

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

NÁVRH KONSTRUKCE AUTOMATIZOVANÉHO GONIOFOTOMETRU, POLOHOVACÍHO ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ SVÍTIDEL.

DESIGN OF GONIOPHOTOMETER CONSTRUCTION FOR POSITIONING OF LUMINAIRES
DURING MEASUREMENT.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

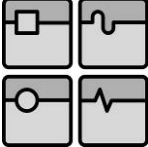
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR MINÁŘ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR BLECHA, Ph.D.

BRNO 2008

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 1
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním řešením goniofotometru. První část je věnována přehledu obecných druhů konstrukcí goniofotometru, jejich vlastnostem a metodám, používaným při měření. V další části je proveden návrh celého zařízení včetně univerzálního upínacího mechanismu a pohonu pro automatizované řízení.

Klíčová slova

Fotometrie, goniofotometr, upínací zařízení, tuhost rámu, automatizovaný pohon.

Abstract

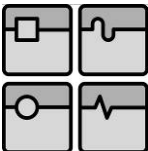
The main subject of this bachelor's thesis is to design goniophotometer construction for positioning of luminaires during measurement. First part deals with description of general goniophotometer constructions, their characteristic and methods, which are used for measuring. Second part deals with design of complete appliance including all-purpose chucking mechanism and drive, for automatic control.

Keywords

Photometry, goniophotometer, chucking mechanism, frame stiffness, automatic control drive.

Bibliografická citace

MINÁŘ, P. *Návrh konstrukce automatizovaného goniofotometru, polohovacího zařízení pro měření svítidel..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blecha, Ph.D.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 2
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Návrh konstrukce automatizovaného goniofotometru, polohovacího zařízení pro měření svítidel* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Blechy, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 20. května 2008

vlastnoruční podpis autora

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 3
	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Blechovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Baxantovi, Ph.D. za podmíněné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Obsah

1	Úvod	7
2	Přehled současných používaných goniofotometrů	8
2.1	Goniofotometr	8
2.2	Far- Field fotometrie	8
2.3	Near- Field fotometrie.....	9
2.3.1	Metoda LM-70 (Application Distance)	9
2.3.2	Metoda Luminance-field	10
2.4	Rozdělení goniofotometrů	10
2.4.1	Goniofotometr s rotujícím zrcadlem	10
2.4.2	Goniofotometr s otočným zdrojem světla a pevným snímačem	11
2.4.3	Goniofotometr s otočným snímačem a pevným zdrojem světla	12
3	Návrh konstrukce	13
3.1	Univerzální upínací zařízení	14
3.1.1	Rameno upínáku	14
3.2	Koncové sklíčidlo.....	16
3.2.1	Vidlice se šroubem	16
3.2.2	Závitová vložka	16
3.2.3	Spojka	17
3.2.4	Materiál	17
3.3	Rám a lineární vedení	17
3.4	Podstavec	19
3.4.1	Svařenec.....	19
3.4.2	Otočný stůl	20
4	Pohon	21
4.1	Krokový servomotor (krokový motor) versus spojitý servomotor	21
4.2	Pohon horizontální osy	24
4.3	Pohon vertikální osy	25
4.4	Elektroinstalace a řízení	26
4.4.1	Kabeláž	26
4.4.2	Bezpečnostní prvky.....	27
4.4.3	Řízení.....	27
5	Parametry navrženého goniofotometru	29
6	Závěr.....	31
7	Seznam použitých zdrojů	33
8	Seznam použitých symbolů	36
9	Seznam obrázků	37
10	Seznam příloh.....	39

1 Úvod

Zařízení, skrývajícím se pod názvem goniofotometr, je přístroj, pomocí kterého je možné měřit svítivost svítidla. Toto zařízení pracuje na základě nezávislé rotace svítidla ve dvou osách: horizontální a vertikální. Jeho úkolem je tedy s ním pevně a spolehlivě rotovat. Na trhu existuje několik málo výrobců, kteří goniofotometr komerčně vyrábějí, avšak požadavky na něj jsou ve většině případů natolik speciální, že v tomto oboru nelze dost úspěšně realizovat sériovou výrobu a výrobu je třeba přizpůsobit konkrétním požadavkům zákazníka. Zákazníky jsou většinou firmy vyrábějící světelná zařízení nebo laboratoře výzkumných ústavů.

Název goniofotometr naznačuje spojení s oborem fotometrie. Ta je částí optiky, která se zabývá zkoumáním viditelného spektra světelného záření, měřením vlastností světla a jeho energetickým obsahem. Veličiny, které jsou výsledkem těchto měření, se označují jako veličiny fotometrické a jsou to např. svítivost zdroje, světelný tok, světelná energie a osvětlení. Fotometrie je tedy obor, který se zabývá působením světla na lidský zrakový orgán, lidské oko. Jedním z přístrojů, který se používá pro měření těchto charakteristik a konkrétně svítivosti, je právě goniofotometr, který měří svítivost světelného zdroje.

Optika má na našem území dlouhou historii. Datuje se už od roku 973, kdy bylo založeno pražské biskupství a zejména pak od založení pražské univerzity roku 1348 králem Karlem IV. Fotometrie, jako samostatná část optiky, byla vyčleněna až počátkem 17. století filosofem a astronomem Johannem Kepllerem na dvoře císaře Rudolfa II. Johannes Kepler tehdy konstatoval základní fotometrický zákon o ubývání osvětlení se čtvercem vzdálenosti od světelného zdroje. Dalšími, se kterými bývá počátek fotometrie spojován, jsou německý matematik, fyzik a astronom Johann Heinrich Lambert a August Beer.

Svítivost (I) je jednou ze sedmi základních fyzikálních veličin soustavy SI. Její jednotkou je kandela (cd – z latinského slova *candela* - svíce). Udává prostorovou hustotu světelného toku zdroje v různých směrech.

K měření svítivosti se při měření goniofotometrem nejčastěji používá přístroj zvaný Luxmetr, který měří osvětlenost (E). Tato veličina vyjadřuje světelný tok (Φ) (jednotka lumen – lm), který dopadá na určitou plochu. Jednotkou osvětlení je lux (lx). Tuto naměřenou veličinu lze převést na svítivost podle definice základního fotometrického zákona ve tvaru $E = \frac{I}{r^2}$ (kde r je vzdálenost pozorovatele od zdroje světla), který říká, že osvětlení ubývá se čtvercem vzdálenosti od zdroje světla.

Přístroje pro měření fotometrických veličin jsou potřebné nejenom pro zkoumání vlastností světla, ale hodnoty a závěry z nich stanovené jsou zároveň nutné pro návrh osvětlovacích celků a podstatné pro prodej v obchodech. V současné době jsou klasické žárovky s vláknem vytlačovány úspornými zářivkami díky jejich nízké spotřebě elektrické energie. Tyto zářivky nebyly doposud v takové míře využívány, jedná se zejména o domácnosti, kde se nároky na osvětlení v každé místnosti mění, stejně tak jako výbojkové lampy pro osvětlení výrobních hal a silnic. Jako další příklad je možné uvést rozmach LED svítidel, které se dostávají už i do automobilového průmyslu. V mnoha případech se jedná o lidskou bezpečnost: naváděcí světla pro letadla a další osvětlovací prvky sloužící v dopravě.

„Představa věci, obrázek věci, působí na zvědavost mocněji nežli věc sama.“

KAREL ČAPEK

2 Přehled současných používaných goniofotometrů

V této kapitole bude uveden přehled používaných fotometrických metod měření svítivosti a rozdělení obecných konstrukcí goniofotometrů, které jsou v současnosti na trhu, princip jejich funkce a vlastnosti.

2.1 Goniofotometr

Goniofotometr je laboratorní přístroj, který umožňuje měřit rozložení svítivosti v různých rovinách pod různými úhly. Jeho součástí je snímač luxmetr (fotočlánek), který snímá osvětlenost. Ke snímání v různých pozorovacích úhlech musí goniofotometr obsahovat pohyblivé prvky, podle kterých lze obecné konstrukce goniofotometru rozdělit do třech základních modifikací:

- Pevný zdroj i snímač a otočné zrcadlo (soustava zrcadel)
- Otočný zdroj a pevný snímač
- Otočný snímač a pevný zdroj

Bližší informace k jednotlivým typům jsou uvedeny v kapitole 2.4.

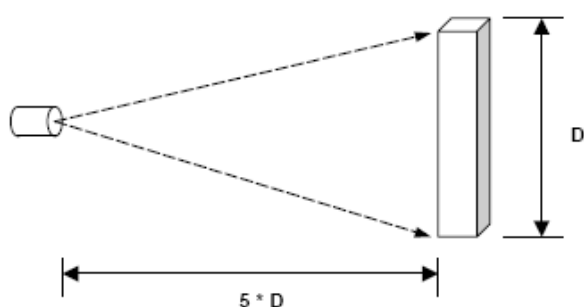
Další dělení lze provést podle druhu snímání. Používané jsou dvě metody, které jsou úzce spjaté s konstrukcí goniofotometru:

- Goniofotometr užívající fotometrickou metodu Far-Field (Vzdálené pole)
- Goniofotometr užívající fotometrickou metodu Near-Field (Blízké pole)

2.2 Far- Field fotometrie

Jedná se o metodu využívající zejména goniofotometry s polohováním svítidla nebo odražením světla otočným zrcadlem, přičemž snímání probíhá ve větší vzdálenosti od zdroje.

Podstatou tohoto typu měření je to, že předpokládá nekonečně malý světelný zdroj vzhledem ke vzdálenosti měření. Předpokládá se vzdálenost zdroje od místa měření minimálně 5x větší, než je maximální rozměr světelného zdroje.



Této vzdálenosti není problém dosáhnout u relativně malých svítidel jako jsou žárovky nebo lampy. Komplikace však nastávají u svítidel, které mají dominantní rozměr v jedné ose. Měření je potom náročné na prostor, který nemusí být ve všech laboratořích k dispozici. Taková svítidla jsou například zářivková tělesa.

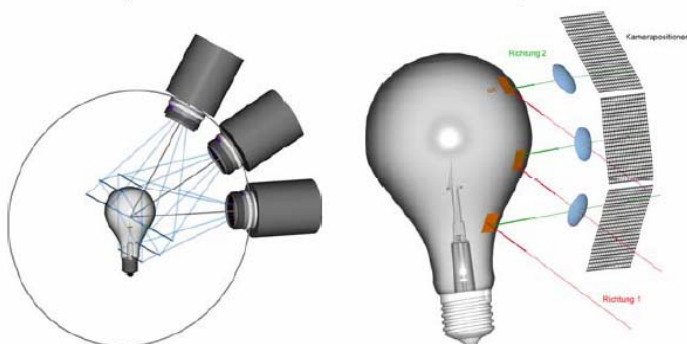
Obr. 1.: Princip 5-ti násobné vzdálenosti [3]

Světelné záření není usměrňováno, dopadá na snímací zařízení, které ho vyhodnocuje. Toto zařízení zpravidla nebývá přímou součástí goniofotometru. Stojí pevně v určité vzdálenosti. V některých případech ale může být pohyb žádoucí. Ten je pak řízen spolu s pohybem otočné soustavy goniofotometru (viz. Obr. 6.).

Při měření touto metodou by se mělo provádět clonění světelného proudu od okolního prostředí (viz. Obr. 8.). Přestože jsou laboratoře temné komory, není žádoucí, aby docházelo k ovlivnění měření odrazem od okolních předmětů. Ke clonění se využívají černé látky s minimální světelnou odrazivostí.

2.3 Near- Field fotometrie

Tento druh získávání fotometrických veličin je taktéž založen na principu 5-ti násobné vzdálenosti. Měření ale probíhá v malé vzdálenosti od zdroje, která lze

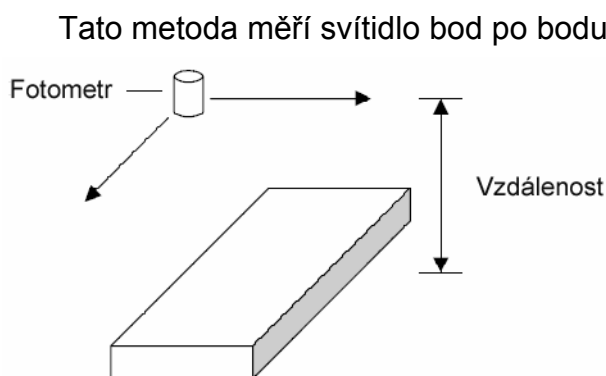


Obr. 2.: Princip měření svítivosti [4]

u menších svítidel snadno dodržet. Tento princip je však porušen u lineárních fluorescentních svítidel, zářivek, které jsou ve veřejných prostorech (úřady, kanceláře, dílny) zastoupeny v bezkonkurenční většině. Přesto lze i pomocí této metody tato svítidla měřit.

Tato měření se tedy provádí tak, že je celý zdroj světla softwarově (Lighting Analysts' AGI32™, Lighting Technologies' Lumen Micro™) rozdělen na síť elementárních bodových zdrojů. Toto ovšem předpokládá, že zdroj svítí homogenně po celé jeho délce, což vždy není pravda a nepřesnosti je pak nutné dopočítávat. Proto existují ještě další zpřesňující metody a právě v nich spočívá podstata Near-Field fotometrie - měření charakteristik světla v blízké vzdálenosti od svítidla. Jako příklad jsou uvedeny pouze dvě podle titulu THINKING PHOTOMETRICALLY PART II (viz.[3]).

2.3.1 Metoda LM-70 (Application Distance)



Obr. 3.: Metoda LM-70 [3]

Tato metoda měří svítidlo bod po bodu v dané vzdálenosti. Naměřené veličiny jsou pak interpolovány a vytvoří hodnotu charakteristiky odpovídající celému svítidlu. Konečný výsledek je získán až po zpracování kompatibilním softwarem.

