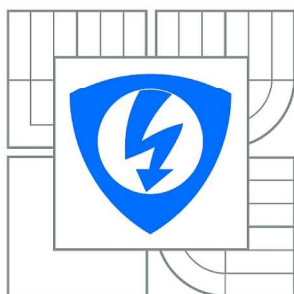


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

REALIZACE DIGITÁLNÍHO EXPOZIMETRU

REALIZATION OF DIGITAL EXPOSURE METER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

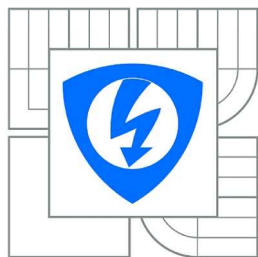
RICHARD VACULA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ FRÝZA, Ph.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Richard Vacula
Ročník: 3

ID: 115303
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Realizace digitálního expozimetru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti využití světelného senzoru ISL29003 pro realizaci digitálního automatického expozimetru, který podle světelných podmínek a zadaných parametrů filmového materiálu spočítá potřebné nastavení kamery nebo fotoaparátu. Místo analogového hledáčku použijte zaměřování pomocí laserové diody. Vytvořte expozimetr, který bude umět měřit jak dopadající, tak odražené světlo. Navrhněte konstrukční řešení, tj. optickou část, návrh DPS, vhodné ovládací prvky a kostru řídicího softwaru pro mikrokontrolér.

Pomocí profesionálních expozimetrů proveďte kalibraci vámi vytvořeného zařízení. Z výsledků měření proveďte upřesnění početních algoritmů. V případě velkého vlivu teploty na výsledky měření realizujte přepočty výsledků měření na základě aktuální teploty. Vyzkoušejte expozimetr v praxi natočením krátkého filmu na 8 nebo 16mm kameru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Intersil. Data Sheet ISL29003 [online]. 2008 - [cit. 3. června 2010]. Dostupné na [www:
http://www.intersil.com/data/fn/fn7464.pdf](http://www.intersil.com/data/fn/fn7464.pdf).

[2] ISO 2720:1974. General purpose photographic exposure meters (photoelectric type) [online]. 2010 - [cit. 3. června 2010]. Dostupné na [www:
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=7690](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=7690).

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o historii měření světla, zabývá se způsoby měření expozice a konstrukčním řešením expozimetrů. V posledních kapitolách je rozváděno téma realizace digitálního expozimetru, zkoumají se vlastnosti digitálního světelného senzoru ISL29003 a jeho využití pro účely měření expozice.

KLÍČOVÁ SLOVA

Expozimetr, expozice, clona, závěrka, fotografie, film.

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with the history of light measurement, ways of measuring exposure and constructions of exposure meters. In the last chapters it is treated of the realization of digital exposure meter. This project also examines the characteristics of digital light sensor ISL29003 and its use for purposes of measuring exposure.

KEYWORDS

Exposure meter, exposure, aperture, shutter, photo, film.

VACULA, R. *Realizace digitálního expozimetru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 33 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Realizace digitálního expozimetru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Frýzovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Poděkování patří také zaměstnancům společností Meopta, Barrandov a Foma. Zvláštní poděkování náleží Jaroslavu Ferstovi za odbornou a materiální výpomoc.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 HISTORIE MĚŘENÍ EXPOZICE	3
1.1 Expoziční tabulky	3
1.2 Optické expozimetry	5
1.3 Elektrické expozimetry	5
2 Elektronické měření světla	6
2.1 Světlo a fotosenzitivní materiály	6
2.1.1 Selenové fotoelektrické články	7
2.1.2 Germaniové fotodiody	8
2.1.3 Křemíkové fotodiody	9
2.1.4 Fototranzistory	9
2.1.5 Fotorezistory	9
2.1.6 Vakuové fotonky a fotonky plněné plynem	9
2.2 Měření odraženého světla	10
2.2.1 Měření součtového jasu	10
2.2.2 Měření nejvyšších jasů	11
2.2.3 Měření rozsahu jasů	11
2.3 Měření dopadajícího světla	11
2.4 Veličiny a vztahy popisující světlo	12
2.4.1 Světelný tok	12
2.4.2 Intenzita osvětlení	12
2.4.3 Svítivost	13
2.4.4 Jas	13
2.5 Veličiny a vztahy pro určení správné expozice	13
2.5.1 Expoziční hodnota (Exposure value)	13
2.5.2 Citlivost filmu (film sensitivity)	15

2.5.3	Clona.....	16
2.5.4	Expoziční doba (exposure time, rychlost závěrky).....	16
2.6	Využití světelného senzoru ISL29003 pro účely měření expozice.....	17
2.6.1	Základní vlastnosti ISL29003.....	17
2.6.2	Konstrukční řešení ISL29003.....	18
2.6.3	Struktura senzoru ISL29003.....	18
2.6.4	Komunikace s ISL29003.....	20
3	Realizace digitálního expozimetru s ISL29003	21
3.1	Konstrukční řešení optické části.....	21
3.1.1	Měření dopadajícího světla.....	21
3.1.2	Měření odraženého světla.....	21
3.2	Umístění expozimetru do krabičky Z-61.....	24
3.2.1	Rozmístění ovládacích prvků.....	24
3.2.2	Pohled do nitra expozimetru.....	25
3.3	Popis zapojení.....	25
3.4	Návrh základní kostry řídicího softwaru.....	26
3.5	Návrh konečné verze softwaru.....	27
3.5.1	Stručný popis programu.....	27
3.6	Výpočetní algoritmy.....	28
3.6.1	Převod naměřených dat senzoru ISL29003 na intenzitu osvětlení.....	28
3.6.2	Přepočet intenzity osvětlení na expoziční hodnotu, kalibrace.....	29
3.6.3	Výpočet clony filmové kamery.....	32
3.6.4	Výpočet clony fotoaparátu.....	33
3.6.5	Výpočet závěrky fotoaparátu.....	33
3.7	Ověření digitálního expozimetru v praxi.....	34
4	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Ukázka expoziční tabulky ORWO [5]	3
Obr. 1.2: Ukázka expozičního kalkulátoru z roku 1928 [5]	4
Obr. 1.3: Ukázka optického expozimetru [5]	5
Obr. 2.1: Spektrální citlivost lidského oka a některých čidel citlivých na světlo [4];	7
Obr. 2.2: Schematický řez selenovou destičkou [4];	7
Obr. 2.3: a) Sekonic L-398 b) selenové články (vpravo, [4]).....	8
Obr. 2.4: Germaniové fotodiody pro detekci IR záření [10]	8
Obr. 2.5: a) Fotorezistory CdS [11] b) Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení [4] .	9
Obr. 2.6: Fotonky [4]	10
Obr. 2.7: Mléčná kalota - spherical diffuser Kenko \$27,-	12
Obr. 2.8: Spektrální citlivost ISL 29003, citlivost měření v závislosti na úhlu dopadajícího světla	17
Obr. 2.9: Technický výkres ISL29003 [1]	18
Obr. 2.10: Blokové schéma senzoru ISL29003 [1]	19
Obr. 2.11: Průběhy komunikace s ISL29003 [1]	20
Obr. 3.1: Ukotvení čočky a její přilepení na krabičku.....	22
Obr. 3.2: Kalibrace umístění senzoru a čočky	23
Obr. 3.3: Laser unit HLDPM-650-3, GES electronic	23
Obr. 3.4: Rozmístění ovládacích prvků	24
Obr. 3.5: Pohled do nitra expozimetru.....	25
Obr. 3.6: Návrh základní kostry řídicího softwaru	26

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Citlivost lidského oka na jednotlivé vlnové délky světelného spektra [4]	6
Tab. 2.2: Clonová čísla pro různá osvětlení [3]	12
Tab. 2.3: Závislost mezi clonou, expoziční dobou a Expoziční hodnotou [12]	14
Tab. 2.4: Porovnání jednotlivých norem pro citlivost filmu [13]	15
Tab. 2.5: Normalizovaná řada clonových čísel [3]	16
Tab. 2.6: Doba jednoho cyklu měření v závislosti na měř. rozsahu n-bit rozlišení [1] ..	20

ÚVOD

S rozvojem a miniaturizací elektronických součástek v 70. letech minulého století došlo k postupnému ústupu externích mechanických i jednoduchých elektrických expozimetrů. Cílem většiny výrobců fotoaparátů bylo zpřístupnit fotografii velkým masám lidí, což předpokládalo především snížení nároků na uživatele od přemýšlení nad světelnými podmínkami k pouhému mačkání spouště. Expozimetry se tak staly součástí většiny poloautomatických fotoaparátů i kamer a externí expozimetry zůstaly pouze drahou doménou profesionálních fotografů.

V posledních dvou letech však, i podle slov pracovníků Filmových laboratoří Barrandov, zažívá klasický kinofilm, ale i 8mm a 16mm amatérský film boom. Kameramani už jsou unaveni neustálými změnami digitálních formátů, tato nejistota se přenáší i do vyčkávání kin, která dodnes promítají na starých 35mm promítačkách (pokud už disponují DCI technologií, tak si zároveň ponechávají i staré promítačky), nejinak tomu je u multikin. Archivace digitálních dat je nejistá (spolehlivost a životnost digitálních médií) a klasický film je dodnes považován za základní způsob uchovávání filmových děl. V mnohých zemích jsou filmaři dokonce povinni digitálně natočený film převést na klasický kinofilm, který se poté ukládá do filmových archivů pro budoucí generace.

Podobný návrat, nedávno ještě mnohými vysmíváný, nastal u gramofonové desky, kdy už i v České republice začíná být běžnou praxí vydat MP3 verzi a LP. Součástí koupě vinylu je přibalený kód pro stažení MP3 verze alba. Klasická vinylová deska se stala symbolem vzpoury proti neustálému zrychlování tempu doby a miniaturizaci. Posluchač si chce vystavit velký obal, chápat princip samotného přehrávání. Dá se říci, že projednou vyhrála umělecká stránka mince nad technickou. A rovněž zjištění, že médium, které si může doma vyrobit (nebo vypálit) každý, zcela ztratilo svou psychologickou hodnotu (CD).

Zatímco u vinylu jde spíše o uměleckou a psychologickou hodnotu a zjištění vydavatelství, že člověk chce za tu cenu mít něco velkého, u filmu můžeme doložit i argumenty, proč je lepší než nové formy zpracování obrazu. Opět je tu určitá psychologická stránka věci, kdy už jsou mnozí unaveni hodinami střihu a korekcemi za počítačem. Vyvolání běžného filmu a jeho střih nebo zvětšování fotografií je tak trochu alchymie a hlavně relaxace, kdy nehoníme myši ikonky, ale vidíme pracovat fyzikální zákony v praxi. V podstatě si za vše můžeme sami, od namíchání vývojky po dobu volání. A nepotřebujeme k tomu sedět za klávesnicí.

Ovšem, není to jen o schovávané v temné komoře. I přes všechnu snahu a rozvoj digitálních médií je v případě natáčení **profesionálních** filmů použití klasických pásů levnější (konzultováno ve Filmových laboratořích Barrandov, neplatí pro digitální fotografii). Digitální projekční technika srovnatelná s kvalitou obrazu 35 či 70mm filmu je velmi drahá a pořádně se neví, co bude za deset let. Za to běžný filmový pás odpromítá i vesnické kino s 60 let starými promítačkami s obloukovými lampami (možná se budete divit, kolik kin z takových strojů dodnes promítá). Obraz na filmu je přirozený. Tak jako všude kolem nás koluje spousta prachu, tak i film má na každém snímku své jemné zrno umístěno jinde. Ztrácí se tak pocit statičnosti a neživotnosti,

která je typická pro digitální kamery. Svým rozlišením a jednoduchostí projekce, údržby a životností promítaček, stále vítězí klasický kinofilm, ať chceme, nebo ne. I slavný 3D film Avatar se v těch nejlepších kinosálech promítá z filmových pásů.

Jak už jsem uvedl, spousta amatérů filmařů se vrací k analogovému filmu. Zvýšila se poptávka po starých kamerách, ale i externích expozimetrech. Bohužel, většina jich dnes není funkční, dobové světlocitlivé články po letech přestanou plnit svou funkci. Profesionální expozimetry jsou velmi drahé a proto jsem se rozhodl realizovat digitální expozimetr s dnešní součástkovou základnou. Ponořil jsem se do dobové literatury, abych znovu objevil, co předešlé generace dobře znaly. A doufám, že toto zařízení bude fungovat dobře, spolehlivě a vyplní mezeru na trhu amatérských filmařů.

1 HISTORIE MĚŘENÍ EXPOZICE

1.1 Expoziční tabulky

V samotných počátcích fotografie se expozice měřila odhadem. Tehdejší materiály nebyly nijak výrazně citlivé, bylo zcela normální exponovat jeden snímek hodinu nebo dvě. Při fotografii rodiny se tak nesměl po celou dobu nikdo hýbat, jinak by celá práce fotografa přišla vniveč. Pokud byl snímek exponován o 10 minut déle, nic vážného se nestalo.

Zároveň však vznikají první pomůcky pro určování expozice – tzv. expoziční tabulky. Zprvu se jednalo pouze o zápisky a praktické zkušenosti průkopníků fotografie. Ovšem, užívání takových poznámek se uchytilo jako jednoduchá a užitečná pomůcka pro ostatní začínající fotografy, a tak jako se dnes šíří různé návody a postupy u nových technologií na internetu, docházelo ke sdílení zkušeností i mezi fotografy, až tyto expoziční tabulky začali přibalovat výrobci ke svým filmům. Přesnost nebyla nikterak přelomová, ovšem alespoň ve většině případů již „bylo na obrázku něco vidět“ [5].

ORWO [®] NEGATIVE-FILM				
PANCHROMATIC				
NP 15 15 DIN · 25 ASA 22 FOCT Panchromatic	Sehr feinkörnig. Очень мелкозернистая. Very fine grain. Grain très fin. De grano muy fino. Drobnozrnnistý. Velice jemnozrný.			
NP 20 20 DIN · 80 ASA 65 FOCT Panchromatic	Äußerst konturenscharf. Крайняя резкость контуров. Extremely sharp contours. Netteté des contours extrême. Suma nitidez de contornos. Najwyższa ostrość konturów. Krajní obrysová ostrost.			
NP 27 27 DIN · 400 ASA 360 FOCT Super-Panchromatic	Höchstempfindlich. Наивысшая светочувствительность. Maximum sensitive. Rapidité extrême. Máxima sensibilidad. Najwyższa czułość. Vysoce citlivý.			
	Filmwechsel: bei gedämpftem Licht! Смена пленки: при экранированном свете! Film changing: in subdued light! Changement de la pellicule: à la lumière atténuée! Cambio de la película: a la luz amortiguada! Wymiana filmu: przy przytłumionym świetle! Výměna filmu: při tlumeném světle!			
				
