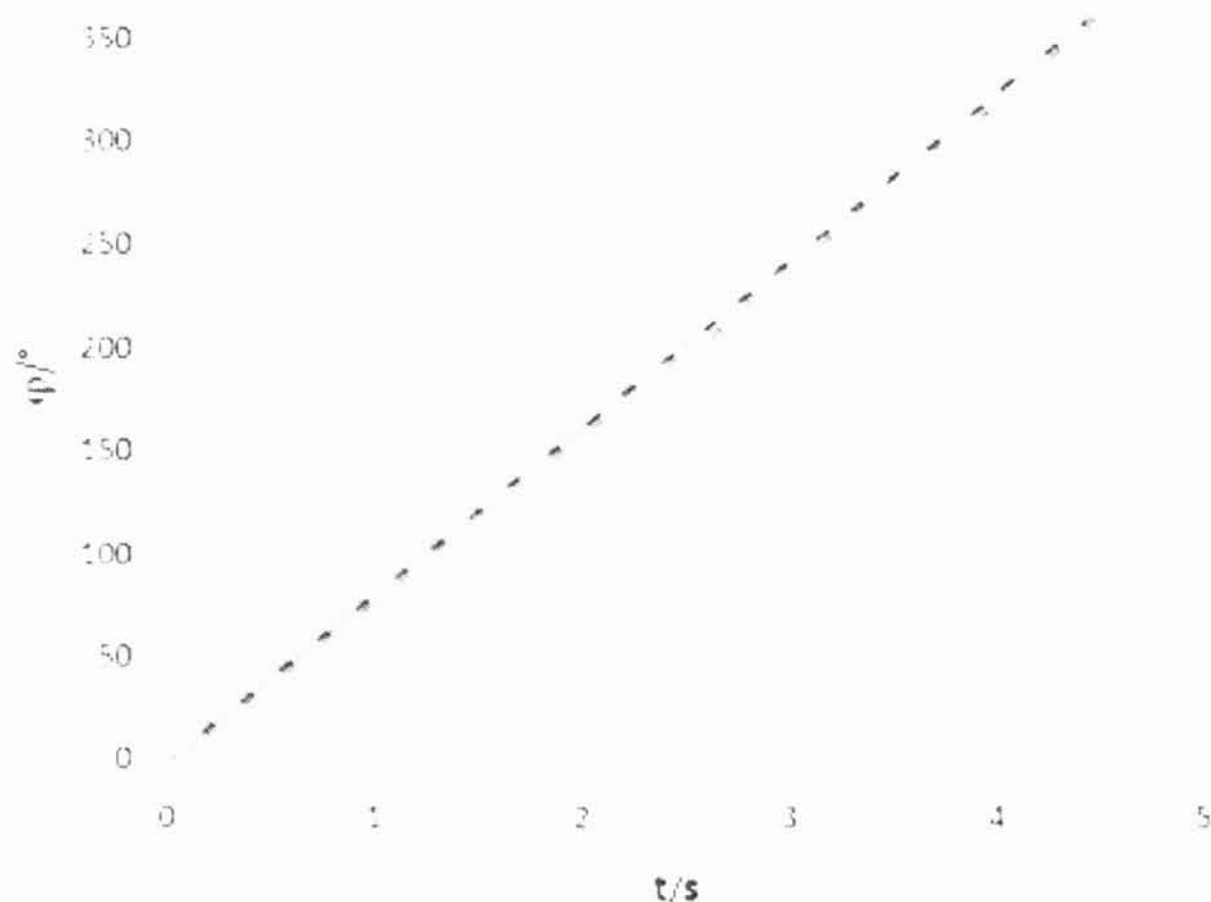
## 2.11.2 Rotace kotouče téměř bez působení momentu vnějších sil -vypracování

Tato úloha se věnuje studiu rovnoměrného kruhového pohybu. Tento pohyb je zde reprezentován otáčením kotouče na rotační vzduchové dráze. Na obvodu kotouče je umístěno křídélko, které vytíná  $15^\circ$ . Budeme měřit dobu, za kterou se kotouč otočí o vybraný úhel  $\varphi$ . Tyto hodnoty času jsou uvedeny v tabulce 2.11.1. Na základě této tabulky poté sestrojíme závislost úhlové dráhy  $\varphi$  na čase  $t$ .

2.11.1. Závislost úhlové dráhy na čase												
$\varphi / ^\circ$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
15	0,187	0,189	0,191	0,191	0,188	0,187	0,190	0,187	0,192	0,184	0,189	0,002
30	0,374	0,374	0,368	0,368	0,367	0,384	0,366	0,383	0,382	0,365	0,373	0,007
45	0,560	0,572	0,551	0,571	0,562	0,575	0,556	0,564	0,571	0,569	0,565	0,007
60	0,746	0,748	0,740	0,747	0,743	0,759	0,742	0,744	0,767	0,749	0,749	0,008
75	0,932	0,956	0,931	0,947	0,932	0,928	0,920	0,954	0,941	0,908	0,935	0,014
90	1,118	1,126	1,110	1,113	1,137	1,127	1,126	1,120	1,139	1,114	1,123	0,009
105	1,304	1,282	1,328	1,316	1,266	1,334	1,279	1,305	1,277	1,278	1,297	0,023
120	1,489	1,530	1,447	1,469	1,453	1,461	1,532	1,464	1,497	1,477	1,482	0,028
135	1,675	1,663	1,641	1,628	1,698	1,679	1,712	1,676	1,626	1,648	1,665	0,027
150	1,860	1,870	1,832	1,878	1,850	1,827	1,910	1,909	1,888	1,842	1,867	0,028
165	2,045	2,096	2,032	2,038	2,011	2,077	2,056	2,049	2,092	2,083	2,058	0,027
180	2,230	2,282	2,203	2,228	2,169	2,267	2,178	2,284	2,190	2,204	2,223	0,040
195	2,414	2,385	2,462	2,375	2,405	2,428	2,345	2,420	2,461	2,440	2,414	0,036
210	2,599	2,587	2,663	2,614	2,660	2,666	2,640	2,579	2,651	2,674	2,633	0,034
225	2,783	2,828	2,790	2,859	2,799	2,862	2,748	2,716	2,779	2,707	2,787	0,051
240	2,967	2,967	2,943	2,906	2,909	2,914	3,015	3,045	2,919	2,902	2,949	0,047
255	3,151	3,180	3,088	3,128	3,222	3,237	3,159	3,198	3,219	3,084	3,167	0,052
270	3,334	3,392	3,294	3,261	3,364	3,310	3,323	3,253	3,350	3,343	3,322	0,042
285	3,518	3,434	3,476	3,504	3,421	3,491	3,422	3,560	3,513	3,492	3,483	0,043
300	3,701	3,738	3,671	3,630	3,640	3,642	3,800	3,598	3,748	3,691	3,686	0,059
315	3,884	3,936	3,985	3,942	3,968	3,950	3,819	3,997	3,839	3,787	3,911	0,070
330	4,067	4,022	4,111	3,972	3,953	4,158	4,099	3,969	3,990	3,965	4,031	0,069
345	4,250	4,210	4,181	4,360	4,324	4,291	4,239	4,316	4,338	4,129	4,264	0,071
360	4,433	4,340	4,351	4,553	4,357	4,455	4,348	4,519	4,487	4,467	4,431	0,074

Tab. 2.11.1.



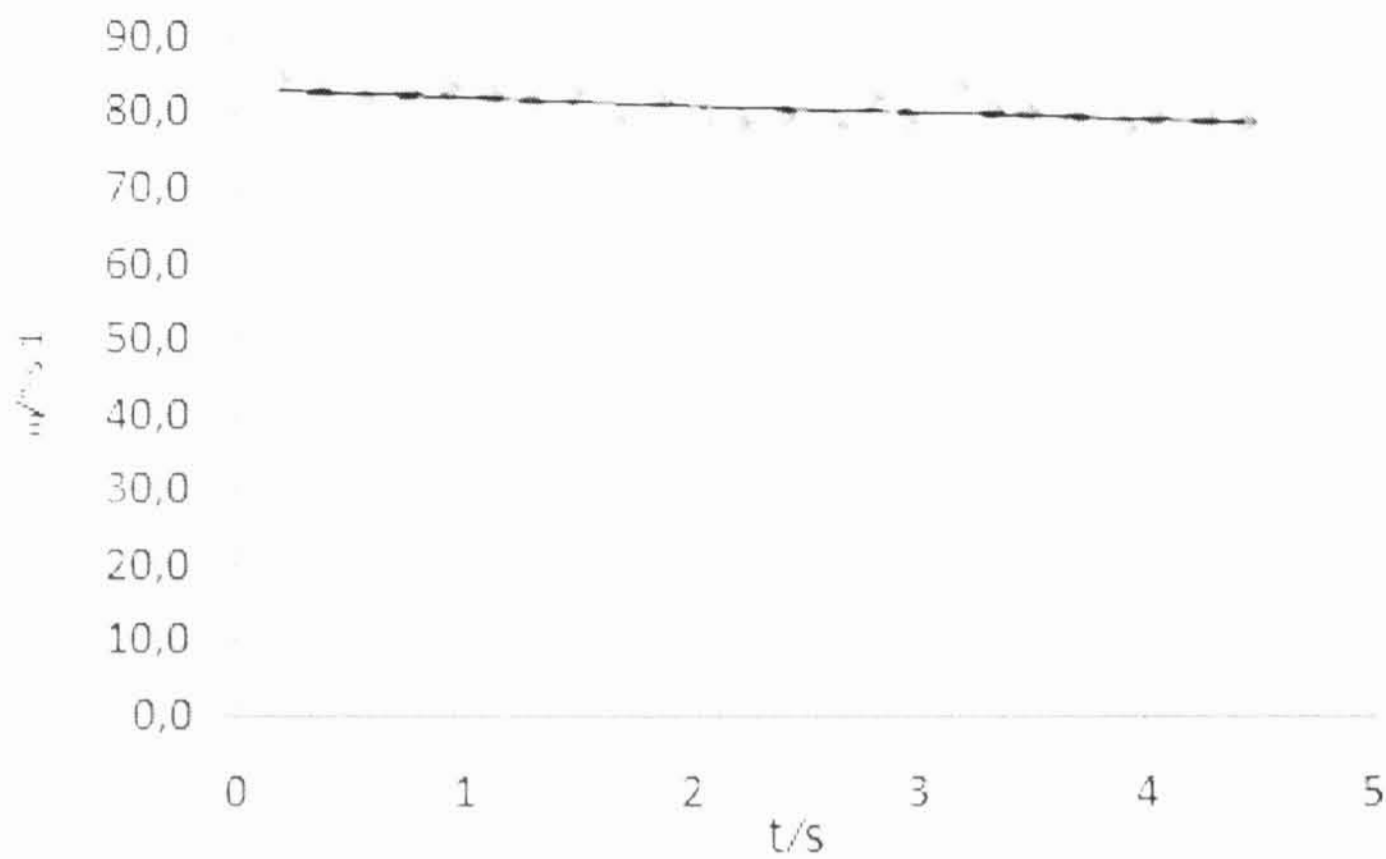


Graf 2.11.1. Závislost úhlové dráhy na čase

Z grafu 2.11.1., je patrné, že se jedná o rovnoměrný typ pohybu, jelikož spojnicí jeho závislosti je přímka. Dále zkusme ověřit závislost úhlové rychlosti  $\omega$  na čase  $t$ . V následující tabulce 2.11.2. jsou uvedeny hodnoty doby, kterou potřebovalo křídélko vytínající úhel  $15^\circ$ , k průchodu měřicím čidlem.

2.11.2. Závislost úhlové rychlosti na čase														
$\omega / ^\circ$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$	$\omega / ^\circ \cdot s^{-1}$	$\delta \omega / ^\circ \cdot s^{-1}$
15	0,178	0,175	0,174	0,176	0,180	0,176	0,181	0,179	0,181	0,173	0,177	0,003	84,6	1,3
30	0,181	0,177	0,184	0,185	0,181	0,180	0,179	0,185	0,180	0,180	0,181	0,003	82,8	1,2
45	0,184	0,184	0,186	0,179	0,188	0,182	0,181	0,189	0,179	0,179	0,183	0,004	81,9	1,6
60	0,179	0,179	0,183	0,177	0,183	0,180	0,184	0,175	0,183	0,183	0,181	0,003	83,1	1,3
75	0,181	0,179	0,183	0,178	0,177	0,178	0,182	0,178	0,180	0,176	0,179	0,002	83,7	1,0
90	0,180	0,184	0,182	0,178	0,182	0,179	0,185	0,177	0,178	0,185	0,181	0,003	82,9	1,3
105	0,186	0,182	0,181	0,185	0,181	0,181	0,186	0,188	0,183	0,187	0,184	0,003	81,5	1,1
120	0,180	0,176	0,177	0,177	0,180	0,185	0,181	0,184	0,182	0,183	0,181	0,003	83,1	1,4
135	0,188	0,192	0,193	0,187	0,189	0,190	0,190	0,193	0,183	0,190	0,190	0,003	79,2	1,2
150	0,182	0,186	0,186	0,179	0,184	0,185	0,183	0,184	0,178	0,180	0,183	0,003	82,1	1,2
165	0,187	0,191	0,190	0,193	0,192	0,184	0,189	0,185	0,191	0,189	0,189	0,003	79,3	1,2
180	0,189	0,187	0,190	0,191	0,189	0,191	0,189	0,191	0,192	0,186	0,190	0,002	79,2	0,8
195	0,187	0,190	0,188	0,185	0,185	0,189	0,182	0,187	0,190	0,192	0,188	0,003	80,0	1,2
210	0,190	0,187	0,194	0,195	0,191	0,188	0,185	0,188	0,195	0,196	0,191	0,004	78,6	1,5
225	0,182	0,184	0,180	0,180	0,182	0,186	0,181	0,179	0,185	0,182	0,182	0,002	82,4	1,0
240	0,188	0,192	0,190	0,193	0,187	0,184	0,192	0,192	0,189	0,184	0,189	0,003	79,3	1,3
255	0,180	0,177	0,180	0,175	0,183	0,184	0,182	0,178	0,176	0,175	0,179	0,003	83,8	1,5
270	0,186	0,188	0,190	0,187	0,191	0,185	0,182	0,183	0,183	0,184	0,186	0,003	80,7	1,3
285	0,187	0,185	0,191	0,190	0,189	0,185	0,182	0,182	0,189	0,190	0,187	0,003	80,2	1,4
300	0,188	0,189	0,191	0,190	0,186	0,185	0,191	0,193	0,189	0,184	0,189	0,003	79,5	1,2
315	0,191	0,194	0,187	0,194	0,191	0,192	0,191	0,196	0,189	0,188	0,191	0,003	78,4	1,1
330	0,190	0,185	0,186	0,186	0,188	0,193	0,186	0,190	0,194	0,185	0,188	0,003	79,7	1,3
345	0,192	0,189	0,189	0,185	0,191	0,193	0,193	0,185	0,189	0,192	0,190	0,003	79,0	1,2
360	0,190	0,188	0,191	0,185	0,190	0,189	0,193	0,190	0,186	0,195	0,190	0,003	79,1	1,2

Tab. 2.11.2.