Nevýhoda této metody je v tom, že výsledky jsou aplikovatelné pouze pro danou vzdálenost, ze které byla data měřena. Charakteristika tedy

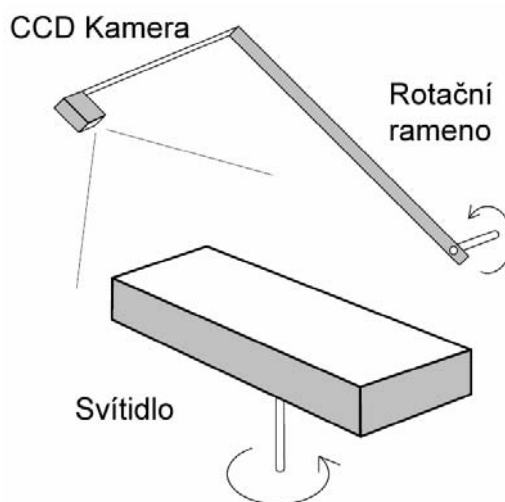
není měřena jako funkce vzdálenosti. Pokud chceme získat úplnou prostorovou charakteristiku, je nutno měřit pro každou vzdálenost zvlášť.

2.3.2 Metoda Luminance-field

Tato metoda užívá speciální CCD digitální kameru k měření čtyř-rozměrného pole světla, obklopující svítidlo. Na rozdíl od metody aplikační vzdálenosti jsou naměřená data platná pro jakýkoli bod v prostoru v závislosti na vzdálenosti od zdroje.

Nevýhodou této metody je, že produkuje velký objem dat, což může působit problém při zpracování softwarem.

Poznámka: Tato metoda může být taktéž použita pro ukázkou obrazu předmětu (svítidla) z jakéhokoli bodu v prostoru kolem něj. Tento efekt je znám z filmového průmyslu a byl použit například ve filmu Matrix.

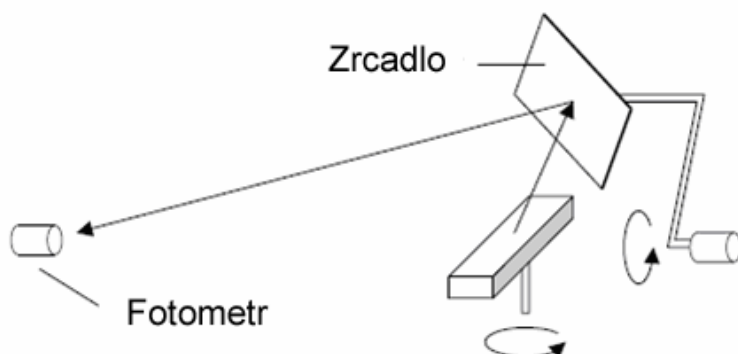


Obr. 4.: Metoda Luminance-field [3]

2.4 Rozdělení goniofotometrů

2.4.1 Goniofotometr s rotujícím zrcadlem

Tento druh goniofotometru lze realizovat v mnoha modifikacích podle toho, kolik má jaký prvek stupňů volnosti. Zdroj světla je upevněn buď na pevnou, nebo na



Obr. 5.: Princip zrcadlového goniofotometru s pevným snímačem [3]

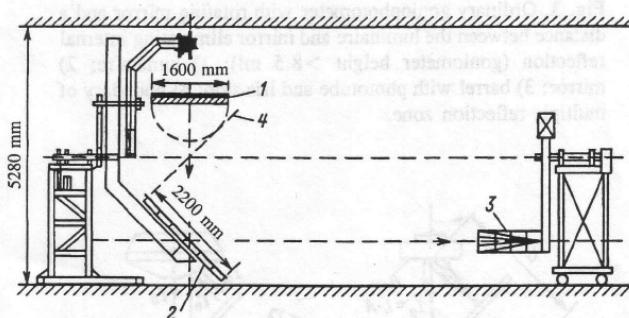
rotující horizontální základnu. Velké zrcadlo, připevněné na dlouhého ramene, rotuje kolem zdroje ve vertikální rovině a navíc může mít ještě jeden stupeň volnosti ve vlastním natočení. Zrcadlo je tedy po celé své oběžné dráze natáčeno tak, aby odrazilo světlo do fotosnímače. Ten potom stojí pevně. Pokud se zrcadlo nenatáčí, musí s ním

rotovat i snímač (viz. Obr. 6.). Zrcadlo musím mít reprodukovatelnost svého úhlového nastavení v rozmezí $\pm 0,25^\circ$.

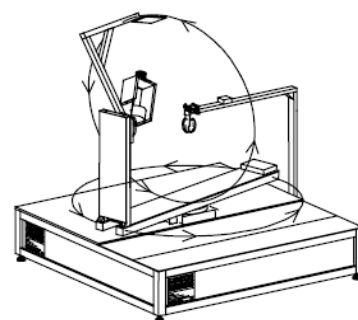
Výhodou tohoto typu goniofotometru je, že umožňuje měřit velká i malá svítidla a to na velké vzdálenosti. S tím však souvisí i vysoká prostorová náročnost, která lze v laboratorních podmínkách hůře realizovat. Čím větší je rameno, které

unášejí zrcadlo, čím komplikovanější je také konstrukce celého zařízení. Rám musí být dostatečně tuhý a polohování je s rostoucí délkou ramene méně přesné. Navíc se zvětšováním prostoru souvisí i nutnost většího clonění, aby se zabránilo ovlivnění měření odrazy světla od okolí. Vysoké nároky jsou kladeny na čistotu zrcadel, jehož jen nepatrné znečištění ve značné míře ovlivní výsledky měření. Existují však i malé goniofotometry tohoto druhu (viz. Obr. 7.).

Další možnost této konstrukce spočívá v nahrazení zrcadla přímo snímačem, který by vykonával stejný pohyb, tento přístroj by pak spadl do oblasti Near-Field fotometrie (viz. kapitola 2.3).



Obr. 6.: Princip zrcadlového goniofotometru s pohyblivým snímačem [1]



Obr. 7.: Malý goniofotometr s otočným zrcadlem a snímačem pro měření LED a malých svítidel [2]

2.4.2 Goniofotometr s otočným zdrojem světla a pevným snímačem

Tento druh goniofotometru lze rozdělit podle konstrukce na dva typy:

- Goniofotometr s otočným ramenem
- Goniofotometr s otočným slotem

Princip prvního typu je podobný, jako u typu s rotujícím zrcadlem, avšak rotační pohyb jak v horizontální i vertikální rovině vykonává rameno se zdrojem světla a snímač je pevný. Má ale nevýhodu v tom, že konstrukce ramena musí být dostatečně tuhá, aby bez deformace unesla svítidla o větší váze a zároveň nestínila ve výhledu na měřicí snímač. Další nevýhodou tohoto modelu je, že při měření světelných zdrojů, jejichž svítivost se mění v závislosti na poloze, dochází ke zkreslení výsledků. Takovými svítidly jsou výbojky a některé zářivky. Většinou totiž nejsou upínány v pracovní poloze.

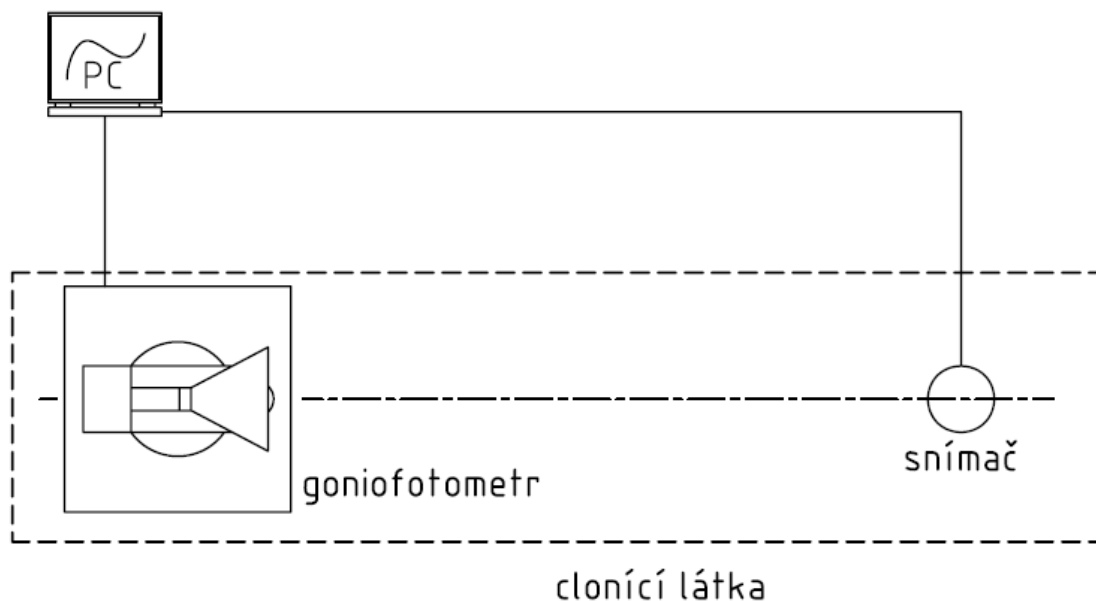
Velice dobře lze však na tomto typu goniofotometru měřit zářivková tělesa, která se kvůli svým rozměrům na ostatní goniofotometry příliš nehodí.

Ideální variantou by bylo měřit svítidlo v jeho pracovní poloze a požadované vzdálenosti, to je však v laboratorních podmínkách často nereálné. Výbojky jsou většinou orientované tak, aby svítily shora dolů. Taková svítidla se ve své funkční poloze dají měřit na zrcadlovém goniofotometru. Ve skutečnosti se však měří i na tomto typu zařízení, avšak v horizontální poloze.

Druhý typ goniofotometru s otočným zdrojem světla je goniofotometr s otočným a naklápěcím stolem. Výhodou tohoto typu je, že je jeho konstrukce kompaktní a tím i dostatečně tuhá.

Tento goniofotometr je vhodný na těžké výbojkové lampy a další zdroje světla svítící pouze v jednom směru.

Goniofotometry s otočným zdrojem světla jsou univerzální zařízení k měření svítidel.



Obr. 8.: Schéma měření na goniofotometru s otočným zdrojem světla v laboratoři

2.4.3 Goniofotometr s otočným snímačem a pevným zdrojem světla

Zdroj světla je pevně uchycen a okolo něj krouží snímač. Tento typ je v podstatě shodný se zrcadlovým goniofotometrem pouze s tím rozdílem, že místo zrcadla je na rotující rameno upevněn přímo snímač.

3 Návrh konstrukce

Jak již bylo uvedeno, konstrukce goniofotometru musí být dostatečně tuhá, aby splňoval požadavky na přesnost měření. Protože pro laboratoř světelné techniky ústavu elektroenergetiky FEKT VUT v Brně se hodí univerzální přístroj, na kterém jde měřit široká škála svítidel, bude nutné navrhnout goniofotometr s otočným rámem a definovanou tuhostí pro maximální váhu svítidla 30 kg tak, aby úhel odklonění od vodorovného směru do snímače nepřesáhl 0,05 °. Bude se jednat o návrh založený na konstrukci stávajícího zařízení.



Obr. 9.: *Současný goniofotometr v laboratoři světelné techniky*

Při návrhu rámu je nutné brát zřetel nejenom jeho tuhost, ale zároveň na jeho optické vlastnosti. Při měření svítidel, které svítí do všech směrů, se rameno dostává do zorného pole snímače a brání mu ve výhledu na svítidlo. Způsobenou nepřesností měření je pak nutno dopočítat. Je tedy žádoucí, aby byl profil ramene co možná nejužší a bez dalších prvků, které by mohly stínit.

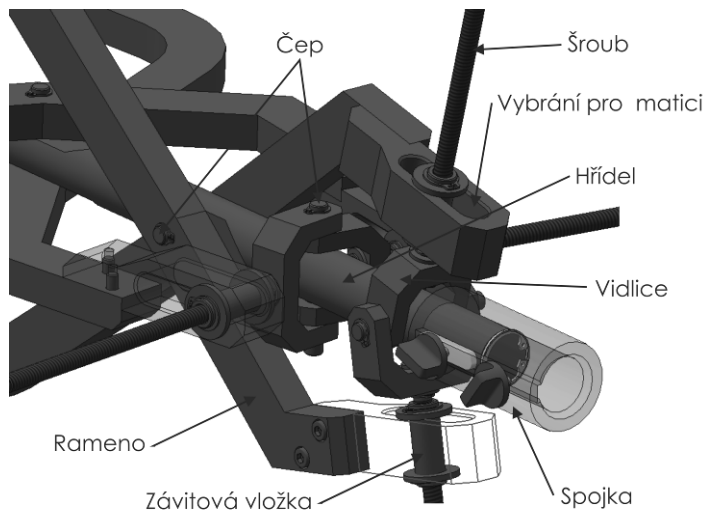
K realizaci pohyblivé části konstrukce (rámu) se nabízejí dva materiály: ocelové nebo hliníkové profily. Vzhledem k jednoduchosti montáže hliníkových profilů, jejich variabilnosti a celkově stavebnicovém pojetí celé konstrukce, bude použit právě tento materiál. Ačkoli jeho pořizovací cena značně převyšuje cenu obyčejné oceli. Výhodou konstrukce z hliníkových profilů je taktéž její jednoduchá modifikace.

V úvahu je nutné vzít také optické vlastnosti povrchu jednotlivých částí konstrukce. V zájmu minimální odrazivosti a maximální absorpce světelného záření budou tyto části opatřeny nátěrem či nástřikem speciální černou barvou.

V dalších podkapitolách bude uveden pouze popis jednotlivých částí konstrukce. Parametry navrženého goniofotometru jsou uvedeny na konci popisu v kapitole 5, výpočty tuhosti a průhybů jsou uvedeny v přílohách, v textu na ně bude odkazováno.

Celý 3D model zařízení byl vytvořen v parametrickém programu SolidWorks® Office 2007 SP 0.0. Všechny obrázky bez uvedeného zdroje jsou získány právě pomocí tohoto programu. Model je hlavním obsahem přiloženého CD.

