

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky



Bakalářská práce

České Budějovice 2008

Petr Haikl

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Fyzikální veličiny a možnosti jejich měření

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. František Špulák

Autor: Petr Haikl

Anotace:

Bakalářská práce „Fyzikální veličiny a možnosti jejich měření“.

Stěžejním tématem této práce je popis historického vývoje a měření vybraných fyzikálních veličin. Historický vývoj měření. Různé metody měření v současnosti např. u intenzity osvětlení, svítivosti a světelného toku u svítidel veřejného osvětlení. Zpracování výsledků měření. Optimalizace výkonu veřejného osvětlení.

Abstrakt:

Baccalaureate work "Physical quantity and chances of their metering". Pivotal topics those work is description historical development and metering choice physical quantity. Historical development metering. Sundry expenses method metering extant e.g . near illumination, luminance and luminous flux near light fitting public lighting. Processing test data. Optimization achievement public lighting.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Fyzikální veličiny a možnosti jejich měření“ sem vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Františka Špuláka a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW) uvedené v příloze, tzn., že nebyla porušena autorská práva a práce není plagiátem.

Prohlašuji, že v souladu s § 47 zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Hrdějovicích dne 21. 11. 2008

Petr Haikl

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem bych rád poděkoval RNDr. Františku Špulákovi za cenné rady a připomínky k bakalářské práci.

Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a trpělivost.

Obsah bakalářské práce

Úvod	8
1. Základ měření vybraných fyzikálních veličin	9
1.1 Rozdělení fyzikálních veličin	9
1.2 Skalární veličiny -	9
1.3 Vektorové veličiny-	9
1.4 Fyzikální veličiny extenzivní	9
1.5 Fyzikální veličiny intenzivní	9
1.6 Fyzikální veličiny protenzivní	10
1.7 Označení veličin	10
1.8 Základ měření fyzikálních veličin	11
2. Historie měrných jednotek	12
2.1 Vznik mezinárodní soustavy SI	13
2.2 Metrologie	14
2.2.1 Legální metrologie	14
2.2.3 Aplikovaná metrologie	15
3. Historický vývoj měření vybraných fyzikálních veličin	16
3.1 Délka	16
3.2 Vývoj měření délky	17
3.4 Bezkontaktní měření	19
3.6 Radarová měřicí zařízení	20
3.6 Selsyny na induktivním principu	21
3.7 Optické přírůstkové snímače	21
3.8 CCD snímací zařízení	22
3.9 Hmotnost	23
3.10 Vývoj měření hmotnosti	23
3.11 Standard hmotnosti	24
3.12 Jiný standard hmotnosti	25
3.13 Základní rozdělení vah	25
3.14 Mechanické váhy	26
3.14.1 Pákové váhy	26
3.15 Váhy deformační	29
4. Vývoj přesnosti měření	41
4.1 Přesnost měření	41
4.2 Přesnost měřidel	41
4.2 Kalibrace	42
4.3 Měřicí technika	42
4.4 Měřicí metody	48
4.5 Početní metody pro spočítání chyby měření	48
5. Různé metody měření u intenzity osvětlení, svítivosti a světelného toku.	50
5.1 Základní světelně technické veličiny a pojmy	50
5.2 Světelný tok	51
5.3 Prostorový úhel	52
5.4 Svítivost	53
5.5 Intenzita osvětlení	56
5.6 Jas svazku světelných paprsků	58
5.7 Základy měření světelně technických veličin	59
5.8 Měření svítivosti	63
5.9 Měření čar svítivosti	65
5.10 Měření světelného toku	67
5.11 Měření intenzity osvětlení	71
5.12 Měření jasu	77

6.	Zpracování výsledků měření u svítidel veřejného osvětlení	82
7.	Optimalizace výkonu veřejného osvětlení	86
7.1	System Lixos	87
7.2	Příklady aplikace systému Lixos	90
Závěr		95

Úvod

Tématem diplomové práce je popsání historického vývoje některých vybraných fyzikálních veličin a v návaznosti s tím i vývoje přesnosti měření.

Popsány jsou fyzikální veličiny, jako je délka, hmotnost a čas. U těchto fyzikálních veličin je dobře patrné jak se vyvíjely metody měření a měřicí přístroje v průběhu času. Kolik různých metod měření a měřících zařízení s neuvěřitelnou mírou přesnosti je v dnešní době k dispozici. Dále následuje popis různých metod měření fotometrických veličin v současnosti např. u intenzity osvětlení, svítivosti a světelného toku u svítidel veřejného osvětlení. Je zde ukázáno, do jakých typů grafů jsou naměřené hodnoty svítidel veřejného osvětlení zpracovávány. V poslední části jsou uvedeny různé způsoby optimalizace výkonu veřejného osvětlení a s tím i spojené úspory elektrické energie, které jsou nyní spojeny s využitím výpočetní techniky.

1. Základ měření vybraných fyzikálních veličin

1.1 Rozdělení fyzikálních veličin

Fyzikální veličina je jakákoliv objektivní vlastnost hmoty, jejíž hodnotu lze změřit nebo spočítat.

Fyzikální veličiny se dělí na dva základní typy:

1.2 Skalární veličiny

Skaláry jsou určeny svojí velikostí a jednotkou a Nezávisí na volbě souřadné soustavy, v níž je daná veličina měřena.

Například to může být hmotnost, teplota nebo elektrický náboj.

1.3 Vektorové veličiny

Vektory jsou určeny svojí velikostí, jednotkou a směrem.

Například to může být síla, magnetické pole nebo elektrický proud.

Veličiny můžeme také dělit na [extenzivní](#), [intenzivní](#) a [protenzivní](#)

1.4 Fyzikální veličiny extenzivní

Jejich typickou vlastností je jejich aditivnost – jednotlivé části dají celek, jehož velikost možno spočítat pouhým sečtením, a naopak celek je možno zase dělit na části. Typickými zástupci extenzivních veličin jsou charakteristiky prostoru délka, plocha, objem a hmotnost atd. Například dvě tělesa o délce 1 m mohou dohromady vytvořit jedno těleso 2 m. Další jejich vlastností je, že je lze měřit přímo, nebo přímým srovnáním s nějakým vzorkem anebo vzájemně mezi sebou. Dvoumetrová tyč je stejně dlouhá jako vedle ležící dvě metrové, srovnané za sebou.

1.5 Fyzikální veličiny intenzivní

Naproti tomu u teploty nejde sečíst teplotu dvou těles o teplotě 50°C a očekávat, že výsledná teplota bude dohromady 100 °C, jakoby tvořily jedno těleso. Výsledné těleso po jejich spojení bude mít sice váhu danou součtem jejich vah, ale teplota tělesa nebude prostým součtem. Veličinu s takovouto vlastností nazýváme veličinou intenzivní. Nutno rozlišovat teplotu jako stav tělesa a teplotní rozdíl, i když samotnou teplotu je také možno chápat jako rozdíl mezi měřenou teplotou a nějakým referenčním bodem. Určit danou teplotu číselně je obtížnější než v případě např. délky, neexistuje nějaké „přímé“ měřítko, se kterým by bylo možno nakládat tak jednoduše jako v případě veličin extenzivních.

Proto takové veličiny musíme měřit nepřímou - oklikou přes nějakou jinou, extenzivní veličinu: například rtuťovým teploměrem měříme teplotu pacientova těla na základě měření objemu rtuti, která se tepelně roztahuje. Výše uvedený příklad také názorně ilustruje zásadní omyl, kterého se dopustíme, pokud řádně nerozlišíme různé veličiny jako teplota (stavová veličina, intenzivní, nemožné sčítat) a teplo (množství tepelné energie, extenzivní veličina, možno sčítat). V minulosti fyzikové dlouho nebyli schopni tento rozdíl stanovit: teprve jasné odlišení obou veličin umožnilo prudký rozvoj termodynamiky v devatenáctém století, rozšíření parních strojů a nástup průmyslové revoluce.

1.6 Fyzikální veličiny protenzivní

Čas je veličinou, která plyne stále a pro jeho zvláštnost se pro veličiny, s ním spojené, ujal zvláštní název: protenzivní.

1.7 Označení veličin

Veličiny nejčastěji označujeme jednopísmennou zkratkou podle počátečního písmene slova, označujícího tradičně veličinu v anglickém, případně německém, francouzském či latinském jazyce.

Proto označujeme písmenem t čas (původně lat. tempus, nyní angl. time) nebo také τ , písmenem v rychlost (lat. velocitas, angl. velocity), písmenem a zrychlení (lat. acceleratio, angl. acceleration) písmenem m hmotnost (lat. massa, angl. mass) atd. Tyto zkratky jsou obvyklé, nikoliv však závazné a jsou proměnlivé místem a časem: např. fyzikální práce se dříve zhusta označovala písmenem A (z německého Arbeit), nyní jsme zvyklí psát W (z anglického work). V označování veličin panuje značná libovůle, často pro odlišení významu používáme pro jednu a tutéž veličinu různá písmena - např. fyzikální veličinu „délka“ označujeme písmenem l (lat. longitudo, angl. length = délka), ovšem jindy zase jako h (height = výška) anebo b či w (breadth, width = šířka), případně d (distance = vzdálenost anebo diameter = průměr) a nic nám nebrání v tom, abychom v česky psané práci použili např. zkratek d , v , $š$ (délka, výška, šířka). Tuto relativní libovůli v označování veličin ovšem není možné přenášet na označování jednotek, které je naproti tomu naprosto závazné!

V každém případě je nutné pokaždé slovně uvádět, kterou konkrétní veličinu máme pod kterým písmenným označením na mysli. [91]

1.8 Základ měření fyzikálních veličin

Základem fyziky je měření. Objevovat fyziku znamená takto poznávat možnosti měřených veličin, které jsou s ní spjaty. Aby se dala fyzikální veličina dobře popsat, je třeba nejdříve zavést její jednotku, tj. takovou míru této veličiny, které se přisoudí číselná hodnota přesně 1.0. Potom se vytvoří standart, snímž se budou všechny ostatní hodnoty dané fyzikální veličiny porovnávat. Například jednotkou délky je metr. Jeho standart je definován jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za přesně definovaný zlomek sekundy. Jednotku fyzikální veličiny i její standart se může definovat naprosto libovolným způsobem. Důležité je jen to, aby tato definice byla natolik rozumná a praktická, aby mohla být v odborných kruzích všeobecně přijata.

Jakmile je definován standart například pro délku, musí se ještě vypracovat metody, jak posuzovat různé délky. Ať jde o tloušťku lidského vlasu nebo vzdálenosti hvězd od země. Jednou z metod měření je měření metrem a jeho posouvání v měřené vzdálenosti nebo otáčením kola s přesným obvodem jednoho metru. Tato metoda je však nevhodná při měření právě třeba lidského vlasu nebo vzdálenosti hvězd. Proto například vzdálenost hvězd měříme v tzv. světelných rocích, tj. jakou vzdálenost uletí světlo za jeden rok. Fyzikálních veličin je takové množství, že není jednoduché je nějakým způsobem uspořádat. Může se však využít toho, že některé veličiny jsou vzájemně závislé. Příkladem může být rychlost, kterou lze vyjádřit jako podíl délky a času. Lze tedy vybrat po mezinárodní dohodě, celkem malý počet fyzikálních veličin, pro něž se definují jejich vlastní standardy. Délka i čas k nim patří. Všechny ostatní veličiny lze pak vyjádřit pomocí těchto základních veličin a jejich standardů. Takže rychlost pak může být definována pomocí dvou základních veličin a to délky a času a jim odpovídajících jednotek a standardů. Standardy základních veličin musí být dostupné a při opakovaném měření neproměnné. Kdyby byl definován jako standard délky český sáh, tedy vzdálenost mezi prsty rozpažených rukou (cca 190 cm), byl by to standard snadno dostupný, avšak pro každého člověka jiný. Věda a technika však vyžaduje mnohem větší přesnost, a proto je neproměnnost standardu mnohem důležitější než jeho snadná dostupnost. Je teda třeba mít k dispozici dostatečný počet jeho přesných kopií i za cenu náročnosti jejich zhotovení. V klasické fyzice včetně teorie relativity se předpokládá, že měření se provádí tak, že nedojde k ovlivnění měřené hodnoty, respektive že vliv měření bude zanedbatelně malý. [45]

2. Historie měrných jednotek

Měřit začali lidé už v počátcích své historie. Pravděpodobně i pravěcí lidé si sdělovali své poznatky o vzdálenostech důležitých míst pro lov např. napajedel, obvyklých cest zvířete, umístění pastí i časových obdobích kdy táhne zvíře do zimovišť či na jarní pastvu. Důležitost měření pak vzrůstá se vznikem prvních lidských civilizací. Tyto civilizace byly závislé na organizované zemědělské výrobě a obchodní výměně různého zboží. Měrnými jednotkami se zpravidla stávali části lidského těla. U jednotek délky to byly např. palec, loket, stopa. U jednotek hmotnosti to byly např. semena rostlin či jejich plody. U jednotek objemu to byly např. běžně používané nádoby jako pohár, vědro. U jednotek plochy to byly velikosti pozemků např. záhon, pole.

Evropa středověku měla velmi roztržštěnou soustavu měr a vah, to úzce souviselo se vznikem měst, která měla práva obchodu a pořádání trhů kde pak platily místní měrové a váhové jednotky. To přetrvalo, až do novověku. Pokusy o sjednocení měrných jednotek byly úspěšné jen v rámci jednotlivých státních útvarů, a i když v Evropě 19. století bylo jen několik velkých států, které v předchozím období pohltily všechny menší státy, nebyly tyto státy schopny se dohodnout na jednotném používání měrných jednotek. Teprve až po zavedení tzv. metrické soustavy měr v revoluční Francii, která byla založena na odvození měrných jednotek z poznatků tehdejší vědy a desítkové soustavy, se ukázalo, že tato soustava může být základem pro mezinárodní soustavu měr. Na popud Francie započala jednání, která byla završena v Paříži, kdy dne 20. 5. 1875 byla podepsána mezinárodní konvence o metru. Ten byl stanoven měřením již roku 1797 jako desátá miliontá část čtvrtiny zemského poledníku. Tuto dohodu podepsalo 17 států. Tehdejší Rakousko-Uhersko a do kterého tehdy patřily i české země, po přijetí této dohody, mohlo zrušit např. 22 různých délkových měr. [1]



Obr. 2.1 Dobová nauková francouzská tabule vysvětluje přechod na nový systém měr a vah. Obrázky ilustrují přechod starých francouzských měr na nové. Pinta byla nahrazena litrem, libra kilogramem, loket metrem, čtvereční sáh arem a půl fura krychlovým metrem. [8]

2.1 Vznik mezinárodní soustavy SI

Po druhé světové válce bylo dohodnuto metrickou soustavu zmodernizovat, aby každý stát kdekoli na světě mohl přesně reprodukovat národní etalony kterékoliv měřicí jednotky a tím aby odpadlo pravidelné dojíždění do Paříže k pravidelným kalibrováním národních etalonů. Tím vznikla nová mezinárodní soustava měrných jednotek, nazvaná *Système International d' Unités* se zkratkou SI. Byla postupně tvořena a schvalována na deseti až šestnácti konferencích měr a vah v letech 1954 až 1979. Byla vydána jako mezinárodní norma, a to když v roce 1971 bylo na 14. generální konferenci pro váhy a míry bylo vybráno sedm základních veličin a odpovídajících základních jednotek, které se staly základem Mezinárodní soustavy jednotek označované zkratkou SI a nazývané také metrická soustava viz tabulka 2.1.

JEDNOTKY se dělí na:

Základní

délka	: metr	- m
hmotnost	: kilogram	- kg
čas	: sekunda	- s
el. proud	: ampér	- A
termodynam. teplota	: kelvin	- K
látkové množství	: mol	- mol
svítivost	: kandela	- cd

Doplňkové a odvozené

rovinný úhel	: radián	- rad
prostorový úhel	: steradián	- sr
m ² , m ³ , m/s, m/s ² , kg/m ³ , Pa, J, W, Hz, N, a další		

Užívané spolu s SI

čas: minuta – min, hodina – h, den – d
rovinný úhel: stupeň – °, minuta – ′, vteřina – ″
Celsiova teplota: °C
objem: litr – l (L)

Tabulka 2.1 Jednotky SI [2]

Všechny takzvané odvozené jednotky soustavy SI jsou definovány pomocí jednotek základních. Například jednotkou síly je newton (značka N) a ten lze vyjádřit pomocí jednotek základních a to jednotkami hmotnosti, délky a času $1 \text{ newton} = 1 \text{ N} = 1 \text{ kgms}^{-2}$.

Aby se daly jednoduše zapsat značně velké nebo příliš malé hodnoty veličin, používá se exponenciální tvar zápisu čísel pomocí mocnin čísla 10. Takto se vyjádří

$$9000000 \text{ m} = 9 \cdot 10^6 \text{ m} \text{ a nebo } 0,0000007 \text{ A} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ A}.$$

Jinou možností vyjádření malých nebo velkých hodnot veličin je užití předpon v názvech jednotek. Jejich seznam je uveden v tabulce 1.2.

Každá předpona odpovídá příslušné mocnině čísla 10. Předpona u jakékoli z jednotek SI signalizuje, že hodnotu je třeba vynásobit odpovídající mocnině čísla 10.

Například $3000000 \text{ wattů} = 3 \cdot 10^6 \text{ W} = 3 \text{ megawatty} = 3 \text{ MW}$

Násobky a díly jednotek se tvoří přednostně podle třetí mocniny deseti. Předpony jednotek SI jsou uvedeny v tabulce 1.2 .

Předpony pro násobky a díly jednotek :

E	exa	10^{18}	=	1 000 000 000 000 000 000
P	peta	10^{15}	=	1 000 000 000 000 000
T	tera	10^{12}	(bilión) =	1 000 000 000 000
G	giga	10^9	(miliarda)=	1 000 000 000
M	mega	10^6	(milión) =	1 000 000
k	kilo	10^3	(tisíc) =	1 000
h	hekto	10^2	=	100
da	deka	10^1	=	10
		10^0	=	1
d	deci	10^{-1}	=	0,1
c	centi	10^{-2}	=	0,01
m	mili	10^{-3}	=	0,001
μ	mikro	10^{-6}	=	0,000 001
n	nano	10^{-9}	=	0,000 000 001
p	piko	10^{-12}	=	0,000 000 000 001
f	femto	10^{-15}	=	0,000 000 000 000 001
a	atto	10^{-18}	=	0,000 000 000 000 000 001

V r. 1992 byly předpony rozšířeny o tyto:

Y	yotta	10^{24}
Z	zetta	10^{21}
z	zepto	10^{-21}
y	yokto	10^{-24}

Tabulka 2.2 Předpony jednotek SI [2]

2.2 Metrologie

Metrologie byla původně naukou o měřácích a váhách. V současné době je interdisciplinárním oborem zahrnujícím vše, co se měření týká.

Členění metrologie:

- oblast legislativní- legální metrologie
- oblast teoretická- fundamentální metrologie
- oblast praktická- aplikovaná metrologie
- doprovodné činnosti

2.2.1 Legální metrologie

Legální metrologie vymezuje důležitý okruh předpisů, který má zaručit, aby výsledek měření byl vždy reprezentativní. To znamená že, je nutné zaručit určitou úroveň měrových procesů, metrologických prostředků a kvalifikaci personálu.

Oblast legální metrologie obsahuje dvě základní složky. První je tzv. řízená oblast, direktivní, zajištěná zákony. Účelem zákona je zachování jednoty měřidel a metod měření. Obsahuje principy uvádění měřidel do oběhu, jejich kalibrace, kontroly a manipulaci.

Druhou neméně důležitou je neřízená oblast legislativy, která tvoří předpisy, jejich dodržování je však životní nutností jak pro poskytovatele služeb (výrobce), tak pro odběratele (zákazníka).

2.2.2 Fundamentální metrologie

Má za úkol vývoj nových měřících metod, zpřesňování měrových jednotek a konstant. To je bezpodmínečně nutné v prostředí neustále se zvyšujících požadavků na přesnost a kvalitu výrobků a služeb.

2.2.3 Aplikovaná metrologie

Aplikovaná metrologie spojuje při praktickém provádění legální a fundamentální metrologii. Hovoří se někdy o oborové metrologii jako je například strojírenská metrologie.

Směrnice	Vyhláška	Nařiz. vlády	Měřidlo nebo výrobek
71/317	33/2002		Pravouhelná závaží 5 kg - 50 kg a válc. záv. 1 kg - 10 kg
71/318	336/2000		Plynoměry
71/319	22/2001		Průtokoměry na kapaliny jiné než voda
71/347	29/2002		Měřicí přístroje pro měření objemové hmotnosti obilí
73/362	339/2000		Hmotné délkové měřky
74/148	32/2002		Závaží od 1 mg do 50 kg
75/033	334/2000		Vodoměry na studenou vodu
75/410	250/2001		Pásové dopravníkové váhy
76/765	31/2002		Lihoměry a hustoměry na líh
76/766	141/1997		Lihoměrné tabulky
76/891	338/2000		Elektroměry
77/095	336/2000		Taxametry
77/313	21/2001		Měřicí systémy pro kapaliny jiné než voda
78/1031	249/200		Automatické kontrolní a třídící vážící zařízení
79/830	333/2000		Vodoměry na teplou vodu
86/217	37/2000		Měřiče tlaku v pneumatikách pro motorová vozidla
90/384		326/2002	Váhy s neautomatickou činností
93/42		181/2001	Zdravotnické prostředky

Obr. 2.3.3.1 kategorie harmonizovaných měřidel v Evropě [90]

3. Historický vývoj měření vybraných fyzikálních veličin

3.1 Délka

V roce 1792 byl v revoluční Francouzské republice zaveden v novém systému měr a vah jako jednotka délky metr, který byl definován jako jedna desetimiliontina vzdálenosti od severního pólu k rovníku. Z praktických důvodů se od tohoto standardu upustilo a metr byl definován jako vzdálenost mezi dvěma tenkými vrypy na tyči vyrobené ze slitiny platiny a iridia a byl nazván standardním metrem. Tento standard je dodnes uložen v Mezinárodním úřadu pro váhy a míry v Sévres u Paříže. Jeho přesné kopie, nazývané druhotnými standardy, byly rozeslány do metrologických laboratoří po celém světě a jsou používány při výrobě dalších, mnohem snadněji dostupných standardů. Každé zařízení pro měření délky poskytuje údaje odvozené od standardního metru. Posléze se ukázalo, že pro vědu a techniku je třeba mnohem přesnější standard, než je vzdálenost mezi dvěma, byť přesnými vrypy na tyči ze speciálního kovu. Takže v roce 1960 byl přijat nový standard metru, který vycházel z definice vlnové délky světla. Tento metr byl definován jako 1650763,73 násobek vlnové délky oranžově červeného světla, které při výboji emitují atomy izotopu kryptonu 86. Takovýto neobvyklý počet vlnových délek se vybral z důvodu, aby se nový standard co nejpřesněji přiblížil stávajícímu standardu metru. Atomy izotopu kryptonu 86, které byly použité pro definici nového standardu metru, jsou prakticky dostupné kdekoli, jsou identické a všechny vyzařují světlo přesné vlnové délky. V každém z nich je tak standard zajištěn lépe a bezpečněji než v jakémkoli ústavu měr a vah kdekoli na světě. Požadavky na přesnost se neustále zvyšovaly, až bylo dosaženo takového stupně, že standard metru odvozený od atomů kryptonu přestal těmto nárokům vyhovovat. Proto v roce 1983 byl definován nový standard metru a to jako vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu v přesně stanoveném časovém intervalu. Sedmnáctá generální konference pro váhy a míry schválila novou definici metru, která je definována takto: Jeden metr je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za dobu $1/299792458$ sekundy. Tato konkrétní volba velikosti časového intervalu v definici metru vlastně určuje velmi přesně velikost rychlosti světla ve vakuu, což je $299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jelikož měření rychlosti světla je v současnosti jedno z nejpřesnějších měření, je tedy využití rychlosti světla pro nejnovější definici standardu metru opodstatněné. [45]

3.2 Vývoj měření délky

Měření délek různých rozměrů a vzdáleností patřilo k prvním měřickým technikám v počátcích lidské civilizace. Jednotky byly různě odvozeny od částí [lidského těla](#).

Už při stavbách egyptských pyramid se používala přesná pravítka z kamene.

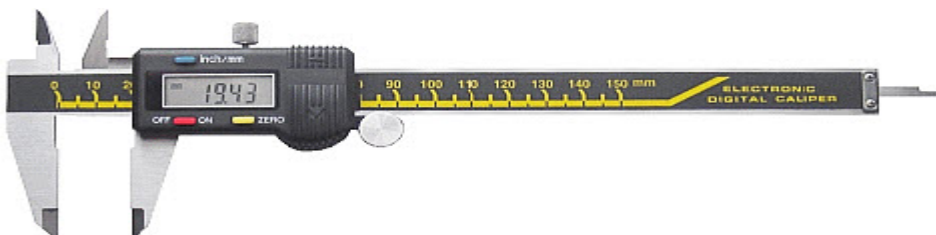
Podle dochovaných záznamů se používala pravítka také dřevěná a měřicí pásma z provazů. Dlouhá staletí pak měření délek v podstatě nezaznamenalo téměř žádný pokrok. Tehdejší úroveň vědy a techniky ani přesnější metody měření nevyžadovala. Nároky na přesnější měření byly zvyšovány až s rozvojem technické výroby v druhé polovině devatenáctého století při nástupu průmyslové revoluce. Dnes je však třeba měřit velmi krátké i velmi dlouhé vzdálenosti s velkou přesností, jež vyžadují úroveň dnešní průmyslové výroby a vědy. V případě velmi malých rozměrů používáme metody měření. V případě velmi malých rozměrů používáme kontaktní metody měření.



Obr. 3. 2. 1 měření vzdáleností v 18. století [8]

3.3 Kontaktní měření

Měřená součást se vkládá mezi čelisti měřidla. Používá se posuvné měřítko nebo mikrometr. Posuvné měřítko má jednu stupnici na pevné části a druhou zvanou nonius na pohyblivé části. Na posuvném měřítku se dá měřit s přesností na 0,05 mm. Nejnověji se prosazují posuvná měřítka s digitálním zobrazením naměřené hodnoty, viz obr. 3.3.1



Obr. 3.3.1 posuvné měřítko s digitálním zobrazením naměřené hodnoty [85]

Mikrometrická měřidla se používají mnohem rozsáhleji díky široké nabídce výrobců měřidel. Princip těchto měřidel si bere za základ přesný mikrometrický šroub o stoupání zpravidla 0,5 mm. Vedlejší stupnice na bubínku je rozdělena na 50 dílků a bubínek se otočí o jednu otáčku. Pak stoupání $0,5\text{mm} : 50 \text{ dílky} = 0,01$. Matice spojená s měřícím bubínkem tedy umožňuje odečítat hodnoty v 0.01 mm. Digitální přístroje mohou odečítat rozměry až v hodnotách 0,001 mm. Digitální měřidla poskytují ještě jednu výhodnou možnost a to že se s nimi dá měřit komparativně jelikož nulová hodnota se dá nastavit kdekoliv v rozsahu hlavního měřítka.



Obr. 3.3.2 digitální třmenový mikrometr [85]

Při měření velice malých délek respektive jen úchylek od daného rozměru se používají úchylkoměry. Provedení se liší podle požadavků na přesnost, měřícím rozsahu a principu použitého převodu z měřícího doteku na číselník. Rozsah přesnosti těchto přístrojů se pohybuje v rozmezí 0,1 až do 0,0001 mm. Úchylkoměry se musí používat se stojánky, jež zaručují, že měřící dotek je kolmý ve dvou svislých rovinách na směr měření. Rovněž se musí používat vhodné a nepoškozené výměnné doteky.



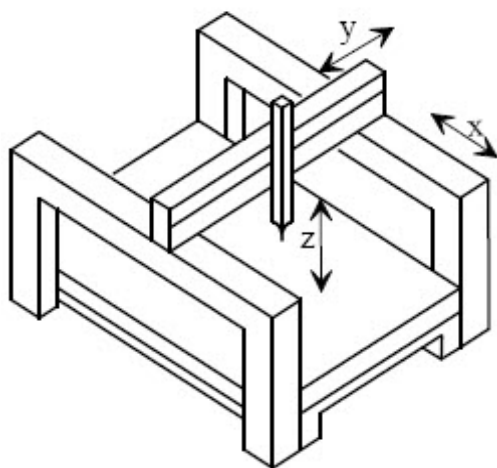
Obr. 3. 3. 4 Stojánek s úchylkoměrem [85]

Tří souřadnicová měřicí technika takzvaná 3D, viz [obr. č.3.4.1](#), je v současnosti nejpodstatnější inovací v měřicí technice pro strojírenství. Tří souřadnicové měřicí stroje vybavené vhodným softwarovým vybavením umožňují měřit v prostoru nejkomplicovanější tvary součástí. Princip měření spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru, k němuž se další body měřené součásti vztahují. Každý měřený bod je definován třemi na sebe kolnými souřadnicemi. Přesnost měření se pohybuje od 0,01 až do 0,0001 mm v závislosti na druhu použitého typu odměřování polohy. Pohyblivé části 3D strojů jsou vesměs uloženy na aerostatickém vedení. Přesně definované pohony posuvů jsou realizovány krokovými motory. Snímání měřených bodů se realizuje pomocí stavebnicových všesměrových snímacích hlav. Celkové doteky, které se při častém kontaktu s měřenou plochou opotřebovávají a jsou nahrazovány přesnými kuličkami ze syntetického rubínu.

3.4 Bezkontaktní měření

Bezkontaktní měření rozměrů je dnes zajišťováno na několika principech.

Je to využití laserových snímacích zařízení, radarových snímacích zařízení s vysokofrekvenčním zářením, selsyny na induktivním fázovém principu, optická zařízení s optickými přírůstkovými snímači a využití CCD snímacích zařízení.



PORTÁLOVÝ SMS

Obr. 3. 4. 1

Portálový souřadnicový měřicí stroj měřící ve 3D. [85]

a) Laserová měřicí zařízení

Laserová měřicí technika se používá od jednoduchých zařízení, jako je zaměřovací systém využívající laserový paprsek a zaměřovací terč až po laserinterferometry se schopností měřit délky v hodnotách nanometrů.

Laserointerferometry využívají interferenčního jevu k určení rozdílu drah dvou světelných paprsků z etalonu He-Ne-I₂ laseru. Svazek paprsků ze zdroje koherentního záření je rozdělen na dvě části. Jednotlivé paprsky se po odrazu v optické soustavě skládají a po dopadu na stínítko se rozdíl drah projevuje jako interferenční proužky. Interferenční proužky se sečítají a jejich zlomek se zjišťuje měřením s rozlišitelností 0.01 proužku, což představuje přibližně délku 3 nm. Proto se používá měření s více zdroji při různých vlnových délkách, a sice při červeném světle 633 nm a při zeleném světle 534 nm. V jednom rameni interferometru se pohybuje koutový odražeč, jehož vzdálenost se měří. V praxi se tato metoda hojně využívá pro měření geometrické přesnosti obrobků při strojním obrábění.



Obr. 3.4.2 laserové dálkoměry
[85]

3.6 Radarová měřící zařízení

Využití této měřící techniky je v praxi pro kontinuální měření výšky hladiny. Využívá se pulzní metoda měření o frekvenci 25 GHz a následného zpracování odraženého signálu. Touto metodou lze měřit až do vzdálenosti 30 m a to i při extrémní prašnosti a teplotě až 200 °C . Prvotní odražené signály jsou v radaru zpracovány a při použití vyhodnocovací metody, která využívá algoritmus vytvořený na základě sběru provozních dat nashromážděných s více jak milionu vyřešených úloh měření výšky hladiny.

