



Diplomová práce

Měření prahu viditelnosti flikru při různé intenzitě osvětlení

Studijní program:

N0914P360003 – Biomedicínské inženýrství

Autor práce:

Bc. Jana Svobodová

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jan Kremláček, Ph.D.

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Měření prahu viditelnosti flikru při různé intenzitě osvětlení

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Jana Svobodová
<i>Osobní číslo:</i>	D21000153
<i>Studijní program:</i>	N0914P360003 Biomedicínské inženýrství
<i>Zadávací katedra:</i>	Fakulta zdravotnických studií
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

Cíle práce:

1. Seznamte se s problematikou flikru obecně, seznamte se s běžně užívanými metodami používanými k měření prahu viditelnosti flikru a vyberte vhodnou metodu.
2. Vypracujte literární rešerši o studiích věnovaných viditelnosti flikru a perifernímu vidění,
3. Na vhodném počtu figurantů proveďte měření prahu viditelnosti při několika vhodně zvolených intenzitách světla v podmínkách, které zohledňují periferní vidění,
4. Naměřená data vhodným způsobem vyhodnoťte.

Teoretická východiska (včetně výstupu z kvalifikační práce):

Tzv. flikr je pocit nestálosti světelného podnětu. Je způsobený rychlými změnami jasu v čase, které mají na pozorovatele prokazatelný zdravotní vliv. Ačkoliv se povědomí o účincích flikru na lidské zdraví postupně rozšiřuje, metody vyhodnocení míry závažnosti flikru jsou nedokonalé. Existují pouze zastaralé metody pro jeho měření, které nestíhají reagovat na rychlý rozvoj moderních světelných zdrojů založených na LED technologii. Vyhodnocení prahu viditelnosti pro různé intenzity světla při různých frekvencích přispěje k vývoji algoritmu pro vyhodnocování závažnosti flikru za různých referenčních podmínek (intenzita osvětlení). To je nezbytným krokem k aktualizaci a dalšímu rozvoji stávajících hygienických norem, které by měly právě flikr zohledňovat.

Výzkumné předpoklady:

1. Předpokládáme, že s nižší intenzitou osvětlení roste práh viditelnosti flikru (klesá citlivost),
2. Citlivost na flikr vrcholí kolem 10 Hz,
3. Předpokládáme, že v makulárním vidění je práh viditelnosti flikru vyšší než v periferní oblasti sítnice.

Metoda:

Kvantitativní

Technika práce, vyhodnocení dat:

Rešerše, naměřené experimentálních dat a jejich vyhodnocení

Místo a čas realizace výzkumu:

Technická univerzita, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, listopad 2023 – únor 2024

Vzorek:

30 – 35 figurantů

Rozsah práce:

60 – 80 stran

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování práce:

Jazyk práce:

tištěná/elektronická

čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] CIE, 2016. *CIE TN 006:2016 Visual Aspects of Time-Modulated Lighting Systems – Definitions and Measurement Models*. Technical Note 006. B.m.: CIE
- [2] TNI IEC, 2022. TNI IEC/TR 61547-1 Zařízení pro všeobecné osvětlování – EMC požadavky odolnosti – Část 1: Objektivní světelný flikrmetr a metoda zkoušení odolnosti proti kolísání napětí. *TNI IEC/TR 61547-1* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/tni-iec-tr-61547-1-360090-246248.html>
- [3] EISEN-ENOSH, Auria et al. Evaluation of Critical Flicker-Fusion Frequency Measurement Methods for the Investigation of Visual Temporal Resolution. *Scientific Reports* [online]. [B.r.] [cit. 2023-04-29]. Dostupné z doi: 10.1038/s41598-017-15034-z
- [4] KUKAČKA, Leoš et al. Comparison of Procedures for Measuring the Temporal Contrast Sensitivity Function. In: 2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference Expo (LS18). 2023, s. 1–6. Dostupné z doi: 10.1109/LS1858153.2023.10170649
- [5] BENEŠ, Jiří, Daniel JIRÁK a František VÍTEK. *Základy lékařské fyziky*. 4.vydání. Univerzita Karlova: Karolinum, 2019. isbn 978-80-246-2646-1.
- [6] MOMB AUER, Wilhelm, 2005. *Flicker in Stromversorgungsnetzen: Messung, Berechnung, Kompensation ; Erläuterungen zu den Europäischen Normen und VDEW-Richtlinien sowie DIN EN 50160:2000-03*. Berlin Offenbach: VDE-Verl. VDE-Schriftenreihe Normen verständlich, 110. ISBN 978-3-8007-2805-3
- [7] VALBERG, Arne, 2005. *Light vision color*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-84902-6.
- [8] TOI, Vo Van, Christof Walter BURCKHARDT a Pierre-Alain GROUNAUER. Irregularities in the flicker sensitivity curve [online]. [B.r.] [cit. 2023-04-29].
- [9] IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. New York: IEEE Power Electronics Society, 2015
- [10] PERZ, Małgorzata. *Flicker perception in the periphery* [online]. 2010 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46984624/685337-1.pdf>. Diplomová práce. Eindhoven University of Technology
- [11] FERNANDEZ-ALONSO, Maydel et al. 2019. Assesment of psychophysical methods for measuring the critical flicker fusion frequency in yes/no tasks [online]. Intitute of Neuroscience: Newcastle University, 4-6 [cit. 2023-08-30]. Dostupné z: https://www.jennyreadresearch.com/download/basic_science/vision/FernandezAlonsoKaspirisRousellisInnesRead2019.pdf

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

10. července 2023

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2024

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc.,
MBA
děkan

doc. Ing. Daniel Jirák, Ph.D.
garant studijního programu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

26. 4. 2024

Bc. Jana Svobodová

Měření prahu viditelnosti flikru při různé intenzitě osvětlení

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá světelným flikrem a jeho viditelností při různých frekvencích a různé intenzitě osvětlení. V teoretické části jsou kromě anatomie a fyziologie oka popsány normalizované flikrometry a jejich principy měření. Z důvodu rychlého rozvoje elektrotechniky se však jedná o zastaralé přístupy, a proto byla navržena nová metoda, která je blíže popsána ve výzkumné části. Pomocí ní byl naměřen práh viditelnosti flikru, který byl poté porovnán s prahy konvenčního flikrometru. Získaná data poukazují na nezbytnost aktualizace flikrometrů a světelných norem.

Klíčová slova: flikr, fluktuace, míhání, flikrometr, LED, osvětlení, viditelnost flikru, zrak

Abstract

This thesis deals with light flicker and its visibility at various frequencies and different light intensities. In the theoretical part, besides the anatomy and physiology of the eye, standardized flickermeters and their measurement principles are described. However, due to the rapid development of electrotechnics, these are outdated approaches, and therefore, a new method has been proposed, which is described in the research part. Using this method, the flicker visibility threshold was measured, which was then compared with the thresholds of conventional flickermeter. The obtained data indicate the necessity of updating flickermeters and light standards.

Keywords: flicker, fluctuation, blinking, flickermeter, LED, illumination, flicker visibility, eyesight

Poděkování

Ráda bych poděkovala panu Ing. Leošovi Kukačkovi, Ph.D. za trpělivost a odborné vedení. Dále panu prof. Ing. Janu Kremláčkovi, Ph.D. a MUDr. Vladimíru Mašínovi, Ph.D. za ochotu při zodpovídání všech mých dotazů. Děkuji také příteli Ing. Lukáši Kaniovi za cenné rady při programování a za jeho partnerskou oporu. V neposlední řadě chci poděkovat celé své rodině za neúnavnou podporu při studiu.

Obsah

Seznam zkratek	10
Seznam symbolů	11
1 Úvod	12
2 Teoretická část	14
2.1 Fyziologie oka	14
2.1.1 Evoluce oka	14
2.1.2 Anatomie lidského oka	14
2.2 Fyziologie a psychofyziologie vidění	18
2.2.1 Mechanismus transformace světelného signálu v elektrický	18
2.2.2 Adaptace na tmu a světlo	19
2.2.3 Zraková dráha a korové projekční oblasti	20
2.2.4 Vyvolané odpovědi a iluze	21
2.3 Fotometrie	23
2.3.1 Vybrané fotometrické a radiometrické veličiny	23
2.4 Flikr	25
2.4.1 Vznik flikru za přítomnosti meziharmonických složek	27
2.4.2 Flikrmetr	28
2.4.3 Zrakový vjem rušivého flikru	32
2.4.4 Periferní flikr	33
2.5 Historie experimentů zabývajících se reakcí oka na modulované světlo	33
2.5.1 E. Hartmann	35
2.5.2 W. Tyler	36

2.5.3	M. Fernandez-Alonso	36
2.6	Metody určování prahu viditelnosti flikru	37
3	Výzkumná část	40
3.1	Cíle a výzkumné předpoklady	40
3.2	Metodika výzkumu	41
3.2.1	Použitá experimentální zařízení	41
3.2.2	Charakteristika výzkumného souboru	43
3.2.3	Samotný experiment	44
3.3	Analýza výzkumných dat	47
3.3.1	Hystereze	48
3.3.2	Křivka prahu viditelnosti	49
3.3.3	Krabicový graf (boxplot)	52
3.3.4	Histogramy	53
3.3.5	Kumulativní distribuční graf	54
3.3.6	Statistická významnost vlivu jednotlivých vnějších faktorů	56
4	Diskuze	63
5	Závěr	65
	Seznam použité literatury	66
	Seznam použité literatury	70
A	Přílohy: Obrázky	74
B	Přílohy: Tabulky	77

Seznam zkratek

AP	aritmetický průměr
CFE	kritická frekvence flickru
EEG	elektroencefalograf
EU	Evropská unie
FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci
FZS	Fakulta zdravotnických studií Technické univerzity v Liberci
LED	elektroluminiscenční dioda
MCS	metoda konstantních stimulů
MED	medián
MS	metoda schodišť
MOL	metoda limitů
např.	například
Obr.	obrázek
SMODCH	směrodatná odchylka
SSL	Solid-state lighting, typ osvětlení využívající elektroluminiscenční diody
resp.	respektive
Tab.	Tabulka
TUL	Technická univerzita v Liberci
tzv.	takzvaně
UV	ultrafialové
VEP	zrakové evokované potenciály
VRMS	střední kvadratická hodnota napětí

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
E	lx	osvětlení
f	Hz	frekvence
I	cd	svítivost
L	cd/m ²	jas
π	—	Ludolfovo číslo, $\pi \doteq 3,141\,592\,653\,5$
Φ_v	lm	světelný tok
P_{st}	—	indikátor krátkodobého flickru
P_{st}^{LM}	—	hodnota osvětlení měřená světelným flickrmetrem, indikátor krátkodobého flickru
S	m ²	obsah plochy
τ	s	časová konstanta
T	K	termodynamická teplota
E_r	Td	jednotka osvětlení sítě

1 Úvod

Jedním z nejdůležitějších smyslů člověka je zrak. Člověk přijímá až 90 % informací z okolí právě díky zraku. Jedná se o složitý proces založený na příjmu a zpracování informačních signálů. Signál je přenášen pomocí fotonů – částic elektromagnetického vlnění. Ty jsou pro lidské oko viditelné v rozmezí vlnové délky 400 – 760 nm. Udává se, že rozsah zmíněné vlnové délky je podmíněn citlivostí fotoreceptorů sítnice, ve skutečnosti jsou receptory schopné registrovat světlo až do 315 nm. Limitace kratších vlnových délek než 400 nm je způsobena materiálem oční čočky, který za normálních podmínek toto světlo pohlcuje. Obraz se po průchodu rohovkou, komorovou vodou, čočkou a sklivcem zobrazuje na sítnici a je interpretován centrálním nervovým systémem (1, 2).

Kvalita vzniklého obrazu je ovlivněna mnohými faktory jako je například jas, kontrastní citlivost jedince, věk, kondice optického aparátu, případná patologie, nebo právě jev zvaný flickr, jinak označován také jako míhání. Jedná se o rychlou změnu jasu v čase. Lidským okem je vnímán pouze v určitých frekvencích, a to přibližně do 60 – 100 Hz. Kolísání o vyšších frekvencích pozorovatel okem nezaregistruje. V některé literatuře je označováno za tzv. neviditelný flickr, který je možné zachytit na EEG, či elektroretinogramu. Viditelný i neviditelný flickr má prokazatelný vliv na lidský organismus. Mezi hlavní symptomy viditelného flickru patří únava očí (asthenopie), rozmazané vidění, malátnost, snížení pracovní výkonnosti a v méně četných případech i bolest hlavy, či migréna. U citlivějších jedinců může dojít ke zvýšené srdeční činnosti a u osob s predispozicemi hrozí i spuštění epileptických symptomů (3).

Flickr mimo jiné vzniká rychlými změnami napětí, což je charakterizováno jako

změna velikosti napětí v časovém úseku do 10 min. V delším časovém horizontu pak mluvíme o „výkyvech napájecího napětí“. V normě IEC 61000-4-15 ed.2 z roku 2010 (4) je popsán standardní flickrmetr, který se stal nedílnou součástí elektromagnetické kompatibility i standardů kvality napájení. Změny vznikající v oblasti výroby, během přenosu, distribuci, i při spotřebě elektrické energie jsou nepopíratelnými důvody poukazujícími na nutnou aktualizaci metod měření flickru. Tyto změny totiž ovlivňují napájecí napětí v elektrické síti, což může mít za důsledek právě blikání světelného zdroje (5). Technická zpráva IEC TR 61547-1 z roku 2015 pak popisuje tzv. světelný flickrmetr, který vychází z výše popsaného standardního flickrmetru a reaguje na zmíněné nedostatky. Ani ten však nelze označit za bezchybný. Obě dvě metody budou blíže popsány v teoretické části.

Ačkoliv se povědomí o účincích flickru postupně rozšiřuje, nejsou přesně stanovená kritéria rychlých změn intenzit osvětlení a normy regulující světlo na pracovištích ho ignorují. Existují metody pro jeho měření, většinou se ale jedná o zastaralé přístupy, které nestíhají reagovat na rychlý rozvoj elektrotechniky.

Vyhodnocení prahu viditelnosti pro různé intenzity světla při různých frekvencích by mohlo přispět ke zmapování vnímavosti flickru a pochopení závislosti osvětlení a proudu. To je bezpochyby nezbytným pilířem pro aktualizaci světelných norem, které by měly právě flickr zohledňovat.

2 Teoretická část

Teoretická část popisuje zrakový aparát člověka, seznamuje se základními fotometrickými veličinami, vysvětluje pojem flickr a principy standardního i světelného flickrometru. V další podkapitole jsou přiblíženy metody měření flickru, z kterých bylo čerpáno v průběhu výzkumu.

2.1 Fyziologie oka

Chceme-li se zabývat flickrem, je nezbytné pochopit vlastnosti lidského zraku, s čímž souvisí i struktura samotného oka.

2.1.1 Evoluce oka

Již Charles Darwin (1809 – 1882) zkoumal tento komplexní orgán a jeho vývoj napříč živočichy. První primitivní „oko“ se pravděpodobně vyvinulo z běžné buňky s fotopigmentem rhodopsinem, který reagoval na světlo. Z ní pak postupně vznikaly funkční systémy, které můžeme dnes pozorovat u různých živočichů – např. složené (fasetové) oči u malého hmyzu, či lidské oko, tzv. komorové (6).

2.1.2 Anatomie lidského oka

Lidské oko se skládá z několika částí s povrchy s různými indexy lomu a zakřivením. To ovlivňuje šíření elektromagnetických vln a následnou tvorbu obrazu na sítnici (6).

Rohovka

K největšímu lomu světla dochází právě na povrchu rohovky. Setkává se zde tkáň a vzduch a index lomu je proto největší. Tento povrch je průhledný pro ultrafialové (UV) světlo do přibližně 290 nm. Rohovka má jemná nervová vlákna a je velmi citlivá na dotek a na silné UV záření. Je chráněna tenkým slzným filmem, který ji zvlhčuje (6).

Přední oční komora a komorová voda

Za rohovkou se nachází přední komora s komorovou vodou. Ta vzniká v akomodačních (ciliárních) svalech a vyplavuje se z oka Schlemmovy kanály. Slouží k udržování optimálního nitroočního tlaku, který je přibližně 15 mmHg. Zvýšený tonus je příčinou onemocnění zvané zelený oční zákal, nebo-li glaukom (6)(7).

Čočka

Čočka je elastické těleso, které umí pomocí akomodačních svalů zaostřovat na objekty v různé vzdálenosti od oka. Pokud se sval stáhne, sníží se napětí, které normálně udržuje čočku zaostřenou na nekonečno (v praxi 6 metrů). Zmenší se tím velikost prstence akomodačního svalu a zvětší se zakřivení čočky. Proces akomodace trvá přibližně 0,35 s, přičemž se sníženými světelnými podmínkami se schopnost akomodace snižuje. Zaostřování se zhoršuje také s rostoucím věkem, kdy čočka ztrácí elasticitu. V mladém věku člověk dokáže zaostřit na bod blíže než 10 cm od očí, zatímco ve věku 45 let na bod mezi 25 cm a 90 cm. Po 70 letech se bod posouvá do vzdálenosti až 1 m. S věkem se také mění propustnost pro UV světlo. Obvykle absorbuje čočka vlnové délky mezi 290 nm – 400 nm, přičemž se stárnutím klesá množství propouštěného modrého světla. V 80 letech se na sítnici dostane přibližně desetina krátkých vln s délkou 400 nm (6).

Sklivec

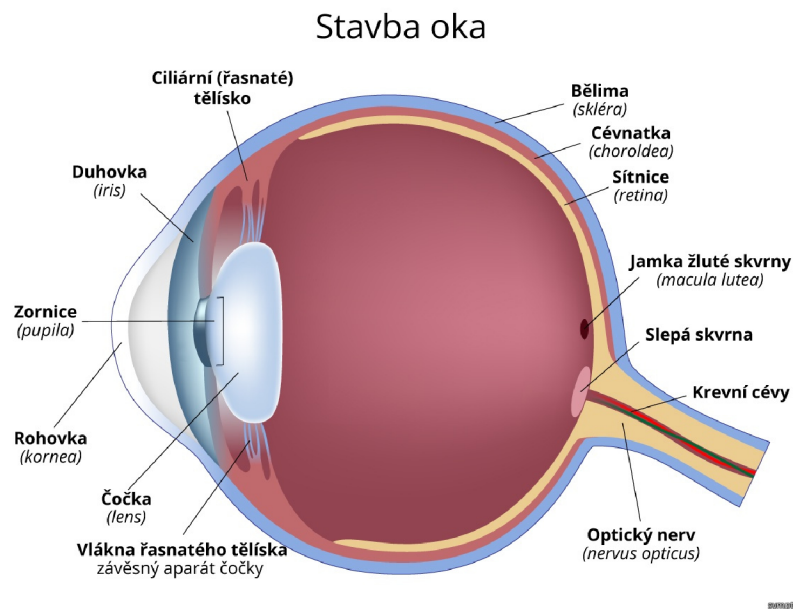
Sklivec je gelovité těleso, které vyplňuje oko a svým vnitřním tlakem udržuje jeho kulovitý tvar (6).

Zornice

Zornice reguluje tok světla dopadající na sítnici. S nižším osvětlením se zvětšuje její průměr. Pohybuje se od 2 mm při denním světle do 8 mm ve tmě. Je důležité zmínit, že periodické změny světla s frekvencí vyšší než 2 Hz nevyvolávají změny průměru zornice. Schopnost měnit svoji velikost je také podmíněna věkem jedince. Starší oko s menší velikostí zornice v šeru má za důsledek, že do sítnice proniká méně světla a je snížena ostrost zraku a kontrastní citlivost (6).

Duhovka

Jedná se o barevný prsteneček kolem zornice, který má u všech lidí stejný pigment – melanin. Rozdílné barvy očí jsou způsobeny odlišnou koncentrací zmíněného pigmentu, např. hnědé oči mají pigmentu nejvíce (6).