3.1 Univerzální upínací zařízení



Obr. 10.: Části upínáku

Toto zařízení pracuje na principu obyčejných kleští či nůžek. Jedná se o konstrukci čtyř ramen s kloubovými spojeními tak, aby bylo adaptabilní pro různé tvary. Konstrukce se tedy skládá z několika částí. Nosnou část ramen tvoří hřídel se čtyřmi dírami pro čep a vybráními pro ramena. Na této hřídeli jsou připevněna ramena, která jsou proti sobě stahována závitovými tyčemi pohyblivě upevněnými pomocí vidlic na čepu. V rameni klouže závitová matice, která umožňuje dotahovat šroub

neustále v kolmé pozici k povrchu ramene s vybráním pro její vedení. Kolmá pozice šroubu k tomuto povrchu je nutná proto, aby byl pohyb možný v celém rozsahu tak, jak je ukázáno na Obr. 13.:. Ramena opisují kruhovou dráhu a pokud by matice neměla dostatečnou volnost k tomu, aby byla zajištěna kolmost. Docházelo by ke křížení přímé dráhy pohybu šroubu a kruhové dráhy ramene, a proto by nebylo možné s ramenem pohybovat, čímž by upínák ztratil svou funkci.

Každá dvojice ramen je k hřídeli uchycena pomocí čepu, zajištěného z obou dvou stran pojistným kroužkem. Stejně tak jsou přichyceny i vidlice, které umožňují pohyb šroubu po kružnici.

3.1.1 Rameno upínáku

Rameno upínáku je složeno ze čtyř částí. K hlavní a nejdelší části, která je vyrobena vyříznutím z tabule duralu, je přišroubován pevný článek s vybráním pro pohyb matice šroubu. Na druhé straně je pevně přišroubován článek, kterým můžeme regulovat dosah kleštiny. To je žádoucí zejména tehdy, pokud jsou na svítidle nerovnosti, např. lem. Nakonec je k rameni pohyblivě na čepu tvořeném šroubem připevněna kleština. Její volnost znovu umožňuje lepší přizpůsobivost celého upínacího systému různým svítidlům.



Obr. 11.: Rameno upínáku, druhá řada

Ramena jsou vždy dvě stejná ve dvou řadách. První řada ramen na Obr. 12.: má strmější tvar, aby bylo možné upnout svítidlo co nejblíže k hřídeli a zmenšilo se tak rameno síly od hmotnosti svítidla. Na Obr. 11.: je zobrazeno rameno druhé řady, jehož profil už může být pozvolnější, protože je umístěno více vzadu a uchopuje svítidlo blíže k jeho konci. Díky variabilitě koncových klestí a nesymetričnosti dotahování ramen může být

upínák použit k upínání různých tvarů svítidel. Nejenom válcové lampy, ale i svítidla s tvarově členitým povrchem nebo zářivková tělesa. To je ovšem omezeno maximálním a minimálním sevřením ramen, jak je znázorněno na Obr. 13.. Maximální rozpětí ramen je 580 mm a minimální 70 mm, pokud uvažujeme druhou řadu ramen, maximální 550 mm a minimální 55 mm pro první řadu. Tato rozpětí je možné korigovat pohyblivým článkem na konci ramene.



Obr. 12.: Rameno upínáku, první řada

Problém, který zde může nastat, je upnutí svítidla přesně do osy hřídele upínacího mechanismu, které u tohoto typu zařízení nebude nikdy dokonalé.

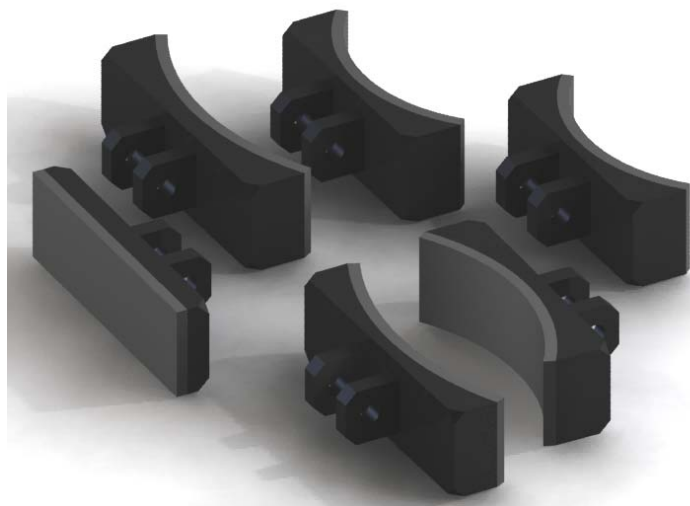
Pokud by totiž bylo stahování ramen symetrické, bylo by to na úkor univerzality a při nesymetričnosti povrchu lampy by problém přesného upnutí nastal také. Nehledě na to, že zdroj světla nemusí být přesně v ose povrchu svítidla. Musí zde být tedy počítáno s tím, že se mohou nepřesnosti sčítat. Problém přesného upnutí lze nejlépe řešit přípravkem, do kterého by se upnuté svítidlo upevnilo do stejné polohy, jako při měření, tedy podélnou osou vodorovně. Proti zdroji světla by bylo v ose umístěno laserové ukazovátko, nejlépe osový kříž. Celým upínákem se svítidlem by se otáčelo a upnutí by bylo podle házení postupně ručně doladěno do optimálního stavu. Jednodušší, avšak méně přesný způsob upnutí pro svítidla se symetrickým pláštěm je možné provést způsobem vyplývajícím z konstrukce upínáku. Pokud budou vzdálenosti upínací matice od konce šroubu na obou dvojicích ramen stejné, jinak řečeno, bude-li délka volného konce šroubu na obou dvojicích ramen stejná, bude svítidlo upnuto přibližně v ose celého upínáku.



Obr. 13.: Maximální a minimální rozpětí ramen upínáku

3.2 Koncové sklíčidlo

Upínák je vybaven sadou koncových sklíčidel, jejichž poloměr vybrání je odstupňován podle průměru válcového pláště svítidla tak, aby k povrchu sklíčidlo co nejlépe přilnulo a to v řadě 100, 150, 200, 250 a 290 mm. Jedno sklíčidlo má rovnou plochu pro svítidla s rovinným pláštěm (zářivková tělesa).



Všechna jsou opatřena přilepenou pryží. Ta má dobrou přilnavost a vysoký součinitel tření, což napomáhá tomu, aby svítidlo nemohlo ze sevření vyklouznout. Samotné sklíčidlo je vyrobeno obrobením polotovaru duralové tyče. Jak je vidět na Obr. 11., je k rameni přichycena volně čepem, který tvoří šroub stažený matkou.

Obr. 14.: Sada koncových sklíčidel

3.2.1 Vidlice se šroubem



Vidlice je opět vyrobená z duralového polotovaru a pomocí čepu přichycena k hřídeli a zajištěna pojistným kroužkem. Stejně tak je to s ocelovou závitovou tyčí, ta je s vůlí uložena v díře

Obr. 15.: Vidlice se závitovou tyčí

vidlice tak, aby se mohla volně otáčet, a za podložkami je zajištěna pojistnými kroužky. Všechny vůle se dotažením závitové tyče vymezí. Závitová tyč je opatřena křídélky pro snadné dotažení rukou.

3.2.2 Závitová vložka

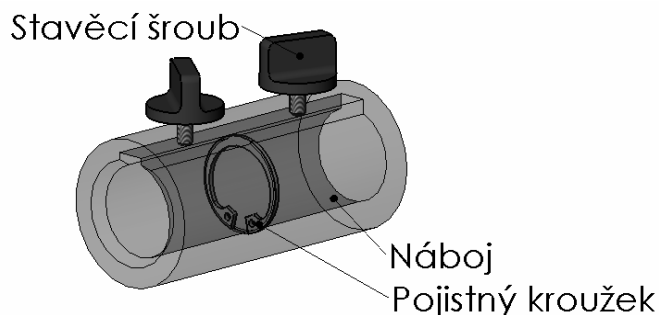
Závitová vložka je tvořena maticí, což je váleček s vyříznutým závitem a vysoustruženými drážkami pro pojistné kroužky. Podložky zajištěné pojistným kroužkem přenášejí sílu dotahování šroubu na rameno. Aby váleček v drážce dobře klouzal, musí být hladce opracován.



Obr. 16.: Závitová vložka

3.2.3 Spojka

Spojka je tvořena nábojem, pojistným kroužkem a dvěma stavěcími šrouby. V náboji je proražena drážka pro pero, díky kterému spojka přenáší krouticí moment z hnací hřídele na upínák. Díra v náboji má zkosenou hranu tak, aby vytvořila náběh pro snadnější nasazení. Stavěcí šrouby jsou speciální s plastovou hlavou pro jednoduché ruční zajištění. Pojistný kroužek uvnitř vytváří pevné rozhraní mezi hřídelí pohonu a upínákem.



Obr. 17.: Spojka

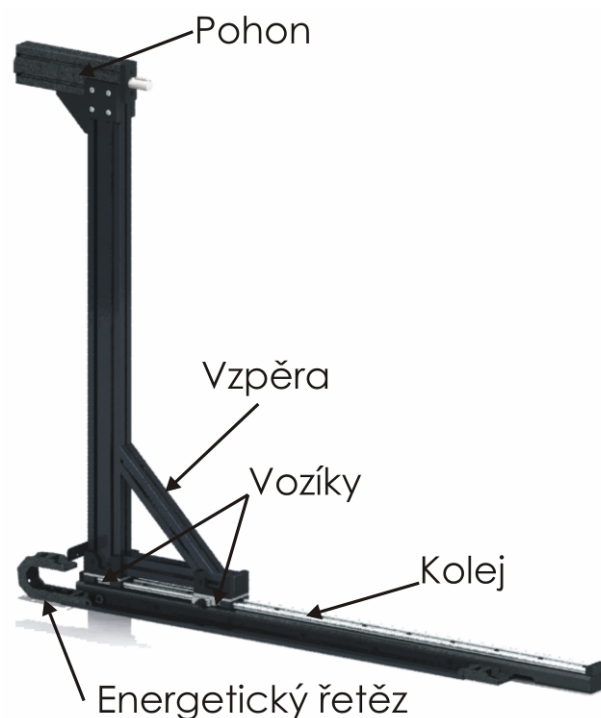
3.2.4 Materiál

Všechny části upínáku vyjma spojovacího materiálu jsou vyrobeny, jak už bylo uvedeno výše, z hliníkové slitiny Dural. Tento materiál má s uhlíkovou ocelí srovnatelné mechanické vlastnosti (mez pevnosti a kluzu v tahu), je ovšem mnohem dražší. Přesto byl upřednostněn a to z toho důvodu, že má skoro třikrát nižší měrnou hmotnost (ocel 7,85 g/cm³ a hliník 2,75 g/cm³). Tato vlastnost je velice důležitá. Vzhledem k tomu, že svítidlo může vážit i 20 kg a spolu s upínákem musí být ručně zvednuto a nasazeno na osu ve výšce 1250 mm, nemůže být hmotnost upínáku velká, aby ho byl člověk schopen sám nasadit. Váha upínáku, jehož hlavní části jsou vyrobeny z duralu, je tedy zhruba 6,5 kg (v ocelovém provedení by to bylo asi 16 kg). Uvedené hmotnosti byly zjištěny pomocí parametrického modelovacího programu SolidWorks® verze Office 2007.

3.3 Rám a lineární vedení

Jak již bylo několikrát uvedeno, rám nesmí být příliš mohutný, aby nestínil, ale zároveň ani subtilní, aby unesl bez větší deformace váhu svítidla. Opět se ke konstrukci nabízejí dva nejběžnější materiály: hliníková slitina a ocel. Zde byl opět vybrán hliník. Má několik předností. Je lehčí, jak již bylo dříve uvedeno, existují výrobci extrudovaných hliníkových profilů s velice dobře propracovaným stavebnicovým pojetím celého sortimentu a v neposlední řadě hraje důležitou roli i design, tedy vzhled celého měřicího zařízení.

Konstrukce byla tedy provedena pomocí katalogu profilů firmy MiniTec [9]. Tato firma byla vybrána díky svým propracovaným webovým stránkám



Obr. 18.: Rám s posuvem

a 3D CAD podpoře svých výrobků, což usnadnilo tvorbu modelu celého zařízení.

Lineární vedení bylo vybráno s ohledem na cenu a náročnost údržby. Firma IGUS má opět velice dobře propracované webové stránky a 3D CAD katalog a lineární vedení DryLin® W je pro tuto aplikaci ideálním řešením.

DryLin® W představuje cenově výhodný předem smontovaný systém. Provedení umožňuje mimořádně vysokou flexibilitu v konstrukci a snadnou montáž použitím jednoduché nebo dvojité kolejnice. Jako materiál kolejnice je použit tvrdě eloxovaný hliník poskytující nejlepší výsledky ohledně tření a opotřebení. Díky vyloučení lubrikace je systém mimořádně stálý vůči nečistotám.

Kluzné prvky:	bezúdržbové
Materiál:	iglidur® J/J200
Max. obvodová rychlost:	15 m/s
Provozní teplota:	-40 °C až +90 °C

Výhody:

- Jednoduchá instalace, bezúdržbové
- Ekonomický vozík ze zinku litého pod tlakem s vložkou
- Stálost vůči nečistotám díky suchému provozu
- Nízká hmotnost a nízkohlučný provoz
- Dobrá absorpce krouťícího momentu
- Vhodný pro jednoosý systém



Obr. 19.: Lineární kluzné vedení DryLin® W firmy IGUS [11]

Citováno ze stránek výrobce www.igus.cz [11].

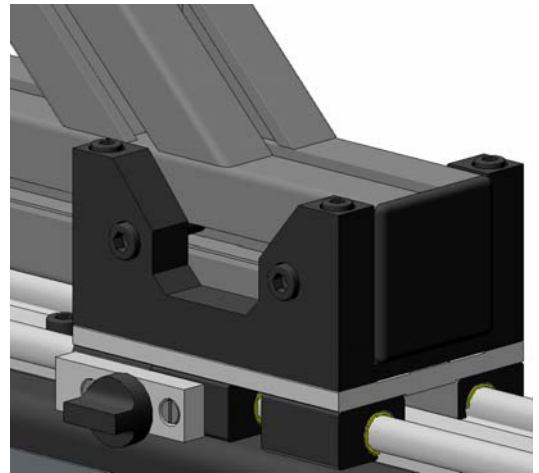
Vozíky WW-10-40-10 mají statickou únosnost 4800 N a maximální moment 170 Nm. Proto jsou dva, aby maximální moment 258 Nm unesly (viz. příloha P1.8).