		NP 15 1/60 s		
		NP 20 1/125 s		
		NP 27 1/250 s		
				
		f/11	8	5,6
		f/16	11	8
		f/22	16	11
				
		f/8	5,6	4
		f/11	8	5,6
		f/16	11	8
				
		f/5,6	4	2,8
		f/8	5,6	4
		f/11	8	5,6
				
		f/2	—	—
		f/2,8	—	—
		f/4	2,8	—
				
		500 W		
		m	1 m	1,5 m
			2 m	3 m
		NP 15 1/15 s	f/4	2,8
		NP 20 1/30 s	f/5,6	4
		NP 27 1/60 s	f/8	5,6

Obr. 1.1: Ukázka expoziční tabulky ORWO [5]

Užívání bylo jednoduché a odvíjelo se od roční a denní doby, druhu záběru, stavu oblohy a citlivosti materiálu [3]. Ovšem, výsledky nikdy nebyly přesné, byla důležitá zkušenost a intuice fotografa. Přesto se dodnes filmové materiály ORWO dodávají i s přibalenou expoziční tabulkou (Obr. 1.1) a v NDR nebyli nikdy používání expozimetrů příliš naklonění. Expoziční pružnost jejich fotomateriálů byla a je vysoká, což umožňuje výsledný film výrazně ovlivnit při samotném vyvolávání.

Osvětlení :		Citlivost desek Sch°								Osvětlení :	
Pošmourno		14-15	17-18	19-20	21-22					Zamračeno	
Jasno		14-15	17-18	19-20	21-22					Slunečno	
Únor, Říjen		dopol. 12		10-11	9	8	7			dopol. 12	
Leden, Listop.		dopol. 12		10-11	9	8	7			dopol. 12	
Prosinec		dopol. 12		11	10	9	8			dopol. 12	
Hodiny ..		odpol. 12		1	2	3	4			odpol. 12	
Hodiny ..		odpol. 12		1	2	3	4			odpol. 12	

Předmět snímku:	Expoziční doby ve vteřinách:								Předmět snímku:	
Mračna - Moře - Ledovce.	0	1/500	1/300	1/200	1/100	1/50	1/25	1/10	Sněhové krajiny	
Vnitřky velmi tmavé	0	240	480	960						Vnitřky kostelů s barevnými okny
Vnitřky tmavé	0	30	60	120	240	480	960	Vnitřky kostelů světlé		
Vnitřky světlé	0	4	8	16	30	60	120	240	Portréty v pokoji 2-3 m od okna	
Krajina otevřená - Rybníky - Panoramy	0	1/100	1/50	1/25	1/10	1/5	1/2	1	Spórt na volném prostranství	
Krajina s popředím světlým	0	1/50	1/25	1/10	1/5	1/2	1	2	Pobřeží	
Krajina s popředím tmavým	0	1/25	1/10	1/5	1/2	1	2	4	Ulice široké, světlé	
Ulice úzké - Uliční scény	0	1/25	1/10	1/5	1/2	1	2	4	Architektura tmavá - Střomy	
3 ² 4 ⁵ 6 ³ 9 12 18 25										
Relativní otvor objektivu f:										

Expoziční měřítko

systém ing. Vlad. Kutina.

Patent ohlášen.

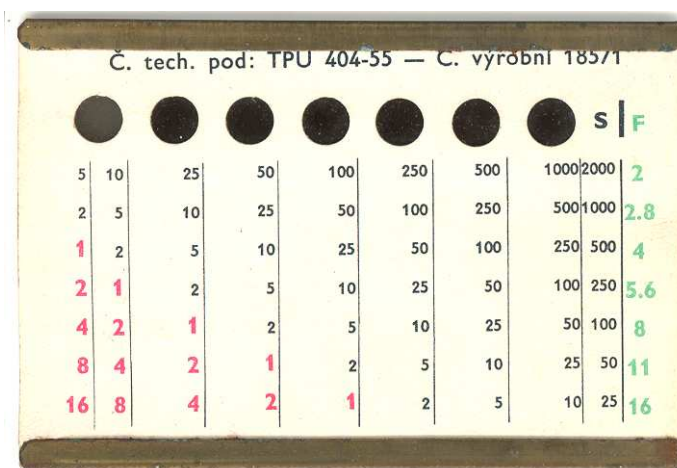
Exp

1.2 Optické expozimetry

První revolucí v měření světelných podmínek byly optické expozimetry (dobově optické osvitoměry), založené na pozorování snímaného předmětu přes šedý klín proměnlivé hustoty, opatřený číselnou stupnicí. Posunuje se jím tak dlouho, až oko přestane rozeznávat podrobnosti na předmětu nebo číslice na stupnici. Osvitová doba se odečte přímo ze stupnice klínu, převod na danou citlivost materiálu a clonové číslo se volí pomocí tabulky připojené k expozimetru.

Tento způsob měření se řadí mezi tzv. subjektivní metody, protože „správnost výsledků závisí na schopnostech a okamžitém stavu oka“ [3]. Při delším pozorování se oko přizpůsobuje novým podmínkám a postupně vidí jinak, než na počátku měření. Měření tak musí probíhat hbitě pro co největší přesnost. Výsledky měření nejsou příliš přesné, ale už o mnoho lepší, než v případě užití expozičních tabulek. Příklad optického expozimetru je na obrázku 1.3.

Pokud z tohoto popisu není funkce optického expozimetru dostatečně zřejmá, není od věci shlédnout film Jiřího Menzela, *Báječní muži s klikou*, kde samotný režisér měření touto metodou provádí. Poslední optické expozimetry se vyráběly na sklonku 50. let. Pak již přišla éra elektrických expozimetrů.



Obr. 1.3: Ukázka optického expozimetru [5]

1.3 Elektrické expozimetry

První elektrické expozimetry nebyly opět nijak výrazně přesné, ale měření opět usnadnily. Využívaly často přímého propojení fotocitlivého článku s citlivým ručičkovým mikrovoltmetrem a jedním měřicím rozsahem. Elektrickým expozimetřům a měření osvitů elektronickými prvky budou věnovány následující kapitoly.

2 ELEKTRONICKÉ MĚŘENÍ SVĚTLA

2.1 Světlo a fotosenzitivní materiály

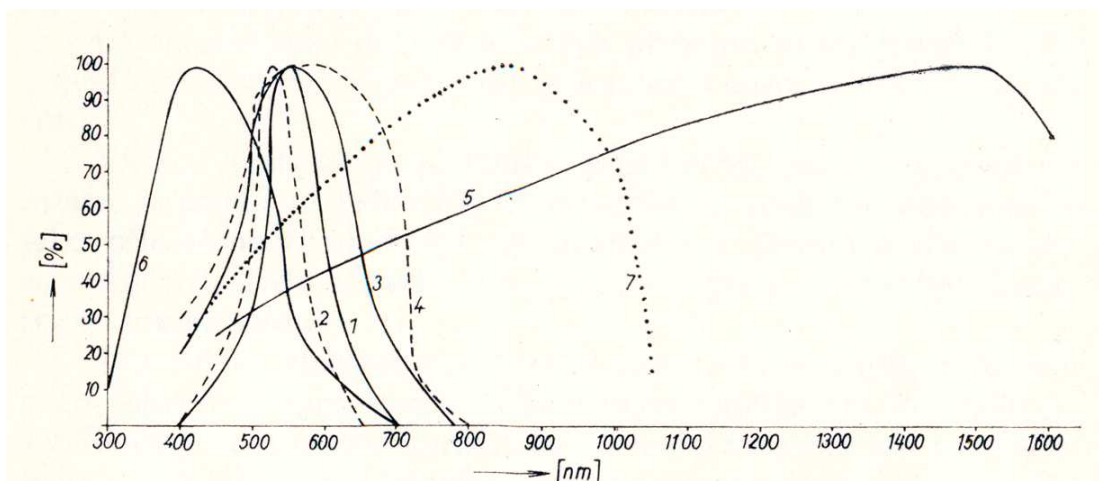
Světlo je elektromagnetické záření určitých vlnových délek. Lidské oko vnímá jen malý úsek celého spektra tohoto záření v rozmezí 400 až 800 nm. Tzn., že vnímá světlo, které se označuje jako „bílé“ (sluneční záření), ačkoli se skládá ze záření mnoha vlnových délek. Záření určité vlnové délky vnímá oko jako světlo určité barvy.

Ovšem, záření každé vlnové délky vnímá oko odlišně, a tak k vyvolání vjemu stejné intenzity je třeba pro různé barvy rozdílné energie:

Tab. 2.1: Citlivost lidského oka na jednotlivé vlnové délky světelného spektra [4]

Délka vlny [nm]	Citlivost lidského oka [%]
385	0,01
400	0,04
440	2,30
480	13,90
520	71,00
555	100,00
580	87,00
620	38,10
660	6,10
700	0,41
755	0,01

Z křivek spektrální citlivosti lidského oka a některých fotosenzitivních materiálů je patrné, že maximum citlivosti se nachází v oblasti zeleného světla, tedy v okolí vlnové délky 555 nm. Z těchto poznatků vyplynul požadavek najít takový negativní materiál, jehož citlivost by odpovídala citlivosti lidského oka. K měření intenzity světla, je zapotřebí opět vyrobit čidlo s podobnou spektrální citlivostí, tedy reagující jen na konkrétní vlnové délky. Vývoj těchto materiálů byl zdlouhavý proces, který není ani dnes u svého konce. Fotolaboratoře Kodak a Fuji přicházejí se stále novými typy fotomateriálů (9. 12. 2010) a vyvíjejí se nová a nová světlocitlivá čidla, která se stále více přibližují citlivosti lidského oka.



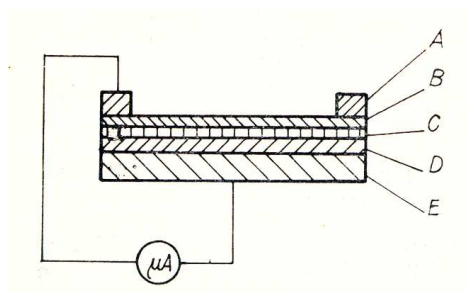
Obr. 2.1: Spektrální citlivost lidského oka a některých čidel citlivých na světlo [4];

1 lidský zrak při běžném osvětlení; 2 lidský zrak při slabém osvětlení; 3 selenový článek; 4 fotorezistor CdS; 5 germaniová fotodioda; 6 fotonka; 7 křemíková fotodioda

2.1.1 Selenové fotoelektrické články

Selen je jedním z vůbec prvních polovodičů, který se pro účely měření světla začal používat. Je známý také jako dobová náhrada vakuových diodových usměrňovačů.

Na kovový podklad je nanesena vrstva selenu vodivosti P o tloušťce cca 0,08 mm. Na tuto vrstvu se napaří další vrstva selenu opačné vodivosti N a na ni ještě průhledná vrstva zlata nebo platiny. Na okraji článku je úzký kontaktní pás z Woodova snadno tavitelného kovu. Celý článek je chráněn bezbarvým lakem.

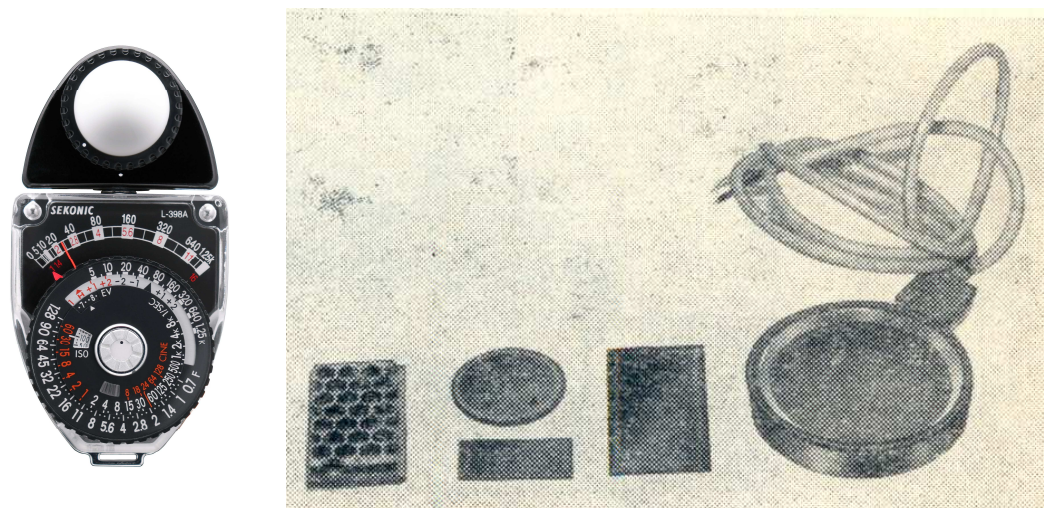


Obr. 2.2: Schematický řez selenovou destičkou [4];

A dotykový pás; B vodivá průhledná vrstva; C selenová vrstva vodivosti N; D selenová vrstva vodivosti P; E kovový podklad;

Dopadající světlo prochází krycí vrstvou a selenem vodivosti N. Vlivem vnitřního světelného jevu dochází k pohybu elektronů mezi jednotlivými vrstvami selenu, vzniká elektrické napětí – na kovovém podkladu je kladný pól, na selenové vrstvě typu N je záporný pól. Následné měření světla se provede uzavřením elektrického obvodu citlivým ručičkovým (nebo dnes digitálním) mikroampérmetrem. Velikost napětí, které vzniká na selenovém fotoelektrickém článku, závisí nejen na intenzitě dopadajícího

světla, ale i na rozměrech článku. Spektrální citlivost tohoto čidla je velmi blízká lidskému oku. Selen je však choulostivý na vlhkost, rtuťové páry a stárnutím dochází ke změnám jeho vlastností. Starým expozimetřům se selenovým článkem tak dnes nelze příliš věřit a i proto se od jeho užívání téměř ustoupilo. Avšak z důvodu, že je selenový článek ideální pro **analogový expozimetr** bez nutnosti napájení, se dodnes jeden takový přístroj se selenovým článkem vyrábí. Jedná se o expozimetr firmy Sekonic L-398A.