Obr. 2.1: Anatomický popis očního bulbu (8)

Sítnice

Sítnice obsahuje buňky citlivé na světlo – tyčinkové a čípkové fotoreceptory. **Čípky** jsou receptory denního (fotopického) světla a jsou zodpovědné za vnímání barev. V lidském oku rozlišujeme 3 typy čípků s odlišnou citlivostí – L-, M- a S-čípky, pro dlouhé, střední a krátké vlnové délky. Dřívější označení bylo R-, G- a B-čípky, což naznačovalo citlivosti pro červenou, zelenou nebo modrou barvu. **Tyčinky** jsou zase buňkami nočního (skotopického) vidění a registrují množství dopadajícího světla. Zrakový systém je tvořen z 95 % tyčinkami a jejich ztráta vede k šerosleposti. Oko adaptované na tmou má citlivostní maximum při 507 nm a oko adaptované na světlo pak 555 nm. Tyčinky jsou tedy výrazně citlivější než čípky. Oblast mezi denním a nočním viděním se nazývá mezopické vidění. Optická soustava se musí přizpůsobit jasům na jejich přelomu a uplatňují se tak fotočivné tyčinky i čípky (9) (2) (6).

U obou typů buněk lze popsat tři hlavní části (1):

- zevní segment,
- vnitřní segment,
- synaptická terminála.

Zevní segment je fotosenzitivní část, specializovaná k přijímání světla. Obsahuje totiž tzv. **membránové disky**, což jsou nad sebou uspořádané oploštělé váčky, jejichž membrány obsahují zrakový **fotopigment**. Tvoří se z cytopazmatické membrány a neustále vznikají a zanikají (1).

Paprsek procházející sítnicí se šíří nejprve řadou průhledných buněčných vrstev než se dostane k receptorům. Konkrétně se jedná o gangliové, amakrinní, bipolární a horizontální buňky. Gangliové buňky komunikují pomocí axonů s mozkem. Tyto axony tvoří zrakový nerv, který do oční bulvy vstupuje v oblasti nazývané jako **slepá skvrna**. V tomto bodě nejsou žádné světločivné buňky, a proto zde nevzniká obraz. Teoretickým protikladem je tzv. **žlutá skvrna**, v jejímž prostředku se nachází prohlubeň fovea centralis. Jedná se o bod, do kterého se promítá centrální paprsek

a je zde nejostřejší vidění. Nachází se zde hustě nakupené čípky. Pokud nás upoutá nějaký předmět a intenzita osvětlení je dostatečná, oči se automaticky nastaví tak, aby dopadaly paprsky z pozorovaného objektu přímo na žlutou skvrnu (1) (2) (6) (9).

2.2 Fyziologie a psychofyziologie vidění

Zrakové vnímání je komplexní proces, na kterém se podílí celá optická soustava oka. Je provázen složitými biochemickými a elektrofyziologickými ději, které jsou následně vyhodnocovány nervovými centry.

2.2.1 Mechanismus transformace světelného signálu v elektrický

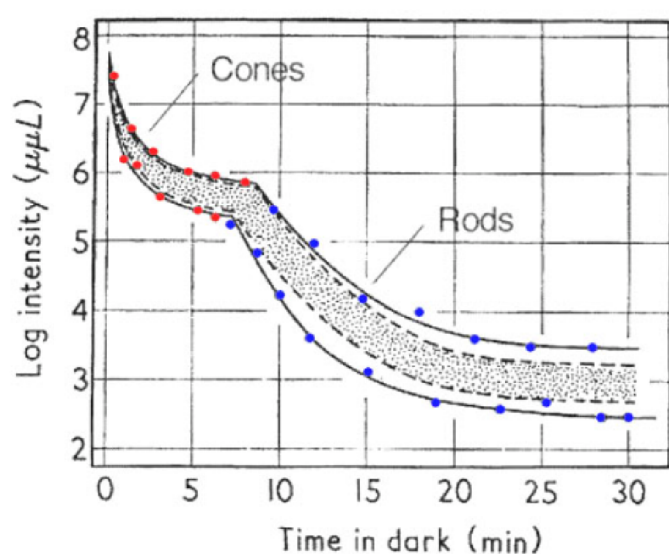
Pro proces vidění je klíčová transformace pohlcených fotonů z viditelného spektra na elektrický signál. Po dopadu určitého množství světla na systém membránových disků zevního segmentu dojde k rozpadu fopigmentu. V barvivu dojde k chemickému procesu, který zapříčiní změnu napětí receptorového potenciálu. Disková membrána tyčinek obsahuje fopigment **rhodopsin**, který je složen z izomeru vitamínu A – 11-cis-retinalu a z bílkoviny opsinu. Právě **opsin** svým aminokyselovým složením způsobuje, že je rhodopsin (a tudíž lidské oko) nejcitlivější na světlo vlnové délky 505 nm, což odpovídá modrozelené barvě (1).

Jak již bylo řečeno, světelný stimul způsobí rozpad fopigmentu následovaný vznikem generátorového potenciálu. Povrchová membrána obsahuje Na⁺ kanály, které setrvávají za tmy v otevřeném stavu. Mají dobrou vodivost pro sodné ionty a vysoké řídicí napětí, což za tmy způsobuje významný tok sodíku do zevního segmentu fotoreceptorů. To má za následek odchýlení membránového napětí (v pozitivním směru) od hodnoty elektrochemického rovnovážného potenciálu iontu K⁺ (−100 mV), pro který je membrána obdobně jako v jiných buňkách také dobře propustná. Membránové napětí fotoreceptoru je tedy za tmy udržováno na nízké úrovni (kolem −30 mV) a membrána je tudíž depolarizována. Dopadne-li na fotoreceptor světelný paprsek, uzavřou se sodné kanály, čímž vzroste negativita membránového napětí (až k −70 mV) a dojde k tzv. hyperpolarizaci. Tato napěťová změna se

elektronicky šíří po celé povrchové membráně k synaptické terminále. Zde vyvolá pomocí mediátoru další lokální napěťové změny (1).

2.2.2 Adaptační křivka, časová závislost logaritmu intenzity prahového osvětlení

Při „adaptaci na tmu“ dochází ke vzrůstu citlivosti oka během pobytu v nízkých světelných podmínkách. Naopak snížení citlivosti na světlo v silně osvětleném prostředí je označeno termínem „adaptační křivka“. V odborné literatuře je také uváděn termín „zrakový práh“, který popisuje minimální intenzitu osvětlení, která umožní vyvolání zrakového vjemu (1) (10).



Obr. 2.2: Adaptační křivka, časová závislost logaritmu intenzity prahového osvětlení sítnice v mikroluxech (10)

Na Obrázku 2.2 je patrné že čím déle setrváváme ve tmě, tím více klesá zrakový práh, a tudíž roste citlivost sítnice k osvětlení. V šesti logaritmických jednotkách by vzrostla asi milionkrát. Za tento jev je zodpovědný právě fotopigment, který se během pobytu ve tmě regeneruje po rozložení z předchozího oslnění. V procesu adaptace na tmu lze pozorovat dvě fáze. Během první fáze dochází ke strmému klesání na nižší prahové intenzity osvětlení (cca do 8. minuty). Jedná se o čípkovou adaptaci. Následuje druhá, pomalejší fáze adaptace, která je ukončena po přibližně 30 minutách. Během ní se regenerují tyčinky. Rozdílná doba adaptace těchto foto-

senzitivních buněk je dána jejich odlišnou dobou regenerace. Tyčinkový rhodopsin potřebuje ke svému zotavení delší dobu. Kromě toho bylo zjištěno, že čípky navíc v počáteční fázi svojí adaptace tlumí činnost tyčinek (1).

2.2.3 Zraková dráha a korové projekční oblasti

K popsání zrakové dráhy je potřeba znát celou cestu od dopadajících fotonů na sítnici až po zpracování vizuální informace v příslušných oblastech mozku. Z toho důvodu je vhodné začít nejprve s popisem zorného pole (1).

Zorné pole

Pojem zorné pole označuje prostor, který vidíme při fixaci zraku. Je podmíněno anatomii hlavy dané osoby a může být narušeno různými patologiemi. Nejširší je zorné pole do stran od osy hlavy, kde dosahuje 90° . Zezdola a ze shora je to pak přibližně 60° a nejužší pole je tzv. nazální, které je ovlivněno proporcemi nosního hřbetu (2). Jelikož není sítnice homogenní, není zorné pole vnímáno stejně. Za běžných podmínek vidíme nejdokonaleji předměty, které se nacházejí v centrální části zorného pole, tj. v rozsahu 1 – 2 úhlových stupňů. Objekty na okrajích zorného pole, jsou okem vnímány s malou zrakovou ostroší a bez barvy, jelikož se promítají do periferie sítnice (1).

Zraková dráha

Zraková dráha je seskupení neuronů, které mají za úkol převést vizuální informaci z oka do dané korové projekční oblasti centrálního nervového systému. Popisujeme zde čtyři typy neuronových buněk (1):

- již zmíněné fotoreceptory,
- bipolární buňky,
- gangliové buňky sítnice.

Axony gangliových buněk se spojují na sítnici do zrakového nervu, vystupují z očního bulbu a tvoří **nervus opticus**. Na lebeční dutině se sbíhají zrakové nervy (nervi optici) z obou očí a vytváří chiasma opticum. Shluk axonů vycházející z chiasmatu tvoří tzv. **tractus opticus**. Dochází zde také k typickému křížení vláken zrakových nervů. Je vhodné zmínit, že se nekříží všechny axony, nýbrž pouze axony z mediálních polovin sítnice. Axony z laterálních polovin sítnic zůstávají na stejné polovině. Z toho důvodu pak obsahuje každý tractus opticus nervová vlákna z obou bulbů (1).

Přibližně 80 % axonů optického traktu míří do corpus geniculatum laterale a končí v tzv. **primární zrakové korové oblasti**. Zde dochází k dekodování zrakové informace a k její transformaci na elementární smyslový vjem – **počitek**. Zbýlých 20 % končí ve **středním mozku**. Tato vlákna mají pod kontrolou reflexní pohyby očí, či změnu průměru zornice, čímž se chrání před nadměrným osvětlením (1).

2.2.4 Vyvolané odpovědi a iluze

Jak již bylo několikrát zmíněno, zrakové vnímání je komplexní souhrn dějů, začínající v optické soustavě. S dopadem světla na sítnici začínají komplikované biochemické a elektrofyziologické pochody napříč zrakovou dráhou. Výsledný vjem – počitek, je interpretován pomocí podkorových nervových center a mozkové kůry (2).

Optické klamy

Pozorováním získává člověk informace o okolí, které následně subjektivně vyhodnocuje. Zajímavým případem jsou tzv. **optické klamy**, jejichž prvotní interpretace může být v rozporu s našimi dosavadními zkušenostmi. Typický příklad je odraz a lom na vodní hladině či v zrcadle. Další iluze jsou zapříčiněné kontrastem v obraze, kdy se nám pak například šedý proužek na bílém papíře může jevit jako tmavší, než na papíře černém. Celá řada klamů vzniká také v interakci mezi pravidelnými vzory a geometrickými obrazy (2).

Splývání vjemů

Nedílnou vlastností vidění je **splývání vjemů**. Při rychlém střídání obrazových scén o frekvenci alespoň 25 snímků za vteřinu vnímáme statickou scénu jako dynamickou. Toho je využíváno například ve filmařství (2).

Entoptické fenomény

O entoptických fenoménech hovoříme ve chvíli, kdy jsme schopni vnímat vlastní oční struktury. Příkladem jsou poletující sklivcové zákaly, cévní kresby, či pohyb červených krvinek, které jsou viditelné nejčastěji proti modré obloze nebo při rovnoměrném osvětlení (2).

Stroboskopický efekt

Pozorujeme-li pohybující se těleso, které je přerušovaně osvětlované, dochází k stroboskopickému jevu. Pozorovaný objekt vidíme jen v krátkých okamžicích a zrakový vjem tak zaniká později, než dojde k podráždění sítnice. V mozku tak vznikají obrazy pohybujícího se tělesa, přičemž frekvence stroboskopického osvětlení udává jeho tvar a pohyb (11). Pokud je frekvence pozorovaného předmětu a blikání (flikru) stejná či podobná, může se zdát, že se objekt pohybuje pomaleji, opačným směrem nebo vůbec. To může být rizikové například v průmyslových výrobnách, kde se může obsluha kvůli tomuto optickému klamu nebezpečně přiblížit například k rotující lopatce stroje a způsobit si tak úraz (12).

Fantomový efekt

Jiná situace může nastat ve chvíli, kdy se pohybuje naopak pozorovatel a objekt zůstává statický. Pokud je v zorném poli dané osoby blikající zdroj světla (s frekvencí v rozmezí 80 – 2500 Hz), mozek vyhodnotí, že je na scéně více světelných zdrojů. To se děje zejména ve chvílích, kdy je velký kontrast mezi zdrojem světla a okolím. Typickým příkladem je noční řízení a brzdové světlo se špatnou modulací, čili s flikrem. Řidič za brzdícím autem pak vidí více světel kolem jednoho původního, což

může rozptýlit jeho pozornost a také prodloužit dobu reakce (12).

Zrakové evokované potenciály

Drážděním zrakových receptorů předem definovanými stimuly lze získat zrakové evokované potenciály (Visual Evoked Potentials – VEP). Tyto potenciály jsou důsledkem elektrické aktivity centrálního zorného pole. Amplituda VEP je udávána v rozmezí od $0,3 \mu\text{V}$ do $20 \mu\text{V}$. Při měření těchto signálů je však potřeba odfiltrovat elektroencefalgrafickou aktivitu, která má amplitudu od $60 \mu\text{V}$ do $100 \mu\text{V}$ (2).

Používané stimuly mohou mít různý charakter. Jedním z nich jsou tzv. zábleskové stimuly (flash off a flash on), kdy se dráždí pomocí změny osvitů sítnice. Tento typ vyšetření není tak přesný a má spíše screeningový charakter. Je vhodné jej využít u osob s horšími zrakovými vlastnostmi, či u osob neschopných spolupracovat. Dalším způsobem, jak stimulovat zrakové receptory je pomocí strukturovaného stimulu, kdy je měněn kontrast mezi různě osvětlenými částmi sítnice, což ovšem vyžaduje dobrou zrakovou ostrost. Pomocí VEP je pak možné vyšetřovat funkční aktivitu zrakové dráhy a diagnostikovat různé zrakové patologie (2).

2.3 Fotometrie

Optika je nauka zabývající se vlastnostmi světla, jeho šířením a interakcemi s okolím. Jednou z částí optiky je disciplína zvaná fotometrie. Ta popisuje elektromagnetické vlnění délky 380 až 760 nm působící na fotoreceptory lidského oka, které vyvolává zrakový vjem.

2.3.1 Vybrané fotometrické a radiometrické veličiny

K popisu světla ve viditelném spektru je potřeba znát fotometrické a vybrané radiometrické veličiny. K jejich definování byl použit *Mezinárodní elektrotechnický slovník, část 845: Osvětlení* (13):

- **Světelná energie** – energie elektromagnetických vln vyjádřena poměrem spektrální světelné účinnosti vynásobené maximálním světelným účinkem při

předem stanovených fotometrických podmínkách. Tato energie může být přijímána, přenášena, či vyzařována. Pro fotopické podmínky je pak vyjádřena jako:

$$Q_v = K_m \int_0^{\infty} Q_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

kde $Q_{e\lambda}$ je spektrální zářivá energie o vlnové délce λ , $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost a K_m je maximální světelný účinek. Světelnou energii lze také vyjádřit pomocí časového integrálu světelného toku Φ_v přes daný časový interval Δt :

$$Q_v = \int_{\Delta t} \Phi_v dt \quad (2.2)$$

Jednotka světelné energie je lumenosekunda ($\text{lm} \cdot \text{s}$).

- **Zářivý tok**, nebo také zářivý výkon označuje změnu zářivé energie v čase

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}, \quad (2.3)$$

kde Q_e je vyzařovaná, přenášená, nebo přijímaná energie a t je čas. Jednotkou jsou watt (W).

- **Světelný tok** – změna světelné energie v čase

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt}, \quad (2.4)$$

kde Q_v je vyzařovaná, přenesená nebo přijímaná světelná energie a t je čas. Tato veličina je odvozená ze zářivého toku, který je vyhodnocen dle účinku na běžného fotometrického pozorovatele. Světelný tok lze také odvodit ze spektrálního složení zářivého toku:

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} Q_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.5)$$

kde K_m je maximální světelný účinek, $Q_{e\lambda}$ je spektrální zářivý tok, $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost a λ je vlnová délka. Jednotkou světelného toku je lumen ($\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{sr}$).

- **Svítilivost** – hustota světelného toku v prostorovém úhlu v daném směru:

$$\Phi_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad (2.6)$$

kde Φ_v je světelný tok v daném směru a Ω je prostorový úhel. Svítivost lze také odvodit ze spektrálního složení zářivosti ze vztahu:

$$I_v = K_m \int_0^\infty I_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (2.7)$$

kde K_m je maximální světelný účinek, $I_{e\lambda}$ je spektrální zářivost o vlnové délce λ a $V(\lambda)$ je poměrná spektrální světelná účinnost. Tato veličina se vyjadřuje v kandelách ($\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$)

- **Jas** – hustota svítivosti na průmětu plochu v daném směru v daném bodě:

$$L_v = \frac{dI_v}{dA} \cdot \frac{1}{\cos\alpha} \quad (2.8)$$

kde I_v je svítivost, A je plocha a α je úhel mezi normálou k povrchu v daném bodě a daným směrem. Jednotkou jasu je $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Integrováním jasu přes plochu průmětu $A \cdot \cos\alpha$ a prostorový úhel Ω lze také získat světelný tok:

$$\Phi_v = \iint L_v \cos\alpha dA d\Omega \quad (2.9)$$

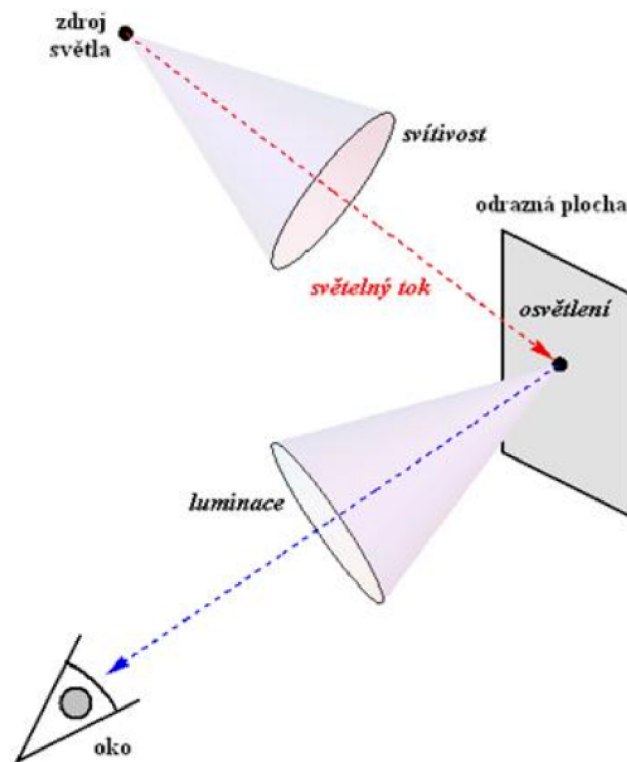
Důležitou jednotkovou, kterou nelze opomenout je **Troland (Td)**. Jedná se o jednotku osvětlení sítnice, vyjádřenou pomocí plochy zornice A (mm^2) a jasu stimulu L ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$) (6) (15):

$$E_r = A \cdot L(td), \quad (2.10)$$

2.4 Flickr

Pojem flickr bývá v různých zdrojích definován jinak. Podle Mezinárodního elektro-technického slovníku je flickr překládán jako „míhání“ a je definován jako **subjektivní dojem nestálosti zrakového vjemu**, který je způsoben světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální složení v čase kolísá. Toto kolísání může být periodické i neperiodické a může být vyvoláno napájecím zdrojem, vlastním světelným zdrojem, či jinými faktory (13).