Lineární vedení je zde použito proto, aby bylo možné posunout zdroj světla do vertikální osy. Zdroj světla by měl být ideálně umístěn v průsečíku horizontální a vertikální osy rotace svítidla. To znamená, že při rotacích je stále v jednom bodě a neopisuje žádnou dráhu. Tím je zajištěn stejně velký úhel natočení světelného paprsku do snímáče, jako je úhel natočení na enkodéru pohonu.

Rozsah posuvu, myšleno maximální a minimální vzdálenost čela horizontálního pohonu (viz. kap. 4.2) od osy vertikální rotace, je: 1100 – 130 mm.

Posuv není vybaven žádným řízeným pohonem, je pouze ruční. Proto je jeden vozík vybaven aretací v podobě stavěcího šroubu. Ruční posuv je zde spíše výhodou, protože je rychlý. Zdroj světla je nutné posunout do vertikální osy rotace, avšak on je většinou ukryt v plášti svítidla a neexistuje možnost, jak ho přesně do osy nastavit. Pro přibližné určení je zde použit optický laserový systém, osový kříž, díky kterému je možno alespoň orientačně svítidlo posunout tam, kam je potřeba. Blíže v kapitole 3.4.2.

Na vozících je přimontována ocelová forma, do které je vložen hliníkový profil a šrouby pevně přichycen. Firma MiniTec dodává speciální matky, které jsou svým tvarem přizpůsobeny tak, aby přesně zapadly do drážky v profilu. Ve vozíku už jsou vyřezány závity, do kterých přijde zašroubovat šroub. Celá montáž je tedy rychlá a jednoduchá.



Obr. 20.: Vozík s aretací

3.4 Podstavec

Podstavec ramene goniofotometru plní funkci pevného a stabilního uložení celého zařízení. Je celý zakrytován plechem, proto zde při výběru materiálu nehrál roli vzhled surového polotovaru. Jako materiál byl tedy vybrán uzavřený ocelový profil, ze kterého je celý podstavec svařen. Oproti hliníkovým profilům je levný a těžký, což je nyní výhodou. Součástí podstavce jsou sestava otočného stolu a svařenec, kostra celého podstavce. Ty budou dále v podkapitolách rozebrány a popsány.

3.4.1 Svařenec

Svařenec podstavce má půdorys čtverce o straně 1280 mm a je 440 mm vysoký. Jeho konstrukce musí být tuhá aby unesla nejen váhu svítidla a konstrukcí, které nese, ale i obsluhy, která po něm bude chodit, když bude svítidlo upínat. Proto je jeho kostra svařena z ocelových profilů firmy Ferona, a.s. o rozměrech 80x80x5 mm. Střední, nosné profily, mají vyříznut zub, do kterého je vložena a zavařena obdelníková ocelová tyč, ke které je přišroubována deska s otočným stolem. Po bocích horních profilů jsou přivařeny zahnuté plechy, které podepírají na nich položený rošt.



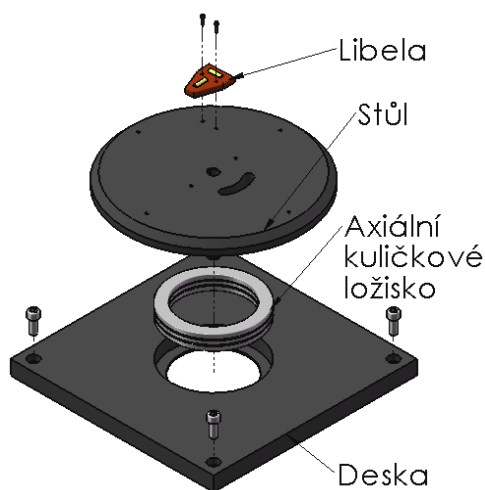
Obr. 21.: Podstavec

Rošt je vyroben firmou Perfo Linea a.s. Chrudim (popřípadě firmou Ferona, a.s.) z konstrukční oceli lisováním, je zároveň pozinkovaný nebo může být kvůli

optickým vlastnostem (odraz světla) i jinak povrchově upraven. K rámu podstavce je přichycena malá rozvaděčová skříň pro elektroinstalaci. Ze spodu profilů přijde navařit patka se závitovou dírou, do které bude našroubována gumová, výškově stavitelná nožička, aby bylo možno celé zařízení nastavit do vodorovné polohy. Plechy mají vyvrtané díry, podle kterých se při montáži předvrtají díry pro samořezné šrouby přímo do svařence.

3.4.2 Otočný stůl

Celé rameno goniofotometru spolu s upínákem a svítidlem je spojeno s podstavcem přes otočný stůl. Tento stůl je volně vsazen v axiálním ložisku. Vzhledem k ceně a malému zatížení bylo vybráno ložisko označení 51122A výrobce ZKL. Kvůli pohonu a vedení kabelů musí být toto ložisko veliké, a proto nemá smysl počítat jeho životnost, jeho dynamická únosnost je 90 kN a takového zatížení nebude na goniofotometru zdaleka nikdy dosaženo. Ložisko je vsazeno do desky, která je



Obr. 22.: Sestava otočného stolu

přišroubována na navařené a vyrovnané pásovice ve výřezích ocelových profilů, tím je dosaženo maximálně přesného usazení. Na stole je připevněna dvouosá libela (vodováha), díky které je možné pomocí nožiček podstavce nastavit stůl do vodorovné polohy. Pokud v této poloze bude stůl, pak se v ní bude nacházet i celé rameno se svítidlem. Vedle libely bude ke stolu připevněn optický laserový kříž, s jehož pomocí bude možno přibližně určit průsečík vertikální a horizontální osy rotace. Na trhu je k dostání několik druhů těchto zařízení v různých cenových relacích. Stojánek pro něj bude tedy vyroben až podle konkrétního výrobku.

Stůl je vyroben z oceli. V ose je vyvrtána díra s proraženou drážkou pro pero, do které je zasunuta hřídel pohonu. Vedle díry je vyfrézován otvor v podobě výseče z mezikruží pro průchod kabelů. Ze spodu je tento otvor rozšířen vyfrézovanou kruhovou drážkou pro kabely, aby nemohlo dojít k jejich přestřižení o uchycení pohonu, viz. kapitola 4.3.

4 Pohon

Pro správnou funkci goniofotometru jsou klíčové dva faktory. Jedním z nich je tuhost rámu a druhým správně řízený pohon. Proto je výběru motorů a řízení potřeba věnovat velkou pozornost. Další podkapitola bude věnována zjištění situace na trhu a poznání různých druhů motorů.

4.1 Krokový servomotor (krokový motor) versus spojitý servomotor

Existují dva druhy motorů, používané v automatizačních aplikacích a sice krokový motor a servomotor. (Krokový motor je svým principem také servomotor, jinak označovaný Inkrementální servomotor, avšak běžně se tyto motory rozlišují pouze na krokový motor a servomotor.) Servomotor je také točivý stroj, u kterého lze narozdíl od běžného motoru nastavit polohu natočení rotoru.



Obr. 23.: Krokový motor
(<http://www.lakewoodconferences.com>)



Obr. 24.: Servomotor
(<http://www.cmcccontrols.com>)

Pozn.: Uvedené obrázky jsou pouze ilustrativní, motorů existuje mnoho druhů v různých provedení, takže je není možné takto jednoduše rozlišit.

Obecně jsou systémy pohonu a řízení pomocí krokových motorů finančně méně nákladné než klasické servomotory, avšak pokud je použit krokový motor o velikosti příruby NEMA SX 23 (typové označení) a větší nebo je řízen pomocí technologie mikrokrokování, které umožňuje přesnější řízení krokového motoru, je cena obou druhů pohonů srovnatelná.

Tab. 1.: Srovnání technologie krokového motoru a servomotoru

Krokový motor	Servomotor
Spolehlivost a údržba	
Krokové motory jsou bezkartáčové, kartáče se používají u stejnosměrných motorů pro mechanické přepínání polarity během otáčení rotoru. Krokové motory tedy nemají žádný mechanický člen, který by podléhal většímu opotřebení a díky tomu jsou víceméně bezúdržbové.	Klasické servomotory s kartáči (stejnosměrné DC) vyžadují jejich pravidelnou výměnu přibližně každých 5 000 hodin. Střídané servomotory bez kartáčů, popřípadě stejnosměrné motory s elektronickou komutací, nevyžadují podobně jako krokové motory žádnou údržbu.

Rozlišení a přesnost

Krokový motor je schopen rozlišit jednu otáčku rotoru typicky na 200 kroků, 400 polovičních kroků nebo až 25 000 mikrokroků. Pokud motor pracuje se zatížením a rotací do přesné polohy, může dojít ke ztrátě informace nevykonáním kroku i přes dodaný impuls. Nepřesnost se projevuje zejména při mikrokrokování, které je využíváno pro plynulost rotace.

Rozlišení servomotoru závisí na použitém enkodéru. Typický enkodér produkuje 2 000 až 4 000 signálů na otáčku rotoru. K dispozici jsou i enkodéry s rozlišením 10 000 signálů na otáčku. Servomotory tedy díky enkodéru dosahují vysoké přesnosti polohování.

Rychlost a výkon

Krokové motory mají slabou momentovou charakteristiku při vyšších otáčkách. Tato vlastnost může být vylepšena užitím mikrokrokování, avšak i když je motor řízen se zpětnou vazbou, neobstojí ve vyšších otáčkách ve srovnání se servomotorem.

Servomotory jsou schopné produkovat 2 až 4x větší rychlost a výkon než krokové motory stejných rozměrů. Toto zlepšení je důsledek stále zpětné vazby, která umožňuje dosáhnout vysokou rychlost a zároveň vysokou spolehlivost. Zpětná vazba řízení umožňuje motor řídit efektivně tak, aby využil svůj maximální moment.

Zpětná vazba

Krokové motory jsou téměř vždy instalovány bez zpětné vazby. Pokud by byly použity se zpětnou vazbou, stávají se finančně náročnější než servomotory, avšak provoz bez zpětné vazby je jejich principiální nevýhodou. Příkazy k rotaci motoru jsou vydávány v určitém předepsaném množství a vyjma neočekávaných okolností se rotor pootočí o počet příchozích příkazů. Zřídka se stává, že vlivem vibrací či neočekávané síly může motor ztratit krok nebo se zpozdit. Přestože ke ztrátě kroku dochází zřídka, je nutné tuto možnost brát v úvahu.

Servomotory mají už z konstrukce vyplývající zpětnou vazbu. Ta je použita k dorovnání jakékoli odchylky od požadované pozice. Tato stálá kontrola umožňuje dosáhnout vysokých rychlostí, kde zároveň zvyšuje výkon.

Výběr systému

Obecně je vhodné užít krokové motory pro projekty s nižším rozpočtem a tam, kde není požadován vysoký a rychlý výrobní potenciál. Naopak servomotory je vhodné použít tam, kde se počítá s vysokým výkonem, přesností a rychlostí.

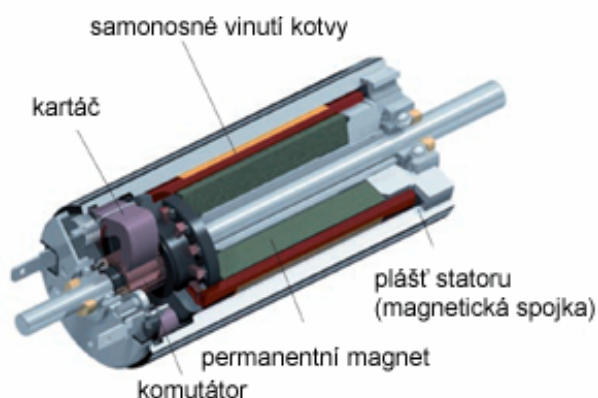
Kvůli přesnosti polohování a velkém výkonu při malých rozměrech bude použit pohon servomotory.

Spojité servomotory lze dále rozdělit do dvou skupin podle druhu napájeného napětí:

- Střídavé servomotory (AC)
- Stejnoseměrné servomotory (DC)

AC servomotory patří v současnosti k nejpoužívanějšímu typu servomotoru. Tyto motory jsou synchronní a ke své funkci nepotřebují kartáče. Na rotoru mají permanentní magnety a ve statoru většinou třífázové vinutí. Motory lze několikanásobně staticky momentově přetížít (většinou je udáváno třikrát oproti spojitému momentovému zatížení), a proto jsou vhodné pro dynamicky náročné úlohy.