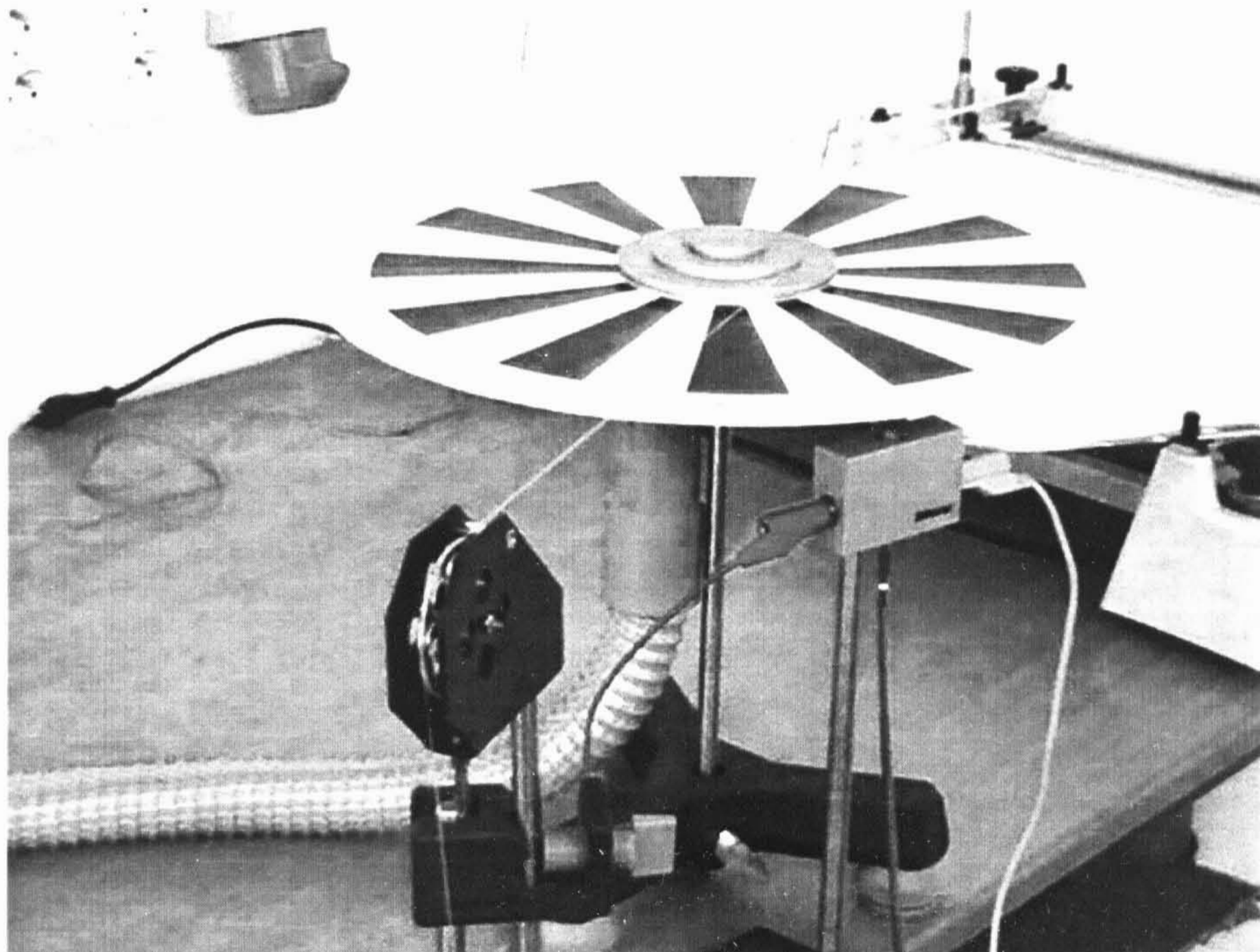


Graf 2.11.2 Závislost úhlové rychlosti na čase

Jak je patrné z grafu 2.11.2. nejedná se o konstantní závislost, kterou čekáváme dle předpokladu o rovnoměrném přímočarém pohybu. Závislost ukazuje mírné klesání úhlové rychlosti  $\omega$  v čase  $t$ . Toto lze přisoudit brzdění způsobovanému třením o vzduch. Tato chyba je však řádově velmi malá, a tak můžeme považovat rotaci kotouče za rovnoměrný rotační pohyb.

## 2.12 Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil

### 2.12.1 Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil - zadání



Obr. 2.12-1. Rotační vzduchová dráha

#### Úkol

Změřte závislost úhlu a času při rovnoměrně zrychleném kruhovém pohybu. Ověřte, zda rotace kotouče odpovídá rovnoměrně zrychlenému kruhovému pohybu.

#### Pomůcky

Rotační vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřicí čidlo, disk, startovací zařízení, detekční křídélko, nit, vodiče, roztahovací střed, závaží, kladka.

#### Časová náročnost

12 minut

## Klíčová slova

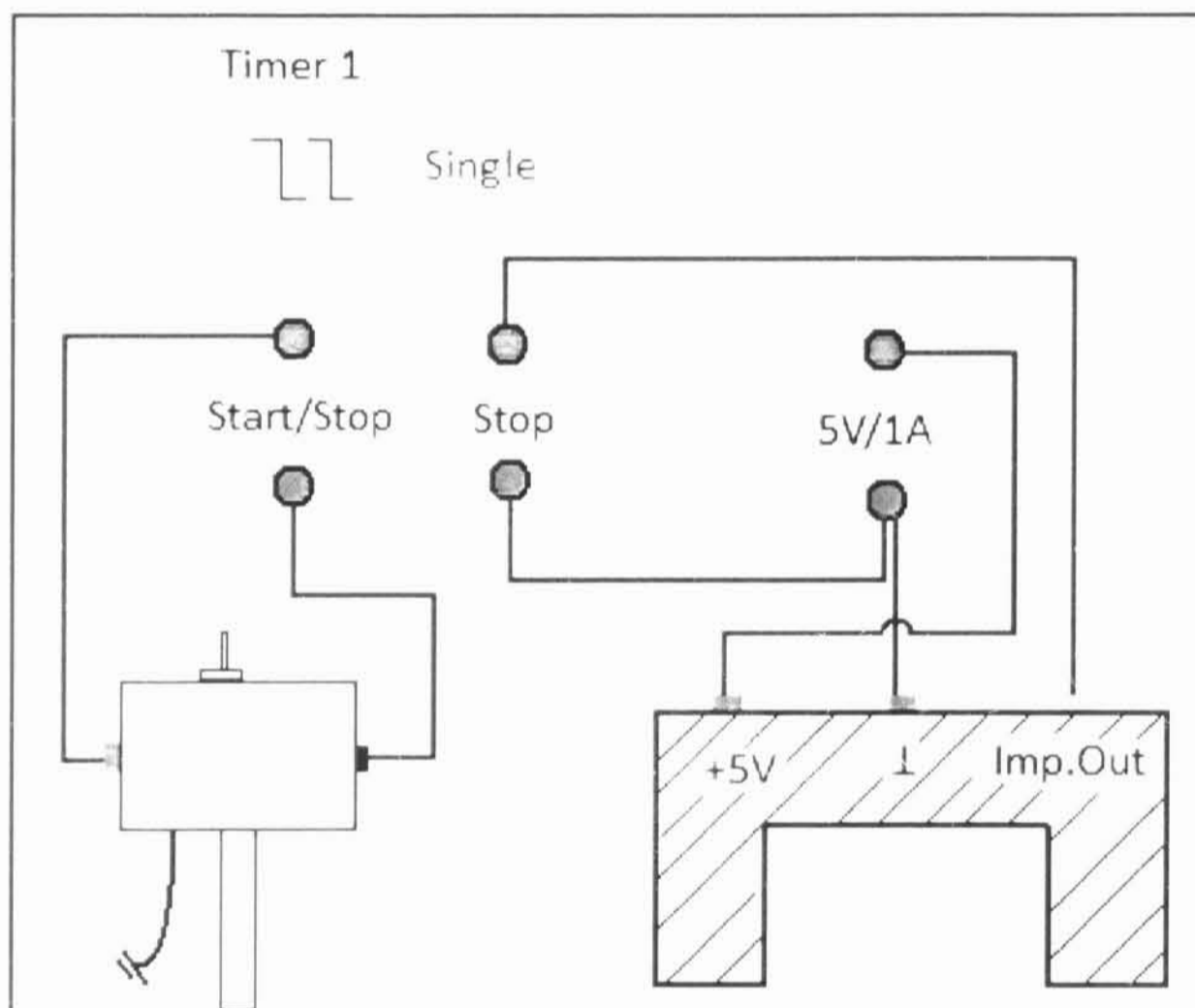
Moment sil, rovnoměrně zrychlený kruhový pohyb, úhlová rychlost, úhlové zrychlení.

## Příprava

- 1) Zkompletujte rotační vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo.
- 2) Připevněte startovací zařízení, tak aby jeho hrot nezavazal pohybu kotouče.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Namotejte nit na roztahovací střed, ved'te ji přes kladku a její volný konec umístěte závaží.
- 5) Umístěte čidlo do vhodné vzdálenosti, aby snímalo pohyb křídélka a nevadilo jeho průchodu.

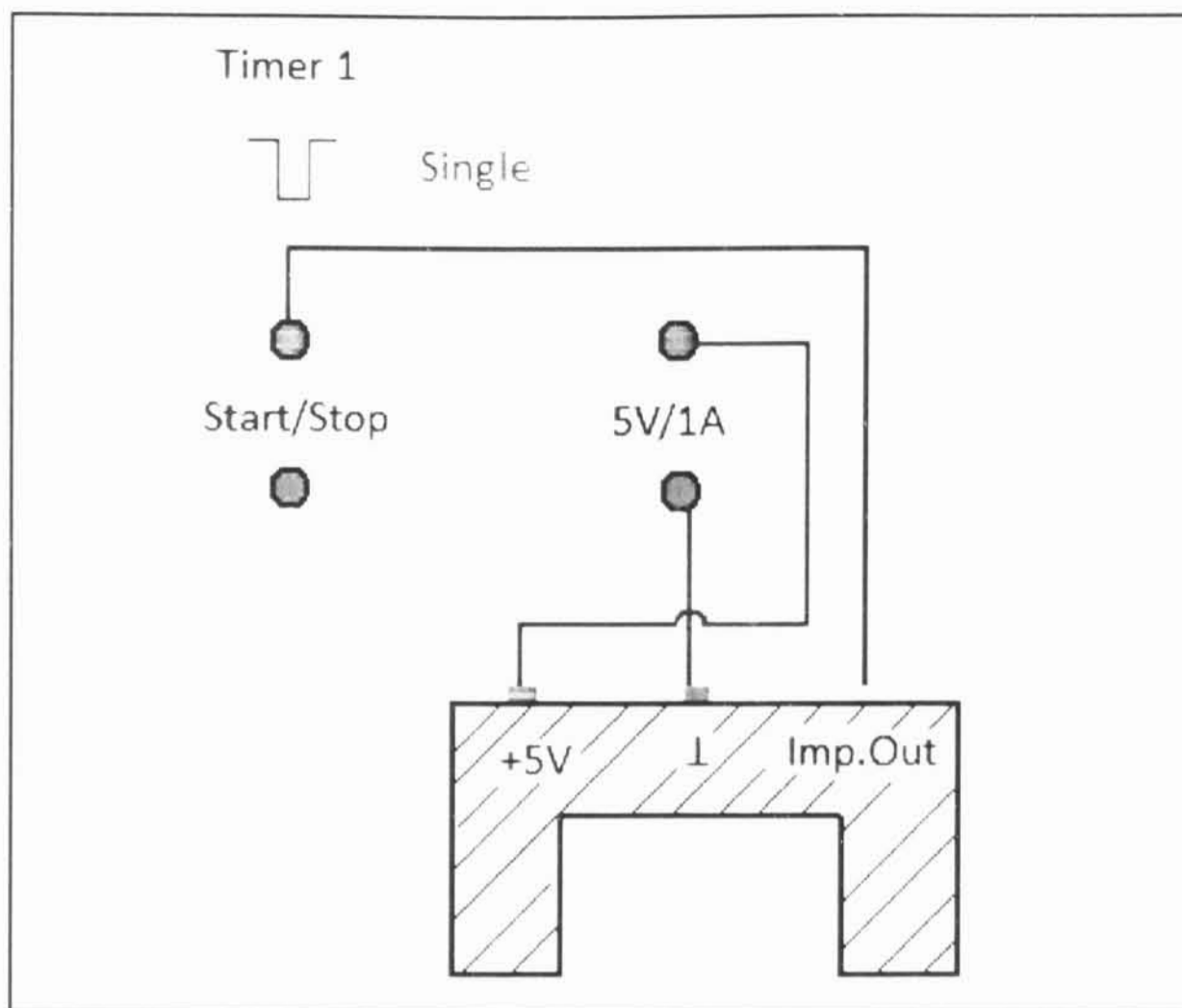
## Provedení

- 1) Změřte čas, který potřebuje disk k otočení o vybraný úhel ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ). Měření provádějte dle zapojení obr. 2.12-2. Sestrojte graf úhlu v závislosti na čase.



Obr. 2.12-2.

- 2) Změřte úhlovou rychlost ve vybraných úhlech ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ). Měření provádějte při zapojení dle schématu obr. 2.12-3. Sestrojte graf závislosti úhlové rychlosti na čase



Obr. 2.12-3.

