

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky

Josef Zahradníček

Stroboskopická metoda ve fyzikální praxi. [I.]

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 50 (1921), No. 1, 68--76

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/122275>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1921

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Kdybychom chtěli stereosk. průměty objektu ve skutečnosti lišily by se příslušné sdružené průměty tak málo, že v grafickém provedení by byly skoro stejné. Tak při vzdálenosti 30 m nejbližšího bodu objektu je paralaxa $p = \frac{65 \cdot 250}{30 \cdot 000} = \frac{1}{2} mm$, tedy nepatrná. Konstrukce takých persp. stereosk. průmětů nebyla by nikterak obtížná, sestrogen-li jeden persp. průmět.

Stroboskopická metoda ve fyzikální praxi.

Dr. Josef Zahradníček.

Časový průběh některých pohybů fyzikálních bývá tak rychlý, že jednotlivé podrobnosti oněch pohybů pro nás mizí a tím přímé pozorování a měření je znesnadněno nebo dokonce znemožněno. Proto sdružujeme pohyby takové s jinými pohyby rychlými, ale známými, a z výsledku, jakož i z jedné složky známé, soudíme na složku druhou. Na př. volný pád na malé dráze studujeme pomocí ladičky, nebo pružného péra známého kmitočtu,*) nebo skládáme jej s rovnoměrným pohybem otáčivého válce — padostroj dle Morina. Pohyby kmitajícího tělesa (pružné péro, ladička, citlivý plamen) rozvinujeme do roviny a dle grafu soudíme na pohyb. Na tom spočívají pokusy s otáčivým zrcadlem Wheatstonovým, obrazce Lissajousovy a metoda grafická vůbec. Zvláště zajímavou a pro studium rychlých pohybů důležitou je tak zvaná metoda stroboskopická, která ve fyzikální praxi koná platné služby jak po stránce kvalitativního pozorování, tak i měření.

Metoda tato, pocházející od Plateaua (1836) a nezávisle na něm od Dopplera (1845), zdokonalená Töplerem (1866), Arnoštem Machem (1870), Mir. Neumannem (1870) a Boltzmannem (1870), spočívá ve stejnoměrně přerušovaném osvětlení tělesa rychle se pohybujícího, tak že těleso pozorujeme jen v určitých, zcela krátkých okamžicích.***) Poněvadž zrakový vněm nezaniká

*) Na této myšlence sestavili padostroje L. bord, Lippich, Babo, T. Muller, Rabs, Edelmann, Kottenbach a j.

***) Historický vývoj metody stroboskopické podává podrobně A. Mach ve svém spise: »Optisch-akustische Versuche«, str. 69 a násl., Praha 1873, uváděje tam i klassické pojednání Plateauovo a Dopplerovo. Methodou strobo-

s podrážděním sítnice současně, nýbrž průměrně asi o $\frac{1}{3}$ sekundy (0.35) déle trvá, vyznívá, máme v oku obrazy pohybujícího se tělesa v několika fásích současně, položené ve směru dráhy jeho. Obrazy tyto — žhavý uhel v pohybu, létavice, padající kapka, kmitající péro — tvoří při spojitém osvětlení spojitou čáru. V osvětlení přerušovaném vidíme jen několik bodů z oné čáry; z počtu a polohy oněch bodů, z periody stroboskopického osvětlení můžeme souditi na tvar a pohyb tělesa, na jeho rychlost, po případě periodu.*)

Jako světelného zdroje užívá se při stroboskopickém osvětlení světla slunečního nebo obloukového, světla elektrické jiskry, Geisslerových trubíc nebo kmitajících plamének. Periodické osvětlení a zastínění pohybujícího se tělesa bývá způsobeno v prvých dvou případech tak zvanou stroboskopickou deskou nebo ladičkou; elektrická jiskra, výboje Geisslerových trubíc (Pulujova lampa a pod.), světlo kmitajících plamének jsou již povahou svou osvětlením přerušovaným, jehož perioda závisí na rychlosti otáčení a síle elektriky atd., na přerušovači, po případě na tónu, jímž plamének byl v pohyb uveden.