DC servomotory jsou motory komutátorového typu. Komutátor ke své činnosti využívá kartáče, které podléhají opotřebení (Obr. 25.), existují však i motory



Obr. 25.: Řez DC motorem RE firmy Maxon Motor AG (mechanicky komutovaný) [13]



Obr. 26.: Řez DC motorem EC firmy Maxon Motor AG (elektronicky komutovaný) [13]

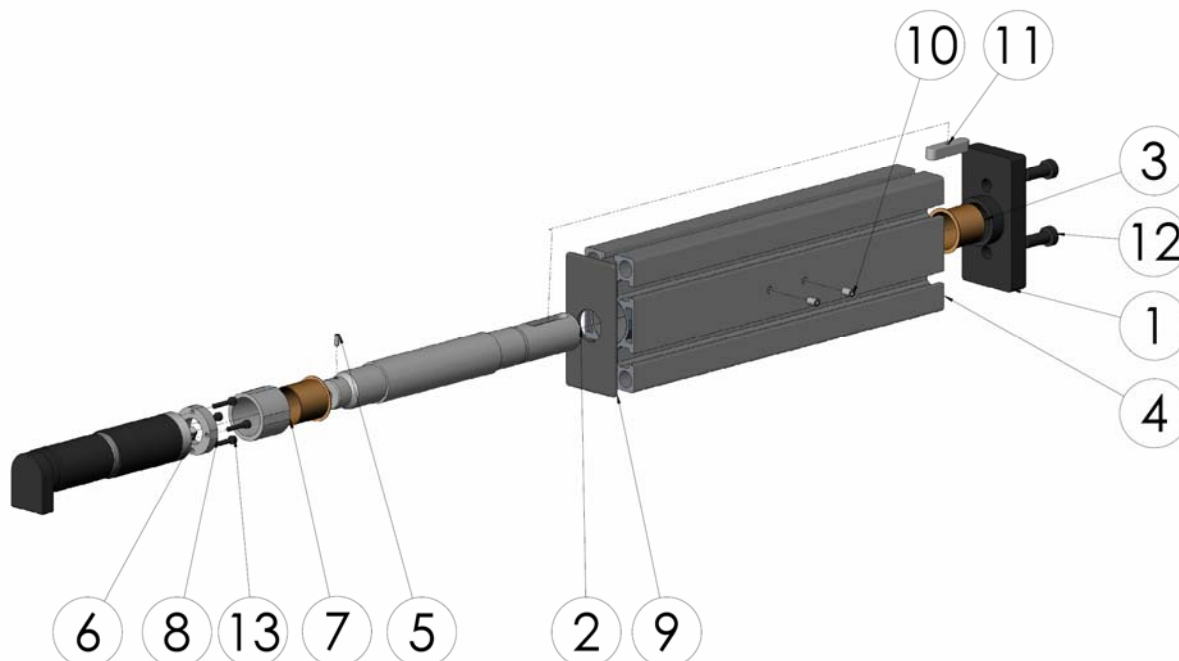
s elektronickou komutací (Obr. 26.), které jsou bezúdržbové jako AC servomotory a jejich životnost omezují pouze ložiska. Konstrukce obou druhů motorů je poměrně složitá a do jisté míry „know - how“ každého výrobce.

Pro pohon horizontální osy goniometru bude použit DC motor firmy Maxon Motor AG (Maxon) typu RE, s klasickou kartáčovou komutací. Firma Maxon Motor si však zakládá na preciznosti a vysoké kvalitě svých výrobků, proto jejich DC mikromotory s kartáčovým komutátorem nedosahují životnosti pouze 5 000 hodin, jako je to uvedeno ve srovnání v tabulce 1, ale až 20 000 pracovních hodin. Navíc díky svým miniaturním rozměrům umožní dosáhnout kompaktního řešení.

Pro pohon vertikální osy bude použit motor typu EC (elektronicky komutovaný) opět firmy Maxon.

4.2 Pohon horizontální osy

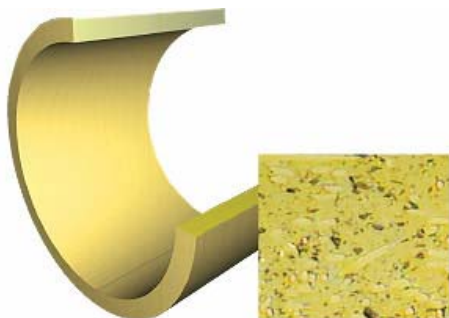
Horizontální rotace je rotací upínáku se svítidlem. Protože je většinou těžiště svítidla přímo v ose svítidla, subtilní motor, který byl vybrán pro pohon, umožňuje



Obr. 27.: Sestava pohonu horizontální osy.

1) domek ložiska, 2) hnací hřídel, 3) kluzné ložisko, 4) hliníkový profil, 5) stavěcí šroub pro upevnění hřídelky motoru v hnací hřídeli, 6) motor s planetovou převodovkou a enkodérem, 7) domek pro vnitřní ložisko, 8) kroužek pro upevnění motoru, 9) plastová krytka profilu, 10) stavěcí šrouby pro uchycení domku ložiska a motoru, 11) pero, 12,13) šrouby s vnitřním šestihranným vybráním.

provést celou konstrukci pohonu do jednoho kompaktního celku. Toto uspořádání poskytuje několik výhod. Motor je ukryt v těle hliníkového profilu, nevytváří tedy žádné clonící plochy a zároveň je díky členitosti jeho povrchu a dobré tepelné vodivosti efektivně chlazen.



Obr. 28.: Materiál Iglidur® [11]

výhodná. Výpočet silových reakcí na ložisko je uveden v příloze P1.4 a výpočet životnosti ložisek ze stránek výrobce je uveden v příloze P2.

Pro uložení hřídele jsou zde použita kluzná ložiska opět firmy IGUS. Ty jsou vyrobeny z polymerního materiálu Iglidur® G. Matrici tvoří základní polymer, výztuhu kompozitní technické materiály. Lubrikanty obsažené v matrici zajišťují bezúdržbový chod a dlouhou životnost. Kromě kompaktnosti jsou tato ložiska finančně velice

Tohoto provedení pohonu bylo dosaženo za cenu nižšího kroutícího momentu, který je dán zejména mechanickou únosností planetové převodovky. Je zde použita planetová převodovka o průměru 32 mm s keramickými čepy, převodovým poměrem 2548:1, maximálním spojitým kroutícím momentem 6 Nm a maximálním dovoleným statickým momentem 7,5 Nm. Rozlišovací schopnost enkodéru je 256 signálů na jednu otáčku hřídele motoru. Jedná se o pohon firmy Maxon, která dodává celek řídicí jednotky, enkodéru, motoru a převodovky podle výběru zákazníka pomocí elektronického průvodce na svých internetových stránkách viz. [14]. Detailní parametry pohonu horizontální osy rotace jsou uvedeny v příloze 0.



Obr. 29.: Planetová převodovka Maxon [14]

Celkové rozlišení natočení hřídele motoru je dáno násobkem převodového poměru planetové převodovky a rozlišovací schopností enkodéru:

$$2548 \cdot 256 = 652288 \Rightarrow \frac{360^\circ}{652288} \cong 0,00055^\circ.$$

Horizontální pohon je tedy schopen natáčet svítidlo s přesností na 55 desetinásobek stupně.

Kroutící moment 6 Nm není závratný, avšak při předpokladu rotačně symetrických svítidel by měl být postačující, protože překonává pouze tření v kluzných ložiskách. Při požadavku měření svítidel s těžištěm posunutým značně mimo osu rotace by musel být motor větší, nevešel by se tudíž do otvoru v hliníkovém profilu a musel by být umístěn až za ním, což by konstrukčně nepředstavovalo větší problém, mohl by však nepatrně stínit. Protože se nejedná o dynamický provoz, otáčení se svítidlem je pomalé a plynulé, nemá zde smysl počítat setrvačný moment soustavy.

4.3 Pohon vertikální osy



Obr. 30.: Pohon horizontální osy

Pohon vertikální osy je zajištěn opět motorem Maxon. Tentokrát je ovšem motor v provedení EC, tedy s elektronickou komutací. Motor je přichycen zespodu k základní desce (viz. Obr. 22.: a Obr. 30.:) pomocí „oka“. Toto upevnění je navrženo tak, aby co možná nejméně bránilo v pohybu kabelům při rotaci a v základní pozici ramene goniofotometru je o 180° potočeno vůči drážce ve stole, aby se mohlo rameno ke snímači natočit i zády.

Planetová převodovka má průměr pláště 62 mm. Její převodový poměr je 236:1, maximálním spojitým kroutícím momentem 50 Nm a maximální dovolený statický moment 75 Nm. Rozlišovací schopnost enkodéru je 500 signálů

na jednu otáčku hřídele motoru. Řídící karta je pro oba pohony společná. Detailní parametry pohonu vertikální osy rotace jsou uvedeny v příloze 0.

Celkové rozlišení natočení hřídele motoru je zde opět dáno násobkem převodového poměru planetové převodovky a rozlišovací schopností enkodéru:

$$236 \cdot 500 = 118000 \Rightarrow \frac{360^\circ}{118000} \cong 0,003^\circ.$$

Vertikální pohon je tedy schopen natáčet svítidlo s přesností na 3 tisíciny stupně.

4.4 Elektroinstalace a řízení

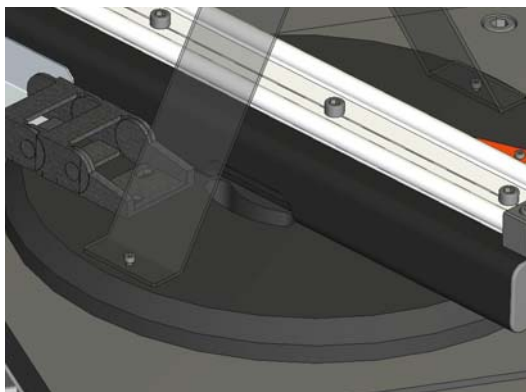
V této podkapitole bude nastíněna možná kabeláž, funkce zabezpečovacích prvků a řízení.

4.4.1 Kabeláž

Základním prvkem elektroinstalace na goniofotometru je rozvaděč, do kterého jsou koncentrovány všechny prvky, potřebné k napájení pohonů a jejich řízení. Do

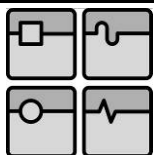


Obr. 31.: Rozvaděč



Obr. 32.: Energetický řetěz

rozvaděče by měl z vnějšku vstupovat pouze hlavní napájecí kabel ze sítě a komunikační kabel z řídicího počítače. Kabely, které jsou rozvedeny v přístroji, prochází otvorem v otočném stole (viz. Obr. 22.: a Obr. 30.:) a dále jsou vedeny podél vodorovného profilu v energetickém řetězu, aby byla jejich poloha stabilně zajištěna při posuvu rámu. Ze řetězu stoupají po svislém hliníkovém profilu k pohonu horizontální osy (viz. Obr. 18.:). Na konci tohoto profilu by měla být umístěna krabička pro připojení kabelů od svítidla.



4.4.2 Bezpečnostní prvky

Pokud by bylo špatně nastavené řízení, hrozí při provozu nebezpečí poškození kabelů mezi otočným stolem a upevněním motoru (viz Obr. 30.). Proto je vhodné použít některé zabezpečovací prvky. Pasivním zabezpečením je vyfrézovaná kruhová drážka ze spodu stolu, která eliminuje střížnou hranu mezi upevněním motoru a plochou stolu. Jako aktivní prvky na se na trhu nabízejí optické závory, indukční a kapacitní snímače atd. Postačující a nejvhodnější variantu však představují mikrospínače. Optická závora by spínala dříve, než je opravdu potřeba, taktéž indukční a další druhy a jejich použití by vyžadovalo složitější konstrukční řešení. Naproti tomu jednoduchý a podstatně levnější mikrospínač při správném použití dokáže poskytnout perfektní ochranu. Navíc pracuje s přírodním napájecím napětím 250 V a může tak být



Obr. 33.: Mikrospínač
(www.gme.cz)

bez problému předřazený řízení. Při nebezpečném stavu tak vypne motorům napájení. Snímače by byly umístěny na sobě z obou stran upevňovacího „oka“ motoru tak, aby případně kabely zatlačily na páčku, spínač sepnuly a uvedly tak goniofotometr do blokovacího stavu motorů. Tento blokovací stav je signalizován pomocí zeleného (případně červeného) signalizačního tlačítka na rozvaděči, kterým se zároveň vypne. Na rozvaděči je rovněž umístěno bezpečnostní stop tlačítko pro obsluhu.

Další zabezpečovací prvky v sobě obsahuje řídící jednotka (viz. následující podkapitola).



Obr. 34.: Jednotka Epos 2
(Maxon) [14]

4.4.3 Řízení

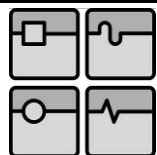
K řízení budou použity řídící jednotky EPOS a EPOS P společnosti Maxon Motor AG. Tyto řídící jednotky jsou vhodné pro náročné úkoly v regulaci motorů malých výkonů. Jednotka dokáže řídit rychlost i polohu rotoru jednoho motoru pomocí PLC (Programmable Logic Controller – programovatelný logický kontrolér).

Ten po nejčastěji používané datové sběrnici CAN/CANopen koordinuje celou soustavu motorů. Jednotka EPOS potřebuje ke své činnosti neustále připojené naprogramované PLC, tuto funkci plní jednotka EPOS P (v režimu Master), nadřazená ostatním jednotkám EPOS. Jednotka EPOS P totiž obsahuje vlastní PLC, externí počítač potřebuje pouze pro jeho naprogramování. Tato jednotka pak podle svého programu řídí činnost svého motoru a motorů ostatních podřazených Eposů a vyhodnocuje informace o jejich stavu v závislosti na koncových snímačích.

Pozn.: Navržené řízení je pouze jednou z mnoha variant a je třeba konzultovat s odborníkem.



Obr. 35.: Schéma řízení pomocí jednotek Epos (Maxon) [15]



5 Parametry navrženého goniofotometru



Velikost měřených svítidel:

š×v×d (podle druhu upínacího mechanismu)

Při použití univerzálního upínáku:

55×55×660 ÷ 550×550×660 mm

Maximální délka zářivkového tělesa:

2300 mm

Velikost zařízení: š×v×d

Podstavec: 1282×495×1282 mm

Válcový prostor vzniklý při rotaci ramene: $\varnothing$ 3580 mm

Výška celého zařízení: 1740 mm



Rozsah pohybu:

Horizontální osa: $0^\circ < \nu < 360^\circ$

Vertikální osa: $-190^\circ < \varphi < 190^\circ$

Přesnost pohybu:

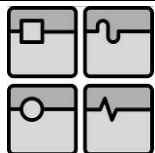
Horizontální osa: $\nu < 0,001^\circ$

Vertikální osa: $\varphi < 0,005^\circ$

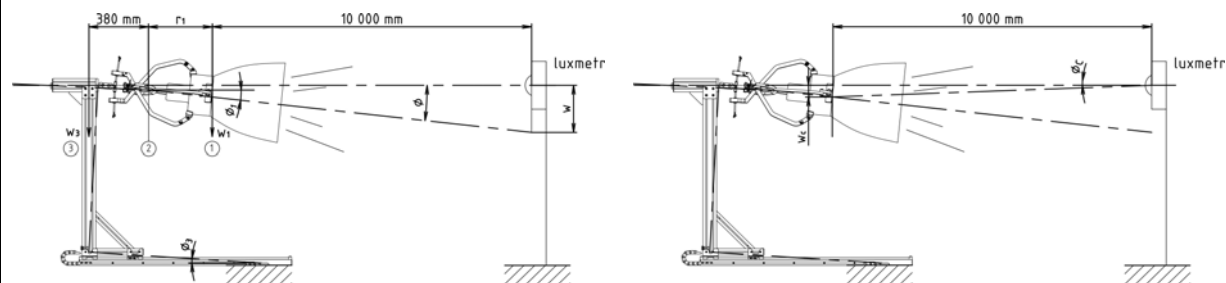
Pohyb:

Svítidlo rotuje kolem horizontální a vertikální osy procházejícími zdrojem světla. Snímač není součástí zařízení a stojí v pevné vzdálenosti a pozici od svítidla.