Obr. 2.3: a) Sekonic L-398 (oficiální fotografie produktu) b) selenové články (vpravo, [4])

2.1.2 Germaniové fotodiody

Každá běžná germaniová dioda je citlivá na světelné záření. Germaniová fotodioda je pouze konstrukčně uzpůsobená tak, aby světlo dopadalo na nejcitlivější oblast jejího PN přechodu. Opět dochází k vnitřnímu fotoelektrickému jevu, jenž lze využít pro další vyhodnocování dopadajícího záření.

Germaniové diody jsou bohužel silně závislé na teplotě a mají zcela nevyhovující spektrální citlivost – jsou nejcitlivější v oblasti IR záření. Z tohoto hlediska je jejich využití nevyhovující a kromě detektorů IR záření již dnes patří spíše do elektrotechnické historie.



Obr. 2.4: Germaniové fotodiody pro detekci IR záření [10]

2.1.3 Křemíkové fotodiody

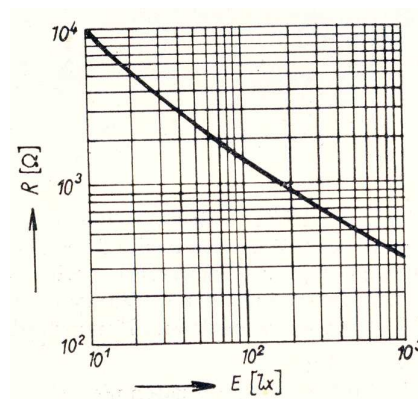
Konstrukční řešení je podobné, jako u germaniových fotodiod. Křemíková fotodioda je ovšem podstatně odolnější proti stárnutí, její teplotní závislost je pro účely expozimetrů zanedbatelná. Spektrální charakteristika je pro fotografické účely nevhodná, ale lze ji upravit různými filtry. Křemíkových fotodiod využívá i čidlo ISL29003, použité v dále popisované konstrukci digitálního expozimetru. Právě ISL29003 používá zelený filtr pro co největší přiblížení se spektrální citlivosti lidského oka. Křemíkové fotodiody se používají hojně ve filmovém průmyslu pro čtení optické filmové stopy na 16 a 35mm promítačkách. Takřka ve všech posledních typech promítaček ve východním bloku je použita fotodioda 1PP75 z bývalého národního podniku TESLA. (Zjištěno z originálních manuálů dobových zařízení n.p. Meopta.)

2.1.4 Fototranzistory

Dopadá-li světlo na vrstvu mezi emitorem a bází, vzniká podobný jev jako u fotodiody. Vzhledem k tomu, že tranzistor má zároveň určitý zesilovací činitel, je výstupní proud podstatně vyšší než u fotodiod. Závislost mezi proudem a osvětlením není lineární, a tak se fototranzistory uplatní tam, kde má malá změna světla vyvolat velkou změnu proudu (například soumrakový spínač).

2.1.5 Fotorezistory

Při osvětlování fotorezistorů nevzniká žádná elektrická energie, jako u dosud popsaných prvků, mění se však jejich odpor. K jejich výrobě se používá selen, sirník, thalium, telurid olovnatý, germanium a sirník kadmnatý (CdS), jehož sloučeniny jsou na světlo nejcitlivější. Nevýhodou fotorezistorů je jejich značná setrvačnost, i přesto se v minulosti pro realizaci elektronických expozimetrů využívaly nejvíce. Fotorezistory u nás dodnes vyrábí, nebo přinejmenším doprodává TESLA Blatná.



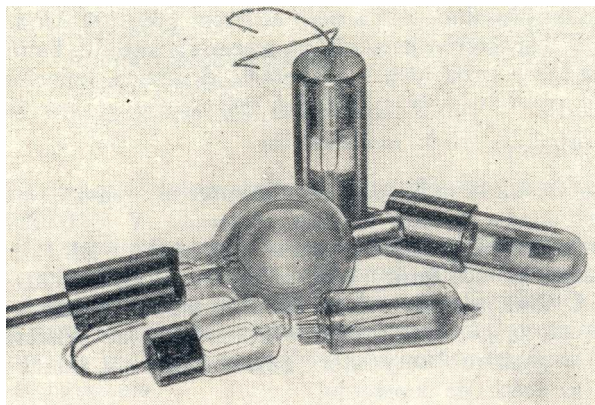
Obr. 2.5: a) Fotorezistory CdS [11]

b) Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení [4]

2.1.6 Vakuové fotonky a fotonky plněné plynem

Fotonky jsou v podstatě elektronky s katodou napařenou na vnitřní stěně skleněné baňky, anodu tvoří kovový prstenec nebo smyčka. Při osvětlení fotonky zapojené do stejnosměrného obvodu dojde k fotoemisi, což je proudění elektronů od katody k anodě.

Fotonky plněné plynem jsou podstatně citlivější, typická je pro ně ovšem také vyšší setrvačnost. Naproti tomu vakuové fotonky mohou být použity v obvodech s kmitočty až do desítek MHz. Fotonky lze využít ve fotografickém procesu jako citlivý článek pro černobílou fotografii.



Obr. 2.6: Fotonky [4]

2.2 Měření odraženého světla

Jinak také měření jasu snímané scény. Podle okolností a požadovaného výsledku je možné využít některou z následujících metod.

2.2.1 Měření součtového jasu

Tato metoda je využívána pro měření expozice nejčastěji. Expozimetr se zaměřuje z místa stanoviště kamery (fotoaparátu) na scénu, která se bude natáčet (fotit). Čidlo tedy musí směřovat na snímané objekty.

Tato forma měření je optimální například při záběrech krajiny, kdy není zapotřebí procházet celý terén a měřit jednotlivá místa, ale stačí nám zjištění, kolik světla se v určitém směru v přírodě ke kameře nebo fotoaparátu odráží.

Je zapotřebí dávat si pozor na mnohem vyšší jas oblohy a tím i ovlivnění správného měření. Aby se vliv oblohy vyloučil (a nedošlo k natočení podexponované krajiny), je nutné při měření krajiny sklonit expozimetr poněkud k zemi, nebo jej shora zastínit rukou.

Při měření je třeba brát v úvahu různý jas hlavních a vedlejších částí záběrů a jejich vliv na výsledné měření. Proto, při měření záběrů s velkým rozsahem jasů (například lyžař na sněhu za horského slunce) je nutné se přiblížit ke snímanému předmětu (lyžař) tak blízko, aby vyplnil celé zorné pole expozimetru.

Při mimořádně malých světelných kontrastech je třeba prodloužit dobu expozice na dvojnásobek, než udává expozimetr, nebo nastavit citlivost filmu o 3 DIN nižší. Za předpokladu mimořádně velkých kontrastů se zase zkracuje doba expozice na polovinu, nebo se nastaví citlivost filmu o 3° DIN větší (DIN = Deutsches Institut für Normung, více o citlivosti filmu v kapitole 2.5.2.).

2.2.2 Měření nejvyšších jasů

Používá se, pokud je zapotřebí ve všech záběrech udržet stejné podání vrcholného světla. Na snímaném objektu je nalezena dostatečně velká plocha o nejvyšším jasu, která je snímána dostatečně blízko umístěným expozimetrem.

Odečtené clony zatím nelze využít, protože je expozimetr sestaven pro určování průměrného osvitu celé kompletní scény. Protože byl změřen jen nejvyšší jas záběru, byl by záběr značně podexponován se zataženými světly a neprůhlednými stíny. Z tohoto důvodu se u středně citlivého materiálu zjištěné clonové číslo zmenší o tři stupně z normalizované řady clonových čísel. U vysoce citlivého filmu pak clonové číslo klesá o 4 stupně dolů.

Metoda měření nejvyšších jasů je výhodná při záběrech zblízka za kontrastního umělého osvětlení. Nehodí se pro záběry krajin a u objektů bez jasných bílých ploch. Je ale možné si pro účely měření pomoci kusem bílého papíru a poté postupovat zcela identicky.

2.2.3 Měření rozsahu jasů

Od předcházející metody se liší v tom, že kromě nejvyšších jasů jsou měřeny stejným způsobem i stíny, které ještě mají být prokresleny. Získají se tak dvě clonová čísla. Z normalizované řady clonových čísel je vybrána jejich střední hodnota, která je vzdálena od obou naměřených clonových čísel o stejný počet stupňů.

Jedná se o geometrický průměr clonových čísel.

$$c = \sqrt{a \cdot b}, \quad (2.1)$$

c ... výsledná clona
a ... clona pro nejvyšší jas
b ... clona pro stín.

Pro spolehlivé měření jasů potřebujeme expozimetr s velmi malým zorným úhlem.

2.3 Měření dopadajícího světla

K přesnému stanovení expozice lze dojít způsobem, kdy měříme intenzitu světla, které na snímáný objekt dopadá.

Pomocí opálové destičky (mléčné difúzní sklo) je možné zjistit osvit části plochy snímaného předmětu. V případě využití mléčné kaloty (obr. 2.7), neboli sférického difuzéru, lze dokonce změřit světlo dopadající na celý trojrozměrný předmět. Mléčná kalota totiž rozšiřuje zorný úhel expozimetru natolik, že zachytí světlo dopadající na předmět z různých směrů.

Vzhledem k tomu, že dochází pouze k měření dopadajícího světla a nikoli také neméně důležitého jasů samotného objektu, je někdy zapotřebí naměřenou hodnotu upravit. Je-li snímáný objekt hodně tmavý, snižuje se clona o půl až jedno clonové číslo. A naopak při světlém objektu se clonové číslo u půl stupně zvyšuje.



Obr. 2.7: Mléčná kalota - spherical diffuser Kenko \$27,-

Měření dopadajícího světla se s výhodou uplatní hlavně při natáčení v ateliéru nebo doma při umělém osvětlení, kdy je možné dobře a spolehlivě proměřovat osvětlení různých částí záběru a podle výsledku měnit vzdálenost nebo výkon reflektorů. Dopadající světlo se měří v luxech (jednotka osvětlení), a konkrétně čidlo ISL29003 je konstruováno přímo pro měření dopadajícího světla. Změřená data jsou odesílána do řídicího mikrokontroléru přímo v luxech.

Jednotlivým veličinám a přepočtům se bude věnovat následující kapitola.

Tab. 2.2: Clonová čísla pro různá osvětlení [3]

Osvětlení [lx]		80 000	40 000	20 000	10 000	5000	2500	1250	630
Osvětlová doba pro 17 DIN	1/100	11	8	5,6	4	2,8	2	1,4	
	1/50	16	11	8	5,6	4	2,8	2	1,4
	1/25	22	16	11	8	5,6	4	2,8	2

2.4 Veličiny a vztahy popisující světlo

2.4.1 Světelný tok

Jednotkou Světelného toku Φ je **lumen**.

1 lumen je definován jako 1,464 miliwattu zářivé elektromagnetické energie o vlnové délce 555 nm, jedná se tedy o zářivý výkon posuzovaný z hlediska citlivosti lidského oka.

2.4.2 Intenzita osvětlení

Nebo osvětlenost dle ČSN EN 12665 bod 3.2.11.

Osvětlením E [lx] dané plochy se rozumí poměr světelného toku Φ [lm] dopadajícího rovnoměrně na ozařovanou plochu a velikosti této plochy S [m²]:

$$E = \frac{\Phi}{S}. \quad (2.2)$$

Jednotkou osvětlení je lux, 1 lux je definován jako osvětlení způsobené světelným tokem 1 lm na plochu 1 m².

2.4.3 Svítivost

Jednotkou *svítivosti* I je Candela [cd], jedna ze sedmi základních jednotek soustavy SI. 1 candela je *svítivost* světelného zdroje, který v daném směru emituje monochromatické záření o vlnové délce 555nm a jehož *zářivost* v tomto směru činí 1/683 wattů na jeden steradián.

Svítivost udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech. *Svítivost* lze určit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj, jehož rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (2.3)$$

kde $d\Phi$ je tok světelného zdroje vyzařující do prostorového úhlu $d\Omega$.

Zářivost je v podstatě totéž, co *svítivost*, její jednotkou je však $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

2.4.4 Jas

Jas [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$] je měrnou veličinou *svítivosti* a je definován jako poměr *svítivosti* ku osvětlené ploše. Označuje se písmenem L.

2.5 Veličiny a vztahy pro určení správné expozice

Expozimetr musí dále operovat s naměřenými veličinami popsány v předchozích bodech. Samotná intenzita osvětlení v luxech není dostatečná pro určení správné expoziční doby nebo clony objektivu. Je důležité počítat s dalšími proměnnými, jako jsou citlivost filmu, velikost výseče zatemňovacího mechanismu filmové kamery atp. Ve fotografii je jakousi základní jednotkou *Expoziční hodnota*, říkájící, jak moc je scéna nasvětlena. Teprve od ní se odvíjí a dopočítává *doba expozice a clona objektivu*.