Nejjednodušší cestou možno si zjednati osvětlení stroboskopické deskami stroboskopickými. Jsou to desky kruhové zhotovené z lepenky a opatřené soustřednou řadou stejných a stejně od sebe vzdálených otvorů. Deska otáčí se ve své rovině dle osy středem jdoucí rovnoběžně, otvory propouští se ve stejných intervalech časových světlo, plnou deskou pak se zadržuje. Při subjektivním pozorování klademe desku na svisle postavený stroj odstředivý, nebo vhodný motor s osou vodorovnou a majíce oko

skopickou se zabývají na př. spisy: E. Grimsehl, Lehrbuch der Physik, 3. vyd. I. díl, str. 590 a 591, Lipsko 1914. — Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik, 10. vyd. str. 235, Lipsko 1905. — Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, 10. vyd. I. díl, str. 666 a 723 a násl., Brunšvik 1906. — M. Neumann, Galvanická ladička a její důležitost v akustice, Druhá Zpráva Jednoty českých math. str. 21—23, Praha 1870. — Rosenberg, Experimentierbuch für den Unterricht in der Naturlehre, 2. vyd. II. díl, str. 188—191, Vídeň 1910. — M. Volkmann, Anleitung zu den wichtigsten physik. Schulversuchen, str. 145, Berlin 1912.

*) V kin matografu užívá se osvětlení přerušovaného s periodou asi $\frac{1}{30}$ sekundy. Obrazy — 30 v jedné sekundě — promítají se na totéž místo stěny a sítnice; máme dojem osvětlení spojitého.

u desky, pozorujeme těleso na druhé straně desky se pohybující a dobře osvětlené. V případě objektivního pozorování klade se deska na vodorovnou osu motoru do světelného kužele světla slunečního — heliostat —, nebo umělého — skioptikon —. V zatemněné místnosti dostaneme pak při otáčení stroboskopické desky pravidelně přerušované osvětlení, v němž možno pozorovati pohybující se těleso buď přímo, nebo jeho stín, nebo obraz. Pro vyučování školní má význam metoda objektivního pozorování, při praktických cvičeních žákovských možno postupovati cestou první.

Popíši nyní naše uspořádání pokusů, jež se v rozmanitých případech dobře osvědčilo. Pro pozorování subjektivní zhotoveny desky z tenké lepenky o poloměru 22 *cm* s počtem otvorů 1, 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20; délka otvorů pravidelně rozložených jest 10 *cm*, vzdálenost jich od vnějšího okraje desky je 2 *cm*. Šířka otvoru je tak volena, aby poměr její ku šířce plochy mezi dvěma sousedními otvory byl přibližně 1 : 8.*) Pro pozorování objektivní jsou rozměry desek menší: poloměr je 13 *cm*, délka otvorů 8·5 *cm* — průměr kondensoru u projekčního přístroje —, vzdálenost otvorů od vnějšího okraje 1·5 *cm*. Deska stroboskopická jest upevněna na vodorovné ose těsně před kondensorem tak, aby otvory přeběhly postupně podél celé polní čočky.***) Deska uvádí se v pohyb pomocí otáčivého kola postaveného na stole projekčního stroje. Otáčení kola, jakož i v případě subjektivního pozorování otáčení kola odstředivky děje se dle taktu Mälzelova metronomu a odtud se počítá perioda osvětlení. Otočí-li se na př. velké kolo za minutu *s*-krát — (čítáno dle metronomu nebo hodinek) —, vymění se otvory stroboskopické desky (*m*-otvorů na desce) v jedné sekundě *r*-krát; otočí-li se kolo v jedné minutě *p*-krát, vymění se otvory téže desky v jedné sekundě

$$\frac{r}{s} p\text{-krát.}$$

*) Jsou-li otvory poměrně širší, jsou zjevy sice světlejší, ale vlivem vyznívání vněmu rozmazané.

**) Tomuto upevnění stroboskopické desky dal jsem přednost před způsobem, jež uvádí M. Volkm nn v citovaném spise, kde deska stroboskopická jest postavena tam, kde paprsky, prošeďše kondensorem, se spojují; světlo prochází malým kruhovými otvory, nebo se zadržuje deskou.

Pro jinou desku s počtem otvorů q jest počet stroboskopických osvětlení v jedné sekundě

$$n = \frac{r p q}{s m}.$$

Pro odstředivý stroj nebo jiné podstatné nařízení jest hodnota $\frac{r}{s m}$ veličinou stálou, kterou předběžným pokusem určíme.