Výsledkem jsou pak přesné a spolehlivé údaje o výšce měřené hladiny. Pro použitou radarovou metodu s impulsy o frekvenci 25 GHz jsou dostačující trychtýřové antény poměrně malých rozměrů, které se vejdou do malých instalačních otvorů. Soustředěný paprsek vysokofrekvenčního záření navíc minimalizuje vliv stěn nádoby na činnost převodníku. [11]

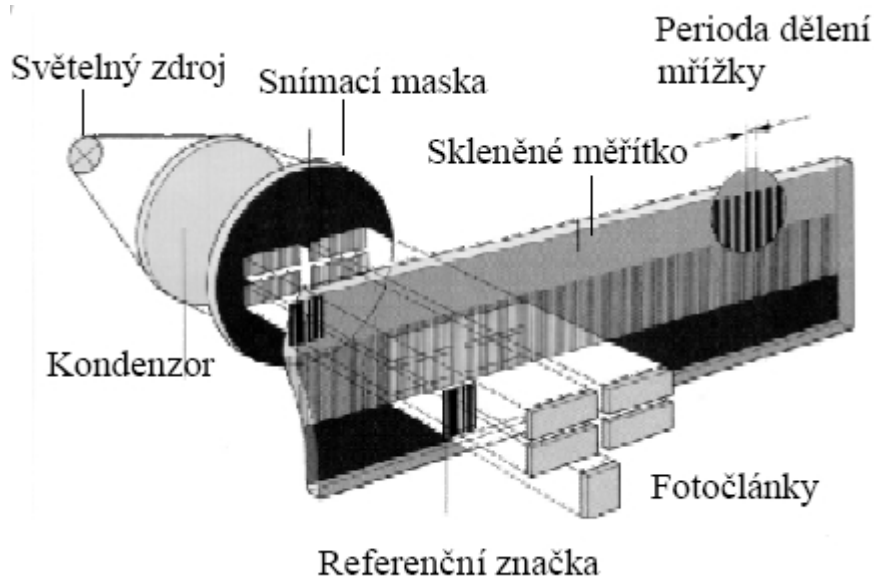
3.6 Selsyny na induktivním principu

Tento způsob měření je používán pro měření polohy. Selsyn je v podstatě střídavý rotační stroj. Připomíná asynchronní motorek s vyvedenou kotvou. Pro potřeby měření se obvykle používá dvoufázové provedení. Napájením cívek statoru se v dutině selsynu vytváří rotující magnetické pole. To v cívce rotoru indukuje střídavé napětí o stejné frekvenci, ale s fázovým posuvem, který je úměrný úhlu natočení. Jeho vyhodnocení se pak získá údaj o natočení rotoru vůči výchozí poloze a to obvykle vůči jedné fázi napájecího napětí. V rámci jedné otáčky má údaj absolutní charakter, který se cyklicky opakuje s každou otáčkou. Údaj o fázi v rámci jedné otáčky je nutné rozšířit o poloze aktuální periody. Údaj je tedy cyklicko-absolutní. Po zapnutí stroje je vždy nutné uvést do souladu vyhodnocovaný údaj s údajem o skutečné poloze, to znamená zjistit polohu aktuální otáčky. Obvykle se to řeší najetím do výchozí referenční polohy, kde se údaj aktualizuje tzn. obvykle se vynuluje a od té doby se stává absolutním- do nejbližšího výpadku napájení. Používaly se i absolutní selsynové senzory s několika selsyny, jejichž rotory byly spojeny v takovém převodu, aby měl výsledný údaj o poloze absolutní charakter v celém rozsahu měřených hodnot a byl automaticky obnovitelný okamžitě po zapnutí.

3.7 Optické přírůstkové snímače

Tento systém se využívá pro měření polohy ve standardních systémech CNC, viz [obr. 3.7.1](#). Podstata spočívá ve změně světelného toku v závislosti na poloze segmentů s ryskami nebo drážkami. Světelný tok je vyhodnocován dvojicí optických čidel, která jsou přesazena o čtvrtinu. Při plynulém pohybu je výstupem senzoru dvojice periodických napětíových signálů, fázově posunutých o čtvrtinu periody. Tradičně jsou tyto spojitě signály omezeny na dvoufázové obdélníkové průběhy. Logickým vyhodnocení posloupnosti jejich úrovní a hran se generují impulsy ve významu elementárních přírůstků pro odpovídající směr pohybu. Pro každý směr jsou takto generovány čtyři impulsy za periodu a tím dochází tedy ke čtyřnásobnému zjemnění oproti dělení snímače. V současnosti se častěji používají senzory se spojitými výstupy sinusového průběhu standardního rozkmitu 1 V.

Ze spojitých průběhů lze získat podstatně více informace než z obdélníkového. Informace o poloze má přírůstkový charakter a po každém zapnutí systému je třeba ji aktualizovat tzn. opět najet do referenčních poloh. Aktualizaci polohového údaje usnadňuje využití tzv. nulového pulsu, který je generován jednou za otáčku. V každé otáčce tak je možno aktualizovat cyklicko-absolutní údaj o poloze a v referenční poloze mu dát absolutní charakter, který je platný do nejbližšího výpadku napájení. [13]



Obrázek. 3. 7. 1 optický přírůstkový snímač [17]

3.8 CCD snímací zařízení

Obecně lze říci, že technologie 3D scanování představuje zcela nový přístup k pořizování prostorové informace pro projektování, retrofity technologií, zaměřování skutečného provedení objektů (průmyslových, uměleckých, historických), výpočet kubatur, zaměřování těžko přístupných a nebezpečných ploch a získávání podkladů pro 3D simulace. V současnosti získává na důležitosti a patří jí budoucnost. Vlastní měření začíná vytvořením bodového pole pro určení bodů v prostoru, následuje vlastní proces skenování, které probíhá automaticky bez zásahu lidského faktoru. Body jsou následně převedeny do zpracovatelského software v podobě tzv. mračna. Toto mračno je programem zpracováno (odstraní se zbytečné body, minimalizují se odchylky) způsobem, kdy jednotlivé části mračna jsou nahrazovány geometrickými tvary a následně je vytvořen 3D model, který může být importován do CAD systémů. Jinou metodou je osvětlení snímaného tělesa přes mřížku. Na tělese vznikne optický obraz mřížky deformované tělesem. Obraz mřížky vytvořený na povrchu tělesa je snímán dvěma kamerami. Těleso je postupně natáčeno, až o 360° .

Z křivek mřížky sejmutých kamerami, z úhlu natočení tělesa a ze vzájemného umístění a natočení kamer je v počítači vypočítán tvar tělesa. [13]

3.9 Hmotnost

Hmotnost je základní fyzikální veličina v soustavě SI jednotek, která charakterizuje základní vlastnost všech hmotných objektů, která se ve fyzikálních jevech projevuje setrvačností a vzájemným přitahováním hmotných objektů. Jednotkou hmotnosti je kilogram (kg). Hmotnost je základní jednotka soustavy SI a podle normy ISO je kilogram hmotnost mezinárodního prototypu kilogramu, který je uložen v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy v Sévres u Paříže (definice pochází z roku 1901). Prototyp vyrobila firma C. Longue v Paříži ze slitiny platiny a iridia (9:1). Druhá definice vychází z faktu, že kilogram je hmotnost 1 dm³ destilované vody při teplotě 20° C a normálním tlaku 1,01325 · 10⁵ Pa. Hmotnost je možno definovat silovými účinky vzájemného gravitačního působení objektů. Rozlišujeme klidovou hmotnost m_0 a pohybovou hmotnost m , mezi nimiž platí vztah 3.9.1

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (\text{Vztah 3.9.1})$$

kde v – rychlost tělesa, c – rychlost světla

3.10 Vývoj měření hmotnosti

Snad prvními národy, které měly svou vlastní měrovou soustavu, byli před více než 3000 lety Babylóňané a Asyřané, kteří čerpali ze zkušenosti Sumerů. Měli již normalizovaná závaží. Již v této době jsou používány váhy založené na nejjednodušším principu rovnoramenné páky. Dvě stejná ramena mají na každém konci zavěšenou misku. K vyvažování břemene se používala závaží z kamene.

Starí Římané měli systematicky zpracované váhy do dvanáctkové soustavy. Kopie jejich lékárenských závaží se používala v Evropě až do Francouzské revoluce. Velmi starou jednotkou, byla libra, která se používala jak ve starém Řecku, tak ve starém Římě. Britsko americká soustava měr a vah vychází při měření hmotnosti z libry dodnes a označuje ji pound. Postupem doby nabývaly snahy o jednotný systém vah a měr na důležitosti. Koncem 18. století a začátkem 19. století se na našem území používal „vídeňský“ systém měr a vah. Pro hmotnost v něm byla například jednotka vídeňský cent, vídeňský lot atd. V tomto období se však věda, technika a obchod dostaly již na tak vysokou úroveň, že staré jednotky pro váhy přestaly vyhovovat. Zjednodušení však přinesl teprve metrický systém.

Zajímavé je, že kilogram byl původně odvozen z metru a to jako hmotnost 1 dm³ čisté odvzdušněné vody při největší hustotě tj. 4 °C. Po dlouhý čas používaly rovnoramenné váhy se zavěšenými miskami, až teprve r. 1669 člen Francouzské akademie věd profesor Giles Person z Robervalu přišel s vynálezem rovnoběžníkových balančních vah. Tato konstrukce však čekala velmi dlouho na své uplatnění, ale později se velmi rozšířila. Je to konstrukce sníž se setkáváme ještě dnes např. u známých kuchyňských vah našich babiček. Až v 18. století vynalezl anglický tesař John Wyatt váhy pro vážení povozů a těžkých břemen. Byly to mostové váhy složené z většího počtu převodních pák. Důležitým vynálezem byly desetinné váhy, které sestrojil štrasburský váhař Quitenz a tím daly vzniknout novým velmi rozšířeným vahám. 19. století přineslo další typy vah. Váhař Béragér sestrojil nové balanční váhy, které se dodnes používají v domácnosti. Byly rovněž sestrojeny běhounové váhy, které se v té době nazývali rychlováhami, protože se nemuselo zdlouhavě manipulovat s ručním kladením závaží na misku. Břemeno se vyvažovalo posouváním běhounu po stupnici. Začátkem 20. století se začaly vyrábět nové rychlováhy na sklonném principu. Stačilo položit břemeno na misku vah a váhy samy po vychýlení sklonného vahadla ukázaly na stupnici výsledek. Tyto váhy byly nejvíce používány v obchodě a průmyslu. Všechny uvedené typy vah jsou váhy pákové a jsou založeny na mechanickém principu vyvážení břemene. Přestože mají často velmi dokonalé konstrukce, některým účelům již nevyhovují. Pákový mechanismus se totiž vyznačuje určitou setrvačností a vážení trvá určitou dobu. Proto se hledaly nové principy měření hmotnosti. Místo vyrovnaní hmotnosti dvou závaží břemene a vyvažovacího závaží se začaly používat měření deformace tuhého tělesa. Tak vznikly váhy pružinové, torzní, hydraulické a posléze s rozvojem elektroniky váhy elektromechanické. I když první patent na elektromechanický snímač váhy byl udělen v USA už roku 1908, rozvoj elektromechanických vah začal až po druhé světové válce. V současné době se pro snímání deformací měrného tělesa používají polovodičové součástky. Mohly tak vzniknout i nové principy měření síly jako je například měření frekvence kmitající zatížené struny, měření úhlu vychýlení rotujícího zatíženého tělesa. [45]

3.11 Standard hmotnosti

Standardní kilogram je nyní podle mezinárodní úmluvy určen hmotností válce vyrobeného ze slitiny platiny a iridia, ten má tvar válce, jehož výška i průměr jsou 39 mm a je uložen Mezinárodním ústavu pro váhy a míry Sérvés u Paříže. Přesné kopie tohoto etalonu byly rovněž rozeslány do laboratoří pro standardy v ostatních zemích.

Hmotnost jiných těles se pak může měřit porovnáním s hmotností s kteroukoli z kopií standardního kilogramu. Tyto etalony jsou porovnávány se standardním kilogramem v Sèvres u Paříže každých 15 až 20 let.

3.12 Jiný standard hmotnosti

Porovnávat hmotnosti atomů mezi sebou se dokáže mnohem přesněji než je srovnávat přímo se standardním kilogramem. Proto se užívá ještě dalšího standardu hmotnosti je jím atom uhlíku $^{12}_6\text{C}$ jemuž byla mezinárodní úmluvou přisouzena hmotnost dvanácti tzv. atomových hmotnostních jednotek (u). Hmotnost atomové jednotky souvisí s hmotností standardního kilogramu vztahem $1 \text{ u} = 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Poslední dvě čísla jsou zatížena chybou ± 10 . Tak lze s přiměřenou přesností porovnávat hmotnosti různých atomů s hmotností uhlíku $^{12}_6\text{C}$. Zatím, však chybí spolehlivý způsob, jak dosáhnout stejné přesnosti i při měření běžných hmotností, srovnatelných s hmotností kilogramu.

3.13 Základní rozdělení vah

Váhy se dělí do několika skupin, podle zvolených kritérií.

A. Podle činnosti:

Automatické – vážení a s ním spojené operace se uskutečňují bez účasti obsluhy.

Neautomatické- jedna operace se děje za účasti obsluhy.

B. Podle způsobu vyvažování:

S automatickým vyvažováním- rovnovážné polohy se dosahuje bez zásahu obsluhy automatického vyvažování.

C. Podle výstupního signálu:

S analogovým výstupem.

S číslicovým výstupem.

Kombinované.

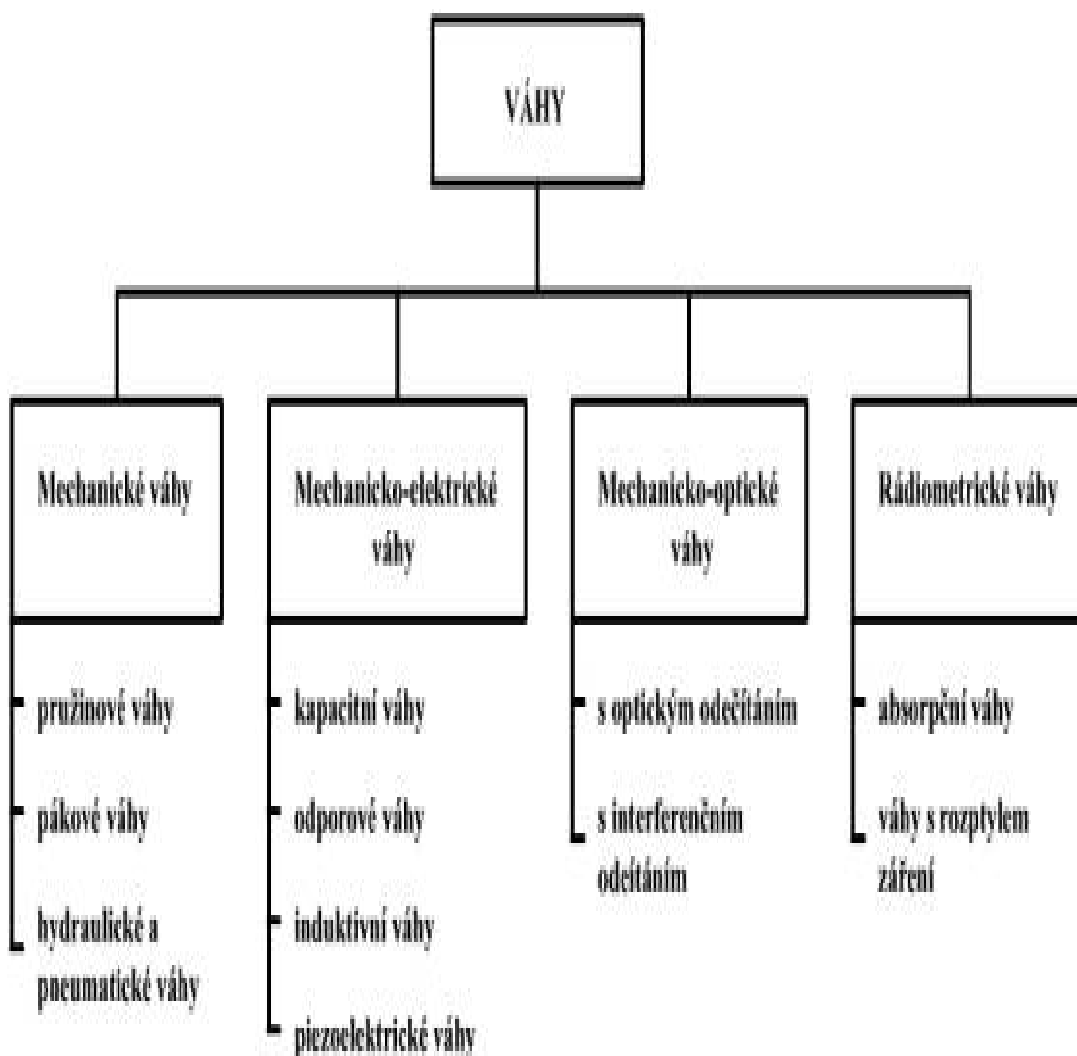
D. Podle funkce:

Se závažím

Bez závaží

E. Podle konstrukce

Můžeme váhy dělit podle tabulky č.3.13.1



Tabulka č.3.13.1 rozdělení vah [26]

3.14 Mechanické váhy.

3.14.1 Pákové váhy

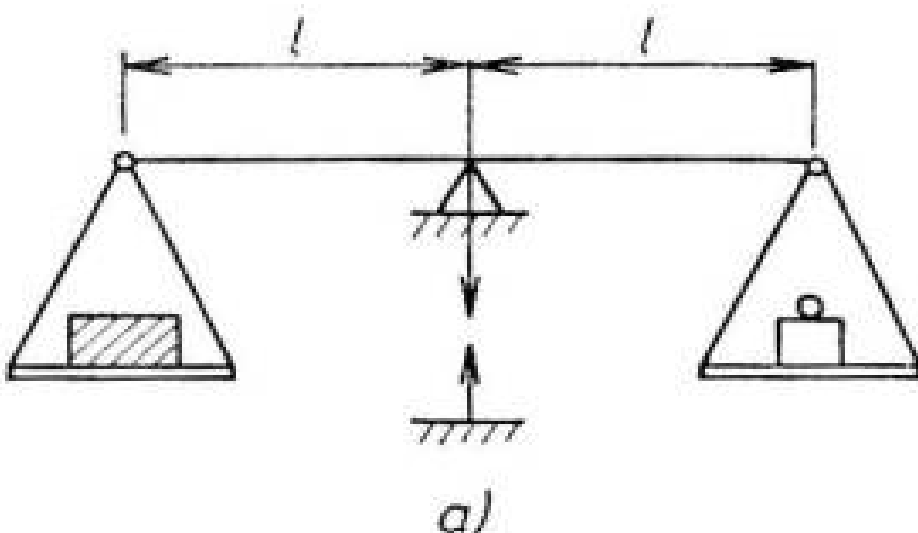
Pákové váhy patří k nejvíce používaným vahám. Vyznačují se velkou přesností a spolehlivostí.

Můžeme je rozdělit na:

- a) váhy závažové
- b) váhy běhounové
- c) váhy sklonné
- d) váhy sdružené

a) Závažové váhy

Na obrázku [č.3.14.1.1](#) je zobrazen princip rovnoramenných závažových vah. Na jednu misku se pokládá vážený objekt, druhou misku dokládáme přesnými závažími o známé hmotnosti. Po vyvážení ramen je hmotnost váženého objektu rovna hmotnosti závaží. Nejpřesnější z nich, váhy metrologické, se používají k porovnání hmotnostních prototypů, etalonů a normalů. Dosažitelná hranice přesnosti je 10^{-9} . Váhy analytické (s maximálním zatížením 100 – 200 g) mívají dosaženou přesnost 10^{-5} až 10^{-7} . Jelikož jsou určeny pro velmi přesná měření, musí tomu odpovídat jejich konstrukce. Všechny otočné body jsou umístěny na břitech. Analytické váhy jsou umístěny ve skleněné skříni, která je chrání před vnějšími vlivy. Váhy jsou opatřeny aretačním zařízením, které umožňuje, aby veškeré manipulace (kladení závaží apod.) se děla při aretovaných vahách, aby nedocházelo k opotřebení nebo dokonce porušení břitů. Váhy se odaretují pouze při vlastním vážení, při kterém však musí být vlastní ochranná skříňka uzavřena. Pro dosažení udané přesnosti vážení je nutno dodržovat předpisy pro práci s analytickými vahami. Rovněž vlastní umístění analytických vah vyžaduje určité předpisy. Nejlépe je umístit váhy na konzole zapuštěné v nosné zdi, aby se zamezilo chvění a otřesům. Abychom váhy mohli ustavit do vodorovné polohy, jsou opatřeny třemi nožkami, z nichž výšku dvou můžeme měnit stavitelnými šrouby. Váha bývá již sama opatřena libelou ke kontrole. [26]

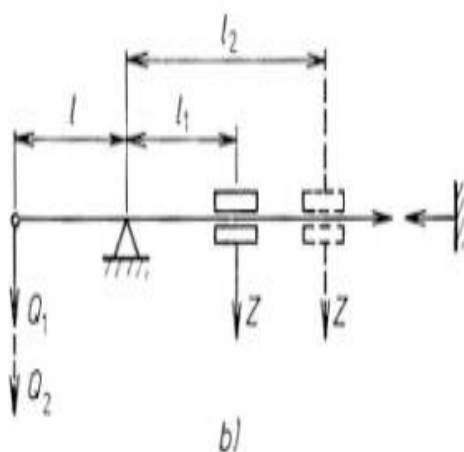


Obrázek .3.14.1.1 princip rovnoramenných vah [26]

Analytické váhy nebrzděné jazýček vah koná kolem rovnovážné polohy tlumené kmity. Doba kyvu bývá asi 10 sekund. U tohoto typu vah nečekáme na ustálení, ale rovnovážnou polohu zjišťujeme z krajních poloh kmitajícího jazýčku vah metodou kyvů. Jejich přesnost je oproti brzděným vahám menší. Analytické váhy brzděné- jsou opatřeny brzdícím (tlumícím) zařízením, které zabrání rozkmitání. Rovnováha nastane během několika sekund. U těchto vah, které patří do kategorie dražších vah, je většinou vyřešeno i mechanické přidávání malých závažíček pomocí zařízení, ovládaného z venku ochranné skříně. Předmět vyvažujeme celogramovými závažími, v posledním gramu dovažujeme mechanickými navažovacími zařízeními. Na stupnici odečítáme desetiny miligramů, noniem lze odhadnout setiny miligramu.

b) Běhounové pákové váhy

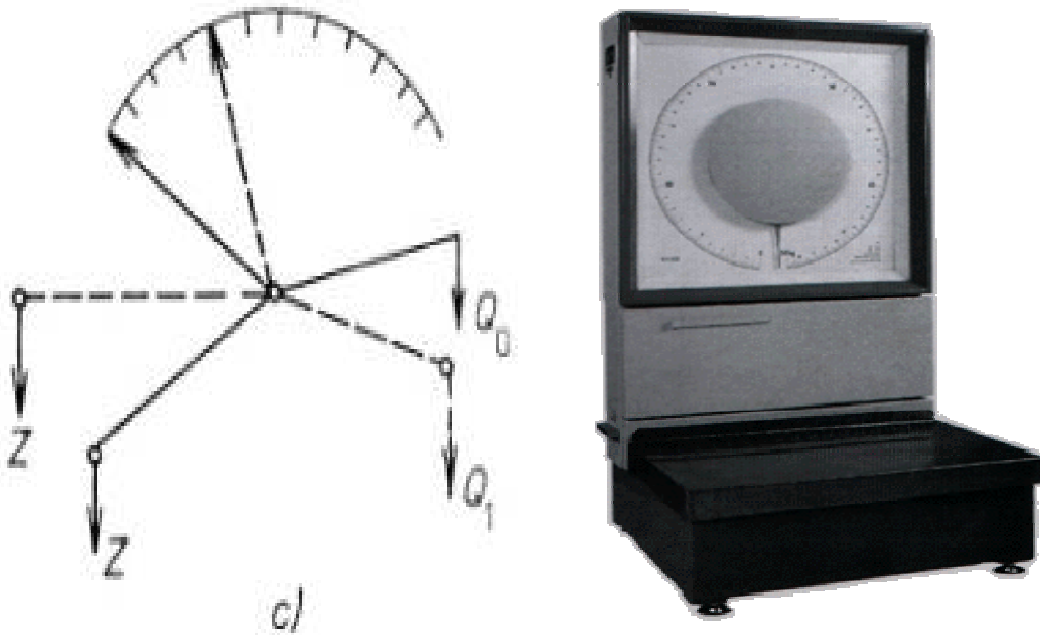
Princip těchto vah je na [obrázku č.3.4.1.2](#). Měřené břemeno se vyvažuje posouváním závaží konstantní hmotnosti- tzv. běhoun, po ramenu vahadla. Sklonné pákové váhy- princip je na obrázku 9.3. Vyvážení břemena se dosahuje výchylkou sklonného vahadla s protizávažím ze základní nulové polohy. Rovnovážná poloha, v níž se vahadlo ustálí, je pro každé zatížení jiná. Měřítkem hmotnosti je výchylka vahadla. Velikost závaží i délka ramen jsou konstantní. Na tomto principu jsou konstruovány i velké průmyslové váhy.



Obrázek 3.4.1.3 běhounové pákové váhy [26]

c) Váhy sklonné

Vyvážení břemena se dosahuje výchylkou sklonného vahadla s protizávažím ze základní nulové polohy. Rovnovážná poloha, v níž se vahadlo ustálí, je pro každé zatížení jiná. Měřítkem hmotnosti je výchylka vahadla. Velikost závaží i délka ramen jsou konstantní. Na tomto principu jsou konstruovány i velké průmyslové váhy. Obrázek 3.4.1.2 sklonné váhy [26]



d) Váhy sdružené

Kombinují dva předcházející principy. Velmi častou kombinací jsou váhy závažové a sklonné. Závaží slouží k přestavení rozsahu, poloha sklonného ramena bez jakékoli další manipulace udává hmotnost břemena v daném rozsahu.

3.15 Váhy deformační

Ve srovnání s váhami pákovými jsou konstrukčně i provozně jednodušší, snadno přenosné, dispozičně příznivější. Nedosahují však přesnosti pákových vah. Hlavním zdrojem chyb je nestálost mechanických vlastností pružného členu, jež bývá způsobena zejména teplotními vlivy, únavou materiálu, strukturálními změnami, agresivním působením prostředí. Oblast použitelnosti v technické i laboratorní praxi je velmi široká. Deformační váhy se vyrábějí pro nepatrné váživosti od jednotek mg (u torzních mikrovah) až do nosnosti 10^5 kg.

Deformační váhy lze rozdělit:

1) podle tvaru pružného členu a způsobu namáhání na:

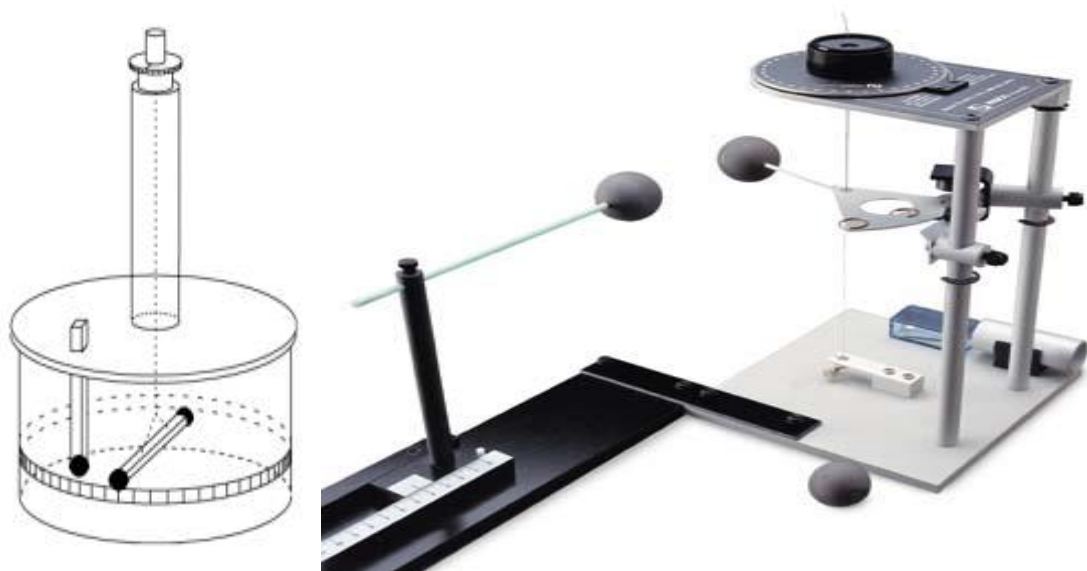
- a) torzní Coulombovy,
- b) pružinové- mincíře,
- c) hydraulické
- d) ostatní

2) podle způsobu indikace deformace pružného členu na:

- a) přímé s mechanickým převodem,
- b) optickým převodem
- c) elektrickým převodem

a) Torzní váhy

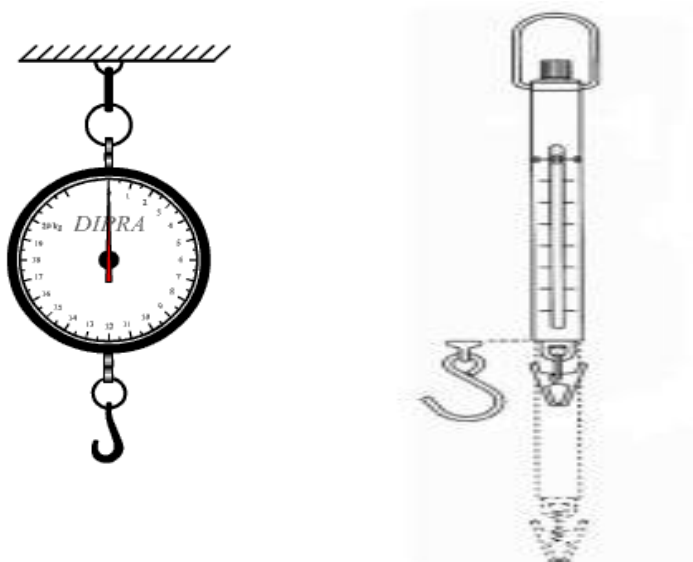
Coulombovy torzní váhy, viz obrázek [č.3.1.4.4](#) jsou určeny pro měření malých sil. Jsou sestaveny ze skleněné válcové nádoby, ve které jsou na tenkém pružném vlákně o poloměru R zavěšena izolační ramínka o délce $2a$. Vláknem je upnuté v otočné hlavici se stupnicí. Na ramínku jsou 2 kovové kuličky. U jedné z nich je další kovová kulička, která je upevněna na tenké kovové tyčce. Úhel vychýlení ramínka α se indikuje pomocí odrazu světelného paprsku od zrcátka z namontovaného na ramínku.



Obrázek č.3.1.4.4 Coulombovy torzní váhy [26]

b) Pružinové váhy

Obsahují pružinu, na kterou se zavěsí vážený předmět. Pružina se natahuje a hmotnost se zobrazí na stupnici. Na stejném principu funguje také siloměr. Liší se pouze v měřené veličině. Zobrazení pružinových vah je na [Obrázku č.3.1.4.5](#)



Obrázek č.3.1.4.5 pružinové váhy [26]

c) Elektromechanické váhy

Pro automatizační techniku je velmi výhodné při měření hmotnosti převod výstupní veličiny na elektrický signál. U elektromechanických vah se využívá obou základních odvažovacích principů, váhy pákové i deformační. U pákových vah se převádí přímočará nebo úhlová výchylka na analogový nebo číslicový elektrický signál.

U deformačních vah se převádí deformace pružného členu (poměrné prodloužení nebo mechanické napětí) na elektrický signál buď analogový, nebo číslicový. Snímače jsou [kapacitní](#), [odporové](#) a [piezoelektrické](#). Současné průmyslové elektromechanické váhy kromě základního úkonu - měřit hmotnost resp. přepravní výkon - plní ve spojení s počítačovou a další automatizační technikou i jiné významné funkce ve zdokonalování logistických a dalších technologických (např. výrobních) procesů. Jsou připojovány na počítačové systémy ekonomického řízení podniků, účetního výkaznictví, skladového hospodářství atd. Stávají se hlavními prvky v řízení různých technologických procesů, jejichž průběh závisí na vážení. [26]

d) Kapacitní snímače

Základem kapacitního snímače je dvou nebo několika elektrodový systém, jehož parametry se mění v důsledku působení měřené neelektrické veličiny.

Uvažujeme-li jednoduchý deskový kondenzátor, bude pro jeho kapacitu C platit

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (\text{vztah 3.1.4.1})$$

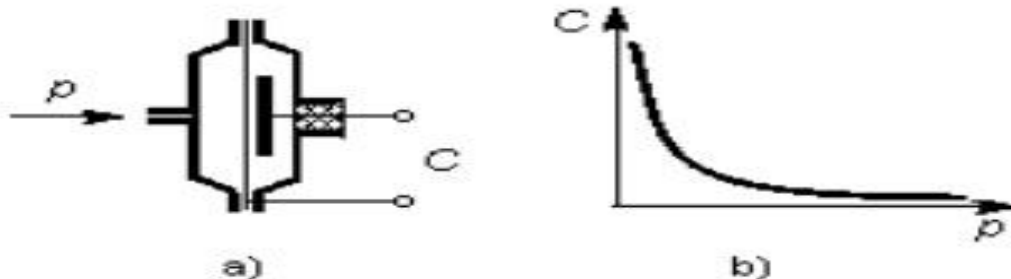
S - plocha elektrod; d - vzdálenost elektrod; ε_0 - permitivita vakua; ε_r - relativní permitivita
Z rovnice vyplývá, že změnu kapacity lze způsobit změnou plochy elektrod, vzdáleností elektrod nebo změnou dielektrika (relativní permitivity ε_r).