Kromě samotného termínu flickr definuje slovník také pojmy:



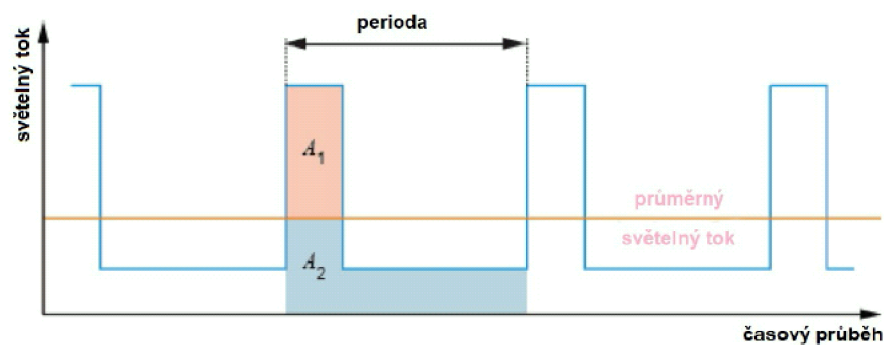
Obr. 2.3: Schématické znázornění vztahu fotometrických veličin (14)

- **Kontrast** – ve smyslu *vnímání* jde o hodnocení rozdílu vzhledu dvou nebo více částí pole, která jsou pozorována současně či následně. Může se jednat o kontrast jasnosti, světlosti, nebo například barvy (13).
- **Kontrastní citlivost** – převrácená hodnota nejmenšího pozorovaného kontrastu jasu (13).
- **Kritická frekvence flikru** (*critical flicker frequency*) – mezní kmitočet střídání podnětů pro daný soubor podmínek, kdy již není flikr pozorovatelný (13),
- **Index flikru** – podíl světelné energie nad střední hodnotou (vypočítaná z velikosti okamžitého světelného toku převyšujícího střední hodnotu světelného toku) a celkové světelné energie za periodu (13).

Matematicky lze index flikru vyjádřit jako:

$$If = (A1)/(A1 + A2), \quad (2.11)$$

kde A_1 je plocha nad střední hodnotou světelného toku a A_2 značí plochu pod jeho střední hodnotou (viz 2.4) (13).



Obr. 2.4: Grafické schéma indexu flickru (13)

S frekvencí modulace světelného toku pracuje také Talbotův zákon, který říká: „*Je-li bod na sítnici buzen světelným podnětem, jehož intenzita se periodicky mění s kmitočtem vyšším, než je kritický kmitočet mihání, je zrakový vjem stejný jako při neměnném podnětu s intenzitou rovnou průměrné intenzitě proměnného podnětu za dobu jedné periody.*” (13)

V kontextu této práce se může jevit důležitější **Ferryho-Porterův zákon**. Ten říká, že kritická frekvence flickru je úměrná logaritmu jasu:

$$CFF = a \cdot \log L + b, \quad (2.12)$$

kde a a b jsou konstanty. Vyplyvá z toho tedy, že s **rostoucí intenzitou stimulu se zvyšuje i vnímání** pozorovatele na flickr (16).

2.4.1 Vznik flickru za přítomnosti mezipharmonických složek

Jak bylo již řečeno, změna světelného toku světelného zdroje způsobuje flickr. Zrakový aparát člověka vnímá nejvíce změny v rozsahu 1 – 35 Hz. Dojde-li v tomto frekvenčním rozsahu k překročení prahové hodnoty světelného toku, naruší se optické vnímání pozorovatele a můžeme hovořit o „**vnímavosti flickru**” (17).

Světelný flickr je dán přenosovou funkcí světelného zdroje a může být způsoben fluktuací napětí. Ke kolísání magnitudy napětí může dojít v případě, že obsahuje

meziharmonické a/nebo subharmonické složky (speciální druh meziharmonických frekvencí). Tyto složky jsou neceločíselnými násobky základního kmitočtu a platí pro ně následující (17):

Harmonické složky: $f = h \cdot f_1$ kde $h > 0$

Meziharmonické složky: $f \neq h \cdot f_1$ kde $h > 0$

Subharmonické složky: $f > 0$ Hz a $f < f_1$

kde f_1 představuje základní frekvenci systému (17). Na Obrázku 2.5 lze vidět příklad signálu s meziharmonickou složkou. Frekvence míhání se nazývá **modulační frekvence** a je charakterizována jako:

$$f_m = |k \cdot f_1 - f_{IH}| \quad (2.13)$$

kde f_{IH} značí meziharmonickou frekvenci a $k \cdot f_1$ je lichá harmonická frekvence nejbližší k f_{IH} . Pokud chceme hovořit o *modulační frekvenci* v souvislosti s kolísáním světelného toku, je lepší použít termín *frekvence flickru* (17).

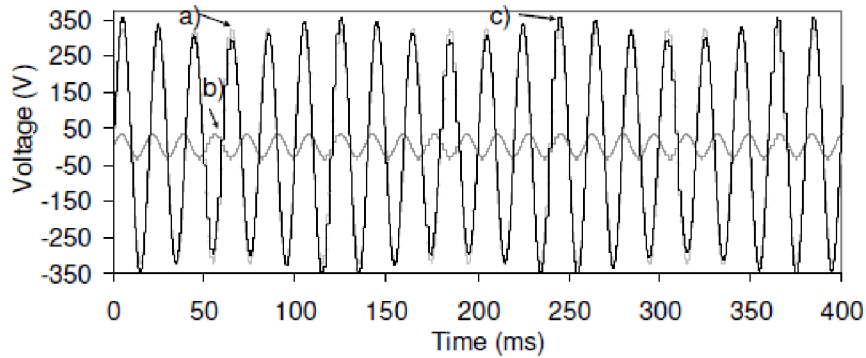
Obvykle je napětí deformováno více než jednou meziharmonickou složkou. Pro účel popsání citlivosti světelných zdrojů meziharmonické frekvence je však lepší uvažovat existenci pouze jedné takové složky. Matematický zápis signálu se základním kmitočtem a jednou meziharmonickou složkou by pak odpovídal:

$$u(t) = U_{1,pk} \cdot [\sin(2\pi f_1 t) + u_{IH,pk} \cdot \sin(2\pi f_{IH} t + \varphi_{IH})] \quad (2.14)$$

hodnota $U_{1,pk}$ představuje základní magnitudu, f_1 základní frekvenci kmitočtu a $u_{IH,pk}$ relativní magnitudu meziharmonické složky, f_{IH} její frekvenci a φ_{IH} fázový úhel meziharmonické složky (17).

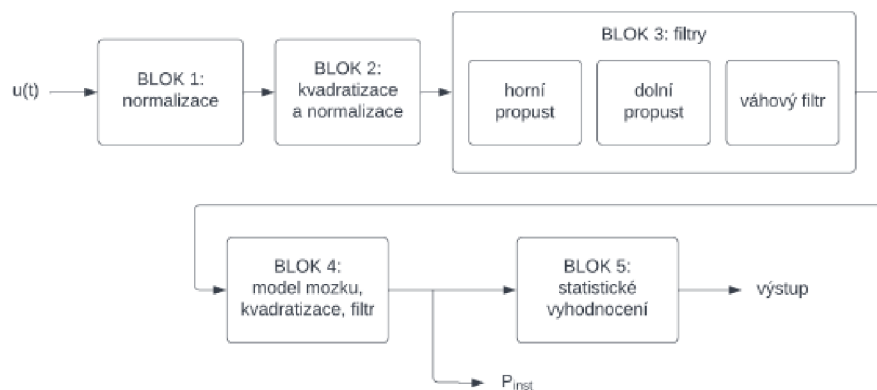
2.4.2 Flickrmetr

Flickrmetr je komplexní zařízení sloužící k měření kolísání napětí způsobující nestabilitu světelných zdrojů, jinak označované jako flickr. Standardní flickrmetr podle normy IEC 61000-4-15 (4) pochází z roku 1986 (update z roku 2010) a od té doby se stal nedílnou součástí standardů elektromagnetické kompatibility i standardů kvality napájení. Řízení stability napájecího napětí bylo totiž jediným způsobem, jak



Obr. 2.5: Ukázka průběhu napětí s mezharmnickou složkou, a) základní frekvence 50 Hz při napětí 230 VRMS, b) mezharmnická složka 58 Hz při 23 VRMS (17)

stabilizovat světelný výkon žárovek a zářivek. Architekturu flikrmetru lze popsat v pěti blocích a rozdělit do dvou částí. První část simuluje odpověď vazby žárovka-oko-mozek (bloky 2, 3 a 4), druhá statisticky analyzuje signál flikru a prezentuje výsledky (blok 5) (18).



Obr. 2.6: Blokové schéma napětového flikrmetru (19)

Samotné bloky mají své specifické funkce (20), (19):

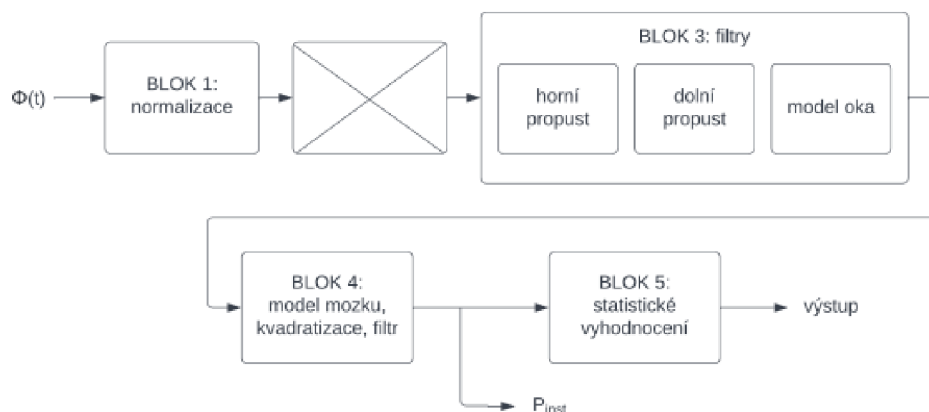
- Blok 1 – normalizace signálu – každých 10 ms vypočítává efektivní hodnotu. Cílem je získat měření nezávislé na napětí.
- Blok 2 – kvadraticke vstupního napětí – získáme signál úměrný okamžitému výkonu, který je spotřebován na žárovce.

- Blok 3 – filtrace signálu – horní propust odstraní stejnosměrnou složku, dolní propust odstraní vysoké frekvence a váhový filtr nám poskytne kombinovanou odezvu žárovky a oka.
- Blok 4 – kvadratizace signálu flikru – zanedbáváme dva po sobě jdoucí rychle stimuly a získáme okamžitý flikr.
- Blok 5 – statistické vyhodnocení – vyhodnocení rušivosti na výstupu.

Žárovky však byly nahrazeny LED osvětlením a rychlým vývojem elektrotechniky a energetiky dochází také ke změnám v sítích (rozšíření spínané elektroniky, odlišná distribuce z větrných elektráren, atd.). Z těchto důvodů lze standardní flikrmetr označit za zastaralý a aktualizace je tedy jednoznačně žádoucí (20).

Světelný flikrmetr

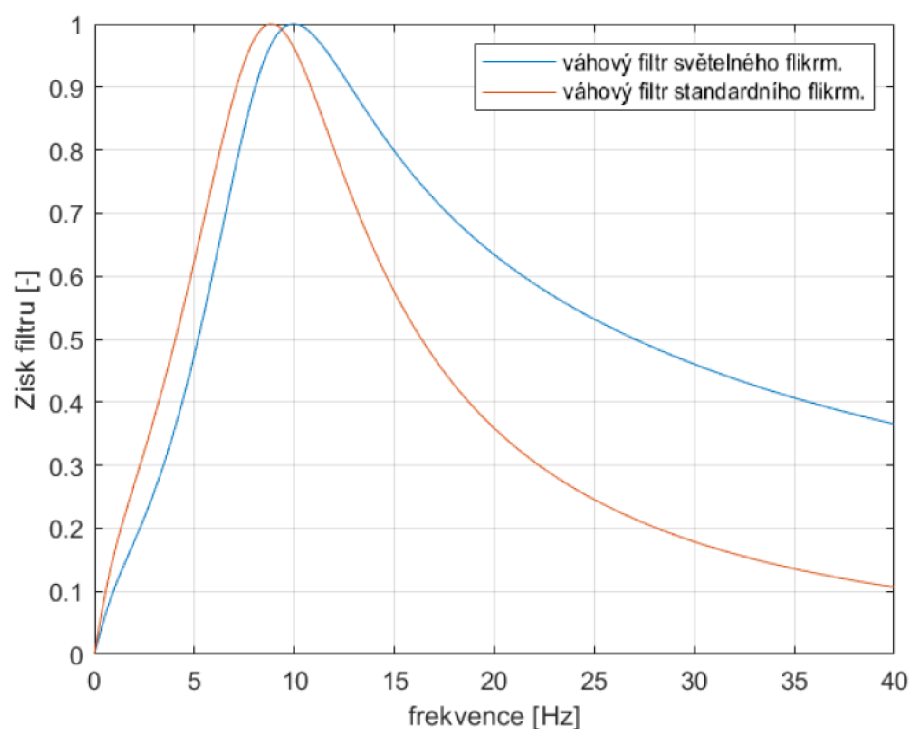
Technická zpráva IEC TR 61547-1 z roku 2015 popisuje tzv. světelný flikrmetr, který vychází z výše popsaného standardního flikrmetru a reaguje na zmíněné nedostatky. **Vstupem již není napětí, ale světelný tok.** Došlo k odstranění části reprezentující žárovku a odebrání bloku 2, který konvertoval právě napětí. Není tedy přítomna závislost na zdroji světla (21).



Obr. 2.7: Blokové schéma světelného flikrmetru (19)

Z bloku 3 byla odstraněna frekvenční odezva žárovky, čímž se změnila frekvenční charakteristika (viz 2.8). Blok 4 zůstává stále beze změny, stejně jako blok 5, který

je i nadále optimalizován pro žárovky. Velkou nevýhodou tohoto způsobu měření je, že je s ním možné zaznamenávat pouze **viditelný flickr** (20, 21).



Obr. 2.8: Porovnání frekvenčních charakteristik váhových filtrů flickrmetrů (19)

Vyhodnocování flickru

V technické zprávě IEC 61547-1 3. vydání (21) lze najít paramentru P_{st}^{LM} , který je indikátorem krátkodobého flickru měřeného světelným flickrmetrem. Slouží k vyhodnocování flickru vzniklého například modulací LED světelných zdrojů, což je jev doprovázející stmívání světelných zdrojů. Tento parametr je od roku 2021 regulován Evropskou unií (22), přičemž byla stanovena limitní hodnota při plném zatížení $P_{st}^{LM} \leq 1$. Tuto hodnotu by měl respektovat každý výrobce svítidel v EU. Další parametr $P_{st}^{LM}(I)$ pak bere v potaz také odolnost svítidla se zdrojem vůči rušení a výkyvům v síti, čehož je ověřováno pomocí generátoru meziharmonického napětí simulujícího rušení v síti. Svítidla se stmívatelným zdrojem by měla splňovat limity pro P_{st}^{LM} i $P_{st}^{LM}(I)$ při plném, polovičním, ale i malém zatížení. U některých stmívatelných LED driverů

totiž dochází právě při nastavení svítidla na nízkou intenzitu ke vzniku nebezpečného flikru (12).

2.4.3 Zrakový vjem rušivého flikru

Subjektivní vjem flikru je kvůli složitosti a komplexnosti zrakového systému ovlivněn mnohými faktory. Důležitým aspektem je anatomie a fyziologie zraku daného jedince, zejména spektrální citlivost oka a jeho adaptační mechanismy. Na vjemu se podílí také parametry sledovaného objektu v prostoru, jako například: jas objektu, jas pozadí (adaptační jas), kontrast, spektrum světla objektu a pozadí, čas trvání vjemu, velikost objektu, umístění objektu do hlavní osy pohledu, pohyb v zorném poli, jasové nerovnoměrnosti objektu a pozadí atp. Další eventuální faktory mohou být z úrovně kognitivní, jako je například pozornost, očekávání, či návyk. Celkovou viditelnost jakéhokoliv objektu lze pak popsat funkcí všech parametrů (5).

Je to právě jasový kontrast, díky kterému dokážeme pomocí zraku získat ze scény velké množství užitečných informací. Oko totiž přirozeně reaguje na nespojitosti a gradienty jasů v zorném poli. Kdyby byla sítnice osvětlena rovnoměrně, nemohli bychom rozeznat v prostoru objekt na základě jeho jasu, nýbrž pouze podle jeho barvy. I když je barevný kontrast méně viditelný než jasový, lze i pomocí něj získat značné množství informací. Z toho vyplývá, že je vjem kontrastu okem složen z kompozice jasů a barev. Jeho velikost je pak dána expozicí určité části sítnice s fotoreceptory, což je ovlivněno velikostí pozorovaného objektu a jeho umístěním ve scéně (5).

Dochází-li k časové, či prostorové změně jasu nebo barevnosti pozorované scény, oko registruje flikr. To je navíc ovlivněno dynamickými vlastnostmi adaptačních mechanismů zraku. Vjem blikání vzniká s časovým zpožděním a rychlost vnímání roste s zvyšujícím se kontrastem jasu objektu vůči pozadí a s růstem jasu předmětu v zorném poli. Doba trvání vjemu je pak ovlivněná hladinou jasu pozadí a dobou trvání světelného stimulu (5).

2.4.4 Periferní flikr

Periferní vidění označuje pozorování obrazu mimo oblast fixovaných očí. V zorném poli lze rozlišit více necentrálních bodů, které spadají pod termín periferního vidění. *Vzdálené* periferní vidění poskytuje informace z okraje zorného pole (90°), *střední* periferní vidění z prostřední části zorného pole a *blízké*, někdy označované jako *paracentrální* nebo *parafoveální* se nachází v blízkosti fixačního centra očí (23).

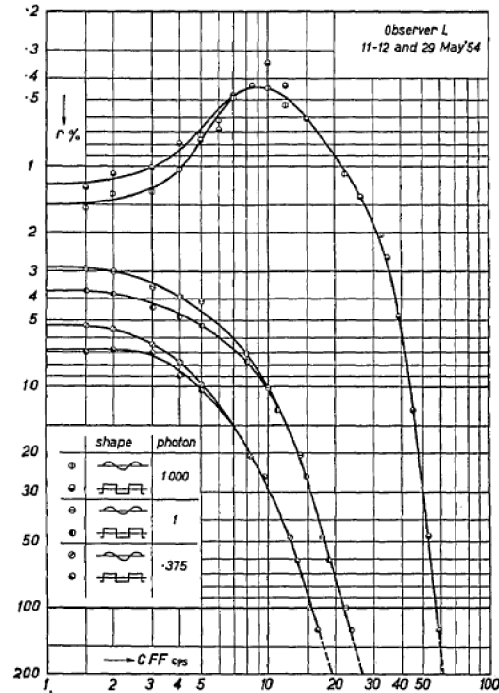
Důvodem rozdílného vidění na okraji zorného pole je různorodá struktura lidského oka, konkrétně sítnice, která obsahuje fotoreceptory (viz 2.1.2). Citlivost na tmu je vyšší v místech poblíž fovei, kde je největší hustota tyčinek. Světlo o nízké intenzitě je viditelné naopak na periférii a ve chvíli, kdy se pokusíme o fixaci na žlutou skvrnu se paprsek ztratí. Také barevné vnímání je odlišné podle umístění obrazu v zorném poli. Umístění paprsku v zorném poli má vliv také na kritickou frekvenci flikru (CFF). Zjednodušeně řečeno, je možné že přímým pohledem neodhalíme flikr o velké intenzitě a vysoké frekvenci, avšak pokud zdroj podnětu začneme pozorovat periferním viděním, pak se pro nás stane viditelným (23).

2.5 Historie experimentů zabývajících se reakcí oka na modulované světlo

Problematikou modulovaného světla se zabývali vědci již na přelomu 50. a 60. let minulého století. Vyšlo najevo, že je vnímavost flikru ovlivněna nejenom frekvencí, ale také jinými faktory, jako je jas, barva světla, či charakter stimulu (23).

De Lange

Nizozemský neurofyziolog **De Lange** zkoumal dynamiku vnímání jasu při různých modulacích světla a zasloužil se o popsání klíčových poznatků. Důležitým předpokladem v De Langových experimentech je, že zrakový systém člověka naznačuje znaky dolnopropustného filtru. Je-li frekvence míhání světla rovna kritické frekvenci při průměrném konstantním jasu, lidské oko zareaguje na každou periodickou změnu



Obr. 2.9: De Lange experiment - kritická frekvence flickru analogického modelu (25)

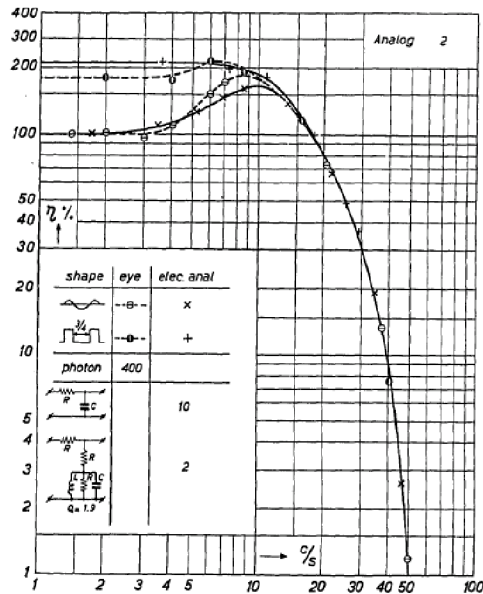
jasu jako lineární systém. Ve svých pracích detailně popisuje měření flickru na analogickém modelu z rezistorů a kondenzátorů, pomocí kterého získal křivku vnímavosti flickru. Ta se stala stavebním kamenem pro váhový filtr v používaném IEC flickrmetru (24).