Jiného přerušovače světla, velice přesně pracujícího, použil ke studiu rychlých pohybů Arnošt Mach. Rameno elektromagnetické ladičky Helmholtzovy opatřil plíškem se skulinou, kterou se světlo při kmitání ladičky propouštělo, nebo plíškem zadržovalo. *) Pro účely střední školy zdá se mi však býti výhodnější deska stroboskopická, jednak pro svou jednoduchost a láci, jednak z toho důležitého důvodu, že periodu osvětlení možno u stroboskopické desky v širokých mezích měniti — od $\frac{1}{10}$ do $\frac{1}{1000}$ sekundy —. Jak již svrchu řečeno, závisí počet přerušení a tím i perioda stroboskopického osvětlení na počtu otvorů desky a na její rychlosti. Naproti tomu jest perioda osvětlení u stroboskopické ladičky stálá a rovná se kmitové době ladičky nebo její polovině dle polohy štěrbin. Stroboskopickými deskami můžeme pozorovati pohyby různých rychlostí ve fásích co nej-různějších.

V následujících řádcích uvedeme pokusy, jež snadno dají se provéstí methodou stroboskopickou jak subjektivní tak objektivní. Jsou to většinou pokusy uvedené v pojednáních svrchu jmenovaných autorů; co z vlastní zkušenosti přidáno, ponechávám posouditi laskavému čtenáři.

Pohybujeme-li rukou s roztaženými prsty rychle sem a tam ve světelném poli stroboskopického osvětlení, vidíme více prstů než pět. Podobný pokus můžeme provéstí s bílou nebo lesklou tyčinkou.

Poletuje-li v zorném poli moucha, noční motýl, pozorujeme pěkně různé, vzájemně oddělené polohy křídel. Přístroj s deskou stroboskopickou možno umístiti na okno a pozorovati let vlaštovek atd.

*) Myšlenky Machovy po stránce experimentální uváděl v život a v nich se zdarem pokračoval jeho assistent Miroslav Neumann, předčasně zemřelý nadějný fysik český (1848—1873).

Padá-li v poli stroboskopického osvětlení kousek křídý nebo lesklá kulička — Mach užíval kuličky z teploměru —, pozorujeme ji v několika polohách a to ve vzdálenostech, jež se mají k sobě v poměru čísel 1 : 3 : 5 . . . Zajímavým je tento pokus s padající kapkou vodní. Zvláště pěkně jeví se šňůra lesklých perel, lijeme-li zvolna vodu fluoresceinem zbarvenou ve světelném poli proti tmavému pozadí. Perly kapek druží se k sobě ve vzdálenostech svrchu uvedených.*) Zajímavo jest též pozorovati stroboskopicky pohyb kapek dešťových.

Předešlý pokus může sloužiti k měření zemského urychlení g . Je-li perioda osvětlení $\frac{1}{n}$ sekundy — za tu dobu se zorné pole jedenkrát osvětlí a zatmí —, je-li viděti kapku na dráze s v N -polohách, počáteční polohu klidu v to čítajíc, pak děje se pád po dobu

$$t = \frac{N-1}{n} \text{ sekund.} \quad \text{Z rovnice} \quad s = \frac{g t^2}{2}$$

plyne pak hodnota pro g . Při měření padá kapka nebo lesklá kulička nad experimentálním stolem proti tmavému stínítku, probíhající dráhu několika decimetrů. Počet poloh N , v nichž kapka se nám jeví, musí býti určen z několika pokusů; oko si musí totiž na stroboskopické osvětlení různých period zvykatí. Při podrobnějším pozorování padající kapky shledáme, že osciluje kolem rovnovážných poloh.

Při stroboskopickém osvětlení dá se pěkně studovati rovnoměrný pohyb kruhový a pohyb harmonický. Upevníme na přístroj odstředivý uprostřed dřevěné pravítka o rozměrech $45 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$, nesoucí na koncích příšroubovány dva porcelánové knoflíky — izolátory — poloměru 1.2 cm a výšky 2.5 cm . Otáčíme-li rovnoměrně odstředívkou, jež postavena je tak, aby rovina kola byla ke směru rovného paprsku kolmo, objeví se nám při spojitěm osvětlení bílý kruh. V osvětlení periodickém pozorujeme bílý knoflík jen v několika bodech na obvodu kruhu stejně od sebe vzdálených — rovnoměrný pohyb

*) Všech těchto a následujících pokusů můžeme také použiti k rozhodnutí otázky, je-li osvětlení přerušované nebo spojitě a je-li přerušování spojitě.

kruhový. Otočíme-li odstředivý stroj dle osy svislé o 90° , tak že zorný paprsek spadá do roviny kola, pozorujeme vlastně pravouhlý průmět předešlého pohybu — pohyb harmonický. V periodickém osvětlení objeví se nám koule opět v několika polohách na dráze přímé, rovné průměru předešlého kruhu a ve vzdálenostech nestejných. V poloze středové jsou vzdálenosti největší — největší rychlost, jež ke krajům klesá na hodnotu nulovou; na koncích průměru jsou obrazy jasnější.

