

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum  
Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica

---

Vladislav Kolesnikov; Jiří Záhejský  
Teorie stroboskopického jevu a jeho užití

*Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica*, Vol.  
6 (1965), No. 1, 147--(169)

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/119836>

**Terms of use:**

© Palacký University Olomouc, Faculty of Science, 1965

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>

*Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky přírodovědecké fakulty.  
Vedoucí katedry: Prof. paed. dr. Josef Fuka.*

## TEORIE STROBOSKOPICKÉHO JEVU A JEHO UŽITÍ

VLADISLAV KOLESNIKOV a JIŘÍ ZÁHEJSKÝ

*(Předloženo dne 24. června 1964)*

### Úvod

Dnešní velký rozvoj techniky se vyznačuje mimo jiné vznikem zcela nových strojů a přístrojů. Tento rozvoj techniky vyžaduje nové přesné měřicí a zkušební metody. Rychle běžící stroje se složitými pohyby vyžadují bezdotykové měření rotujících součástí a vyskytuje se i požadavek na pozorování jednotlivých dílů strojů při provozních rychlostech. Poněvadž lidské oko nemůže postřehnout jednotlivé změny fází kmitajících nebo rotujících těles (pozorovatel vidí jako celek celou oblast ohraničenou krajními polohami kmitajícího tělesa, u rotujícího tělesa pak jednotlivé polohy splývají), je vizuální pozorování velmi obtížné. Osvětlujeme-li rotující nebo kmitající těleso tak, aby časový vjem mezi jednotlivými záblesky nestačil zaniknout, pak lidské oko nevnímá skutečný pohyb tělesa, ale pohyb, který je vytvářen jednotlivými periodicky osvětlenými polohami tělesa. Pozorovatel pak vnímá stojící těleso nebo jeho zpomalený pohyb. Tento úkol řeší stroboskopie.

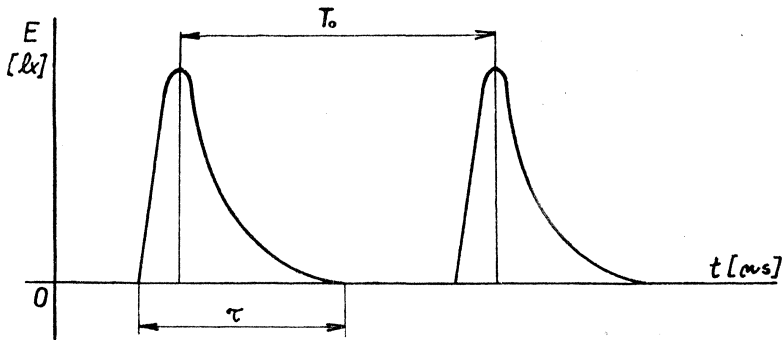
Stroboskopická metoda je však málo známá a nedocenená. Nemáme dosud v naší literatuře souborné větší dílo, které by pojednávalo o moderních stroboskopech a také o teorii zábleskového osvětlování. Stroboskopických metod se u nás používá jen v některých závodech jako např. v MEZ Mohelnice při vyvažování elektromotorů, v TESLE Litovel při kontrole otáček gramofonových motorků, v optických závodech při kontrole sthovacích mechanismů snímacích a promítacích kinopřístrojů a při určování frekvenčních charakteristik regulátorů otáček, ve filmové technice, v Motorpalu Jihlava při kontrole činnosti vstřikovacích čerpadel spalovacích motorů, v některých autoopravnách apod.

V této práci chceme uvést aspoň částečně teorii zábleskového osvětlování, dále některé dosud vyráběné přístroje a poukázat na jejich užití.

Vzhledem k tomu, že se u nás stroboskopy nevyrábějí, uvádíme popis, konstrukci a funkci jednoduchého stroboskopu určeného především pro školní účely.

## I. Teorie zábleskového osvětlování

Pro studium zábleskového osvětlování je nutné zavést některé nové pojmy. Objasníme nejdříve pojem impulsového obrazu a jeho vlastnosti. Je možné jej definovat takto: Impulsový obraz je obraz trvající velmi krátkou dobu, kterou nazýváme *dobou trvání obrazu*  $\tau$ . Předpokládejme, že mimo dobu trvání obrazu  $\tau$  je osvětlení  $E$  rovno nule, nebo má zanedbatelnou hodnotu vzhledem k osvětlení v době  $\tau$ . Opakují-li se impulsové obrazy ve stejných časových intervalech, pak tento interval nazveme *periodou opakování obrazu*  $T_0$  a jeho převrácenou hodnotu  $\frac{1}{T_0}$  *frekvencí opakování obrazu*  $f_0$  (obr. 1).



Obr. 1.

Abychom obdrželi impulsový obraz nějakého tělesa, je nutné jej osvětlit světlem o impulsovém průběhu. Existují dva způsoby získání impulsového světla.

a) Světelné impulsy vytváříme přímo ve zdroji, kterým osvětlujeme zkoumaný předmět. Na tomto principu jsou založeny moderní elektronické stroboskopy.

b) Světelné záblesky vytváříme impulsovým modulováním stálého světelného toku vysílaného ze zdroje před nebo po jeho odrazu od zkoumaného předmětu. Modulujícím prvkem bývá obvykle clona, která propouští světlo jen po krátkou dobu. Na tomto principu jsou založeny, nyní již málo používané, mechanické stroboskopy.

Zavedeme-li dále pojem *účinné doby trvání obrazu*  $\tau_u$ , a to z toho důvodu, že osvětlení  $E$  každého bodu obrazu není stejné po dobu  $\tau$ , dále pojem *maximálního osvětlení*  $E_{\max}$ , pak účinná doba trvání obrazu  $\tau_u$  je doba ve které osvětlení představuje polovinu maximální hodnoty  $E_{\max}$  (obr. 2). *Účinné maximální osvětlení*  $E_u$  je rovno osvitě  $e$  ve skutečné době  $\tau$ , dělenému účinnou dobou trvání obrazu  $\tau_u$ . Poněvadž

$$e = \int_0^{\tau} E dt,$$

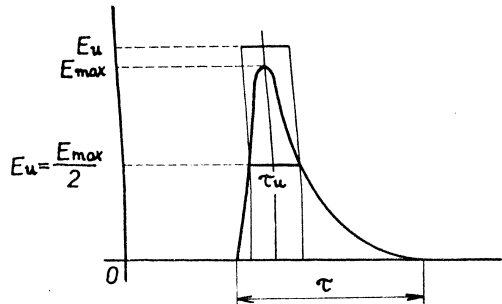
dostaneme pro  $E_u$

$$E_u = \frac{e}{\tau_u} = \frac{1}{\tau_u} \int_0^{\tau} E dt.$$

Z toho vyplývá, že graf skutečného průběhu impulsového obrazu můžeme nahradit grafem ve tvaru obdélníka o základně  $\tau_u$  a výšce  $E_u$ . Plocha tohoto obdélníka je stejná jako plocha omezená grafem skutečného průběhu osvětlení a osou úseček a rovná se osvitu  $e$ .

*Středním osvětlením obrazu  $E_{stř}$*  nazýváme hodnotu osvětlení, kterou obdržíme integrováním v mezích periody opakování obrazu  $T_0$ , tj. osvit jednoho obrazu dělený dobou  $T_0$ .

$$E_{stř} = \frac{e}{T_0} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} E dt.$$



Obr. 2.

## II. Stroboskopický jev

Stroboskopu se s výhodou používá ke zkoumání periodického pohybu. Je to takový pohyb, při kterém každý bod pohybujícího tělesa má vždy po stejných časových intervalech (periodách pohybu  $T_r$ ) stejné souřadnice polohy. Nejprve budeme studovat nejběžnější a v praxi nejobvyklejší periodický pohyb, rovnoměrný pohyb kruhový. Při tomto pohybu je poloha každého bodu periodickou funkcí času s periodou  $T_r$ . Pro grafické vyšetřování stroboskopických jevů je výhodné vyjádřit fázi pohybu jako periodickou funkci času  $\varphi$ , kde

$$2\pi > \varphi \geq 0. \quad (1)$$

Při kruhovém pohybu s periodou  $T_r$  a frekvencí  $f_r = \frac{1}{T_r}$  a úhlovou rychlostí  $\omega_r = 2\pi f_r$  je fáze pohybu  $\varphi$  dána vztahem

$$\varphi = \omega_r(t - kT_r) \quad \text{kde} \quad kT_r \leq t < (k+1)T_r, \quad (2)$$

a  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$

Rovnoměrný pohyb kruhový má tu vlastnost, že pohybující se těleso prochází libovolně zvolenou polohou jen jednou v průběhu jedné periody. Proto je tento druh pohybu nejvýhodnější pro stroboskopická pozorování.