Pro měření tlaku se využívá kapacitního snímače, u něhož dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami. Jedna elektroda kondenzátoru je pevná a druhá je tvořena membránou, která vlivem působení měřeného tlaku mění svou polohu. Pokud budeme uvažovat, že ve vztahu 3.1.4.2 se mění d , ostatní veličiny zahrneme do konstanty k_1 , a potom

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d} = \frac{k_1}{d} \quad (\text{vztah 3.1.4.2})$$

dostaneme

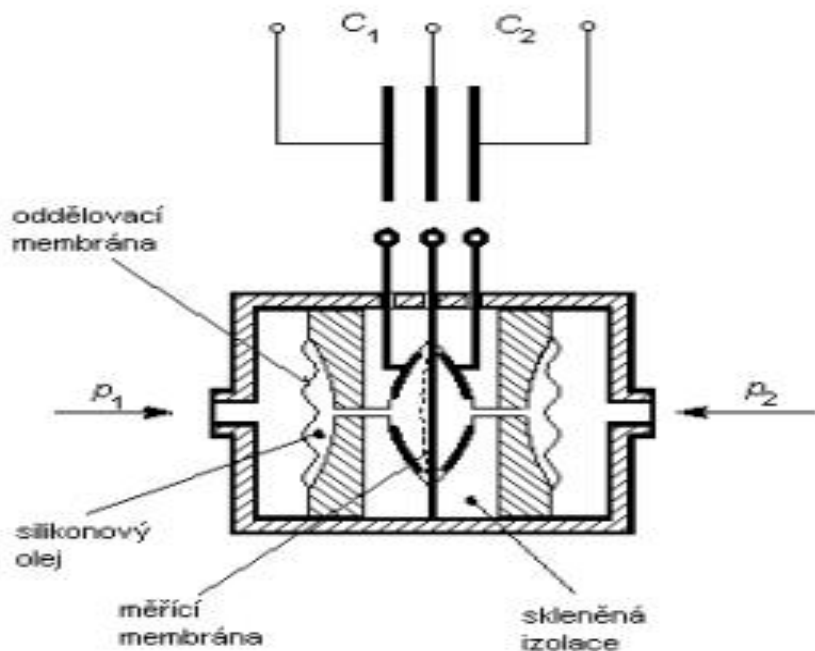
Z obr. č.3.1.4.6 je patrné, že průběh charakteristiky je nelineární. Je zřejmé, že změny kapacity (a tím i citlivost) budou největší při malých vzdálenostech elektrod d .



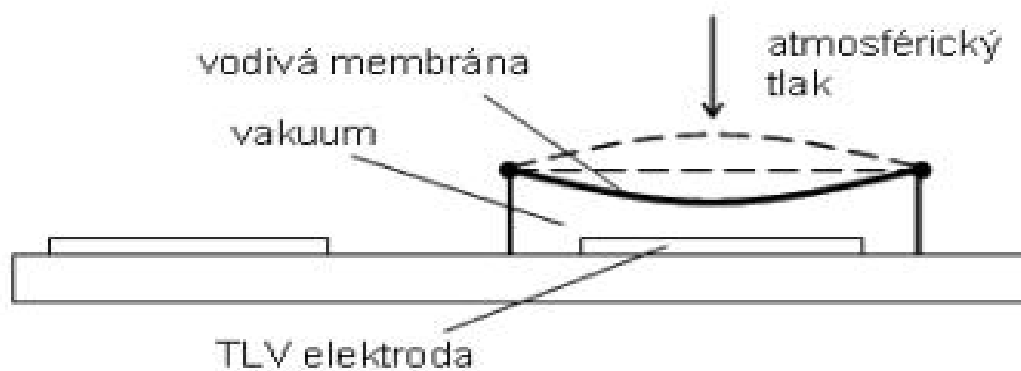
Obrázek č. 3.1.4.6 kapacitní snímač [26]

Membránový senzor tlaku, pracující na principu diferenčního kapacitního senzoru je znázorněn na obr. 3.1.4.6. Tento senzor se využívá při vyhodnocování tlakového rozdílu u měření průtoku tekutin škrticími orgány. Elektrické vyhodnocovací obvody, které převádí změny kapacity na výstupní elektrický signál, bývají doplněny obvody pro potlačení vlivů parazitních kapacit. Ty jsou způsobeny kapacitami kabelu, přívodů a stínícího krytu. Používají se pro měření statických, spíše však dynamických tlaků. Statické tlaky měří s chybou cca 1 %. Jejich měřicí membrána má zpravidla vysokou vlastní frekvenci.

Výměnou za jinou s rozdílnou tuhostí lze měnit frekvenční rozsah měření a jeho citlivost. Kapacitní snímače se napájejí střídavým proudem. Změna kapacity se měří buď, v můstkovém zapojení nebo s využitím frekvenční modulace.



Obr. 3.1.4.7 diferenční kapacitní senzor tlaku [26]



Obr. 3.1.4.8 příklad využití kapacitního principu k měření velmi malých tlaků [26]
100 Pa- 10⁻⁴ Pa

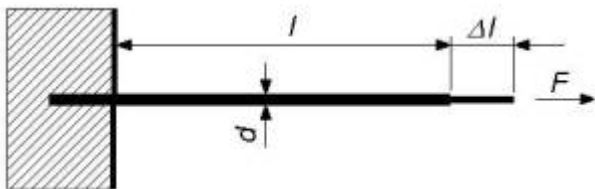
e) Odporové snímače

Snímače s odporovými tenzometry

Tlak plynu nebo kapaliny je snímán vlnovcem či membránou, která je spojena s pružným siloměrným členem. Příklad takového snímače tlaku je tlakoměr s polovodičovými tenzometry na obr. 3.1.4.9. Podstata funkce spočívá ve výrazné a přesné změně jeho odporu v závislosti na mechanické deformaci.

Běžné materiály se obvyklými zatíženími deformují tak málo, že to lidskými smysly nezjistíme. Teprve odporové tenzometry umožnily tyto deformace přesně elektricky měřit. Odporový tenzometr je odporový senzor, u něhož se využívá tzv. piezorezistivního jevu. Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám geometrických rozměrů a ke změnám krystalografické orientace, které vedou ke změně odporu. Pružnými deformacemi rozumíme takové síly, které působí v mezích platnosti Hookova zákona a jsou zpravidla vyvolány tlakem nebo tahem. Princip odporového tenzometrického snímače vysvětlíme na deformaci odporového drátku o délce l , průřezu S (průměru d) a měrném odporu ρ_R , na který působí síla F tak, že se drátek prodlouží o délku Δl , viz.

[Obrázek č. 3.1.4.9.](#)



Obrázek č. 3.1.4.9 [26]

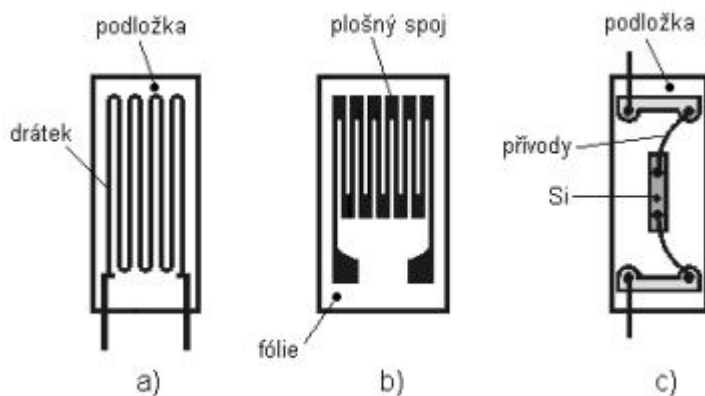
Původní odpor vodiče je $R = \frac{\rho_R l}{S}$. V důsledku působící síly se změní jeho délka o Δl , průřez o ΔS a vlivem změn ve struktuře i měrný odpor. Tím se změní odpor vodiče o ΔR . Pro malé změny bude platit: $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_R} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_R} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S}$$

Při tahovém namáhání se zvětšuje délka drátu a při zachování objemu se zmenšuje jeho průřez. Odpor vodiče roste. Uvažujeme-li relativní deformaci $\varepsilon = \Delta l / l$, potom pro

$$\text{relativní změnu odporu v oblasti pružných deformací platí vztah } \frac{\Delta R}{R} = k_c \cdot \frac{\Delta l}{l} = k_c \cdot \varepsilon$$

kde k_c – koeficient deformační citlivosti.



Obrázek č. 3.1.4.10 provedení odporových tenzometrů [26]

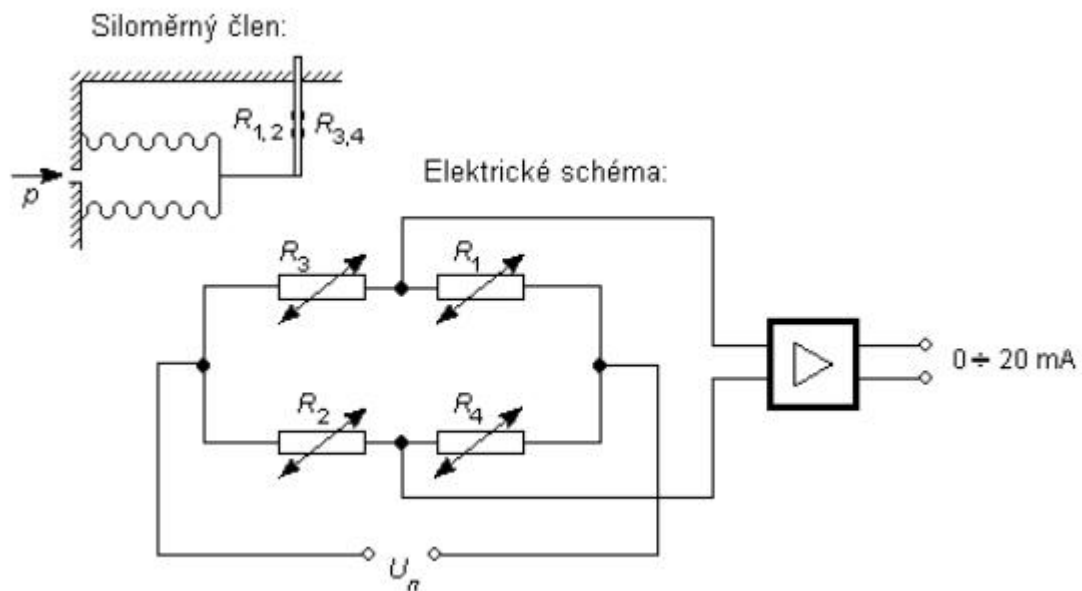
Hodnota koeficientu k , závisí na materiálu vodiče. Měl by být stálý, nezávislý na deformaci, teplotě a na technologické přípravě deformačního materiálu. Hodnota k v praxi se téměř vždy určuje experimentálně. Pro konstantan a některé druhy chromniklových slitin, jejichž teplotní závislost odporu je zanedbatelná, je hodnota $k_c = 2$. Odporové tenzometrické snímače se vyrábí ve tvarech podle [obrázku č. 3.1.4.10](#). Základním úkolem odporového tenzometru je, aby reagoval změnou odporu na mechanickou deformaci vyvolanou působící silou. Velmi často využívaným zařízením je siloměrný člen, tvořený vetknutým nosníkem, na němž jsou nalepeny tenzometry. Sílou působící na volný konec nosníku je nosník namáhán v oblasti pružných deformací. Vlivem pružné deformace jsou povrchová vlákna nosníku namáhána na straně působící síly F tahem a na straně odvrácené tlakem. Tenzometr A se tedy natahuje a tenzometr B se smršťuje. Zapojením tenzometrů do různých větví můstku dochází ke zvýšení citlivosti měření a současně ke kompenzaci teplotní závislosti odporu.

Kovové odporové tenzometry

Vyrábějí se z odporových drátků průměru 0,02 až 0,05 mm, které jsou nalepeny na tenký podklad z papíru nebo z plastické hmoty. Mají tvar mnohonásobné vlásenky. Konce drátku jsou připájeny na tlustší vývody. Celý tenzometrický snímač se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Tenzometrické snímače složitých tvarů (radiální, spirálové aj.) se dnes vyrábějí odleptáváním tenké odporové fólie (shodný postup jako výroba plošných spojů). Takto zhotovené fóliové tenzometrické snímače ([Obrázek. č.3.1.4.10 b](#)) mají lepší vlastnosti než snímače drátkové.

Polovodičové tenzometry

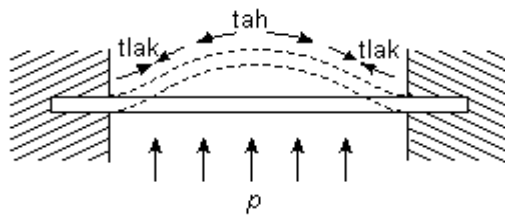
Vyrábějí se z křemíku, a to buď řezáním, broušením či leptáním monokrystalu nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Působením mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Změna odporu závisí na typu polovodiče i na koncentraci příměsí. Aktivní část, proužek z polovodiče se lepí vhodným lepidlem na plochu podléhající deformaci. Přívody jsou kovové. Polovodičové tenzometry vykazují nelineární závislosti odporu na deformaci i na teplotě. Pro vyhodnocení tenzometrických měření se používá nejčastěji zapojení tenzometrů do Wheatstoneova můstku ([Obr. č. 3.1.4.11.](#)). [26]



Obrázek č. 3.1.4.11 - funkční schéma snímače tlaku s polovodičovými tenzometry [26]

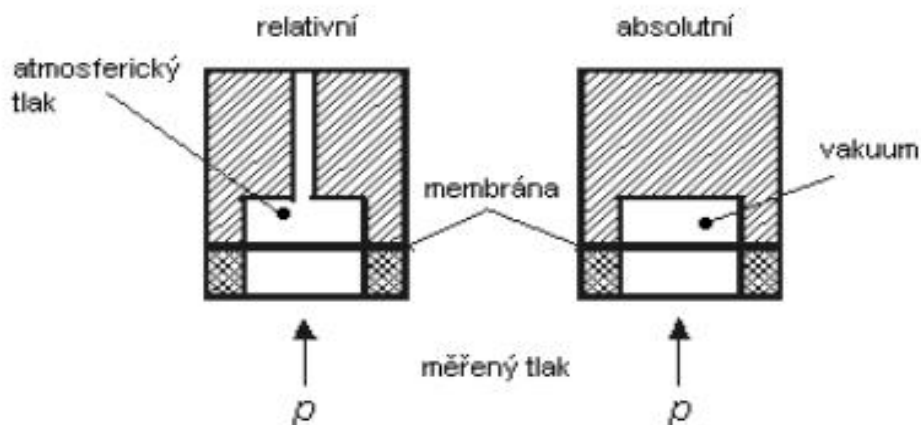
Na každé straně nosníku siloměrného členu jsou nalepeny dva polovodičové tenzometry zapojené do měřicího můstku. Při působení síly vyvolané účinkem tlaku jsou tenzometry R_1 a R_2 namáhány na tah, tenzometry R_3 a R_4 jsou namáhány na tlak. V měřicím můstku jsou tenzometry zapojeny tak, že tenzometry namáhané stejným směrem jsou umístěny v protilehlých větvích můstku. Výsledná citlivost je potom čtyřnásobná ve srovnání s použitím jednoho tenzometru. Signál můstku je upravován zesilovačem na unifikovaný proudový výstup 0 až 20 mA. Vedle snímačů tlaku s lepenými tenzometry se vyrábí i snímače s polovodičovými tenzometry, které se zhotovují difúzní technologií.

Základem snímače tlaku s polovodičovými tenzometry difundovanými je čidlo, které je bezprostředním převodníkem tlaku na elektrický signál. Podstatnou součástí je kruhová křemíková membrána vetknutá do válcového pouzdra. Membrána, na jejímž povrchu jsou vytvořeny polovodičové tenzometry, je současně pružným elementem pro snímání tlaku. Membrána je konstantní tloušťky, vetknutá do obvodu a namáhána tlakem rovnoměrně rozloženým po celé ploše. Na [Obr.č. 3.1.4.12.](#) je plnou čarou zakreslena membrána v nezatíženém stavu a čárkovaně ve stavu zatíženém tlakem p .



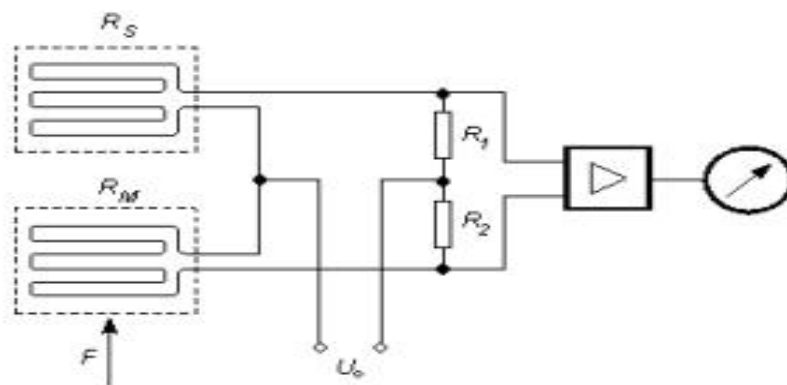
Obrázek č. 3.1.4.12 [26]

Snímače tlaku s křemíkovou membránou s nadifundovaným systémem odporů se používají k měření přetlaku, absolutního tlaku, podtlaku i tlakové difference v rozsazích 0 - 0,16 MPa až 0 - 3 MPa. Uspořádání je zřejmé z [Obr. č.3.1.4.13.](#)



Obrázek č. 3.1.4.13 snímače s polovodičovými tenzometry [26]

Při aplikaci polovodičových tenzometrů je nutno vždy teplotní závislost kompenzovat vhodným zapojením měřicího můstku nebo pomocným obvodem. Vhodným umístěním tenzometrů na zařízení jakož i vhodným uspořádáním tenzometrů do měřicího můstku je možno zvýšit citlivost měření a potlačit nelinearitu snímače a vliv ostatních ovlivňujících veličin. Příklad základního zapojení je na [Obr. č.3.1.4.14.](#)



Obrázek č.3.1.4.14 tenzometrický můstek s kompenzací [26]

V jedné větvi je tenzometrický snímač R_M , vystavený účinkům síly F . V druhé větvi je srovnávací tenzometr R_S , kterým eliminujeme vliv teploty. Tento tenzometr musí mít stejné vlastnosti jako snímač R_M , musí být nalepen v jeho blízkosti, aby měl shodnou teplotu, ale nesmí být mechanicky namáhán. Odporových tenzometrů se používá k měření malých i velkých deformací, mechanických napětí, sil, momentů sil, namáhání a ostatních veličin, které můžeme převést na výše uvedené veličiny. Aplikace křemíkových odporových tenzometrů ve snímačích umožňuje provádět taková měření mechanických veličin, která nelze s využitím jiných fyzikálních principů realizovat. Tenzometrů je možno využít např. pro měření tlaku nebo pro měření výšky hladiny a měření množství na základě tíhových účinků. Odporové tenzometry patří mezi snímače s vynikající přesností a velmi dobrými dynamickými vlastnostmi. Na údaj tenzometru působí však řada parazitních vlivů (např. teplota, velikost procházejícího proudu), které mohou ovlivnit přesnost měření. Při provozním měření tlaků se využívá velmi často deformačních tlakoměrů. Použitím různých siloměrných členů i deformačních elementů se dosahuje u snímačů tlaku s odporovými tenzometry měřicích rozsahů např.

0 - 10 kPa až 0 - 40 MPa.

f) Piezoelektrické snímače tlaku

Jsou založeny na tzv. Piezoelektrickém jevu. Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje. Tento děj je reciprokový; přiložením střídavého elektrického pole se krystal mechanicky rozkmitá. Tyto vlastnosti vykazuje např. křemen, titaničitan barnatý a olovnatý, některé makromolekulární látky a jiné.

V praxi se nejčastěji využívá vlastností SiO_2 a BaTiO_3 . Piezoelektrický element tvoří výbrus získaný z krystalu křemene ([Obr. č. 3.1.4.15](#)) vyřezáním destičky, jejíž hrany budou rovnoběžné s jednotlivými osami krystalu (X - osa elektrická, Y - osa mechanická, Z - osa optická). Piezoelektrický jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalu ([Obr. č.3.1.4.15](#)). Působí-li síla kolmo na optickou osu, krystal se zelektrizuje a na plochách kolmých na elektrickou osu se objeví elektrický náboj. Působí-li na křemennou destičku rovnoměrně rozložená síla F_x ve směru elektrické osy X ([Obr. č. 3.1.4.15c](#)), hovoříme o tzv. podélném piezoelektrickém jevu a velikost náboje Q , vznikajícího na každé stěně, kolmé k elektrické ose, bude

$$Q = K_p \cdot F_x \quad \text{vztah (3.1.4.3)}$$

Kde K_p je piezoelektrická konstanta (piezoelektrický modul) (C N^{-1}). Z [rovnice \(3.1.4.3\)](#) je vidět, že velikost nábojů vznikajících při působení síly podél elektrické osy X nezávisí na rozměrech krystalového výbrusu. Působí-li na krystal síla F_y ve směru mechanické osy Y, vznikají náboje opět na plochách kolmých na elektrickou osu, avšak směr polarizačního vektoru je záporný a velikost náboje závisí na geometrických rozměrech krystalu. Hovoříme o tzv. příčném piezoelektrickém jevu. Velikost náboje

$$Q \text{ je dána vztahem 3.1.4.4.} \quad Q = -K_p \cdot F_y \frac{b}{a} \quad \text{vztah (3.1.4.4)}$$

Kde b, a jsou rozměry destičky [obr. č. 3.1.4.15 b](#) Piezoelektrický modul křemene má poměrně malou hodnotu. Jeho předností je ale lineární statická charakteristika, minimální závislost piezoelektrické konstanty na teplotě, velký měřicí rozsah, který je dán mechanickou pevností krystalu a široké teplotní rozmezí (maximálně do 550°C).

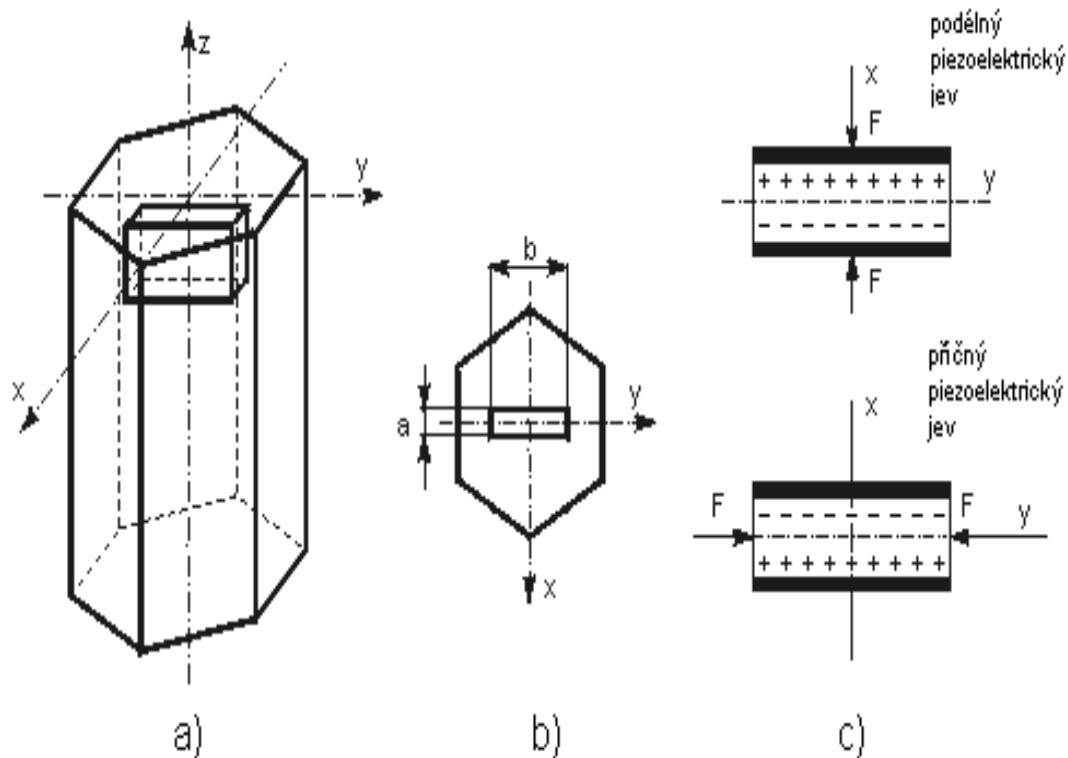
Piezoelektrický snímač je vytvořen z krystalového výbrusu, který je opatřen vodivými elektrodami. Při působení neelektrické veličiny se piezoelektrický snímač chová jako generátor náboje. Protože dielektrikum má značný izolační odpor, představuje zdroj napětí s velkým vnitřním odporem. Náboj, vznikající při působení měřené veličiny, se převádí na napětí a ze [vztahu \(3.1.4.3\)](#) dostaneme vztah

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{K_p F_x}{C} \quad \text{vztah (3.1.4.5)}$$

kde U - výstupní napětí snímače, C - kapacita čidla včetně přívodů

Výstupní napětí snímače je poměrně vysoké, přesto není možné k měření použít přímo ukazovacího měřicího přístroje.

Mezi měřicí přístroj a snímač je nutno zařadit zesilovač s velkým vstupním odporem, jehož hlavním úkolem je impedanční přizpůsobení, méně již vlastní zesílení signálu. Běžně se využívá obvodů realizovaných s tranzistory řízenými elektrickým polem.



Obrázek č. 3.1.4.15 Piezoelektrický snímač a) krystal křemene, b) výbrus snímače, c) piezoelektrický jev [26]

4. Vývoj přesnosti měření

4.1 Přesnost měření

Přesnost měření závisí na:

- [Přesnosti měřidel](#)
- [Použité měřicí technice](#)
- [Vhodné metodě měření](#)
- [Vhodných početních metodách pro spočítání chyby měření](#)
- [Přesnosti pozorování](#)
- Vlivu okolí

4.2 Přesnost měřidel

Mechanická měřidla jsou výrobky lidských rukou. Z tohoto důvodu mají svou konečnou přesnost omezenou dosaženými vůlemi při výrobě.

Přesnost měření se v historii odvíjela od používání méně nebo více přesných měřidel.

Už naši předkové aniž by znali metrologické postupy, věděli, že jimi naměřené hodnoty se o něco liší od hodnot skutečných. Tak například když naši předkové měřily délku provázky nebo řetízky, viděli, že se prověšují a proto přidávali malý „příměrek“.

Ten se nazýval „naděl Pánbůh“. Tímto „příměrkem“ pak zpřesnili měření, takže se více přiblížilo skutečné hodnotě. Na příkladu vývoje měření času je dobře vidět jak výroba stále přesnějších hodin umožnila přesnější měření času. Na obrázku 4.3.5 je názorně vidět jak s vývojem přesnějších hodin se zvyšovala i přesnost měření času.

Přesnost měřidel však souvisela i s tím jak přesně se zhodovala se stanoveným etalonem pro danou měřenou fyzikální veličinu tzn., že měřidlo které se zhodovalo, bylo [kalibrováno](#). Proto vždy v historii byl dáván důraz na kalibraci měřidel a za nedodržení hrozily přísné tresty, jako tomu bylo například i ve starém Egyptě.

Trest smrti hrozil tomu, kdo zapomněl nebo zanedbal svoji povinnost zkalibrovat své měřidlo délky při každém úplňku. Takové bylo riziko královských architektů odpovědných za budování chrámů a pyramid pro faraóny ve starém Egyptě tři tisíce let před naším letopočtem. První královský loket byl definován jako délka předloktí od lokte ke špičce nataženého prostředníčku vládnoucího faraóna, plus šířka jeho ruky. Prvotní měření bylo přeneseno na černou žulu a do ní vytesáno. Pracovníkům na staveništích byly předány žulové nebo dřevěné kopie a architekti byli odpovědni za jejich udržování.

4.2 Kalibrace

Základním prostředkem při zajištění návaznosti měření je kalibrace měřidel. Tato kalibrace zahrnuje určení metrologických charakteristik přístroje. To se provádí přímým srovnáním s etalony. Vystavuje se kalibrační certifikát a připevňuje se štítek na kalibrované měřidlo. Na základě těchto informací může uživatel určit, zda je přístroj vhodný pro požadované měření.

Existují tři důvody, proč je třeba přístroje kalibrovat:

- zajistit, aby údaje uváděné přístrojem byly konzistentní s jiným měřením
- stanovit správnost údajů uváděných přístrojem
- zajistit spolehlivost přístroje, tj. zda je možno se na něj spolehnout

Kalibrací přístroje lze dosáhnout následujících skutečností:

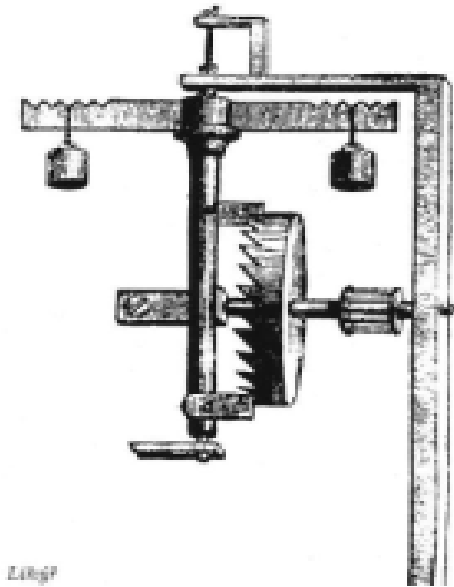
- výsledek kalibrace umožní buď přiřazení hodnot měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo stanovení korekcí vůči indikovaným hodnotám.
- Kalibrace může rovněž určit další metrologické vlastnosti, jako je účinek ovlivňujících veličin
- Výsledek kalibrace lze zaznamenat v dokumentu, který se někdy nazývá kalibrační certifikát nebo „kalibrační list“.

Přesnost měřidel je stanovena dnes třídou přesnosti měřicího přístroje. Třídou přesnosti δ se rozumí podíl maximální odchylky Δ_{\max} přístroje k maximálnímu rozsahu stupnice X_{\max}

4.3 Měřicí technika

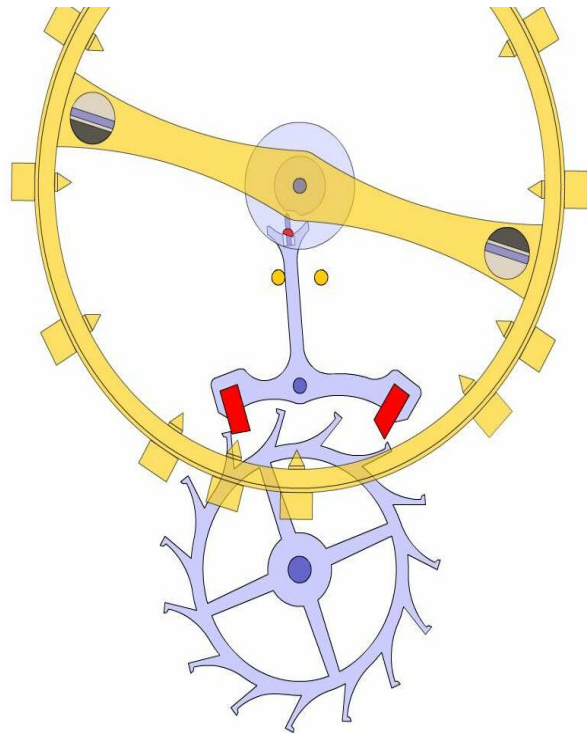
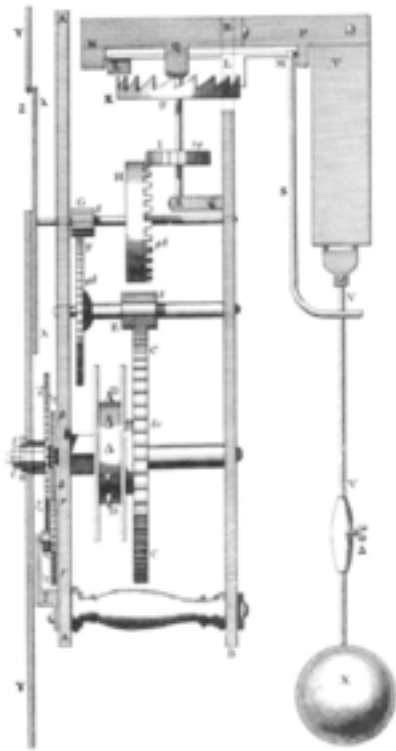
Na příkladu vývoje měření času je dobře vidět jak výroba stále přesnějších hodin umožnila přesnější měření času. Na [obrázku 4.3.5](#) je názorně vidět jak s vývojem přesnějších hodin se zvyšovala i přesnost měření času. Zásadním problémem mechanických kolečkových hodin bylo zajištění rovnoměrného chodu. Toto zařízení se nazývá krok a na jeho dokonalosti závisí nejdůležitější vlastnost hodin a to je přesnost. U prvních mechanických hodin zajišťoval rovnoměrný chod lihýř viz [obr. č 4.3.1](#). Takové hodiny fungovaly tak, že na ose s příčnou tyčí s dvěma závažími byly nad sebou na protilehlých stranách zasazeny dvě lopatky. Jejich vzdálenost odpovídala šířce ozubeného kolečka, do něhož zapadaly. Když horní lopatka uvázla mezi dvěma zuby kolečka, strkal jí zub, kterému překážela, do strany a zároveň pootočil osu o půl obrátky, takže se níže pootočená lopatka ocitla proti níže položeným zubům kolečka a zapadla mezi ně. Byla rovněž odstrčena a takhle to šlo pořád do kola.