2.5.1 Expoziční hodnota (Exposure value)

Expoziční hodnota (EV) pokrývá všechny kombinace nastavení fotoaparátu – tedy všechny kombinace rychlosti závěrky (*expoziční doby*) a *clony* objektivu, které zajistí stejné exponování snímku (za různého nastavení clony a rychlosti závěrky budou výsledná fotografie nebo filmový pás prokresleny stejně). Koncept byl vyvinut v Německu v roce 1950 ve snaze zjednodušit výběr mezi kombinacemi nastavení fotoaparátu. *Expoziční hodnotu* lze vypočítat:

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t}, \quad (2.4)$$

EV ...expoziční hodnota (Exposure Value) [-]

N ... clona [-]

t ... expoziční doba (rychlost závěrky) [s]

vzorec je platný pro citlivost filmového materiálu ISO 100/21°

Tab. 2.3: Závislost mezi clonou, expoziční dobou a Expoziční hodnotou [12]

EV	Clona									
	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0	11	16	22
-6	60	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	64 m	128 m	256 m	512 m
-5	30	60	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	64 m	128 m	256 m
-4	15	30	60	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	64 m	128 m
-3	8	15	30	60	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m	64 m
-2	4	8	15	30	60	2 m	4 m	8 m	16 m	32 m
-1	2	4	8	15	30	60	2 m	4 m	8 m	16 m
0	1	2	4	8	15	30	60	2 m	4 m	8 m
1	1/2	1	2	4	8	15	30	60	2 m	4 m
2	1/4	1/2	1	2	4	8	15	30	60	2 m
3	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	15	30	60
4	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	15	30
5	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	15
6	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8
7	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2	4
8	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1	2
9	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2	1
10	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4	1/2
11	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8	1/4
12	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15	1/8
13	1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30	1/15
14		1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60	1/30
15			1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125	1/60
16				1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250	1/125
17					1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500	1/250
18						1/8000	1/4000	1/2000	1/1000	1/500
19							1/8000	1/4000	1/2000	1/1000
20								1/8000	1/4000	1/2000
21									1/8000	1/4000

Tabulka je platná pro citlivost filmového materiálu ISO 100/21°. Pro citlivost filmu ISO 200/24° se EV zvyšuje o jedničku. Pro ISO 400/27° o dvojku, odečítají se tedy v tabulce hodnoty o dva řádky níže.

Možná více napoví vzorec:

$$EV_s = EV_{100} + \log_2 \frac{S}{100}, \quad (2.5)$$

S ... citlivost filmu v ASA stupnici (100, 200, 400, 800 ...)

Zjištění expoziční hodnoty z intenzity osvětlení změřené čidlem digitálního expozimetru je možné provést výpočtem dle vzorce 2.6:

$$EV = \log_2 \frac{E \cdot S}{C}, \quad (2.6)$$

E ... intenzita osvětlení [lx]

S ... citlivost filmu v ASA stupnici

C ... kalibrační konstanta expozimetru

2.5.2 Citlivost filmu (film sensitivity)

Citlivost filmu sjednotily organizace American Standards Association (ASA) a Deutsches Institut für Normung (DIN). V Evropě se až do 80. let používal především systém značení DIN a v USA zase ASA. Ovšem časem došlo ke kompromisnímu sjednocení zavedením normy ISO, která kombinuje oba standardy. A to formou zápisu ASA/DIN, například film o citlivosti ISO 100/21°. Mnohdy je ISO synonymem pro citlivost filmu, jde však pouze o zdůraznění, podle jaké normy je citlivost filmu popisována (ISO 12232:1998). Uvádění údaje např. ISO 400 ve fotoaparátech je tak nekompletní (chybí druhá část dle DIN), správně se jedná o ASA 400, DIN 27° nebo ISO 400/27°. V Rusku se pak používá norma GOST. Srovnání v tabulce 2.4.

Tab. 2.4: Porovnání jednotlivých norem pro citlivost filmu [13]

ASA	DIN	GOST	Příklady filmů o dané citlivosti
6	9		Kodachrome original (1. verzi navrhl Karel Schinzel v Opavě)
8	10		Polaroid PolaBlue
10	11		Kodachrome 8mm
12	12	11	Agfa Dia-Direct
16	13	11	Agfacolor 8 mm reversal film
20	14	16	Adox CMS 20
25	15	22	Kodachrome II, Kodachrome 25
32	16	22	Kodak Panatomic-X
40	17	32	Kodachrome 40
50	18	45	Fuji RVP, Kodak Vision2 50D 5201, AGFA CT18
64	19	45	Kodachrome 64, Ektachrome-X
80	20	65	Ilford Commercial Ortho
100	21	90	Fomapan R100
125	22	90	Kodak Plus-X Pan
160	23	130	Fujicolor Pro 160C/S, Kodak Portra
200	24	180	Agfa Scala 200, Fujicolor Superia 200
250	25	180	Tasma Foto-250
320	26	250	Kodak Tri-X Pan Professional
400	27	350	Kodak Tri-X 400
500	28	350	Kodak Vision3 500T 5219
640	29	560	Polaroid 640
800	30	700	Fuji Pro 800Z
1000	31	700	Kodak TMAX
1250	32		Kodak Royal-X Panachromatic

2.5.3 Clona

Clona reguluje množství světla dopadajícího na fotocitlivý materiál. Funguje na podobném principu jako oční zornička a určuje se pomocí clonového čísla N .

$$N = \frac{f}{D}, \quad (2.7)$$

N ... clonové číslo,
 f ... ohnisková vzdálenost objektivu,
 D ... průměr vstupní pupily.

Operuje se s mezinárodní normalizovanou řadou clonových čísel (tabulka 2.5), jak už bylo popsáno v dřívějších kapitolách.

Tab. 2.5: Normalizovaná řada clonových čísel [3]

AV	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
N	0.5	0.7	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0	11	16	22	32	45	64	90	128

AV je tzv. **A**perature **V**alue ze systému APEX zavedeným v roce 1960 organizací ASA pro ucelení popisu a výpočtů expozice. EV a AV se liší v tom, že AV zanedbává citlivost filmu a pomáhá tedy popisovat pouze vztahy mezi clonou a rychlostí závěrky, zatímco EV (exposure value, expoziční hodnota) bere v úvahu také citlivost filmu. Kdyby se u tabulky 2.3 zaměnilo značení EV za AV, **nebylo** by nutné doplňovat informaci, že údaje v tabulce jsou platné pouze za předpokladu užití filmu ISO 100/21°.

Tabulka 2.5 zase odpovídá skutečnosti za předpokladu, že je expoziční doba (rychlost závěrky) rovna jedné sekundě. Pro lepší pochopení byly v tabulce 2.3 vyznačeny buňky s expoziční hodnotou 1s, kde je opět zřetelná v širším pojetí normalizovaná řada clonových čísel.

Zmenší-li se či zvětší-li se otvor clony o jeden vyznačený stupeň clonového čísla, je množství světla dopadajícího na film poloviční, respektive dvojnásobné. Čím vyšší je clonové číslo, tím menší je otvor clony a tím méně světla také dopadne na film.

Clona ovlivňuje také hloubku ostrosti filmu. Za situace, kdy je clona maximálně otevřená, můžeme určit *světelnost objektivu* jako podíl volného průměru objektivu ku ohniskové vzdálenosti.

2.5.4 Expoziční doba (exposure time, rychlost závěrky)

Expoziční doba se měří v sekundách a značí písmenem t . Určuje dobu osvitu světlocitlivého materiálu. Volba expoziční doby fotografovi umožňuje ovlivnit výsledné vykreslení zachycené reality. Například fotografie noční křižovatky s dlouhou expoziční dobou zachytí prostředí jako tepnu provozu, nikoli jednotlivá auta. Volba nesprávné expoziční doby mnohdy vede k rozmazaným fotografiím, kdy fotografované předměty jsou ve svých pohybech rychlejší, nežli samotný fotoaparát. Vůči expoziční době je třeba vždy upravovat clonu, abychom dosáhli stejného osvitu filmu. Viz tab. 2.3.

2.6 Využití světelného senzoru ISL29003 pro účely měření expozice

2.6.1 Základní vlastnosti ISL29003

Senzor ISL29003 komunikuje po sběrnici I²C. Nutno podotknout, že digitálních čidel pro účely měření světla je velmi málo, senzor s tak vysokým rozlišením měření je v této kategorii patrně jenom jeden, a to z řady ISL2900X společnosti Intersil, která se stále vyvíjí a přivádí na trh kontinuálně nová a vylepšená řešení.

V předchozích kapitolách byly rozebrány požadavky na světlocitlivé články ve fotometrii. Proto je možné v tuto chvíli pouze některé z pojmů připomenout a ověřit si, zda je ISL29003 svými parametry vyhovující.

Spektrální citlivost je pomocí zeleného světelného filtru umístěného před diodová pole korigována tak, aby se co nejvíce blížila vnímání světla lidského oka. To znamená, že je senzor v případě měření viditelného spektra nejvíce citlivý na vlnovou délku 555nm. Aby bylo potlačeno ovlivňování měření IR zářením, obsahuje senzor dvě pole fotodiod. Jedno pole měří dopadající světlo s ohledem na citlivost lidského oka a druhé je určeno pro měření IR záření. Senzor lze nastavit tak, aby byla výstupní data výsledkem odečtení IR složky od měření širšího spektra, čímž se částečně sníží chybovost způsobená zdrojem IR záření. Zelený filtr je bohužel i nad polem fotodiod měřicím IR složku spektra, což způsobí, že je i při měření IR záření zesíleno pásmo v okolí 555 nm. Odečtením IR složky se tedy odečítá i užitečná složka 555nm. Dá se tedy konstatovat, že umístění zeleného filtru i nad pole diod pro měření IR záření značně eliminuje možnost vyloučení vlivu IR záření. Konstrukční řešení čidla je v tomto ohledu nešťastné, neboť potlačení vlivu IR záření je minimální.

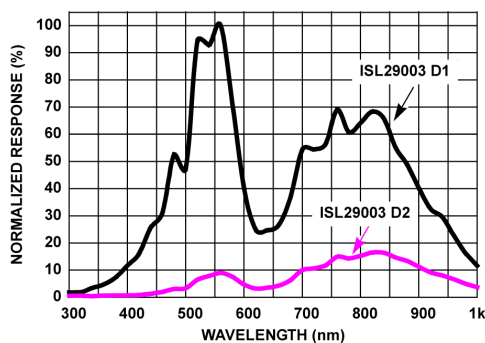


FIGURE 8. SPECTRAL RESPONSE

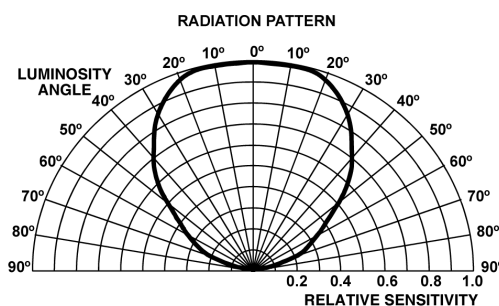


FIGURE 9. RADIATION PATTERN

Obr. 2.8: Spektrální citlivost ISL 29003, citlivost měření v závislosti na úhlu dopadajícího světla

Zorný úhel měření je velmi důležitý pro účely měření odraženého světla, je totiž v zájmu fotografa a kameramana, aby zorný úhel expozimetru byl podobný zornému úhlu objektivu snímajícího danou scenerii. Z obrázku 2.9 vyplývá, že senzor žádný přesný zorný úhel nemá, spíše se jedná o plynulý přechod mezi maximální a minimální citlivostí. Proto je zapotřebí zorný úhel korigovat další optikou – v případě měření odraženého světla definovat pomocí čočky jasný zorný úhel a spektrálním difuzérem při měření dopadajícího světla maximálně rozšířit zorný úhel a zprůměrovat dopadající

světlo.

ISL29003 má 4 **měřicí rozsahy**. 1000, 4000, 16 000 a 64 000 luxů. Nejcitlivější expozimetry umí měřit intenzitu osvětlení do cca 70 000 luxů, z čehož vyplývá, že svým měřicím rozsahem je tento senzor vyhovující.

Digitální senzor obsahuje rovněž **teplotní kompenzaci**, díky které udržuje výsledky měření téměř konstantní bez ohledu na jeho aktuální teplotu.

Provozní teplotní rozsah -40 až 85°C umožňuje měření i v extrémních podmínkách.

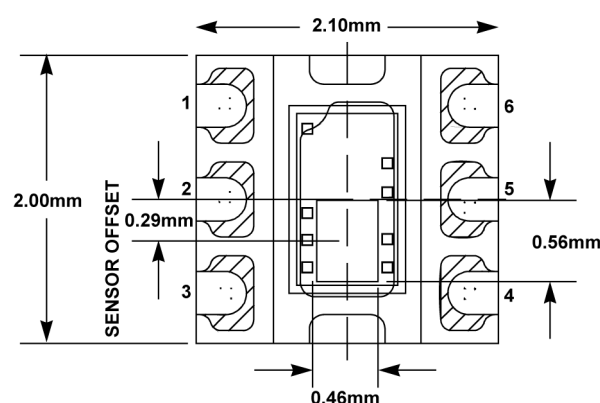
Z těchto poznatků lze dovodit, že senzor ISL29003 je pro účely sestavení digitálního expozimetru vhodný.

2.6.2 Konstrukční řešení ISL29003

Senzor je vyráběn ve speciálním světlopropustném pouzdru 6 LD ODFN. Využívají jej pouze světelné senzory společnosti Intersil a bylo tudíž nutné vytvořit pro návrh desky novou součástku v knihovně návrhového softwaru Eagle.

Zajímavostí je chladičí plocha ze spodní strany pouzdra. Ta není ani tak z důvodu vlastního zahřívání obvodu, ale naopak slouží k ochlazování senzoru při měření vysokých intenzit dopadajícího světla. Za předpokladu, že světlo koncentrujeme další optikou do malého prostoru světlocitlivé fotodiody, by mohlo dojít ke spálení celého senzoru.

Obvod ISL29003 pro správnou funkci měření vyžaduje, aby dopadající svazek světla byl alespoň o průměru 1,5mm [1]. To vychází z obecného a nepříliš psaného pravidla, že dopadající světelný svazek má být alespoň 3x širší, než je nejkratší strana přijímací fotocitlivé plochy světelného senzoru.

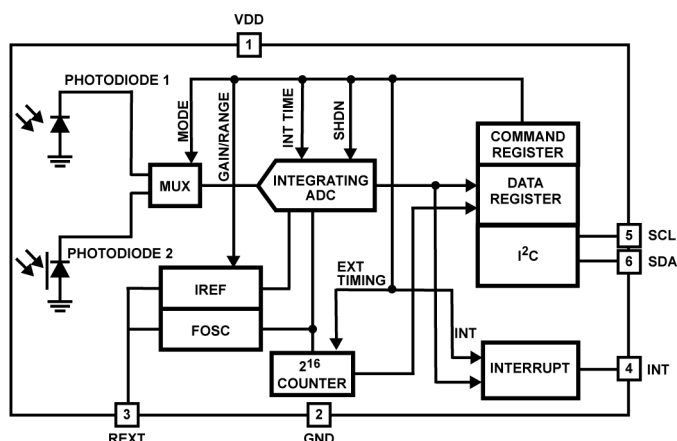


Obr. 2.9: Technický výkres ISL29003 [1]

2.6.3 Struktura senzoru ISL29003

ISL29003 obsahuje *dvě fotodiody*. D1 je citlivá jak na viditelné, tak infračervené záření, zatímco D2 reaguje především na infračervené záření. Proud z fotodiody je poté konvertován 16 bitovým AD převodníkem. Příkazem po sběrnici I²C lze přepínat módy,

kteřá z fotodiód bude při konverzi aktivní. Mode1 = D1, Mode2 = D2, Mode3 = D1 – D2. Mode 3 se hodí právě pro účely digitálního expozimetru, kterým se správně měří pouze viditelné složky elektromagnetického záření. Potlačení IR záření je však, jak už bylo uvedeno výše, nedostatečné a je třeba tuto skutečnost mít u měření na paměti (pokud bude focen nebo natáčen infrazářič, je třeba si uvědomit, že expozimetr s největší pravděpodobností spočítá expozici či clonu špatně).