Obr. 36.: Navržený goniofotometr



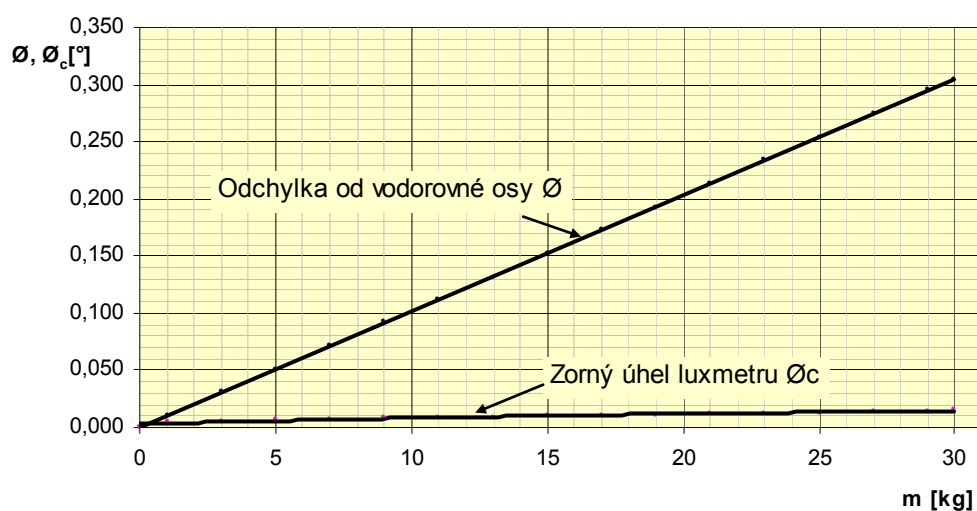
Průhyb a natočení rámu goniofotometru



Obr. 37.: Schéma průhybů a natočení rámu viz. příloha P1.9
(vlevo úhel $\emptyset$, vpravo zorný úhel luxmetru $\emptyset_c$)

Tab. 2.: Tabulka natočení a průhybů rámu v závislosti na hmotnosti svítidla

m [kg]	w ₁ [mm]	w ₃ [mm]	w [mm]	w _c [mm]	$\emptyset$ [°]	$\emptyset_c$ [°]
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,066	0,874	2,716	0,940	0,010	0,005
3	0,197	0,856	6,383	1,054	0,031	0,006
5	0,329	0,838	10,049	1,167	0,051	0,007
7	0,460	0,820	13,715	1,280	0,071	0,007
9	0,592	0,802	17,382	1,394	0,092	0,008
11	0,723	0,784	21,048	1,507	0,112	0,009
13	0,854	0,766	24,714	1,620	0,132	0,009
15	0,986	0,748	28,380	1,734	0,153	0,010
17	1,177	0,730	32,047	1,847	0,173	0,011
19	1,249	0,712	35,713	1,960	0,193	0,011
21	1,380	0,694	39,379	2,074	0,214	0,012
23	1,512	0,675	43,045	2,187	0,234	0,013
25	1,643	0,657	46,712	2,301	0,254	0,013
27	1,775	0,639	50,378	2,414	0,275	0,014
29	1,906	0,621	54,044	2,527	0,295	0,014
30	1,972	0,612	55,877	2,584	0,305	0,015



Obr. 38.: Grafické vyjádření závislosti úhlů natočení na hmotnosti svítidla

6 Závěr

V úvodu práce byla shrnuta současná a veřejně dostupná řešení konstrukce goniofotometru a naznačena jejich vhodnost pro různé druhy svítidel. Byly stručně popsány vybrané metody, používané při měření svítivosti svítidla. Hlavní část práce tvoří návrh konstrukce univerzálního goniofotometru pro laboratoř světelné techniky ústavu elektroenergetiky FEKT VUT v Brně. V jednotlivých kapitolách je uveden popis důležitých částí konstrukce. Bylo navrženo kompletní zařízení a vytvořen 3D model, na jehož základě je možné zařízení rozpracovat do výrobních výkresů a případně vyrobit. Poznatky z této práce mohou být použity pro další zpracování. Byl vytvořen výpočtový program, pomocí něhož lze konstrukci dimenzovat pro jiné zatížení. Dále byla na základě objednávek u jednotlivých výrobců stanovena přibližná cena celého zařízení po materiálové stránce.

Goniofotometry jsou natolik speciální zařízení, že se jejich výrobou zabývá jen několik málo výrobců. Univerzální goniofotometr, na kterém by bylo možno uskutečnit měření jakéhokoli svítidla od miniaturních LED po velké závěsné a pouliční lampy, se komerčně nevyrábí. Existuje jich několik a každý je určený pro užší a konkrétní oblast svítidel. Například k měření automobilových světlometů, divadelního osvětlovacího zařízení, LED. Samotná konstrukce je odvozena z použité metody měření: Near či Far- Field fotometrie.

Pomocí goniofotometru jsou vytvářeny vyzařovací charakteristiky svítidla, které jsou důležité nejen pro výrobu a návrh svítidel, ale i pro jejich prodej. Goniofotometr je tedy zařízení, které je v laboratořích výrobců světelné techniky a laboratořích výzkumných ústavů téměř nezbytné.

„Je smutné, když něco musíme považovat za hotové a uzavřené.“

JOHANN WOLFGANG GOETHE

7 Seznam použitých zdrojů

- [1] L MARX, Peter. *Neue Goniophotometer für lichttechnische Laboratorien*. Licht [online]. 1997, Jahrg. 97, N. 7-8 [cit. 2008-05-15], s. 602-605. Dostupný z: <<http://www.mx-electronic.com/pdf/Drehspiegeldeu.PDF>>.
- [2] LIGHTING SCIENCES, Inc. *Lamp and LED Photometric System*. Lighting Sciences [online]. 2004, vol. 04, no. 8 [cit. 2008-03-08], s. 1-4. Dostupný z: <<http://www.lightingsciences.com/lamp-photometric-system.pdf>>.
- [3] ASHDOWN, Ian. *Thinking Photometrically Part II*. In LIGHTFAIR 2001 Pre-Conference Workshop. 1.05th Version, March, 14, 2001. s. 1-46. Dostupný: <<http://www.helios32.com/Thinking%20Photometrically%20II.pdf>>.
- [4] Bredemeier, K. Poschmann, R.; Schmidt, F.: *Nahfeldgoniophotometer – Systeme zur Messung der Lichtverteilungen an Leuchten, Lampen und LED*. Licht 2006, 11.09.2006, Bern, 2006 Dostupný z: <http://www.technoteam.de/e898/e97/e305/e1022/Technoteam_Licht2006_Nahfeldgoniophotometer.pdf>
- [5] MALÍŠEK, V, BAJER, J. Společná laboratoř optiky : *Vývoj optiky v českých zemích* [online]. 2006 , 1.11.2006 [cit. 2008-05-18]. Elektronický článek. Dostupný z: <<http://rco.upol.cz/slo/view.php?cisloclanku=2006110002>> nebo <http://www.jcmf.cz/lib/i_hopto.html>.
- [6] DVOŘÁK, Tomáš. *Softwarové vybavení laboratoře pro světlotecnická měření*. [s.l.], leden 2007. 57 s. České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická. Vedoucí diplomové práce Dr. Ing. Libor Veselý. Dostupný z: <https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/dvorakt1_2007dipl.pdf>.
- [7] JANÍČEK, Přemysl, et al. *Mechanika těles : Pružnost a pevnost I*. 3. přeprac. vyd. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství : Akademické nakladatelství cerm, s.r.o. Brno, březen 2004. 287 s. ISBN 80-214-2592-X.
- [8] JANÍČEK, Přemysl, FLORIAN, Zdeněk. *Mechanika těles : Úlohy z pružnosti a pevnosti I*. 4. přeprac. vyd. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství : Akademické nakladatelství cerm, s.r.o. Brno, květen 2004. 170 s. ISBN 80-214-2655-1.
- [9] Profilcatalog MiniTec. [s.l.] : [s.n.], leden 2006. 364 s. [cit. 2. 5. 2008] Dostupný z: <http://www.minitec.de/de/Web/products/catalogue_download.php?SESSID=c3575bae9353d9a7245b73a55fb62aa6>.
- [10] PŘIBIL, Erich. *Technická příručka* [online]. c1998-2004 [cit. 2008-05-03]. Dostupný z: <<http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/>>.

- [11] Igus: *Plastics for longer life* [online]. [2008] [cit. 2008-05-13]. Dostupný z: <<http://www.igus.cz>>.
- [12] Elektronický katalog firmy Techno – inc. [USA]: *Linear Motion Products Catalog* – H834, 2008, str. 41, [cit. 2008-05-15]. Dostupný z: <<http://www.techno-isel.com/tic/H834/H834cat.htm>>.
- [13] SINGULE, Vladislav. *Vlastnosti a použití mikromotorů. Automa* [online]. 2008, roč. 2008, č. 3 [cit. 2008-05-15], s. 62-64. Dostupný z: <http://www.uzimex.cz/soubory/20080327_au_2008-03.pdf>.
- [14] Maxon Motor AG. *Online Katalog Maxon Motor AG* [online]. [2008] [cit. 2008-05-15]. Dostupný z: <<http://www.maxonmotor.de>>.
- [15] BROŽ, Václav, Uzimex, s.r.o. *Možnosti řízení stejnosměrných motorů do 400 W*: MSV Brno 2007. Technika [online]. 2007, roč. 2007, č. 9 [cit. 2008-05-16], s. 48-50. Dostupný z: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070905_te_2007-09.pdf>.
- [16] UZIMEX Praha, spol. s.r.o.. *Malé stejnosměrné motory Maxon*. [s.l.] : [s.n.], 18. 7. 2002. Verze 1.1, 55 s. Dostupný z: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf>.
- [17] AME System Pty. Ltd.. *AME System* [online]. c2006 [cit. 2008-05-17]. En. Dostupný z: <<http://www.amesystem.com.au>>. ABN 85 061 60.
- [18] Feron, a.s.. *On-line ceník s možností objednávek* [online]. c2004 [cit. 2008-05-17]. Dostupný z: <<http://62.168.62.45/cze/ceniky/on-line-cenik.php>>.
- [19] I-náradí.cz : *Náradí pro profesionály i domácí kutily* [online]. c2007 [cit. 2008-05-17]. Dostupný z: <<http://www.i-naradi.cz/>>.
- [20] Hennlich Industrietechnik spol. s r.o. [online]. [2007] [cit. 2008-05-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.hennlich.cz>>.
- [21] SVEN, Kloss. *Ein Goniophotometer zur Messung des Lichtstromes und der Lichtstärkeverteilung von hohlen Lichtleitern*. Berlin, 2001. 93 s. Elektrotechnik der Technische Universität Berlin. Vedoucí dizertační práce Prof. Dr. D. Filbert. [cit. 2008-05-19]. Dostupný z: <http://edocs.tu-berlin.de/diss/2001/kloss_sven.pdf>.
- [22] GONOS, I.F., TRIANTAFILLOPOULOU, E.K., TOPALIS, F.V. *Development of a low-cost automated goniophotometer*. Athens : [s.n.], [200-?]. 5 s. National Technical University of Athens. [cit. 2008-05-19]. Dostupný z: <<http://users.ntua.gr/igonos/MMA2000-Goniophotometer.pdf>>.

- [23] ASHDOWN, Ian, RYKOWSKI, Ron. *Making Near-Filed Photometry Practical*. In IESNA Conference Paper 19. [s.n.], May, 10, 1997. s. 1-22. [cit. 2008-05-19]. Dostupný z: <http://www.infotek.com.tw/support/support_03/IT-RadiantImaging/ORG/Making%20Near-Field%20Photometry%20Practical-ORG-2003%200723.PDF>.
- [24] SVOBODA, Pavel, BRANDEJS, Jan, PROKEŠ, František. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. 2006. první vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2006. 223 s. ISBN 80-7204-465-6.
- [25] Strojmetal Kamenice, a.s.: *Info materiály* [online]. c2006 [cit. 2008-04-23]. Dostupný z: <<http://www.strojmetal.cz/vyvoj/info-materialy.htm>>.
- [26] ELEKTROSVIT Svatobořice, a. s. [online]. [2006] [cit. 2008-05-19]. Dostupný z: <www.elektrosvit.eu>.
- [27] NOLTE, Rainer, BREDEMEIER, Knut. *10 Jahre Nahfeldgoniophotometer – Grenzen und Möglichkeiten*. [s.l.] : [s.n.], [2001]. 15 s.[cit. 2008-05-19]. Dostupný z : <http://www.technoteam.de/e898/e97/e305/e761/10JahreNahfeldgoniometer_ger.pdf>.
- [28] *NEAR-FIELD GONIOPHOTOMETER RIGO 801*. [s.n.], [cit. 2008-05-19]. 16 s. Dostupný z: <http://www.technoteam.de/e898/e97/e284/e289/e745/Brochure-RiGO801-Print_eng.pdf>.