Tento pokus usnadní žákům pochopení tohoto nerovnoměrného pohybu a grafické znázornění i mathematické vyjádření jeho stane se jim samozřejmým. Pokusem možno předvésti i případ složitější, kdy paprsek zorný svírá s rovinou kola úhel $0^\circ < \varphi < 90^\circ$; v tomto případě pozorujeme nerovnoměrný pohyb v ellipse, jejíž velká poloosa rovná se poloměru původního kruhu r , malá pak jest $r \sin \varphi$.

Methoda stroboskopická hodí se hlavně k pozorování rychlých pohybů periodických, ať už je to pohyb kyvadlový — $l < 25 \text{ cm}$ —, nebo kmitavý pohyb pružného péra, upevněného ve svěráku a zakončeného bílou nebo lesklou kuličkou,*) nebo pohyb ladičky nejvhodněji elektromagnetické, pohyb pružné spirály podélně kmitající, příčný pohyb vlnivý vlákna upevněného jedním koncem na kotvě Wagnerova kladívka nebo na rameni ladičky, pohyb struny, blany, vznik Chladniho obrazců, pohyb citlivých plamének, vlnivý pohyb vzduchu — kouře v píšťalách, vlnivý pohyb na hladině vody nebo rtuti. Již povrchní pozorování stroboskopické všech těchto pohybů ukazuje, že jsou nerovnoměrné.

Podáme nyní pro zjevy stroboskopické jednoduché úvahy mathematické. Vztahy ony dají se snadno pochopiti a odvoditi z rovnoměrného pohybu kruhového a odtud dají se přenést na pohyb harmonický, kyvadlový a kmitavý. (Srovnej postup v cit. spisu Machově str. 64 a násl.)

Budíž perioda pohybu tělesa $\tau = \frac{1}{N}$; N -krát v jedné sekundě vykoná těleso jistý pohyb a proběhne všemi fázemi

*) Pružné péro může být udržováno v pohybu elektromagneticky — prodloužená kotva Wagnerova kladívka.

jeho. Je-li perioda stroboskopického osvětlení τ — zorné pole se v jedné sekundě N -krát osvětlí a N -krát zatmí, pak pozorujeme pohybující se těleso stále v téže fási a zdá se nám tudíž, že těleso jest v klidu.

Je-li počet osvětlení o jedno menší $N - 1$, pak pozorujeme pohybující se těleso v každém z jeho jednotlivých pohybů ve fási jiné časově o

$$\vartheta = \frac{1}{N-1} - \frac{1}{N} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N-1}$$

posunutě*) a v jedné sekundě postupně v $N - 1$ fásích, jež se v oku skládají v pohyb jediný. Místo skutečných N -pohybů v jedné sekundě pozorujeme v tomto případě stroboskopického osvětlení pohyb jediný, který jest proti skutečnému pohybu N -krát pomalejším a při tom zdánlivě spojitým. A v tom právě spočívá podstatná výhoda stroboskopické metody, že rychlost pohybu je zdánlivě snížena.

Je-li počet osvětlení v jedné sekundě $N + 1$, nastává případ obdobný, jenže fáse druží se k sobě směrem opačným. (Kola vozu v kinematografu otáčející se někdy obráceně, kotouče električky pracující v zatemněné místnosti a osvětlené výboji jiskrovými, deska Samojlovova, o níž bude zmínka na konci práce, otáčejí se někdy zdánlivě směrem opačným.)