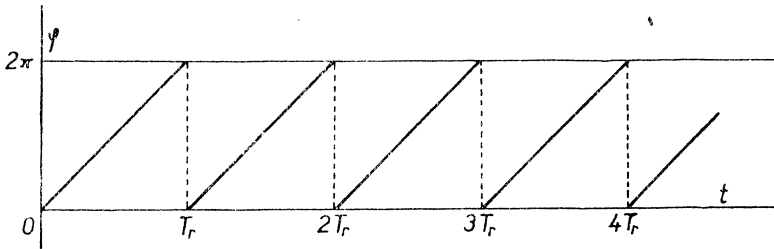
Grafické znázornění závislosti fáze pohybu na čase  $t$  představuje čára ve tvaru zubů pily (obr. 3). Plně vytažené úsečky mají sklon  $\omega = \frac{2\pi}{T_r}$  a kolmé čárkované úsečky grafu představují spojitě přechody fáze z hodnoty  $2\pi$  na hodnotu 0 a leží ve stejných vzdálenostech odpovídajících  $T_r$ . Celý graf

vlastně představuje graf fáze skutečného kruhového rovnoměrného pohybu o frekvenci  $f_r$ .

Derivujeme-li vztah (2) podle času dostaneme

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega_r = \frac{2\pi}{T_r}. \quad (3)$$

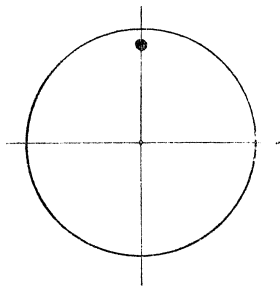
Tento vztah určuje rychlost vzrůstu fáze, která má v případě uvažovaného rovnoměrného kruhového pohybu, stálou hodnotu.



Obr. 3.

Pojem fáze pohybu dovoluje odvodit pravidla stroboskopie, která budeme dále aplikovat i na jiné periodické pohyby.

Přejdeme nyní k vyšetřování zdánlivého stroboskopického pohybu. Pro jednoduchost budeme uvažovat rovnoměrně rotující kotouč s vyznačeným



Obr. 4.

bodem na jeho obvodu (obr. 4). Osvětlujeme-li takové těleso stálým světlem, pak dostaneme úplně nejasný obraz a nerozlišíme žádné podrobnosti pohybu. Pouze impulsový obraz periodicky rotujícího tělesa může být zřetelný a má značnou informační hodnotu. Abychom obdrželi impulsový obraz, musíme zkoumaný předmět osvětlovat stroboskopem, který dává světelné záblesky s měnitelnou frekvencí.

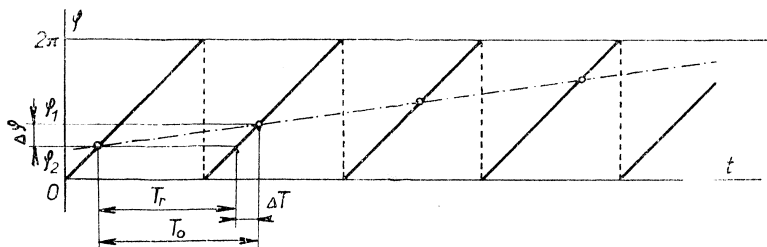
V obecném případě, kdy pro kmitočet  $f$ , skutečného pohybu tělesa a kmitočet  $f_0$  jednotlivých osvětlených poloh (obrazů), neplatí žádné matematické vztahy, pak po sobě jdoucí obrazy představují různé fáze pohybu a tedy i různé polohy. Při malých kmitočtech obrazu máme dojem rychlého střídání obrazů v různých polohách — při dostatečně velkých kmi-

točtech se jednotlivé obrazy zdánlivě překrývají a tvoří nečitelnou měnící se mozaiku bez informační hodnoty.

Jestliže se však impulsové obrazy objevují stále ve stejné fázi periodického pohybu, pak jsou identické a těleso se jeví zdánlivě v klidu. Tento jev nastává jen při určitém poměru frekvence impulsového obrazu a frekvence pohybu. Jsou-li po sobě jdoucí impulsové obrazy pokaždé poněkud v jiné fázi pohybu, pak se pozorovaný předmět jeví zdánlivě ve zpomaleném pohybu, buď ve směru, nebo proti směru skutečného pohybu. Zdánlivý stroboskopický pohyb

se vyskytuje jako plynulý tehdy, když kmitočet impulsových obrazů je dostatečně velký. V dalších úvahách je naznačena kinematika zdánlivého pohybu.

Uvažujme bod na tělese (obr. 4), které se pohybuje rovnoměrně s periodou  $T_r$ , kmitočtem  $f_r$  a úhlovou rychlostí  $\omega_r = 2\pi f_r$ . Předpokládejme dále, že pohyb je určen fází  $\varphi$  podle vztahu (2). Pohyb bodu pozorujeme stroboskopicky, čímž dostaneme impulsové obrazy uvažovaného bodu. Obraz má periodu  $T_0$  a kmitočet  $f_0 = \frac{1}{T_0}$ . Předpokládejme ještě, že obraz trvá nekonečně krátkou dobu, přičemž osvětlení má konečnou hodnotu, která umožňuje zrakový vjem.



Obr. 5.

Úvodem ukážeme některé zvláštní případy zdánlivého pohybu. Vyšetříme nejdříve případ, kdy se frekvence  $f_0$  obrazu a frekvence skutečného pohybu  $f$  nepatrně liší (obr. 5). Rozdíl mezi periodou obrazu a pohybu  $\Delta T$  je

$$\Delta T = T_0 - T_r \quad (4)$$

přičemž  $|\Delta T| \ll T_r$  a  $|\Delta T| \ll T_0$  a je konstantní, poněvadž  $T_0$  i  $T_r$  se s časem nemění. Uvažujeme-li dva po sobě jdoucí obrazy, přičemž první ukazuje bod ve fázi  $\varphi_1$ , druhý ve fázi  $\varphi_2$ , pak rozdíl fází těchto obrazů  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  může být považován za přírůstek fáze za dobu  $\Delta T$  skutečného pohybu. Ze vztahů (4) a (3) plyne pro přírůstek fáze

$$\Delta\varphi = \frac{d\varphi}{dt} \Delta T = 2\pi \frac{T_0 - T_r}{T_r}, \quad (5)$$

ktejří je stejný pro libovolnou dvojici po sobě následujících obrazů.

Pozorovateli se jeví  $\Delta\varphi$  jako přírůstek fáze zdánlivého pohybu za dobu rovnou periodě obrazu  $T_0$ . Vznikne tak subjektivní dojem, že pozorovaný bod je ve zdánlivém pohybu s frekvencí zdánlivého pohybu  $f_p$ . Úhlová rychlost tohoto zdánlivého pohybu je

$$\omega_p = \frac{\Delta\varphi}{T_0} = 2\pi f_p \quad (6)$$

Užitím vztahu (5) vypočteme kmitočet zdánlivého pohybu  $f_p$ .

$$f_p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi T_0} = \frac{T_0 - T_r}{T_0 T_r} = \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_0} = f_r - f_0 \quad (7)$$

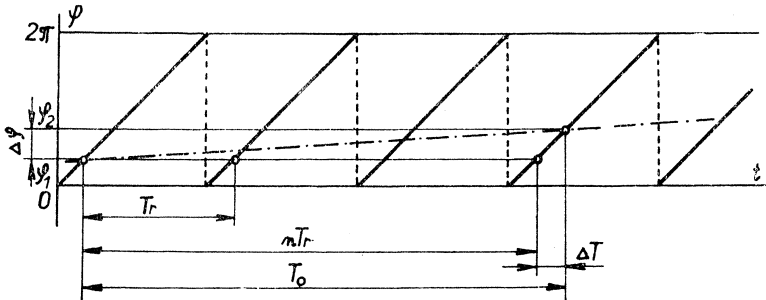
Znaménko  $f_p$  určuje směr zdánlivého pohybu. Je-li  $f_r > f_0$ , pak  $f_p > 0$  a  $\Delta\varphi > 0$ , tj. fáze se s časem zvětšuje, což má za následek, že zdánlivý pohyb má souhlasný směr se skutečným pohybem. Je-li  $f_r < f_0$ , pak  $f_p < 0$  a  $\Delta\varphi < 0$ , tj. fáze se s časem zmenšuje a zdánlivý pohyb je opačný vzhledem ke skutečnému pohybu. Je-li  $f_r = f_0$ , pak  $f_p = 0$  a těleso se jeví zdánlivě v klidu.

Má-li vzniknout subjektivní dojem zdánlivého pohybu, je nutné, aby frekvence  $f_0$  byla větší než mezní frekvence  $f_m$  při níž pozorovatel začíná vnímat jednotlivé obrazy izolovaně, tj. musí být splněna podmínka

$$f_0 > f_m. \quad (8)$$

V kinematografii nebo v televizi se vyžaduje splnění přísnějšího požadavku, aby totiž nebyl zřejmý impulsový ráz obrazu a aby vznikl dojem obrazu trvale osvětleného. Proto se v kinematografii užívá frekvence 16—25 obr./s a v televizi 25—50 obr./s. Tato mezní frekvence  $f_m$  závisí na druhu použitého světla, na osvětlení, na podílu  $\frac{\tau_u}{T_0}$  a konečně též na individuálních schopnostech pozorovatelova zraku.

Ve stroboskopii při použití krátkodobých impulsů ( $\tau_u$  je malá) lze dosáhnout dojmu trvalého osvětlení tělesa teprve při vyšších frekvencích, a proto se od tohoto požadavku upouští a klade se důraz jen na vznik dojmu zdánlivého pohybu. Proto se bere za mezní hodnotu  $f_m = 10$  obr./s.