D.H. Kelly

Další důležitou osobností zkoumající flickr byl americký vědec **D.H. Kelly**. Ten měřil citlivost vizuální odezvy na časově závislé stimuly. Ve svých publikacích prezentuje grafy charakterizující reakci oka na různé frekvence a úrovně osvětlení. Výstupem jeho práce je popis průměrné reakce zrakového systému na světelné stimuly s různým charakterem (viz A.3) (24).

C. Rashbass

Dalším badatelem, který přispěl svým výzkumem k pozdějšímu sestavení flickrmetru byl neurofyziolog Cyril **Rashbass**. Zatímco De Lange sestavuje křivku prahu vidi-



Obr. 2.10: De Lange experiment - kritická frekvence flickru pozorovatele (25)

telnosti flickru v závislosti na intenzitě světla pro symetrické a asymetrické sinusové průběhy, Rashbass popisuje tento vztah jako obecný pro různé tvary průběhů. Nejprve provedl měření pro obdélníkový průběh, aby tak získal práh viditelnosti v závislosti na trvání světelného impulsu. Dále měřil práh viditelnosti dvou krátkých záblesků v závislosti na délce intervalu mezi nimi, načež sestavil tzv. Rashbassův model:

$$\int_0^{\tau} [f(t)]^2 dt \quad (2.15)$$

kde $f(t)$ značí lineárně transformovaný signál po průchodu filtrem a τ je doba integrace, která je delší než trvání stimulu. Rashbass navrhl tuto dobu jako konstantu mezi 150 ms a 250 ms. Jeho rovnice tak dokáže reprezentovat eliptickou charakteristiku, která se podle jeho závěrů nejlépe podobá vnímání flickru lidským okem (24) (26).

2.5.1 E. Hartmann

Studie zabývající se periferním flickrem mají obvykle podobné nastavení experimentu. Například v článku Hartmanna z roku 1979 byl použit klinický perimetr, který

měří oblast zorného pole. Brada a čelo figuranta byly umístěny do opěrky, což fixovalo pozici hlavy. Jako zdroj flickru posloužil otvor v polokouli, který byl zezadu osvětlen. V případě tohoto experimentu bylo využito žárovky s wolframovým vláknem. Fixační bod o malém průměru byl promítnut na stěnu polokoule. K modulaci testovacího podnětu byl použit elektrooptický modulátor s tzv. Pockelovým článkem a tvar stimulu byl sinusový či obdélníkový (27).

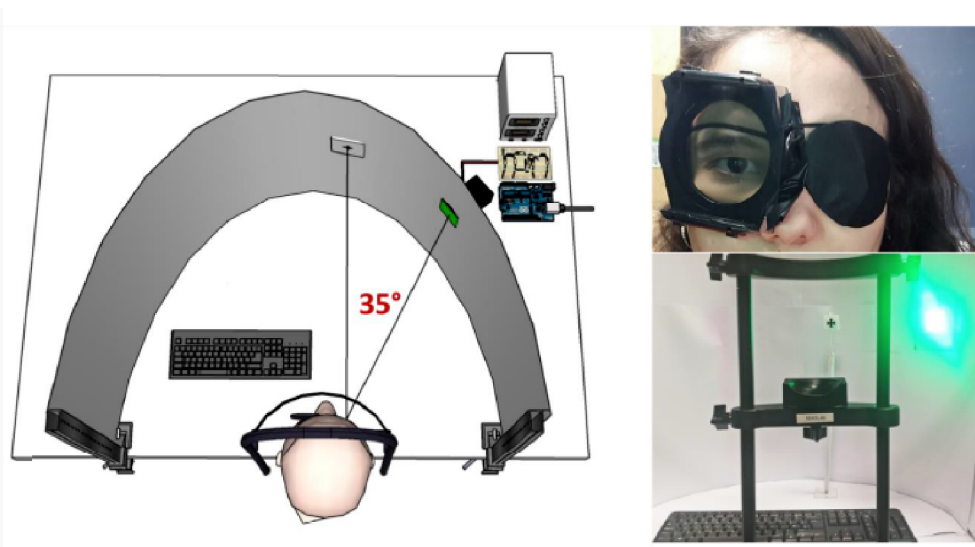
2.5.2 W. Tyler

Ve výzkumu z roku 1985 bylo zjištěno, že je pokles CFF s rostoucí excentricitou ovlivněn hustotou gangliových buněk (28). V dalších studiích bylo však prokázáno, že stimulace stejného množství čípků v každém místě sítnice nevedlo ke stejným hodnotám CFF. Ve skutečnosti došlo prý CFF narůstal přibližně do 40° zorného pole, načež následoval pokles (29). V roce 1990 Tyler spolu s Hamerem již použili LED s vlnovou délkou 660 nm. Cílem bylo stimulovat čípky citlivé na červené světlo a ověřit tak Ferry-Porterův zákon pro různý typ fotoreceptoru. Periferní stimulus byl umístěn temporálně do 35° horizontálního zorného pole. Autoři zmiňují, že v předchozích experimentech vyšla právě ve zmíněné oblasti citlivost největší, proto byl zvolen ke stimulaci tento úhel (30).

2.5.3 M. Fernandez-Alonso

Aktuálnější výzkum z roku 2023 byl inspirován právě ověřeným nastavením experimentu Tylera a Hamera (30). Zdrojem osvětlení byly elektroluminiscenční diody, které byly umístěny za difuzor. Ten byl umístěn taktéž v úhlu 35° od pravého oka figuranta a měl za úkol rozptylovat světlo. Množství světla dopadajícího na sítnici bylo ovlivňováno filtry, které byly nad okem figuranta (viz 2.11) a k udržení konstantní velikosti zornice byly použity hydrochloridové oční kapky (31).

V případě experimentu popsaném ve výzkumné části této diplomové práce je měřen periferní flickr na osvětlené desce stolu. Abychom se přiblížili kancelářským podmínkám, je zrak "fixován" pouze bílým papírem. Není tedy za potřebí měřit úhel,



Obr. 2.11: Nastavení experimentu periferního flikru (31)

ve kterém figurant flikr registruje, jako tomu bylo ve výše zmíněných experimentech.

2.6 Metody určování prahu viditelnosti flikru

Před zahájením výzkumné části je potřeba prozkoumat také metody samotného měření periferního flikru, zvážit jejich výhody i limitace a provést výběr vhodného přístupu pro náš experiment.

Metoda schodišť

Jednou z metod, která připadá v úvahu je **metoda schodišť (MS)**. Ta je založena na rozlišování mezi dvěma podněty –jedním pulzujícím a druhým stálým. Frekvence pulzujícího světla se mění v závislosti na správnosti odpovědi figuranta. Pokud subjekt třikrát po sobě odpoví správně, zvýší se frekvence podnětu o 2 Hz. V případě jedné nesprávné odezvy se frekvence sníží o 2 Hz. Test je ukončen po osmi změnách frekvence. Kritická frekvence flikru (CFF) je vypočtena jako průměr posledních šesti hodnot změn frekvence. Mělo by se jednat o poměrně rychlou metodu s dobrou opakovatelností (32).

Metoda limitů

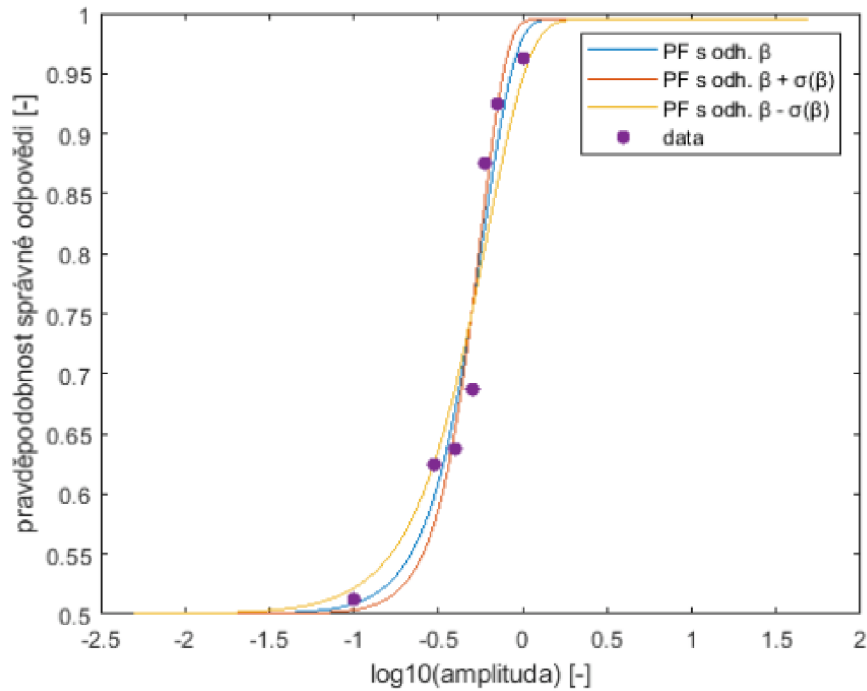
Často se při podobném měření používá také **metoda limitů (MOL)**. Během MOL se postupně zvyšuje (z 10 Hz), či snižuje frekvence flikru (z 60 Hz), dokud figurant nezahlásí konstantní/ blikající stimul. Aby se snížila variabilita testu, je pokus opakován, dokud standardní odchylka tří po sobě jdoucích iterací není menší než 3 Hz. Práh je poté vypočten jako průměr těchto tří iterací. Pokud toto kritérium není splněno, je experiment dokončen po 9 iteracích. Prahová hodnota je pak vypočtena jako průměr všech 9 hodnot. Hlavní výhodou této metody je rychlost experimentu, což souvisí také s nízkou únavou zraku figurantů. Na druhou stranu je tato metoda považována za méně přesnou a náchylnou k subjektivnímu zkreslení (32).

Metoda konstantních stimulů

Další metodou, která je dle předchozích experimentů považována za nejpřesnější je **metoda konstantních stimulů (MCS)**. Flikr o různých intenzitách je dvacetkrát prezentován figurantovi, vždy v náhodném pořadí a poté je vypočteno procento správných odpovědí. Výsledky jsou proloženy logistickou funkcí, čímž získáme psychometrickou křivku, ze které se definuje prahová hodnota na 80% úspěšnosti detekce. Dlouhá doba měření však vede k únavě figurantů, a proto využití této metody není příliš oblíbené (32).

Metoda ručního nastavování

Podle této metody je figurantovi promítnut jeden blikající stimul s počáteční intenzitou (magnitudou modulace). Ta se obvykle volí jako hodnota těsně nad očekávaným prahem. Figurant si pak sám bez časového omezení upravuje intenzitu, dokud nenajde svůj práh viditelnosti. Obvykle figurant opakuje tento úkol vícekrát pro několik frekvencí, přičemž pořadí frekvencí je náhodné. Práh viditelnosti lze získat z několika odpovědí pro každou frekvenci jako průměr nebo medián (33).



Obr. 2.12: Psychometrická funkce (19)

Metoda fusion-to-flicker

V jiném zdroji byla popsána metoda fusion-to-flicker. U této metody je zajímavé, že skutečné měření začíná od spodní hranice modulace, kdy není figurant schopný rozeznat flickr. Tato oblast je označena jako „fusion”. Figurant si tak na znatelné blikání světla nemůže zvyknout a následné odhalení flickru by mělo být méně zaujaté (34).

Metoda Yes/No

Výběr vhodné metody je také podmíněn zdrojem světla. V předchozím experimentu, který probíhal ve stejné laboratoři, se pracovalo se dvěma světelnými body, mezi kterými figurant vybíral ten, na kterém registruje flickr (19). V našem případě budeme pracovat pouze s jedním zdrojem světla, tudíž úkolem figuranta bude pouze ohlásit, zda flickr postřehl, či nikoliv. Tento přístup je v některé literatuře označován jako „Yes/No“ (31).

3 Výzkumná část

Ve výzkumné části je popsán průběh samotného experimentu včetně cílů, výzkumných předpokladů a metod měření.

3.1 Cíle a výzkumné předpoklady

Hlavním cílem této diplomové práce je **zkoumání lidského prahu viditelnosti flikru** pro různé intenzity světla při různých frekvencích, což by mohlo být přínosem pro zmapování vnímavosti flikru a pochopení závislosti osvětlení a proudu. Neméně důležité je ale stanovení i dílčích úkolů:

1. Seznámit se s problematikou flikru obecně, dále změřit práh viditelnosti flikru, seznámit se s běžně užívanými metodami, které se k měření používají a vybrání vhodné metody.
2. Vypracovat literární rešerši o studiích věnovaných viditelnosti flikru a perifernímu vidění.
3. Na vhodném počtu figurantů provést měření prahu viditelnosti při několika vhodně zvolených intenzitách světla v podmínkách, které zohledňují periferní vidění.
4. Naměřená data vhodným způsobem vyhodnotit.

Pro zdárné splnění stanovených cílů jsou brány v potaz následující předpoklady:

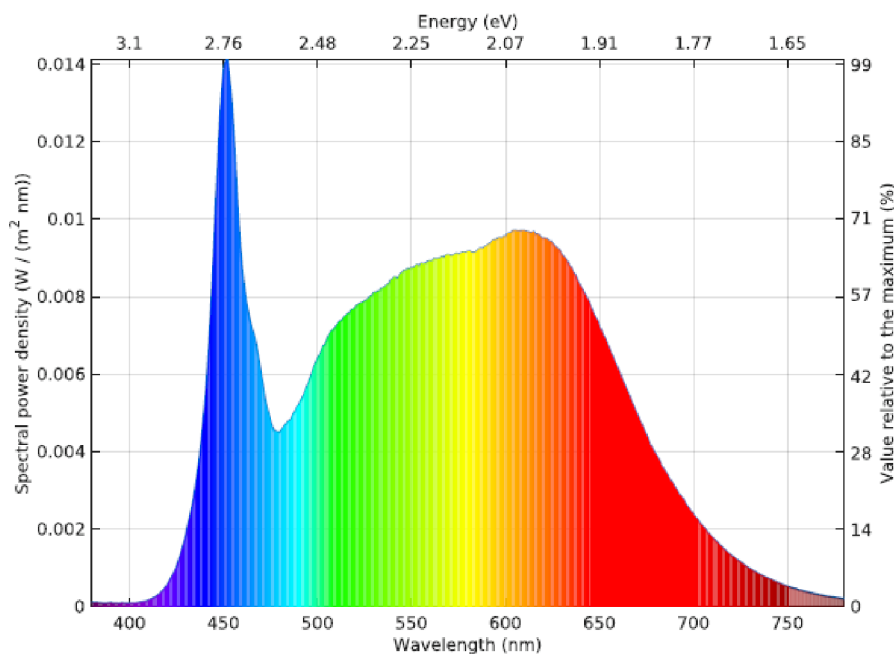
1. Uvažujeme, že s nižší intenzitou osvětlení klesá citlivost na flikr.
2. Citlivost na periferní blikání lehkosti vrcholí kolem 10 Hz.

3. Předpokládáme, že v centrálním vidění je práh viditelnosti nižší než v periferním vidění (23).

3.2 Metodika výzkumu

3.2.1 Použitá experimentální zařízení

Pro provedení experimentu bylo použito celkem 30 ks **elektroluminiscenčních diod (LED)** zapojených sériově ve čtyřech kanálech. Tyto LED vyzařují teplo o velikosti 4000 K a jejich spektrum je k nahlédnutí na Obrázku 3.1. Svítidlo délky 160 cm je zavěšené 100 cm nad stolem a je vyrobeno z hliníkového plechu, který má účel výkonného chladiče. Odvádí přibližně 20 – 50 W tepla, vznikajícího během provozu. Kromě toho jsou diody zakryté matným pískovaným sklem, které slouží k rovnoměrnému rozptýlení světla po pracovní desce stolu. Vliv použití tohoto matného skla je na LED spektrum zanedbatelný.



Obr. 3.1: Spektrum LED, 4000 K (35)

Jelikož je světelný výstup LED přímo úměrný protékajícímu proudu, k jejich

ovládání bylo potřeba zapojit zdrojovou měřící jednotku **Keithley SourceMeter 2612B**, pomocí které je možné proud řídit. Výsledné osvětlení tak bylo nakalibrováno pro první experiment na 1 000 lx a pro druhý na 500 lx. K tomuto účelu bylo použito zařízení PhotoResearch SpectraScan Pr740.

Další důležitou částí obvodu je podpůrný zdroj napětí **HP6030**, který má za úkol držet konstantní napětí. Oba dva moduly byly řízeny počítačovým programem, který byl vytvořen doktorem Kukačkou a studentem Hergeselem (19) pro účely předešlých experimentů měření foveálního flikru.

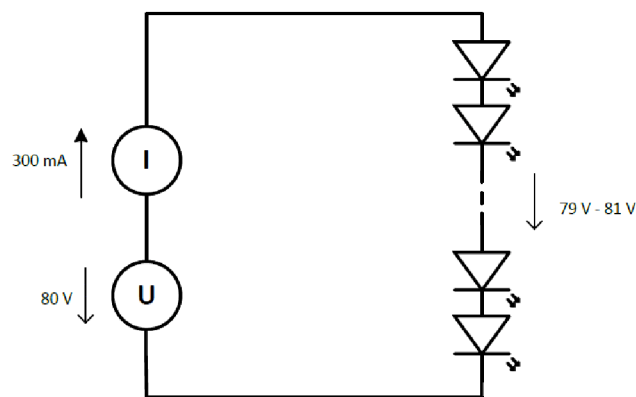


Obr. 3.2: Řídicí program po zahájení experimentu

Řídicí program

V rozhraní programu (viz A.2, 3.2) je před zahájením měření potřeba nastavit hodnotu jasu (v našem případě 500 cd/m², či 1000 cd/m², testované frekvence jsou již automaticky předvyplněny. V průběhu experimentu je vidět hodnota právě promítané frekvence, která je volena programem v náhodném pořadí a aktuální amplituda modulace stimulu. Ta je předem fixně nastavena pro každou frekvenci, a to tak, aby

byl figurant schopen flikr jednoznačně rozeznat. Obsluha má k dispozici celkem čtyři tlačítka pro změnu amplitudy modulace – malé snížení, malé zvýšení, velké snížení a velké zvýšení. V případě malých kroků se jedná o změnu o 5 % z aktuální hodnoty a v případě velkých kroků o 20 %. Ve chvíli, kdy je dosaženo kritické prahové hodnoty, lze hodnotu zaznamenat tlačítkem. Po uložení 8 hodnot dojde k automatickému ukončení experimentu a exportu dat do *csv* souboru. Během měření je možné dle potřeb figuranta udělat přestávku. K tomu účelu slouží tlačítko, které zcela vypne modulaci světla.