A právě příčné tyči se říkalo [lihýř](#). Lihýřové hodiny se musely natahovat jednou za 5 až 6 hodin a za tu dobu se dokázaly rozejít se skutečným časem až o dvě hodiny. Není tedy divu, že tyto středověké hodiny byly doplňovány stále slunečními hodinami pro srovnání času.



Obrázek č.4.3.1 lihýř [55]

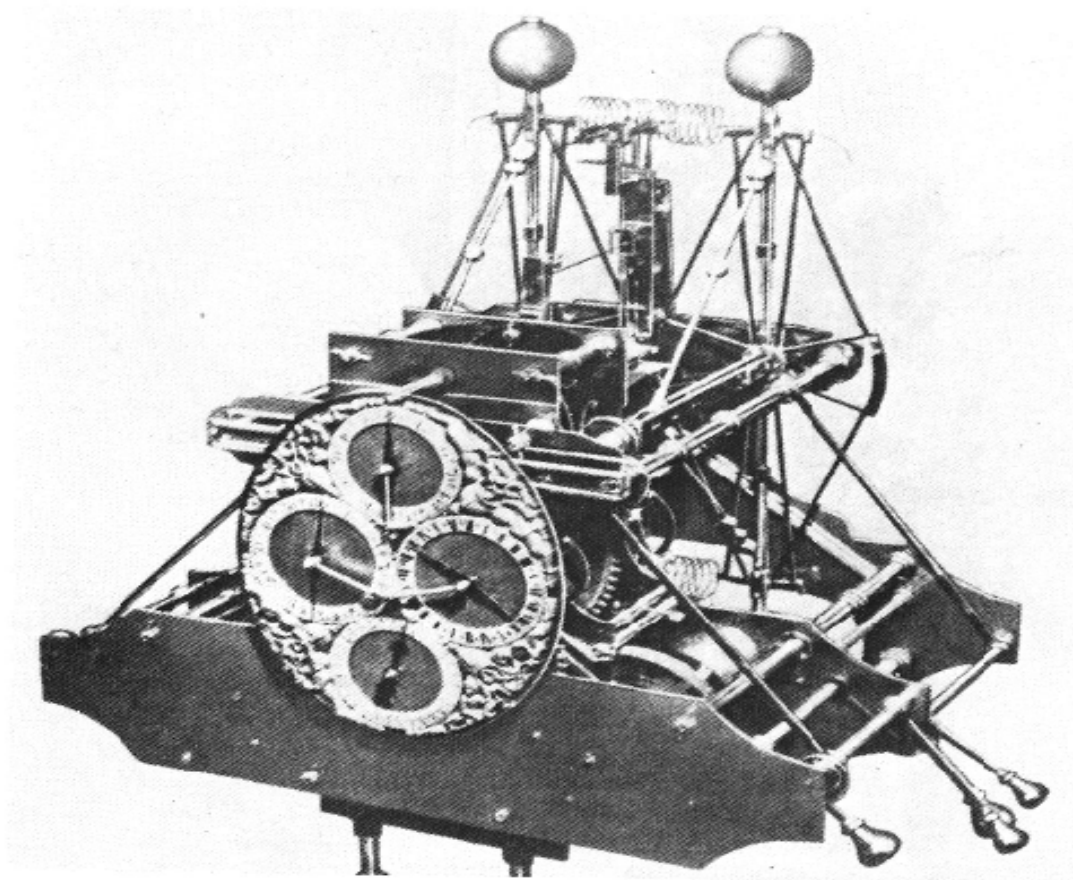
Regulace hodin pomocí lihýře byla později zdokonalena a podstatná změna nastala také v síle, která uvádí hodinový stroj do pohybu. Tíha závaží byla nahrazena silou svinuté pružiny- hodinového pera. To umožnilo stavbu menších hodin. V 1656, Christian Huygens, holandský vědec, vyrobil první kyvadlové hodiny, regulované mechanismem s “přirozenou” dobou kmitu. (Galileu Galileimu je přisuzováno, že vynalezl kyvadlové pojetí hodin, studoval pohyb kyvadla už v roce 1582. Dokonce nastínil plán kyvadlových hodin, ale vlastně nikdy takové hodiny nepostavil). Huygensovy kyvadlové hodiny ([obr. č. 4.3.2](#)) neměly chybu víc jak 1 minutu za den, bylo to poprvé, kdy bylo takové přesnosti dosaženo. Jeho pozdější vylepšení redukovala chybu jeho hodin na chybu 10 sekund za den. Kolem 1675, Huygens vyvinul setrvačnick se svinutou pružinou ([obr. č. 4.3.3](#)), ještě dnes se v některých dnešních náramkových hodinkách tento setrvačnick vyskytuje. Toto zlepšení poskytlo přenosným hodinám chybu do 10 minut za den. [4]



Obrázek č. 4.3.2 Huygensovy kyvadlové hodiny [55] Obrázek č. 4.3.3 [55]

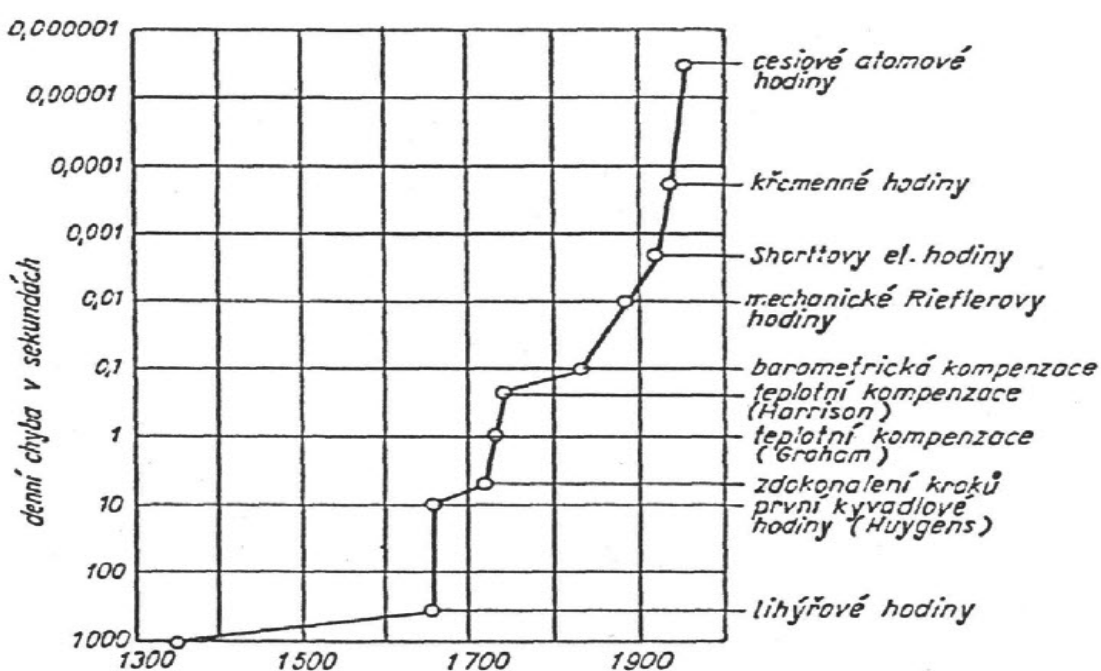
V 1721, George Graham zlepšil přesnost kyvadlových hodin tak, že chyba byla 1 sekunda za den tím, že kompenzoval změny délky kyvadla způsobené kolísáním teploty. V roce 1715 John Harrison, který zkonstruoval přesný námořní chronometr. První jeho hodiny (H1) vážily 250 kg a pro navigaci na moři se příliš nehodily. Jeho čtvrtý model (H4, rok 1759) již představoval použitelné hodiny (jejich průměr byl 12 cm). Jsou označovány za nejslavnější hodiny na světě (alespoň pro námořní navigaci). Bylo to celoživotní dílo, které dokončil až jeho syn William. Hodiny byly testovány až do roku 1784, kdy bylo uznáno, že splňují podmínky pro udělení ceny 20 000 liber britské admirality, za vyřešení problému určení zeměpisné délky. Za 5 měsíců se zpozdily o pouhých 15 sekund. Bylo tak možno plně rozvinout námořní navigaci, kde se k určování polohy využívalo Slunce, Měsíce, planet a 57 navigačních hvězd.

V následujícím století, vyvinul v 1889 k Siegmund Riefler [obr. č 4.3.4](#) hodiny s téměř volným kyvadlem, které dosáhly přesnosti setiny sekundy za den a staly se standardem v mnoha astronomických observatořích. W.H. Shortt sestrojil v r. 1921 hodiny které téměř okamžitě nahradily Rieflerovv hodiny jako nejpřesnější přístroj na měření času v mnoha observatořích. Tyto hodiny měla dvě kyvadla, jedno podřízené a jedno nadřízené. Kyvadlo podřízené dávalo řízenému kyvadlu jemné impulsy, které potřebovalo pro udržování svého pohybu, a také řídilo ručičky hodin. Toto řešení dovolilo nadřízenému kyvadlu zůstat osvobozené od mechanických úloh, které by rušily jeho pravidelnost.



Obrázek č. 4.3.4 chronometru Sigmunda Riflera se dvěma kyvadly [55]

V 20. století W.H. Shortt vynalezl stejné kyvadlové hodiny s přesností jedné setiny sekundy za den. V tomto systému časové kyvadlo nedělá žádnou práci a jeho pohyb je sledován elektrickými zařízeními, která řídí kyvadlo podřízené, které svými impulsy řídí nadřízené kyvadlo. Tato forma hodin se stala standardem pro použití v observatořích.

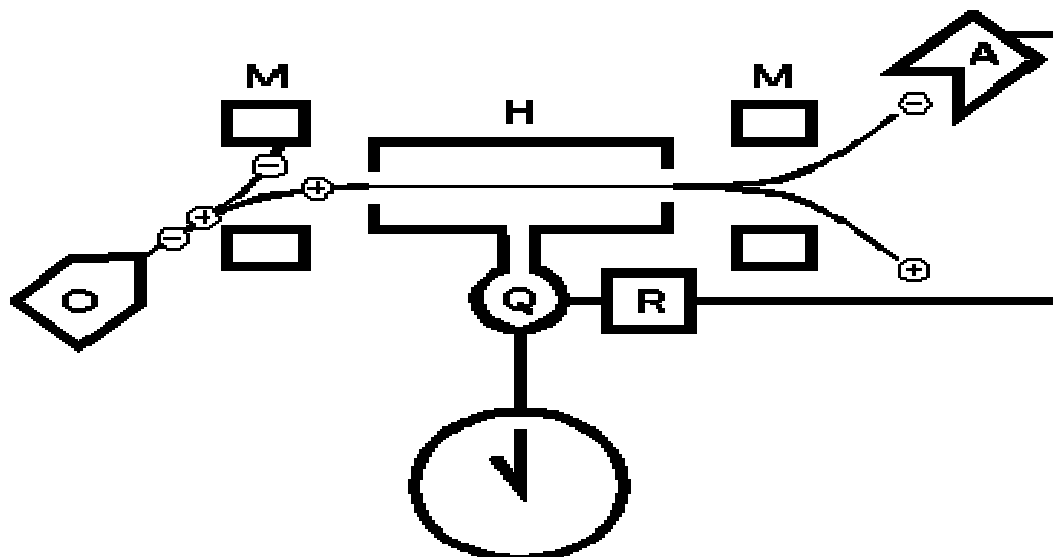


Obr. č. 4.3.5 znázorňující vývoj přesnosti měření času [55]

Křemenné hodiny pracují na principu že, krystal křemene pokud je umístěn do elektrického pole o určitých vlastnostech je samovolně deformován tímto polem. Při vypnutí tohoto pole získanou energii krystal vrací v podobě elektrického impulsu o určitých vlastnostech. Na tomto principu je sestaven elektronický oscilátor, který generuje přesné časové intervaly. Takový krystal je ovšem používán nejen v hodinkách ale i v různých jiných zařízeních kde je potřeba generovat pravidelné časové impulsy nebo požadovanou frekvenci (rádia, mikrovlné trouby, televize). Proč právě křemen? Je to proto, že je velmi snadno k dostání a má ideální vlastnosti. Rychlost kmitů takového oscilátoru založeném na křemenného krystalu, závisí na jeho velikosti a zůstává po velmi dlouhou dobu neobyčejně přesný a to je právě důvod proč je používán v elektronických zařízeních na měření času. Oscilátory založené na křemenném krystalu jsou díky svojí jednoduchosti velmi spolehlivé a dokáží generovat kmitočty od desítek kHz do desítek MHz. Hodinové strojky, ať už elektro-mechanické nebo digitální jsou velmi přesné a spotřebovávají jen velmi malé množství energie. Díky tomu vydrží baterie v takových hodinkách i několik let. První hodinky s křemenným krystalem byly vyrobeny panem Warrenem Morrisonem kolem roku 1950 v Bellových laboratořích v Kanadě. Firma Seiko v roce 1969 nabídla veřejnosti první náramkové hodinky systému quartz nazvané Astron.

Atomové hodiny pracují podle následujícího principu (obr. č. 4.3.6). Ve vytápěné peci se atomy ^{133}Cs dostávají do dvou různých energetických stavů E_1 a E_2 , z nichž jeden označíme symbolem (+) a druhý stav symbolem (-). Přejít atomu ze stavu (+) do stavu (-) může být vynucen, přičemž je tento přechod spojen s vysíláním elektromagnetického záření charakteristické frekvence. Podle zákonů atomové fyziky je f_{Cs} rovna rozdílu energií stavů (+) a (-) dělené Planckovou konstantou h . V případě atomu cézia má tato frekvence f_{Cs} hodnotu 9 192 631 770 Hz. U atomu cézia je f_{Cs} daleko lépe časově konstantní (10^{-14}) než např. doba kmitu kyvadla (10^{-5}), doba periody oběhu Země (10^8), nebo frekvence kmitu krystalu křemene (10^{11}). Čas se tak stal veličinou, kterou umíme změřit s největší dosažitelnou přesností. V blízké budoucnosti se podaří tuto přesnost alespoň o dva řády zvětšit. Ve vakuové komoře atomových hodin se vypařují atomy cézia. Magnet, který se nachází za pecí, vychyluje atomy tak, že se do komory dutinového rezonátoru dostanou jen atomy se stavem (+). Tady jsou atomy nuceny prostřednictvím ozáření magnetickým mikrovlnným polem přejít do stavu (-). Druhým magnetem jsou pak atomy, které zažily změnu stavu z (+) do (-), vedeny na detektor (wolframový drát). Počet atomů na detektoru je největší, pokud je frekvence magnetického mikrovlnného oscilátoru Q držena na frekvenci f_{Cs} . Zpětnovazební smyčka tak udržuje mikrovlnný oscilátor Q na frekvenci f_{Cs} . Napočítáním 9 192 631 770 period je získán ze signálu oscilátoru časový interval o jedné sekundě. [56]

Schéma atomových hodin:



Obrázek č.4.3.6 schéma atomových hodin [56]

O-pec vyzařující atomy; Q-mikrovlnný oscilátor; M- třídící magnety; A- detektor;
H- dutinový rezonátor; R-regulátor

4.4 Měřící metody

Mezi základní metody měření lze zařadit dvě: dotyková a bezdotyková. Při dotykovém měření je měřený předmět v kontaktu s měřidlem. Pro bezkontaktní měření je realizovatelné za využití různých fyzikálních principů.

Měření je možné provádět těmito metodami:

- přímým měřením tj. odečítáním
- nepřímým měřením tj. podle naměřených hodnot se vypočte výsledná měřená hodnota
- komparativní měření tj. výsledky měření se srovnávají s hodnotami etalonu

4.5 Početní metody pro spočítání chyby měření

Absolutně přesný výrobek nelze vyrobit. Vždy se bude více či méně lišit vlivem nedokonalosti operátora a nepřesnosti výrobního zařízení.

Měřící zařízení, kterým je hodnota zjišťována, má svoji konečnou platnost a jako každý jiný výrobek je zatíženo nepřesnostmi a opět chybami operátora. Zjištění rozměru, blížícího se skutečnosti, je nutno podrobit analýze. Tedy odstranit ze získané hodnoty chyby, kterými je hodnota zatížena.

Chyby měření lze rozdělit na:

a. Hrubé chyby

Jsou způsobeny nesprávně provedeným měřením a jsou okamžitě patrné. S nimi naměřené hodnoty se od ostatních výrazně se liší.

b. Náhodné chyby

Jsou způsobeny nepravidelnými náhodnými vlivy. Přes svoji nahodilost může být chyba odhadnuta. Náhodné chyby jsou rozloženy podle Gaussova zákona normálního rozložení.

c. Systematické chyby

Jsou způsobeny stále působícími vlivy, které působí trvale. Systematické chyby je možné řešit pomocí vhodného matematického aparátu.

Matematicky vyjádřeno je skutečná hodnota měřené veličiny dána:

$$X_S = X - \delta_H - \delta_N - \delta_S$$

X_S skutečný rozměr veličiny

X naměřený rozměr

δ_H hrubá chyba měření

δ_N náhodná chyba

δ_S systematická chyba

Systematická a náhodná chyba mohou mít znaménka + nebo –

Přesnost pozorování

Pozorování měření je dnes řešeno pomocí výpočetní techniky, která dokáže přesně zaznamenávat velké množství dat a následně zajišťuje i následné vypočítání požadovaných hodnot. Tím je zajištěna velká přesnost pozorování v neměnné kvalitě.

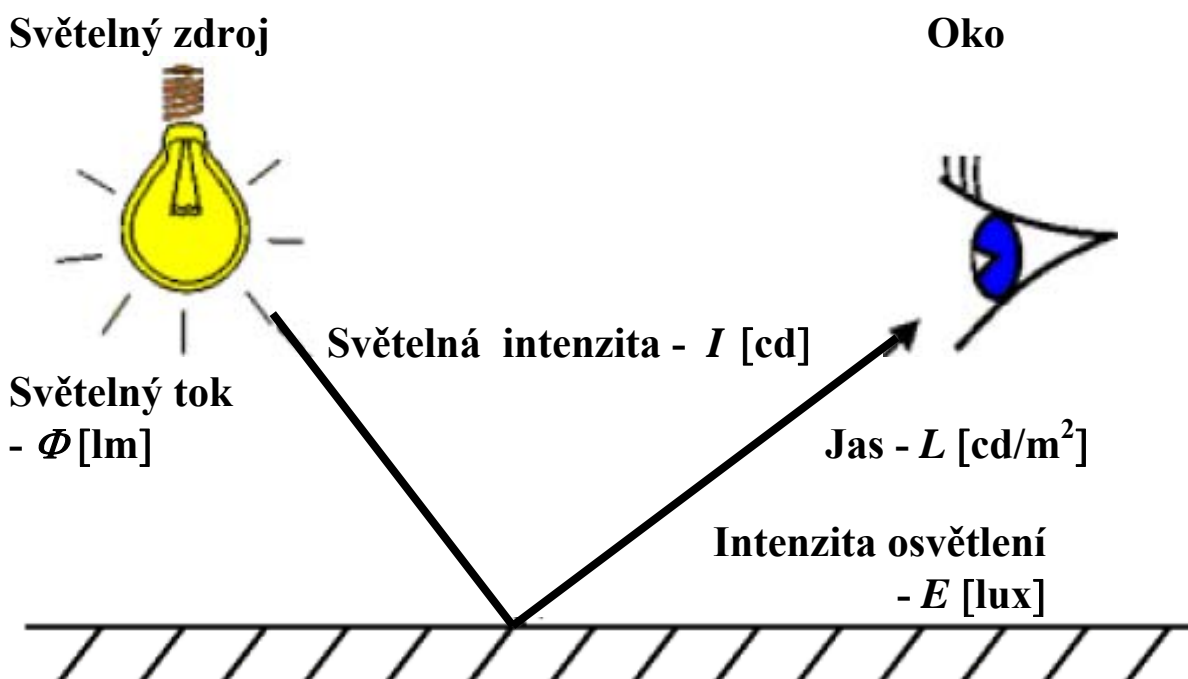
Vliv okolí

Vliv okolí při měření je dnes eliminován použitím klimatizace, která zajišťuje stálou teplotu a vlhkost vzduchu. Použití dostatečného osvětlení zajišťuje zaručenou viditelnost. Tím je dosaženo stejných podmínek pro opakovaná měření. [9]

5. Různé metody měření u intenzity osvětlení, svítivosti a světelného toku.

5.1 Základní světelně technické veličiny a pojmy

Vzhledem k tomu, že zrakový orgán člověka nemá schopnost vnímat souhrnné působení světla za určitou dobu, není pro vlastní vidění důležité celkové množství světelné energie vyzářené zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. Ve světelné technice se při hodnocení kvality osvětlení jako prostředku podmiňujícímu úroveň informace přijímané zrakem sledují důsledky působení záření na zrakový orgán a zrakový vjem. Proto se ve světelné technice neposuzují energetické veličiny (např. zářivý tok, zářivost apod.), ale pracuje se s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují proměnlivou citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Pro zajištění jednotnosti světelně technických výpočtů se počítá s hodnotami spektrální citlivosti oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele.



Obr. 5.1 Základní fotometrické jednotky a jejich spojitost [92]

5.2 Světelný tok

Světelně technická veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem, se nazývá světelný tok. Jednotkou světelného toku je 1 lumen (lm). Světelný tok Φ mono frekvenčního záření, tedy záření jediné vlnové délky λ , které přenáší určitý zářivý výkon (tj. zářivý tok) Φ_e (W), se určí ze vztahu 5.2.1

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W})$$

(vztah 5.2.1)

Kde c je světelná účinnost mono frekvenčního záření rovná poměru světelného toku Φ a odpovídajícího zářivého toku Φ_e

$$K(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_e(\lambda)} \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm}, \text{W})$$

(vztah 5.2.2)

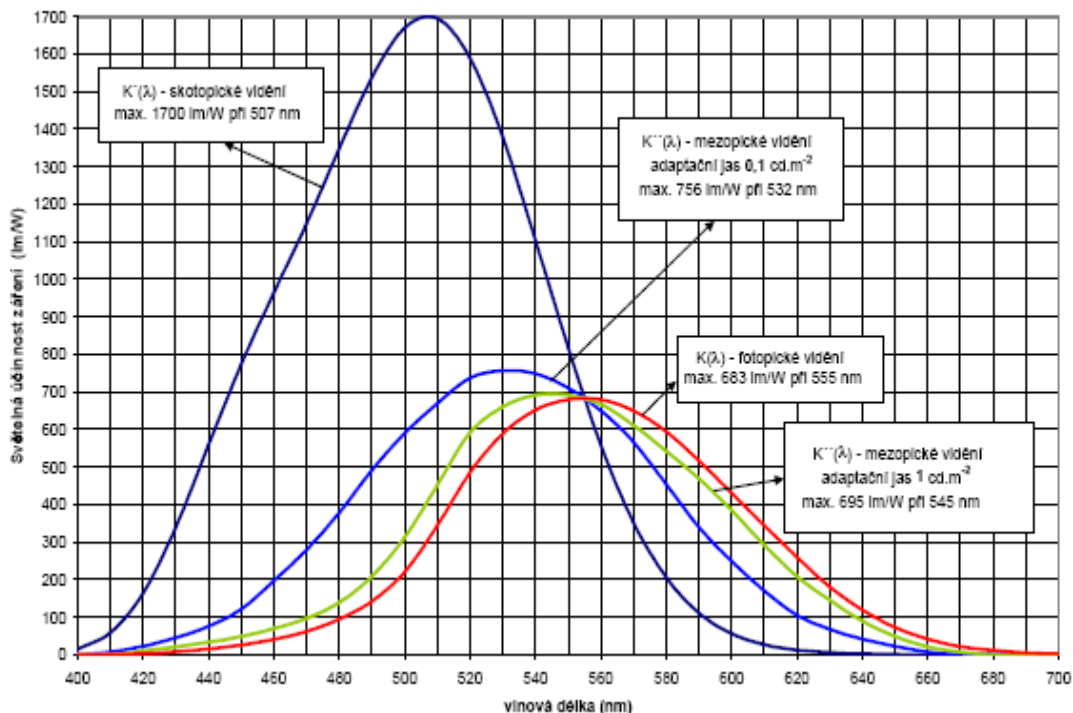
Z hlediska určitého pozorovatele je světelná účinnost záření rovna absolutní hodnotě citlivosti zraku pozorovatele k záření určité vlnové délky (tj. jeho spektrální citlivosti). Při fotopickém (denním) vidění dosahuje veličina $K(\lambda)$ své maximální hodnoty K_m pro záření tzv. základní vlnové délky $\lambda = \text{lm} = 555 \text{ nm}$. U normálního fotometrického pozorovatele bylo usnesením 16. generální konference „Míry a váhy“ v r. 1979 schváleno pracovat s hodnotou $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

$V(\lambda)$ je poměrná hodnota světelné účinnosti mono frekvenčního záření, pro kterou platí vztah

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$$

(vztah 5.2.3)

Pozorovatele (obvykle se uvažuje normální fotometrický pozorovatel) je veličina $V(\lambda)$ totožná s poměrnou spektrální citlivostí zraku pozorovatele při fotopickém vidění. Stejně jako se pro fotopické vidění definovaly veličiny $K(\lambda)$, K_m a $V(\lambda)$ definují se pro skotopické vidění veličiny $K'(\lambda)$, $K'_m = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ při $\lambda = 507 \text{ nm}$ a $V'(\lambda)$. Světelný tok při skotopickém vidění se pak pro monochromatické záření určuje ze vztahu (5.2.3). V níž se ovšem veličiny $K(\lambda)$, K_m a $V(\lambda)$ nahradí veličinami $K'(\lambda)$, K'_m a $V(\lambda)$.



Obr. 5.2.1 Průběhy absolutních hodnot světelných účinností záření zraku normálního fotometrického pozorovatele pro vidění fotopické, mezopické a skotopické. [63]

Z uvedeného, vyplývá, že světelný tok je vlastně zářivý tok zhodnocený zrakovým orgánem normálního fotometrického pozorovatele, a to obvykle při fotopickém vidění.

5.3 Prostorový úhel

Důležitou geometrickou veličinou používanou ve světelně technických výpočtech je prostorový úhel. Jeho velikost je určena velikostí plochy, vyřáté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou (1 m^2) na povrchu jednotkové koule ($r = 1 \text{ m}$).

Prostorový úhel Ω , pod nímž je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A_k vyřátá na povrchu této koule, se stanoví ze vztahu

$$\Omega = \frac{A_k}{r^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (\text{vztah 5.3.1})$$

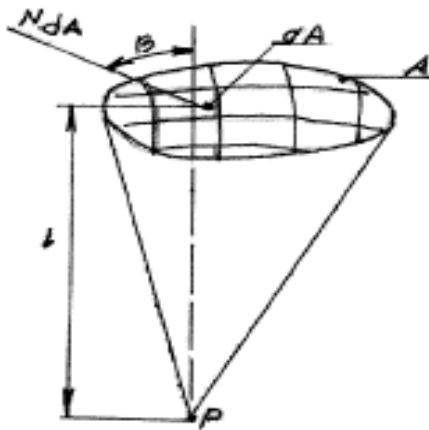
Největší hodnoty $\Omega_{\max} = 4\pi$ nabývá prostorový úhel pro plochu A_k rovnou povrchu celé koule, kdy je velikost plochy A_k rovna $A_k = 4\pi r^2$

Prostorový úhel $d\Omega$ elementu dA obecné plochy A pozorované ze vzdálenosti l z bodu P

$$\text{se vypočte z výrazu } d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad \text{vztah (5.3.2)}$$

Kde β je úhel, který svírá osa prostorového úhlu $d\Omega$, tj. paprsek l , s normálou N_{dA} plošky dA . Celá plocha A na obr. je z bodu P vidět pod prostorovým úhlem Ω , který je roven součtu všech dílčích prostorových úhlů, v jejichž mezích lze z bodu P pozorovat všechny dílčí plošky dA , na které byla plocha A rozdělena. To znamená, že prostorový úhel Ω se stanoví integrací vztahu 5.3.2 po ploše A .

$$\Omega = \iint_A \frac{\cos \beta}{l^2} dA \quad (\text{sr; m}^2, \text{m}) \text{ vztah 5.3.3}$$



Obr. 5.3.1 prostorový úhel [63]

5.4 Svítivost

Při nerovnoměrném rozložení světelného toku zdroje či svítidla do různých směrů prostoru je třeba kromě hodnoty úhrnného světelného toku znát ještě prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech, tj. svítivost zdroje v těchto směrech.

Svítivost je možno stanovit pouze pro bodový zdroj, tj. pro zdroj (svítidlo), jehož svítící plocha má rozměry prakticky zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu. Svítivost $I_{\gamma\zeta}$ bodového zdroje (svítidla bodového typu) ve směru určeném úhly γ, ζ je rovna světelnému toku obsaženému v jednotkovém prostorovém úhlu a je tedy definována vztahem 5.4.1.

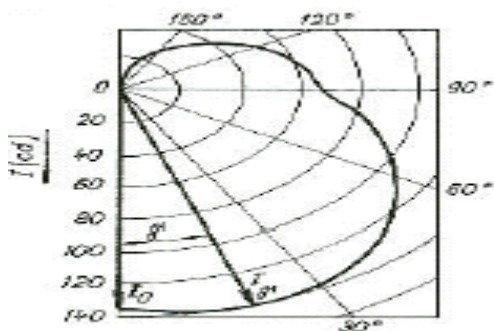
$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (\text{cd; lm, sr}) \quad \text{vztah (5.4.1)}$$

kde $d\Omega_{\gamma\zeta}$ je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ, ζ a v jehož mezích uvažovaný zdroj vyzařuje tok $d\Phi$.