Obr. 6.

Chceme-li při zdánlivém pohybu pozorovat podrobnosti pohybujícího se tělesa, je nutné, aby též frekvence zdánlivého pohybu  $f_p$  nebyla příliš vysoká, tj. aby

$$|f_p| \leq f_n. \quad (9)$$

Je to způsobeno omezenou schopností zrakového orgánu a opožděnou reakcí mozku na zrakové podněty. Překročí-li frekvence  $f_p$  mezní hranici  $f_n$ , pak pozorovatel přestává zřetelně pozorovat podrobnosti obrazů. V praxi se bere hodnota  $f_n = 2$  Hz.

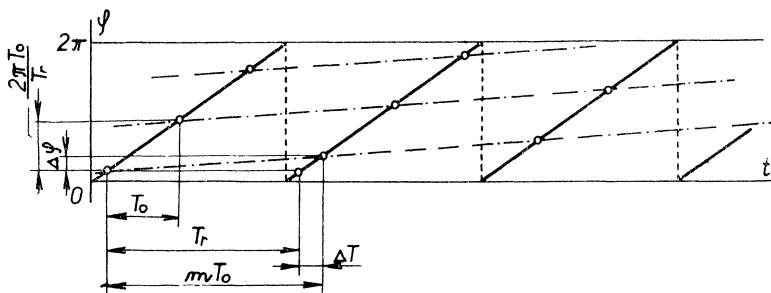
Vyšetříme nyní případ, kdy frekvence obrazu  $f_0$  je značně menší než frekvence pohybu  $f_r$  (obr. 6). Položme  $\Delta T = T_0 - nT_r$ , kde  $n$  je celé kladné číslo takové, aby součin  $nT_r$  byl nejbližší  $T_0$  a  $|\Delta T| \ll T_r$ .

Tak jako v předchozím případě je přírůstek fáze mezi dvěma po sobě následujícími obrazy

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{T_0 - nT_r}{T_r}. \quad (10)$$

Odtud pro frekvenci zdánlivého pohybu plyne s použitím vztahu (6)

$$f_p = f_r - n f_0. \quad (11)$$



Obr. 7.

Závěrem ještě vyšetříme případ, kdy frekvence obrazu  $f_0$  je značně větší než frekvence pohybu  $f_r$  (obr. 7). Pak  $\Delta T = m T_0 - T_r$ , kde  $m$  je takové kladné číslo, aby hodnota součinu  $m T_0$  byla nejbližší hodnotě  $T_r$ , a  $|\Delta T| \ll T_r$ . Z obr. 7 je patrné, že obraz bodu během každé periody pohybu bude pozorován v  $m$  fázích. (Mezi jednotlivými po sobě jdoucími fázemi je rozdíl  $\frac{2\pi T_0}{T_r}$ .) Takový stroboskopický obraz se nazývá *obrazem vícenásobným*. Přírůstek fáze vícenásobného obrazu jako celku za dobu  $m T_0$  je v tomto případě

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{m T_0 - T_r}{T_r}. \quad (12)$$

Odtud pro frekvenci zdánlivého vícenásobného obrazu plyne

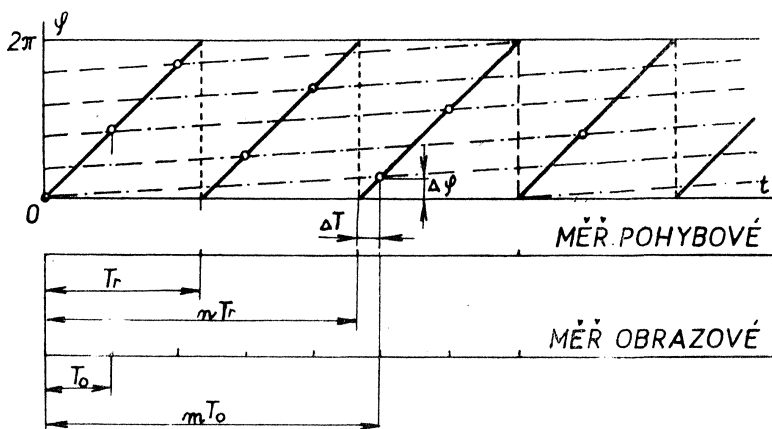
$$f_p = \frac{\Delta\varphi}{2\pi m T_0} = f_r - \frac{f_0}{m}. \quad (13)$$

V těchto případech jsme předpokládali, že  $\Delta T \ll T_r$ , a  $\Delta T \ll T_0$ . Nyní vyšetříme případ, kdy frekvence obrazu  $f_0$  i frekvence pohybu  $f_r$  nabývají libovolných hodnot. Pro tento případ sestojíme graf závislosti fáze na čase tak, že na osu úseček nanese dvě měřítka, a to měřítko pohybové a obrazové. První je rozděleno na periody pohybu  $T_r$ , a druhé na periody obrazu  $T_0$  (obr. 8).

Průměty dílků obrazového měřítka do šikmých úseček grafu fáze skutečného pohybu se nazývají body obrazu, které určují okamžik ve kterém se obraz objeví a fázi pohybu, kterou tento obraz představuje.



Teoreticky existuje nekonečně mnoho interpretací zdánlivého pohybu při daných frekvencích  $f_r$  a  $f_0$ , podle toho, které obrazy považujeme za předcházející a které za následující. Každé interpretaci zdánlivého pohybu odpovídá přímka procházející dvěma libovolnými body obrazu. Tímto způsobem dostaneme čáru tvaru pily (obr. 8 čerchovaně), která představuje zdánlivý pohyb a nazývá se graf fáze zdánlivého pohybu.



Obr. 8.

Uvažujme zdánlivý pohyb určený lomenou čarou, která prochází každým  $m$ -tým bodem obrazu. Z grafu (obr. 8) vyplývá, že zbývajícími body obrazu je možno proložit  $m$  rovnoběžných čar a stroboskopický obraz ukáže rotující těleso současně v  $m$  fázích pohybu. Vznikne tak  $m$ -násobný obraz. Číslo  $m$  se nazývá násobek stroboskopického obrazu. Každý dílčí obraz  $m$ -násobného obrazu se tedy opakuje s periodou dílčího obrazu  $T_d = mT_0$ . Tato perioda  $T_d$  je rovna součtu určitého celého násobku  $n$  period skutečného pohybu  $T_r$  a doby  $\Delta T$ , kde  $|\Delta T| < T_r$ .

Ze vztahu (3) plyne pro  $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{T_r} \cdot \Delta T. \quad (14)$$

Dobu  $\Delta T$  můžeme vyjádřit pomocí čísel  $m$  a  $n$

$$\Delta T = mT_0 - nT_r. \quad (15)$$

Z rovnice (13) a (14) dostaneme pro  $\Delta\varphi$  po vydělení  $2\pi mT_0$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{T_r} (mT_0 - nT_r)$$

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi mT_0} = f_r - \frac{n}{m} f_0.$$

Levá strana rovnice je podle (12) rovna frekvenci  $f_p$  zdánlivého pohybu  $m$ -násobného obrazu jako celku

$$f_p = f_r - \frac{n}{m} f_0. \quad (16)$$

Tento vztah je základním stroboskopickým vzorcem. Čísla  $m$  a  $n$  jsou libovolná přirozená čísla, která ve vzorci (16) se nedají krátit. Znaménko  $f_p$  určuje směr zdánlivého pohybu, který pro  $f_p > 0$  je shodný se směrem skutečného pohybu a pro  $f_p < 0$  je opačný.

Praxe klade nejčastěji požadavek na získání jednoduchého stojícího obrazu. V tomto případě dosadíme do vzorce (16)  $m = 1$  a  $f_p = 0$ . Tak dostaneme

$$\frac{f_0}{f_r} = \frac{1}{n} \Rightarrow f_r = n f_0. \quad (17)$$

Číslo  $n$  udává počet period skutečného pohybu, které uplynou mezi dvěma po sobě následujícími obrazy.