Obr. 3.3: Elektrické schéma zapojení experimentálních zařízení (zdroj: autor)

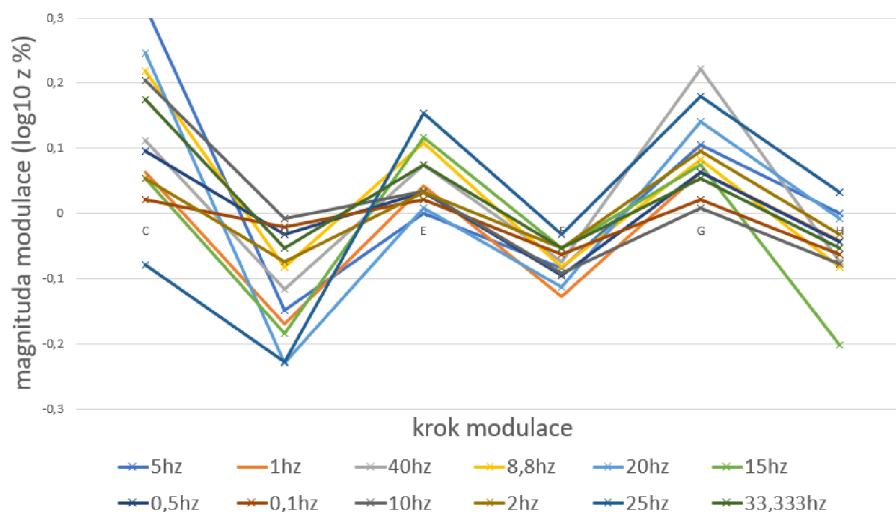
3.2.2 Charakteristika výzkumného souboru

Data byla získávána z měření s 29 figuranty, kteří se již podíleli i na jiných experimentech v laboratoři, týkajících se citlivosti flikru. Celkem se jednalo o 19 mužů a 10 žen. Všichni prošli úvodním měřením, kdy jim byl měřen barvocit, ostrost zraku a kontrastní citlivost. K měření barevného vidění byl použit Farnsworth-Munsellův test 100 odstínů a ostrost zraku byla ověřena pomocí Snellenovy tabule. K měření kontrastní citlivosti pak byly využity tyto testy: Pelli-Robsonův test s písmeny a s glyfy ve tvaru podkovy a test se sinusovou mřížkou na pěti různých prostorových frekvencích. Tabulka s daty je k nahlédnutí v příloze Tab.B.1. **Mezi figuranty nebyla odhalena žádná významná odchylka kvality zraku, která by vylučovala účast v experimentu.** Kritická frekvence flikru při 5 % stimulu byla

u většiny figurantů mezi 30 – 45 Hz, což je považováno za normální. Jedna osoba měla CFF rovnu 25 Hz, což ale nebyl důvod k vyřazení z experimentu. Všichni figuranti se zúčastnili měření při jasové úrovni $E_0 = 1\,000\text{ lx}$, druhého měření o snížené jasové úrovni $E_0 = 500\text{ lx}$ se však z logistických důvodů zúčastnilo pouze 26 osob.

3.2.3 Samotný experiment

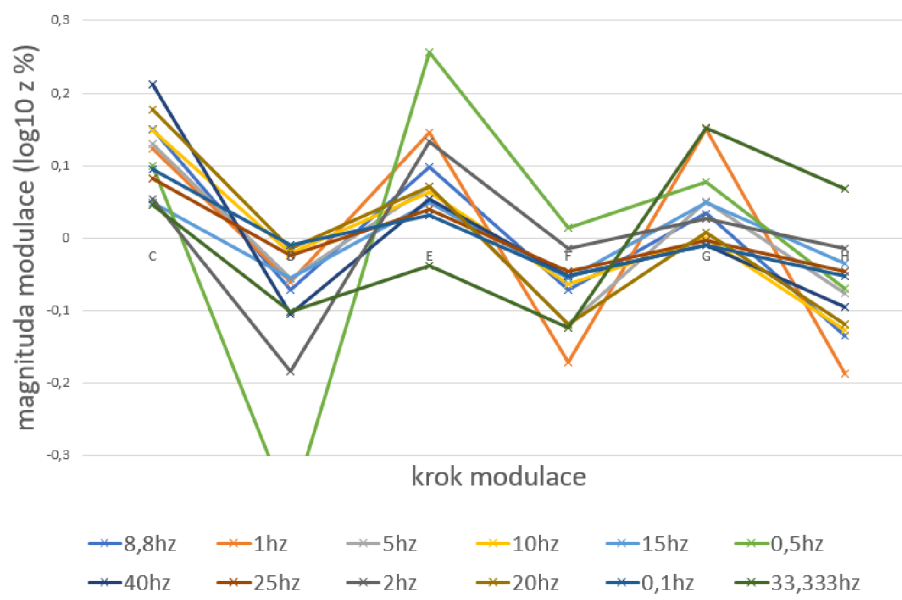
Během tvorby experimentu jsme byli inspirováni různými metodami zmíněnými v teoretické části (Obrázek 2.6). Našimi hlavními požadavky byly: relevantnost výsledků, opakovatelnost a přiměřená časová náročnost. Oproti původním přístupům bylo pracováno s předem určenými fixními frekvencemi, a to s 0,1 Hz; 0,5 Hz; 1 Hz; 2 Hz; 5 Hz; 8,8 Hz; 10 Hz; 15 Hz; 20 Hz; 25 Hz; 33,333 Hz a 40 Hz. Podle odpovědí figuranta a jeho schopnosti rozpoznat flikr o dané frekvenci se tedy upravovala pouze intenzita stimulu. K tomu účelu byl vytvořen doktorem Kukačkou program (k nahlédnutí v příloze A.2) v prostředí Visual Studio, který umožňoval zvyšovat či snižovat amplitudu modulace po velkých i malých krocích, tak aby bylo hledání prahu rychlé, ale zároveň co nejvíce přesné. Přesný průběh hledání prahu viditelnosti flikru je rozepsán níže v kapitole *Průběh měření* (3.2.3).



Graf 3.4: Zkušební měření, hystereze - figurant 1, první pokus

Zkušební měření

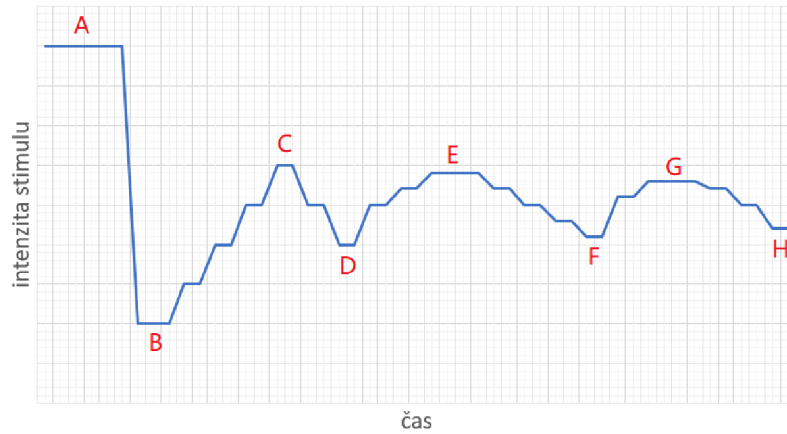
Pro hladký průběh skutečného měření byl proveden nejprve zkušební test na dvou figurantech, kdy byly stanoveny výchozí parametry a rozvrhnut potřebný časový rámec měření. Původně bylo plánováno všechny frekvence zopakovat dvakrát. Od toho však bylo upuštěno po zobrazení výsledků zkušebního měření. Oba figuranti vykazovali zřejmou únavu a sníženou pozornost ke konci měření. To totiž v celé své délce trvalo přes hodinu, což se ukázalo jako příliš dlouhý čas pro koncentraci na míhání světla na osvětlené ploše. Na Obrázku 3.4 lze vidět, jak se postupně zužuje rozsah prahu citlivosti v posledních naměřených krocích. V druhé sadě měření frekvencí (Obrázek 3.5) je určení prahu mnohem méně jednoznačné. Obdobný průběh byl zaznamenán i u druhého figuranta.



Graf 3.5: Zkušební měření, hystereze - figurant 1, druhý pokus

Průběh měření

Experimenty probíhaly v zatemněné laboratoři (Obrázek 3.7) s kalibrovaným LED zdrojem světla, které osvětlovalo pracovní stůl s čistým bílým papírem, jež figurant pozoroval. Jasová mapa z pohledu pozorovatele je znázorněna na Obrázku A.1



Obr. 3.6: Metoda schodišť (zdroj: autor)

v příloze. V místnosti nebyl jiný signifikantně viditelný světelný zdroj, který by ovlivňoval figurantův zrak. Stůl s notebookem, který obsluhovala osoba řídící experiment, byl oddělen neprůsvitným závěsem. Toto opatření bylo zavedeno z toho důvodu, aby se zabránilo případnému negativnímu vlivu dlouhodobého pozorování flikru při opakovaném měření.



Obr. 3.7: Laboratoř FM TUL, osvětlený stůl 1 000 lx, stínící závěs (zdroj: autor)

Figurant byl usazen na židli s předem danou vzdáleností od stolu a dostal nejprve instruktážní papír s popisem experimentu. Během čtení zároveň probíhala 5 minutová adaptace na světelné podmínky v laboratoři. V prvním experimentu byl

stůl osvětlen **1 000 lx**, v druhém pak **500 lx**. Poté byl figurant vyzván, aby sledoval bílý papír na stole, který tak fixoval jeho zrak, a započalo měření. Jednotlivé níže popsané kroky jsou viditelné také na schématu (Obr. 3.6):

1. Byl promítnut stimul s vysokou intenzitou stimulu o náhodně vybrané frekvenci (z výše zmíněných). Figurant tak spolehlivě detekoval flickr a věděl, na jakou frekvenci míhání se soustředit. Na schématu odpovídá bodu A.
2. Následně byla intenzita snížena hluboko pod očekávaný práh tak, aby nebyl flickr postřehnutelný a figurantovo oko se před další detekcí neadaptovalo. Tímto přístupem jsme se inspirovali právě u dříve zmíněné metody fusion-to-flicker (34). Odpovídá bodu B.
3. Intenzita byla po krocích zvyšována do té doby, než figurant opět zaregistroval flickr. Odpovídá bodu C.
4. Intenzita byla snižována, dokud figurant nepřestal vidět flickr. Viz bod D.
5. Předěšlé dva body se opakují. Přísluší bodům E – H.

Jako podnět bylo použito sinusově modulované světlo:

$$E(t) = E_0 \left(1 + \frac{A}{100} \sin(2\pi f_m t) \right), \quad (3.1)$$

kde $E(t)$ odpovídá intenzitě osvětlení desky stolu v čase, E_0 je průměrné osvětlení, A značí intenzitu stimulu v % a f_m je frekvence stimulu v Hz. V případě potřeby figuranta bylo možné přerušit měření flickru krátkou přestávkou s konstantním osvětlením. Experiment obvykle trval kolem 45 minut.

3.3 Analýza výzkumných dat

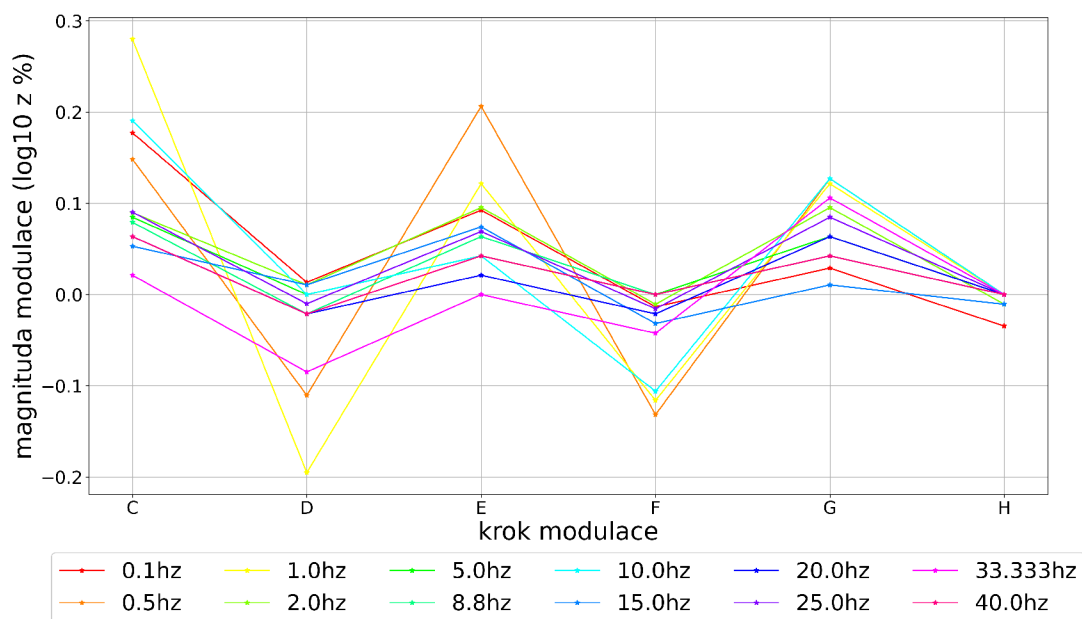
Po ukončení měření se automaticky vyexportoval soubor CSV (viz ukázka B.2) se všemi amplitudami modulací (A-H) pro příslušných 12 frekvencí v čase. V hlavičce souboru byl zaznamenán čas a datum měření, nebo použité osvětlení, což jsou

parametry, které byly potřeba k rozdělení figurantů do pozorovaných skupin. Obsahoval také informaci o rozsahu osvětlení na kanál (lx), rozsahu proudů (mA), zvýšení vstupního napětí (V), vzorkovací frekvenci stimulu (vzorek/sekunda), době trvání stimulu a o rozsahu měření pro signál z fotodiod (V).

Pilotní data byla nejprve zkušebně zpracovávána v tabulkovém procesoru **Excel** a následně v integrovaném vývojovém prostředí **PyCharm**, aby byla ověřena správnost postupu při vývoji programu. Další zpracovávání dat už probíhalo pouze v prostředí PyCharm s verzí programovacího jazyku Python 3.9.

3.3.1 Hystereze

Obdobně jako tomu bylo v pilotním měření, byla také pro výzkumná data nejprve vykreslena **hystereze**. Jednotlivé amplitudy modulace naměřené v bodech C – H byly zlogaritmovány a následně byl pro každou frekvenci vypočten medián, který se odečetl od nuly.



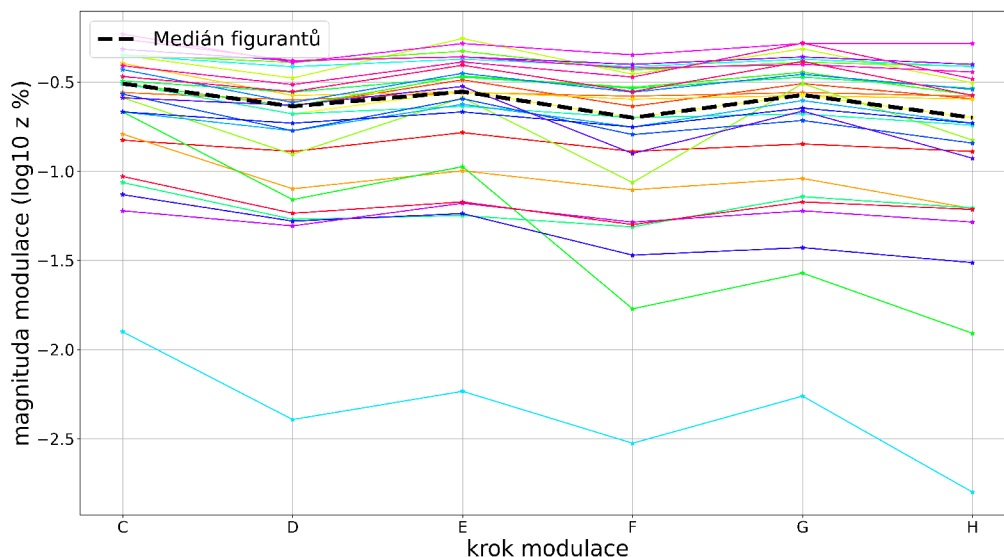
Graf 3.8: Hystereze prahu viditelnosti, figurant 24, 1 000 lx

Pro výpočet logaritmu byla použita knihovna *math*. Vstupním datům byl změněn datový typ na *float* s šestnácti desetinnými místy. Kromě toho musely být

desetinné čárky ve vstupních datech nahrazeny za tečky. Funkcí *statistic.median()*, jsme následně získali medián jako float hodnotu reprezentující prostřední hodnotu vstupního pole (vypočtené logaritmy).

Na křivce je znatelné hledání prahu v postupných krocích pro všechny frekvence. Na Grafu 3.8 je dobře viditelné, jak se figurantovo hledání prahu s přibývajícím kroky zužuje - zpřesňuje, přesně tak jak metoda schodišť předpokládá.

Zajímavý je také graf **hystereze pro jednotlivé frekvence**, na kterém jsou naopak všichni figuranti (Graf 3.9). Lze si všimnout, že pro některé figuranty se s přibývajícím kroky citlivost na flickr snižovala. To mohlo být zapříčiněno pravděpodobně únavou, či sníženou pozorností ke konci měření, nicméně průběh hledání prahu pro valnou většinu figurantů probíhal podle očekávání.



Graf 3.9: Hystereze prahu viditelnosti, 15 Hz, 1000 lx, všichni figuranti

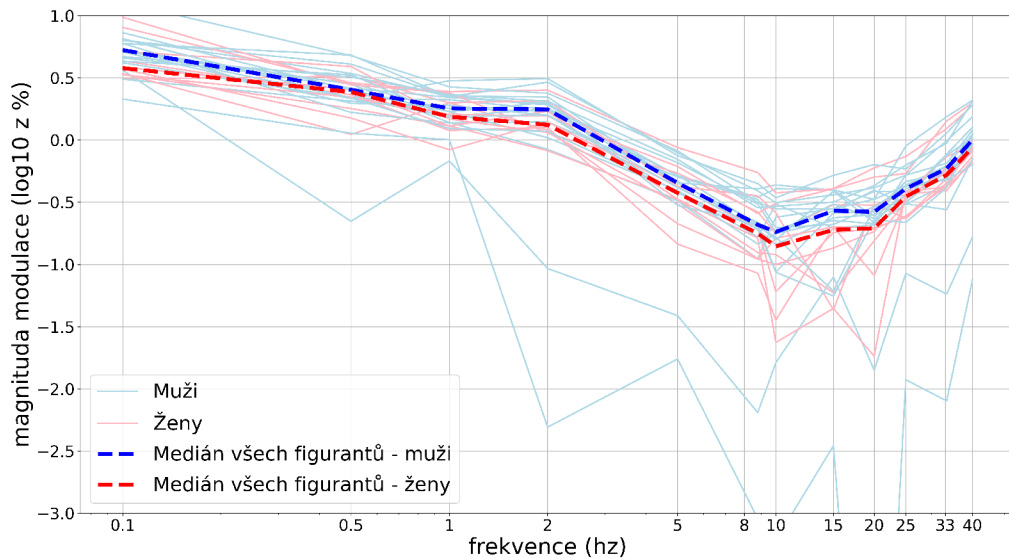
3.3.2 Křivka prahu viditelnosti

Dále byly vykresleny prahy viditelnosti všech figurantů pro zmíněných 12 frekvencí, čímž vznikla **křivka prahu viditelnosti**. Jednotlivé prahy pro každého figuranta jsou vypočteny po vzoru metody schodišť (Obrázek 2.6) jako medián z posledních šesti naměřených hodnot změn intenzity stimulu. Ze všech prahů byl následně vykreslen celkový medián (viz Graf 3.10, Graf 3.11). Při vykreslování grafů byl brán

v úvahu nejprve **aritmetický průměr**, jakožto součet všech naměřených hodnot dělený počtem vzorků (36):

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} \quad (3.2)$$

kde N značí počet figurantů, kterým byl měřen práh viditelnosti flickru a X_i jsou proměnné, či-li naměřené hodnoty prahu. Ten je však příliš citlivý na odlehlé hodnoty, což může vést k nadhodnocování vypočteného prahu viditelnosti. Rizikovou hodnotou by mohl být zejména bod C (3.6), jelikož stoupání z podprahového bodu B na bod C je prováděno z důvodu časové úspory po větších krocích. Toto zkreslení lze eliminovat zvolením mediánu na místo průměru.