8 Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
E	Modul pružnosti v tahu	MPa
F	Síla	N
g	Tíhové zrychlení	m.s^{-2}
G	Modul pružnosti ve smyku	MPa
J_y	Osový kvadratický moment průřezu	mm^4
k	Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti	-
M	Silový moment	Nmm
m_1	Hmotnost svítidla	kg
M_o	Ohybový moment	Nmm
M_{omax}	Maximální ohybový moment	Nmm
n	Návrhový součinitel	-
$\emptyset$	Natočení rámu od vodorovného směru	°
$\emptyset_c$	Zorný úhel luxmetru	°
p	Tlak při kontrole na střih	MPa
R_e	Mez kluzu materiálu v tahu	MPa
S	Průřez	mm^2
T	Posouvající síla	N
w	Průhyb	mm
W_o	Modul průřezu v ohybu	mm^3
α	Součinitel koncentrace napětí	-
σ_{max}	Maximální ohybové napětí	MPa
σ_{nom}	Nominální ohybové napětí	MPa
T	Tlak při kontrole na otláčení	MPa

9 Seznam obrázků

Obr. 1.: Princip 5-ti násobné vzdálenosti [3].....	8
Obr. 2.: Princip měření svítivosti [4].....	9
Obr. 3.: Metoda LM-70 [3]	9
Obr. 4.: Metoda Luminance-field [3]	10
Obr. 5.: Princip zrcadlového goniofotometru s pevným snímačem [3].....	10
Obr. 6.: Princip zrcadlového goniofotometru s pohyblivým snímačem [1]	11
Obr. 7.: Malý goniofotometr s otočným zrcadlem a snímačem pro měření LED a malých svítidel [2].....	11
Obr. 8.: Schéma měření na goniofotometru s otočným zdrojem světla v laboratoři	12
Obr. 9.: Současný goniofotometr v laboratoři světelné techniky	13
Obr. 10.: Části upínáku.....	14
Obr. 11.: Rameno upínáku, druhá řada.....	14
Obr. 12.: Rameno upínáku, první řada.....	15
Obr. 13.: Maximální a minimální rozpětí ramen upínáku.....	15
Obr. 14.: Sada koncových sklíčidel	16
Obr. 15.: Vidlice se závitovou tyčí	16
Obr. 16.: Závitová vložka.....	16
Obr. 17.: Spojka.....	17
Obr. 18.: Rám s posuvem.....	17
Obr. 19.: Lineární kluzné vedení DryLin® W firmy IGUS [11]	18
Obr. 20.: Vozík s aretací	19
Obr. 21.: Podstavec.....	19
Obr. 22.: Sestava otočného stolu	20
Obr. 23.: Krokový motor (http://www.lakewoodconferences.com)	21
Obr. 24.: Servomotor (http://www.cmcccontrols.com).....	21
Obr. 25.: Řez DC motorem RE firmy Maxon Motor AG (mechanicky komutovaný) [13]	23
Obr. 26.: Řez DC motorem EC firmy Maxon Motor AG (elektronicky komutovaný) [13]	23
Obr. 27.: Sestava pohonu horizontální osy.	24
Obr. 28.: Materiál Iglidur® [11]	24
Obr. 29.: Planetová převodovka Maxon [14]	25
Obr. 30.: Pohon horizontální osy	25
Obr. 31.: Rozvaděč.....	26
Obr. 32.: Energetický řetěz	26
Obr. 33.: Mikrospínač (www.gme.cz)	27
Obr. 34.: Jednotka Epos 2 (Maxon) [14].....	27
Obr. 35.: Schéma řízení pomocí jednotek Epos (Maxon) [15]	27
Obr. 36.: Navržený goniofotometr	29
Obr. 37.: Schéma průhybů a natočení rámu viz. příloha P1.9	30
Obr. 38.: Grafické vyjádření závislosti úhlů natočení na hmotnosti svítidla	30

V přílohách:

P1.1-1: Silové schéma ramena univerzálního upínáku	42
P1.1-2: Průběh ohybového momentu na rameni univerzálního upínáku	42
P1.1-3: Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí při příčném vrtání [7]	43
P1.2-1: Znázornění střihu a otláčení	44
P1.3-1: Silové schéma hřídele upínáku.....	45
P1.3-2: Průběh ohybového momentu na hřídeli upínáku.....	45
P1.3-3: Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí při příčném vrtání [7]	45
P1.4-1: Silové schéma hnací hřídele upínáku.....	46
P1.5-1: Průběh ohybového momentu na hnací hřídeli.....	47
P1.5-2: Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí pro tyč se zápichem [7]	47
P1.6-1: Silové schéma ramena upínáku pro výpočet průhybu.....	48
P1.6-2: Průběh ohybového momentu na rameni univerzálního upínáku	48
P1.6-3: Znázornění průhybu.....	48
P1.7-1: Silové schéma hřídele upínáku.....	49
P1.7-2: Průběh posouvající síly a ohybového momentu a na hřídeli univerzálního upínáku	49

P1.7-3:	Znázornění průhybu	49
P1.8-1:	Silové schéma rámu a úplné uvolnění, schéma zjištění výsledných vnitřních účinků	50
P1.8-2:	Goniofotometr,	50
P1.8-3:	Průběh ohybového momentu po délce střednice m	51
P1.8-4:	Průběh ohybového momentu po délce střednice o	51
P1.8-5:	Úplné uvolnění rámu	52
P1.8-6:	Znázornění posuvu w	52
P1.8-7:	Průřezy profilů	53
P1.8-8:	Natočení rámu	53
P1.9-1:	Schéma posuvů a natočení s luxmetrem 1	54
P1.9-2:	Detail	54
P1.9-3:	Schéma posuvů a natočení s luxmetrem 2	54

10 Seznam příloh

P1	Výpočtová část.....	41
P1.1	Výpočet průřezu ramene univerzálního upínacího mechanismu	42
P1.2	Kontrola čepu.....	44
P1.3	Kontrola nosné hřídele upínáku	45
P1.4	Výpočet reakcí v kluzných ložiskách.....	46
P1.5	Kontrola hnací hřídele k meznímu stavu pružnosti	47
P1.6	Výpočet průhybu profilu ramene upínáku v místě působení síly F	48
P1.7	Výpočet průhybu nosné hřídele upínáku	49
P1.8	Výpočet tuhosti rámu	50
P1.9	Výpočet důsledků posuvů a natočení rámu a svítidla	54
P2	Výpis z výpočtového programu životnosti ložisek firmy IGUS [11]..	55
P3	Stanovení ceny za materiál	57
P4	Parametry pohonů	61
P5	Ukázky vyzařovacích charakteristik	63
P6	Komerčně vyráběné goniofotometru.....	65

Příloha P1 - Výpočtová část

Výpočtová příloha je provedena v podobě programu v programu Mathcad, verze 14.0.0.163 [build 701291152].

Základní vstupní veličiny:

Maximální hmotnost svítidla, na kterou je proveden výpočet:	$m_1 := 30 \text{ kg}$
Tíhové zrychlení:	$g := 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Tíhová síla od svítidla:	$F_1 := m_1 \cdot g = 294.3 \text{ N}$
Mez kluzu materiálu ramene upínáku v tahu: (hliníková slitina EN AW 6082 - Dural)	$R_{ed} := 340 \text{ MPa}$
Modul pružnosti Duralu v tahu:	$E_d := 70000 \text{ MPa}$
Modul pružnosti Duralu ve smyku:	$G_d := 27000 \text{ MPa}$
Mez kluzu v tahu oceli S355J2 (11 503), viz. [10]: (materiál hnací hřídele upínáku)	$R_e := 344 \text{ MPa}$
Modul pružnosti oceli:	$E := 210000 \text{ MPa}$

Budou provedeny kontroly jednotlivých součástí vzhledem k meznímu stavu pružnosti a některé budou navrhovány na danou hodnotu průhybu či natočení střednice. Celý výpočet je prováděn se zjednodušujícími předpoklady a předpokladem lineární pružnosti a pevnosti prutů.

Mezní stav pružnosti tělesa je takový jeho stav, při jehož překročení vznikají plastické deformace (po uskutečnění zatěžovacího cyklu). [7]

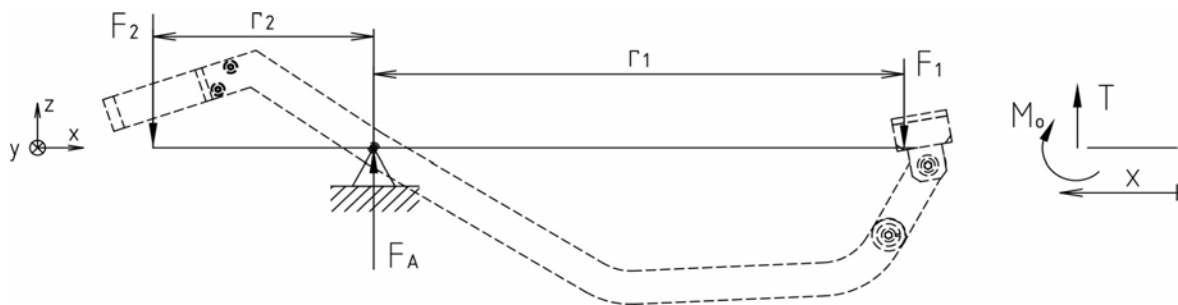
P1.1 - Výpočet průřezu ramene univerzálního upínacího mechanismu

Hledá se výška $h_{\min}$ při návrhové bezpečnosti $n := 3$ (bez uvažování účinku vrubu), šířce $b := 16$ mm a průměru čepu $d := 8$ mm.

Materiál: EN AW 6082 T6, (AlSi1MgMn); Mez kluzu: $R_{ed} = 340$ MPa [25].

Výpočet síly F_2 na rameni pro šroub:

Celý výpočet je zjednodušen na případ rovné obdelníkové tyče o šířce b a hledané výšce h , která je uchycena rotační vazbou v místě čepu. Síly působí ve směru tíhové síly.



Obr. P1.1-1: Silové schéma ramena univerzálního upínáku

Hledá se síla, která vyrovná moment od zátěžné síly F_1 na rameni r_1 .

$$F_1 = 294.3 \text{ N} \quad (\text{tíhová síla od svítidla})$$

$$M_1 = M_2$$

$$r_2 := 210 \text{ mm}$$

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$r_1 := 370 \text{ mm}$$

$$F_2 := F_1 \cdot \frac{r_1}{r_2} = 518.529 \text{ N}$$

$$\text{Reakce na čepu: } F_A := F_1 + F_2 = 812.829 \text{ N}$$

Pozn.: Síla F_1 působící na konci prutu by měla být snížena odhadem o 1/3 - 1/2, protože je lampa sevřena ještě v horizontální ose. Avšak při sevření dotažením šroubu dojde k předpětí, proto bude tato síla ponechána bez změny.

Ohybový moment jako funkce proměnné x :

$$x = (0, r_1 + r_2) = (0, 580) \text{ mm}$$

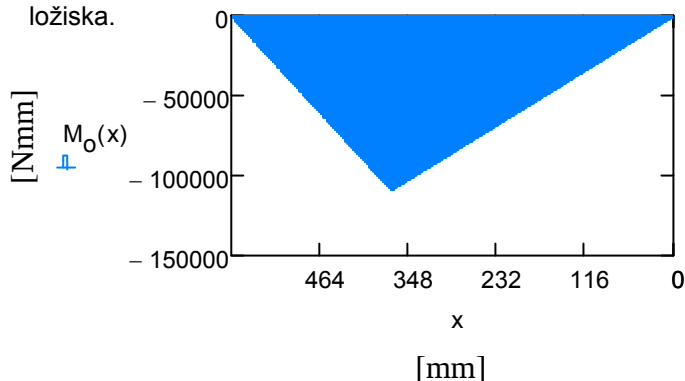
$$M_O(x) := \begin{cases} -F_1 \cdot x & \text{if } x \geq 0 \wedge x \leq r_1 \\ -F_1 \cdot x + F_A \cdot (x - r_1) & \text{if } x > r_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow M_{O1}$$

$$\Rightarrow M_{O2}$$

Průběh ohybového momentu působícího rameno:

Znázorněný průběh ohybového momentu je od působíště síly F_1 po vstup hřídele do ložiska.



$$M_O(0) = 0 \quad \text{Nmm}$$

$$M_O(r_1) = -108891 \quad \text{Nmm}$$

$$M_O(r_1 + r_2) = 0 \quad \text{Nmm}$$

Obr. P1.1-2: Průběh ohybového momentu na rameni univerzálního upínáku

Maximální ohybový moment působící na rameno je podle průběhu v místě čepu:

$$r_1 = 370 \text{ mm} \quad M_{\text{omax}} := |M_o(r_1)| = 108891 \text{ Nmm}$$

Výpočet výšky obdelníkového profilu:

Modul průřezu v ohybu (jedná se o obdelníkový průřez při uvažování vrubového účinku od díry pro čep):

$$W_o = \frac{b \cdot (h_{\text{min}} - d)^2}{6}$$

Nominální ohybové napětí:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{M_{\text{omax}}}{W_o}$$

Odvození vztahu pro výšku profilu:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{6 \cdot M_{\text{omax}}}{b \cdot (h_{\text{min}} - d)^2} \Rightarrow n = \frac{R_e}{\sigma_{\text{nom}}} = \frac{R_e \cdot b \cdot (h_{\text{min}}^2 - 2 \cdot h_{\text{min}} \cdot d + d^2)}{6 \cdot M_{\text{omax}}}$$

$$\Rightarrow d^2 + h_{\text{min}}^2 - 2 \cdot d \cdot h_{\text{min}} - \frac{6 \cdot M_{\text{omax}} \cdot n}{R_e \cdot b} = 0$$

Předpoklad (nutný pro výpočet programem):

$$h_{\text{min}} := 50 \text{ mm}$$

Potom výsledný vztah pro výšku **h** pomocí programu:

$$R_{\text{ed}} = 340 \text{ MPa} \quad M_{\text{omax}} = 108891 \text{ Nmm}$$

$$d = 8 \text{ mm} \quad n = 3$$

$$b = 16 \text{ mm}$$

$$h_{\text{min}} := \text{root} \left(d^2 + h_{\text{min}}^2 - 2 \cdot d \cdot h_{\text{min}} - \frac{6 \cdot M_{\text{omax}} \cdot n}{R_{\text{ed}} \cdot b}, h_{\text{min}} \right)$$

$$\textbf{Výsledná minimální výška profilu:} \quad h_{\text{min}} = 26.982 \text{ mm}$$

Zvolená výška profilu: $h := 30 \text{ mm}$ (s přihlédnutím k velikosti průhybu, viz. P1.6).