Ve vzorci (16) pro určité hodnoty  $f_r$  a  $f_0$  můžeme za  $m$  a  $n$  volit libovolná přirozená čísla, která nelze krátit. Teoreticky dostaneme nekonečně mnoho různých interpretací stroboskopického jevu. Oko však nestačí postřehnout všechny tyto interpretace a vidí jen ty, které splňují omezovací podmínku (9) a dále vztah  $|T_p| > T_n$ . Nemá-li pozorovaný obraz vykazovat zřetelné míhání, je nutné, aby zrakový vjem mezi dvěma dílčími obrazy trval. Musí tedy platit

$$T_d \leq T_m. \quad (18)$$

Poněvadž  $T_d \leq mT_0$ , musí platit pro číslo  $m$

$$mT_0 \leq T_m \Rightarrow m \leq \frac{T_m}{T_0} = \frac{f_0}{f_m}. \quad (19)$$

Abychom určili podmínku pro číslo  $n$  vyjdeme ze vztahu (9). Po dosazení ze vztahu (16) za  $f_p$  dostaneme

$$\left| f_r - \frac{n}{m} f_0 \right| \leq f_n.$$

Po vyřešení této nerovnosti s absolutní hodnotou dostaneme podmínku pro  $n$

$$m \frac{f_r - f_n}{f_0} \leq n \leq \frac{f_n + f_r}{f_0} m. \quad (20)$$

V případě, že nelze najít žádný nemíhavý zdánlivý pohyb, můžeme vyšetřit obraz u kterého se pozorovateli jeví zřetelné míhání. Tento případ nastane, jestliže perioda dílčího obrazu  $T_d$  bude větší než  $T_m = 0,1$  s, tj. zrakový vjem vymizí dříve, než se jeho obraz znovu opakuje. V tomto případě vezmeme místo omezující podmínky (18), podmínku mírnější

$$T_m < T_d \leq 2T_m \quad \text{tj.} \quad \frac{f_0}{f_m} < m \leq \frac{2f_0}{f_m} \quad (21)$$

nebo

$$2T_m < T_d \leq 3T_m \quad \text{tj.} \quad \frac{2f_0}{f_m} < m \leq \frac{3f_0}{f_m}. \quad (22)$$

Tyto případy má smysl vyšetřovat jen tehdy, jestliže se obraz za dobu  $T_d$  opakuje ve stejné nebo jen nepatrně pozmeněné fázi. V případě, že vyjdou dvě různé interpretace zdánlivého pohybu, pak pozorovatel bude zdánlivě vnímat obě, pokud jejich periody budou jen málo odlišné. Budou-li periody značně odlišné, pak pozorovatel vnímá ten zdánlivý pohyb, jehož perioda je větší.

Ukážeme nyní užití předchozích vztahů na praktických příkladech.

$\alpha$ ) Určeme stroboskopický jev, který vznikne osvětlujeme-li předmět (obr. 4), rotující s frekvencí  $f_r = 25$  Hz, záblesky stroboskopu o frekvenci  $f_0 = 40$  Hz.

Řešení: Ze vztahu (19) máme  $m \leq 4$ . Číslo  $m$  může tedy nabývat hodnot 1, 2, 3, 4. Pro tyto hodnoty  $m$  určíme ze vztahu (20) hodnoty přirozeného čísla  $n$ .

Pro  $m = 1$ ,  $\frac{23}{40} \leq n \leq \frac{27}{40}$ . V tomto intervalu není žádné přirozené číslo  $n$ .

Pro  $m = 2$ ,  $\frac{23}{20} \leq n \leq \frac{27}{20}$ . V tomto intervalu není žádné přirozené číslo  $n$ .

Pro  $m = 3$ ,  $\frac{69}{40} \leq n \leq \frac{81}{40}$ . Vyhovuje  $n = 2$ .

Pro  $m = 4$ ,  $2,3 \leq n \leq 2,7$ . V tomto intervalu není žádné přirozené číslo  $n$ .

Tedy z možných  $m = 1, 2, 3, 4$ , vyhovuje  $m = 3$  a  $n = 2$ . Ze vztahu (16) určíme frekvenci zdánlivého pohybu

$$f_p = 25 - \frac{2}{3} 40 = -\frac{5}{3} \text{ Hz.} \quad T_p = -\frac{3}{5} \text{ s.}$$

Pozorovatel vnímá trojnásobný nemíhavý zdánlivý obraz, který se otáčí jako celek s periodou  $\frac{3}{5}$  s proti směru skutečného pohybu.

$\beta$ ) Určeme stroboskopický jev, který vznikne, osvětlujeme-li předmět (obr. 4), rotující s frekvencí  $f_r = 25$  Hz, záblesky stroboskopu o frekvenci  $f_0 = 32$  Hz.

Řešení: Ze vztahu (19) máme  $m \leq 3,2$ . Číslo  $m$  může tedy nabývat hodnot 1, 2, 3. Pro tyto hodnoty  $m$  nedostaneme z nerovnosti (20) žádné přirozené číslo. Zdánlivý obraz tedy bude míhavý. Ujijeme tedy mírnější podmínky (21), která dává pro číslo  $m$  hodnoty  $m = 4, 5, 6$ .

Ze vztahu (20) dostaneme pro  $m = 4$ ,  $n = 3$ ,  
pro  $m = 5$ ,  $n = 4$ .

Frekvence zdánlivého pohybu bude

$$f_{p1} = 1 \text{ Hz, } T_{p1} = 1 \text{ s.}$$

$$f_{p2} = -\frac{3}{5} \text{ Hz, } T_{p2} = -\frac{5}{3} \text{ s.}$$

Pozorovatel bude vnímat buď čtyřnásobný zdánlivý obraz rotující s periodou 1 s ve směru skutečného pohybu nebo pětinasobný zdánlivý míhavý obraz, rotující s periodou  $\frac{5}{3}$  s proti směru skutečného pohybu. Tyto dva vjemy se budou střídat podle toho, na který z nich se pozorovatel soustředí.

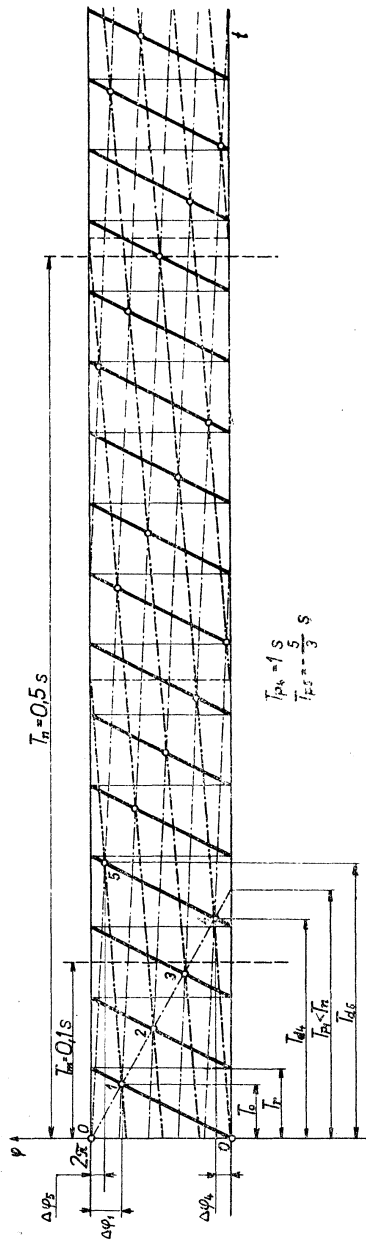
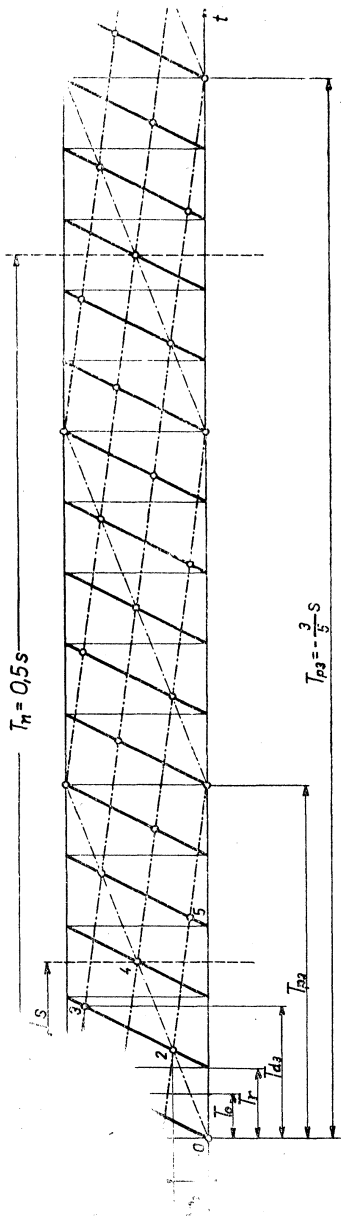
### III. Grafické řešení stroboskopického jevu pro dané hodnoty $f_0$ a $f_r$ .

Analytické řešení stroboskopického jevu pomocí vzorce (16), kde je nutné z omezujičích podmínek určit hodnoty čísel  $m$  a  $n$ , je zdoluhavé. Rychlejší a názornější způsob řešení je grafický.