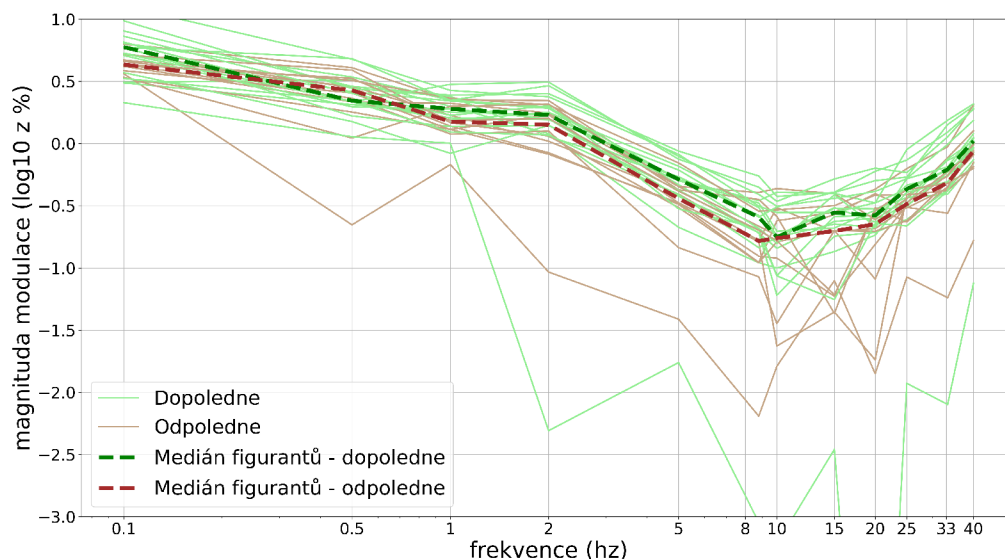
Graf 3.10: Porovnání prahu viditelnosti mužů a žen, 1000 lx

Medián, jakožto střední hodnota (nebo jako průměr ze dvou hodnot nejbližě středu v případě sudého počtu prvků), je odolnější vůči extrémním hodnotám (tzv. outlierům). Pro lichý počet vzorků $n = 2k + 1$ je definován jako (36):

$$\tilde{X} = x_{\frac{n+1}{2}} \quad (3.3)$$

Pro sudý počet vzorků $n = 2k$:

$$\tilde{X} = \frac{1}{2}(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) \quad (3.4)$$



Graf 3.11: Porovnání prahu viditelnosti podle denní doby, 1000 lx

Vypočtené mediány i průměry včetně směrodatné odchylky pro 12 frekvencí a pro obě jasové úrovně jsou k nahlédnutí v Tabulce 3.1.

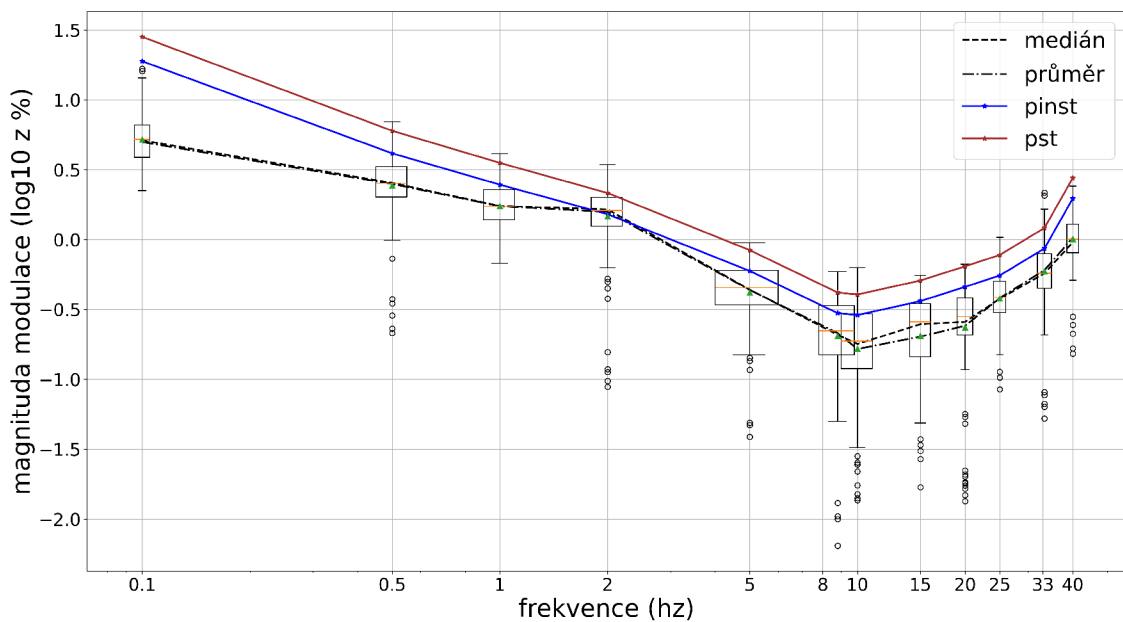
Názvy výstupních souborů CSV z měření obsahují klíčové znaky, pomocí kterých byla data rozdělena do pozorovaných skupin: 1 000 luxů/500 luxů, ženy/muži a odpoledne/dopoledne, přičemž byla později vyhodnocována jejich statistická významnost.

Tab. 3.1: Naměřené hodnoty prahů viditelnosti v $\log_{10} z \%$ s průměry, mediány a směrodatnou odchylkou

f(Hz)	$E_0 = 500 \text{ lx}$			$E_0 = 1000 \text{ lx}$		
	AP	MED	SMODCH	AP	MED	SMODCH
0,1	0,744	0,750	0,172	0,692	0,707	0,161
0,5	0,427	0,482	0,174	0,360	0,403	0,246
1	0,254	0,227	0,166	0,225	0,228	0,149
2	0,182	0,189	0,180	0,080	0,203	0,524
5	-0,444	-0,430	0,244	-0,435	-0,372	0,359
8,8	-0,707	-0,593	0,339	-0,789	-0,681	0,548
10	-0,784	-0,705	0,296	-0,887	-0,752	0,563
15	-0,700	-0,642	0,293	-0,764	-0,626	0,446
20	-0,597	-0,625	0,236	-0,851	-0,599	1,146
25	-0,423	-0,428	0,184	-0,480	-0,434	0,332
33,333	-0,233	-0,227	0,274	-0,304	-0,254	0,425
40	0,0710	0,0509	0,1929	-0,0429	-0,0283	0,2930

3.3.3 Krabicový graf (boxplot)

Pro prahovou křivku vypočtenou z mediánů všech figurantů byl následovně vykreslen **krabicový graf (boxplot)**, který vizualizuje data pomocí kvartilů. Jak je vidno na Obrázku 3.12, všechny frekvence jsou propojeny čárkovanou čarou značící výsledný medián, a čerchovanou čarou, která opisuje průměr. Jako v předešlých případech byla pro vykreslení grafu použita knihovna *matplotlib.pyplot* s metodou *boxplot*. Data jsou porovnána s prahovými hodnotami stanovenými **světelným flickrem** - hodnotou P_{st} jako krátkodobý flickr a P_{inst} reprezentující okamžitý flickr (21). Tato práce se zabývá měřením viditelnosti flickru, zatímco parametr P_{st} může být chápán spíše jako hodnota popisující dráždivost flickru. Ta je definována jako „maximální hodnota kolísání jasu (či spektrálního rozložení), která vyvolá flickr, jež není pro vybraný vzorek populace nekomfortní (21)”. V kontextu této práce lze tedy



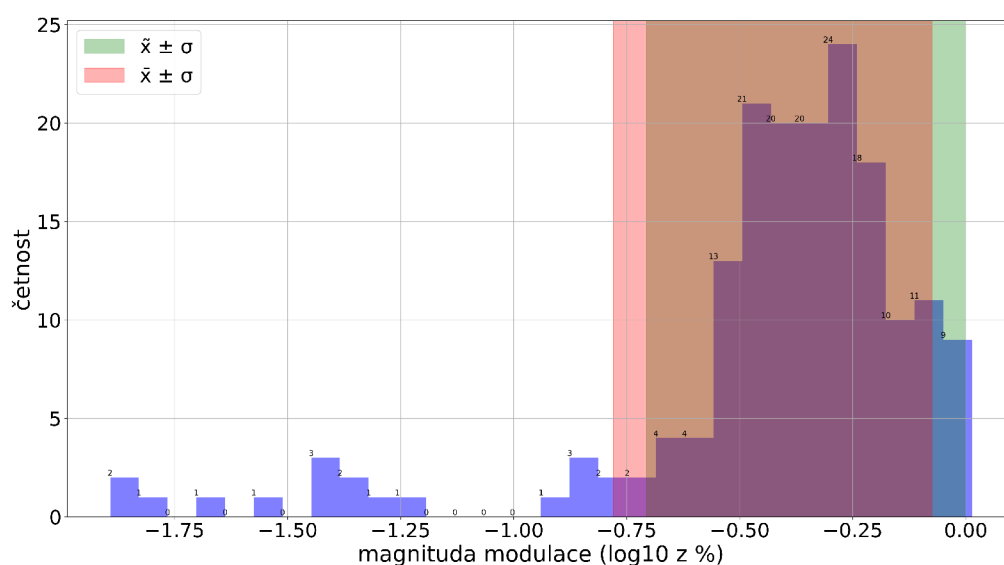
Graf 3.12: Boxplot prahové křivky, 1000 lx

zjednodušeně říct, že prahu viditelnosti je dosaženo při první registraci mihotání světla, kdežto o dráždivosti mluvíme až ve chvíli, kdy jsme blikajícím světlem vyrušeni od nějaké činnosti. To je důvod proč jsou hodnoty krátkodobého flickru nižší než hodnoty okamžitého flickru. Na první pohled je však patrné, že naměřené prahy čítají

znatelně nižších hodnot než obě předepsané hodnoty pro světelný flikrmetr. Z toho lze usoudit, že jsou požadavky normy na osvětlení značně podhodnocené a bylo by vhodné je zaktualizovat.

3.3.4 Histogramy

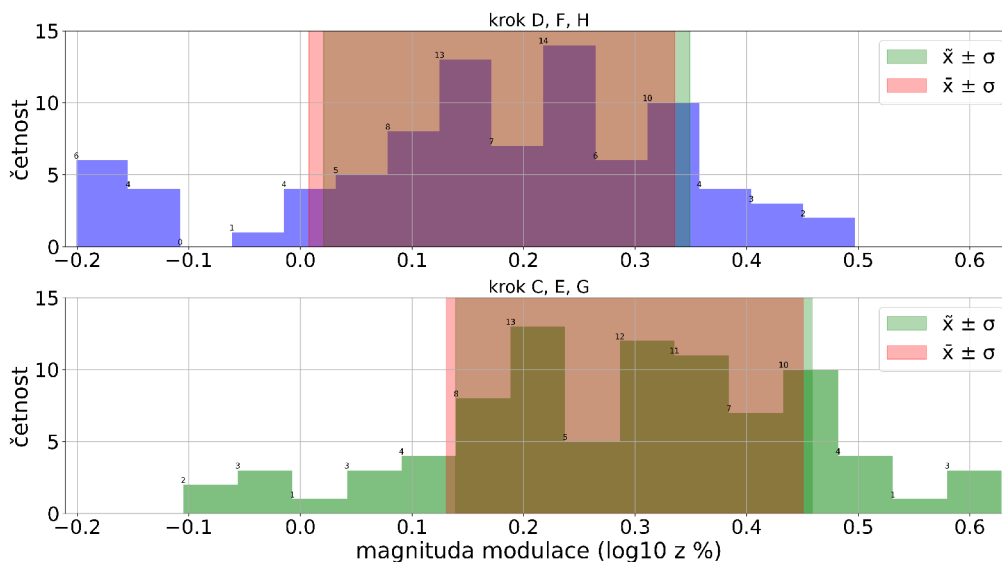
Užitečné informace poskytly také histogramy, které slouží ke grafickému znázornění **distribuce dat v námi určených intervalech**. Jako první byl vykreslen histogram prahů viditelnosti flikru naměřených u všech figurantů v krocích C – H, na kterém je viditelné grafické srovnání celkového průměru a jeho rozptylu (červený obdélník), mediánu s rozptylem (zelený obdélník) a jejich průsečík (viz 3.13).



Graf 3.13: Histogram všech kroků pro 5 Hz, 1000 lx

Na Grafu 3.14 je vidět porovnání prahu viditelnosti flikru o frekvenci 1 Hz mezi "stoupajícími" a "klesajícími" kroky. Body C-E-G, byly hledány zvyšováním amplitudy modlace dokud figurant flikr nezaregistroval, zatímco D-F-H byly získány snižováním intenzity do chvíle, kdy pro figuranta přestal být flikr znatelný a viděl pouze konstantně osvětlenou plochu. Je patrné, že pozorovatel je citlivější na flikr, pokud je postupně ubírána intenzita z vyšší amplitudy modlace, při které oko flikr spolehlivě rozpozná. Je-li intenzita pod prahem viditelnosti pozorovatele

a amplituda je postupně zvyšována, je pro něj obtížnější flickr postřehnout. Tomu nasvědčují právě nižší prahy viditelnosti u vrchního grafu, čili u "klesajících kroků" D-F-H. Tento jev byl zaznamenán u všech frekvencí při obou úrovních osvětlení.

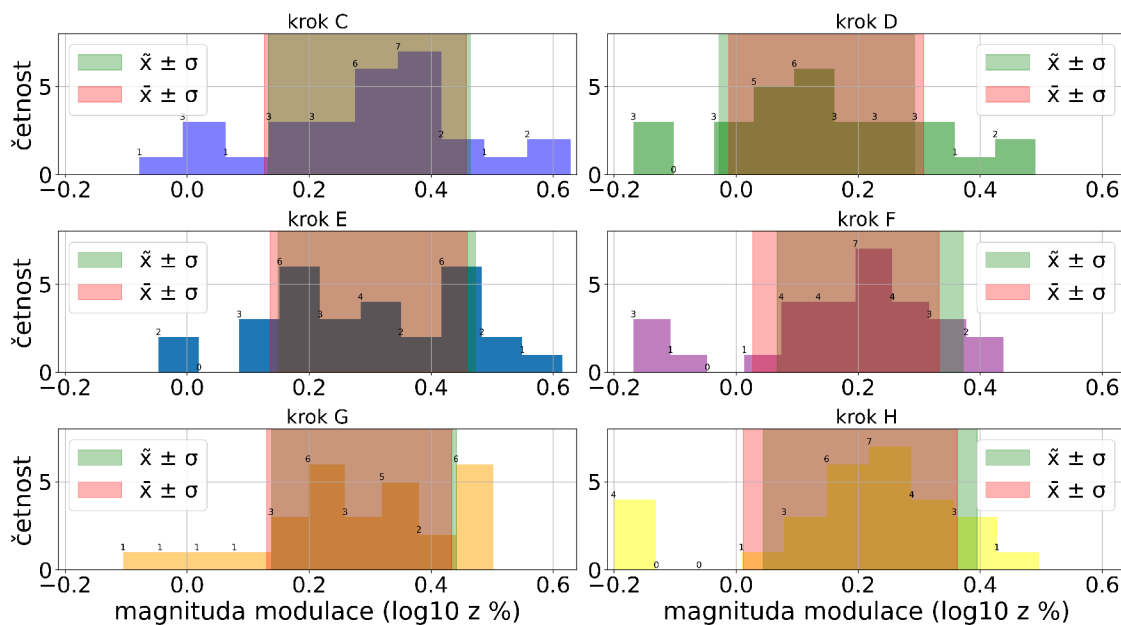


Graf 3.14: Histogram kroků C-E-G a D-F-H, 1 Hz, 1000 lx

Dále byly na Obrázku 3.15 vykresleny histogramy pro jednotlivé kroky C, D, E, F, G a H. Na tomto grafickém znázornění je opět patrné postupné snižování prahu s přibývajícím opakováním. Rozptyl mediánu se v kroku C pohybuje přibližně mezi 0,13 – 0,45 ($\log_{10} z \%$). V kroku H se pak rozptyl snížil na 0,04 – 0,36 ($\log_{10} z \%$). V grafu reprezentujícím prahy viditelnosti naměřené v kroku D je možno pozorovat, že průměr se směrodatnou odchylkou odhadu prahu viditelnosti oproti mediánu spíše podhodnocuje. Tento jev lze také sledovat v některých krocích například u frekvence 33,333 Hz, či 40 Hz. Ze zpětné vazby figurantů, kteří během experimentu komentovali průběh měření bylo patrné, že valně většině přišlo nejobtížnější pozorování právě velmi pomalých, či velmi rychlých frekvencí.

3.3.5 Kumulativní distribuční graf

Při popisu náhodných veličin je vhodné použít analytické funkce, které stanovují pravděpodobnost, s kterou náhodná veličina nabyde dané hodnoty. Diskrétní ná-



Graf 3.15: Histogramy jednotlivých kroků C – H, 1 Hz, 1000 lx

hodné veličiny se popisují pomocí funkce pravděpodobnosti $f(x_i)$, kde $f(x_i)$ reprezentuje pravděpodobnost, že bude veličina rovna hodnotě x_i . Pravděpodobnostní funkce má následující vlastnosti (36):

- Funkce je normalizovaná na 1. Pro spojité proměnné by platilo:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1. \quad (3.5)$$

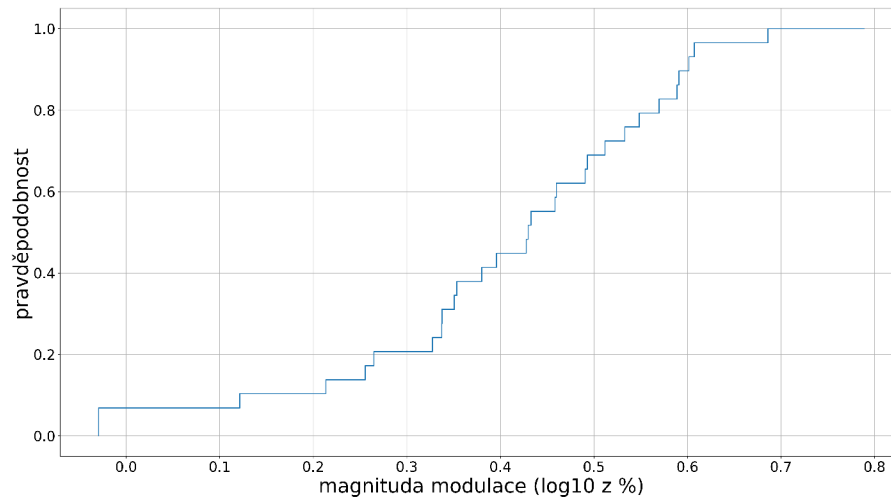
Pro diskrétní proměnné jsou integrály nahrazeny součtem všech hodnot, kterých může integrace nabývat.

- Pravděpodobnostní distribuce nemůže být nezáporná, $f(x) \geq 0$,
- Pro kumulativní distribuční funkci $F(x)$ pak platí:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(\tau)d\tau, \quad (3.6)$$

$F(x)$ představuje pravděpodobnost, že veličina nabyde hodnoty menší, či rovné než x . Jedná se o neklesající funkci x , která začíná na nule a má nejvyšší hodnotu v 1 (36).

Graf takové funkce poskytuje detailnější informace než histogram. Lze z něho vyčíst rozložení dat okolo mediánu (pravděpodobnost 0,5), či např. kvartilové a kvantilové rozpětí. Zároveň není zobrazení dat zkreslené výběrem intervalů, jako je tomu u histogramu. Graf 3.16 ukazuje distribuci dat při měření stimulu o frekvenci 0,5 Hz při 500 lx.



Graf 3.16: Kumulativní distribuční graf, 0,5 Hz, 500 lx

3.3.6 Statistická významnost vlivu jednotlivých vnějších faktorů

Důležitou součástí této práce je prokázání statistické významnosti mezi prahy viditelnosti flikru v podmínkách s **různou intenzitou osvětlení**, konkrétně tedy 1 000 luxů a 500 luxů. Byl zvolen **odhad prahu viditelnosti**, jakožto průměrná hodnota prahu všech 29 figurantů. Předpokládáme, že rozdělení pravděpodobnosti (PDF) tohoto odhadu bude podle **Centrální limitní věty** normální. Tento teorém totiž říká, že součet velkého počtu nezávislých proměnných náhodných veličin je přibližně Gaussovského rozdělení. Průměr tohoto rozdělení je součet průměrů proměnných a rozptyl tohoto rozdělení je roven rozptylu proměnných. Tento výrok platí bez ohledu na to, jaké mají rozdělení jednotlivé proměnné (36):

$$A_{th} \sim N(\bar{x}, \frac{s^2}{N}), \quad (3.7)$$

kde A_{th} je odhad prahu, \bar{x} je průměr z pozorovaných dat, s^2 je rozptyl pozorovaných dat (normalizován pomocí $N - 1$) a N je počet figurantů (resp. počet prahů získaných z naměřených hodnot C – H). Nejistota typu A by pak mohla být určena ze vzorce:

$$U(A_{th}) = 2s/\sqrt{N}, \quad (3.8)$$

Odečteme-li rozdělení pravděpodobnosti pro odhady prahů mezi experimenty s 500 a 1 000 lx, získáme statistickou významnost rozdílu mezi dvěma soubory dat. Jelikož uvažujeme, že mají odhady prahů normální rozdělení, bude tudíž i rozdělení pravděpodobnosti jejich rozdílu normální (36):

$$(A_{th,1} - A_{th,2}) \sim (|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|, \frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2} - \frac{2s_1s_2\rho}{\sqrt{N_1N_2}}), \quad (3.9)$$

ρ je korelační koeficient mezi $A_{th,1}$ a $A_{th,2}$, který byl z naměřených dat odhadnut jako 0,434.