Je-li perioda pohybu $\frac{1}{N}$, perioda osvětlení $\frac{1}{n}$, při čemž platí $N - \nu = n$, pak pozorujeme pohyb ve fásích s časovým rozdílem

$$\vartheta = \frac{1}{n} - \frac{1}{N} = \frac{\nu}{nN}.$$

V jedné sekundě pozorujeme těleso postupně v n -fásích a úhrnný rozdíl fásový jest

$$n \vartheta = \frac{\nu}{N}.$$

Těchto n -fásí skládá se v jediný pohyb stroboskopický, je-li $n\vartheta = \frac{1}{N}$, což vede k podmínce svrchní $\nu = 1$. Nebo může

*) Grimschl má ve svém spisu shora uvedeném o tomto případě mylné tvrzení.

nastati stroboskopický klid, je-li fázový rozdíl ϑ roven celistvému násobku period pohybuujícího se tělesa $\vartheta = k \frac{1}{N}$.

Odtud vyplývá podmínka

$$\frac{v}{n} = k, \quad \text{čili} \quad \frac{N}{n} = k + 1;$$

za jednu periodu osvětlení vykoná těleso $k + 1$ periodických pohybů

$$\frac{1}{N} = (k + 1) \frac{1}{N},$$

pozorujeme tedy těleso stále v téže fázi. V případech pro $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ plynou pro poměr kmitočtů hodnoty $\frac{N}{n} = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

Vedle těchto dvou případů, kdy místo $N > n$ pohybů v jedné sekundě pozorujeme buď jen jediný pohyb stroboskopický anebo klid, nastávají patrně případy, kdy pozorujeme několik stroboskopických pohybů. Je-li jeden stroboskopický pohyb ukončen během l -period osvětlení, platí

$$l\vartheta = k \frac{1}{N}, \quad \text{čili} \quad \frac{v}{n} = \frac{k}{l},$$

kde $l < n$ a $k < v$ jsou čísla celá a nesoudělná. Na jednu sekundu případně pak

$$\frac{n}{l} = \frac{v}{k},$$

stroboskopických pohybů,*) jež se dějí proti skutečným N pohybům v poměru $q = N : \frac{v}{k}$ -krát pomaleji.**)

Je-li perioda osvětlení kratší než perioda pohybu $n > N$, nastávají případy poněkud odchylné od předešlých. Rozdíl fázový je v tom případě

$$\vartheta = \frac{1}{N} - \frac{1}{n} = \frac{n - N}{nN}.$$

*) V jedné sekundě možno sledovati pohodlně až pět stroboskopických pohybů, doba jednoho musí být kratší než doba trvání zrakového vněmu.

**) Je-li $l = n$, $k = v$ — kmitočty N a n jsou čísla nesoudělná —, pak může být počet stroboskopických pohybů buď $v < n$ $v = N - n$, pohyby však mají amplitudu nestejnou, fáze stále ji é a jiné, anebo může být pohyb jen jeden, zvláště je-li $v > n$.

Hledejme podmínku pro trvalý stroboskopický klid

$$\vartheta = k \frac{1}{N}; \quad \text{pak jest} \quad \frac{n}{N} = \frac{1}{1-k},$$

kde k je číslo celé a, jak z povahy případu plyne, menší než 1. Pro $k = 0, -1, -2, -3, -4 \dots$ dostáváme známé už hodnoty $\frac{n}{N} = 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5} \dots$

Jediný pohyb stroboskopický nastává patrně v případě, kdy jest $n\vartheta = \frac{1}{N}$; odtud plyne rovněž známý případ $n = N + 1$.

Má-li býti pozorováno několik pohybů stroboskopických, musí platiti

$$l\vartheta = k \frac{1}{N}, \quad \text{čili} \quad l = \frac{kn}{n-N}.$$

Místo N -pohybů v jedné sekundě pozorujeme

$$\frac{n}{l} = \frac{n-N}{k}$$

pohybů stroboskopických. Aníž bychom se dále zabývali tímto obecným případem, uvažme, co nastává v případě $n = kN$, kde k je číslo celé. Během jednoho pohybu vykonaného v čase $\frac{1}{N} = k \frac{1}{n}$ spatřujeme těleso v k -fásích, z nichž při pohybu kyvadlovém a kmitavém vidíme třeba jen polovinu. Vzdálenosti sousedních obrazů stroboskopických jsou stejnodobé a vykonány v čase $\tau = \frac{1}{n}$. Znajíce dobu τ — dovedeme ji určití dle dříve uvedeného — a znajíce počet stroboskopických obrazů $k + 1$, vypočteme snadno veličinu N .

(Dokončení.)