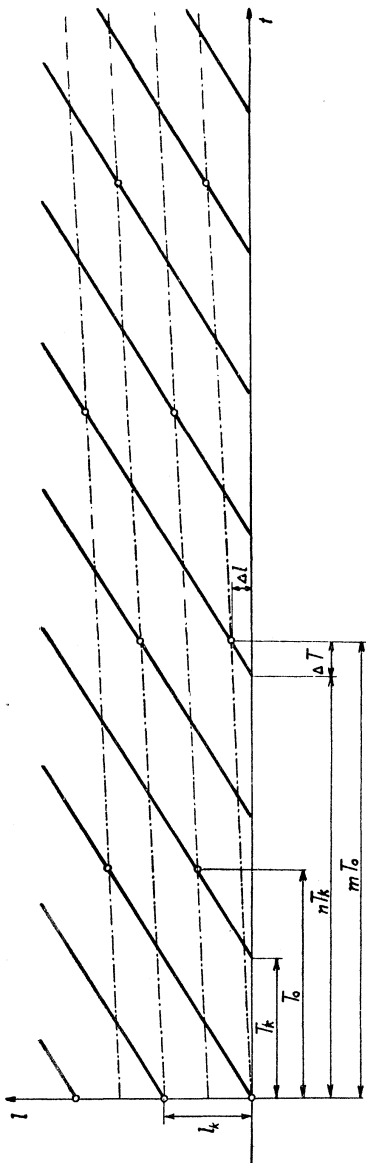
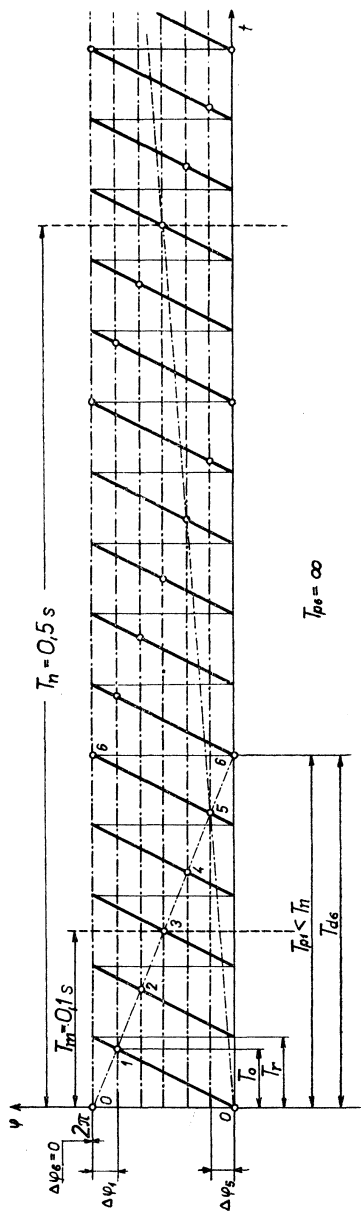
Pro řešení užijeme grafu z obr. 8. Na osu úseček vyneseme periody  $T_r$  a  $T_0$  v příslušném měřítku. Průměty bodů  $O$ ,  $T_0$ ,  $2T_0$ ,  $3T_0$ , ... do šikmých úseček grafu fáze skutečného pohybu dávají body obrazu. Pro jednoduchost zvolíme bod prvního obrazu v počátku souřadnic, tedy se souřadnicemi  $t = 0$ ,  $\varphi = 0$ , nebo  $t = 0$ ,  $\varphi = 2\pi$ . Na osu úseček vyneseme též periody  $T_m = 0,1$  s,  $T_n = 0,5$  s, které budou sloužit jako omezující podmínky pro to, aby bylo možné ze všech interpretací stroboskopického jevu vybrat právě ty, které se budou pozorovateli skutečně jevit. Nyní v intervalu  $O$  až  $T_m$  hledáme k prvnímu bodu obrazu takový obraz, který se od něho liší o nejmenší fázový rozdíl  $\Delta\varphi$  (případně o  $\Delta\varphi = 0$ ). Těmito dvěma body je určena čára fáze zdánlivého pohybu. Prochází-li tato čára každým  $m$ -tým bodem obrazu, pak můžeme zbývajícími body proložit  $m$  rovnoběžných čar fáze zdánlivého pohybu. Stroboskopický obraz je v tomto případě  $m$ -násobný. Má-li pozorovatel tento  $m$ -násobný obraz zřetelně vidět, musí platit pro periodu zdánlivého pohybu vztah  $|T_r| > T_n$ . Neexistuje-li v intervalu  $O - T_m$  takový bod obrazu, aby uvedená podmínka byla splněna, provedeme podobné vyšetřování v intervalu  $T_m$  až  $2T_m$ , případně v intervalu  $2T_m$  až  $3T_m$ . K prvnímu bodu obrazu hledáme opět takový bod, aby rozdíl fáze  $\Delta\varphi$  byl velmi malý nebo roven nule. Čára procházející těmito body určuje zdánlivý pohyb, který ovšem bude vykazovat zřetelné míhání.

Postup při grafickém řešení ukážeme nejlépe na praktických příkladech. Jako první vyřešíme již dříve řešený příklad  $\alpha$ ) (obr. 9). V intervalu  $O - T_m$  najdeme k prvnímu bodu obrazu  $O$  bod 2, který se od bodu  $O$  liší o malý fázový rozdíl  $\Delta\varphi_2$ . Body  $O$  a 2 určují čáru fáze zdánlivého pohybu s periodou  $T_{p2}$ . Poněvadž je  $T_{p2} < T_n$ , nebude tento zdánlivý pohyb pozorovatel vnímat. Najdeme tedy k bodu  $O$  bod 3, který se od bodu  $O$  liší rovněž o malý fázový rozdíl  $\Delta\varphi_3$ . Spojnice těchto bodů určuje graf zdánlivého pohybu s periodou  $T_{p3} = -0,6$  s. Poněvadž je  $T_{p3} > T_n$ , bude tento zdánlivý pohyb pozorovatel vnímat. Body 1, 4 a body 2, 5 určují další rovnoběžné čáry fáze zdánlivého pohybu. Výsledkem grafického řešení je tedy trojnásobný zdánlivý, nemíhavý obraz otáčející se s periodou  $T_{p3}$  proti směru skutečného pohybu.

Př.  $\beta$ ) (obr. 10). V intervalu  $O - T_m$  najdeme k prvnímu bodu obrazu  $O$ , bod 1, s fázovým rozdílem  $\Delta\varphi_1$ . Spojnice bodů  $O$ , 1 určuje čáru fáze zdánlivého pohybu s periodou  $T_{p1} < T_n$ . Tento pohyb nebude pozorovatel vnímat. V tomto intervalu nelze již najít jiný bod s malým fázovým rozdílem. Určíme tedy body 4 resp. 5 v intervalu  $T_m - 2T_m$ , které vzhledem k bodu  $O$  mají malý fázový rozdíl  $\Delta\varphi_4$  resp.  $\Delta\varphi_5$ . Body  $O$ , 4 a body  $O$ , 5 určují dva různé grafy fází zdánlivého pohybu, jejichž periody  $T_{p4}$  a  $T_{p5}$  jsou větší než  $T_n$ .



Obr. 9, 10.



Obr. 11, 12.

Poněvadž fázový rozdíl  $\Delta\varphi_4$  je přibližně stejně velký jako  $\Delta\varphi_5$ , bude pozorovatel střídavě vnímat jeden nebo druhý zdánlivý pohyb. Výsledkem grafického řešení je tedy jeden čtyřnásobný míhavý obraz otáčející se ve směru skutečného pohybu s periodou  $T_{p4} = 1$  s, nebo pětinasobný míhavý obraz otáčející se proti směru skutečného pohybu s periodou  $T_{p5} = -\frac{5}{3}$  s.

Na obr. 11 je grafické řešení stroboskopického jevu pro  $f_r = 25$  Hz a  $f_0 = 30$  Hz. V tomto případě jsou možné dvě interpretace zdánlivého pohybu, které jsou určeny grafy fází procházejících body O, 5 a O, 6. Poněvadž je  $\Delta\varphi_5 \gg \Delta\varphi_6$ , kde  $\Delta\varphi_6$  je rovno nule, bude  $T_{p6} \gg T_{p5}$  a pozorovatel bude vnímat jen šestinasobný stojící míhavý obraz ( $T_{p6} = \infty$ ).

#### IV. Stroboskopický jev při jiných druzích pohybu

Ve stroboskopii se často setkáváme s předměty, které se pohybují rovnoměrným kruhovým pohybem a které se skládají z  $k$  segmentů souměrných vzhledem k ose rotace. V tomto případě čas uplynulý mezi dvěma po sobě následujícími stejnými polohami segmentů, může být považován za *periodu úsekového pohybu*  $T_k$ . Tato perioda je tolikrát kratší než perioda skutečného pohybu  $T_r$ , kolik je na tělese segmentů. Tedy

$$T_k = \frac{T_r}{k} \quad \text{a} \quad f_k = k f_r. \quad (23)$$

Předpokládejme, že rotující kružnice je rozdělena na  $k$  stejných úseků délky  $l_k$ . Je-li obvodová rychlost kružnice  $v$ , pak pro periodu  $T_k$  a frekvenci úsekového pohybu vyplývají vztahy

$$T_k = \frac{l_k}{v} \quad \text{a} \quad f_k = \frac{v}{l_k}. \quad (24)$$

Úseky o délkách  $l_k$  můžeme nahradit libovolnými identickými předměty, které zachovávají stálou obloukovou vzdálenost  $l_k$ . Předpokládejme, že poloměr kružnice se blíží k nekonečnu. V tomto případě je drahou pohybu přímka po které se pohybují stálou rychlostí  $v$  předměty rozmístěné ve stejných vzdálenostech  $l_k$ . Tuto situaci splňují přibližně např. střely vystřelené z kulometu. Uvažujeme-li každou střelu zvlášť, pak jejich pohyb probíhá jen jednou, neopakuje se. Naopak uvažujeme-li určitou polohu a předpokládáme-li, že vcházející do ní identické předměty tvoří zdánlivě jednu a tutéž skupinu, v takovém případě obdržíme přímočarý periodický pohyb úsekového charakteru, který je charakterisován rovnicemi (24). U přímočarého úsekového pohybu nemá smysl mluvit o fázi. Můžeme jej však znázornit graficky jako závislost dráhy  $l$  na čase  $t$ . Tento graf je tvořen rovnoběžnými přímkami posunutými vzájemně ve vodorovném směru o intervaly  $T_k$ . Spojnice dvou libovolných bodů obrazu dává čáru zdánlivého pohybu. Rychlost zdánlivého pohybu vypočteme jako podíl přírůstku dráhy  $\Delta l$  a časového intervalu  $mT_0$ , po jehož uplynutí se  $m$ -násobný obraz opakuje. Rychlost zdánlivého pohybu je dána vztahem

$$v_p = \frac{\Delta l}{mT_0}. \quad (25)$$

Grafický způsob řešení je naznačen na obr. 12. Platí

$$\Delta l = v_r \Delta T, \quad (26)$$

kde  $v_r$  je rychlost skutečného pohybu.