Střední hodnota svítivosti bodového zdroje se stanoví jako poměr celkového světelného toku zdroje a prostorového úhlu, do kterého zdroj vyzařuje. Jednotkou svítivosti je 1 kandela (cd), která patří k základním jednotkám soustavy SI. Podle usnesení 16. generální konference „Míry a váhy“ z roku 1979 je jedna kandela rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, při čemž zářivost zdroje v tomto směru je $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$. Zjistí-li se hodnoty svítivosti zdroje světla ve všech směrech prostoru a nanesou-li se prostorově od bodu zdroje jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů fotometrická plocha svítivosti. Při výpočtech obvykle postačuje znát jen některé řezy touto plochou, a to rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V rovinách řezů se takto dostanou čáry (křivky) svítivosti v polárních souřadnicích. Počátek diagramu svítivosti se umísťuje do tzv. světelného středu zdroje či svítidla, tj. do bodu, v němž si lze představit soustředěn uvažovaný zdroj. Základní či vztahový směr diagramu svítivosti, od něhož se měří úhly, se umísťuje obvykle do směru normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Jednotlivé křivky svítivosti se získávají měřeními na goniofotometrech a výrobci svítidel, popříp. zdrojů je uvádějí v dokumentaci (ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel). Křivky svítivosti lze matematicky obecně popsat vztahem

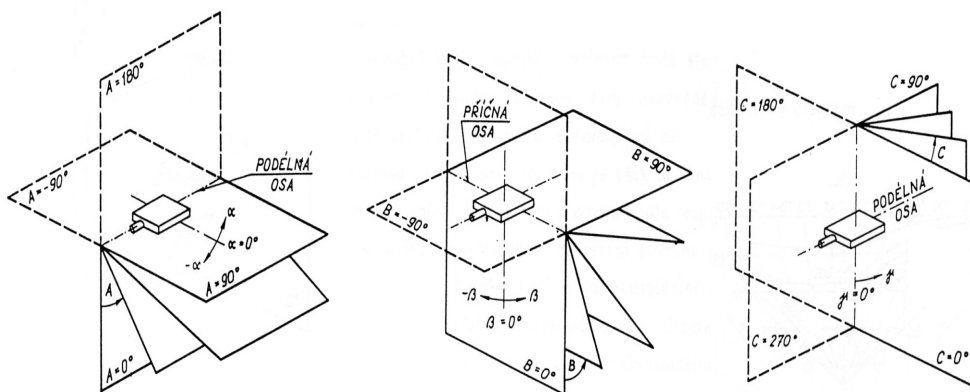
$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_1(\gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -) \quad \text{vztah (5.4.2)}$$

kde I_{γ} je svítivost přečtená z uvažovaného diagramu svítivosti pod úhlem γ od vztahového směru. I_0 je svítivost uvažovaného zdroje ve vztahovém směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla, $f_1(\gamma)$ je charakteristická funkce svítivosti, matematicky popisující uvažovanou křivku svítivosti, [obr. 5.4.1](#) Nejčastěji se k aproximaci využívá matematických funkcí. Příklad čáry svítivosti $\cos^n \gamma$ (kde $n = 0, 1, 2, 3$ a 5); $\sin \gamma \cdot \cos^m \gamma$ (kde $m = 1, 2, 3, 4$), a zejména pak různých lineárních kombinací uvedených funkcí. Čáry svítivosti se obvykle udávají v určitých rovinách vybraných z některého ze tří typů svazků různoběžných rovin, jejichž průsečnice (osa svazku) prochází světelným středem svítidla, resp. zdroje. Nejčastěji se užívá svazku rovin $C - \gamma$ ([obr.5.4.2](#)), jehož osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla či zdroje. [63]



Obr 5.4.1 Příklad čáry svítivosti v polárním diagramu [63]

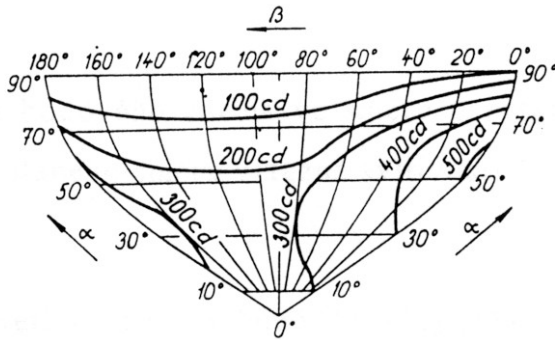
Aby křivky svítivosti svítidel udávané v katalogích byly nezávislé na skutečném světelném toku použitých zdrojů světla, přepočítávají se hodnoty svítivosti v diagramech na světelný tok zdroje 1000 lm. Skutečná svítivost I_γ svítidla se zdrojem, jehož tok je Φ , se pak určí vynásobením svítivosti $I'\gamma$ přečtené z diagramu svítivosti pro 1000 lm poměrem $\Phi/1000$.



obrázek 5.4.2 soustava fotometrických rovin [63]

Prostorové rozložení svítivosti je možné též znázornit popsáním bodů na povrchu jednotkové koule se středem ve světelném středu uvažovaného zdroje hodnotami svítivosti odpovídajícími směru spojnice světelného středu s tím kterým bodem na povrchu koule. Poloha jednotlivých bodů na povrchu koule a tím i uvažovaný směr v prostoru se určuje v síti rovnoběžek a poledníků. Spojením bodů stejných hodnot svítivosti na povrchu koule vzniknou čáry nazývané izokandely, Nakreslením sítě izokandel se získá izokandelový diagram. Praktická realizace prostorové souřadnicové soustavy je však obtížná. Výhodnější je užít některého ze způsobů zobrazení povrchu koule resp. polokoule v rovině. Často se užívá sinusoidálního zobrazení povrchu polokoule do rovinného diagramu. [63]

Na obrázku 5.4.3 je do sinusoidální sítě poloviny poloprostoru zakreslen příklad izokandelového diagramu. Plochy uzavřené jednotlivými izo-kandelami jsou v sinusoidálním diagramu rovné prostorovým úhlům, do nichž zdroj či svítidlo vyzařuje se svítivostí odpovídající té které izokandele. Proto je možné zmíněných diagramů využít ke stanovení světelného toku svítidla nebo zdroje.



Obrázek 5.4.3 - izokandelový diagram [63]

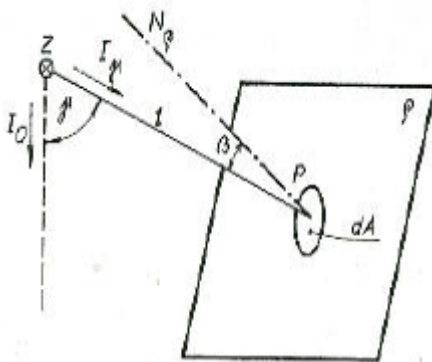
5.5 Intenzita osvětlení

Intenzita osvětlení E rovinné plošky dA , tj. plošná hustota světelného toku $d\Phi$ dopadajícího na plošku dA je určena vztahem

$$E = \frac{d\Phi_{\text{dopad}}}{dA} \quad (\text{lx; lm, m}^2) \quad \text{vztah (5.5.1)}$$

plošky dA se často nazývá i intenzita osvětlení v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině tvoří ploška dA . Jednotkou intenzity osvětlení je 1 lux (lx);

1 lx = 1 lm.m⁻². V literatuře je možno se ještě setkat s metrickou jednotkou phot (ph); 1 ph = 104 lx a dále s nemetrickou jednotkou footcandle (fc); 1 fc = 1 lm . ft⁻² = 10,764 lx



obrázek 5.5.1 [63]

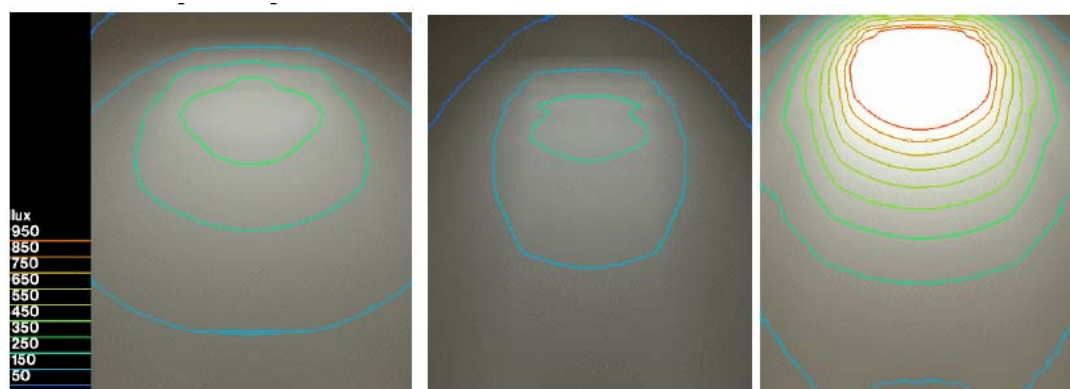
Osvětluje-li se bodovým zdrojem Z ze vzdálenosti l ploška dA tvořící okolí bodu P v rovině ρ a svírá-li normála $N\rho$ roviny ρ úhel β s paprskem l , lze s využitím rovnic odvodit pro intenzitu osvětlení E_p v bodě P roviny ρ bodovým zdrojem výraz

$$E_{pp} = \frac{I\gamma}{l^2} \cdot \cos \beta \quad (\text{lx; cd, m, -}) \quad \text{vztah (5.5.2)}$$

kde $I\gamma$ je svítivost bodového zdroje ve směru paprsku l , tj. ve směru pod úhlem od zvoleného směru vztahné I_0 . Ze vztahu 5.5.2 vyplývá, že intenzita osvětlení bodovým zdrojem je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje (zákon čtverce vzdálenosti) a přímo úměrná kosinu úhlu β dopadu světelných paprsků (Lambertův kosinusový zákon). Největší je tedy intenzita osvětlení plošky dA ve směru normály $N\rho$ (kdy $dA \perp l$ a úhel $\beta = 0$), tj. tzv. normálová intenzita osvětlení E_N , pro kterou platí

$$E_{pp(\beta=0)} = E_N = \frac{I\gamma}{l^2} \quad (\text{lx; lx; cd, m}) \quad \text{vztah (5.5.3)}$$

Z uvedeného vyplývá, že intenzita osvětlení je tedy nejen funkcí bodu, ale i orientovaného směru. K získání lepšího přehledu o rozložení hladiny intenzity osvětlení v bodech pracovní či srovnávací roviny je možno sít kontrolních bodů v uvažované rovině popsat zjištěnými hodnotami intenzity osvětlení, popřípadě ještě pospojovat body stejných intenzity osvětlení a nakreslit tedy čáry nazývané izoluxy. Síť izolux vytváří izoluxní plán obrázek. Někdy se využívá i prostorového znázornění rozložení osvětlenosti v axonometrickém zobrazení.



Fasádní okno

Vikýřové okno

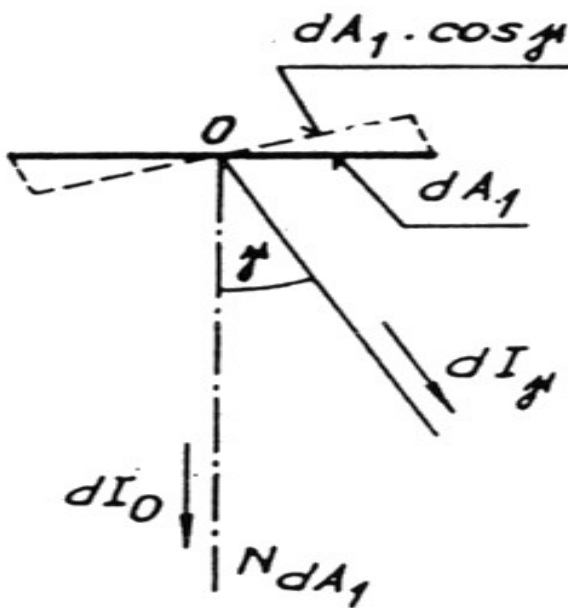
Střešní okno

obrázek 5.5.2 izoluxy u různých typů oken [82]

5.6 Jas svazku světelných paprsků.

Veličinou, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán, je jas svazku světelných paprsků. Pouze v homogenním, nepohlcujícím a nerozptylujícím prostředí je jas svazku světelných paprsků na jeho dráze všude stejný, a tedy nezávislý na vzdálenosti od zdroje světla. V takovém případě lze pak připustit zjednodušené nahrazení jasu svazku paprsků jasnem zdroje (svítící plošky zdroje) v uvažovaném směru a využít rovnice k určení jasu L_γ plošky dA_1 ve směru pod úhlem γ od normály N_{dA_1} viz obrázek 5.6.1

$$L_{OP} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cdot \cos \gamma} \quad (\text{cd.m}^{-2}, \text{m}^2, -) \quad \text{vztah (5.6.1)}$$



Obrázek 5.6.1 - jas L_γ plošky dA ve směru pod úhlem γ od normály N_{dA} [9]

Jednotkou jasu je 1 kandela na 1 m^2 (cd.m^{-2}) dřívější označení nit (nt). Jas svazku paprsků ať již vycházejících ze zdrojů nebo odrážených od různých ploch je závislý na stanovišti pozorovatele i na směru jeho pohledu. Z toho je zřejmé, že jas svazku paprsků je funkcí nejen bodu, ale též orientovaného směru. Zjistí-li se hodnoty jasu svazku paprsků dopadajících z různých směrů do okolí určitého bodu prostoru a nanesou-li se tyto hodnoty na odpovídající směry od uvažovaného bodu jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů radiusvektorů fotometrická plocha rozložení jasu. Tato plocha jednoznačně charakterizuje rozložení toků v uvažovaném bodě prostoru, ale její určení je v obecném případě prakticky nezvládnutelné.

Řezy fotometrickou plochou jasu provedené rovinami obsahujícími uvažovaný bod se nazývají čáry (křivky) jasu a kreslí se obvykle v polárních souřadnicích.

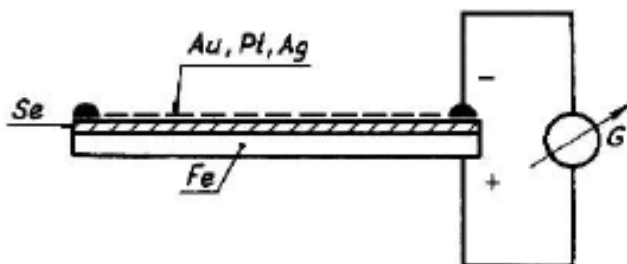
Čáry jasu se matematicky popisují vztahem 5.6.2.

$$L_{\gamma} = L_0 \cdot f_L(\gamma) \quad (\text{cd.m}^{-2}, \text{cd.m}^{-2}, -) \quad \text{vztah (5.6.2)}$$

Kde L_0 je jas svazku paprsků dopadajících do okolí uvažovaného bodu ve směru, který se zvolil za vztažný směr, L_{γ} je jas svazku paprsků ve směru pod úhlem γ měřeným od vztažného směru, $f_L(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) jasu, která matematicky popisuje tvar uvažované čáry jasu. K aproximaci čar jasu se používá mocnin funkce kosinus, funkce sinus, jejich součinů a lineárních kombinací těchto funkcí. Vztah 5.6.2 se používá k určení jasu zdroje ve směru oka pozorovatele nebo fotonky, popřípadě ke zjištění jasu nepřístupných zdrojů či zdrojů neurčitých směrů.

5.7 Základy měření světelně technických veličin

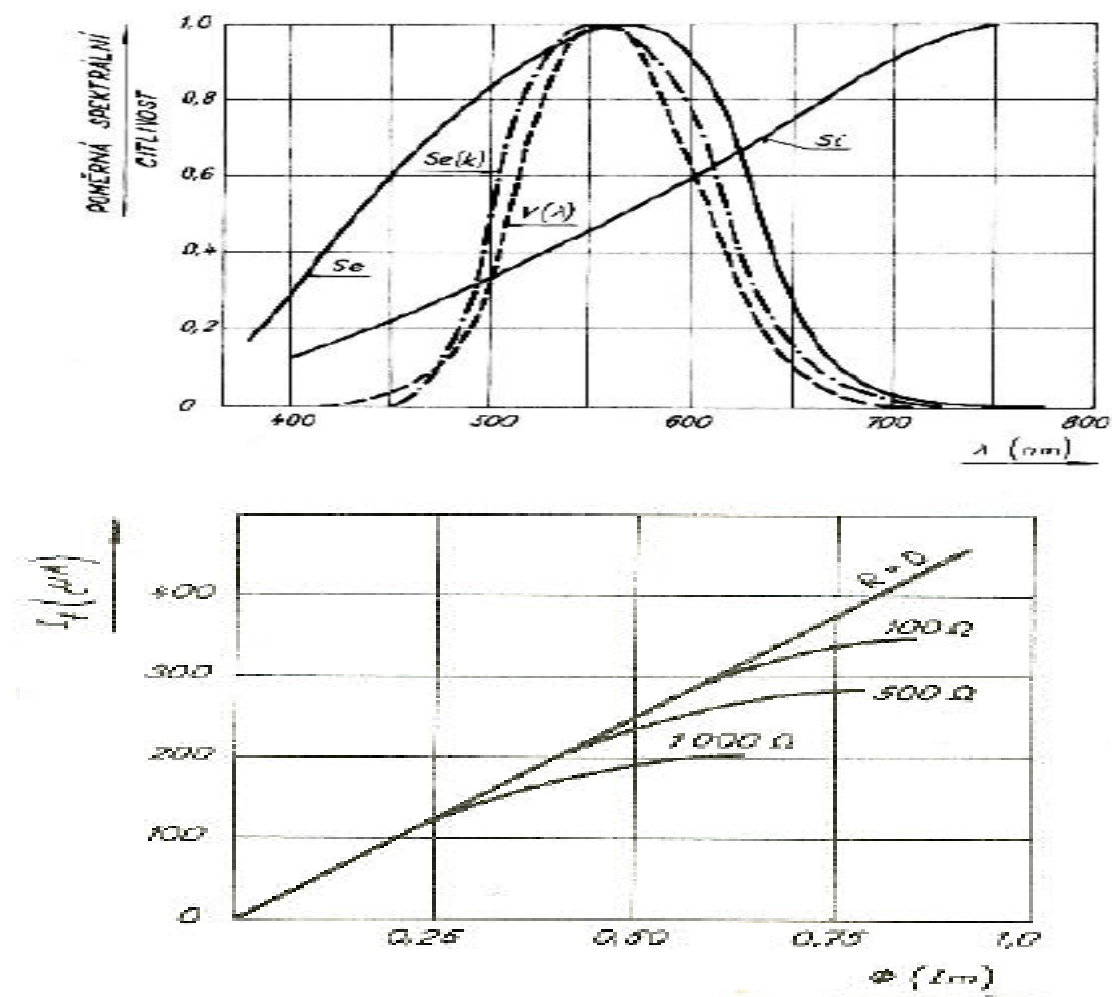
Metody měření fotometrických veličin se dělí na vizuální (subjektivní metody, při kterých se jako indikátoru využívá zraku a na fyzikální (objektivní), při kterých se měří fyzikálními čidly. Subjektivní měření jsou závislá na individuálních vlastnostech zraku různých pozorovatelů a na změnách těchto vlastností v závislosti na podmínkách pozorování a různých subjektivních faktorech. Dnes se všeobecně dává přednost měřením fyzikálním, při nichž se využívá přesných objektivních přístrojů vybavených kvalitními fotočládky. To umožňuje provádět jak rychlá a snadná provozní měření (zvl. Intenzity svítivosti a jasů) s rozšířenou nejistotou měření mezi 8 až 14 %, tak i přesná laboratorní měření (např. svítivosti a světelného toku) při rozšířené nejistotě měření do 8 %. Existují i přístroje pro orientační měření, která jsou určena k ověřování základních podmínek zrakové pohody a u nichž se rozšířená nejistota měření pohybuje mezi 14 až 20 %.



obrázek 5.7.1 princip fotočládku [68]

Pro laboratorní světelně technická měření je třeba mít k dispozici vhodné etalony (normály) svítivosti (popřípadě i jasů) a světelného toku, které je třeba pravidelně ověřovat a kontrolovat (např. žárovkové normály po každých 15 h hoření, nejméně však jednou za rok). Jako etalonu svítivosti se obvykle užívají speciální žárovky s vláknem konstrukčně řešeným v jedné rovině, aby bylo možno přiměřeně jednoznačně změřit vzdálenost. Svítivost takového etalonu je při kalibračních měřeních zjištěna pro určitou teplotu chromatičnosti při jednoznačně definované poloze zdroje ve směru kolmém k rovině vlákna a při přesně stanoveném napájecím napětí a proudu. Má-li se při světelně technických měřeních, ať již vizuálních či fyzikálních, dosáhnout správných, srovnatelných a reprodukovatelných výsledků, je třeba při měřeních postupovat velmi pečlivě a dodržovat celou řadu podmínek. Měření nesmí být ovlivněna rozptýleným světlem. Optické části fotometrů nesmí být zaprášeny. Fotometrická vzdálenost, t. j. vzdálenost fotometru od zdroje, musí být dostatečně velká (nejlépe desetkrát větší než největší rozměr zdroje), aby bylo možno považovat zdroj za bodový. Tato okolnost je zvláště důležitá při měření svítivosti zdrojů. Dalšími příčinami chyb bývají nedostatečná stabilita přístrojů a světelných normálů. Pokud jde o samotné přístroje, patří k nejčastějším zdrojům nejistot měření nedokonalá shoda spektrální citlivosti fotočlánků s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního pozorovatele, dále jejich úhlová chyba, nelinearita mezi dopadnutým světelným tokem a foto proudem, ale také teplotní závislost a únava. Před každým měřením je třeba ponechat jak zkoušené zdroje, tak i normály dostatečně dlouho zahořet, aby se ustálily jejich světelně technické i elektrické parametry. Např. žárovky se zahořují přibližně 5 minut, ale výbojové zdroje světla asi 20 minut podle jejich náběhových charakteristik. Jako přijímačů záření se nejčastěji používá hradlových křemíkových (dříve i selenových), fotonek založených na principu ventilového fotoefektu. Základní deska fotočlánku je železná, popřípadě hliníková. Vrstva křemíku, resp. selenu je pokryta průsvitnou vodivou vrstvičkou z platiny, stříbra nebo zlata ([obr. 5.7.1](#)). Po obvodě fotonky je sběrný kroužek pro odvádění elektrického proudu. Ozáří-li se tenká vrstva křemíku či selenu, nanesená na kovové podložce, vznikne rozdíl potenciálů kovové podložky a vrstvy křemíku či selenu a uzavřeným obvodem pak protéká proud, který se měří např. [Obr. 5.7.1](#) galvanometrem G nebo mikroampérmetrem. [68]

Obrázek 5.7.2 charakteristiky citlivosti různých druhů fotonek [63]



obrázek 5.7.3 závislost spektrální citlivosti selenových foto článků [68]

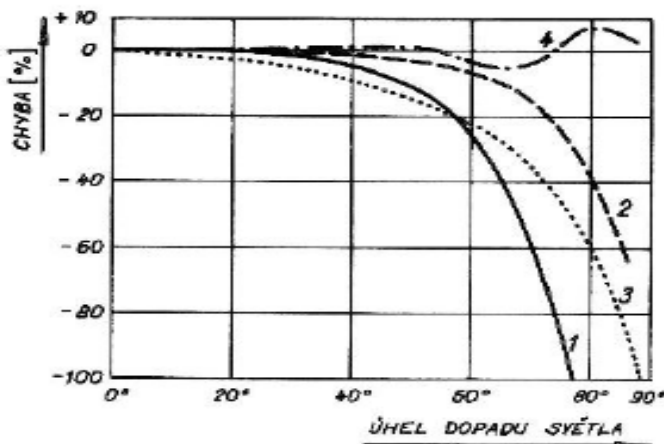
Křivka spektrální citlivosti fyzikálního přijímače má mít průběh shodný s křivkou $V(\lambda)$ spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele. To je zvláště důležité pro měření výbojových zdrojů světla s čárovým nebo kombinovaným spektrem. Spektrální rozložení poměrné citlivosti nekorigovaného fotočlánku ([viz obr.5.7.2](#)).

Křivka Se -selénový fotočlánek, křivka Si -křemíkový fotočlánek je odlišné od průběhu poměrné spektrální citlivosti oka normálního pozorovatele křivka $V(\lambda)$. Měří-li se proto s nekorigovaným fotočlánkem, jsou údaje přečtené na měřicím přístroji rovny skutečným hodnotám osvětlení jen tehdy, pokud druh měřeného světla je shodný se světlem použitým při cejchování přístroje.

Je-li měřené světlo jiného druhu, musí se naměřené hodnoty násobit korekčním činitelem. Přepočítávání odpadá, vybaví-li se fotočlánek korekčními filtry, které zajistí přizpůsobení křivky citlivosti fotočlátku křivce citlivosti oka [obr.5.7.2](#): křivka Se (k). Křemíkové hradlové fotočláanky vykazují vysokou spektrální citlivost ve viditelné oblasti spektra a ve srovnání se selenovými fotočláanky jsou stabilnější a jejich elektrický proud při stejné intenzitě osvětlení je několikanásobně větší. Závislost fotoelektrického proudu na světelném toku dopadnutém na hradlový fotočlánek je při běžném zapojení nelineární a dosti závislá na odporu vnějšího obvodu. V porovnání s křemíkovými fotočláanky je zmíněná závislost výraznější u fotočláanků selénových ([obr.5.7.3](#)). Je patrné, že k dosažení vyhovující linearitě musí proto mít vnější obvod selénového fotočláanku odpor menší než 100Ω . U křemíkových fotonek je linearita závislosti foto proudu na intenzitu osvětlení zachována téměř až do odporu vnějšího obvodu $R = 500 \Omega$. Proud fotony lze měřit mikroampérmetry či při proudech menších než $100 \mu\text{A}$ galvanoměry s vnitřním odporem do 100Ω . Moderní přístroje pro měření foto proudu se již vybavují jak zesilovači, tak i kompenzačním zařízením s měřením proudu nakrátko fotočláanku a zabezpečují tak v širokém rozsahu linearitu mezi foto proudem a hladinou intenzity svítivosti. [Obr. 5.7.3](#). Závislost foto proudu selénového fotočláanku na odporu R jeho vnějšího obvodu. Při déletrvajících měřeních se může, zvláště u selénových fotonek, projevit únava fotočláanku, a to obvykle poklesem foto proudu při konstantní intenzitě osvětlení. Vyžaduje-li se vyšší přesnost měření, je třeba fotočláanky ověřovat po půl až jedné hodině. Citlivost fotočláanku postupně rovněž klesá při konstantní intenzitě osvětlení vyšší než 200 lx . Po zatemnění se fotočlánek zotaví. Pouze při osvětlení nad 1000 lx bývá pokles citlivosti trvalý. Proto se u některých fotočláanků přiměřením vysokých hladin intenzitě osvětlení snižuje světelný tok dopadnutý na fotočlánek zakrytím části přijímací plochy fotočláanku clonami s otvory. Proud hradlového fotočláanku závisí též na teplotě okolí a na kmitočtu kolísání světla, což se projevuje, zvláště u selénových fotonek, přiměřením výbojových zdrojů světla napájených střídavým proudem. Foto proud křemíkových fotočláanků je na teplotě okolí téměř nezávislý. Při změně teploty okolí v rozmezí $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ bývají změny údajů vesměs menší než $\pm 1\%$. Fotočláanky se cejchují pro kolmý dopad světla. Při šikmém dopadu světla při konstantní svítivosti zdroje a stejné vzdálenosti zdroje od místa měření je intenzitě osvětlení úměrná kosinu úhlu dopadu. [68]

U obvyklých fotočlánků byly zjištěny odchylky od tohoto zákona zvláště při úhlech dopadu větších než 30° (viz obr.5.7.4). Chyba je způsobena částečným zrcadlovým odrazem, sníženou propustností horní vrstvy, polarizací i cloněním okraje fotočlánku obrubou.

Směrová (úhlová) chyba se odstraňuje tzv. kosinusovým nástavcem provedeným např. ve tvaru kulového vrchlíku z rozptylného skla.



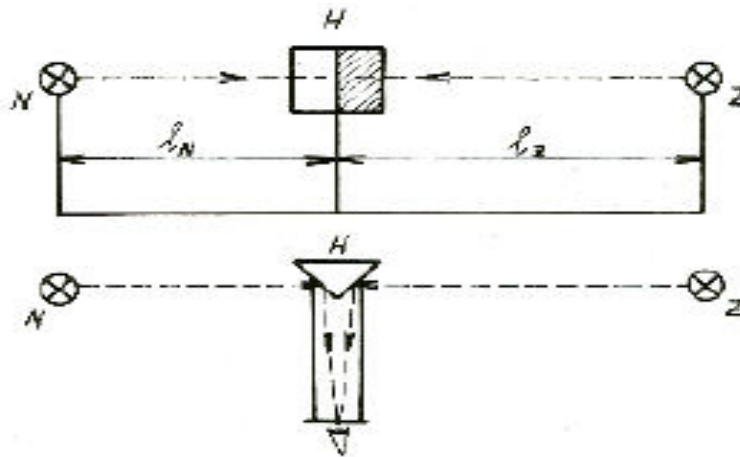
- 1 -fotočlánek s přečnávající obrubou,
- 2 -fotočlánek bez obruby,
- 3 -fotočlánek s korekčním filtrem,
- 4 -fotočlánek s kosinusovým nástavcem

Obr. 5.7.4 Chyby různých fotočlánků v závislosti na úhlu dopadu světla [68]

5.8 Měření svítivosti

Svítivost, jako fotometrická veličina, se neměří přímo, ale převádí se při subjektivním měření jasu nebo při objektivním měření na měření intenzity osvětlení. Měření se provádí na fotometrické lavici, která se skládá z vodících tyčí či kolejniček, po nichž pojíždí vozíky se zdroji světla a tzv. fotometrickou hlavicí. Vzdálenosti mezi fotometrickou hlavicí a zdroji se odečítají na měřítku upevněném na lavici. Středů zdrojů i fotometrické hlavice musí být nastaveny přesně do optické osy. Při vizuálním měření se buď přímo porovnává svítivost měřeného zdroje se svítivostí etalonu, nebo se měří substituční metodou s použitím srovnávacího světelného zdroje. Fyzikální měření se obvykle provádí metodou substituční. Při vizuálním měření přímým pozorováním se na jednom konci lavice (obr. 5.8.1) umístí měřený (zkoušený) zdroj Z, na druhém konci etalon svítivosti N a mezi nimi fotometrická hlavice H, tvořená např. trojbokým hranolem, umožňujícím měření na stejný jas. Odrážející plochy hranolu musí být dokonale rozptylné, aby jasy pozorovaných ploch byly úměrné jejich intenzity osvětlení.

Z [obr. 5.8.1](#) je vidět, že zorné pole fotometru je v tomto případě rozděleno na dvě části. Stejného jasů obou částí pole fotometru lze dosáhnout za předpokladu stejné chromatičnosti světla etalonu a zkoušeného zdroje v souladu se zákonem čtverce vzdálenosti změnou vzdáleností l respektive l_z . [68]



Obr. 5.8.1 Schématické uspořádání vizuálního měření na fotometrické lavici s fotometrem na stejný jas [68]

N – etalon svítivosti,

Z – zkoušený (měřený) zdroj,

H – fotometrická hlavice s trojbokým hranolem pro měření na stejný jas

Po vyrovnání jasů platí pro poměr svítivosti I_Z měřeného zdroje ke svítivosti I_N srovnávacího zdroje vztah, z něhož se při známé svítivosti I_N snadno určí svítivost I_Z měřeného zdroje.

$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{(l_Z)^2}{(l_N)^2} \quad (\text{cd, cd; m, m}) \quad (\text{vztah 5.8.1})$$

Pojížděním fotometru mezi oběma zdroji se vyrovná na stejný jas nebo kontrast obou částí fotometrického pole, odečte se vzdálenost l_N normálu l_N a l_Z měřeného zdroje I_Z naměřená svítivost se pak určí ze [vztahu 5.8.1](#). K zajištění stejných optických podmínek pro oba zdroje se měření zopakuje ještě jednou při fotometru otočeném o 180° .

Z obou měření se stanoví střední hodnota. Při vizuálním měření substitučním se dává etalon svítivosti i měřený zdroj postupně na tutéž stranu fotometru a oba tyto zdroje se porovnávají s vhodným srovnávacím zdrojem, který je umístěn na druhé straně fotometru. Srovnávací zdroj nemusí mít známou hodnotu svítivosti, ale jeho svítivost musí být alespoň v průběhu jednoho měření konstantní.

Po vyrovnání jasu obou částí fotometrického pole postupně pro etalon svítivosti I_N naměřený zdroj I_Z , se na měřítku fotometrické lavice odečtou vzdálenosti l_N a l_Z a svítivost měřeného zdroje se určí podle [vztahu 5.8.1](#). Při měření zůstává vzdálenost fotometru od srovnávacího zdroje konstantní a posouvá se buď vozík s etalonem či měřeným zdrojem, nebo vozík fotometru s pevně připojeným vozíkem srovnávacího zdroje. Tato metoda vylučuje vliv nesymetrie fotometrické destičky a pracuje s konstantním jasem srovnávacího pole. Při objektivním měření se osvětluje postupně etalonem svítivosti a měřeným zdrojem fyzikální čidlo. Nejčastěji se měří při konstantní intenzitě osvětlení čidla, kdy se vylučuje vliv nelinearity závislosti foto proudu fotonky na intenzitě osvětlení. Mění se tedy poloha měřeného zdroje tak, až je výchylka měřicího přístroje stejná jako při osvětlení etalonem svítivosti. Pak se hledaná svítivost vypočte opět ze [vztahu 5.8.1](#). Pokud by se měřilo při různé intenzitě osvětlení fotočlánku, bylo by nutno ověřit linearitu fotočlánku a počítat s korekčními činiteli. Přiměření je třeba vyloučit účinky rozptýleného světla na čidlo. Proto se na fotometrickou lavici umísťují mezi zdroj a fotometr stínící clony tak, aby na fotonku dopadalo světlo pouze od měřeného zdroje. Velikost otvorů v clonách musí být taková, aby žádná aktivní část zdroje nebyla zastíněna. Při objektivním měření musí být citlivá plocha čidla zcela a rovnoměrně osvětlena. Přesnost měření svítivosti teplotních zdrojů pracovním teplotním etalonem svítivosti činí asi $\pm 2\%$.