Obr. 2.10: Blokové schéma senzoru ISL29003 [1]

AD převodník je schopen pracovat v několika režimech. Od 4 bitového až po 16 bitové rozlišení. Konvertování v 16 bitovém módu trvá déle, výsledná data jsou ovšem přesnější. Pracovní frekvenci převodníku určuje buďto interní dvou rychlostní oscilátor s externím rezistorem cca 100k zapojeným mezi GND a REXT nebo se odvíjí od frekvence na sběrnici I²C. Frekvence interního oscilátoru lze spočítat podle vzorců:

$$f_{osc1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{100k}{R_{EXT}} \cdot 655kHz, \quad (2.8)$$

$$f_{osc2} = \frac{100k}{R_{EXT}} \cdot 655kHz. \quad (2.9)$$

Ze vzorců je patrné, že oscilátor pracuje ve dvou režimech – kdy je zařazena dělička dvěma, a kdy naopak není. Při použití $R_{EXT} = 100k$ je pak pracovní frekvence převodníku 655 kHz a 327 kHz. Nižší frekvence je užita pro měření na nejnižším rozsahu (při nejmenších intenzitách světla), jelikož je pro správné měření nízkých intenzit osvětlení nutný delší čas.

Senzor nedokáže sám volit své měřicí rozsahy. Kontrolu výsledku měření a na následně i přepnutí rozsahu musí řídit připojený mikroprocesor. Taktéž senzor ISL29003 žádným způsobem neindikuje dokončení měření. Tuto funkci mají až novější verze senzoru, jsou však hůře sehnatelné na světovém trhu součástek. Je proto zapotřebí dle datasheetu zjistit dobu měření a z ní teprve časovat čtení změřených dat mikroprocesorem. Více v tab. 2.6.

Tab. 2.6: Doba jednoho cyklu měření v závislosti na měř. rozsahu n-bit rozlišení [1]

n	RANGE1 $f_{OSC} = 327 \text{ kHz}$		RANGE4 $f_{OSC} = 655 \text{ kHz}$	
	$t_{INT} [\text{ms}]$	RESOLUTION LUX/COUNT	$t_{INT} [\text{ms}]$	RESOLUTION LUX/COUNT
16	200	0.01	100	1
12	12.8	0.24	6.4	16
8	0.8	3.90	0.4	250
4	0.05	62.5	0.025	4000

ISL29003, jak je patrné z obrázku 2.10, obsahuje ještě příkazové a datové registry pro účely komunikace po sběrnici I²C.

2.6.4 Komunikace s ISL29003

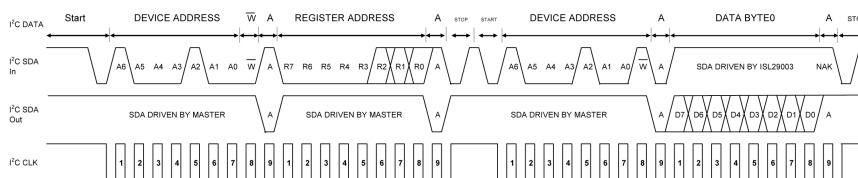


FIGURE 1. I²C READ TIMING DIAGRAM SAMPLE

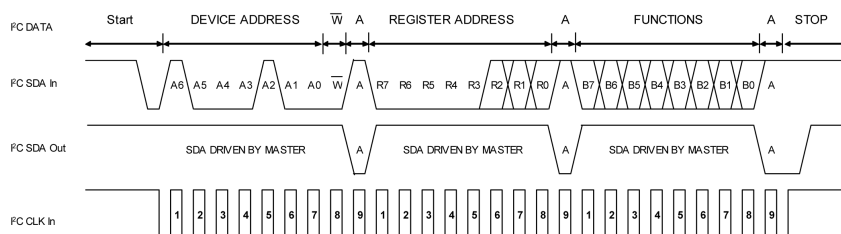


FIGURE 2. I²C WRITE TIMING DIAGRAM SAMPLE

Obr. 2.11: Průběhy komunikace s ISL29003 [1]

Senzor ISL29003 komunikuje po sběrnici I²C. Adresa zařízení bohužel není ovlivnitelná vnějšími piny a je stejná u všech senzorů. Při realizaci digitálního expozimetru jsou zapotřebí 2 senzory, jejich přepínání je řešeno mechanicky páčkovým přepínačem. Po mechanickém přepnutí je nutné přepnout čidla i softwarově v režimu nastavení expozimetru, neboť se předpokládá, že oba senzory budou rozdílně kalibrovány.

Command Register slouží k nastavení různých vlastností senzoru, například výběr fotodiody, interní/externí časování, rozlišení AD převodníku.

Control Register umožňuje volit měřicí rozsah.

Sensor Data Register shromažďuje výsledky měření intenzity dopadajícího světla.

3 REALIZACE DIGITÁLNÍHO EXPOZIMETRU S ISL29003

Problematika měření světla byla rozebrána více než dost, proto bude v následujících kapitolách věnována pozornost samotné realizace digitálního expozimetru.

3.1 Konstrukční řešení optické části

Optická část expozimetru musí být nutně oddělena od části elektrotechnické. Hrozí riziko ovlivnění měření svitem indikačních LED diod a displeje. Světlo se k sensorům nesmí dostat jinou cestou, než skrze optické díly. Z toho důvodu byla vybrána speciální krabička Z-61 dodávaná společností Típa, spol. s r.o.

3.1.1 Měření dopadajícího světla

Dopadající světlo ze všech možných stran je nutno zprůměrovat a osvítit jím senzor ISL29003. K tomu poslouží mléčná kalota, neboli sférický difuzér. Pod mléčnou kalotou je umístěn senzor. Mléčná kalota simuluje trojrozměrný předmět. Kdyby nás zajímalo světlo dopadající na jednotlivé části snímaného předmětu, realizovalo by se v podstatě 2D měření pomocí rovného mléčného sklíčka umístěného před senzorem. Nijak výrazně více není třeba konstrukční řešení blíže specifikovat, jelikož i samotný senzor je přizpůsoben pro měření dopadajícího světla. Mléčná kalota je nejdražším optickým dílem expozimetru a jako kalibrovaná lze zakoupit pouze ve formě náhradního dílu k profesionálním expozimetrům Kenko.

3.1.2 Měření odraženého světla

Z hlediska konstrukce i výpočtů je již odražené světlo atraktivnější. Expozimetrem se musí zaměřit natáčený nebo fotografovaný předmět a zjistit, kolik světla se od něj do objektivu kamery nebo fotoaparátu odráží.

Je třeba dbát na to, aby měl expozimetr rozumný zorný úhel, tak, aby zhruba odpovídal zorným úhlům fotoaparátů a kamerám. Zorný úhel lze vypočítat z následujícího vzorce:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg \frac{d}{f}, \quad (3.0)$$

α ... zorný úhel objektivu [°],

d ... kratší strana osvětleného fotocitlivého materiálu (film, senzor...) [mm],

f ... ohnisková vzdálenost zvolené optiky [mm].

Ovšem, u malého senzoru je třeba počítat minimálně s trojnásobkem kratší strany d . V případě ISL29003 tedy $0,46 \times 3 = 1,38$ mm. Vzhledem k tomu, že se čidlo nesmí usadit přímo do ohniska, ale kousek před něj, a taky ať se operuje s určitou rezervou, počítejme s $d = 2$ mm.

Podnik Meopta optika Přerov dodal několik typů čoček, z nichž se nakonec nejlépe osvědčil kus s parametry $f = 10,3 \text{ mm}$, $\varnothing 13 \text{ mm}$. Po dosazení do vzorce vyjde výsledný úhel měření $\alpha = 22^\circ$, který je kompromisem mezi úzkým bodovým měřením (2°) a širokým úhlem měření u historických expozimetrů (50°). Většina moderních expozimetrů má zorný úhel pro měření odraženého světla v okolí 20° .

Čočka spojka, použitá pro účely tohoto expozimetru, musí být propustná pro celé viditelné spektrum. Nesmí se používat čočky s reflexní vrstvou nebo jinými filtry.

Nejdéle trval vlastní nápad uchycení čočky. Při použití lepidla by hrozilo její znehodnocení a speciální úchytné systémy stojí desítky dolarů. Jako vhodné řešení se nakonec ukázalo zakoupit dvě podložky pro šrouby $\varnothing 13 \text{ mm}$ a mezi ně zafixovat čočku o téže průměru. Poté běžným olovnatým címem spájet obě podložky dohromady, což lze bez větších potíží 40W mikropájkou. Výsledná optika se poté bez větších potíží přilepí dobrým lepidlem k samotné krabičce.

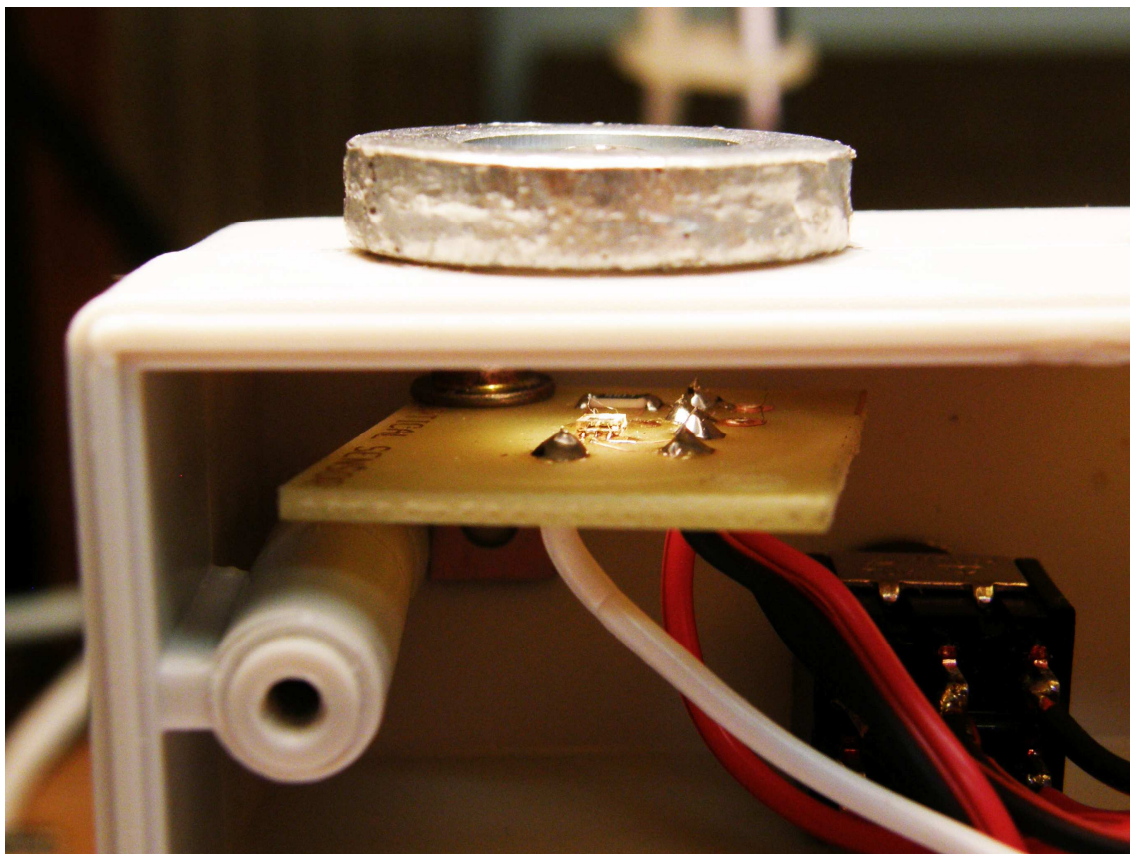


Obr. 3.1: Ukotvení čočky a její přilepení na krabičku

Při stádiu návrhu expozimetru bylo zamýšleno, že se všechny odrazivé a možné propustné plochy v okolí optických částí začerní. V praxi se však ukázalo, že tato úprava není nutná, neboť odlesky od podložky nikdy nezasahují čidlo a světlo propuštěné optikou je vždy o větší intenzitě, než které se do prostoru snímání dostane prosvítáním bílého plastu. Pokud by bylo zapotřebí 100% eliminace vnějších světelných vlivů, může se nastříkání bezodrazové barvy kdykoli dodělat.

Kalibrace pozice senzoru

Senzor ISL29003 je nutné umístit tak, aby při namíření expozimetru docházelo skutečně k měření daného předmětu a ne „hřiště o 10 metrů vedle“. Proto je důležité si zakreslit správnou pozici čočky i čidla ještě před pevnou fixací. Kolmo proti čočce se namíří bodový světelný zdroj. Čidlo je umístěno 10 mm od středu čočky (souřadnice z) a nyní se již pohybujeme pouze v osách x, y tak, aby paprsek světla dopadl přesně na fotodiodu na senzoru. Ukázka takového měření je na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Kalibrace umístění senzoru a čočky

Kalibrace laseru

Je vhodné po zkalibrování senzoru provést rovněž kalibraci laseru. Ta je zcela jednoduchá. Bodový zdroj světla je promítán přesně na žádané místo na senzoru. Tlačítkem se aktivuje laser a sleduje se, jestli je jako vůči senzoru paprsek stejně posunut i v úrovni bodového zdroje. Pro účely laserového zaměřování byl vybrán obyčejný modul HLDPM-650-3, který je aktivován pouhým přivedením 3V napětí přes tlačítko na levém boku krabičky. Správnou kalibraci je možné ověřit také například v dlouhém tunelu ústícím světlem. Na dlouhé vzdálenosti se projeví i sebemenší chyby.