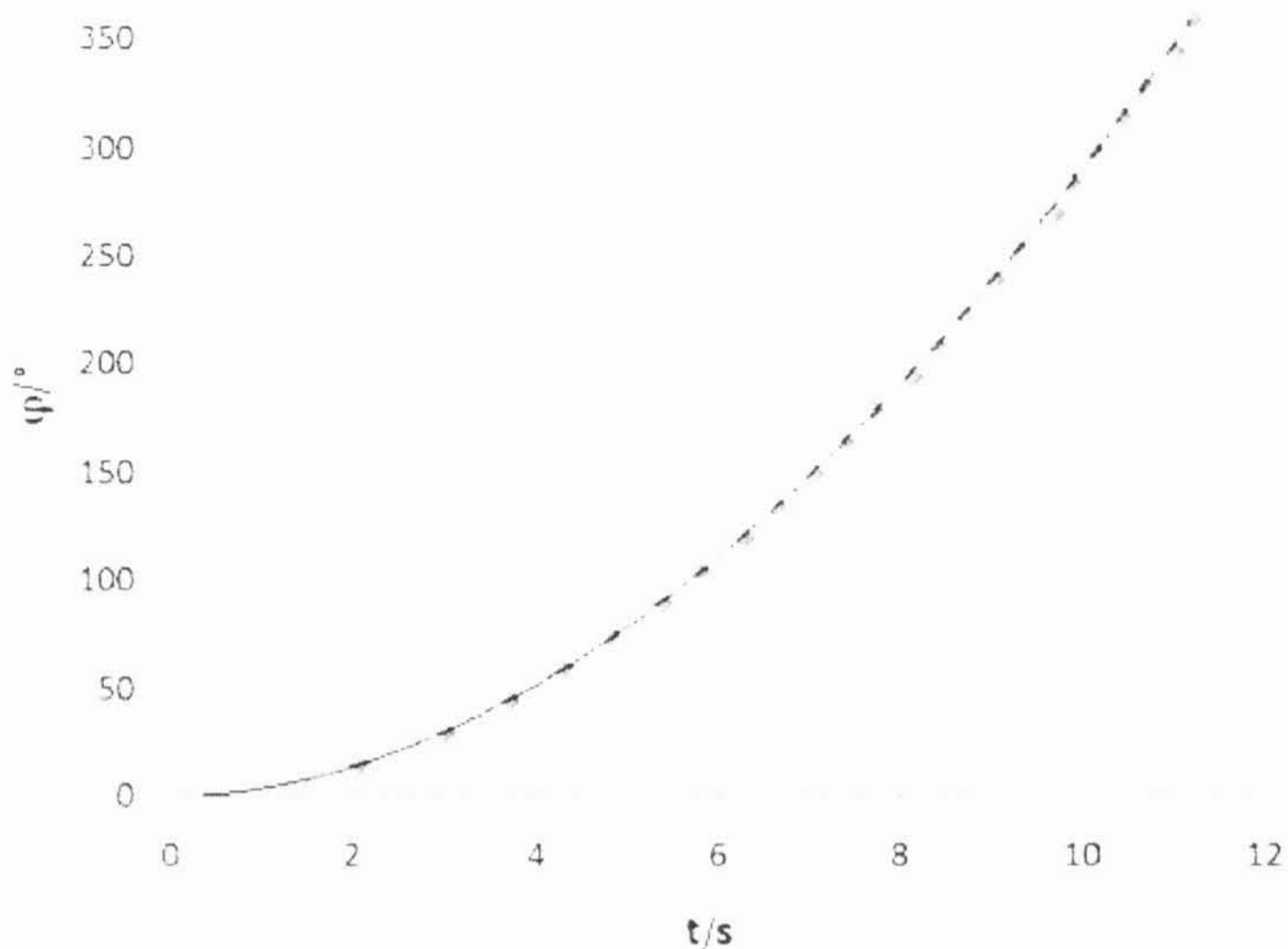
- 3) Na základě naměřených hodnot diskutujte, o jaký typ pohybu se jedná, na základě znalosti rovnoměrného přímočarého pohybu, diskutujte o závislosti úhlového zrychlení. Srovnajte tyto dva pohyby.

## 2.12.2 Rotace kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil - vypracování

V této úloze se budeme zabývat rotací kotouče při působení konstantního momentu vnějších sil. Tento pohyb je alternativou k rovnoměrně zrychlenému přímočarému pohybu a tudíž u něho můžeme nalézt jisté podobnosti. U přímočarého pohybu měla závislost dráhy na čase tvar paraboly. Zkusme ověřit, zdali tomu není i zde, v případě závislosti úhlové dráhy  $\varphi$  na čase  $t$ . Naměřené hodnoty času, který potřebuje kotouč k otočení o danou úhlovou dráhu, jsou uvedeny v tabulce 2.12.1.

2.12.1. Závislost úhlové dráhy na čase												
$\varphi / ^\circ$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$
15	2,071	2,107	2,027	2,034	2,058	2,029	2,084	2,062	2,084	2,046	2,06	0,03
30	3,030	3,008	2,977	3,085	2,948	3,091	2,943	3,082	2,987	3,014	3,02	0,05
45	3,715	3,769	3,772	3,626	3,678	3,717	3,771	3,716	3,741	3,690	3,72	0,04
60	4,298	4,333	4,216	4,366	4,331	4,259	4,411	4,311	4,281	4,224	4,30	0,06
75	4,862	4,795	4,987	4,785	4,743	4,791	4,720	4,815	4,935	4,782	4,82	0,08
90	5,406	5,374	5,508	5,359	5,243	5,523	5,294	5,474	5,245	5,527	5,40	0,11
105	5,819	5,753	5,745	5,795	5,740	5,958	5,869	5,860	5,793	5,690	5,80	0,07
120	6,252	6,401	6,316	6,162	6,316	6,146	6,431	6,431	6,068	6,415	6,29	0,13
135	6,654	6,776	6,476	6,589	6,559	6,760	6,594	6,621	6,586	6,729	6,63	0,09
150	7,036	6,937	6,913	7,212	7,230	6,862	7,066	7,124	7,125	7,125	7,06	0,12
165	7,400	7,332	7,310	7,210	7,612	7,321	7,566	7,406	7,584	7,196	7,39	0,14
180	7,749	7,730	7,529	7,652	7,632	7,544	7,768	7,964	7,832	7,655	7,71	0,13
195	8,085	8,308	8,213	8,162	8,138	8,150	8,019	8,122	8,201	7,957	8,14	0,09
210	8,409	8,418	8,435	8,277	8,233	8,583	8,288	8,472	8,586	8,187	8,39	0,13
225	8,722	8,563	8,628	8,735	8,471	8,626	8,616	8,901	8,757	8,609	8,66	0,11
240	9,025	9,077	9,113	9,207	9,017	8,996	9,106	8,832	8,892	9,009	9,03	0,10
255	9,319	9,287	9,177	9,342	9,275	9,100	9,329	9,426	9,157	9,191	9,26	0,10
270	9,606	9,655	9,606	9,516	9,517	9,736	9,840	9,584	9,870	9,867	9,68	0,13
285	9,885	9,902	9,749	9,746	10,176	9,860	9,718	9,608	9,906	10,155	9,87	0,17
300	10,157	9,931	9,911	10,342	10,235	9,916	10,157	10,089	10,100	10,163	10,10	0,14
315	10,423	10,456	10,344	10,646	10,370	10,584	10,409	10,553	10,126	10,295	10,42	0,14
330	10,683	10,986	10,443	10,372	10,689	10,395	10,479	10,893	10,675	10,750	10,64	0,20
345	10,937	10,822	10,799	11,237	11,235	11,012	10,684	11,067	11,049	11,110	11,00	0,17
360	11,187	11,056	11,126	11,393	11,231	11,017	11,476	11,369	10,947	10,991	11,18	0,17

Tab. 2.12.1.

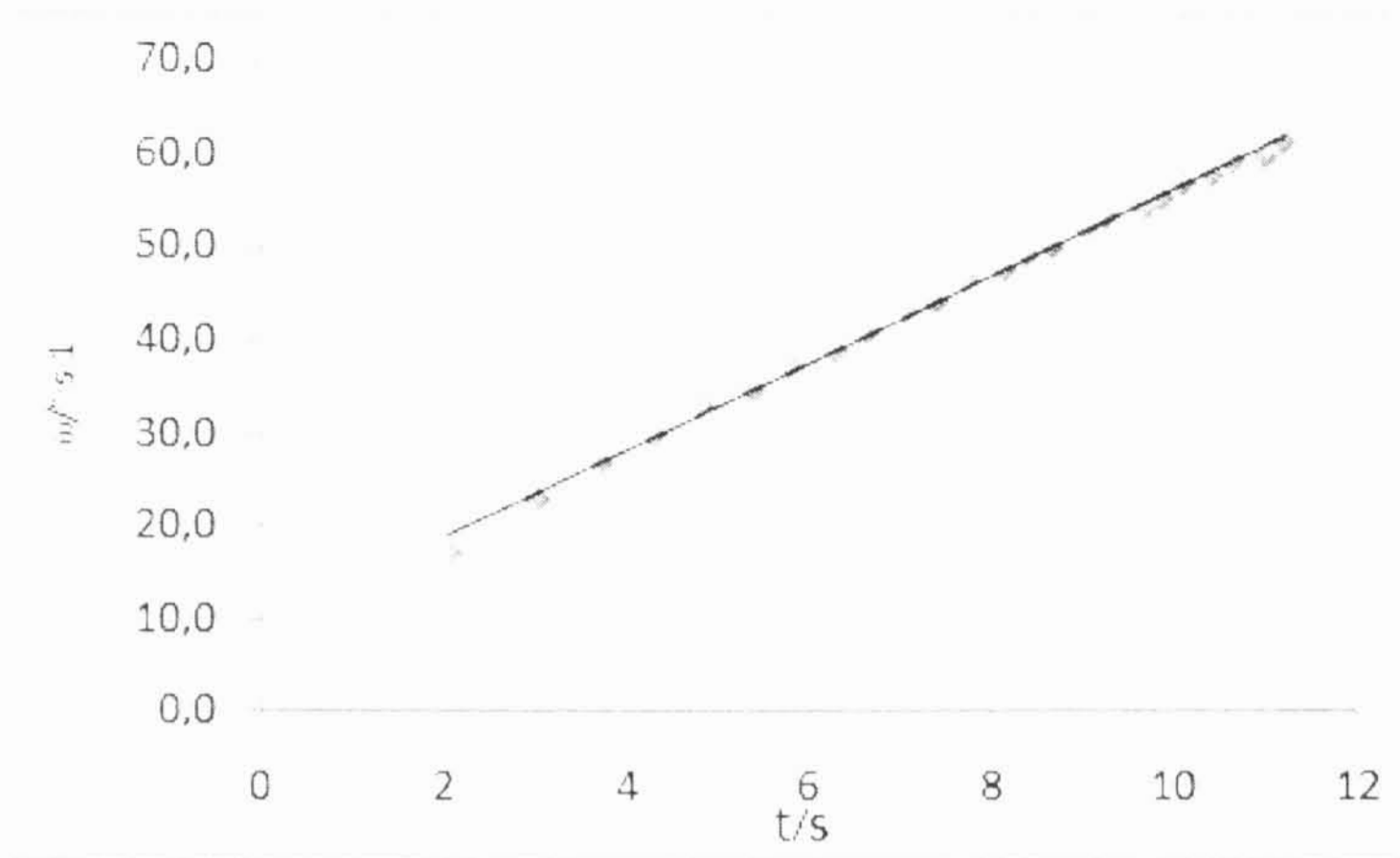


Graf 2.12.1.

Jak je patrné z tohoto grafu, závislost úhlové dráhy je na čase obdobná, jako závislost dráhy na čase při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu. Zkusme tedy ověřit, zda průběh „skoro okamžité“ úhlové rychlosti, je obdobný jako u rovnoměrně zrychleného pohybu. V tabulce 2.12.2. je uvedena doba průchodu detekčního křídélka ( $15^\circ$ ) skrz měřicí čidlo a dále je zde uvedena hodnota úhlové rychlosti vypočítaná z příslušných naměřených hodnot.

2.12.2. Závislost úhlové rychlosti na čase														
$\varphi / ^\circ$	$t_1 / s$	$t_2 / s$	$t_3 / s$	$t_4 / s$	$t_5 / s$	$t_6 / s$	$t_7 / s$	$t_8 / s$	$t_9 / s$	$t_{10} / s$	$t / s$	$\delta t / s$	$\omega / ^\circ \cdot s^{-1}$	$\delta \omega / ^\circ \cdot s^{-1}$
15	0,869	0,861	0,888	0,891	0,864	0,869	0,847	0,879	0,871	0,877	0,872	0,012	17,2	0,2
30	0,659	0,651	0,640	0,666	0,646	0,647	0,662	0,643	0,644	0,649	0,651	0,008	23,1	0,3
45	0,560	0,560	0,544	0,574	0,564	0,549	0,543	0,557	0,545	0,554	0,555	0,009	27,0	0,5
60	0,493	0,504	0,504	0,493	0,485	0,499	0,506	0,499	0,504	0,501	0,499	0,006	30,1	0,4
75	0,451	0,438	0,444	0,460	0,440	0,457	0,457	0,458	0,461	0,440	0,451	0,009	33,3	0,6
90	0,428	0,421	0,428	0,436	0,440	0,440	0,427	0,419	0,430	0,438	0,431	0,007	34,8	0,6
105	0,401	0,407	0,402	0,409	0,398	0,398	0,399	0,407	0,391	0,389	0,400	0,006	37,5	0,6
120	0,380	0,385	0,386	0,381	0,380	0,390	0,390	0,383	0,382	0,370	0,383	0,006	39,2	0,6
135	0,362	0,366	0,365	0,366	0,359	0,370	0,371	0,368	0,356	0,370	0,365	0,005	41,1	0,5
150	0,347	0,351	0,339	0,344	0,338	0,337	0,352	0,346	0,342	0,356	0,345	0,006	43,4	0,8
165	0,334	0,342	0,338	0,344	0,332	0,343	0,344	0,339	0,327	0,337	0,338	0,005	44,4	0,7
180	0,323	0,318	0,315	0,315	0,320	0,323	0,317	0,329	0,325	0,327	0,321	0,005	46,7	0,7
195	0,313	0,322	0,312	0,317	0,314	0,309	0,311	0,304	0,320	0,318	0,314	0,005	47,8	0,8
210	0,304	0,311	0,305	0,310	0,296	0,301	0,301	0,296	0,301	0,309	0,303	0,005	49,4	0,8
225	0,296	0,295	0,296	0,297	0,301	0,300	0,302	0,304	0,291	0,299	0,298	0,004	50,3	0,6
240	0,288	0,280	0,281	0,281	0,280	0,290	0,287	0,295	0,295	0,292	0,287	0,006	52,3	1,1
255	0,281	0,283	0,273	0,282	0,287	0,275	0,286	0,277	0,280	0,277	0,280	0,004	53,5	0,8
270	0,275	0,269	0,275	0,278	0,282	0,279	0,272	0,281	0,268	0,279	0,276	0,005	54,4	0,9
285	0,269	0,267	0,262	0,274	0,268	0,271	0,273	0,273	0,275	0,275	0,271	0,004	55,4	0,8
300	0,264	0,264	0,257	0,267	0,261	0,265	0,269	0,260	0,259	0,261	0,263	0,004	57,1	0,8
315	0,258	0,265	0,265	0,255	0,258	0,255	0,263	0,255	0,253	0,262	0,259	0,004	57,9	1,0
330	0,254	0,254	0,250	0,249	0,252	0,260	0,253	0,256	0,249	0,248	0,252	0,004	59,4	0,8
345	0,249	0,257	0,251	0,246	0,250	0,246	0,252	0,248	0,250	0,253	0,250	0,003	59,9	0,8
360	0,245	0,238	0,241	0,250	0,248	0,242	0,241	0,248	0,245	0,240	0,244	0,004	61,5	1,0

Tab. 2.12.2.