5.9 Měření čar svítivosti

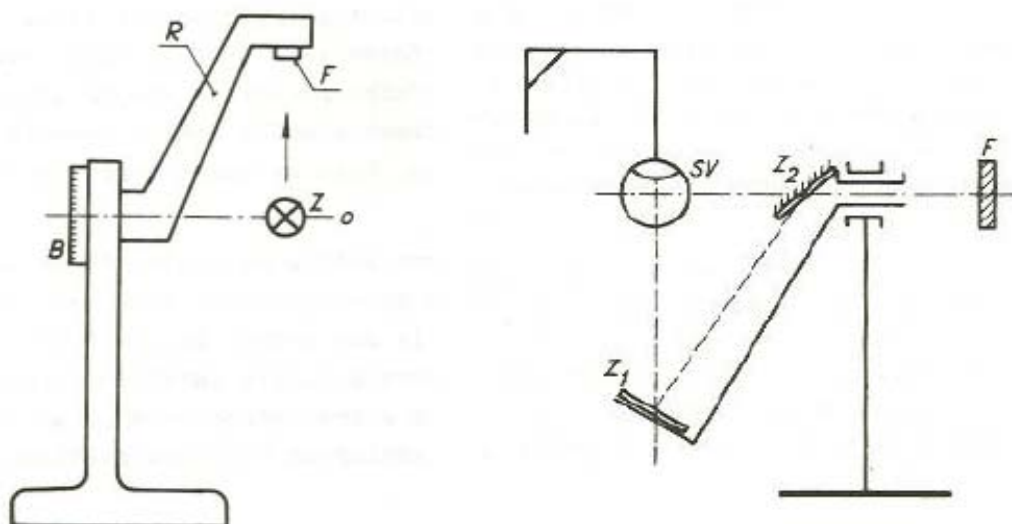
Čáry svítivosti světelných zdrojů lze měřit na fotometrické lavici, a to zjišťováním svítivosti postupně v různých směrech. Podle požadované přesnosti se měří po 10° či 5° , nejčastěji však v souladu s požadavky evropských norem po 2° . Běžně se však čáry svítivosti zdrojů a svítidel měřicími přístroji, které se nazývají goniofotometry. Jsou to zařízení, která umožňují měřit svítivost světelného zdroje či svítidla v různých rovinách a pod různými úhly.

Takový požadavek mohou splnit v zásadě tři různá konstrukční uspořádání:

- 1) otočný zdroj a pevný fotometr
- 2) pevný zdroj a otočný fotometr
- 3) pevný zdroj i fotometr a otočný zrcadlový systém.

Goniofotometry s otočným zdrojem či svítidlem nejsou vhodným řešením, neboť u mnohých zdrojů je světelný tok závislý i na poloze zdroje.

Přístroje druhé skupiny lze použít pouze pro objektivní měření. Používají fotonku připevněnou na rameni, které se otáčí okolo zdroje či svítidla. Výhodou tohoto řešení je skutečnost, že svítidlo či zdroj je zavěšen v normální provozní poloze. Příklad konstrukce goniofotometru s otočným ramenem je na [obr.5.9.1](#). [68]



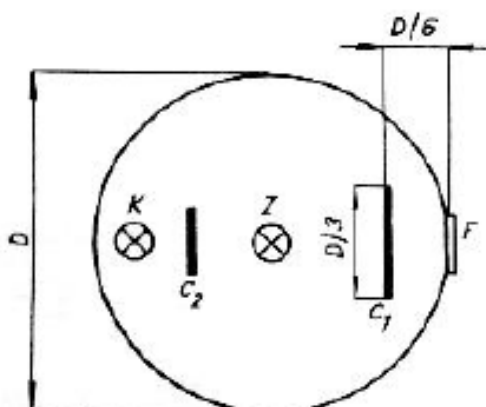
Obr. 5.9.1 goniofotometr s otočným ramenem Obr. 5.9.2 goniofotometr s zrcadlovým systémem [68]

Přístroj se skládá z ramene R, na němž je upevněna fotonka F. Rameno R se otáčí kolem měřeného zdroje Z umístěného v ose otáčení o. Úhel natočení se odečítá na bubínku B. Změna roviny, ve které se měří křivka svítivosti, se provádí natočením zdroje či svítidla. Goniofotometry třetí skupiny umožňují měření v libovolné vzdálenosti, jsou však velmi náročné na konstrukční řešení, zejména zvl. pokud jde o optickou kvalitu zrcadel. Příklad řešení takového goniofotometru je na [obr. 5.9.2](#). Kolem svítidla SV se na pevném rameni otáčí zrcadlo Z_1 . Světlo odražené zrcadlem Z_1 odráží druhé zrcadlo Z_2 ve směru osy otáčení na pevně umístěný fotočlánek F. Fotometrická vzdálenost je dána součtem vzdáleností od měřeného zdroje přes obě zrcadla až k fotočlátku. U tohoto přístroje by bylo možno provádět absolutní měření svítivosti, ale bylo by zapotřebí znát činitele absorpce zrcadel, který se časem zvětšuje. Konstrukce všech typů goniofotometrů musí být dostatečně tuhá, aby nedocházelo během rotace k deformaci či kývání nosných částí, čímž by se zaváděly přídavné chyby měření.

Svítivost se obvykle v různých směrech neměří absolutně, ale stačí relativní měření, které dovoluje nakreslit tvar zjištěné křivky v polárních souřadnicích. Ocejchování diagramu svítivosti se posléze provede zjištěním jedné absolutní hodnoty svítivosti, například ve směru svislé osy svítidla, a to zvláštním měřením buď přímo na goniofotometru nebo na fotometrické lavici. Goniofotometry pro hromadná měření je výhodné vybavit zařízením pro samočinné zakreslování čar svítivosti na polární papír.

5.10 Měření světelného toku

Světelný tok světelných zdrojů či svítidel je možno stanovit buď graficko početními metodami z naměřených křivek svítivosti nebo přímým měřením světelného toku v integrátoru s použitím normálu světelného toku. Integrátor může mít tvar krychle nebo kvádrů, ale nejvhodnější (zvláště při nesymetrickém rozdělení světelného toku) jsou integrátory ve tvaru koule podle [obr.5.10.1](#). Jde o dutou kouli opatřenou na vnitřním povrchu bílým rozptýlným nátěrem s velkou reflexní schopností. Důležitým požadavkem je, aby byl nátěr barevně neutrální. Nejlépe vyhovují některé druhy běloby zinkové, titanové či barytové. Často bývá základní nátěr trvalý a na něj je nanesen nátěr rozpustný ve vodě, který se pravidelně obnovuje. Činitel odrazu by měl být v mezích 0,75 až 0,85. Koule má na jedné straně okénko s fotočlánkem F zastíněné clonou C_1 , aby na něj nedopadalo světlo přímo ze zdroje.



Obr. 5.10.1 Integrátor světelného toku
[68]

Zdroj Z je zavěšen přibližně ve středu koule. Při rozsvícení zdroje uvnitř koule dochází k mnohonásobným odrazům na vnitřním povrchu koule. Tímto mnohonásobně odraženým světlem se osvětlí též okénko s fotonkou.

Dopadá-li na vnitřní povrch integrátoru ze zdroje tok z a má-li rovnoměrně rozptýlně odražející povrch integrátoru integrální činitel odrazu ρ , pak je odražená složka výsledného světelného toku F dopadající vlivem mnohonásobných odrazu na vnitřní povrch integrátoru rovna

$$\Phi = \rho \cdot \Phi_z + \rho^2 \cdot \Phi_z + \rho^3 \cdot \Phi_z + \dots \rho^n \cdot \Phi_z = \frac{\rho}{1-\rho} \cdot \Phi_z \quad (\text{lx}) \quad (\text{vztah 5.10.1})$$

Vnitřní povrch kulového integrátoru je ve všech místech stejně osvětlen a intenzita osvětlení v libovolném bodě tečné roviny k vnitřnímu povrchu integrátoru je rovna střední hodnotě intenzitě osvětlení celého vnitřního povrchu πD^2 kulového integrátoru o průměru D . V místě okénka s měřicím čidlem odpovídá intenzitě osvětlení Φ pouze odraženým světelným tokům, tj. toku Φ a stanoví se ze vztahu 5.10.2.

$$E = \frac{\Phi}{\pi \cdot D^2} = \frac{\rho}{\pi \cdot D^2(1-\rho)} \Phi_z = k_i \cdot \Phi_z \quad (\text{lx} \cdot \text{lm}^{-1}; \text{m}) \quad (\text{vztah 5.10.2})$$

kde k_i je konstanta integračního fotometru

$$k_i = \frac{\rho}{\pi \cdot D^2 \cdot (1-\rho)} \quad (\text{vztah 5.10.3})$$

Fotočlánek indikuje tedy hodnotu intenzity osvětlení E , která je přímo úměrná toku zdroje F_z . Ze [vztahu 5.10.2](#) je patrné, že citlivost integračního kulového fotometru ovlivňuje jeho průměr D a činitel rovnoměrně rozptýlného odrazu ρ . Obvykle se měří objektivní metodou substituční. Nejprve se umístí do integrátoru normál světelného toku a stanoví se konstanta zařízení.

Pak se normál vyjme a místo něho se do koule umístí měřený zdroj. Údaj fotometru násobený konstantou zařízení udává světelný tok měřeného zdroje. Pokud se měří v integrátoru světelný tok celého svítidla nebo zdroje s většími nosnými částmi, dochází k určitému pohlcení a odstínění části světelného toku. V takovém případě je vhodné použít pro vyloučení stínícího vlivu pomocnou žárovku, zvanou korekční zdroj K (viz [obr.5.10.1](#)). Ten bývá umístěn u stěny koule obvykle naproti výstupnímu okénku, přičemž je zakryt clonou C_2 , aby neosvětloval přímo výstupní okénko, ani měřený zdroj či svítidlo. Je vhodné, aby světelný tok pomocné žárovky se příliš nelišil od světelného toku měřeného zdroje a musí být konstantní po dobu jednoho měření.

Postup měření s korekčním zdrojem je následující:

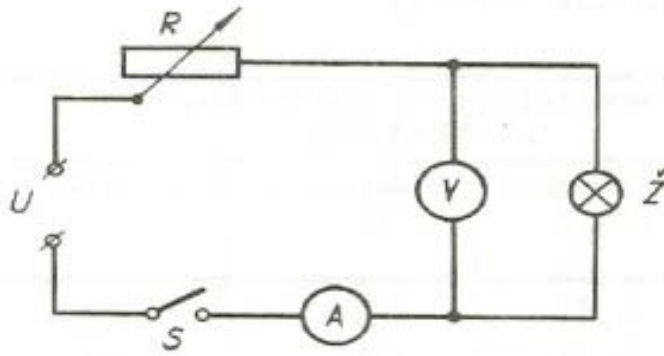
- 1) Při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji se zjistí údaj fotometru E_n
- 2) Při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji -údj fotometru E_{kN}
- 3) Při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji -údj fotometru E_{kx}

4) Při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji -údaj fotometru E_x
 Je-li světelný tok normálu Φ_N , pak světelný tok měřeného zdroje F_x se vypočte ze

$$\text{vztahu } \Phi_x = \Phi_N \cdot \frac{E_x}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kx}} \quad (\text{lm}) \quad (\text{vztah 5.10.4})$$

V tomto vztahu poměr $\frac{E_{kN}}{E_{kx}}$ udává korekci vlivu stínění neaktivních částí. [68]

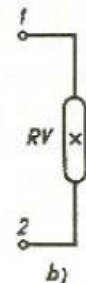
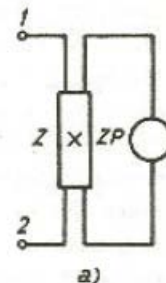
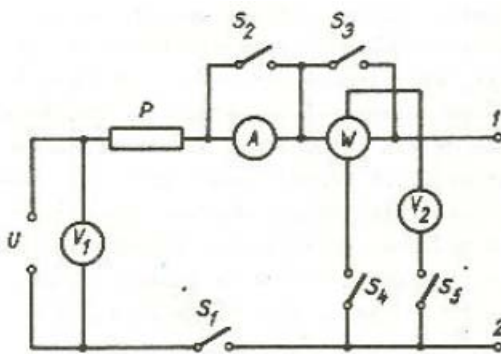
Obdobným postupem se může v integrátoru změřit i světelný tok svítidla. Pak je možno stanovit též účinnost svítidla jako poměr světelného toku vyzařovaného svítidlem ke světelnému toku zdrojů instalovaných ve svítidle. Před začátkem měření světelného toku je třeba světelný zdroj nechat určitou dobu zahořet, aby se ustálily jeho světelně-technické parametry. U výbojových zdrojů je tato doba 20 i více minut. Přesnost měření světelného toku v integrátoru je ovlivněna jednak vlastnostmi fotočlánku (závislost foto proudu na intenzitě osvětlení), jednak změnami teploty uvnitř integrátoru při déletrvajících měřeních. Linearita fotočlánku se má pravidelně kontrolovat a je třeba počítat s korekčními křivkami; vliv teplotních změn se dá omezit tím, že se světelný zdroj zahořuje při otevřeném integrátoru a integrátor se zavírá na dobu vlastního měření. Vlastnosti vnitřního nátěru integrátoru se rovněž časem poněkud mění, což by mohlo mít vliv u dlouhotrvajících měření (např. zkoušky životnosti zdrojů). Také výstupní okénko musí vyhovovat určitým požadavkům, např. jeho umístění se má krýt co nejpřesněji s vnitřním povrchem integrátoru. Rovněž clony pro odstínění přímo dopadajícího světla mají mít určité geometrické rozměry, např. clona C_1 má mít průměr asi $D/3$ a její vzdálenost od výstupního okénka má být $D/6$, kde D je průměr integrátoru. Přesnost měření světelného toku při použití teplotních pracovních etalonů bývá $\pm 2\%$, při měření zářivek a výbojek asi $\pm 3,5\%$. Při srovnávacích měřeních se žárovkami a vysokotlakými výbojkami musí být teplota okolí kulového integrátoru v rozmezí 22 až 27°C, při provozních měřeních 18 až 29°C. Zářivky se měří při okolní teplotě integrátoru $25 \pm 1^\circ\text{C}$ v prostředí bez průvanu. Žárovky a vysokotlaké výbojky rtuťové se měří v poloze svislé, patičí nahoru, vysokotlaké výbojky sodíkové a zářivky v poloze vodorovné tak, aby jejich podélná osa ležela na spojnici středu koule se středem fotočlánku. [68]



Obr. 5.10.2 Schéma napájení žárovek při fotometrických měřeních [68]

U -zdroj napětí, R -odpor, Ž -zkoušená žárovka, A -ampérmetr, V -voltmetr, S -vypínač

Žárovky se přiměření zapojují podle schématu na [obr.5.10.2](#) a doporučuje se přiměření voltmetr nevypínat a od hodnoty měřeného proudu odečítat hodnotu proudu procházejícího voltmetrem. Přiměření zářivek se měřicí přístroje a předřadník zapojí podle [obr.5.10.3a](#). Kolíky patič zářivky se na napájecí napětí zapojí křížem a během měření se zapojení nemění. Měří-li se vysokotlaké výbojky, použije se schématu zapojení podle [obr.5.10.3b](#). Světelný tok zářivek a vysokotlakých výbojek se měří po ustálení světelně technických a elektrických parametrů obvykle po 20 minutách svícení, a to za stejných podmínek, při kterých se pak měří. Přiměření se buď používá referenčních předřadníků a udržuje se napájecí napětí rovné jmenovitému napětí použitého předřadníku, nebo se měří při jmenovitém příkonu měřeného zdroje.



Obr. 5.10.3 [68]

Obr. 5.10.3a Obr. 5.10.3 b

Schéma napájení zářivek (a), resp. vysokotlakých výbojek (b) při fotometrických měřeních U -zdroj napětí, P -předřadník, A -ampérmetr, W -wattmetr, V1 , V2 -voltmetry, S1 až S5 -vypínače, Z-zářivka, RV -výbojka, ZP -zapalovač

Přiměřením jedné elektrické veličiny musí být přístroje na měření ostatních veličin (s výjimkou napájecího napětí) vypnuty [ČSN 360012 Měření světelného toku a elektrických parametrů zářivek a rtuťových výbojek]. Měří se každá veličina zvlášť, a to při konstantním světelném toku zkoušených zdrojů, tj. po zapnutí určitého přístroje se změnou napájecího napětí upraví měřená hodnota foto proudu na hodnotu, která byla před zapnutím tohoto přístroje. Měří-li se při jmenovitém příkonu zdroje, nastaví se po zahoření zdroje na wattmetru příkon rovný součtu příkonu zdroje a příkonu spotřebovaného napět'ovou cívku wattmetru. Ampérmetr a voltmetr pro měření obloukového napětí jsou odpojeny. Tomuto stavu odpovídající foto proud se pak udržuje konstantní přiměřením ostatních elektrických veličin. Příkon P_W spotřebovaný napět'ovou cívku wattmetru o odporu R_W při napětí U_{ob} se vypočte z výrazu

$$P_W = \frac{U_{ob}^2}{R_W} \quad (W; V, \Omega) \quad (\text{vztah 5.10.5})$$

5.11 Měření intenzity osvětlení

K měření intenzity osvětlení se používá objektivních přístrojů, luxmetrů, které se skládají z přijímače s korigovaným fotočlánkem opatřeným kosinusovým nástavcem a z měřicího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem.

Luxmetry se člení podle celkové přípustné chyby (f_c): na přesné ($f_c \pm 5\%$), provozní ($f_c \pm 10\%$) a orientační ($f_c \pm 15\%$). Sleduje se přitom 11 druhů chyb (f_1 až f_{11}): f_1 -relativní chyba stupnice, f_2 -spektrální chyba (vzniká přiměřením ve světle se spektrem jiným, než které bylo použito při cejchování, což je obvykle normalizované světlo A, 2856 K), f_3 -směrová (úhlová) chyba, f_4 -chyba nestability, f_5 -chyba vlivu teploty (vztažená na 1°C), f_6 -odchylka spektrální citlivosti čidla od křivky $V(\lambda)$, f_7 , f_8 -chyby vyplývající z citlivosti fotonky na záření UV (f_7) a IČ (f_8), f_9 -chyba linearity, f_{10} -chyba přiměřením modulovaného záření a f_{11} -chyba při změně rozsahu přístroje. Chyby f_6 až f_{11} se zjišťují pouze při typové zkoušce přístroje. Indikátor luxmetru musí být opatřen korektorem umožňujícím nastavení nuly. Má-li luxmetr vlastní napájecí zdroj, musí být možnost průběžně kontroly napětí tohoto zdroje. Luxmetr musí snést na každém rozsahu přetížení 20 % měřicího rozsahu, a to po dobu 5 minut. Za normálních podmínek musí být životnost luxmetrů minimálně 5000 provozních hodin. Frekvenční rozsah pro všechny třídy přesnosti luxmetrů je v mezích od 40 do 105 Hz. [68]

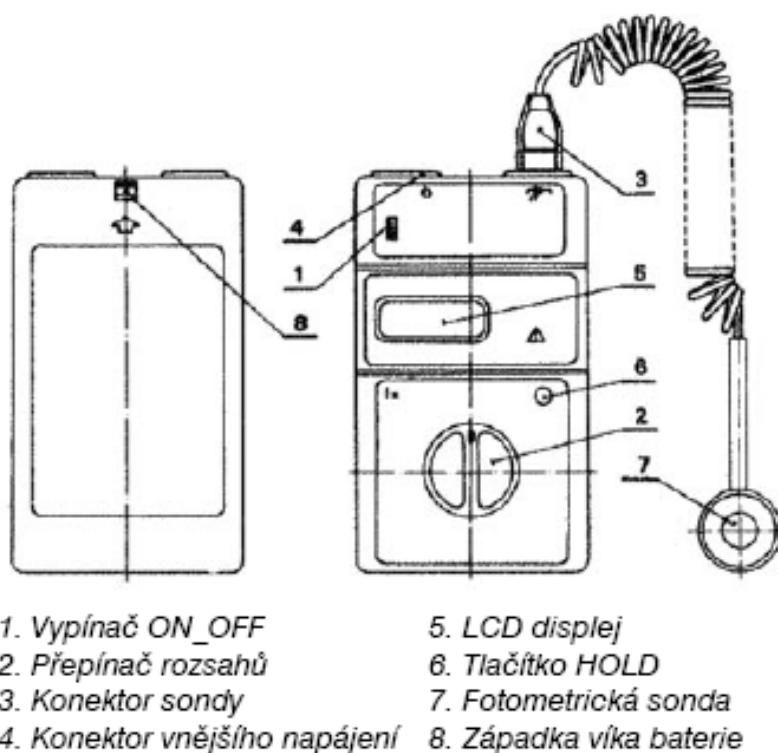
Před započítím měření je třeba fotočlánky po dobu 5 až 15 minut ponechat odkryté ve světelném prostředí, v němž se bude měřit, aby se čidla daným podmínkám přizpůsobila a stabilizovala se. Vzhledem k tomu, že se v průběhu využívání luxmetrů mohou jejich parametry, zejména vlastnosti fotočlánků, měnit, je zapotřebí luxmetry pravidelně kalibrovat prostřednictvím pověřeného pracoviště (např. ČMI -Český metrologický institut, EZÚ – Elektrotechnický zkušební ústav), a to podle ustanovení zákona č.119/200 o metrologii (popřípadě podle pokynů výrobce, jsou-li přísnější než uvádí zákon) a požadavků Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: přesné přístroje maximálně po 2 letech, přístroje pro provozní měření po 3 letech a přístroje pro orientační měření nejdéle po 5 letech. Luxmetry určené pro provozní měření bývají většinou konstruovány s dostatečně dlouhým stíněným kabelem spojujícím pouzdro s fotočlánkem s vlastním měřicím přístrojem, čímž se zajišťuje, aby výsledky měření nebyly nevhodně ovlivněny při čtení údajů. Je-li fotočlánek zabudován přímo v pouzdře měřicího přístroje, je třeba, aby byl přístroj vybaven dálkově ovládanou fixací naměřené hodnoty, neboť jinak je obtížné zabránit tomu, aby pracovník, který údaje odečítá, neovlivnil měření, např. zastíněním čidla, popřípadě dalších světelně činných ploch atd. Nejsou-li malé kapesní luxmetry takto upraveny, jsou pak použitelné jen pro skutečně orientační měření. Podobné malé luxmetry jsou též základem expozimetrů užívaných ke zjištění potřebné doby osvětlení při fotografování. V současnosti je u nás v praxi pro provozní měření intenzity osvětlení běžně využíván objektivní digitální luxmetr PU 550 s rozsahy 20 lx, 200 lx, 2000 lx, 20 klx a 100 klx vyráběný firmou Metra Blansko (viz obr.5.11.1).



Obr.5.11.1
Digitální provozní luxmetr typu PU
550 Metra Blansko [68]

Měřicí rozsah	Přesnost
20 lx	± (1 % z měřené hodnoty + 0,5 % z měřicího rozsahu + přídatná chyba sondy)
200 lx	
2 000 lx	
20 klx	
200 klx	

Tabulka 5.11.1 přesnost digitálního provozního luxmetru typu PU 550 Metra Blansko [79]



Obr. 5.11.2 Rozložení funkčních prvků u digitálního provozního luxmetru typu PU 550 Metra Blansko [79]

Přístroj je vybaven korigovanou křemíkovou foto diodou opatřenou kosinusovým
Nároky na luxmetry určené k přesnějšímu měření nízkých hladin intenzity osvětlení jsou poměrně vysoké, a to jak pokud jde o kvalitu a citlivost samotného čidla, tak i pokud jde o parametry vyhodnocovacího zařízení, zvláště jeho zesilovač. Z obvyklých fotonek se pro tyto účely nejčastěji užívají křemíkové fotočlánky.

S nízkými hodnotami intenzity osvětlení se častěji setkáváme ve veřejném osvětlení, zejména přiměřeně na komunikacích. Protože se v těchto případech měří intenzity osvětlení ve vodorovné rovině, je výhodné pro zajištění vodorovné polohy přijímací plošky fotočlánku použít speciálního zařízení, tzv. kardanova závěsu.



Obr. 5.11.3 přesného digitálního luxmetru a radiometru typu 211 firmy PRC Krochmann s čidlem [89]

Příkladem objektivního přesného digitálního luxmetru je radiometr typu 211 německé firmy PRC Krochmann (viz obr. 5.11.3) s korigovanými čidly a nastavci pro měření jak intenzity osvětlení rovinné plochy (v rozsahu 0,001 lx až 200 klx), tak střední kulové, válcové i půl válcové intenzity osvětlení a rovněž s využitím speciálních čidel pro měření ozářenosti v oblasti záření UV-A, UV-B, UV-C (0,001 mW.cm⁻² až 200 kW.cm⁻²). Měření intenzity osvětlení jsou důležitá a nezbytná k tomu, aby se mohla objektivně posoudit jakost osvětlovací soustavy ať již vnitřního nebo venkovního prostoru.

Při měření je třeba dbát na to, aby se nepřekročil rozsah měřicího přístroje, a aby zejména u starších typů přístrojů nedošlo k ozáření čidla nedovoleným světelným tokem. Při použití analogových měřících přístrojů s více rozsahy se měří na vyšších rozsazích v horních dvou třetinách stupnice (při poklesu se přepíná na nižší rozsah).

U digitálních přístrojů se měří na nejnižším rozsahu pokrývajícím měřené hodnoty.

Vlivy zhoršující měření jako např. vliv závislosti světelného toku zdrojů na změnách napájecího napětí, popřípadě i na teplotě okolí a na době provozu zdrojů, z hlediska jejich stárnutí. Míra zašpinění samotného prostoru a svítidel. Proto je nutné přiměřeně intenzity osvětlení dodržovat určitá pravidla, aby se v co největší míře eliminovaly nepříznivé vlivy znehodnocující výsledky měření. Přesná měření se opakují, tzn., že se měří nejméně dvakrát. Výsledné hodnoty se stanoví jako průměrné z jednotlivých měření. U provozních měření se jejich opakování doporučuje. Měřením se kontrolují hodnoty intenzity osvětlení v bodech pracovní či srovnávací roviny (nejčastěji se uvažuje vodorovná rovina ve výši 0,85 m nad podlahou ve vnitřních prostorech a obvykle nejvýše 20 cm nad povrchem ve venkovních prostorech), a to jednak u nového zařízení (nová svítidla a zdroje, nově vymalováno, nové vybavení) a jednak u zařízení v běžném provozu. Při měření nového zařízení musí být svítidla i zdroje světla čisté, nepoškozené a musí odpovídat projektu. Svítidla i zdroje musí být instalovány ve správné poloze. Pokud jde o světelné zdroje, je přiměřeně třeba dbát těchto okolností:

- 1) Zářivky a výbojky musí před měřením svítit alespoň celkem 100 h a žárovky alespoň 10 h (při jmenovitém napětí), neboť vlivem stárnutí zdroje klesá světelný tok. V záznamu měření se uvádí, kolik hodin celkem byly již světelné zdroje v provozu.
- 2) aby se zajistilo dostatečné zahoření zdrojů, měří se intenzity osvětlení v soustavách s výbojovými zdroji asi po 20 minutách nepřetržitého provozu. U uzavřených zářivkových svítidel může být stabilizace i delší, u žárovek lze měřit po uplynutí minimálně 1 minuty. Fotočlánky Je třeba před měřením osvětlit po dobu 5 až 15 minut přibližně stejnými hladinami intenzity osvětlení, které budou měřeny.
- 3) Světelný tok zdrojů se mění s teplotou okolí. Proto je třeba, vždy udat při jaké teplotě bylo měření prováděno.
- 4) Světelný tok zdrojů se mění s napětím, a proto se přiměřeně musí kontrolovat napětí na zdrojích. Napětí se má odečítat současně s údaji intenzity osvětlení.

Liší-li se napájecí napětí od jeho jmenovité hodnoty, provede se korekce naměřených hodnot podle údajů výrobce použitého zdroje nebo, chybí-li tyto údaje, použije se korekce podle ČSN 36 0011-3 (Měření osvětlení vnitřních prostorů, část 3: Měření umělého osvětlení).

Naměřené hodnoty se pak násobí činitelem ku závislým na poměru jmenovitého napětí U_n ke skutečnému napětí U přiměření $ku = (U_n / U)^c$ kde exponent c se stanoví podle druhu světelného zdroje z údajů v tab. 5.11.2, kde jsou uvedeny orientační průměrné hodnoty exponentu c . [68]

Světelný zdroj	exponent c
Žárovky pro všeobecné použití	3,6
Zářivky – induktivní zapojení	1,4
– kapacitní zapojení	0,6
– zapojení duo	1,0
– s elektronickým předřadníkem se stabilizací	0,0
Rtuťová vysokotlaká výbojka	2,5
Halogenidová výbojka	3,0
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,7
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,0

Tabulka 5.11.2 Průměrné hodnoty exponentu c pro různé světelné zdroje [68]

5) Světelný tok závisí i na zaprášení svítidla, a proto je v protokolu zapotřebí tento stav zachytit.

6) Umělé osvětlení je vhodné měřit po setmění nebo při zatemnění oken a světlíků, aby byl vyloučen vliv denního světla. Přiměření osvětlení venkovních prostorů se měří za suchého počasí, bez sněhové pokrývky a pokud možno za čistého ovzduší.

Světlo od výkladních skříní apod. se vyloučí vhodným zastíněním fotonky.

Je-li měřené osvětlení kombinací umělého a denního světla, musí se umělé osvětlení měřit odděleně od denního. Denní osvětlení velmi kolísá jednak během dne a jednak i vlivem atmosférických podmínek.

Kvalitu umělého osvětlení je nutno měřením ověřovat i v soustavách veřejného osvětlení, zvláště na komunikacích. Na komunikacích se intenzity osvětlení měří v pravidelné síti kontrolních míst ve vodorovné rovině ve výšce do 20 cm nad povrchem vozovky. Rozložení kontrolních bodů se volí tak, aby pokrývalo celou plochu jednoho prvku osvětlovací soustavy. U směrově rozdělených komunikací postačuje proměřit intenzity osvětlení jen na jedné straně komunikace. V příčném směru běžně stačí provádět měření ve třech bodech v každém jízdním pruhu. Rozteč kontrolních bodů v příčném směru je pak rovna jedné šestině šířky celé komunikace.

Vzdálenost prvního kontrolního bodu od okraje vozovky je při tom rovna poloviční rozteči kontrolních míst, tj. jedné dvanáctině šířky komunikace. V podélném směru se volí maximální rozteč kontrolních míst 5 m. Při rozteči světelných míst do 50 m tedy obvykle postačuje volit v podélném směru mezi dvěma světelnými místy 10 kontrolních míst. Průměrná hodnota intenzity osvětlení se stanoví jako aritmetický průměr hodnot intenzity osvětlení naměřených v jednotlivých kontrolních bodech. K zajištění vodorovné polohy přijímací plochy fotočlánku je výhodné použít Kardanova závěsu.