A konečně p –hodnotu pro **alternativní hypotézu** (že jsou prahy experimentů s různým nastavením osvětlení odlišné) získáme jako:

$$p = \int_{-\infty}^0 \varphi(\delta, \mu, \sigma^2) d\delta = \phi(0, \mu, \sigma^2), \quad (3.10)$$

kde δ vyjadřuje rozdíl prahů, φ je normální PDF a ϕ je kumulativní distribuční funkce s parametry $\mu = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2|$ a $\sigma^2 = \frac{s_1^2}{N_1} + \frac{s_2^2}{N_2} - \frac{2s_1s_2\rho}{\sqrt{N_1N_2}}$

Vzhledem k tomu, že jsme se však rozhodli využít místo průměru robustnější medián, nelze využít Centrální limitní věty. Ta totiž uvažuje právě s výběrovým průměrem (viz 3.7). Z toho důvodu byl pro statistické vyhodnocování nakonec hledán vhodný neparametrický test.

Wilcoxonův test

Tento neparametrický test je vhodný právě pro párová data, kdy nemůžeme zaručit Gaussovo rozdělení sledované veličiny. Pomocí tohoto testu lze porovnat dvě sady naměřených dat u jednoho výběrového souboru. Veličiny X a X' v našem případě představují různou úroveň osvětlení – 500 lx a 1 000 lx. Tato metoda počítá na základě tohoto principu (37):

1. Zjistí se rozdíly mezi párovými hodnotami (veličina Z) – některé rozdíly vyjdou kladně, jiné záporně. Dojde-li ke shodě párových hodnot, rozdíly budou nulové, což je z dalšího hodnocení vyřadí.
2. Seřadí se vzestupně absolutní hodnoty nenulových rozdílů.
3. Každému rozdílu se přiřadí pořadové číslo (stejným hodnotám se jejich pořadí zprůměruje). Testuje se nulová hypotéza, že jsou tyto rozdíly rozloženy symetricky kolem 0, čili součet kladných a záporných rozdílů by měl být roven nule (platí, pokud je shodné rozdělení obou veličin X a X').
4. Platí:

$$W_+ + W_- = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}, \quad (3.11)$$

kde W_+ odpovídá součtu pořadí odpovídajících rozdílů s kladnou hodnotou a W_- je součet pořadí odpovídajících rozdílů se zápornými rozdíly. Počet párů s nenulovým rozdílem je označen jako n . Menší hodnota ze součtů rozdílů je pak použita jako *testovací kritérium* W :

$$W = \min(W_+, W_-) \quad (3.12)$$

5. V posledním kroku dojde k porovnání vypočteného testovacího kritéria W s kritickou hodnotou pro příslušné n a zvolenou hladinou významnosti α :
 - Je-li $W < W_{(\alpha, n)}$, pak je **zamítnuta** nulová hypotéza o shodě rozdělení veličin X a X' (zamítnuto symetrické rozložení kladných a záporných rozdílů párových hodnot),
 - Je-li $W > W_{(\alpha, n)}$, pak **nelze zamítnout** nulovou hypotézu o shodě rozdělení veličin X a X' (nezamítnuto symetrické rozložení kladných a záporných rozdílů párových hodnot)

Pro tento test existuje v programovacím jazyce Python přímo funkce `Wilcoxon()`, která je dostupná v balíčku `scipy`. Nejprve však muselo být zajištěno spárování hodnot z měření s 500 a 1 000 lx pro každého figuranta a každou frekvenci.

Tab. 3.2: Wilcoxonův test, p-hodnota - 1000/500lx

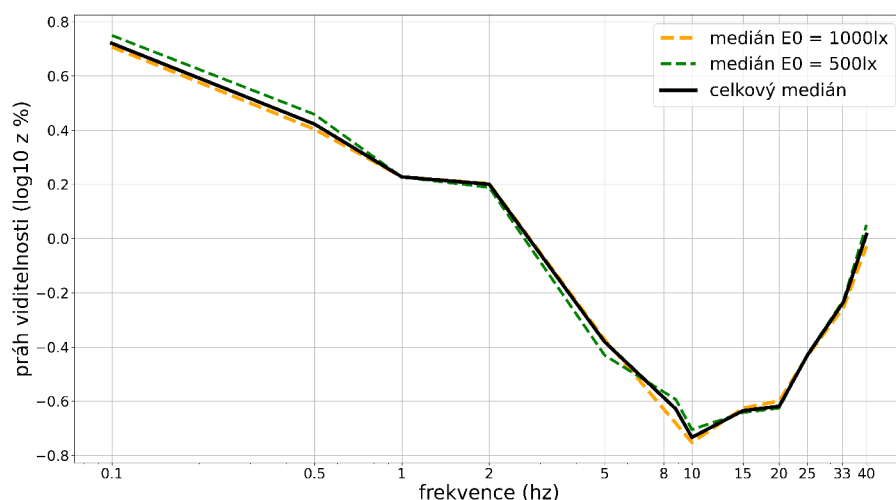
frekvence (Hz)	0,1	0,5	1	2	5	8,8
p-hodnota	0,12	0,075	0,27	0,32	0,86	0,30
frekvence (Hz)	10	15	20	25	33,333	40
p-hodnota	0,34	0,25	0,41	0,15	0,16	0,014

Byla zvolena jednostranná alternativní hypotéza, a to právě kvůli zmíněnému **Ferryho-Porterově zákonu** (2.4), který říká, že s rostoucí intenzitou stimulu roste také citlivost pozorovatele na flickr. Jako vstupní data byly použity právě jednotlivé mediány z 12ti frekvencí pro 29 figurantů, kteří absolvovali experiment s 500 i 1 000 lx. Výstupem je pak *p-hodnota* pro každou z frekvencí:

Podle vypsaných p-hodnot v tabulce (3.2) lze vyvodit závěr o platnosti našich hypotéz:

- Nulová hypotéza: Není rozdíl mezi rozdělením mediánů naměřených dat při 500 lx a 1 000 lx, hladina osvětlení nemá vliv na práh citlivosti.
- Alternativní hypotéza: Mezi rozdělením mediánů naměřených dat při 500 lx a 1 000 lx je rozdíl, hladina osvětlení má vliv na práh citlivosti.

Vzhledem k tomu, že téměř ve všech případech vyšly p-hodnoty větší než kritická hodnota, **nebyla prokázána platnost alternativní hypotézy**. Znamená to tedy, že **nelze předpokládat rozdílnost křivky prahu viditelnosti pro 1 000 luxů a 500 luxů**. Jak popisuje Ferryho-Porterův zákon (viz 2.4), dalo by se očekávat, že se bude s rostoucí intenzitou stimulu zvyšovat také viditelnost flickru. Po získání výsledků z měření bylo téma prozkoumáno hlouběji, načež byl nalezen článek publikovaný v roce 2018 v oftalmologickém časopisu *Vision*. Je zde zkoumán periferní flickr při vysokých intenzitách stimulu, přičemž cílem bylo popsat, jak vypadá trend kritické frekvence flickru s rostoucí intenzitou osvětlení. Závěrem bylo prokázáno, že při vyšších hodnotách než 10^4 Trolandů je přerušen lineární průběh a dochází k saturaci. Ferryho-Porterův zákon byl tak potvrzen pouze do 10 000 Td (31). Tento fakt by mohl být směrodatný i pro vyvozování závěru této práce, a proto bylo potřeba



Graf 3.17: Křivka prahu viditelnosti při různých intenzitách světla

odhadnout osvětlení sítnice při maximálním experimentálním nastavení osvětlení na 1 000 luxů. Z jasové mapy (Obr. A.1) je patrné, že je figurant vystaven přibližně 120 lm. Uvažujeme-li velikost průměrné zornice mezi 2 – 8 mm (viz 2.1.2), lze dopočítat osvětlení sítnice jako:

$$\begin{aligned}
 Td &= A \cdot L = \pi \cdot r^2 \quad td, \\
 Td_1 &= \pi \cdot 1^2 \cdot 120 = 565 \quad td, \\
 Td_2 &= \pi \cdot 4^2 \cdot 120 = 9047 \quad td,
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Ani v jednom z krajních případů velikosti průměrné zornice není přesáhnuto 1 000 Td, a tudíž by neměla být charakteristika viditelnosti flikru ovlivněna saturací, jak popisuje výše zmíněný článek.

Mann-Whitneyův test

Další neparametrický test, který se používá pro komparaci statistických dat bez nutnosti normálního rozdělení, se nazývá Mann-Whitneyův test. Tento test je vhodný pro hodnocení **nepárových hodnot**, kdy porovnáváme dva různé výběrové soubory. Respektive se testuje hypotéza, že veličina X , odpovídající pokusnému zásahu A a veličina Y odpovídající pokusnému zásahu B mají stejné rozdělení pravděpodobnosti. V našem případě jsme sledovali **různou denní dobu** (dopoledne/ odpoledne)

probíhání experimentu a **různé pohlaví figurantů** (ženy/ muži). Před použitím samotného testu je důležité pochopit jeho princip (37): Měření na první sledované

Tab. 3.3: Mann-Whitneyův test, p-hodnota - ženy/ muži

frekvence (hz)	0,1	0,5	1	2	5	8,8
p-hodnota	0,15	0,32	0,66	0,47	0,26	0,26
frekvence (hz)	10	15	20	25	33,333	40
p-hodnota	0,16	0,33	0,34	0,72	0,97	0,89

skupině je označeno jako x_1, x_2, x_{n_1} , měření na druhé skupině pak y_1, y_2, y_{n_2} . Všechna měření jsou pak nehledě na skupinu seřazena vzestupně podle velikosti. Tím získáme tzv. směsný výběr $z: z_1, z_2, z_n (n = n_1 + n_2)$. Jednotlivým hodnotám přiřadíme pořadí (první až n-té). Dojde-li ke shodě 2 a více hodnot ve směsném výběru, přiřadí se jim jejich průměrné pořadí). Pokud se pokusné zásahy neliší, pak by měli mít veličiny X a Y stejné rozdělení pravděpodobností, a tím i průměrné pořadí. V ideálním případě by byl směsný výběr tvořen vždy dvou za sebou jdoucích stejných hodnot ze skupin A a ze skupiny B . Součet pořadí náležejících hodnotám X a Y označíme jako R_A a R_B a přitom platí, že součet všech pořadí ($n = n_1 + n_2$) odpovídá součtu čísel od 1 do n podle vzorce (37):

$$R_A + R_B = \frac{n \cdot (n + 1)}{2}, \quad (3.14)$$

testovací statistika je následně vypočtena jako:

$$U_A = n_1 \cdot n_2 + \frac{n \cdot (n + 1)}{2} - R_A, \quad (3.15)$$

$$U_B = n_1 \cdot n_2 + \frac{n \cdot (n + 1)}{2} - R_B, \quad (3.16)$$

menší hodnota z U_A a U_B , je použita jako testovací kritérium a porovnána s tabulkovou kritickou hodnotou Mann-Whineyova testu pro příslušné n_1 a n_2 a zvolenou hladinu významnosti α (37). V posledním kroku dojde k vyhodnocení:

- Je-li $U < U_{\alpha, n_1, n_2}$, pak zamítáme nulovou hypotézu o shodě rozdělení veličin X a Y ,

- Je-li $U > U_{\alpha, n_1, n_2}$, nelze zamítnout nulovou hypotézu o shodě rozdělení veličin X a Y (37).

Tento test byl proveden přímo pomocí funkce *mannwhitneyu*, která je dostupná taktéž v balíčku *scipy*. Konkrétně byl zvolen oboustranný test, jelikož nebylo možné předpokládat, která ze skupin by měla mít práh nižší, či vyšší. Jejím výstupem je obdobně jako v předchozím testu *p-hodnota* (viz Tab. 3.3, Tab. 3.4):

Tab. 3.4: Mann-Whitneyův test, p-hodnota - dopoledne/ odpoledne

frekvence (hz)	0,1	0,5	1	2	5	8,8
p-hodnota	0,15	0,76	0,26	0,18	0,91	0,47
frekvence (hz)	10	15	20	25	33,333	40
p-hodnota	0,97	0,020	0,34	0,52	0,16	0,090

Je patrné, že ani při jednom z Mann-Whitneyho testů, které byly provedeny na skupinách dat s různým pohlavím figurantů a odlišnou dobou měření, není možné zamítnout nulovou hypotézu. Můžeme tedy konstatovat, že mezi těmito odlišnými soubory nebyla prokázána statisticky významná odlišnost.

4 Diskuze

Z provedených testů vyplývá, že nebyla prokázána statisticky významná odlišnost mezi pozorovanými soubory dat. Na schopnost vnímání flickru by tedy neměly mít vliv parametry jako pohlaví pozorovatele, denní doba, ve které je vystaven stimulu, a dokonce ani rozdíl mezi námi testovanými intenzitami osvětlení – 500 a 1 000 lx. V dalších experimentech se nabízí prověřit více jasových úrovní a ověřit tak naši hypotézu i pro jiné intenzity. Pro úplnou revizi světelného flickrmetru je účelné rozšířit práci také o jiné, než sinusové stimuly. Při použití velmi nízkých frekvencí v řádech mHz je totiž použití sinového stimulu nereálné, či nerealistické. Vhodnější je použití obdélníkového pulzu, který je oproti sinovému dobře viditelný nehledě na frekvenci.

Dalším návrhem k pokračování ve výzkumu je přeměření reálného osvětlení sítě. Jelikož to neumožňovaly laboratorní podmínky ani časová dotace, byla pro účely této práce použita průměrná hodnota zornice.

Algoritmus flickrmetru, který se aktuálně používá pro vyhodnocování míhání světla, byl vyvíjen pro 60 W žárovky, které jsou však nyní ve valné většině nahrazovány LED. Vzhledem k velkým změnám v elektrotechnice a modernizaci zařízení připojených k síti může vznikat zkreslení napětí, které zastaralý flickrmetr není schopen odhalit. V žádné dokumentaci není navíc popsáno, při jakých laboratorních podmínkách probíhala referenční měření, jež vedla k vytvoření prahové křivky. Důležitými faktory pro vnímání flickru jsou např. pozice zdroje světla vzhledem k pozorovateli, frekvence stimulu, či intenzita světla (množství použitých svítidel). Není-li v dokumentaci uvedeno přesné nastavení experimentu, je použití světelného flickrmetru doprovázeno neznámou mírou nejistoty a měření nemůže být označeno za spolehlivé.

Aktuální norma sice v terminologii pojmy dráždivosti a viditelnosti flickru rozli-

šuje, avšak algoritmus flickrometru již nikoli. V kontextu této práce uvažujeme práh viditelnosti při první registraci mihotání světla, zatímco o dráždivosti mluvíme až ve chvíli, kdy jsme blikajícím světlem vyrušeni od nějaké činnosti. V návaznosti na tuto práci se tak nabízí prozkoumat také prahovou křivku pro dráždivost a porovnat ji s dosaženými výsledky z prahu viditelnosti.

5 Závěr

Tato diplomová práce seznamuje čtenáře s termínem flickr, označující rychlou změnu jasů v čase. Ačkoliv se povědomí o účincích flickru na lidské zdraví postupně rozšiřuje, metody vyhodnocení míry závažnosti flickru jsou nedokonalé a zastaralé. Konvenční flickrmetr vychází z více na sobě nezávislých studií s nepřesně popsanou metodikou, tudíž lze pochybovat o reliabilitě tohoto algoritmu. Fakt, že byl založen na žárovkách a není koncipován pro LED, vypovídá o jeho neaktuálnosti.

Z toho důvodu byla v návaznosti na rešerši navržena nová metoda, která je reprezentativní pro běžná prostředí se zdroji umělého světla. Byly naměřeny prahy viditelnosti flickru pro 29 figurantů. Každý z nich byl testován při dvou jasových úrovních – 1000 a 500 luxů a při 12 frekvencích. Naměřené prahy periferního flickru jsou téměř vždy pod limity flickrmetru, což jak vyplývá z výzkumu, není ovlivněno intenzitou světla.

Závěrem lze konstatovat, že jsme u výběrového vzorku prokázali znatelně vyšší citlivost na flickr, než-li předepisuje standardizovaný flickrmetr. Vytvořená metoda, která je detailně popsána ve výzkumné části, může posloužit k vytvoření referenčních podmínek pro žádoucí aktualizaci flickrmetru.

Seznam použité literatury

- [1] KRÁLÍČEK, Petr. *Úvod do speciální neurofyzologie*. 3. vydání. Praha: Galén, 2011. ISBN 978-80-7262-618-2.
- [2] SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing a.s., 2004. ISBN 80-247-0786-1.
- [3] *IEEE 1789-2015. IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*. New York: Standards Committee, 2015. ISBN 978-0-7381-9644-2.
- [4] *IEC 61000-4-15. Electromagnetic compatibility (EMC)*. 2. vyd. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2010. ISBN 978-2-88912-076-5.
- [5] DRÁPELA, Jiří. *Blikání světelných zdrojů způsobené meziharmonickými složkami napětí* [online]. Brno, 2009 [cit. 2024-03-05]. Dostupné z: https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka%5C&id=1314%5C&publikace_id=14208. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] VALBERG, Arne. *Light Vision Color*. 1st ed. The Norwegian University of Science a Technology: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0 470 84902 9.
- [7] VIŠVADEROVÁ, Natálie. *Zrak* [online]. Praha, 2021 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Zrak%5C&oldid=449362>.
- [8] *Oči* [online]. 2023. [cit. 2023-12-13]. Dostupné z: <https://www.symptomy.cz/anatomie/oci>.
- [9] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. Význam mezopického vidění pro praxi. *Časopis Světlo* [online]. 2007, č. 6. [Cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36187.pdf>.

- [10] KALLONIATIS, Michael a Charles LUU. *Dark Adaptation* [online]. 2007. [cit. 2024-03-24]. Dostupné z: <https://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-psychophysics-of-vision/light-and-dark-adaptation/>.
- [11] KRÁLOVÁ, Madga. *Stroboskopický efekt* [online]. [cit. 2023-10-30]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/stroboskopicky-efekt>.
- [12] *Parametry zdravého svítidla: 5. díl – Flicker aneb blikání světelných zdrojů (PstLM a SVM)* [online]. 2022. [cit. 2023-10-28]. Dostupné z: <https://svitimprotebe.cz/vzdelavani/prakticke-rady/flicker-aneb-blikani-svetelnych-zdroju-pstlm-a-svm/>.
- [13] *ČSN IEC 60050-845. Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 845: Osvětlení*. 2. vyd. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [14] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Fotometrické veličiny* [online]. [cit. 2023-07-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>.
- [15] FLORIANOVÁ, Lucie. *Vnímání jasu rychle pulzujícího světla člověkem* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/151219>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [16] KALLONIATIS, Michael a Luu CHARLES. *Temporal Resolution: Webvision: The Organization of the Retina and Visual System* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/temporal-resolution/>.
- [17] DRÁPELA, J. et al. Light Flicker of Fluorescent Lamps with Different Types of Ballasts Caused by Interharmonics. *IEEE Russia Power Tech* [online]. 2005, s. 1–7 [cit. 2024-03-07]. Dostupné z DOI: [10.1109/PTC.2005.4524419](https://doi.org/10.1109/PTC.2005.4524419).

- [18] KUKAČKA, Leoš et al. Comparison of Procedures for Measuring the Temporal Contrast Sensitivity Function. *2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18)* [online]. 2023, s. 1–6 [cit. 2024-01-03]. Dostupné z DOI: [10.1109/LS1858153.2023.10170649](https://doi.org/10.1109/LS1858153.2023.10170649).
- [19] HERGESEL, Jan. *Tvorba experimentu pro určení citlivostní funkce vjemu flickru* [online]. Liberec, 2022 [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/166134/Bakalarska_prace_Hergesel.pdf. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [20] KUKAČKA, Leoš et al. Response of Flicker Assessment Algorithms to Interharmonic Distortion Patterns [online]. 2022 [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9808594>.
- [21] *Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements*. 1. vyd. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015. ISBN 978-2-8322-2649-0.
- [22] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2021/341. In: *Úřední věstník Evropské unie* [online]. 2021, s. 1–41 [cit. 2023-10-28]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R0341&from=EN>.
- [23] PERZ, Małgorzata. *Flicker perception in the periphery* [online]. 2010. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46984624/685337-1.pdf>. Diplomová práce. Eindhoven University of Technology.
- [24] CAI, Rong. *Flicker Interaction Studies and Flickermeter Improvement*. Eindhoven, 2009. Disertace. Eindhoven University of Technology.
- [25] LANGE, De. Eye's Response at Flicker Fusion to Square-Wave Modulation of a Test Field Surrounded by a Large Steady Field of Equal Mean Luminance. *Journal of the optical society of America* [online]. [B.r.], roč. 1961, č. 51 [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1%5C&rwjcode=josa%5C&uri=josa-51-4-415%5C&html=true>.