Položíme dále

$$\Delta T = mT_0 - nT_k. \quad (27)$$

Dosažením (26) a (27) do (25) dostaneme pro rychlost  $v_p$  zdánlivého pohybu

$$v_p = v_r \left( 1 - \frac{nf_0}{mf_r} \right). \quad (28)$$

Jiným důležitým druhem pohybu je pohyb kmitavý. Nejjednodušším druhem kmitavého pohybu je harmonický pohyb bodu s amplitudou  $A_0$  a frekvencí  $\omega_r = 2\pi f_r$ . Souřadnice polohy vyjádříme jako funkci času nebo fáze

$$A = A_0 \sin \omega t = A_0 \sin \varphi. \quad (29)$$

V popsaném pohybu prochází libovolně zvolený bod každou polohou (s výjimkou krajních poloh) dvakrát během jedné periody. Při složitých kmitavých pohybech se může určitá poloha bodu opakovat i víckrát v jedné periodě. Proto při stroboskopickém zkoumání kmitavého pohybu nemůže být fáze vždy jednoznačně určena. Grafem fáze kmitavého pohybu není čára tvaru zubů pily, ale sinusoida.

## V. Stroboskopy

Stroboskopy můžeme rozdělit na tři skupiny — stroboskopy malé, střední a velké. Malé i středně velké přístroje se vyrábějí seriově v elektronických závodech jako General Radio, Dawe instruments, Allgemeine Elektrizitäts-gesellschaft AEG a jiné. Naproti tomu velké laboratorní stroboskopy vyrábějí speciální firmy (např. f. Früngel, Hamburg) v nevelkých seriích. Kromě těchto stroboskopů určených pro práci v normálních podmínkách, vyrábějí některé továrny přístroje určené pro práci v tropických podmínkách, přístroje vodotěsné apod.

Malé stroboskopy jsou určeny převážně pro technickou kontrolu, kde není třeba velké intenzity světla. Tyto přístroje užívají např. neonové výbojky NSP 1, neonový strobotron 1D 21 apod. Skříňky přístrojů jsou obvykle malé, lehce přenosné. Jsou konstruovány buď jako kompaktní přístroje nebo s výbojkou a reflektorem zvláště na 1—3 m šířce. Jako příklad uvádíme stroboskop TESLA TM 558 s výbojkou NSP 1. Je to kompaktní přenosný přístroj u něhož lze měnit frekvenci záblesků od 4 Hz do 150 Hz. Nyní se u nás již nevyrábí. Z dalších značek je to ORISTROB Orion EMG vyráběný v Maďarsku s měnitelným rozsahem frekvence 6—160 Hz. Z nových přístrojů je to tranzistorový stroboflasch 1209 A, který užívá xenonové výbojky nového typu s velmi intenzivními záblesky bílého světla, takže nedochází ke zkreslení barev pozorovaného předmětu. Je konstruován jako kompaktní přenosný přístroj. Může být používán i při denním světle. Počet záblesků lze řídit v rozmezí 5—250 z/s. Tento přístroj vyrábí firma Dawe Instruments Ltd. (Western Avenue Acton, London).



Střední stroboskopy jsou určeny pro technické kontroly a také pro laboratorně vědecké výzkumy při bleskové fotografii. Vytvářejí intenzivní záblesky až do kmitočtu 800 z/s. Mají dosti značnou váhu od 9 do 50 kg. Vyrábějí se jako přenosné nebo převozní přístroje.

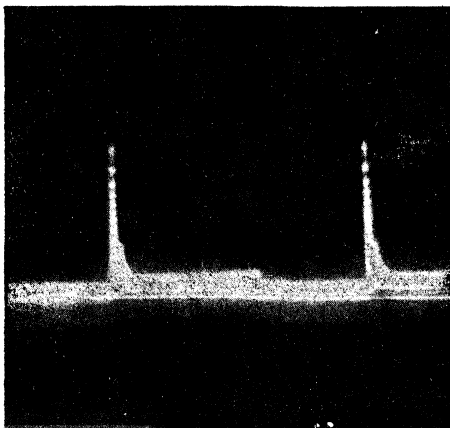
Velké přístroje jsou určeny pro vědeckovýzkumné laboratoře a používá se jich především ve spolupráci s kinokamerou. Mají vysoké kmitočty záblesků od 1 000 do 2 5000 z/s. Váží 70—112 kg a jsou vyráběny jako převozní přístroje s jedním nebo dvěma zábleskovými reflektory. Jako příklad uvádíme přístroj Gross Stroboskop LS 5 o váze 90 kg s xenonovou výbojkou XIE 200 dávající bílé světlo. Firma F. Früngel Hamburg vyrábí Super Stroboskop s argonovou výbojkou o váze 70 kg. Kmitočet záblesků lze měnit od 10 do 2 5000 z/s.

Poněvadž se v současné době u nás stroboskopy nevyrábějí, uvádíme konstrukci přístroje, který je určen převážně pro školní účely a pro méně náročná laboratorní měření. Přístroj byl autory vyvinut na katedře experimentální fyziky a metodiky fyziky UP v Olomouci.

Při konstrukci přístroje se vycházelo z těchto požadavků:

- a) Intenzivní záblesky bílého světla.
- b) Jednoduchá konstrukce.
- c) Jednoduchá manipulace.

Pro získání záblesků bílého světla se jevila jako nejvhodnější výbojka XB 81-62, užívaná běžně ve fotoblesku. Přístroj byl konstruován tak, aby bylo možno použít bez jakýchkoliv úprav jednoho z reflektorů fotoblesku Kovolux se zabudovanými indukčními cívkami.



Obr. 13.

Přístroj je zabudován do skříňky o rozměrech 120 × 250 × 190 mm a je napájený ze sítě. Výbojka s reflektorem a s indukčními cívkami je samostatná a připojuje se k přístroji pomocí třípramenné šňůry. Vlastní přístroj se skládá ze zdroje stejnosměrného napětí a z thyatronového zdroje krátkých impulsů (obr. 17).

Zdroj stejnosměrného napětí je konstruován jako dvojecenný usměrňovač a je osazen dvěma paralelně zapojenými usměrňovacími elektronkami 6Z31. Usměrněné napětí je vyhlazeno dvěma elektrolytickými kondenzátory  $C_1$ ,  $C_2$ , které jsou zapojeny do serie a přemostěny odpory  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Při malém odběru proudu je na výstupu usměrňovače napětí 580—600 V = . Toto napětí je možno přepínačem  $V_2$  přepojit na svorky označené VN na čelní stěně přístroje. Přístroj pak slouží jako zdroj stejnosměrného napětí. Při použití přístroje jako stroboskopu jsou tyto zdíčky pro bezpečnost od zdroje odpojeny.

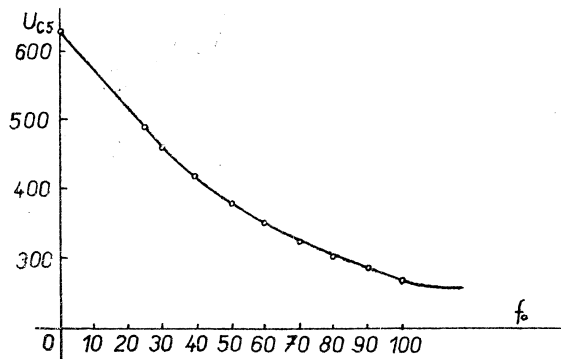
Thyatronový zdroj krátkých impulsů, osazený plynem plněnou tetrodou 21TE31, dává velmi krátké impulsy o amplitudě několika set voltů (viz oscilogram obr. 13.). Thyatronový zdroj krátkých impulsů pracuje takto: Kondenzátor  $C_3$  se nabíjí přes odpor  $R_4$  na napětí 400 V. Paralelně ke kon-

denzátoru je připojen thyatron, na jehož mřížku je přivedeno harmonické napětí z RC generátoru. Jakmile potenciál na mřížce thyatronu dosáhne dostatečné velikosti, vzplane v něm výboj a kondenzátor  $C_3$  se tím vybije. Časová konstanta obvodu  $R_4C_3$  musí být dostatečně veliká, aby se v thyatronu dokončila deionisace dříve, než napětí na jeho anodě znovu vzroste. Tím je omezena i frekvence impulsů. Krátké impulsy se odvádějí z katodového odporu  $R_6$  thyatronu a vedou se kondenzátorem  $C_4$  do primárního vinutí indukční cívky. Změnou mřížkového předpětí thyatronu se mění okamžik vzplanutí výboje, čímž dochází ke změně fáze impulsů.