Graf 2.12.2.

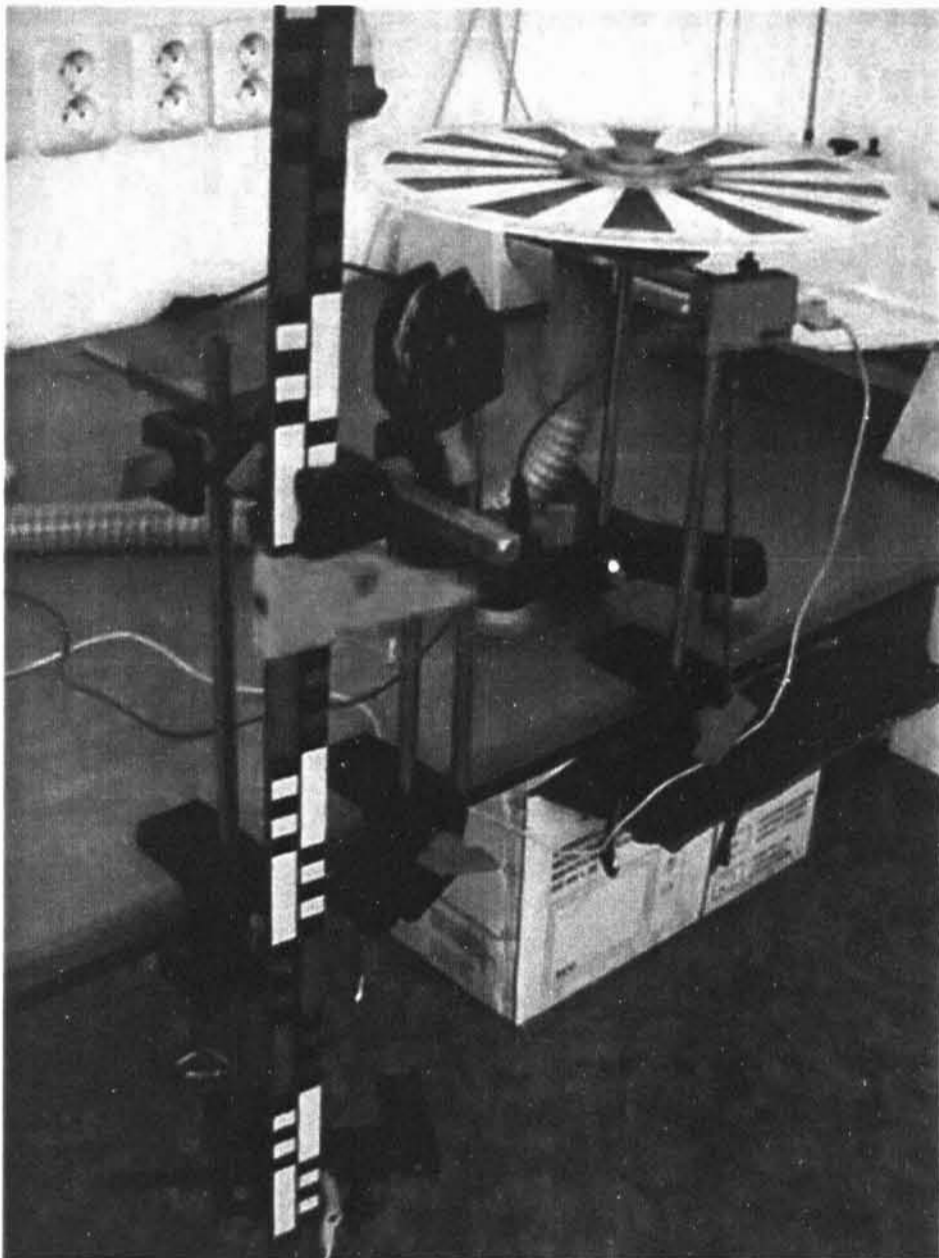
I tato závislost je ve shodě s předpokladem, jelikož jak je patrné z grafu, lze i touto závislostí proložit lineární spojnicí se značnou přesností. Z grafu je dále patrné, že zde byla nenulová počáteční rychlost, toto je způsobeno chybou měření, jelikož neměříme hodnotu okamžité úhlové rychlosti, ale průměrnou úhlovou rychlost průchodu křídélka tedy „skoro okamžitou“ rychlost.

Jak jsme se přesvědčili, je tento pohyb v jistých bodech značně podobný rovnoměrně zrychlenému přímočarému pohybu. Dala by se zde zkoumat taktéž závislost na roztahovacím závaží, které by zde znamenalo různý moment síly. Dále by zde hrál roli poloměr, jakým disk roztahujeme.



## 2.13 Moment setrvačnosti disků

### 2.13.1 Moment setrvačnosti disků - zadání



Obr. 2.13-1. Měření momentu setrvačnosti

#### Úkol

Změřte moment setrvačnosti jednoho a dvou disků, za pomoci rotační vzduchové dráhy.

#### Pomůcky

Rotační vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, disk, startovací zařízení, detekční křídélko, nit, vodiče, roztahovací střed, závaží, kladka.

#### Časová náročnost

10 minut

#### Klíčová slova

Moment sil, rovnoměrně zrychlený kruhový pohyb, úhlová rychlost, úhlové zrychlení, moment setrvačnosti, tíhová síla, druhá impulsová věta (varianta B: zákon zachování mechanické energie, potenciální, kinetická a rotační energie).

## Příprava

- 1) Zkompletujte rotační vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo.
- 2) Připevněte startovací zařízení, tak aby jeho hrot nezavazal pohybu kotouče.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Namotejte nit na roztahovací střed, ved'te ji přes kladku a její volný konec umístěte závaží.

### Varianta B

- 5) Umístěte čidlo, tak aby snímalo průchod závaží.

### Varianta C

- 5) Umístěte čidlo do vhodné vzdálenosti, aby snímalo pohyb křídélka a nevadilo jeho průchodu.

## Provedení

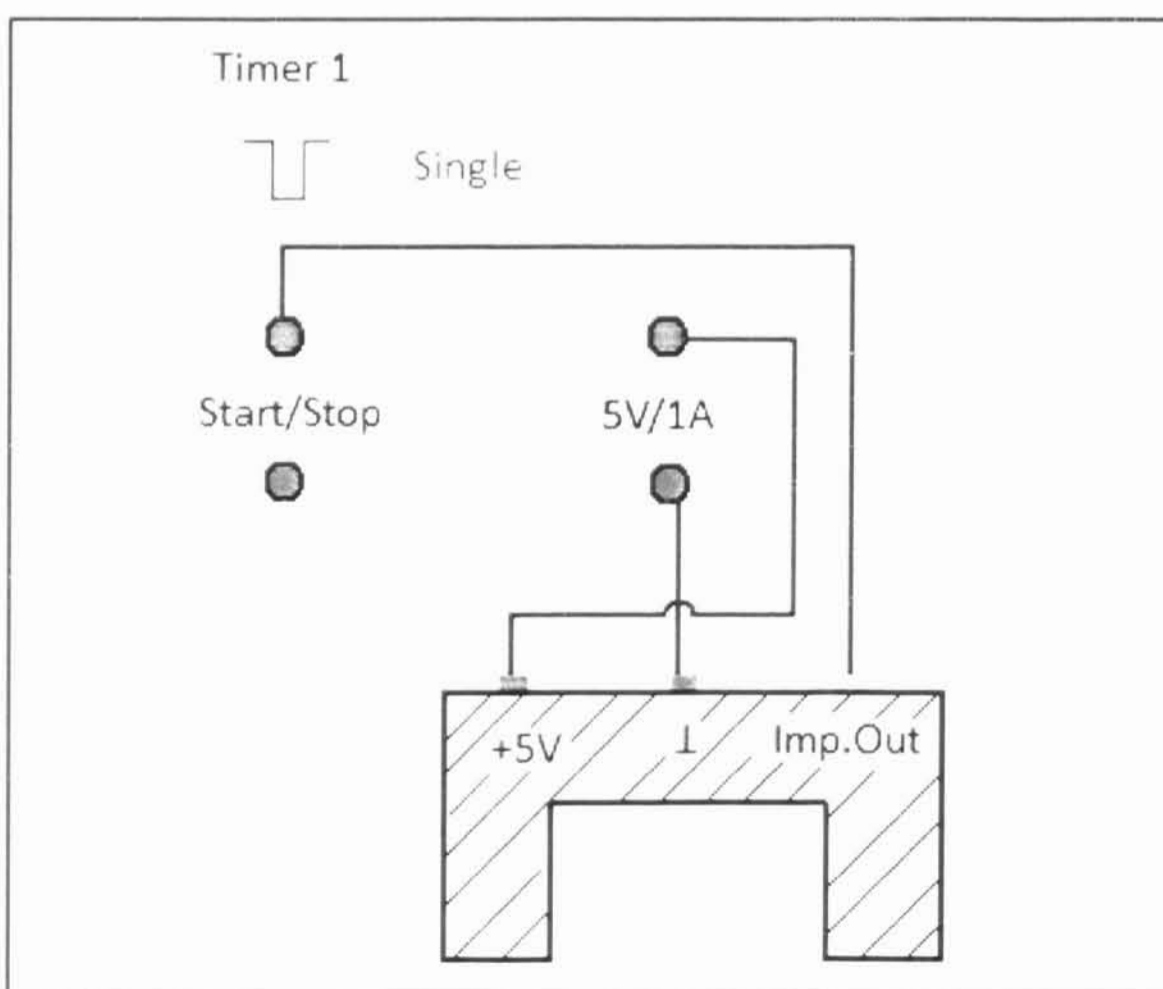
### Varianta A

- 1) Změřte výšku, ze které závaží klesá. Změřte dobu, kterou závaží klesá, pomocí stopek.
- 2) Určete velikost momentu roztáčecí síly. Na základě naměřené hodnoty určete moment setrvačnosti disku.
- 3) Měření zopakujte pro dva disky položené na sobě.

### Varianta B

- 1) Změřte dobu, kterou závaží roztahuje disk, pomocí měřicího čidla.
- 2) Určete velikost momentu roztáčecí síly. Na základě naměřené hodnoty určete moment setrvačnosti disku.
- 3) Měření zopakujte pro dva disky položené na sobě.

Měření provádějte dle zapojení obr. 2.13-2.

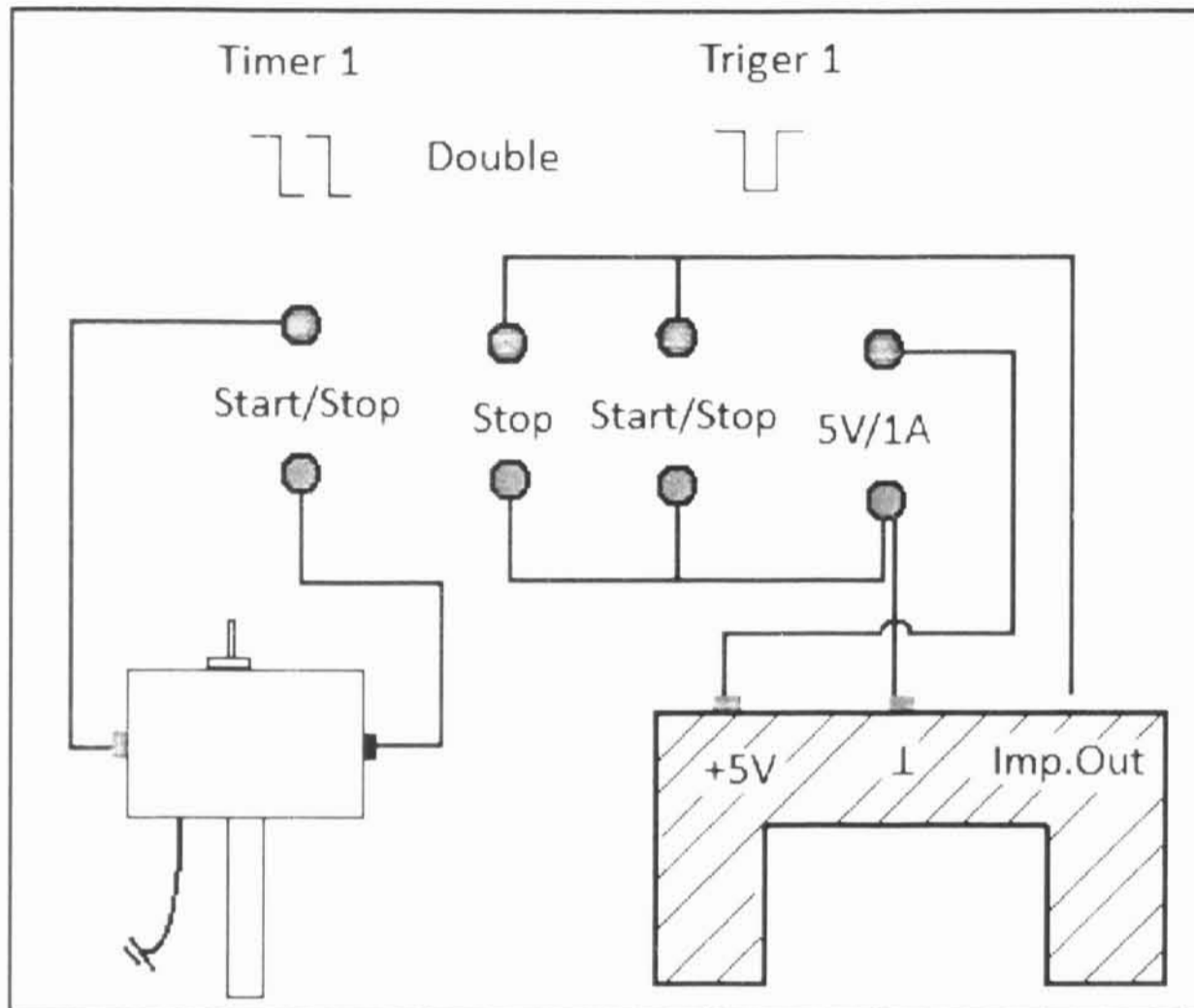


2.13-2.

### Varianta C

- 1) Změřte dobu roztahování a konečnou úhlovou rychlost disku.
- 2) Určete moment setrvačnosti disku na základě naměřených hodnot.
- 3) Měření zopakujte pro dva disky položené na sobě.
- 4) Diskutujte, jaké chyby se při tomto měření dopouštíme a na čem tato chyba závisí.