Obr. 3.3: Laser unit HLDPM-650-3, GES electronic

3.2 Umístění expozimetru do krabičky Z-61

3.2.1 Rozmístění ovládacích prvků



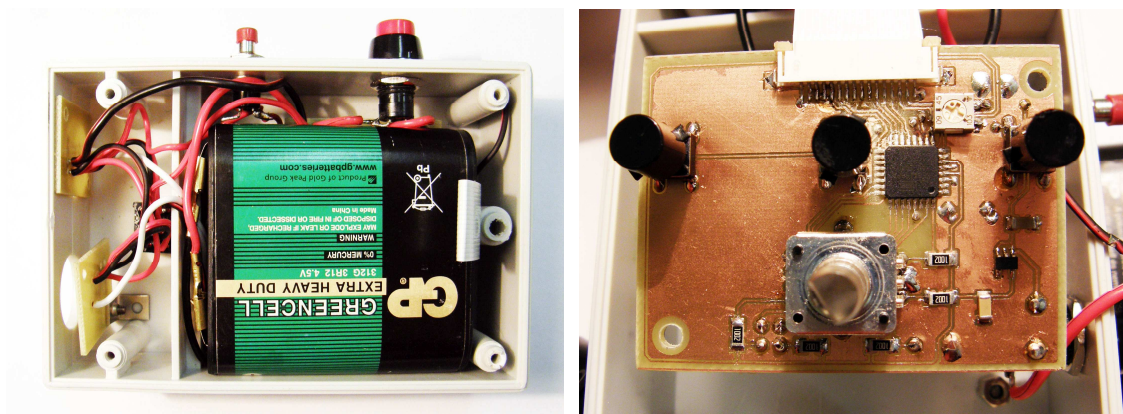
Obr. 3.4: Rozmístění ovládacích prvků

Rozmístění ovládacích prvků by mělo být přehledné, nepřehánět to s množstvím tlačítek atp. Expozimetr tak má 3 ústřední tlačítka a jeden indikační rotační enkodér.

C/F slouží k přepínání mezi módy Kamera/Foto. H značí hold, neboli zmrazení displeje. Tlačítko SET aktivuje nastavovací režim. Enkodér s vestavěnými dvěma LED diodami indikuje mód C/F a umožňuje intuitivní listování v hodnotách clony, expoziční doby, citlivosti filmu. Enkodér má rovněž vestavěné tlačítko pro potvrzování zvolených nastavení.

Páčkovým přepínačem se hardwarově přepojují světelné senzory podle toho, zdali je žádoucí měřit dopadající nebo odražené světlo. Na boční straně se nachází hlavní vypínač a tlačítko pro zapnutí laserové jednotky.

3.2.2 Pohled do nitra expozimetru



Obr. 3.5: Pohled do nitra expozimetru

Design přístroje může připomínat více či méně éru elektronických zařízení ze 70. let Československé socialistické republiky. Ovšem, jak hranatá krabička, tak i 4,5V baterie byla zvolena z ryze praktických důvodů. Všechny prvky jsou do krabičky taktak vměstnány, být o milimetr širší či delší, tak už by nebylo možné krabičku sešroubovat dohromady. Zvolený displej má provozní napětí cca 4,5V a plochá baterie 312G vhodně zaplnila zbývající volný prostor. Navíc, její kapacita je vyšší, nežli mají obyčejné tuškové baterie a zařízení tak vydrží v provozu bez výměny baterie déle (cca 48 hodin).

3.3 Popis zapojení

V této kapitole popisované schéma zapojení se **nachází v příloze A.1.**

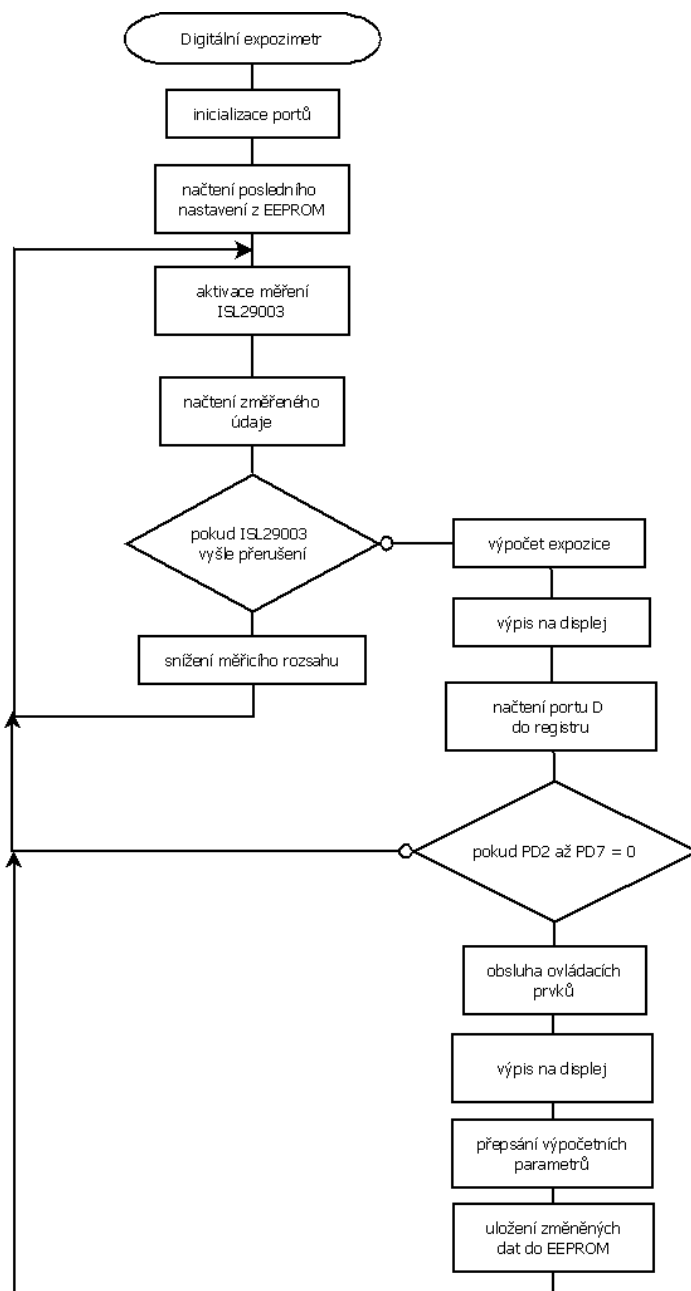
Obsluhu expozimetru a komunikaci s digitálními senzory ISL29003 má na starost mikroprocesor ATMEGA168PA. Byl zvolen vzhledem k vhodnému počtu vstupně/výstupních portů. Na PORTB je připojen přes propojovací pásky FFC displej 2x16 znaků se standardním řadičem kompatibilním s HD44780. V případě potřeby programování stačí místo displeje připojit pomocnou desku propojující programátor Atmel mkII s programovaným procesorem.

Vzhledem ke skutečnosti, že optické senzory i laser vyžadují napětí 3 V, je napětí přiváděné z 4,5V baterie stabilizováno obvodem MCP1802 na 3 V. Přímo z baterie 4,5 V je napájen displej.

PORTC obsluhuje komunikaci s optickými senzory po sběrnici I²C. Na PORTD jsou připojena veškerá ovládací tlačítka.

R1 slouží k nastavení kontrastu displeje. Tlačítkem S1 mechanicky spínáme laserovou jednotku.

3.4 Návrh základní kostry řídicího softwaru



Obr. 3.6: Návrh základní kostry řídicího softwaru

Základní strukturu řídicího softwaru popisuje vývojový diagram na obrázku 3.6. Dojde k inicializaci portů, senzoru ISL29003, načtení výsledku měření. Pokud byl rozsah nevhodný, změně se a měření se opakuje. Pokud není přerušení vyvoláno, znamená to, že měření proběhlo v pořádku a pokračuje se ve zpracování získaného údaje. Následuje kontrola tlačítek, pokud je některé z nich stisknuto, bude obslouženo příslušnou funkcí. V případě opaku se pouze neustále opakuje měření, jeho výpočet a vypsání výsledku na displej.

3.5 Návrh konečné verze softwaru

Již v úvodu realizace expozimetru bylo jasné, že software bude zabírat hodně programové paměti, neboť obsahuje spoustu předdefinovaných tabulek hodnot. Poslední verze programu tak zabírá 80 % programové paměti 16 kB, 86 % datové paměti 1kB a 2% paměti EEPROM. Jakmile dosáhne datová paměť 90% zaplnění, mikroprocesor již není schopen spočítat druhou odmocninu, pro účely expozimetru naprosto nezbytnou.

Výpočetní algoritmy expozimetru jsou pro 8-bitový mikroprocesor značně složité, nastaly různé problémy s konkrétními matematickými a jinými převodními funkcemi, neboť často nepodporovaly datové typy vhodné pro výpočty expozice. Dynamika měření je veliká. Jen intenzita osvětlení může být v intervalu 0 – 64 000 lx. Pokud pak dochází k dalšímu násobení, může docházet u vysokých intenzit k přetečení. Naopak pokud by nastalo dělení u velmi nízkých intenzit, mezivýsledkem by byla např. u datového typu INT nula, tedy i veškeré další výpočty by vyšly jako nulové. Proto je většina výpočtů rozkouskovaná a jednotlivá dělení a násobení se provádí postupně, separovaně tak, aby docházelo k co nejmenším ztrátám naměřených a spočtených dat. Pro názornost poslouží zdrojový kód výpočtu clony u filmové kamery:

```
float pomer=360/vysec;  
//pomocný mezivýpočet  
x=lux*(asa[isoindex]/kalibrace[zpusobmereniindex]);  
//pomocný mezivýpočet  
exposurevalue=(log10(x)/0.30103);  
//výpočet expozice - náhrada log2(x)  
clonaspoctena2=x/(pomer*snimek[snimekindex]);  
//výpočet clony před odmocněním  
clonaspoctena=sqrt(clonaspoctena2);  
//výsledná clona
```

Celý tento kód byl původně sepsán v jednom řádku jako přímý přepis užitého matematického vzorce. Mikroprocesor však tento výpočet nezvládne. Bylo nutné jednotlivé výpočty separovat a experimentovat se závorkami tak dlouho, až byly výsledky měření správné.

Pro účely sestrojení expozimetru se ukázal 8-bitový mikroprocesor jako nedostačující, případně, po delším experimentování a úpravě výpočtů je možné konstatovat, že je ATMEGA168PA na hranici použitelnosti. Alternativou by mohl být některý z 32-bitových mikroprocesorů, nebo řešit Expozimetr analogově, což by bylo pro změnu trochu náročnější z hlediska konstrukce (nutnost vytváření a kalibrování analogových stupnic).

Program byl sepsán v AVR studiu v jazyce C.

3.5.1 Stručný popis programu

Vzhledem k tomu, že je každá operace popsána již přímo ve zdrojovém kódu, zdejší popis programu se omezí pouze na základní principy jeho fungování.

Chod celého expozimetru v podstatě řídí 16-bitový čítač/časovač 1, po jehož přetečení (2 sekundy) se spouští veškeré výpočetní algoritmy, načítání dat ze senzoru a vypisování výsledků na displej. Tlačítkem HOLD se pouze přerušuje čítání a tím i

aktualizace dat na displeji. Čítač je rovněž vyřazen z provozu, pokud je vyvoláno menu nastavení.

Veškeré potřebné veličiny se nastavují rotačním enkodérem, odpadá tak neintuitivní editace parametrů pomocí tlačítek, nebo nutnost použití numerické klávesnice. V případě editace závěrky, clony, citlivosti filmu je otáčením enkodéru vybírána pouze typická hodnota užívaná ve fotografii. Tyto typické hodnoty jsou předdefinované v konstantních datových polích, enkodér pouze inkrementuje, nebo dekrementuje ukazatele daných polí. Pro názornost je uveden následující kód pro rychlost posuvu filmu v kameře:

```
const char snimek[]={1,2,4,8,12,16,18,24,25,32,48,96};
// Pocet snimku za sekundu u filmové kamery.
char snimekindex=0;
// Ukazatel
```

Enkodér ovlivňuje pouze proměnnou snimekindex, pokud je zapotřebí zjistit aktuální konfiguraci, stačí použít pole a ukazatel:

```
snimek[snimekindex]
```

Na tomto principu polí a ukazatelů funguje editace a zobrazování v podstatě všech veličin a vlastností potřebných pro funkci expozimetru.

Hlavní smyčka volá pouze jednotlivé podprogramy, zpravidla inicializační. Zacyklí se poté na volání funkce enkodéru, aby byl mikroprocesor připraven kdykoli zpracovat případné pootočení enkodéru.

3.6 Výpočetní algoritmy

3.6.1 Převod naměřených dat senzoru ISL29003 na intenzitu osvětlení

ISL29003 po aktivaci A/D převodníku převádí analogové napětí fotodiody na 16-bitové číslo uložené ve dvou 8-bitových registrech 0x04 a 0x05 (LSB_sensor a MSB_sensor). Po načtení těchto registrů procesorem a jejich spojení se získá 16-bitová proměnná, která je v datasheetu ISL29003 nazvaná jako DATA. Data je nejprve nutné přepočítat na intenzitu osvětlení v luxech dle vzorce:

$$E = \frac{Range(k) \cdot \frac{100k}{R_{EXT}}}{2^n} DATA, \quad (3.1)$$

E	...	intenzita osvětlení [lux],
$Range(k)$	...	měřicí rozsah, udává maximální změřitelnou intenzitu při daném rozsahu k [lux],
R_{EXT}	...	externí rezistor určující frekvenci vnitřního oscilátoru ISL29003 [kΩ],
$DATA$	...	výstup z A/D převodníku úměrný intenzitě osvětlení dopadající na senzor [-],
2^n	...	počet hodinových cyklů udávající integrační čas A/D převodníku, $n=4, 8, 12, 16$.