- [26] RASHBASS, Cyril. The Visibility of Transient Changes of Luminance. *Journal of Physiology* [online]. 1970, č. 210, s. 165–186 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1395655/>.
- [27] HARTMANN, E., B. LACHENMAYR a H. BRETTEL. The peripheral critical flicker frequency. *Vision Research*. 1979, roč. 19, č. 9, s. 1019–1023. ISSN 0042-6989. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(79\)90227-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(79)90227-X).
- [28] TYLER, Christopher W. Analysis of visual modulation sensitivity. II. Peripheral retina and the role of photoreceptor dimensions. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1985, roč. 2, č. 3, s. 393–398. Dostupné z DOI: [10.1364/JOSAA.2.000393](https://doi.org/10.1364/JOSAA.2.000393).
- [29] TYLER, Christopher W. Analysis of visual modulation sensitivity. III. Meridional variations in peripheral flicker sensitivity. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*. 1987, roč. 4 8, s. 1612–9. Dostupné také z: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:29646276>.
- [30] TYLER, Christopher a Russell HAMER. Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry-Porter Law. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and image science*. 1990, roč. 7, s. 743–58. Dostupné z DOI: [10.1364/JOSAA.7.000743](https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.000743).
- [31] FERNANDEZ-ALONSO, Maydel, Will INNES a Jenny C.A. READ. Peripheral Flicker Fusion at High Luminance: Beyond the Ferry-Porter Law. *Vision* [online]. 2023, roč. 7, č. 1 [cit. 2023-11-28]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.3390/vision7010026>.
- [32] EISEN-ENOSH, Auria et al. Evaluation of Critical Flicker-Fusion Frequency Measurement Methods for the Investigation of Visual Temporal Resolution. *Scientific Reports* [online]. [B.r.] [cit. 2023-04-29]. Dostupné z DOI: [10.1038/s41598-017-15034-z](https://doi.org/10.1038/s41598-017-15034-z).
- [33] KUKAČKA, Leoš et al. Comparison of Procedures for Measuring the Temporal Contrast Sensitivity Function. In: *2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference Expo (LS18)*. 2023, s. 1–6. Dostupné z DOI: [10.1109/LS1858153.2023.10170649](https://doi.org/10.1109/LS1858153.2023.10170649).

- [34] TOI, Vo Van, Christof Walter BURCKHARDT a Pierre-Alain GROUNAUER. Irregularities in the flicker sensitivity curve [online]. [B.r.] [cit. 2023-04-29].
- [35] KUKAČKA, Leoš et al. Flicker Visibility with Different Spectra of White Light. In: *2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. 2023, s. 1–6. Dostupné z DOI: [10.1109/IAS54024.2023.10406563](https://doi.org/10.1109/IAS54024.2023.10406563).
- [36] BONAMENTE, Massimiliano. *Statistics and Analysis of Scientific Data* [online]. 2nd edition. New York: Springer, 2017 [cit. 2024-03-27]. ISBN 978-1-4939-6572-4. Dostupné z DOI: [10.1007/978-1-4939-6572-4](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6572-4).
- [37] BEDÁŇOVÁ, Iveta a Petr LUNHART. *Biostatistikat* [online]. [cit. 2024-04-05]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn4/Wilcoxon.htm>.
- [38] D.H.KELLY. Theory of Flicker and Transient Responses, I. Uniform Fields. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA* [online]. 1971, roč. 1971, č. 61 [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1%5C&rwjcode=josa%5C&uri=josa-61-4-537%5C&html=true>.

Seznam grafů a obrázků

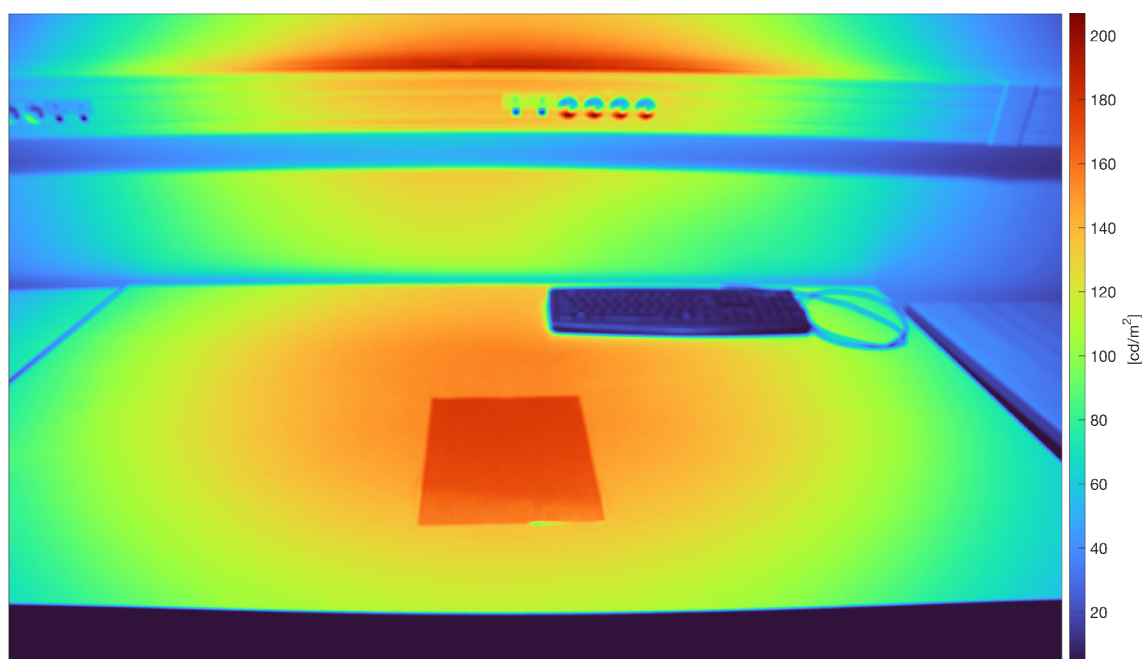
2.1	Anatomický popis očního bulbu (8)	16
2.2	Adaptační křivka, časová závislost logaritmu intenzity prahového osvětlení sítnice v mikroluxech (10)	19
2.3	Schématické znázornění vztahu fotometrických veličin (14)	26
2.4	Grafické schéma indexu flickru (13)	27
2.5	Ukázka průběhu napětí s meziharmonickou složkou, a) základní frekvence 50 Hz při napětí 230 VRMS, b) meziharmonická složka 58 Hz při 23 VRMS (17)	29
2.6	Blokové schéma napětového flickrmetru (19)	29
2.7	Blokové schéma světelného flickrmetru (19)	30
2.8	Porovnání frekvenčních charakteristik váhových filtrů flickrmetrů (19)	31
2.9	De Lange experiment - kritická frekvence flickru analogického modelu (25)	34
2.10	De Lange experiment - kritická frekvence flickru pozorovatele (25) . .	35
2.11	Nastavení experimentu periferního flickru (31)	37
2.12	Psychometrická funkce (19)	39
3.1	Spektrum LED, 4000 K (35)	41
3.2	Řídící program po zahájení experimentu	42
3.3	Elektrické schéma zapojení experimentálních zařízení (zdroj: autor) .	43
3.4	Zkušební měření, hystereze - figurant 1, první pokus	44
3.5	Zkušební měření, hystereze - figurant 1, druhý pokus	45
3.6	Metoda schodišť (zdroj: autor)	46

3.7	Laboratoř FM TUL, osvětlený stůl 1 000 lx, stínící závěs (zdroj: autor)	46
3.8	Hystereze prahu viditelnosti, figurant 24, 1 000 lx	48
3.9	Hystereze prahu viditelnosti, 15 Hz, 1000 lx, všichni figuranti	49
3.10	Porovnání prahu viditelnosti mužů a žen, 1000 lx	50
3.11	Porovnání prahu viditelnosti podle denní doby, 1000 lx	51
3.12	Boxplot prahové křivky, 1000 lx	52
3.13	Histogram všech kroků pro 5 Hz, 1000 lx	53
3.14	Histogram kroků C-E-G a D-F-H, 1 Hz, 1000 lx	54
3.15	Histogramy jednotlivých kroků C – H, 1 Hz, 1000 lx	55
3.16	Kumulativní distribuční graf, 0,5 Hz, 500 lx	56
3.17	Křivka prahu viditelnosti při různých intenzitách světla	60
A.1	Jasová mapa z pohledu pozorovatele, osvětlení plochy stolu 1 000 lx .	74
A.2	Řídící program před nastavením experimentu	75
A.3	Závislost amplitudy jasu dopadající na sítnici a frekvence (38)	76
B.1	Zrakové vlastnosti figurantů	77
B.2	Ukázka exportovaného souboru CSV, načteno v tabulkovém procesoru Excel	78

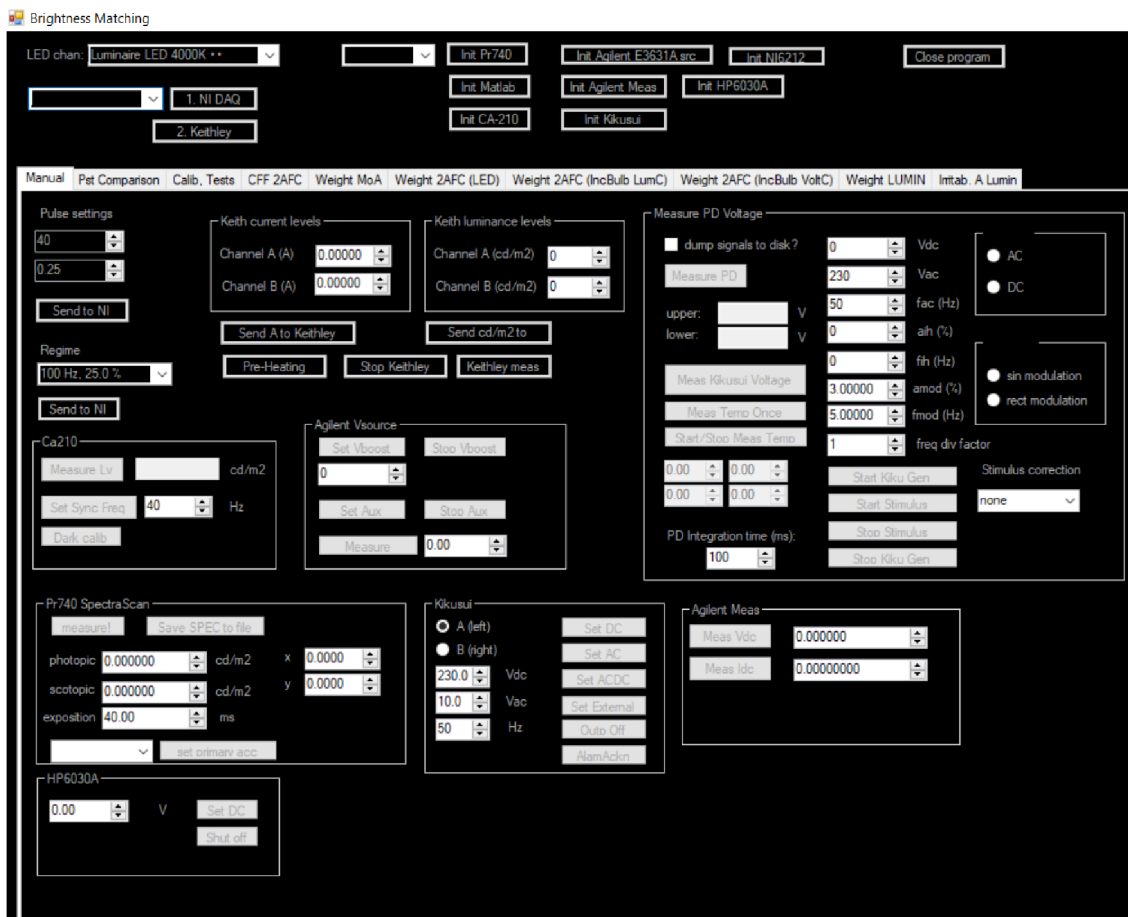
Seznam tabulek

3.1	Naměřené hodnoty prahů viditelnosti v \log_{10} z % s průměry, mediány a směrodatnou odchylkou	51
3.2	Wilcoxonův test, p-hodnota - 1000/500lx	59
3.3	Mann-Whitneyův test, p-hodnota - ženy/ muži	61
3.4	Mann-Whitneyův test, p-hodnota - dopoledne/ odpoledne	62

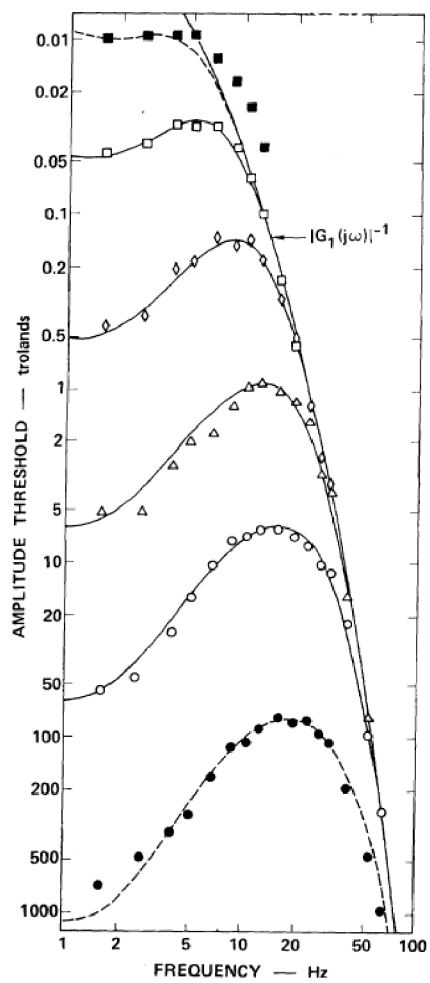
A Přílohy: Obrázky



Obr. A.1: Jasová mapa z pohledu pozorovatele, osvětlení plochy stolu 1 000 lx



Obr. A.2: Řídící program před nastavením experimentu



Obr. A.3: Závislost amplitudy jasu dopadající na sítnici a frekvence (38)

B Přílohy: Tabulky

Tab. B.1: Zrakové vlastnosti figurantů

číslo figuranta	pohlaví	věk figuranta	zraková ostrost	KC1*	KC2	KC3	KC3	KC3	KC3	KC3	KC3	CFF (5%mod)	barvoct
1	M	34	8	1,72	1,8	1,41	1,97	2,36	1,62	1,41	39,04	16	
2	M	24	8	1,55	1,72	1,08	1,97	2,36	1,34	1,16	39,82	20	
3	F	43	10	1,6	1,65	1,1	2,36	1,62	1,62	1,62	25,23	16	
4	M	61	8	1,9	1,9	1,16	1,62	2,36	1,62	1,41	34	8	
5	M	60	7	1,6	1,9	1,27	1,62	1,62	1,36	1,2	32,52	28	
6	M	31	8	1,6	1,6	1,27	2,36	2,36	1,62	0,36	38,28	24	
7	M	44	10	1,6	1,6	1,17	1,62	1,97	1,41	1,02	39,51	16	
8	M	59	8	1,6	1,6	2,36	1,62	1,62	1,41	0,9	32,3	60	
9	M	33	10	1,6	1,9	0,89	1,62	1,1	1,62	1,27	40,4	44	
10	F	35	10	1,6	1,65	0,41	1,62	2,36	1,62	1,62	33,62	12	
11	M	44	11	1,9	1,97	1,36	1,97	2,36	2,36	2,36	37,97	48	
12	M	37	10	1,6	1,65	1,36	1,62	1,62	1,62	1,04	38,63	8	
14	M	33	10	1,9	2	1,97	1,62	2,36	2,36	1,62	39,2	32	
19	M	32	8	1,86	1,83	0,45	1,63	1,27	1,17	1,27	41,06	24	
20	M	35	8	1,73	1,81	0,21	1,83	1,63	1,42	1,05	36,95	60	
22	M	34	9	1,92	2	1,19	1,82	2	2	1,49	37,05	16	
24	M	44	10	1,75	1,99	1,2	1,78	2	2	1,77	35,87	16	
25	F	33	10	1,81	1,81	1,19	1,84	2	1,84	1,8	41,14	20	
26	F	47	10	1,77	1,85	0,89	1,78	2	0,55	0,95	31,28	32	
27	M	41	10	1,81	1,81	1,2	1,78	2	1,78	1,28	34	16	
29	F	29	9	1,59	1,59	1,04	1,53	1,84	1,34	0,75	40,67	4	
31	F	52	7	1,33	1,45	0,8	1,1	1,57	1,35	0,92	35,84	76	
32	M	27	11	1,76	2	1,4	1,84	2	2	2	37,57	28	
33	F	49	9	1,75	1,81	1,1	1,84	1,78	1,4	1,41	38,22	8	
34	M	50	9	1,76	1,82	1,1	1,61	2	1,78	1,43	34,9	52	
35	F	28	9	1,72	1,81	1,1	1,6	1,84	1,56	1,4	36,24	12	
37	F	23	10	1,76	1,83	1,38	2	2	2	1,8	41	24	
38	F	60	10	1,81	1,81	1,16	1,6	2	2	1,77	33,14	0	

Tab. B.2: Ukázka exportovaného souboru CSV, načteno v tabulkovém procesoru Excel

Threshold measurement with LED luminaire															
14.12.2023 17:17															
figurant38															
Luminaire LED 4000K															
tstamp	fmod	Erangle: 0-1680	modA	Vboost: 80	modB	TriggerFreq: 800	modC	TriggerDuty: 0,25	modD	NI range: 2	modE	Phi0 1000	modF	modG	modH
1.70257E+12	33,333	1,50000000	0,57600000	0,57600000	0,57600000	0,40935245	0,40935245	0,42982007	0,40935245	0,42982007	0,40935245	0,49757046	0,38885947		
1.70257E+12	15	1,00000000	0,05000000	0,07387277	0,05250000	0,05788125	0,03384197	0,03731077	0,03069566	0,05788125	0,03384197	0,03731077	0,03069566		
1.70257E+12	20	0,80000000	0,01121567	0,02220625	0,01826914	0,02014172	0,01657065	0,01826914	0,01739918	0,02014172	0,01657065	0,01826914	0,01739918		
1.70257E+12	40	3,00000000	0,70000000	0,89339709	0,60486632	0,60486632	0,60486632	0,66666667	0,54846832	0,66666667	0,54846832	0,70000000	0,63492063		
1.70257E+12	0,1	24,00000000	4,00000000	5,83443000	3,94897188	3,94897188	3,94897188	4,57142857	3,41127038	4,57142857	3,41127038	3,76092560	3,24882894		
1.70258E+12	25	1,10000000	0,20000000	0,39586632	0,28142008	0,28142008	0,28142008	0,41578564	0,35917127	0,41578564	0,35917127	0,41578564	0,37712983		
1.70258E+12	0,5	10,00000000	2,00000000	2,81420085	2,55256313	2,55256313	2,55256313	2,95491089	2,31525000	2,95491089	2,31525000	2,55256313	2,43101250		
1.70258E+12	8,8	0,60000000	0,04822531	0,13094786	0,11311768	0,11311768	0,11311768	0,18425679	0,15916794	0,18425679	0,15916794	0,17548265	0,16712634		
1.70258E+12	5	1,30000000	0,20000000	0,35917127	0,29549109	0,29549109	0,29549109	0,35917127	0,29549109	0,35917127	0,29549109	0,34206787	0,32577893		
1.70258E+12	2	5,00000000	0,80000000	1,58384528	1,30311570	1,30311570	1,30311570	1,83361465	1,58384528	1,83361465	1,58384528	1,92529539	1,83361465		
1.70258E+12	10	0,60000000	0,01162840	0,01413440	0,01220982	0,01220982	0,01220982	0,02538334	0,02192709	0,02538334	0,02192709	0,25015943	0,15556068		
1.70258E+12	1	7,00000000	0,27908165	0,83547461	0,75780010	0,75780010	0,75780010	1,36090010	1,23437651	1,36090010	1,23437651	1,65418258	1,50039236		