Měření provádějte dle zapojení obr. 2.13-3.



Obr. 2.13-3.

### 2.13.2 Moment setrvačnosti disků - vypracování

V této úloze se pokusíme změřit moment setrvačnosti jednoho disku (dvou na sobě ležících disků) na rotační vzduchové dráze. V prvních dvou variantách, které díky podobnosti můžeme provést jako jedno měření, využijeme středoškolských znalostí. Ve třetí variantě využijeme již znalosti fyziky spíše vysokoškolské, a tím demonstrujeme její užití na jednoduchém příkladě. V první variantě se pokusíme vyjádřit veškeré síly, které působí v soustavě. Snadno nahlédneme, že na závaží působí tíhová síla a tažná síla nitě. Výslednice těchto sil urychluje závaží dle vztahu:

$$mg - T = ma$$

Kde  $m$  je hmotnost závaží,  $g$  je tíhové zrychlení,  $T$  je tahová síla v niti,  $a$  zrychlení závaží. Jelikož na závaží působí konstantní síla, je jeho pohyb rovnoměrný zrychlený, proto jeho zrychlení lze určit dle vztahu:

$$a = \frac{2s}{t^2}$$

Kde  $s$  je dráha, kterou závaží urazí a  $t$  doba, kterou potřebuje, aby tuto dráhu urazilo. Tahová síla je nití vedena na kotouč. Moment tahové síly  $M$  lze určit tedy dle vztahu:

$$M = Tr$$

Kde  $r$  je příslušný poloměr roztahovacího středu, kde je nit upevněna. Moment síly uděluje kotouči úhlové zrychlení  $\varepsilon$ , dle:

$$M = J\varepsilon$$

Kde  $J$  je moment setrvačnosti kotouče. Úhlové zrychlení je však spjato se zrychlením závaží dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{a}{r}$$

Nyní již známe všechny potřebné údaje, jelikož dráhu  $s$  a dobu  $t$  si můžeme změřit, a tak můžeme určit moment setrvačnosti disku. Ze vztahu:

$$J = mr^2 \left( \frac{t^2 g}{2s} - 1 \right)$$

Druhý myšlenkový postup je založen na zákonu zachování mechanické energie. Musí zde platit, že potenciální energie závaží se přemění během svého pohybu na kinetickou energii závaží a rotační energii disku. Dle vztahu:

$$mgs = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2$$

Úhlovou rychlost si lze převést na rychlost závaží dle vztahu:

$$v = \omega r$$

Na základě znalosti, že závaží se pohybuje rovnoměrně zrychleným přímočarým pohybem s nulovou počáteční dráhou a nulovou počáteční rychlostí, lze opět vyjádřit vztah pro moment setrvačnosti:

$$J = mr^2 \left( \frac{t^2 g}{2s} - 1 \right)$$

Na základě těchto úvah jsem změřil moment setrvačnosti jednoho a dvou disků, jak je patrné z tab. 2.13.1. a 2.13.2.

2.13.1 měření momentu setrvačnosti disku												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	7,96	7,84	8,03	7,85	8,06	7,90	7,89	7,86	8,02	8,02	7,94	0,08
J/kgm <sup>2</sup>	0,0126	0,0122	0,0128	0,0122	0,0129	0,0124	0,0123	0,0123	0,0127	0,0128	0,0125	0,0002

Tab. 2.13.1.

2.13.2. měření momentu setrvačnosti disků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	11,31	11,32	11,32	11,33	11,14	11,15	11,43	11,31	11,21	11,33	11,28	0,09
J/kgm <sup>2</sup>	0,0254	0,0254	0,0254	0,0255	0,0246	0,0247	0,0259	0,0254	0,0249	0,0255	0,0253	0,0004

Tab. 2.13.2.

Jak je z naměřených hodnot patrné, vychází moment setrvačnosti dvou disků takřka jako dvojnásobek momentu setrvačnosti jednoho disku.

Třetí myšlenka výpočtu momentu setrvačnosti vychází z 2. Impulsové věty:

$$M = \varepsilon J$$

Moment síly si zde můžeme vyjádřit, jako moment síly tahové síly nitě dle vztahu:

$$M = Tr$$

Snadno nahlédneme, že na závaží působí tíhová síla a tažná síla nitě. Výslednice těchto sil urychluje závaží dle vztahu:

$$mg - T = ma$$

Jestliže použijeme zanedbání, že síla urychlující závaží je řádově menší, než síla tahu nitě, můžeme prohlásit, že síla tahu nitě je přímo tíhová síla působící na závaží. Tohoto zanedbání se můžeme dopustit pouze tehdy, pokud závaží má relativně nízkou hmotnost. Dostáváme tedy vztah:

$$M = mgr$$

Jestliže integrujeme vztah druhé impulsové věty, dostáváme:

$$Mt = J\omega$$

Úhlovou rychlost  $\omega$  lze naměřit jako „skoro okamžitou“ rychlost kotouče. Doba  $t$  pak odpovídá času, který disk na tuto rychlost zrychloval.

V následujících tabulkách 2.13.3. a 2.13.4. jsou uvedeny naměřené hodnoty a vypočítán moment setrvačnosti pro jeden a dva disky. Kde  $t$  označuje dobu roztahování a  $dt$  dobu průchodu detekčního křídélka.

2.13.3. měření momentu setrvačnosti disku												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
$t/s$	3,473	3,445	3,461	3,435	3,435	3,437	3,428	3,439	3,431	3,437	3,442	0,013
$dt/s$	0,213	0,209	0,210	0,209	0,212	0,208	0,210	0,209	0,208	0,212	0,210	0,002
$J/kg\ m^2$	0,01247	0,01214	0,01226	0,01211	0,01228	0,01205	0,01214	0,01212	0,01203	0,01229	0,01219	0,00013

Tab. 2.13.3.

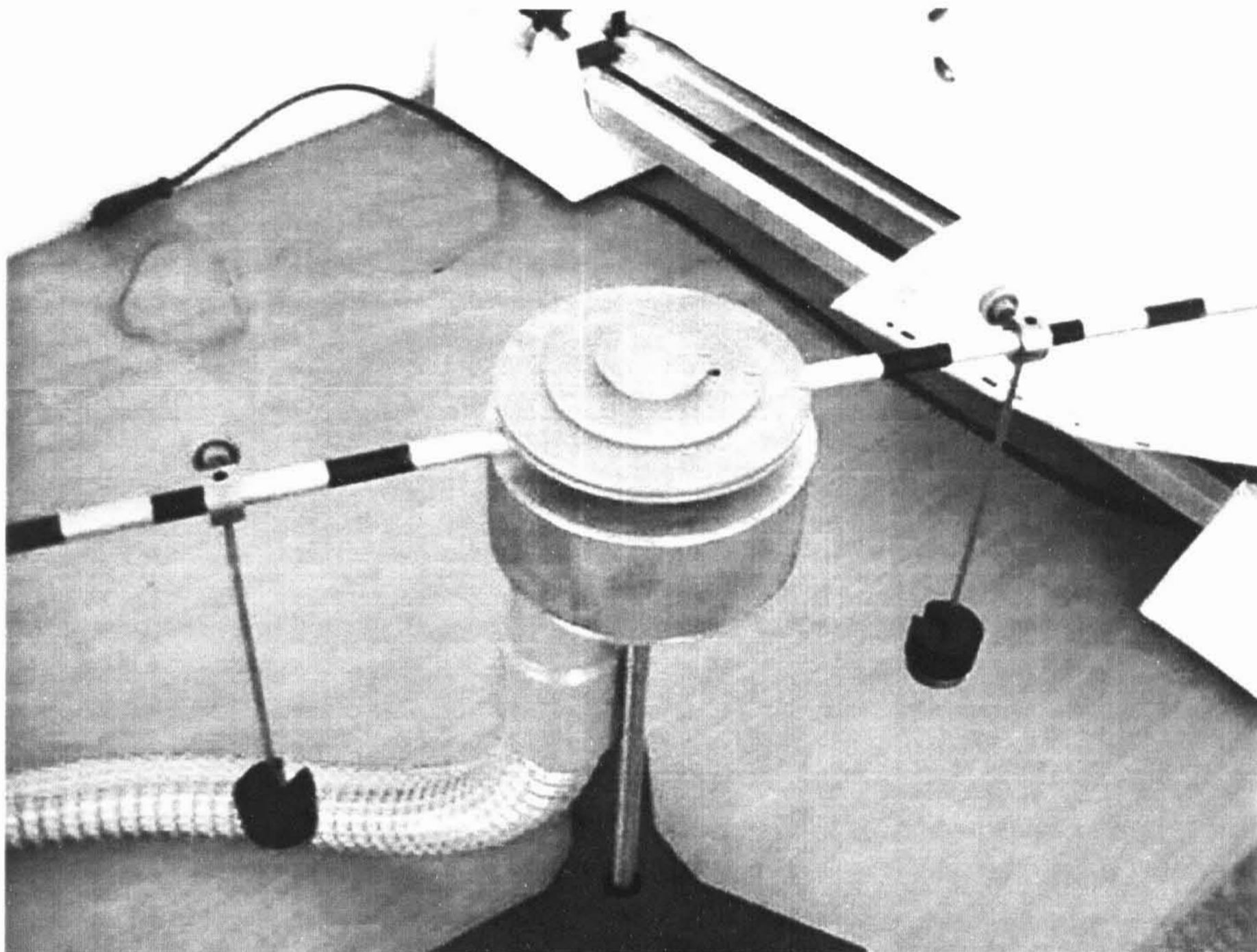
2.13.4. měření momentu setrvačnosti disků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
$t/s$	5,59	5,55	5,66	5,62	5,60	5,66	5,60	5,67	5,55	5,63	5,59	0,04
$dt/s$	0,316	0,318	0,319	0,321	0,317	0,313	0,313	0,320	0,318	0,314	0,317	0,003
$J/kg\ m^2$	0,0298	0,0298	0,0304	0,0304	0,0299	0,0299	0,0296	0,0306	0,0297	0,0298	0,0300	0,0003

Tab. 2.13.4.

Jak je patrné z obou metod, při využití prvních, dostáváme přesnější hodnoty. Ve třetím případě je totiž hodnota momentu setrvačnosti disku zkreslena zanedbáním složky závaží.

## 2.14 Moment setrvačnosti

### 2.14.1 Moment setrvačnosti – zadání



Obr. 2.14-1. Tyč s přívěšky

#### Úkol

Změřte moment setrvačnosti rotující tyčky s přívěšky. Zjistěte závislost momentu setrvačnosti na vzdálenosti přívěšků od středu a jejich hmotnosti.

#### Pomůcky

Rotační vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřící čidlo, startovací zařízení, detekční křídélko, nit, vodiče, roztahovací střed, závaží, kladka, tyč, přívěšky.

#### Časová náročnost

15 minut

#### Klíčová slova

Moment sil, rovnoměrně zrychlený kruhový pohyb, úhlová rychlost, úhlové zrychlení, moment setrvačnosti, tíhová síla, druhá impulsová věta.

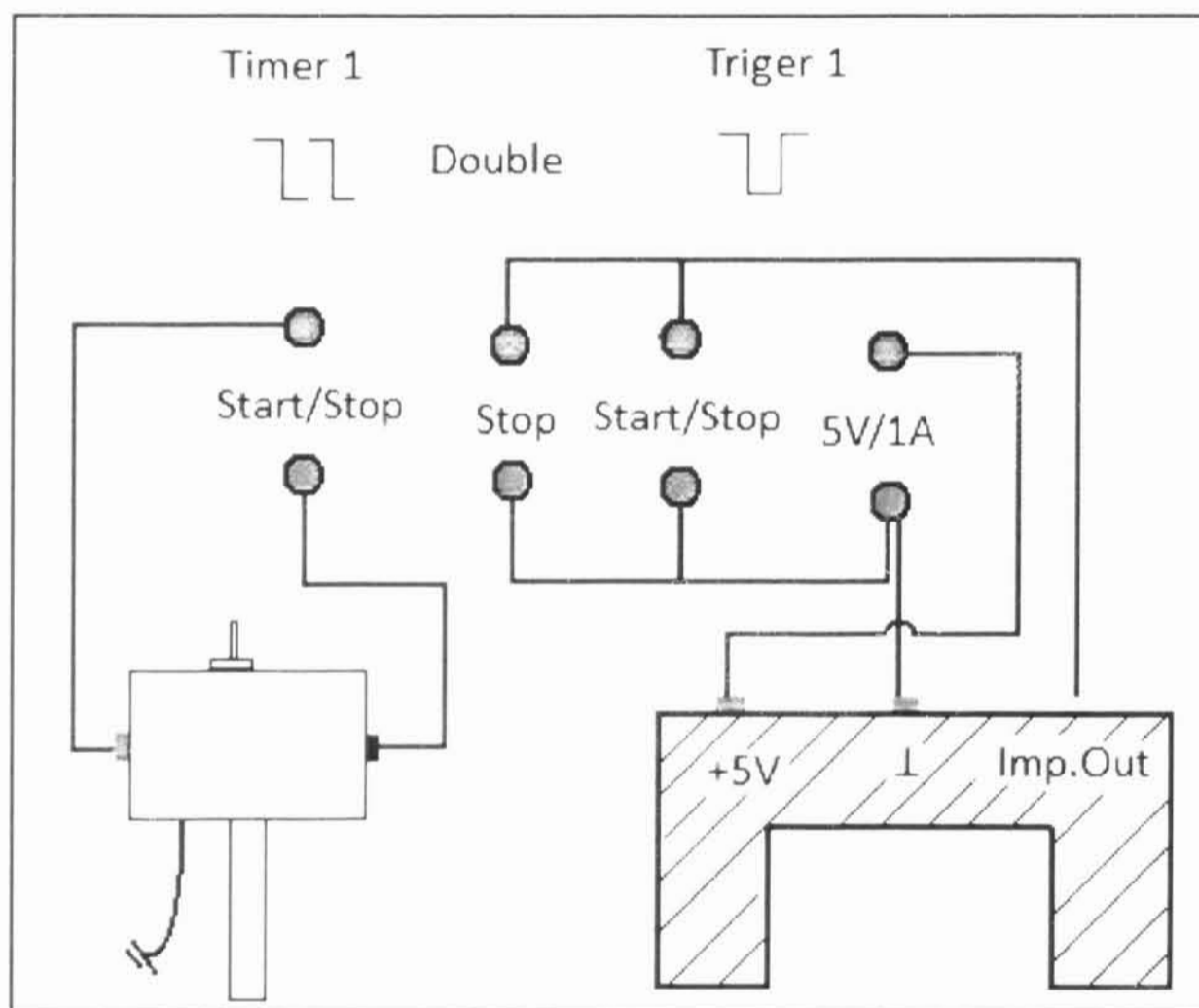
## Příprava

- 1) Zkompletujte rotační vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo.
- 2) Připevněte startovací zařízení, tak aby jeho hrot nezavazal pohybu kotouče.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Namotejte nit na roztahovací střed, ved'te ji přes kladku a její volný konec umístěte závaží.
- 5) Umístěte čidlo, tak aby snímalo průchod závaží.