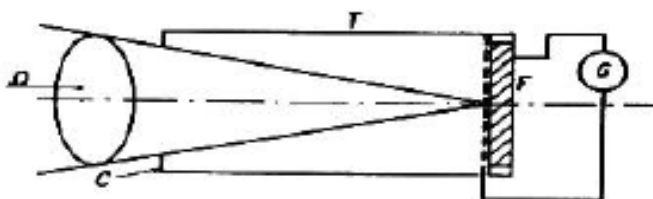
Zpráva o měření musí (ČSN 36 0011) obsahovat označení a charakteristiku kontrolovaného prostoru, účel, druh a stupeň přesnosti měření, popis a náčrt osvětlovací soustavy s vyznačením rozmístění svítidel a kontrolních míst, údaje o použitých zdrojích světla a svítidlech (druh a vlastnosti, napájení, regulace, stáří) s uvedením jejich provozního stavu, dále průměrné napájecí napětí v průběhu měření, teplotu vzduchu, podmínky a postup měření, naměřené hodnoty intenzity osvětlení (tabelární přehled, použité korekce a jejich zdůvodnění, popříp. zápis výsledných hodnot do výkresů, grafické znázornění výsledků měření např. formou izolux), porovnání výsledků s požadavky norem, zhodnocení výsledků měření, popřípadě návrh na opatření, či úpravu osvětlovací soustavy a konečně soupis použitých přístrojů, datum a čas měření, jména pracovníků, kteří měření prováděli a jméno a podpis pracovníka odpovědného za měření. Při zpracovávání výsledků měření se z naměřených hodnot určí místně průměrná hodnota intenzity osvětlení a ověří se, zda odpovídá předepisovaným hladinám s přihlédnutím k době provozu soustavy, ke stavu svítidel, zdrojů atd. Většinou se určuje i minimální, popřípadě maximální hodnota intenzity osvětlení a posuzuje se dodržení požadavků na rovnoměrnost osvětlení.

Po zhodnocení výsledků dobře provedených měření je možno doporučit nejen případné změny zdrojů světla, svítidel, doplnění počtu svítidel, či změnu jejich rozmístění, ale též úpravu způsobu a intervalu údržby osvětlovací soustavy.

5.12 Měření jasu

Dříve se měření jasu redukovalo na měření kolmé svítivosti přesně ohraničené a změřené plošky. Například na rozptýlné kouli se vymezila černým papírem plocha 10 cm a změřila se její svítivost ze vzdálenosti asi 300 až 500 mm. Vhodnější je k měření jasů využít jasoměrů. Přípustná celková chyba jasoměrů pro přesná měření je $\pm 7,5\%$ (kalibrace max. po 2 letech), pro provozní měření $\pm 10\%$ (kalibrace max. po 3 letech) a pro orientační měření $\pm 15\%$ (kalibrace max. po 5 letech). [68]

Přísnější podmínky jsou pro stanoveny (ČSN EN 13032-1) pro jasoměry pro měření parametrů svítidel. Nejjednodušší princip objektivního jasoměru je zřejmý z obr. 5.12.1



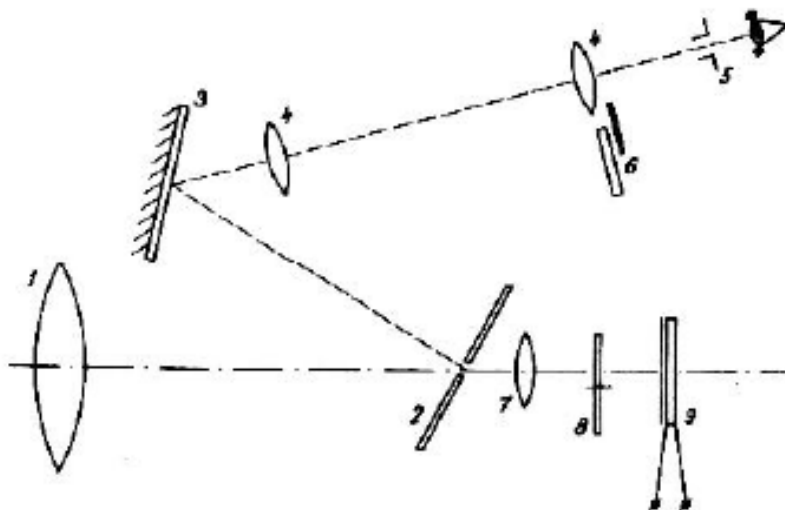
Princip objektivního jasoměru

Obr. 5.12.1 [68]

Princip objektivního jasoměru na obr. 5.12.1 T-černý tubus, F -fotonka, G -galvanoměr, C -clona, Ω -prostorový úhel odpovídající zornému poli přístroje na přijímač je nasazena trubka T, uvnitř černá, opatřená vpředu clonkou C s kruhovým otvorem, čímž je vymezen prostorový úhel Ω , v němž dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač (fotočlánek) F. V popsaném uspořádání se fotočlánekem F změří normálová intenzity osvětlení E_N přijímací plochy čidla. Střední jas L plochy vymezené prostorovým úhlem Ω na sledovaném povrchu se pak určí ze vztahu 5.12.1

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \text{lx, sr}) \quad \text{vztah (5.12.1)}$$

Přiměření jasu jasoměrem se zjišťuje střední hodnotu jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Proto je nutné vždy dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas hodnotíme. U běžných objektivních jasoměrů toto není problém, neboť okolí měřené plochy je v okuláru vidět naměřená oblast je v zorném poli vyznačena např. kroužkem. Podle velikosti plochy, jejíž jas se vyhodnocuje, resp. podle velikosti clony, určujících zorný úhel přístroje, se rozlišují jasoměry bodové, kterými lze měřit jas velmi malých plošek (pozorovaných například pod úhlem $6'$), a integrační, jimiž se zjišťuje jas mnohem větších ploch (pozorovaných např. pod úhlem 2°). Většina fyzikálních jasoměrů je založena na tom, že měří světelný tok procházející clonou určitého tvaru a velikosti. V rovině této clony se zobrazuje zorným polem vymezená ploška, jejíž jas se určuje. Zásadní konstrukční schéma takového přístroje je na obr. 5.12.2.



Obr. 5.12.2 Schematický náčrt konstrukčního uspořádání objektivního jasoměru, umožňujícího pozorovat okolí plošky, jejíž jas se měří. [68]

K obr. 5.12.2 objektiv 1 přístroje zobrazuje měřený záběr na plošku 2, na které je možno pozorovat obraz přes zrcátko 3 a optiku 4 okulárem 5. Do jeho zorného pole se zobrazuje i údaj stupnice měřicího přístroje 6. Ve stínítku 2 je otvor, kterým projde světlo z měřené plošky pomocnou optikou 7 a filtry 8 (barevné i šedé pro změnu rozsahu) na fotočlánek 9, jehož proud se po zesílení přivede do měřicího přístroje. Velikosti otvorů v zrcadlech se obvykle volí tak, aby odpovídaly zorným polím o úhlech 6', 15', 30', 1° a 2°. Podle mezinárodního doporučení CIE se jasoměry člení do čtyř tříd přesnosti označených písmeny L, A, B a C. Uvedeným třídám přesnosti odpovídají největší celkové přípustné chyby jasoměru 5; 7,5; 10 a 20%. $0,05 \text{ cd.m}^{-2}$ (resp. lx). Výrobce udává přesnost přístroje $\pm 5 \%$. Německá firma Lichtmesstechnik Berlin, jejíž jasoměr série L 1009 (viz obr.5.12.3) je vybaven clonami 3°, 1°, 20', 6', popřípadě dokonce 2', resp. 2'x 20', digitálním měřicím přístrojem umožňujícím měření jasů v rozmezí od $0,0001 \text{ cd.m}^{-2}$ do $19.990 \text{ kcd.m}^{-2}$, dále výstupem BCD, popřípadě interfacem IEEE-488, takže je umožněna přímá spolupráce přístroje s počítačem, resp. výstup na tiskárnu.



Obr. 5.12.3 jasoměr série L 1009 německé firmy Lichtmesstechik Berlin [88]

Důležité je měření jasů ve veřejném osvětlení. Průměrný jas povrchu vozovky se měří objektivními jasoměry vybavenými vhodnými clonami (odpovídajícími šířce kontrolované komunikace), a to z místa pozorovatele, které se předpokládá 1,5 m nad vozovkou v 1/4 šířky komunikace ve vzdálenosti 60 m před měřeným úsekem dlouhým 100 m. V této situaci odpovídá nejmenší měřená plocha na vozovce i při kruhové cloně jasoměru 6' ploše elipsy s malou osou asi 0,17 m a s velkou osou asi 12 m.

Proto je volba tvaru a velikosti clony tak závažná. Vesměs se pro tyto účely dává přednost clonám obdélníkovým před kruhovými. Minimální a maximální hodnoty jasu povrchu komunikace se zjišťují z měření jasu ve stejném poli kontrolních míst jako při měření intenzity osvětlení. Clona jasoměru se volí tak, aby měřená plocha byla co nejmenší a nezasahovala do sousedních měřených míst. Provede-li se takto podrobné měření, stanoví se průměrný jas povrchu vozovky jako aritmetický průměr z hodnot jasů naměřených ve zmíněné síti kontrolních míst. Jas se měří vždy na suchém povrchu vozovky, u které jsou již ustáleny odrazné vlastnosti. To obvykle bývá až asi po roce běžného provozu.

Pro podrobné proměření jasů v mnoha bodech na komunikaci jsou vhodné jasoměry, které umožňují měřit jas z jedoucího automobilu při automatické registraci naměřených hodnot. Toto umožňují například jasoměry s kmitajícím zrcátkem, které při kmitočtu kývání zrcátka 5 Hz, rychlosti automobilu asi 55 km.h-1, šířce vozovky 10 m, registrují každou setinu sekundy jednu hodnotu, čímž zajistí návaznost měření jak v podélném, tak i v příčném směru vozovky. Jiný způsob zjištění rozložení jasů na povrchu vozovky využívá obrazu snímaného televizní kamerou a hodnoceného na monitoru. Nepřímá metoda určení jasů povrchu vozovky je založena na zjištění jasového součinitele osvětlení $eL_p = E_p / L_p$ z vypočtených (bodovou metodou) průměrných hodnot intenzity osvětlení a jasů v celém rozsahu sledovaného pole kontrolních míst a poté výpočtu hledané průměrné hodnoty jasů L_{pt} z průměrné, z naměřených hodnot určené, intenzity osvětlení E_{pt} z výrazu $L_{pt} = E_{pt} / eL_p$. Jasový součinitel intenzity osvětlení eL_p platí ovšem pouze pro podmínky, v jakých byl stanovený, to znamená pro určité geometrické uspořádání osvětlovací soustavy, daná svítidla a zdroje a jen pro konkrétní povrch vozovky. [68]

6. Zpracování výsledků měření u svítidel veřejného osvětlení

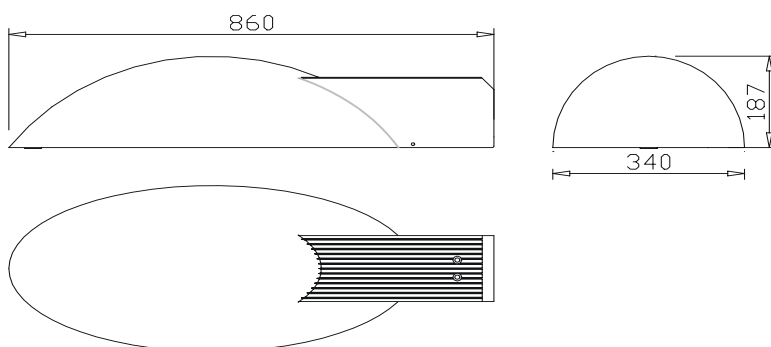
Výsledky měření u svítidel veřejného osvětlení se zpracovávají do různých typů grafů.

Jako příklad je zde uvedeno svítidlo veřejného osvětlení NWS 131/1x150W Ko. Jedná se o moderní typ svítidla, které je vyrobeno jako tlakový odlitek ze slitiny hliníku.

Systém optiky svítidla je tvořen hliníkovým eloxovaným leštěným fasetovým zrcadlem.

Jako zdroj je použita vysokotlaká sodíková výbojka o výkonu 150W.

Svítidlo se používá zpravidla, jako svítidlo komunikační tzn. k osvětlení dopravních komunikací.

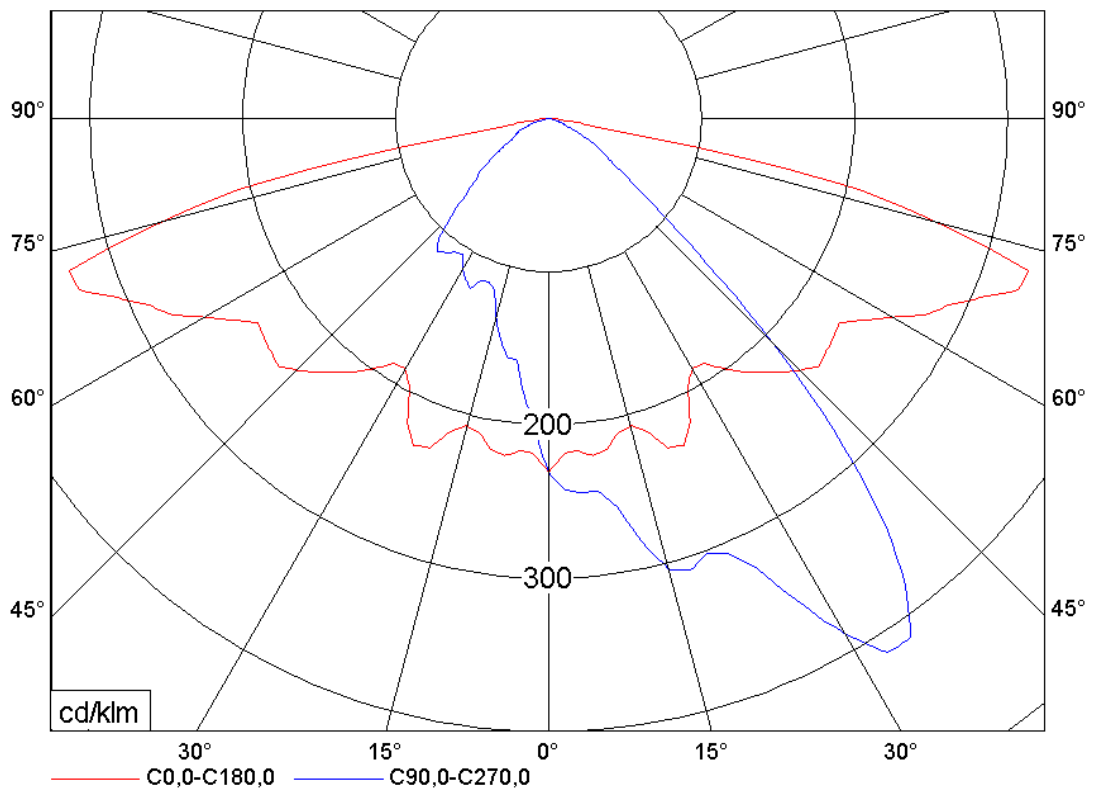


Obr. 6.1 schématický náčrt svítidla NWS 131/1x150W Ko [10]

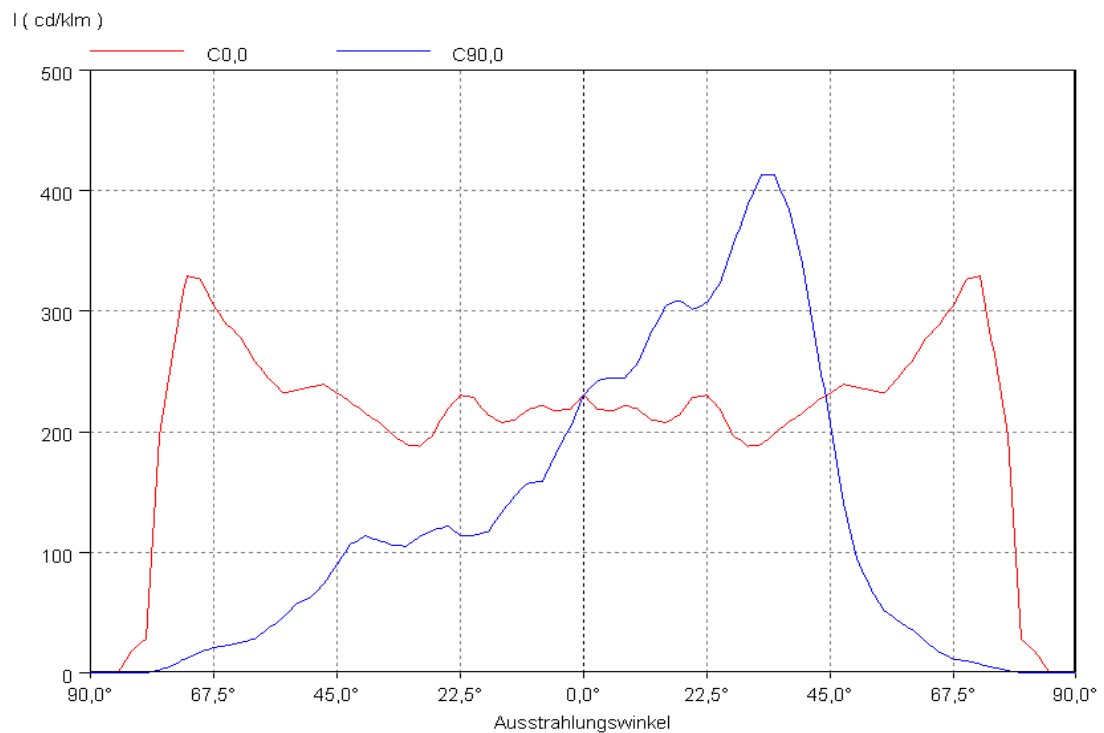
gamma/°	C 0	C 3	C 5	C 8	C 10	C 13	C 15	C 18	C 20	C 23	C 25	C 28	C 30	C 33	C 35	C 38	C 40	C 43	C 45
	C 180	C 178	C 175	C 173	C 170	C 168	C 165	C 163	C 160	C 158	C 155	C 153	C 150	C 148	C 145	C 143	C 140	C 138	C 135
0	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9
5	217,2	218,2	218,5	216,2	217,3	214,1	214,1	216,1	217,1	219,1	219,1	218,9	227,0	227,4	237,4	236,3	243,1	240,7	245,6
10	218,7	228,3	223,8	223,4	221,7	220,9	217,1	214,0	211,8	213,3	212,4	210,2	209,7	214,0	223,3	226,9	228,7	238,3	239,8
15	207,5	222,0	232,2	240,7	238,3	240,4	236,7	236,9	232,4	232,1	233,5	234,9	236,6	236,0	236,1	238,7	242,9	252,7	258,4
20	228,4	219,5	233,2	253,5	262,9	262,9	264,2	264,6	265,1	262,3	269,8	261,6	265,5	265,1	266,7	265,6	273,8	276,8	277,5
25	218,4	242,2	231,1	244,5	267,2	273,2	268,9	274,7	277,9	268,9	265,0	272,8	268,0	276,5	287,6	290,4	296,0	300,0	302,6
30	188,0	233,5	236,1	217,7	239,2	249,6	246,6	250,5	254,4	239,6	234,1	239,9	235,4	239,7	256,6	265,3	281,9	293,9	298,1
35	196,8	196,8	246,6	231,5	210,2	220,3	235,2	239,8	233,1	235,4	230,0	228,8	220,5	213,3	223,5	231,6	245,3	253,8	258,0
40	215,5	188,4	223,5	246,5	220,1	210,1	225,4	239,6	242,4	251,3	257,2	261,2	262,2	262,8	266,7	262,1	266,6	269,1	254,0
45	232,1	205,1	202,1	230,3	248,8	237,0	231,4	255,3	268,3	274,3	277,5	281,4	287,0	285,7	284,8	271,4	274,3	265,5	264,7
50	236,9	242,7	221,7	244,3	278,2	292,3	279,7	291,7	316,5	320,5	312,8	311,5	316,5	303,7	299,0	266,3	262,2	224,5	236,2
55	232,2	268,5	268,0	291,9	325,2	356,5	368,8	380,9	385,0	391,6	366,6	349,5	324,5	311,2	291,8	253,0	234,0	198,6	197,2
60	258,8	286,1	315,3	354,5	372,6	399,0	397,0	426,0	407,8	434,3	384,3	376,8	317,1	300,0	262,1	226,0	196,1	177,0	165,0
65	288,5	324,3	368,0	403,0	436,0	439,2	440,7	426,0	396,2	369,2	311,7	273,3	223,6	209,4	165,0	155,9	133,1	125,9	119,9
70	326,8	402,2	439,3	458,0	442,5	473,9	445,6	388,1	309,5	229,4	166,5	127,9	101,8	98,9	87,8	91,0	80,7	81,4	76,4
75	264,4	322,0	341,3	343,7	333,5	330,7	298,8	238,8	159,8	104,5	62,0	41,2	27,5	29,2	25,4	30,4	30,0	31,0	30,3
80	26,3	28,1	27,9	28,5	28,1	28,3	28,1	28,1	18,4	13,7	1,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
85	1,0	3,5	1,1	2,7	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
90	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabulka 6.1 naměřené hodnoty svítidla NWS 131/1x150W Ko

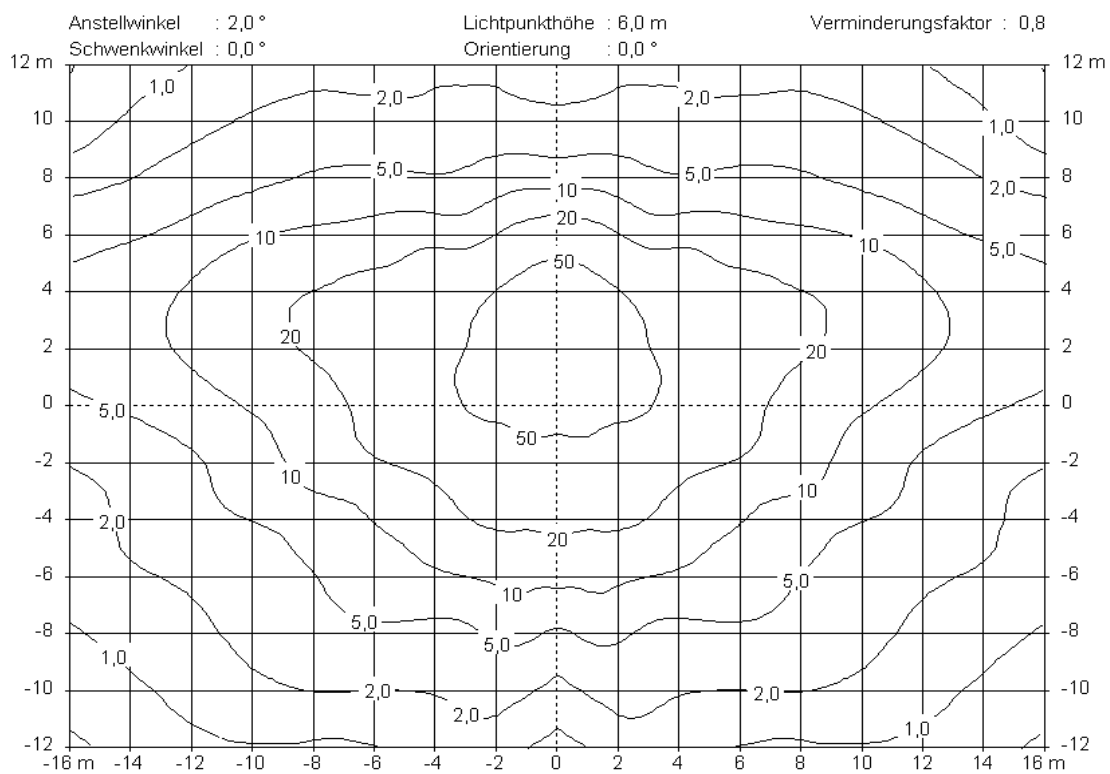
Hodnoty uvedené v tabulce byly naměřené v laboratořích firmy HELLUX ELEKTRA GmbH



Obr. 6.2 polární graf zpracovaný na základě naměřených hodnot v tabulce 6.1 [10]

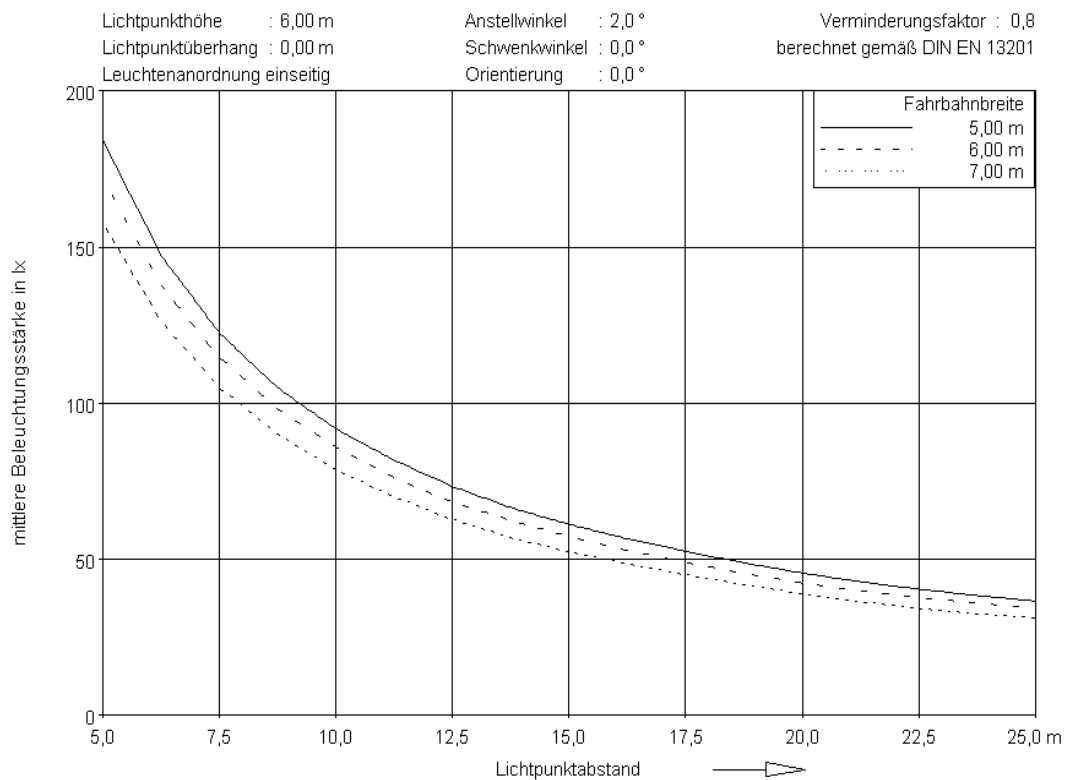


Obr. 6.3 Kartézský diagram zpracovaný na základě naměřených hodnot v tabulce 6.1 [10]

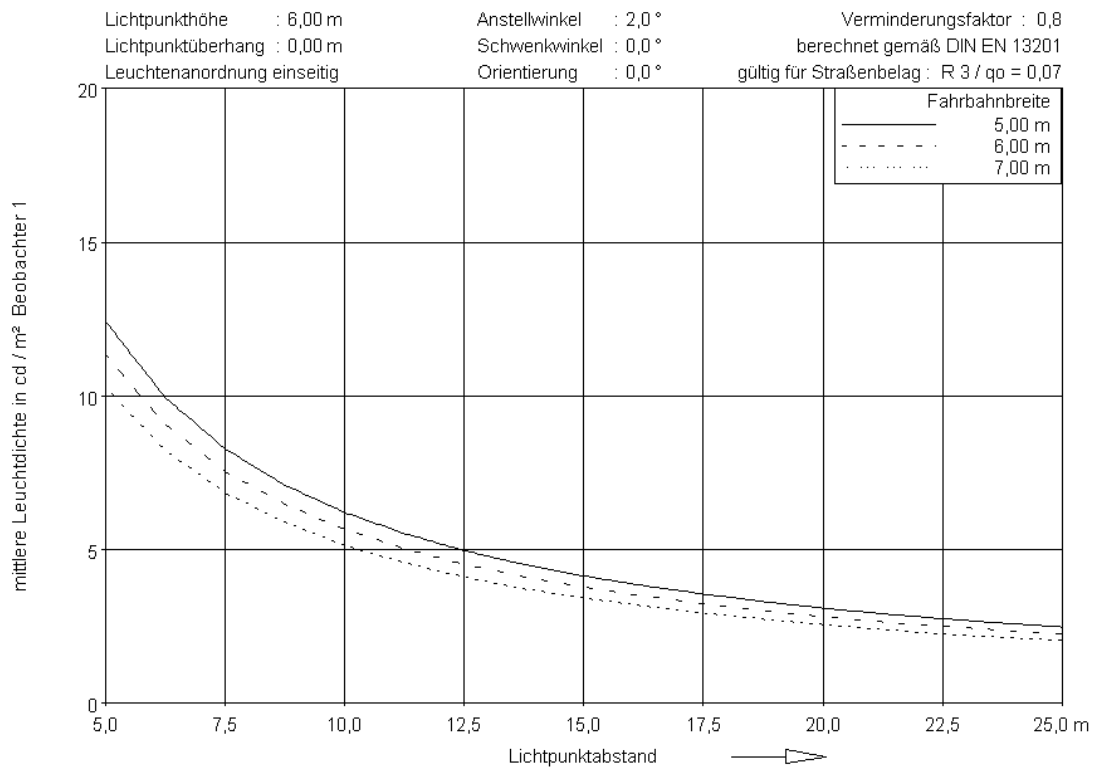


Obr. 6.3 Isolux diagram zpracovaný na základě naměřených hodnot v tabulce 6.1

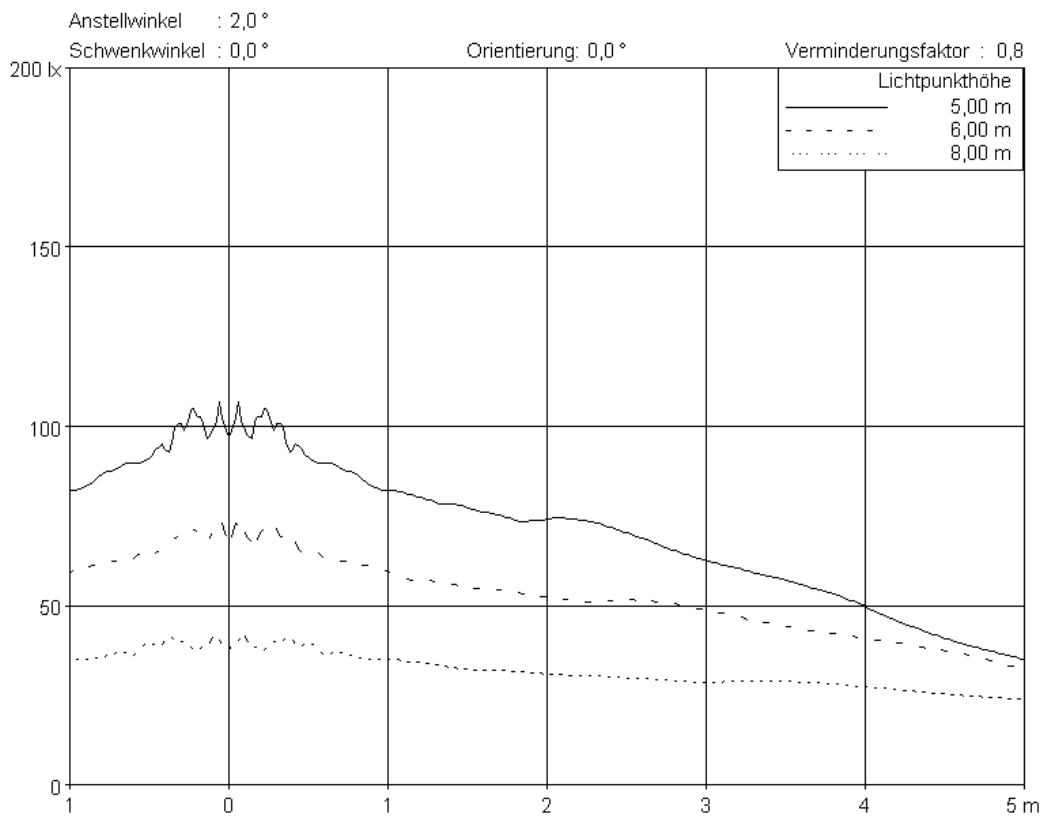
[10]



Obr. 6.4 křivka intenzity osvětlení pro svítidlo NWS 131/1x150W Ko [10]



Obr. 6.5 křivka jasu pro svítidlo NWS 131/1xW Ko [10]

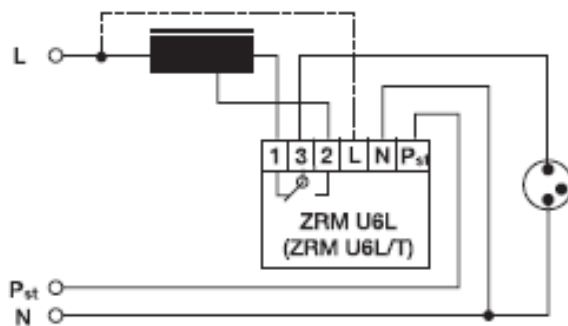


Obr. 6.6 křivka intenzity osvětlení pro svítidlo NWS 131/1xW Ko [10]

7. Optimalizace výkonu veřejného osvětlení

Optimalizace výkonu veřejného osvětlení spočívá v zásadě na řízeném snížení výkonu.