Krátký impuls z thyatronového zdroje vyvolá v sekundárním vinutí indukční cívky impuls vysokého napětí, který uvnitř výbojové trubice vyvolá ionisaci plynu, čímž dojde k zapálení výboje a tím i k vybití kondenzátoru  $C_5$ . Poněvadž frekvence záblesků je poměrně vysoká, bylo nutné, vzhledem k životnosti výbojky, značně snížit intenzitu záblesků zmenšením kapacity kondenzátoru  $C_5$  na hodnotu  $4 \mu\text{F}$  (ve fotoblesku je použito kapacity  $800 \mu\text{F}$ ). Intenzita výboje je ještě omezena malým odporem  $R_9$ , zařazeným do serie s výbojkou. Takto nastavená intenzita je pro vizuální pozorování dostatečná. Pro fotografické účely je potřeba vyšší intenzity záblesků po krátkou dobu. V tomto případě je možné odpor  $R_9$  vyřadit vypínačem  $V_3$ .

Na životnost výbojky má také značný vliv napětí zapalovacích impulsů. Při vyšším napětí zapalovacích impulsů dochází k rozprašování elektrod a k černání výbojové trubice. Proto pro hodnotu kondenzátoru  $C_4$  je nutné volit nejnižší hodnotu, která ještě dostačuje pro spolehlivou funkci přístroje.

Přístroj pracuje až do frekvence 80 Hz. Tento frekvenční rozsah je dostačující, neboť ve školní praxi se nejčastěji užívá frekvencí kolem 50 Hz. Frekvenční omezení je způsobeno jednak časovou konstantou obvodu  $R_5, C_5$ , neboť při vyšších frekvencích se již kondenzátor  $C_5$  nestačí nabíjet, dále též tím, že s rostoucí frekvencí roste i od-

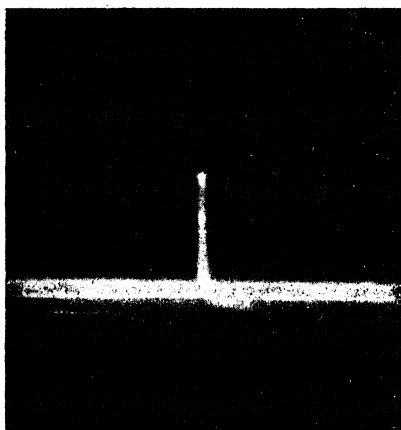


Obr. 14.

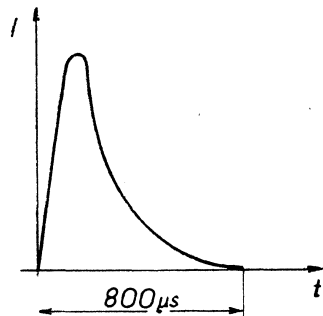
běr proudu z usměrňovače a napětí na jeho výstupu klesá. Závislost napětí na kondenzátoru  $C_5$  (měřeno Avometem na rozsahu 600 V  $\Rightarrow$ ) na frekvenci záblesků udává graf (obr. 14).

Vybití kondenzátoru přes výbojku proběhne ve velmi krátké době. Na obr. 15 je oscilogram proudu procházejícího výbojkou při záblesku. Oscilogram byl pořízen při frekvenci časové základny 50 Hz. Teprve při vysokých frekvencích časové základny je patrný průběh proudu.

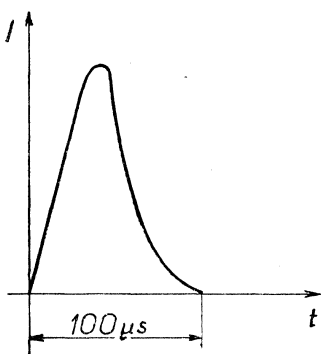
Na obr. 15a je znázorněn průběh proudu je-li do serie s výbojkou zapojen odpor  $R_9$ . Doba trvání výboje je asi  $800 \mu\text{s}$ . Při vyřazeném odporu  $R_9$  je doba výboje podstatně kratší okolo  $100 \mu\text{s}$  (obr. 15b).



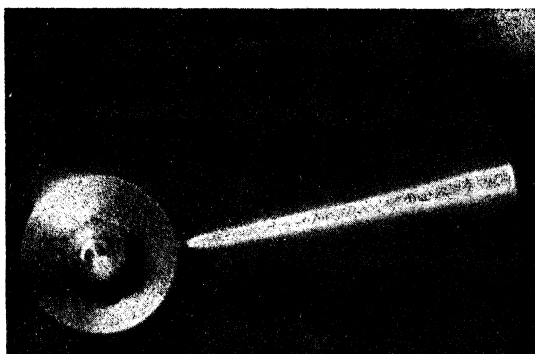
Obr. 15.



Obr. 15a.



Obr. 15b.

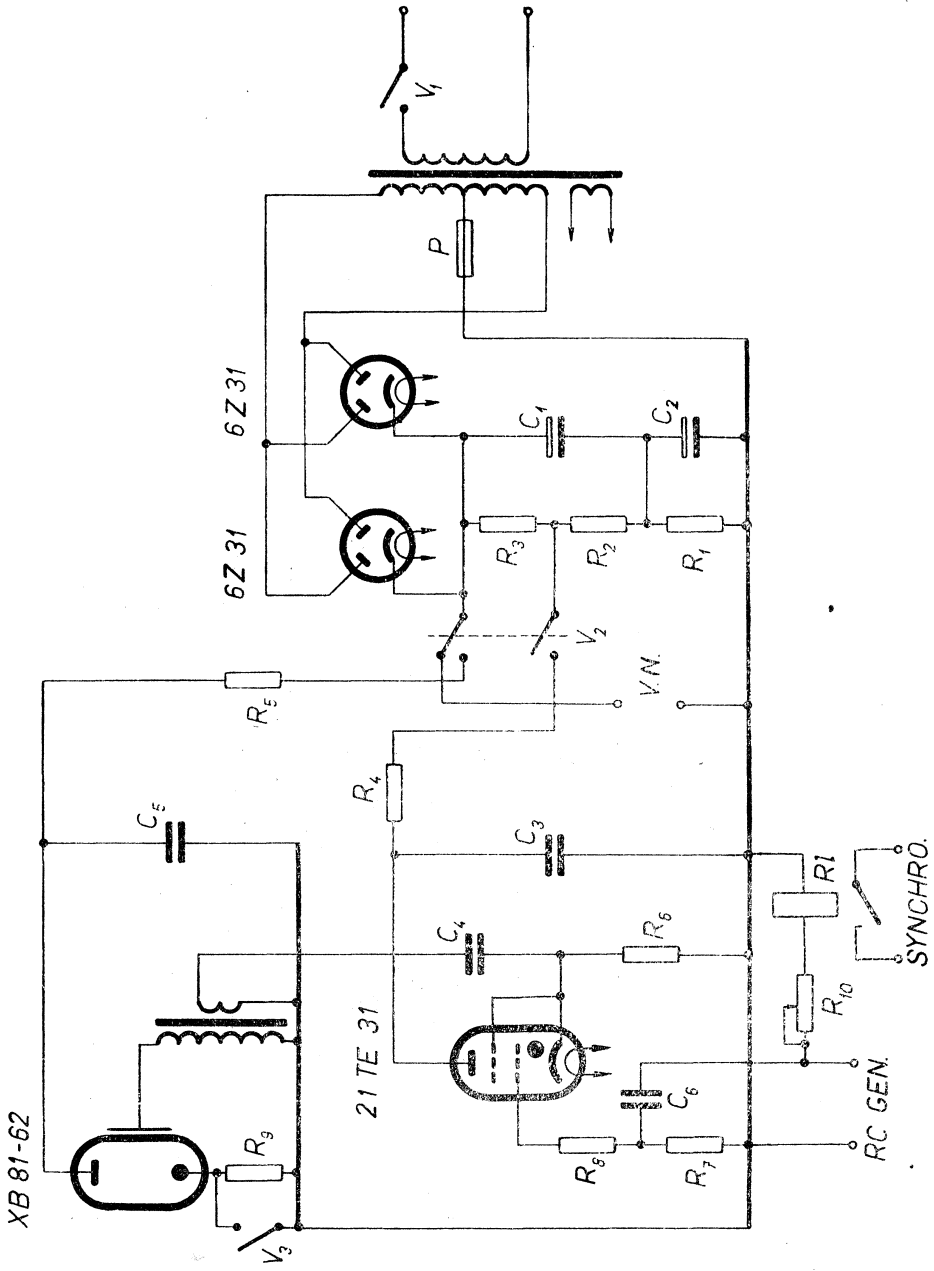


Obr. 16a.



Obr. 16b.