Digitální expozimetr využívá Range 4 (0 – 62 272 lux), $R_{EXT}=100k\Omega$, $n=16$, tedy 65 536 hodinových cyklů pro jeden A/D převod. Za těchto parametrů je rozlišení intenzity osvětlení 1 lux, což je pro účely měření expozice naprosto dostatečné, neboť změna intenzity o 1 lux není natolik zásadní, aby bylo nutné přenastavovat clonu nebo závěrku fotoaparátu či rychlost snímání a clonu u analogové kamery.

K dosažení tohoto rozlišení při maximálním možném rozsahu (0 – 62 272 lux) je však nutné zvolit maximální integrační čas A/D převodníku, což s sebou přináší i delší dobu měření (v řádu desetin sekund). Vzhledem k tomu, že aktualizace stavu expozimetru jednou za sekundu je zcela dostatečná (nejedná se o flashmetr), může být kompromisní řešení, kdy se nemění rozsahy senzoru, bez potíží užito.

3.6.2 Přepočít intenzity osvětlení na expoziční hodnotu, kalibrace

Problematika vztahu mezi *EV* a *E*.

Vůbec nejzajímavější částí této bakalářské práce bylo zjistit, jakým způsobem přepočítat intenzitu osvětlení *E* na expoziční hodnotu *EV*. Ve starších knižních publikacích zabývajících se filmovou technikou existují pouze tabulky nejčastějších expozičních hodnot a k nim přiřazené intenzity osvětlení a napětí či odpor konkrétního čidla [4]. Tabulky tak byly platné pouze pro měření dopadajícího světla za předpokladu užití konkrétního spektrálního difuzéru Metry Blansko a konkrétního fotocitlivého prvku TESLA BLATNÁ.

Veličiny užívané ve fotografii jsou poněkud uzavřeným systémem. Vztahy mezi *EV*, clonou, citlivostí filmu a závěrkou fungují dokonale, ale získání *EV* z některé z fotometrických veličin je již trochu horší. Expozici totiž nikdo přesně vypočítat z intenzity osvětlení neumí. V dobách vzniku fotografie se expozice měřila zcela experimentálně [5]. Později se ustanovil vztah mezi clonou, závěrkou a citlivostí filmu pomocí expoziční hodnoty *EV*. Tím se získala jedna veličina, která obsahovala všechny myslitelné varianty nastavení fotoaparátu. Otevřela se tak cesta analogovým elektrickým expozimetřům, přičemž dopadající světlo na senzor vyvolalo jakžtakž podobnou závislost změny napětí, jako je změna celkové světelné energie dopadající na světlocitlivý prvek. Cejchování stupnic probíhalo experimentálně. Jakmile došlo za stejných světelných podmínek ke správnému exponování filmového materiálu, dopočítala se z nastavených parametrů fotoaparátu expoziční hodnota a označila se na stupnici expozimetru.

Jenže vyvstává další otázka – je jasné, že vyvolání filmu a experimenty dělali všichni za jiných podmínek, používali jiné roztoky, ustalovače, filmy s jinou gradací, citlivostí. Existuje tedy expozimetr, který by měřil zaručeně správně? Neexistuje. V žádném institutu není uschován expozimetr, jehož vlastnosti bychom považovali za výchozí. Dříve měl každý výrobce fotoaparátů většinou i přidruženou výrobu expozimetrů, nebo alespoň doporučený typ expozimetru, kdy měl fotograf jistotu, že bude-li v ČSR fotit přístroji od Meopty, může se spolehnout na expozimetr od Metry.

Dnes již umíme poměrně přesně měřit intenzitu osvětlení, ovšem i dnešní moderní technologie a senzory doplácí na to, že analogová fotografie a fotochemie vzešla z experimentů a tyto obory vznikly ještě dříve, než začaly jakékoli pokusy o sjednocení a popsání měření expozice.

I tak byla snaha najít jednotný vzorec pro přepočet E na EV , který by ovšem zároveň umožňoval různorodé kalibrace jednotlivých výrobců filmové techniky. S trochou nadsázky tedy lze konstatovat, že EV lze vypočítat podle vzorce

$$EV = \log_2 \frac{E \cdot S}{C}, \quad (3.2)$$

E ... intenzita osvětlení [lx],
 S ... citlivost filmu v ASA stupnici,
 C ... kalibrační konstanta expozimetru.

Pro lepší pochopení vzorce je nutné vztahy více rozebrat. Jak už bylo jednou rozebíráno, EV závisí mimo jiné i na citlivosti filmu S . Oproti tomu Apex systém citlivost filmu ve svých výpočtech nebere v úvahu. Vzorec pro přepočet E na AV (Apex Value) by pak vypadal následovně:

$$AV = \log_2 \frac{E}{C}, \quad (3.3)$$

E ... intenzita osvětlení [lx],
 C ... kalibrační konstanta expozimetru.

Pokud by byla kalibrační konstanta rovna jedné, mohla by se vypustit. AV je tedy bez kalibrace rovno binárnímu logaritmu intenzity osvětlení.

V případě vzorce 3.2 je to ovšem s kalibrační konstantou trochu složitější, neboť je zároveň referencí pro citlivost filmu v systému ASA a ve stejnou chvíli plní roli kalibrace. Dalo by se říci, že v tomto případě je C součtem reference k citlivosti filmu (referenční citlivost pro systém EV je ASA100) a kalibrační konstanty. Zvětšením kalibrační konstanty snižujeme výslednou expoziční hodnotu a naopak. Pro lepší pochopení poslouží modifikovaný vzorec, kdy je C skutečně pouze kalibrační konstantou a ne zároveň referencí pro citlivost filmu:

$$EV = \log_2 \frac{E \cdot S}{100 + C}. \quad (3.4)$$

Ve vzorci je dopsána konstanta 100, a to proto, že referenční citlivost filmu je ASA100. Pokud je tedy citlivost $S=100$ a $C=0$, vykrátí se s konstantou 100 a výslednou EV neovlivní. Je-li S dvojnásobná, tedy 200, pak bude výsledná EV vyšší o jedničku. To, že každé další zdvojnásobení citlivosti filmu způsobí přičtení jedničky k EV , je za situace, kdy neuvažujeme kalibraci, základním kamenem vztahu mezi EV a citlivostí filmu. Fotograf většinou nezná podrobně vztahy, ale tyto jednoduché poučky ovládá. Pouze závislost mezi změnou EV dle použitého filmu (jeho citlivosti) je patrná ve vztahu 3.5:

$$\Delta EV = \log_2 \frac{S}{100}. \quad (3.5)$$

Pak je jasné, že kalibrační konstanta ve vzorci 3.2 není pouze kalibrační konstantou (jak se uvádí například na anglické wikipedii [12]), ale již zmíněným součtem reference k citlivosti filmu a kalibrační konstanty (která tak může být i záporná).

Ve výsledku hodnota C pouze posunuje výslednou EV nahoru, nebo dolů, pro účely kalibrace je jedno, jestli ještě obsahuje to, či ono. Modifikovaný vzorec je uveden jen pro lepší pochopení, jaká je souvislost mezi citlivostí filmu a výslednou EV .

Pokud máme senzor, který již umí přesně měřit intenzitu osvětlení, jako je ISL29003, nejsou potřebné další způsoby kalibrace. Stačí pouze kompenzovat různosti ve světelné propustnosti optických prvků a možné odlišnosti přenášeného výkonu umístěním čidla (již posunutí čidla desetinu milimetru dál znatelně posouvá soustředění paprsků na čidlo přes čočku spojku a tím i výsledek měření). Tato kompenzace je možná pouze změnou konstanty C . Digitální expozimetr v režimu nastavení umožňuje volit odlišné kalibrační konstanty pro oba senzory.

Kalibrace senzoru pro dopadající světlo

V absolutní tmě se rozsvítí zdroj světelného záření, optimálně žárovka (pro své bohaté spektrum). Spolehlivý a již „kalibrovaný“ expozimetr postavíme na stejné místo jako nekalibrovaný expozimetr tak, aby, pokud možno, senzory směřovaly do stejného místa a byly stejně daleko od zdroje záření. Pokud se hodnoty EV liší, je třeba dopočítat dle již kalibrovaného expozimetru kalibrační konstantu a zadat ji v režimu nastavení (pomocí otočeného encoderu). K výpočtu kalibrační konstanty se nejdříve spočítá změřená intenzita osvětlení ještě **nekalibrovaného** expozimetru dle vztahu

$$E = \frac{C \cdot 2^{EV}}{S}, \quad (3.6)$$

EV ... expoziční hodnota změřená nekalibrovaným expozimetrem,
 C ... původní kalibrační konstanta nekalibrovaného expozimetru.

A nyní se dopočítá nová kalibrační konstanta

$$C = \frac{E \cdot S}{2^{EV}}, \quad (3.7)$$

EV ... expoziční hodnota změřená **zkalibrovaným** expozimetrem,
 E ... spočtená intenzita osvětlení ze vztahu 3.6,
 S ... nastavená citlivost filmu, na obou expozimetrech identická, např. ASA100.

Nyní se přepíše kalibrační konstanta v nekalibrovaném expozimetru. Měl by vyhodnotit stejnou EV , jako kalibrovaný expozimetr.

Kalibrace senzoru pro odražené světlo

V absolutní tmě a pokud možno v neodrazivě natřené místnosti se rozsvítí zdroj světelného záření, optimálně žárovka (pro své bohaté spektrum). Proti zdroji světla se umístí šedá kalibrační deska s 18% odrazivostí, která nemá žádný barevný nádech (prodává každá prodejna pro profesionální fotografy, např. Fotoškoda). Oba expozimetry se namíří kolmo na kalibrační desku ve stejné vzdálenosti. Vzdálenost se

volí podle velikosti desky tak, aby zorné pole expozimetru snímalo pouze světlo odražené z desky. Je dobré využít co největší užitečnou plochu kalibrační desky. Výsledky měření se porovnají a stejným způsobem, jako při kalibraci pro dopadající světlo, se dopočítá nová kalibrační konstanta.

Složitější způsoby kalibrace

Za situace, kdy by byl expozimetr realizován pomocí obyčejné fotodiody, je kalibrace náročnější. Nelze vycházet z jiné, již úspěšně naměřené veličiny továrním čidlem, jako je ISL29003. Závislost mezi napětím na fotodiodě a intenzitou dopadajícího světla není vůbec úměrná, je tak nutné provádět několikanásobnou kalibraci. Zdroj záření se reguluje od cca 5 do 95% své světelné účinnosti a pokaždé, kdy se hodnoty expozimetrů začínají se změnou osvětlení lišit, provádí se opětovná kalibrace [14]. Zjištěné rozdíly se využijí pro dopočítání korekce metodou nejmenších čtverců. Expozimetr s ISL29003 tuto náročnou formu kalibrace nevyžaduje.

Různé hodnoty kalibračních konstant

Každý výrobce expozimetrů, i když použije podobná čidla, čočky i spektrální difuzéry, používá jinou výchozí výrobní hodnotu kalibrační konstanty expozimetru. Rozdíly nejsou příliš velké (například 320 Minolta versus 340 Seconic), avšak potvrzují, že jednotlivé korporace i dnes udržují drobné rozdíly ve výpočtu *EV* [12].

Důležitá je vzájemná kalibrace expozimetrů

Není tolik důležité, aby expozimetry měřily přesně, ale pokud se jich sejde na jednom natáčení víc, tak aby měřily **stejně**. Díky pružnosti filmového materiálu se může expozimetr splést až o +/- jednu expoziční hodnotu (což je rozdíl jako kdybychom místo filmu ASA100 použili ASA200 a naopak). Ve filmových laboratořích se stejně vždy provádějí korekce. Důležité je, aby se mohly korekce provést jednou pro celou várku dodaných filmů. Tedy, aby všechny expozimetry na natáčení měřily stejně, případně stejně špatně, je-li to ještě v mezích obrazových korekcí filmových laboratoří.

3.6.3 Výpočet clony filmové kamery

U analogové filmové kamery vycházíme z následujících parametrů: expoziční hodnota, rychlost posuvu filmového pásu (obr./s), citlivost filmu, celková výše rotační clony (jedná se o rotační vějířek, který zacloní objektiv po dobu posuvu a ustalování filmu). Profesionální 16mm kamery mají celkovou výše rotační clony nastavitelnou. Pro natáčení sportovních utkání se výše zmenší, aby byla expoziční doba kratší za použití stále stejné rychlosti natáčení. Majitelé starých kamer Admira tuto možnost neměli, proto museli expozici zkrátit tím, že natáčeli např. na dvojnásobnou rychlost. To ovšem způsobí velmi rychlou spotřebu ne zrovna levné filmové suroviny a na projekci takto exponovaného filmu jsou hráči 2x zpomalení. Meopta u svých 8mm promítaček umožňovala plynulou regulaci otáček, filmař tak s rukou na potenciometru neustále kompenzoval různé rychlosti záznamu. Digitální expozimetr při svých výpočtech vychází ze vztahu 3.2 a 3.8.

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t}, \quad (3.8)$$

N ... clonové číslo,
 t ... expoziční doba.

Pokud vzorec 3.9 modifikujeme pro filmovou kameru, tedy vezmeme v úvahu rychlost posuvu pásu a vliv výseče rotační clony, získáme následující vztah

$$EV = \log_2 \frac{\alpha \cdot R \cdot N^2}{360^\circ}, \quad (3.9)$$

R ... rychlost posuvu filmového pásu [obr.s⁻¹],
 α ... celková výseč rotační závěrky [°].

K výpočtu clony filmové kamery je zapotřebí vzorec 3.8 pro získání EV z Intenzity osvětlení a vzorec 3.10, který definuje vztah mezi EV , rychlostí posuvu filmového pásu a clonou objektivu. Za předpokladu, že $EV(3.2)=EV(3.9)$ získáme vztah

$$\log_2 \frac{E \cdot S}{C} = \log_2 \frac{\alpha \cdot R \cdot N^2}{360^\circ}. \quad (3.10)$$

Logaritmy je možné v rovnici 3.10 vyrušit a vyjádřit clonu

$$N = \sqrt{\frac{E \cdot S \cdot 360^\circ}{C \cdot \alpha \cdot R}}. \quad (3.11)$$

3.6.4 Výpočet clony fotoaparátu

U fotoaparátu je výpočet clony jednodušší. Neuvažuje se posuv a ustalování filmu ani rotační clona. Vychází se pouze z citlivosti filmu, expoziční hodnoty a expoziční doby (závěrky). Využije se tak opět rovnosti výsledné EV ve vzorcích 3.2 a 3.8 a odvodí vztah 3.13:

$$N = \sqrt{\frac{E \cdot S \cdot t}{C}}. \quad (3.12)$$

3.6.5 Výpočet závěrky fotoaparátu

Opět se vyjde ze vzorců 3.2 a 3.8, pouze se vyjádří t .

$$t = \frac{N^2 \cdot C}{E \cdot S}. \quad (3.13)$$

Zatímco nastavení clony fotoaparátu je spojitě, závěrku lze většinou nastavovat jen po skocích. Digitální expozimetr obsahuje tabulku standardních továrních hodnot expozičních dob. Po výpočtu podle vzorce 3.15 program expozimetru hledá nejbližší

vhodnou závěrku v předdefinované tabulce.