## Provedení

- 1) Určete moment setrvačnosti samotné tyče.
- 2) Určete moment setrvačnosti tyče s přívěsky. (Přívěsky umísťujte ve stejné vzdálenosti od středu). Určete pro různou vzdálenost přívěsků od středu, ve vybrané vzdálenosti změřte pro různou hmotnost.
- 3) Diskutujte o závislosti momentu setrvačnosti na hmotnosti přívěsků a jejich vzdálenosti od středu. Diskutujte o chybě, které se při měření dopouštíte.

Měření provádějte dle zapojení obr. 2.14-2.



Obr.2.14-2.



## 2.14.2 Moment setrvačnosti - vypracování

V této úloze se pokusíme lépe osvětlit pojem momentu setrvačnosti. U této úlohy předpokládám již absolvování měření momentu setrvačnosti disku, proto nebudu rozvádět způsob měření. Jedná se o variantu 3 z úlohy měření momentu setrvačnosti disku. Abychom mohli srovnávat hodnoty jednotlivých momentů setrvačnosti, je nutno nejprve změřit hodnotu momentu setrvačnosti samotné tyče bez přívěšků. Toto měření je provedeno v tabulce 2.14.1.

2.14.1. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
t/s	4,20	4,21	4,22	4,21	4,28	4,11	4,21	4,33	4,28	4,21	4,23	0,06
dt/s	0,0965	0,0968	0,0964	0,0969	0,0970	0,0990	0,0950	0,0980	0,0970	0,0980	0,0971	0,0010
J/kg m <sup>2</sup>	0,00683	0,00687	0,00686	0,00688	0,00700	0,00686	0,00674	0,00716	0,00700	0,00696	0,00692	0,00011

Tab. 2.14.1. moment setrvačnosti tyče

Jestliže již máme naměřen počáteční moment setrvačnosti, můžeme přidat na tyč přívěsky, které můžeme přirovnat ke dvěma hmotným bodům stejně vzdáleným od osy otáčení. V první části se zaměříme na ověření závislosti momentu setrvačnosti  $J$  na vzdálenosti přívěšků od osy otáčení.

2.14.2. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
t/s	4,50	4,53	4,56	4,55	4,41	4,53	4,60	4,45	4,41	4,46	4,50	0,06
dt/s	0,103	0,103	0,105	0,100	0,105	0,106	0,105	0,101	0,102	0,100	0,103	0,002
J/kg m <sup>2</sup>	0,0078	0,0079	0,0081	0,0077	0,0078	0,0081	0,0081	0,0076	0,0076	0,0075	0,0078	0,0002

Tab. 2.14.2. Moment setrvačnosti  $r = 10$  cm

2.14.3. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
t/s	4,73	4,69	4,55	4,83	4,79	4,56	4,64	4,76	4,55	4,55	4,67	0,10
dt/s	0,107	0,107	0,105	0,106	0,105	0,109	0,104	0,110	0,105	0,107	0,107	0,002
J/kg m <sup>2</sup>	0,0086	0,0085	0,0081	0,0086	0,0085	0,0084	0,0081	0,0088	0,0080	0,0082	0,0084	0,0003

Tab. 2.14.3. Moment setrvačnosti  $r = 12,5$  cm

2.14.4. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
t/s	4,88	4,89	4,98	5,02	4,90	4,93	4,87	4,90	5,02	4,76	4,91	0,07
dt/s	0,112	0,112	0,107	0,112	0,110	0,115	0,107	0,112	0,115	0,113	0,111	0,003
J/kg m <sup>2</sup>	0,0092	0,0092	0,0090	0,0095	0,0091	0,0096	0,0088	0,0092	0,0097	0,0091	0,0092	0,0003

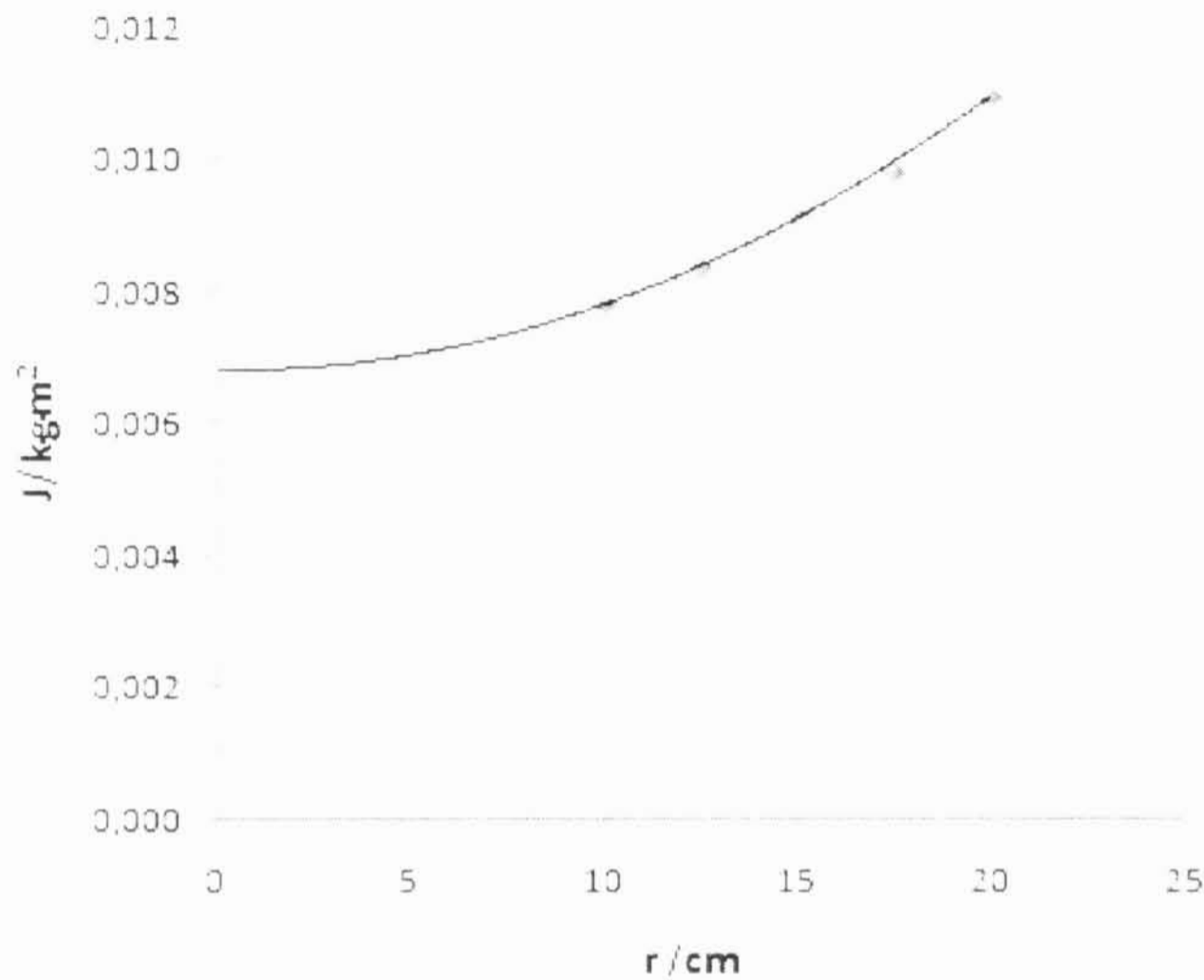
Tab. 2.14.4. Moment setrvačnosti  $r = 15$  cm

2.14.5. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
t/s	5,08	5,12	5,13	5,05	5,01	5,01	5,03	4,92	5,11	5,04	5,05	0,06
dt/s	0,117	0,117	0,119	0,113	0,116	0,113	0,114	0,118	0,110	0,118	0,115	0,003
J/kg m <sup>2</sup>	0,0100	0,0101	0,0103	0,0096	0,0098	0,0095	0,0097	0,0098	0,0095	0,0100	0,0098	0,0003

Tab. 2.14.5. Moment setrvačnosti  $r = 17,5$  cm

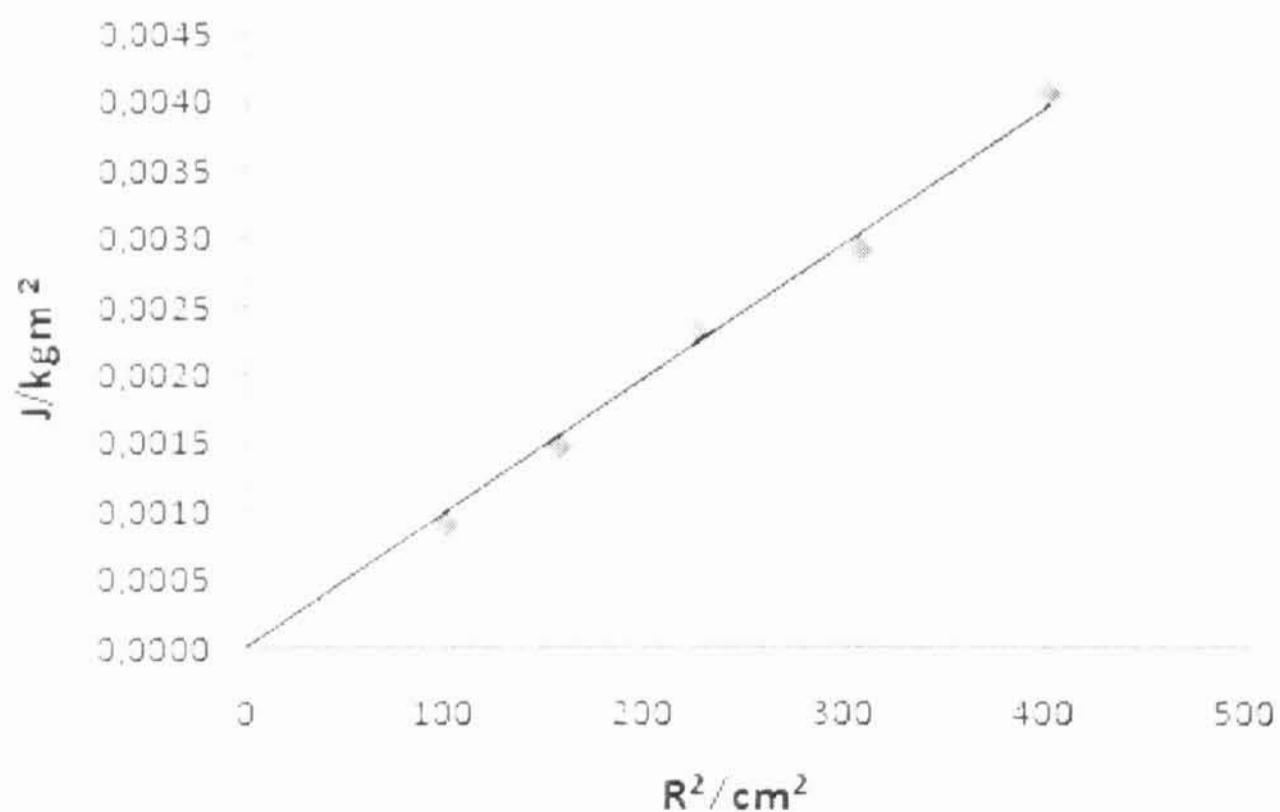
2.14.6. měření momentu setrvačnosti přívěsků												
$\bar{c}, \text{m}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	$\delta$
$\tau / \text{s}$	5,35	5,57	5,22	5,47	5,44	5,48	5,24	5,31	5,21	5,27	5,36	0,12
$\omega t / \text{s}$	0,122	0,124	0,120	0,118	0,123	0,123	0,126	0,120	0,122	0,119	0,122	0,002
$J / \text{kgm}^2$	0,0110	0,0116	0,0106	0,0109	0,0113	0,0114	0,0111	0,0107	0,0107	0,0106	0,0110	0,0003

Tab. 2.14.6. Moment setrvačnosti  $r = 20 \text{ cm}$



Graf 2.14.1. Závislost  $J$  na  $r$

Graf 2.14.1. ukazuje závislost celkového momentu setrvačnosti soustavy tyče s přívěsky. V grafu je závislost proložena polynomicou spojnicí druhého stupně. Spojnice protíná osu  $y$  v hodnotě blízké hodnotě momentu setrvačnosti samotné tyče. Zkusme tedy vynést hodnotu momentu setrvačnosti pouze přívěsků v závislosti na druhé mocnině jejich vzdálenosti od osy otáčení.



Graf 2.14.2. Závislost  $J$  na  $R^2$

Jak je patrné, je závislost lineární procházející počátkem, což je ve shodě s teorií, pokud porovnáváme moment setrvačnosti přívěšků s momentem setrvačnosti dvou hmotných bodů stejně vzdálených od osy otáčení, které jsou vůči této ose souměrné.

V další části zkusme ověřit, zda se moment setrvačnosti přívěšků chová stejně jako moment setrvačnosti hmotných bodů, v závislosti na hmotnosti.