Na obr. 16 je fotograficky zachycen impulsový obraz rotujícího disku s bílou čarou, pořízený v případě a) se zařazeným odporem  $R_0$ , v případě b) s vyřazeným odporem  $R_0$ . Frekvence rotace disku je  $f_r = 110$  Hz. Vypočteme-li dobu trvání obrazu  $\tau$ , vyjde hodnota menší než hodnota zjištěná z průběhu proudu. Je to způsobeno tím, že film nezachytí malé hodnoty osvětlení.

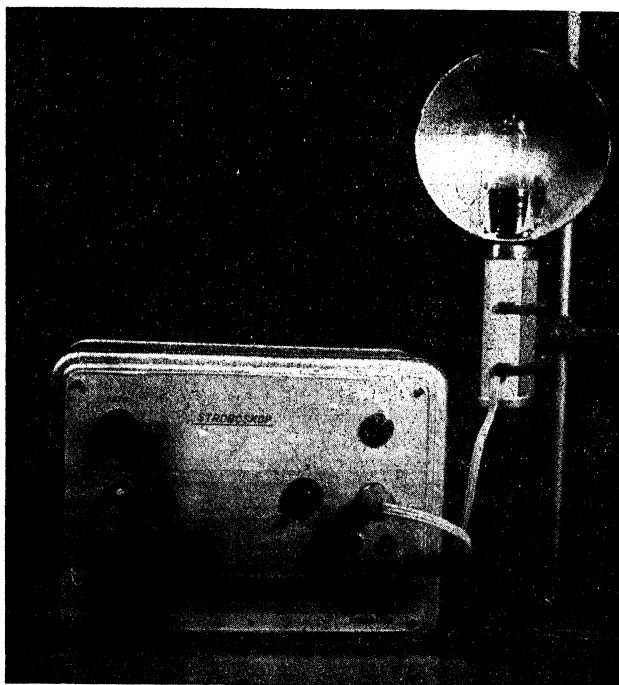


Obr. 17.

Na obr. 17 je schéma stroboskopu s thyatronovým zdrojem krátkých impulsů. Dále uvádíme přehled použitých součástí.

Síťový transformátor — sekundár  $2 \times 400 \text{ V}/200 \text{ mA}$

Odpory	$R_1 = 300 \text{ k}\Omega$	Kondenzátory	$C_1 = 64 \mu\text{F}/450 \text{ V}$
	$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$		$C_2 = 64 \mu\text{F}/450 \text{ V}$
	$R_3 = 200 \text{ k}\Omega$		$C_3 = 25 \text{ nF}$
	$R_4 = 200 \text{ k}\Omega$		$C_4 = 25 \text{ nF}$
	$R_5 = 2 \text{ k}\Omega$		$C_5 = 4 \mu\text{F}/1000 \text{ V}$
	$R_6 = 6 \text{ k}\Omega$		$C_6 = 0,1 \mu\text{F}$
	$R_7 = 47 \text{ k}\Omega$		
	$R_8 = 6 \text{ k}\Omega$		
	$R_9 = 5 \Omega$		



Obr. 18.

Relé  $R_l$  slouží k synchronnímu spuštění pozorovaného děje. Jeho citlivost se nastavuje potenciometrem  $R_{10}$ .  
Snímek přístroje je na obr. 18.

## VI. Využití stroboskopu při vyučování fyziky a při některých laboratorních měřeních

Stroboskopické metody, přestože jsou velmi vhodné pro pozorování některých jevů, jsou dosud málo používány. Zvláště pak ve školní praxi nebyly u nás používány téměř vůbec. Chtěli bychom proto upozornit aspoň na některé možnosti využití stroboskopu.

Využití stroboskopu v učivu fyziky je dobře provedeno např. v americké učebnici fyziky vypracované Physical Science Study Committee (PSSC) P. C. Heat and Co. Boston, kde je jedna kapitola věnována studiu časových intervalů a mnohonásobnému zábleskovému osvětlování. Pro zvýšení názornosti učiva užívá učebnice přímo v textu řady stroboskopických obrázků. Stroboskopu je zde např. využito při demonstraci volného pádu a při výpočtu gravitačního zrychlení, při probírání vodorovného a šikmého vrhu, rázu koulí, zákona zachování hybnosti, pohybu těžiště apod.

Stroboskopická metoda je dále velmi vhodná pro studium kmitavých pohybů a vlnění, kdy lze daný jev zdánlivě zpomalit, případně zcela zastavit a tak studovat průběh děje. Tímto způsobem lze např. demonstrovat kmitavý pohyb ladičky, kmitání a deformaci membrány reproduktoru, chvění strun, kmitání tyčí a desek, vlnění na vodní hladině apod.

Z uvedených příkladů je zřejmé, že možnosti využití stroboskopu ve školní praxi jsou značné a že by bylo jistě vhodné, aby školy měly přístroj k dispozici.

Nyní ještě uvedeme několik příkladů jednoduchých laboratorních měření založených na stroboskopickém jevu.

### 1. Bezdotykové měření frekvence rotujícího tělesa

Rotující těleso osvětluje stroboskopem, na němž lze přesně vyčítat kmitočet obrazu  $f_0$ . Najdeme-li nejvyšší kmitočet obrazu, při němž vidíme jediný stojící obraz tělesa, pak platí  $f_0 = f_r$ . V případě, že frekvence rotace  $f_r$  je vyšší než rozsah frekvencí stroboskopu, musíme postupovat následujícím způsobem. Zjistíme kmitočet  $f_{01}$ , při němž vidíme jednoduchý stojící obraz tělesa. Dále najdeme nejbližší vyšší kmitočet obrazu  $f_{02}$ , při němž opět vidíme jednoduchý stojící obraz tělesa. Pak podle vzorce (17) platí

$$\begin{aligned} f_r &= n f_{01} \\ f_r &= (n - 1) f_{02}. \end{aligned}$$

Z těchto rovnic obdržíme pro kmitočet rotace vztah

$$f_r = \frac{f_{01} f_{02}}{f_{02} - f_{01}}. \quad (30)$$

### 2. Měření malých změn frekvence rotujícího tělesa

Osvětluje-li těleso rotující s frekvencí  $f_r$  záblesky stroboskopu s konstantním kmitočtem obrazu  $f_0$ , pak pro frekvenci rotace zdánlivého pohybu platí vzorec (16)

$$f_n = f_r - \frac{n}{m} f_0.$$

Změní-li se frekvence rotace o malou hodnotu  $\Delta f_r$ , změní se i frekvence zdánlivého pohybu o  $\Delta f_p$ . Podle vzorce (16) platí:

$$f_p + \Delta f_p = f_r + \Delta f_r - \frac{n}{m} f_0 = f_p + \Delta f_r,$$

$$\Delta f_r = \Delta f_p.$$

Malá změna frekvence rotace vyvolá stejnou změnu frekvence zdánlivého pohybu, kterou lze snadno změřit, např. stopkami.

### 3. Měření povrchového napětí kapalin

Zdrojem rozruchu, kmitajícího se známou frekvencí  $f$ , vytvoříme na hladině kapaliny postupné vlnění, které můžeme stroboskopicky zastavit a tak změřit délku vlny. Z vlnové délky, frekvence  $f$ , hustoty kapaliny a gravitačního zrychlení lze pak vypočítat povrchové napětí kapaliny.

V této práci nepodáváme vyčerpávající přehled demonstračních pokusů a laboratorních měření, které lze provádět pomocí stroboskopu, ani se zde nechceme zabývat technikou jednotlivých pokusů a měření, neboť tyto otázky jsou spíše záležitostí metodických časopisů. Šlo nám především jen o naznačení rozsáhlých možností využití tohoto přístroje.

#### LITERATURA

- [1] *Rutkowski, J.*: Stroboskopy. Warszawa, 1961, 255 s.
- [2] *Bonč—Brujevič, A. M.*: Použití elektronek v experimentální fyzice. Praha, SNTL 1959.
- [3] *Horák, J.*: Elektronické měření. Praha, SNTL 1957.
- [4] *Slaboproudý obzor*, 25, č. 4, s. 225—226.

#### РЕЗЮМЕ

### ТЕОРИЯ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО ЯВЛЕНИЯ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

ВЛАДИСЛАВ КОЛЕСНИКОВ И ЙИРЖИ ЗАГЕЙСКИ

Настоящая работа занимается теорией проблескового освещения и показывает численное (аналитическое) и графическое решение стробоскопического явления. Дальше в статье описывается устройство и работа простого стробоскопа, предназначенного для школьных занятий и простейших лабораторных измерений.

В заключение приводятся некоторые способы применения стробоскопа в школе и в экспериментальной физике.

## SUMMARY

### THE THEORY CONCERNING WITH THE STROBOSKOPE PHENOMENA AND THEIR PRACTICAL USING

VLADISLAV KOLESNIKOV and JIŘÍ ZÁHEJSKÝ

This work is concerning with the theory of the lighting illumination and shows the analytical and graphical solution of the stroboskope — phenomena. Further will be described in this paper the construction and activity of the simple stroboskope, specified for using in the school as so as the less pretencious laboratory — measurements. In the conclusion there are introduced some methods of using the stroboskope in the school-praxis and in the experimental physics.