Je důležité si povšimnout, že všechny předchozí vzorce obsahují kalibrační konstantu C .

3.7 Ověření digitálního expozimetru v praxi

Jedinou možnou cestou, jak ověřit funkčnost expozimetru, je natočení krátkého filmu. Bude se jednat o úvodní znělku 16mm letního kina Biograf 16. Projekt Biograf 16 vznikl zcela neplánovaně při realizaci tohoto projektu. V rámci konzultací a dodání potřebné literatury, ale i technického zázemí pro natočení a sestřihání analogového filmu vznikl nápad na vytvoření pojízdného letního kina. Biograf 16 podporuje Meopta, Filmové ateliéry Barrandov, německý výrobce projekčních ploch MW a poslední výrobce 8 a 16mm filmů v Evropě, Foma Bohemia.

Výsledný vyvolaný film (znělka) bude odpromítán, nebo budou alespoň prezentovány fotografie z projekce v rámci obhajoby této bakalářské práce. Natočení filmu a jeho vyvolání může odhalit případné problémové situace, které expozimetr zcela nezvládl. Ovšem, může se jednat i o kameramanovu nezkušenost. Pokud bude výsledný film celkově přexponován, nebo podexponován, bude to znamenat špatně provedenou kalibraci přístroje. Do odevzdání bakalářské práce se nestihly všechny přípravné procesy natáčení filmu – potřebná povolení pro natáčení v památkové zóně NPÚ – státního zámku v Hradci nad Moravicí byla získána týden před odevzdáním práce. Natáčet jen proto, aby bylo něco natočeno, není, vzhledem k ceně filmového materiálu, příliš vhodné. Natáčení 16mm filmu vyžaduje zcela jasnou představu o filmu a detailní přípravu, každý zkažený záběr jde i do stovek Korun.

Téma měření expozice je až nekonečné, dalo by se nadále zkoumat a pátrat další souvislosti. Například jak se mění vlastnosti filmu po jeho expiraci, zda je nutné k prošlému filmu přistupovat jinak (Jízda Jana Svěráka byla natočena na prošlý film). Kdo zkušenosti s analogovým filmem má, většinou si je střeží a k relevantním informacím se dostává poněkud obtížně. Tato bakalářská práce by měla objasnit alespoň zlomek z tajů analogové filmové techniky popsáním způsobů měření expozice.

Během obhajoby práce bude tento expozimetr porovnán s profesionálním expozimetrem, v rámci prezentace budou ukázány rozdíly v měření. Bylo značně problematické zajistit kalibrovaný expozimetr, povedlo se tak až den před dopsáním této práce. Expozimetry, které byly původně získány (Metra, Leningrad) již nebyly plně funkční, protože obsahovaly selenový článek. Moderní expozimetry stojí kolem 30 000 Korun a vzhledem k tomu, že si je málokdo kupuje, ve foto prodejnách v podstatě nejsou. Vše je pouze na objednávku a za situace, kdy bych si expozimetr pouze půjčil a použil pro srovnání a kalibraci, žádný prodejce pochopitelně vyhovět nechtěl.

Se štěstím jsem se potázel až u kameramana České televize Tomáše Hudečka, který pro účely měření a kalibrace zapůjčil kalibrovaný expozimetr Sverdlovsk.

U expozimetrů, které už mají modernější senzor, který stářím nedegraduje, je zase problém s napájením – využívají rtuťové baterie, které EU zakázala. Je tak v dnešní době značně složité sehnat starší kalibrovaný expozimetr, neboť náhradní články jsou již jiného napájecího napětí.

4 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byly nastudovány a zpracovány informace o měření dopadajícího a odraženého světla. Definovaly se požadavky na senzory pro účely měření expozice, realizovala se konstrukce optické a mechanické části digitálního expozimetru. Provedl se rozbor vlastností senzoru ISL29003 a předpokladů správné komunikace s řídicím mikroprocesorem. Na základě těchto poznatků byl navržen řídicí software digitálního expozimetru a jeho úspěšné dokončení. Poslední kapitoly bakalářské práce se věnují kalibraci přístroje a výpočetním algoritmům.

Projekt bude do budoucna uveden na trh jako stavebnice společnosti TIPA. V magisterském studiu na něj bude navazovat realizace laserového promítání titulků.

LITERATURA

- [1] Intersil. Data Sheet ISL29003 [online]. 2008 - [cit. 3. června 2010]. Dostupné na [www: http://www.intersil.com/data/fn/fn7464.pdf](http://www.intersil.com/data/fn/fn7464.pdf).
- [2] ISO 2720:1974. General purpose photographic exposure meters (photoelectric type) [online]. 2010 - [cit. 3. června 2010]. Dostupné na [www: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=7690](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=7690).
- [3] ŘEHOREK, J. *Nová škola amatérského filmu*. Praha: Orbis, 1970
- [4] HYAN, T., KELLNER, L. *Elektronika ve fotografii*. Praha: SNTL, 1974.
- [5] OTOvy stránky nejen o fOTografování [online]. Praha: Otakar Bouška, OK1DOB, 2010 – [cit. 9. prosince 2010]. Dostupné na [www: http://otabouska.vellum.cz/](http://otabouska.vellum.cz/).
- [6] DĚD, J. *Než stisknete spoušť*. Praha: Merkur, 1983.
- [7] KREYSER, R. *Filmujeme bez chyb*. Praha: SNTL, 1986.
- [8] HOLLÓ, D., KUN, M., VÁSÁRHELYI, I. *Příručka filmaře amatéra*. Budapešť: Műszaki Könyvkiadó, 1972, Praha: SNTL, 1982.
- [9] Prof. ŠMOK, J. *Začněte fotografovat*. Praha: SNTL, 1984.
- [10] Pro-Lite Technology – Light measurement [online]. 2010 - [cit. 9. prosince 2010]. Dostupné na [www: http://www.pro-lite.uk.com](http://www.pro-lite.uk.com).
- [11] Wilfrid Laurier University Physics Labs [online]. 2010 - [cit. 9. prosince 2010]. Dostupné na [www: http://denethor.wlu.ca](http://denethor.wlu.ca).
- [12] Exposure value - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2011 - [cit. 23. května 2011]. Dostupné na [www: http://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value](http://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value).
- [13] Film speed - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2011 - [cit. 23. května 2011]. Dostupné na [www: http://en.wikipedia.org/wiki/Film_speed](http://en.wikipedia.org/wiki/Film_speed).
- [14] Fotoprostor – stránky fotoklubu NIKON [online]. 2011 - [cit. 26. května 2011]. Dostupné na [www: http://www.radio-foto.net/foto/Flashm.php](http://www.radio-foto.net/foto/Flashm.php)

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

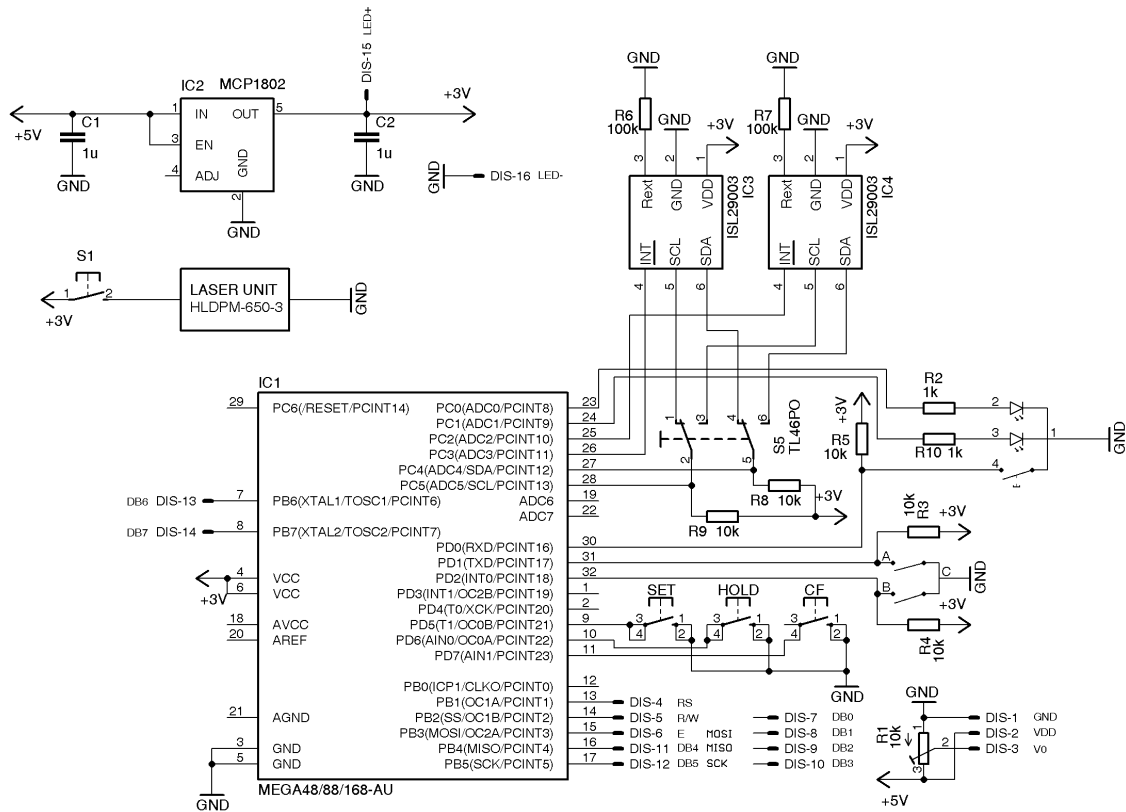
f	Ohnisková vzdálenost
Φ	Světelný tok
E	Intenzita osvětlení
S	Plocha, Citlivost filmu
I	Svítivost
Ω	Prostorový úhel
N	Clonové číslo
EV	Expoziční hodnota
t	Expoziční doba
C	Kalibrační konstanta expozimetru
D	Průměr vstupné pupily objektivu
α	Zorný úhel objektivu
d	Kratší strana osvětleného fotocitlivého materiálu
E	Intenzita osvětlení

SEZNAM PŘÍLOH

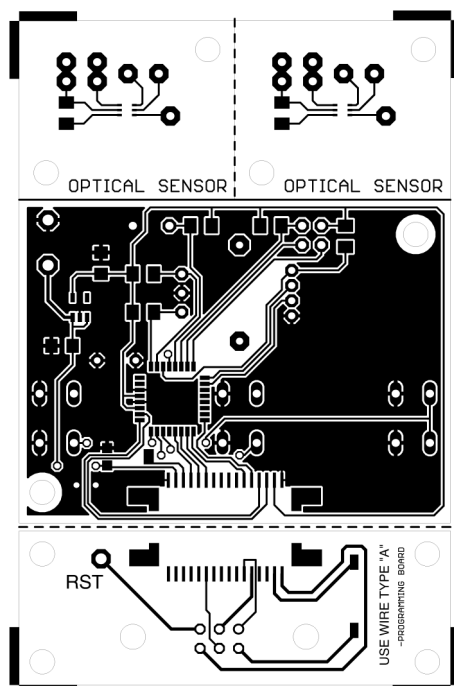
A	Návrh zařízení	39
A.1	Obvodové zapojení	39
A.2	Deska plošného spoje – vrstva top.....	40
A.3	Deska plošného spoje – rozmístění součástek	40
B	Seznam součástek	41

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení

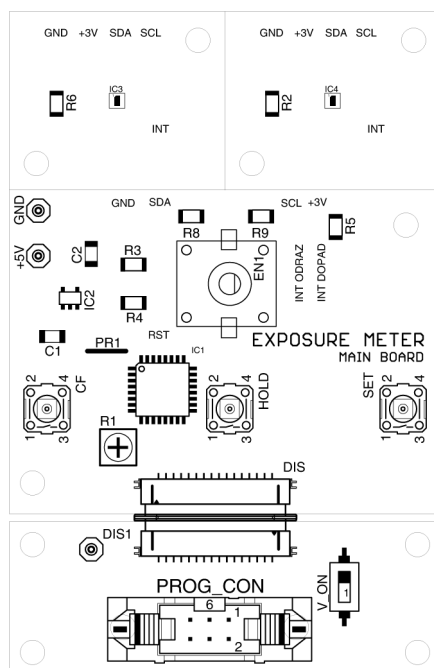


A.2 Deska plošného spoje – vrstva top



Rozměr desky 57 x 88 [mm], měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje – rozmístění součástek



Rozměr desky 57 x 88 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1u	C1206	Keramický kondenzátor
C2	1u	C1206	Keramický kondenzátor
IC1	MEGA168PA	TQFP32	Mikroprocesor Atmel
IC2	MCP1802	SOT23-5	Stabilizátor napětí 3V
IC3 – IC4	ISL29003	ODFN6	Světelný senzor
R1	10k	R1206	Rezistor
R2	100k	R1206	Rezistor
R3 – R5	10k	R1206	Rezistor
R6	100k	R1206	Rezistor
R8 – R9	10k	R1206	Rezistor
EN1	DPL12SV		Rotační enkodér
CF, SET, HOLD		B3F	Mikrospínač
DIS, DIS1		52745-1790	Konektor moxlex FFC 1mm
Displej	BTHQ21603V		16x2, modré podsvětlení
Laser unit	HLDPM-650-3		3W laserová jednotka RED
Čočka	spojka	d = 13 mm	f = 10,3 mm
Difuzér			Spektrální difuzér Kenko
Baterie	4,5 V	312G	Plochá baterie 4,5 V
Krabička	Z-61	Z-61	Krabička s oddělenou komorou