2.14.7. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	5,35	5,57	5,22	5,55	5,50	5,25	5,58	5,61	5,42	5,45	5,45	0,13
dt/s	0,122	0,124	0,120	0,120	0,122	0,125	0,122	0,119	0,127	0,122	0,122	0,002
J/kgm <sup>2</sup>	0,0110	0,0116	0,0106	0,0112	0,0113	0,0111	0,0115	0,0113	0,0116	0,0112	0,0112	0,0003

Tab. 2.14.7. Moment setrvačnosti m = 100 g

2.14.8. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	6,28	6,23	6,10	6,41	6,33	6,37	6,44	6,16	6,33	6,18	6,28	0,11
dt/s	0,144	0,145	0,140	0,140	0,146	0,144	0,143	0,140	0,141	0,144	0,143	0,002
J/kgm <sup>2</sup>	0,0152	0,0152	0,0144	0,0151	0,0156	0,0155	0,0155	0,0145	0,0151	0,0150	0,0151	0,0004

Tab. 2.14.8. Moment setrvačnosti m = 200 g

2.14.9. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	7,05	7,24	7,17	7,17	6,84	6,85	7,17	7,02	7,00	6,85	7,04	0,14
dt/s	0,161	0,157	0,164	0,158	0,164	0,158	0,158	0,164	0,162	0,157	0,160	0,003
J/kgm <sup>2</sup>	0,0191	0,0192	0,0198	0,0191	0,0189	0,0182	0,0191	0,0194	0,0191	0,0181	0,0190	0,0005

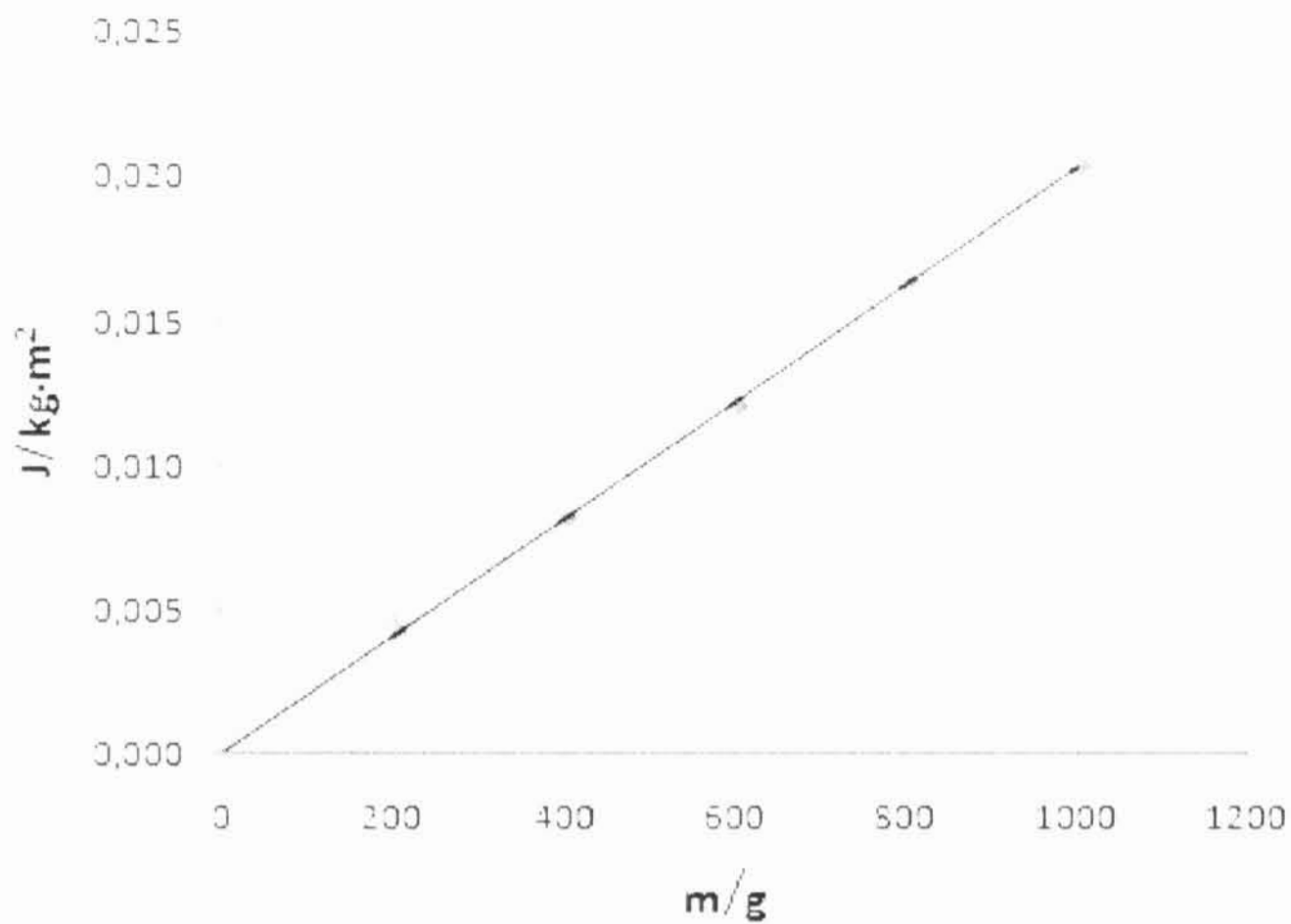
Tab. 2.14.9. Moment setrvačnosti m = 300 g

2.14.10. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	7,77	7,99	7,94	7,84	7,58	7,82	7,58	7,70	7,92	7,85	7,80	0,14
dt/s	0,177	0,173	0,175	0,179	0,180	0,177	0,178	0,176	0,182	0,176	0,177	0,002
J/kgm <sup>2</sup>	0,0232	0,0233	0,0234	0,0237	0,0230	0,0233	0,0228	0,0229	0,0243	0,0233	0,0233	0,0004

Tab. 2.14.10. Moment setrvačnosti m = 400 g

2.14.11. měření momentu setrvačnosti přívěšků												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	8,44	8,40	8,61	8,64	8,35	8,44	8,53	8,46	8,48	8,21	8,45	0,12
dt/s	0,193	0,197	0,192	0,190	0,187	0,193	0,191	0,190	0,188	0,198	0,192	0,003
J/kgm <sup>2</sup>	0,0274	0,0279	0,0279	0,0277	0,0263	0,0275	0,0275	0,0271	0,0269	0,0274	0,0274	0,0005

Tab. 2.14.11. Moment setrvačnosti m = 500 g



Graf 2.14.3. závislost  $J$  na  $m$

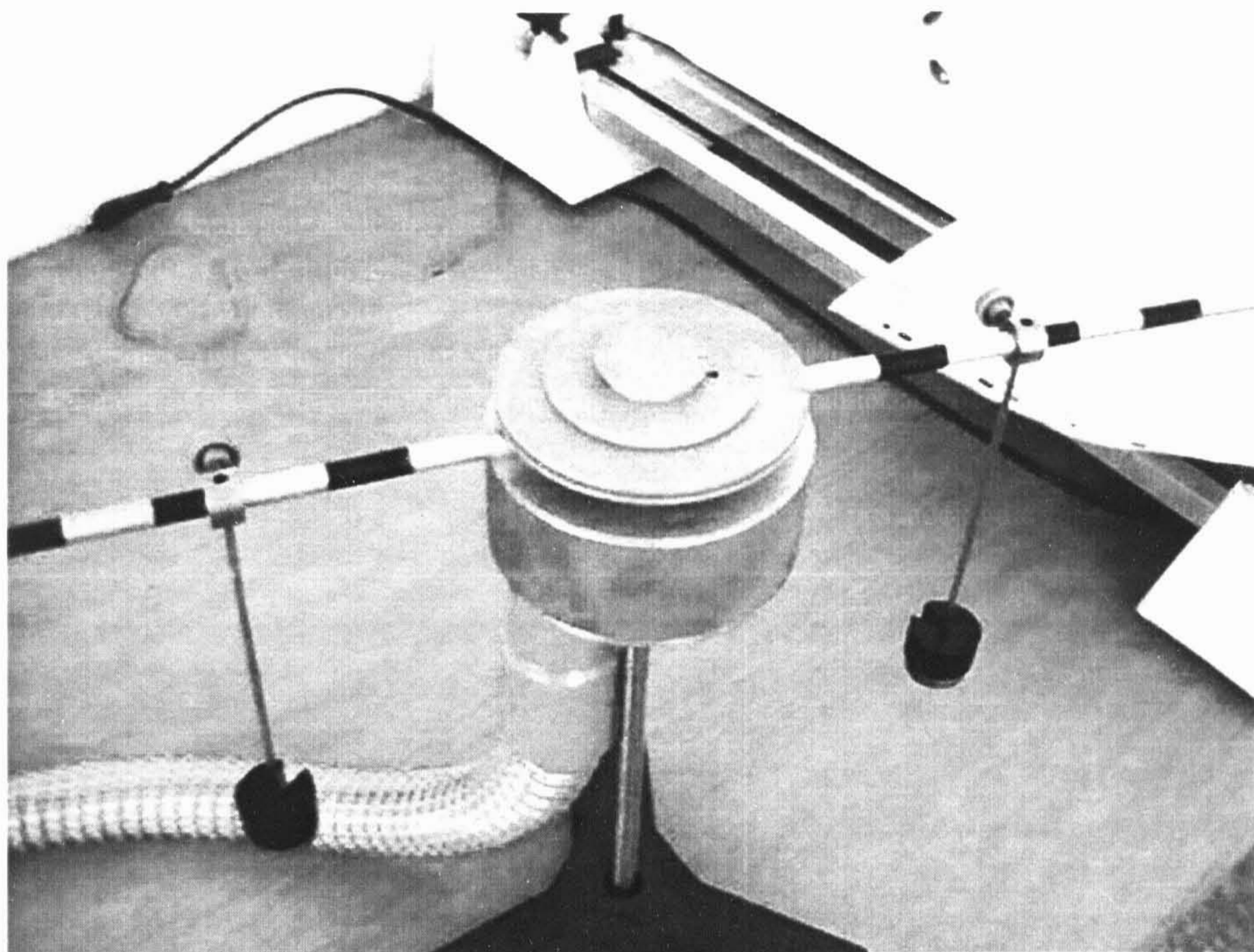
Jak je z grafu 2.14.3. patrné, jedná se o lineární závislost. V grafu je vždy vedena celková hmotnost obou přívěsků. Jestliže naměřené závislosti porovnáme s rovnicí výpočtu momentu setrvačnosti pro dvojici hmotných bodů stejně vzdálených symetricky od osy otáčení (případně pro obruč):

$$J = mr^2$$

Vidíme, že se přívěsky chovají dle této závislosti.

## 2.15 Ověření Steinerovy věty

### 2.15.1 Ověření Steinerovy věty - zadání



Obr. 2.15-1.

#### Úkol

Pomocí měření momentu setrvačnosti na rotační vzduchové dráze ověřte Steinerovu větu.

#### Pomůcky

Rotační vzduchová dráha, dmychadlo, čítač, měřicí čidlo, startovací zařízení, detekční křídélko, nit, vodiče, roztahovací střed, závaží, kladka, tyč, přívěsky.

#### Časová náročnost

15 minut

#### Klíčová slova

Moment sil, rovnoměrně zrychlený kruhový pohyb, úhlová rychlost, úhlové zrychlení, moment setrvačnosti, tíhová síla, druhá impulsová věta, Steinerova věta.

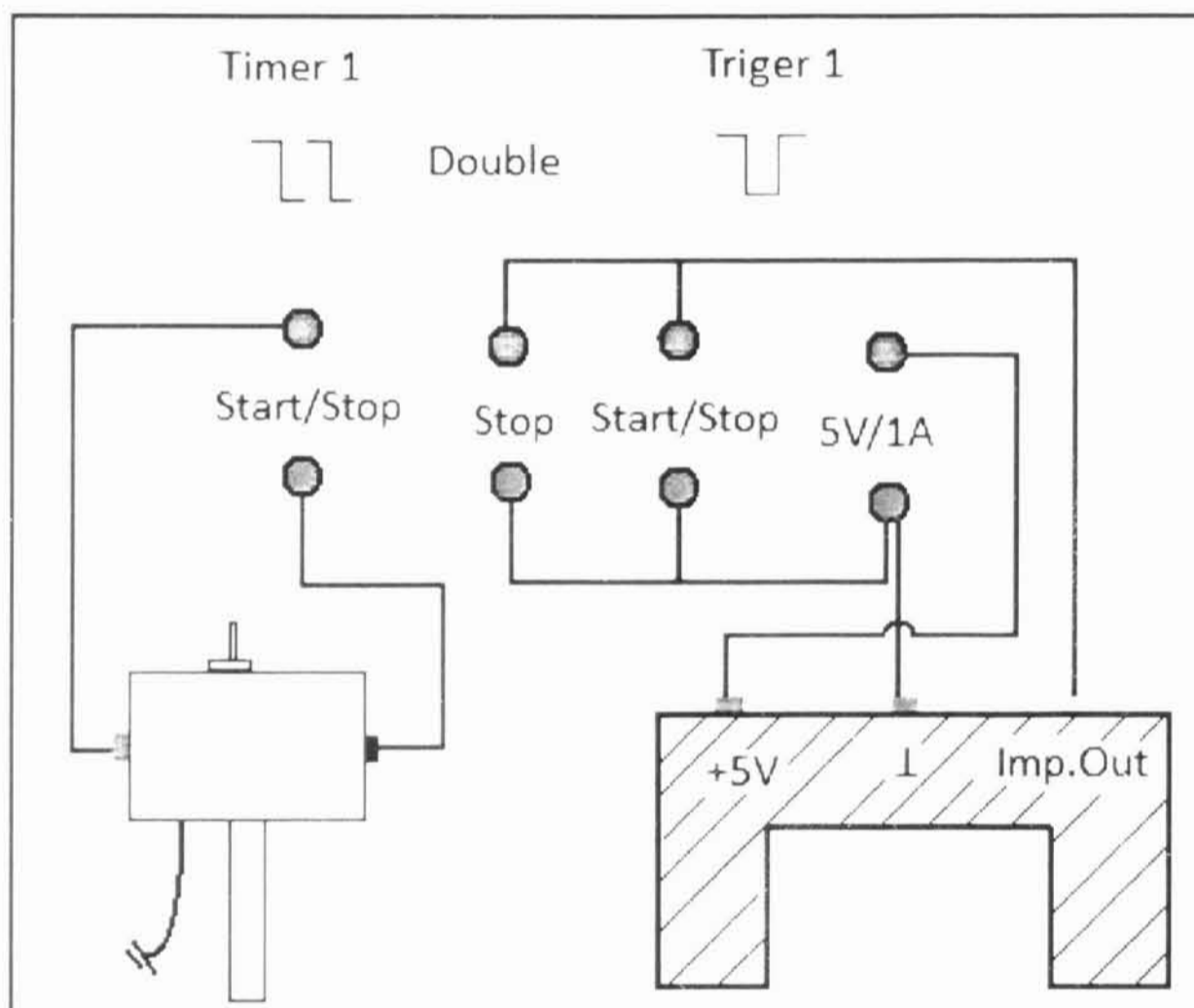
## Příprava

- 1) Zkompletujte rotační vzduchovou dráhu. Připojte dmychadlo.
- 2) Připevněte startovací zařízení, tak aby jeho hrot nezavazal pohyb kotouče.
- 3) Zapojte čítač dle schématu pro danou část úlohy.
- 4) Namotejte nit na roztahovací střed, ved'te ji přes kladku a její volný konec umístěte závaží.
- 5) Umístěte čidlo, tak aby snímalo průchod závaží.

## Provedení

- 1) Změřte moment setrvačnosti tyče s přívěsky, umístěnými ve stejné vzdálenosti od středu.
- 2) Změřte moment setrvačnosti tyče s přívěsky, umístěnými nesymetricky od středu.
- 3) Diskutujte, jak na základě naměřených hodnot lze ověřit Steinerovu větu.

Měření provádějte dle zapojení obr. 2.15-2.



Obr. 2.15-2.