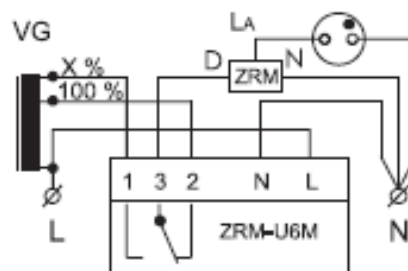
Snížení výkonu svítidel se děje pomocí přepínače výkonu, který přepíná na vyšší nebo nižší výkon předřadníku ve svítidle. Přepínače jsou ovládány dálkově pomocí tzv. ovládací fáze nebo pomocí vnitřních hodin, které jsou integrovány do přepínače výkonu. Tyto přepínače výkonu pak nepotřebují ovládací fázi a mohou být použity ve stávajících rozvodech veřejného osvětlení. Vnitřní hodiny se nastavují na spínání buď ručně na každém jednotlivém přepínači, nebo skupinově. Při hromadném nastavení se hodiny nastavují automaticky podle času zapínání a vypínání veřejného osvětlení.



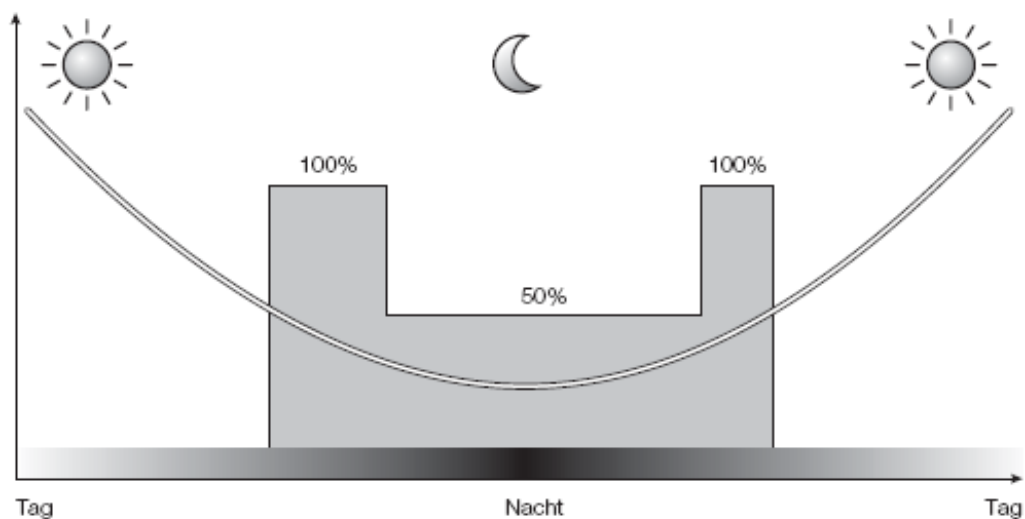
Obr. 7.1 Zapojení výkonového přepínače ZRM U6LT přepínaného pomocnou fází P_{st} [87]



Anschlussdiagramm ZRM U6M A001:



Obr. 7.2 Výkonový přepínač ZRM U6M A001 přepínaný pomocí vnitřních hodin [87]



Obr. 7.3 Schéma plného a redukovaného výkonu svítidla při nasazení výkonového přepínače ZRM U6M A001 během dne a noci. [87]

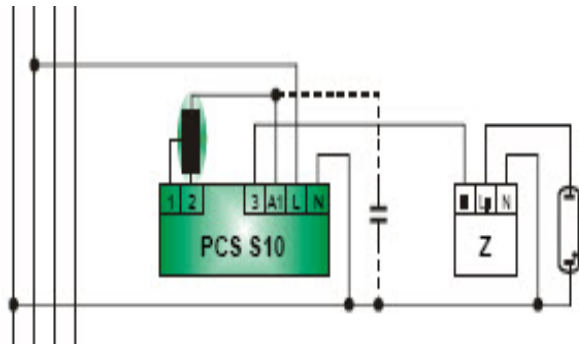
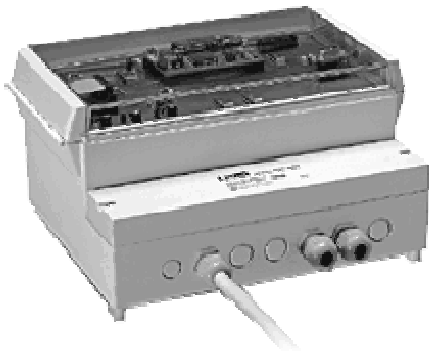
7.1 Systém Lixos

Systém Lixos od firmy Vossloh-schwabe GmbH umožňuje adresné snížení výkonu veřejného osvětlení. Lixos je regulátor výkonu a servisní systém, který tvoří inovační soustavu k adresnému časovému řízení a dohledu, buď u jednotlivých osvětlovacích bodů veřejného osvětlení, nebo u osvětlovacích skupin veřejného osvětlení a u podobných venkovních osvětlovacích zařízení. V městských obvodech je možné společně programovat objektové a pouliční osvětlení. Tím vznikne synergický účinek, který jednak zlepší vzhled města a na druhé straně přinese důslednou úsporu energie. Pro venkovní osvětlení v průmyslu a v dopravě může být naplánováno hospodárné nastavení. Bude tak zajištěno, že jak provozní tak technické osvětlení pracovišť bude snadno zajištěno a rovněž také noční bezpečnostní osvětlení bude provozováno úsporně. Při řídicím vedení je ještě potřebný řídicí vysílač a pak se může tento moderní způsob řízení osvětlení použít jak u nových zařízení, tak i u sanace stávajících zařízení. Úspory jsou dosaženy přizpůsobením osvětlení světelným poměrům a času u jednotlivých objektů, zmenšením nákladů na údržbu a zjišťování poruch jednotlivých svítidel. Lixos umožňuje funkční zkoušku svítidla nebo skupin svítidel.

Zajišťuje i adresnou výměnu nefunkční výbojky svítidla. Systém Lixos pracuje na základě využití jednoho řídicího zařízení tzv. „Master“ a pomocných zařízení tzv. „Slave“. [83]

Celý systém je tvořen čtyřmi prvky.

- Master typ PCS M01 (s integrovanými hodinami reálného času) vložený do skříňového rozvaděče veřejného osvětlení.
- Slave typ PCS S10 vložený ve svítidle nebo v patě stožáru a předřadník s dvouvýkonovým stupněm nebo dodatečnou impedancí, vysokotlaká výbojka 5-400 W
- soumrakový spínač, který uvede do chodu zařízení v závislosti na existující intenzitě osvětlení
- Notebook nebo PC k programování zařízení Master



Obr. 7.4 Master typ PCS M01 [83]

Obr. 7.5 Slave PCS S10 schéma zapojení [83]

Příklad řízení osvětlovacího zařízení k nastavení dvou svítidel veřejného osvětlení:

možné rozvodné stavy:

- | | | |
|-----|-----|------------------------|
| (0) | ⊗ ⊗ | - vypnuta obě svítidla |
| (1) | ⊗ ⊗ | - svítí svítidlo 1 |
| (2) | ⊗ ⊗ | - svítí svítidlo 2 |
| (3) | ⊗ ⊗ | - svítí obě svítidla |
| | | |
| (0) | ⊗ | - vypnuté svítidlo |
| (1) | ⊗ | - redukovaný výkon |
| (3) | ⊗ | - plný výkon |

Při projektování osvětlení případně sanování venkovního a pouličního osvětlení jsou určena realizované vlastnosti osvětlení pro různá místa, objekty a časová období. Ke každému jednotlivému osvětlení je přidružena hardwarová adresa (servis-adresa).

Mimo to je stanoveno, která svítidla jsou odpovědná pro požadované osvětlení a jaký stav zapojení svítidla je v určitém období nutný. Svítidlům, která pracují ve stejném pracovním režimu, je přidělena stejná software-adresa (skupinová adresa). Například ranní osvětlení školní cesty bude plným výkonem a ostatní pouliční osvětlení bude provozováno na redukováný výkon. Potřebná data pro stav zapojení a řadicí časový bod (pracovní režim) jsou zadány jednoduchým PC-programem a přeneseny do správce. Po spuštění soumrakového spínače programuje správce denně jednotlivé Slaves pro přepínací činnost v následujícím osvětlovacím cyklu.

.To znamená v jednotlivých krocích

- Jednotlivá svítidla mohou být spojena do osvětlovacích skupin
- Maximálně 7 osvětlovacích skupin náleží k jednomu osvětlovacímu zařízení.
- Osvětlovací zařízení je řízeno centrálně správcem.
- V každé ze 7 osvětlovacích skupin může být naprogramováno maximálně 8 spínání osvětlovacích cyklů
- Správce dá každému ve svítidle instalovanému Slave informaci k provedení spínacího povelu pro svítidlo a spínací čas:
 - svítidla / svítidlo vypnout.
 - plný výkon zapnout.
 - redukováný výkon zapnout.
 - svítidla / svítidlo vypnout.
- Spínání je centrálně pro všechny osvětlovací zařízení (všech 7 osvětlovacích skupin)
- Informací je digitální amplitudová modulace na momentálně nezatíženém osvětlovacím vedení. Připojený výkon svítidla je omezený ze strany zařízení jen použitou kapacitou tzn. průřezem kabelu a stykačem.
- V zapnutém stavu zařízení je správce odpojený.
- Programování správce pomocí PC případně Notebooku se vyskytuje poprvé u instalace Lixos . Programování může být aktualizováno kdykoli je zapotřebí změnu osvětlení, nebo rozšíření osvětlovacího zařízení. [83]
- Start denního (nočního) osvětlovacího cyklu následuje nejčastěji přes měření intenzity osvětlení pomocí soumrakového spínače. Čas startu je přizpůsoben prostřednictvím vestavěných hodin reálného času.

□ Start v reálném čase je možný.

Pro provedení zkoušky pro maximálně 255 svítidel nebo osvětlovacích skupin, jsou přiměřeně rozděleny hardware-adresy. Vyzkoušení může být pravidelně k pevné době nebo může být prováděno spontánně.

To znamená v jednotlivých krocích:

□ V začátku provozování zařízení je každé svítidlo přeměřeno provozním proudem a výsledek je zaprotokolován.

□ Během krátké-zkoušky jsou všechna přidružená svítidla jedno po druhém podrobená rychlému testu, který trvá cca. 40 sekund a je změřen el. proud svítidla.

□ Výsledky měření jsou srovnány s počáteční hodnotu při začátku provozu.

□ Při odchylce dat následuje funkční test příslušné hardware-adresy, který trvá asi 5 minut.

□ Tento dlouhý test poruchového svítidla, je uložen v paměti.

□ Servisní technik pak může provést adresnou výměnu výbojky.

7.2 Příklady aplikace systému Lixos

Osvětlovací zařízení města v zobrazení na [obr.7.6](#) se skládá z 44 svítidel. Každé toto svítidlo dostane hardware-adresu 1 – 44, která současně definuje stanoviště. Svítidla jsou rozděleny v 7 skupinách se skupinovou adresou (software-adresy) 1 – 7. Mezitím co u skupin 1; 2; 3; 4 a 5 mají všechna svítidla jednu software-adresu se stejným osvětlovacím programem, není současně provozováno osvětlení u skupin 6 a 7 tržního náměstí a pomníku. Svítidla také mohou být zřetězená ve větších skupinách [obr. 7.7](#).

V tomto příkladu tvoří postranní ulice jednu skupinu, křižovatka, přechod pro chodce druhou skupinu a osvětlení a osvětlení tržního náměstí další skupinu. Další příklad [obr. 7.8](#) ukazuje městské jádro s 6 osvětlovacími skupinami (skupinovými adresami). Osvětlovací skupiny jsou řízeny v osvětlovacím režimu podle znázornění [obr. 7.8](#) v redukovaném výkonu ve znázorněném čase. Tím se dosáhne úspora energie asi 30% a to je znázorněno na [obr. 7.9](#). [83]



Abbildung 3

Bereich	Kreuzung	Hauptstraße	Nebenstraße 1	Nebenstraße 2	Fußgängerüberweg	Markt	Anstrahlung
Gruppenadresse	1	2	3	4	5	6	7
Uhrzeit / Schalt-handlung	HS 1 x 250 W	HS 1 x 150 W	HM 1 x 125 W	HM 2 x 80 W	NAN 1 x 35 W	Kompakt – LL 1x 36 W	HS 1 x 400 W
16.35	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗		⊗ ⊗ 38 40	⊗ ⊗ 35 36
23.00	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗		⊗ ⊗ 39 41 42	⊗ ⊗ 37
24.00	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗ ⊗
5.00	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗		⊗ ⊗ 38 40 39 41 42	⊗ ⊗ 35 37
5.30	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗			
8.00	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗	⊗ ⊗ 38 40 39 41 42	⊗ ⊗ 35 37

Obr. 7.6 příklad řízeného osvětlení pomocí systému Lixos [83]



Abbildung 4

Bereich	Kreuzung	Fußgängerüberweg	Hauptstraße	Nebenstraße 1	Nebenstraße 2	Markt	Anstrahlung
Gruppenadresse	1		2	3		4	
Uhrzeit / Schalthandlung	HS 1 x 250 W	NAN 1 x 35 W	HS 1 x 150 W	HM 1 x 125 W	HM 2 x 80 W	Kompakt-LL 1 x 36 W	HS 1 x 400 W
16.35	⊗		⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗ ⊗ 38 40 39 41	⊗ ⊗ 35 36 37 42
23.00	⊗		⊗				
24.00	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗ ⊗ 38 40 39 41	⊗ ⊗ 35 36 37 42
5.00	⊗		⊗	⊗	⊗ ⊗		
5.30	⊗		⊗	⊗	⊗ ⊗	⊗ ⊗ 38 40 39 41	⊗ ⊗ 35 36 37 42
8.00	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗ ⊗ 38 40 39 41	⊗ ⊗ 35 36 37 42

Obr. 7.7 příklad řízeného osvětlení pomocí systému Lixos [83]

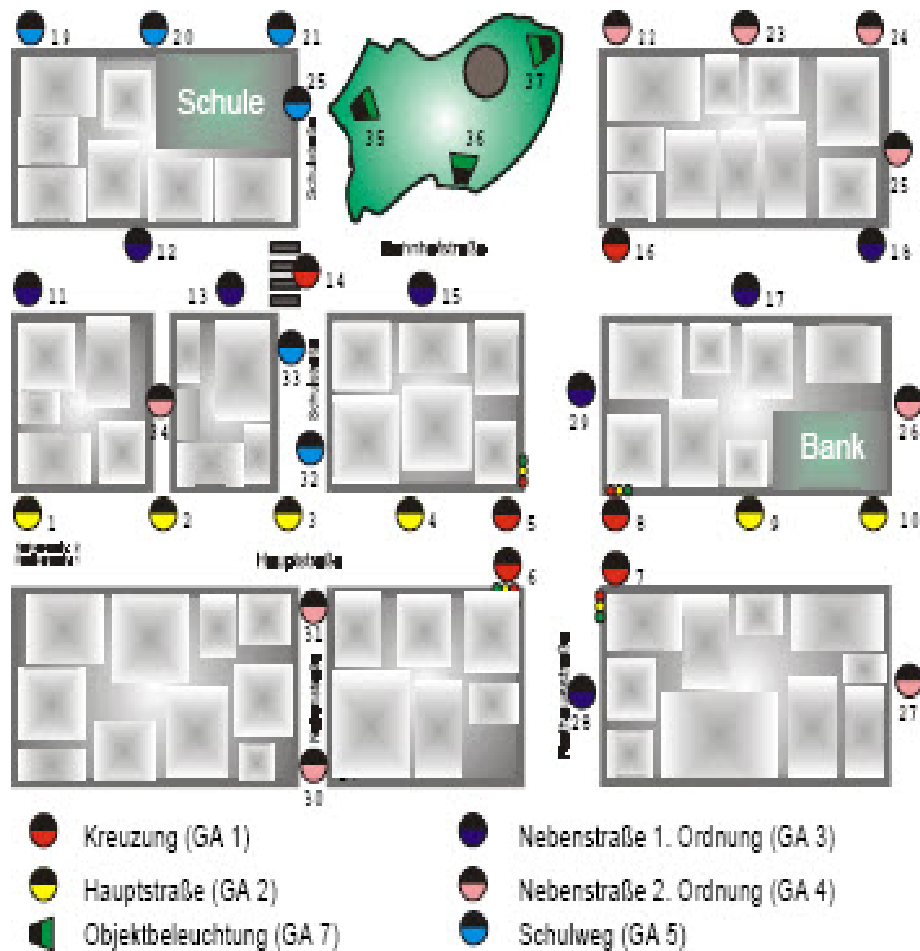
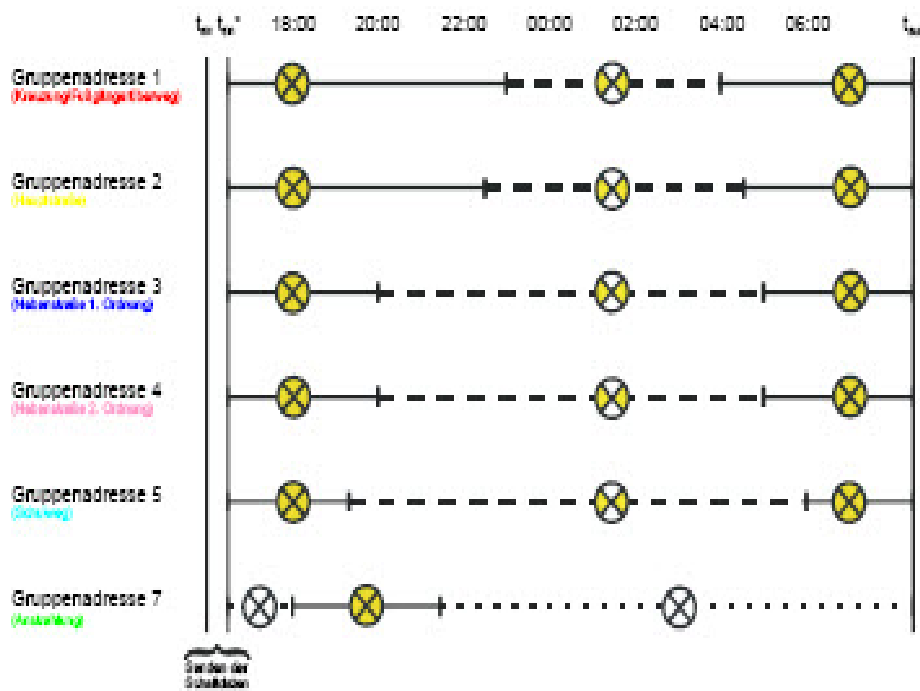
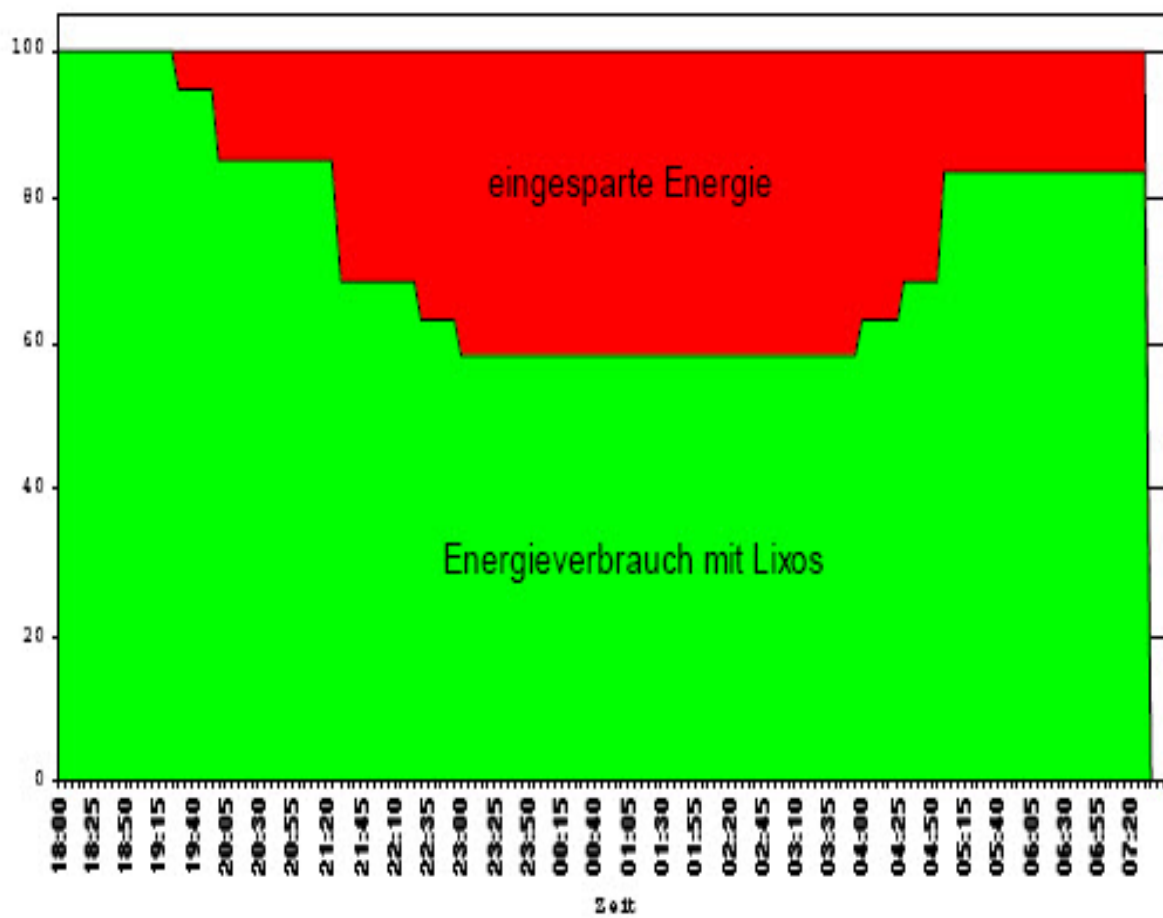


Abbildung 5



Obr. 7.8 příklad řízeného osvětlení pomocí systému Lixos [83]



Obr.7.9 spotřeba energie se systémem Lixos znázorněna zeleně a uspořená energie znázorněna červeně [83]

Závěr

Tato práce si nečiní nároky na nějaké objevné a nové pohledy na měření fyzikálních veličin. Je spíše shrnutím dosavadních metod a postupů měření, které umožňuje zobrazení problematiky měření a jeho náročnosti jak na sumu teoretických znalostí tak i vysokých nároků na měřicí přístroje a především na kalibraci těchto měřidel. Ukazuje se, že zvyšováním přesnosti měření a přesným zpracováním jeho výsledků je možno při aplikaci těchto výsledků do praxe, dosáhnout značných úspor jak energií, tak i použitých materiálů. V neposlední řadě se ukázalo, že v dnešní době je již neodmyslitelnou a nepostradatelnou součástí při zpracování jakéhokoli tématu využití informací z webových stránek umístěných na internetu.

Seznam použité literatury

- [1] Augusta, P., Klůna, J.: Tajemství přesnosti. SNTL- Nakladatelství technické literatury, Praha 1990.
- [2] Šnajberk, M., Dynybyl, V.: Jednotky SI a jejich historický kontext. Vydavatelství ČVUT, 1. vyd., Praha 2002.
- [3] Šindelář, V., Smrž, L., Beťák, Z. : Nová soustava jednotek. SPN 1989.
- [4] Trapp, W.: Kleines Handbuch der Masse, Zahlen, Gewichte und der Zeitrechnung: mit Tabellen und Abbildungen. Komet Verlag GMBH, Koeln 1998.
- [5] Haasz, V., Sedláček, M.: Elektrická měření: přístroje a metody. ČVUT, Praha 1998.
- [6] Pavlíček, I.: Návrh a výpočet umělého osvětlení: doplňkové skriptum. ČVUT, 1994
- [7] Bystřický, V., Kaňka, J.: Osvětlení. ČVUT Praha 1997.
- [8] Hora, P.-Hořejš: Toulky Českou minulostí 5. Baronet & Via Facti 1996
- [9] Quality Centrum, spol.s.r.o.: Metrologie 9.9.2004
- [10] HELLUX ELEKTRA s.r.o.: Katalog výrobků 01/08 CD

Použité webové stránky z Internetu.

- [11] <http://www.mmspektrum.com/novinka/bezkontaktni-radar-pro-mereni-vysky-hladiny-sypkych-latek>(5.9.2008)
- [12] <http://si.vega.cz/clanky/laserova-technika-na-veletrhu-ibf--brno/>(5.9.2008)
- [13] <http://si.vega.cz/clanky/technologie-3d-skenovani/>(5.9.2008)
- [14] <http://www.automatizace.cz/article.php?a=988>(5.9.2008)
- [15] <http://www.renishaw.com/media/pdf/cs/974152aec9c343f0ad1b15ed579c392a.pdf> (5.9.2008)
- [16] <http://www.arsci.cz/stahuj/Fyzika3-115-121.pdf>(5.9.2008)
- [17] <http://search.seznam.cz/?q=interferometrie&pId=WpWEuStJoF2K&count=10&from=21>(5.9.2008)
- [18] http://cquark.fjfi.cvut.cz/publications/MSchulc_bakal.pdf(5.9.2008)
- [19] http://webfyzika.fsv.cvut.cz/MFiles/Vyukovy_software/Help_interferometry.pdf
- [20] http://kfe.fjfi.cvut.cz/kfe/cz/vyuka/docs/anotace/kfe_cz.pdf(5.9.2008)
- [21] <http://www.h.amu.cz/zvuk/studio/dokumenty/Lit136.pdf>(5.9.2008)
- [22] http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/matlab05/prispevky/miks/miks3.pdf(5.9.2008)
- [23] http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/met_geom%20.pdf(5.9.2008)
- [24] <http://artin.zcu.cz/courses/dpz/DPZ-051130.pdf>(5.9.2008)
- [25] http://www.zslado.cz/vyuka_fyzika/Projekt_-_laboratorni_prace/6_trida/mereni_hmotnosti.pdf(5.9.2008)
- [26] http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/hmotnost/ramce_hmotnost.htm

- [27] http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/MET_CASU_P.pdf(5.9.2008)
- [28] http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/05_ekonomika%20a%20rizeni%20stavebnictvi/5_02_ekonomika%20stavebniho%20podniku/mikusova_marie.pdf(5.9.2008)
- [29] <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/86.pdf>(5.9.2008)
- [30] http://www.unmz.cz/cz/20/plan_2008.pdf(5.9.2008)
- [31] <http://frailea.chmi.cz/BR/metspol/seminar/PDF/Mrkvica.pdf>(5.9.2008)
- [32] <http://mereni.navajo.cz/>(5.9.2008)
- [33] http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_1/Kopkane_Daniel_CL.pdf(5.9.2008)
- [34] http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/171_uvmet%2007.doc(5.9.2008)
- [35] http://hgf.unas.cz/mereni_delek.doc(5.9.2008)
- [36] <http://fyzika.gymjs.net/zfm/Zfm.pdf>(5.9.2008)
- [37] http://www.mti.tul.cz/files/elo/lab00_zaklady_mereni.pdf(5.9.2008)
- [38] http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/MET_CASU_P.pdf(10.9.2008)
- [39] http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf(10.9.2008)
- [40] http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/dte/texty/6-1-2_i.doc(10.9.2008)
- [41] <http://www.ped.muni.cz/wphy/prirodoveda/texty/soustava%20si%20a%20mereni%20fyzikalnich%20velicin.doc>(10.9.2008)
- [42] <http://www.gsh.cz/svp/F/Fprima.pdf>(10.9.2008)
- [43] http://www.learned.cz/files/prednasky/svatopluk.krupicka_0207.pdf(10.9.2008)
- [44] http://www.businessinfo.cz/files/2005/061019_jakost-moderni-potreba.pdf(10.9.2008)
- [45] <http://www.vutium.vutbr.cz/fyzika/first.pdf>(10.9.2008)
- [46] <http://homel.vsb.cz/~ruc060/Soubory/KAPIT7.pdf>(10.9.2008)
- [47] http://hgf.unas.cz/mereni_delek.doc(10.9.2008)
- [48] <http://home.zcu.cz/~krizek4/zcu/podklady/MT01.pdf>(10.9.2008)
- [49] <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>(10.9.2008)
- [50] http://www.kip.zcu.cz/kursy/svt/svt_texty.doc(10.9.2008)
- [51] http://dce.felk.cvut.cz/zri/skripta/POZNAMKY_K_PREDNASCE1.doc(10.9.2008)
- [52] <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni.pdf>(19.10.2008)
- [53] <http://www.statspol.cz/request/request2006/sbornik/cezova.pdf>(19.10.2008)
- [54] <http://ct.upce.cz/aid/anotace/A52X163.doc>(19.10.2008)
- [55] http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/kyvadlo.pdf(19.10.2008)
- [56] <http://presny-cas.wz.cz/atomove-hodiny.html> (19.10.2008)
- [57] <http://presny-cas.wz.cz/historie.html> (19.10.2008)
- [58] <http://www.czechspace.cz/cs/galileo/technologie/atomove-hodiny> (19.10.2008)
- [59] http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_clock (19.10.2008)
- [60] <http://physics.nist.gov/GenInt/Time/time.html> (19.10.2008)
- [61] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1960/libby-bio.html(19.10.2008)
- [62] http://en.wikipedia.org/wiki/Willard_Libby(19.10.2008)
- [63] http://www.powerwiki.cz/attach/EST/1_pr_EST_zakl_pojmy.pdf(19.10.2008)
- [64] <http://search.seznam.cz/?q=jas%20sv%20C4%20Bteln%C3%BDch%20paprsk%C5%A>
[F](http://search.seznam.cz/?q=jas%20sv%20C4%20Bteln%C3%BDch%20paprsk%C5%A) (26.10.2008)

- [68]http://www.powerwiki.cz/attach/EST/2_pr_EST_fotometrie.pdf (27.10.2008)
- [69]http://www.powerwiki.cz/attach/EST/2_pr_EST_fotometrie.pdf (27.10.2008)
- [70]<http://aa.bosch.cz/download/Test-zarovek-Bosch-CZ.pdf> (27.10.2008)
- [71]http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni_301.pdf (27.10.2008)
- [72]<http://jan.gfxs.cz/studium/files/optika/spektrum.pdf> (27.10.2008)
- [73]<http://www.knyblova.czweb.org/semestralky/fptmm.pdf> (27.10.2008)
- [74]http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/externi/kat_fyz_0987/fotometrie.doc
(27.10.2008)
- [75]<http://www.knyblova.czweb.org/semestralky/fotometrie.pdf>
- [76]<http://www.med.muni.cz/biofyz/Dokumenty/Doplňkyhlavni.pdf>
- [77]<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce1/94.pdf>
- [78]http://www.vpmc.cz/normy/stahnout/NL_0207.pdf
- [79]<http://www.etm.cz/obr/mereniosvetleni.pdf>
- [80]http://www.ruse-europe.org/IMG/pdf/BRASOV_2.pdf
- [82]http://www.velux.cz/veluxcommon/resources/cache/72cfb1e0-c62d-4287-a85b-4383e4fd13b5_TZ-Mezi_konf_zast_bud_2004_color.pdf
- [83]<http://www.vossloh-schwabe.com/ger/produkte/lixos/>
- [84]<http://www.unimetra.cz/web/file.php?id=68>
- [85]<http://www.nastroje.cz/meridla/posuvna-meritka-katalog/digitalni-posuvna-meritka-s-hloubkomerem-a-rameny-pro-vnitri-mereni-2512381>
- [86]http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmv/hmotnost/hmotnost_definice.htm
- [87]http://www.tridonicatco.com/kms/media/uploads/catalogue_0809_de.pdf
- [88]<http://www.productpilot.com/en/suppliers/lmt-lichtme-technik-gmbh-berlin/162263/?status=product>
- [89]<http://www.prc-krochmann.de/>
- [90]http://www.ks-vahy.net/Download/Metrologie/Metrologie_v_kostce.pdf
- [91]<http://encyklopedie.seznam.cz/heslo/185644-fyzikalni-veliciny>
- [92]<http://www.it.pw.edu.pl/~ptomczuk/Dokumenty/Lighting%20Technology.pdf>