## 2.15.2 Ověření Steinerovy věty - vypracování

V této úloze zkusíme ověřit Steinerovu větu. Steinerova věta popisuje závislost momentu setrvačnosti tělesa, jestliže jej vychýlíme posunem z původní osy otáčení procházející těžištěm tak, že původní osa otáčení zůstane rovnoběžná s aktuální osou otáčení. Moment setrvačnosti pak lze určit jako:

$$J = J_T + mh^2$$

$J_T$  je moment setrvačnosti vzhledem k ose procházející těžištěm,  $m$  je hmotnost tělesa a  $h$  je vzdálenost nové osy otáčení od osy procházející středem. K ověření Steinerovy věty zkusíme vychýlit přívěsky ze symetrické pozice, abychom nepřetěžovali dráhu, volíme co nejmenší hmotnost přívěsků tj. 100 g na každé ze stran.

V první tabulce 2.15.1. je uveden výpočet momentu setrvačnosti samotné tyče (přesný rozpis nebudu uvádět, předpokládám absolvování úloh měření momentu setrvačnosti disku a měření momentu setrvačnosti přívěsku na tyči).

2.15.1. ověření Steinerovy věty												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	4,20	4,21	4,22	4,21	4,23	4,11	4,21	4,33	4,28	4,21	4,23	0,06
dt/s	0,0965	0,0968	0,0964	0,0969	0,0970	0,0990	0,0950	0,0980	0,0970	0,0980	0,0971	0,0010
J/kg m <sup>2</sup>	0,00683	0,00687	0,00686	0,00688	0,00700	0,00686	0,00674	0,00716	0,00700	0,00696	0,00692	0,00011

Tab. 2.15.1. Ověření Steinerovy věty  $J_0$

Dále potřebujeme znát moment setrvačnosti přívěsků v symetrické pozici. Poté již můžeme přívěsky z této pozice vychýlit.

2.15.2. ověření Steinerovy věty												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	5,57	5,69	5,61	5,48	5,41	5,70	5,40	5,70	5,33	5,64	5,55	0,13
dt/s	0,124	0,123	0,120	0,123	0,120	0,124	0,124	0,120	0,119	0,120	0,122	0,002
J/kg m <sup>2</sup>	0,0116	0,0118	0,0113	0,0114	0,0109	0,0119	0,0113	0,0115	0,0107	0,0114	0,0114	0,0004

Tab. 2.15.2. Ověření Steinerovy věty  $h = 0$  cm

2.15.3. ověření Steinerovy věty												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	5,37	5,56	5,39	5,61	5,34	5,42	5,47	5,56	5,30	5,29	5,43	0,11
dt/s	0,122	0,126	0,122	0,125	0,125	0,123	0,123	0,123	0,124	0,120	0,123	0,002
J/kg m <sup>2</sup>	0,0111	0,0118	0,0111	0,0118	0,0112	0,0112	0,0114	0,0115	0,0111	0,0107	0,0113	0,0003

Tab. 2.15.3. Ověření Steinerovy věty  $h = 2,5$  cm

2.15.4. ověření Steinerovy věty												
č.m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Průměr	δ
t/s	5,34	5,26	5,32	5,39	5,54	5,47	5,31	5,59	5,24	5,62	5,41	0,13
dt/s	0,123	0,122	0,120	0,123	0,119	0,125	0,123	0,126	0,124	0,127	0,123	0,002
J/kg m <sup>2</sup>	0,0111	0,0108	0,0108	0,0112	0,0111	0,0115	0,0110	0,0119	0,0109	0,0120	0,0112	0,0004

Tab. 2.15.3. Ověření Steinerovy věty  $h = 5$  cm

Z naměřených hodnot není možno prokázat či vyvrátit předpoklad platnosti Steinerovy věty, jelikož hodnoty se neliší v rámci chyby. Možnou příčinou je již konstrukce vzduchové dráhy, která takovéto výkyvy kompenzuje svou konstrukcí.



### 3 Hodnocení vzduchové dráhy, jako didaktické pomůcky.

V této části se pokusím lehce nastínit můj pohled a hodnocení sady vzduchové dráhy od firmy Phywe, jako didaktické pomůcky.

V hodnocení se pokusím zaměřit na její využití na všech stupních škol.

Pro základní školy bych viděl vhodnou pouze lineární část vzduchové dráhy, pro účely demonstrace rovnoměrného pohybu, případně rovnoměrně zrychleného pohybu. Hlavní nedostatek bych v tomto případě viděl v přílišné složitosti čítače, i když firma Phywe nabízí jednodušší varianty čítače. Souprava obsažená na matematicko-fyzikální fakultě je vybavená nejlepším čítačem, jaký byl v době pořízení od firmy Phywe dostupný. O výhodách a nevýhodách pro praktikum školních pokusů se zmíním později. Jestliže však používáme vzduchovou dráhu pouze pro kvalitativní experimenty, jako např. pružná či nepružná srážka bez měření rychlostí průchodů atd., nemusí být toto překážkou jejího využívání.

Velmi kladné je pro žáky u lineární části vzduchové dráhy pochopení principu. Princip si snadno představí jako rovně se pohybující vznášedlo.

Na středních školách by využití vzduchové dráhy mohlo mít větší opodstatnění, jelikož dobře demonstruje většinu fyzikálních jevů s ní spojených. Taktéž vyšší úroveň žáka umožňuje i případnou samostatnou práci se soupravou vzduchové dráhy. Dobře zde lze demonstrovat závislost dráhy na čase při přímočarém rovnoměrném pohybu a při rovnoměrně zrychleném přímočarém pohybu. Dále je zde dobré předvedení pohybu po nakloněné rovině, téměř bez tření, což bývá častým námětem středoškolských úloh mechaniky. Na škodu je zde však fakt vyšší cenové hodnoty soupravy, taktéž její neskladnost, tudíž její využití při hromadných laboratorních hodinách nepřichází na většině škol, ať již středních či základních v úvahu.

Na vysoké škole je dobré tuto soupravu zařadit do výběrových praktik školních pokusů pro budoucí učitele fyziky hlavně z důvodu, že se zde sami oni seznámí blíže se základními fyzikálními jevy a způsobem jejich měření. Je zde dobré měřit i úlohy, které nejsou plně průkazné jako např. zkoumání pohybu tryskového vozíku na vzduchové dráze. Student si na těchto úlohách může procvičit možnost komentáře i neprůkazného měření a zdokonalit se v úsudku, tak aby byl schopen svůj neúspěch při měření správně vysvětlit a okomentovat chyby vedoucí k neprůkaznosti měření.

Při delším zkoumání vzduchové dráhy narazíte na několik drobných vad, které by se jí daly vytknout. Příkladem takové vady je připevněné měřítko na lineární vzduchové dráze, které začíná na okraji dráhy, což v případě použití startéru vede k nutnosti přepočítávání odečtených hodnot. Je zde tedy nutné vždy používat externí stupnici, což v případě demonstrace např. studentům, kteří nejsou s látkou plně obeznámeni, může činit potíže. Hlavně díky nepochopení kde danou veličinu odečítáme.

Celkově však se jedná o ucelenou sadu pokusů, u které jak je již patrné z množství úloh, převažují klady nad zápory.

## 4 Video praktika

Tato část je věnována stručnému popisu možností natočení úloh se vzduchovou drahou. Součástí zadání mé diplomové práce bylo i prověření možností natočení sady pokusů. Tyto pokusy by bylo možno pak nezávisle demonstrovat v hodinách. Původní ideou byla i možnost natočení kompletní sady úloh, jako jakéhosi virtuálního praktika.

Ukázalo se, že tato část bude takřka nerealizovatelná s běžnými prostředky. V případech, kdy se jednalo o rychlé děje, např. pružná srážka bylo nutno zapnout stabilizaci obrazu, tak aby pohyblivé části byly dobře zřetelné. Toto však způsobí, že kamera ze snímaných snímků vytváří za pomoci jistého prokládání stabilní snímek. Toto následně způsobí, že veškeré rychle se opakující děje, které lidské oko není schopno postřehnout, se zviditelní. Tento efekt lze přirovnat k použití stroboskopu. Tento efekt se projevil na mnohdy úplně nečitelném, či jen blikajícím displeji čítače. Toto je patrné na záběrech videa „pružná srážka. mpeg“, kde je tento efekt snad nejnižší, co se podařilo zachytit při tomto nastavení kamery.

Dalším problémem je, jak je patrné z tohoto záběru je i vysoká hlučnost dmyhadla a tudíž je zde úplně znemožněn jakýkoliv komentář během spuštěného měření. V případě, že by se na komentáři k úloze trvalo, bylo by vždy nutno vypnout dmyhadlo. Taktéž absence např. displeje ze zadní části čítače mne nutila neustále nahlížet přes celý stůl, tak abych mohl odečíst hodnoty.

V dalším videu „nepružná srážka.mpeg“ jsem zkoušel natočit děj bez čítače. V tomto případě dochází k rozmazání obrazu vozíku a v případě promítání pomocí projektoru dochází k efektu „duchů“.

Ve videu „rotace disku.mpeg“ je patrné volení kompromisního zaostření. Volba byla volena jako optimum pro zobrazení hodnot čítače tak aby nedošlo k rozmazání v pozadí rotujícího kotouče. Tento příklad ukazuje, že i na tuto vzdálenost není na čítači patrná desetinná značka a také není jasné nastavení čítače. I přes tyto výhrady si dovoluji hodnotit jako nejlepší, které zachycuje daný experiment.

Video „moment setrvačnosti.mpeg“ je demonstrace případu, kdy by byl nutný slovní komentář. Toto video jsem pouštěl několika lidem a padajícího závaží si nevšiml na první spuštění nikdo. Tudíž tento experiment by vyžadoval přímý komentář během videa, což je z důvodu hlasitosti dmyhadla nemožné realizovat.

Jelikož tato práce byla zadána, jakož to samostatná práce, při měření jsem se snažil natáčet pokud možno samostatně, což vedlo k nutnosti neustále odbíhat ke kameře. Toto by se dalo vyřešit modelem kamery s dálkovým ovládním, ale i tak by byla práce pro jednotlivce celkem obtížná.

V dalších pokusech jsem již natáčel na pokud možno co nejvíce manuální režimy. Zde však nastal problém, že veškeré rychlejší pohyby se začaly stávat rozmazanými, dále také bylo nutno volit kompromisní bod pro zaměření kamery a tak bylo například při měření, rozmazané či nepřiliš zřetelné roztahovací zařízení. Případně nebyla takřka znát čísla na čítači.

Při zjišťování jsem se snažil kontaktovat odborníky s žádostí o pomoc. Bohužel bez úspěchu, který by problém odstranil.

Na všech záběrech, pokud byl použit čítač, bylo nutné na základě znalosti čítače dovozovat, kde se nalézalo desetinné znaménko.

Pro ukázkou příkládám zmíněné čtyři ukázkové úlohy, které vznikly během různých stádií pokusů. Nejlépe se dařilo zachytit pohyby na rotační vzduchové dráze. Bohužel ani tam nebyly záběry ideální, či plně průkazné. Na výsledky práce se lze podívat na přiloženém CD. Videá nejsou záměrně komprimována, aby bylo patrné, že chyby obrazu nevznikly špatně zvolenou, či příliš ztrátovou komprimací.

## 5 Závěr

Prvním a hlavním cílem této diplomové práce bylo sestavení sady pokusů, která by se dala demonstrovat na vzduchové dráze.

Během práce na této části jsem vypracoval sadu patnácti úloh. Tyto úlohy jsou voleny jako demonstrace a seznámení se vzduchovou dráhou.

V první úloze je přehled všech komponent v měřeních použitých. S vytvořením tohoto přehledu je spojena i vytvoření uceleného názvosloví pro jednotlivé části z důvodu, že předchozí návody byly pouze v anglickém případně německém jazyku. Dále je zde uceleně popsána funkce používaného čítače, ke kterému takto rozsáhlý popis chyběl, a bylo tedy nutno se plně seznámit s jeho funkcemi. Uvedeno je zde také několik obecných upozornění, kterými by se měla osoba manipulující se vzduchovou dráhou držet, aby nedošlo k poškození dráhy.

U úloh věnujících se měření jsem uvedl stručný popis úlohy a postup při měření včetně schémat nutných k zapojení měřících čidel. Na schématech jsou uvedeny pouze potřebné informace na rozdíl od návodů poskytnutých výrobcem, ve kterých jsou ve většině duální propojení, případně je použito zapojení, které umožňuje měření více parametrů naráz, ale není vhodné pro základní demonstraci. Příkladem je úloha z kapitoly 2.2, kde je přímo použito zapojení pro změření doby dráhy a průchodu křídélka. Toto nepovažuji za příliš vhodné, a tudíž jsem uvedl zjednodušenou variantu, která studenta provede problematikou postupně a tím lépe ojasní danou problematiku měření.

Sada úloh také nebyla tvořena jako překlad doporučených úloh výrobcem, ale postupným objevováním možností vzduchové dráhy a jejich použitelnost při demonstraci jednotlivých fyzikálních jevů pro účely výuky.

Součástí každé úlohy je také její proměření z důvodu časového odhadu a případné možnosti kontrol naměřených výsledků. Zde bylo měření provedeno důkladněji, než bude požadováno během výuky budoucích učitelů v kurzech Praktikum školních pokusů a Výběrového praktika. Zde jsem hlavně volil co možná nejvíce názorný postup, na rozdíl od obdobného řešení v návodu přiloženého výrobcem. Příkladem může být snaha volby co nejjednodušších vztažných soustav, tak aby nebylo nutno kompenzovat například nenulovou počáteční dráhu apod. Z proměření je také jasné jakou shodu měření a teorie lze očekávat.

Druhým cílem bylo prověření možnosti natočení video praktika pokusů. Během práce na části této úlohy jsem se snažil vyřešit problematiku natáčení experimentů se vzduchovou dráhou. Při řešení jsem kontaktoval i několik odborníků v oblasti foto-video a konzultoval s nimi tuto problematiku. Dospěl jsem však k poznatku, že stávajícími prostředky nebylo možno průkazně úlohy nafilmovat. Záznam několika ukázek problematiky je přiložen na CD.

V třetí části jsem zhodnotil soupravu vzduchové dráhy ze subjektivního pohledu vzhledem k použití na různých stupních škol.

## 6 Použitá literatura

- [1] Svoboda M. a kol.: Praktikum školních pokusů I. UK, Praha, 2001.
- [2] Sears F. W., Zemansky M. W., Young H. D.: University Physics. Addison-Wesley Publishing Company, London 1977.
- [3] Návodů k pokusům se vzduchovou dráhou vydané firmami, které tuto pomůcku vyrábí (Phywe, Leybold.)
- [4] Halliday D., Resnick R., Walker J. Fyzika, část I Mechanika, VUTIUM , Brno, 200