Potom:

Modul obdelníkového průřezu v ohybu:

$$W_{\text{od}} := \frac{b \cdot (h - d)^2}{6} = 1290.667 \text{ mm}^3$$

Nominální napětí:

$$\sigma_{\text{nom}} := \frac{M_{\text{omax}}}{W_{\text{od}}} = 84.368 \text{ MPa}$$

Maximální ohybové napětí (s vrubovým účinkem od díry pro čep):

- potřebné poměry pro určení součinitele koncentrace napětí α :

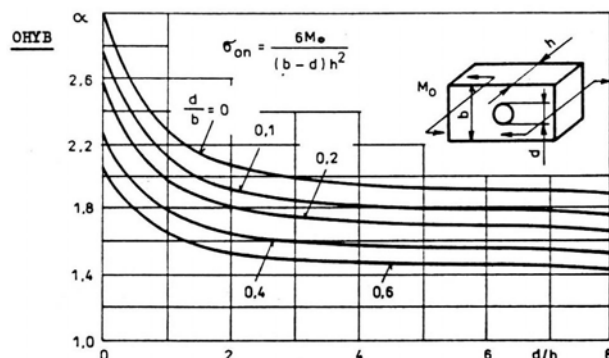
$$\frac{d}{h} = 0.267 \quad \frac{d}{b} = 0.5 \quad \alpha := 2.1$$

Výsledné maximální ohybové napětí

$$\sigma_{\text{max}} := \alpha \cdot \sigma_{\text{nom}} = 177.173 \text{ MPa}$$

Skutečná bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti:

$$k := \frac{R_{\text{ed}}}{\sigma_{\text{max}}} = 1.919$$



Obr. P1.1-3: Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí při příčném vrtní [7]

P1.2 - Kontrola čepu

Čep zcela vyplňuje otvor v rameni a hřídeli, proto je potřeba zkontrolovat na stříh a na otlačení. Ke stříhu dochází tehdy, pokud jsou v těsném kontaktu dvě plochy, přičemž na každou působí síla opačným směrem. Kontrola na otlačení je porovnání tlaku na plochu průřezu čepu s tlakem dovoleným.

Znamé veličiny:

Síla na čep: $F_A = 812.829 \text{ N}$, (viz. P1.1)

Průměr čepu: $d = 8 \text{ mm}$

Nejmenší tloušťka spojovaných součástí: $b = 16 \text{ mm}$

Na otlačení:

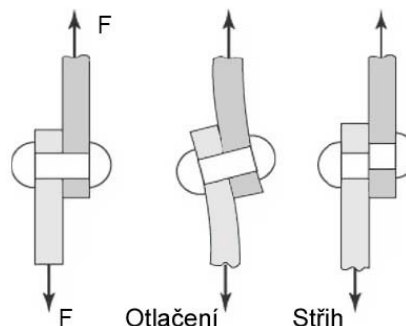
$$\tau := \frac{F_A}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = 16.171 \text{ MPa}$$

Dovolený tlak: $60 \div 80 \text{ MPa}$.

Na stříh:

$$p := \frac{F_A}{b \cdot d} = 6.35 \text{ MPa}$$

Dovolený tlak: $120 \div 150 \text{ MPa}$.

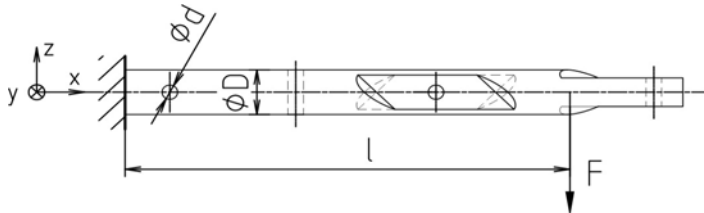


Obr. P1.2-1: Znáznornění stříhu a otlačení

Obě kontroly pro zvolený průměr čepu s přehledem vyhovují.

P1.3 - Kontrola nosné hřídele upínáku

Protože má hřídel mnoho vrubů, je uvažován zjednodušený model pouze s jednou dírou pro čep tam, kde bude působit maximální ohybový moment. Tedy nejbližší k upnutí. Reakce v čepích od vidlicí se navzájem odečtou.



Znamé hodnoty:

$$l := 200 \text{ mm}$$

$$d := 8 \text{ mm}$$

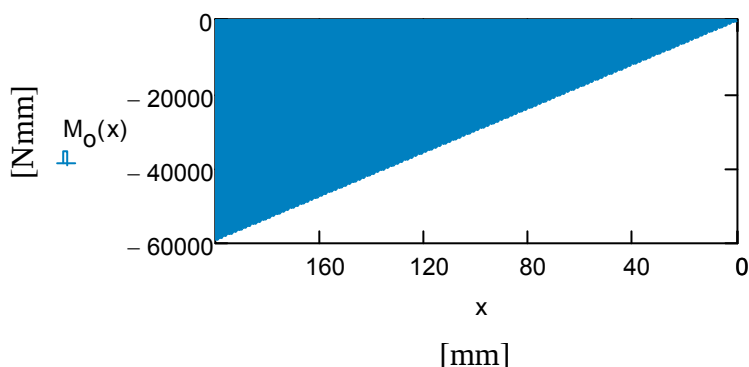
$$D := 25 \text{ mm}$$

$$F_1 = 294.3 \text{ N (tíhová síla lampy)}$$

Obr. P1.3-1: Silové schéma hřídele upínáku

Ohybový moment M_o :

$$x = (0, l) = (0, 200) \text{ mm} \quad M_o(x) := -F_1 \cdot x \Rightarrow |M_o(l)| = 58860 \text{ Nmm}$$



Obr. P1.3-2: Průběh ohybového momentu na hřídeli upínáku

Maximální ohybový moment je v místě upnutí. V tomto místě je tedy také maximální ohybové napětí.

Nominální napětí:

$$\sigma_n := \frac{|M_o(l)|}{\frac{D^3 \pi}{32} - \frac{d \cdot D^2}{6}} = 84.008 \text{ MPa}$$

Určení součinitele koncentrace napětí α :

$$\frac{d}{D} = 0.32 \quad \alpha := 2.1$$

Maximální ohybové napětí:

$$\sigma_{\max} := \sigma_n \cdot \alpha = 176.417 \text{ MPa}$$

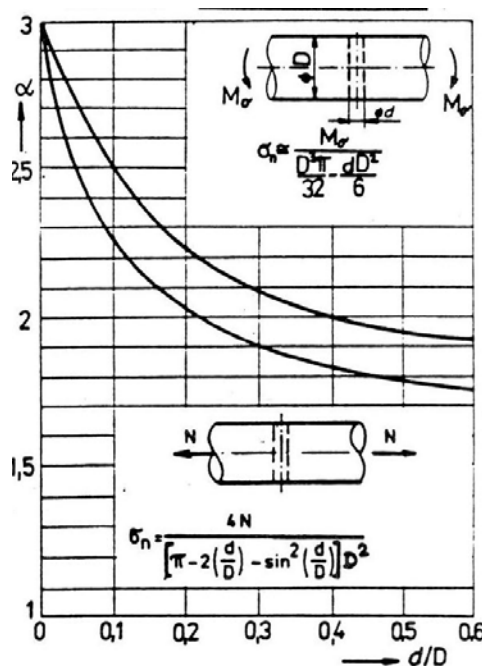
Materiál hřídele: **EN AW 6082**

Mez kluzu: $R_{ed} = 340 \text{ MPa}$

Modul pružnosti: $E_d = 70000 \text{ MPa}$

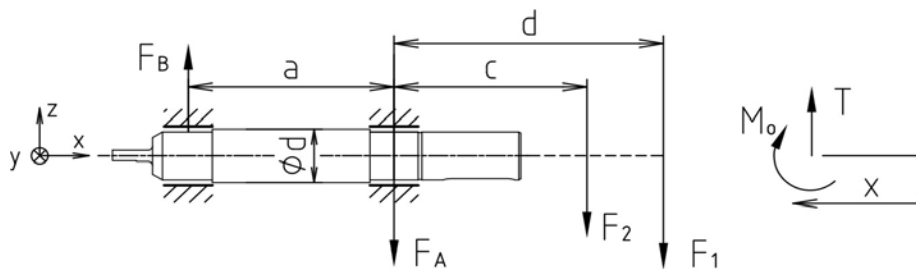
Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti:

$$k := \frac{R_{ed}}{\sigma_{\max}} = 1.927$$



Obr. P1.3-2: Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí při příčném vrtání [7]

P1.4 - Výpočet reakcí v kluzných ložiskách



Obr. P1.4-1.: Silové schéma hnací hřídele upínáku

Znamé veličiny:

Síla F_1 je tíhová síla od svítidla, působící v jeho těžišti, síla F_2 je tíhová síla od upínacího mechanismu, také v těžišti.

$F_1 = 294.3 \text{ N}$	$a := 104 \text{ mm}$	průměr hřídele:	$d_1 := 25 \text{ mm}$
$F_2 := 78.48 \text{ N}$	$c := 772 \text{ mm}$	$c := 402 \text{ mm}$	

Mechanické charakteristiky materiálu hřídele:

Ocel S355J2 (11 503) [10]

Mez kluzu v tahu: $R_e = 344 \text{ MPa}$

Modul pružnosti oceli: $E = 210000 \text{ MPa}$

Rovnice rovnováhy:

$$\sum_i F_z = 0 \quad F_B + F_A - F_1 - F_2 = 0$$

$$\sum_i M_A = 0 \quad F_B \cdot a + F_2 \cdot c + F_1 \cdot d = 0$$

Výsledné reakce z rovnic rovnováhy:

$$F_B := \frac{-F_2 \cdot c - F_1 \cdot d}{a} \quad F_B = -2487.967 \text{ N}$$

$$F_A := F_2 + F_1 - F_B \quad F_A = 2860.747 \text{ N}$$

Výpočet životnosti ložiska je uveden v příloze **P2** jako výpis z výpočtového programu na internetových stránkách výrobce [11].

P1.5 - Kontrola hnací hřídele k meznímu stavu pružnosti

Mezní stav pružnosti tělesa je takový jeho stav, při jehož překročení vznikají plastické deformace (po uskutečnění zatěžovacího cyklu). [7]

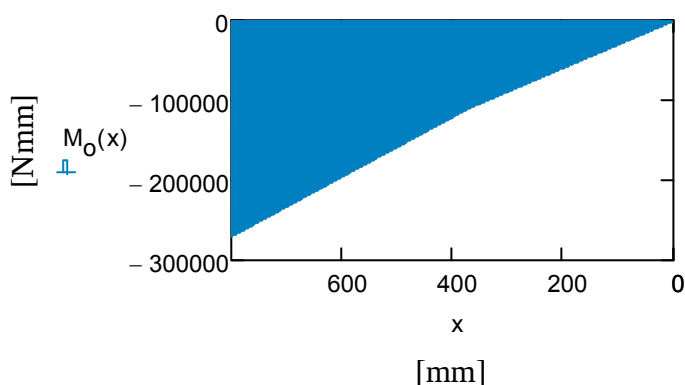
Místo maximálního ohybového momentu je v místě vstupu hřídele do ložiska A. Viz. obr. P1.4-1.

Ohybový moment jako funkce proměnné x:

$$M_O(x) := \begin{cases} (-F_1 \cdot x) & \text{if } x \geq 0 \wedge x \leq (d - c) \\ -F_1 \cdot x - F_2 \cdot (x - d + c) & \text{if } x > (d - c) \end{cases} \quad x = (0, d) = (0, 772)$$

Průběh ohybového momentu působícího na hřídel:

Znáznorněný průběh napětí je od působíště síly F_1 po vstup hřídele do ložiska.



$$M_O(0) = 0 \quad \text{Nmm}$$

$$M_O(d) = -258748.56 \quad \text{Nmm}$$

Obr. P1.5-2: Průběh ohybového momentu na hnací hřídeli

Modul průřezu hřídele v ohybu:

$$W_O := \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} = 1533.981 \quad \text{mm}^3$$

Nominální ohybové napětí:

$$\sigma_n := \frac{|M_O(d)|}{W_O} = 168.678 \quad \text{MPa}$$

Maximální ohybové napětí s uvažováním součinitele koncentrace napětí ve vrubu:

$$d_v := 24.6 \quad \text{mm}$$

Potřebné poměry pro určení součinitele koncentrace napětí:

$$r := 1.6 \quad \text{mm}$$

$$\frac{r}{d_v} = 0.065$$

$$\frac{d_1}{d_v} = 1.016$$

Součinitel koncentrace napětí z grafu:

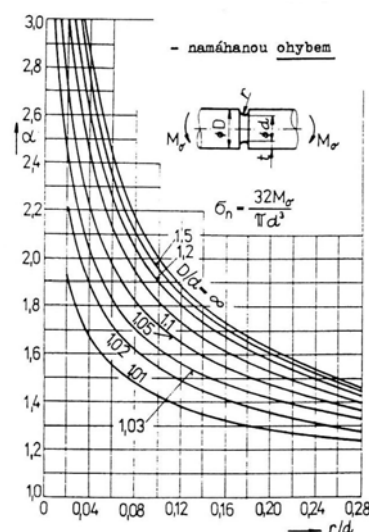
$$\alpha := 1.5$$

Maximální ohybové napětí:

$$\sigma_{\max} := \sigma_n \cdot \alpha = 253.017 \quad \text{MPa}$$

Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti:

$$k := \frac{R_e}{\sigma_{\max}} = 1.36$$

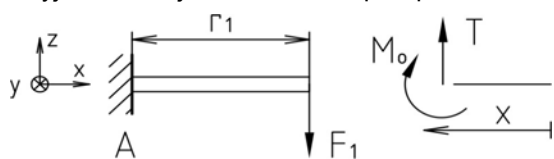


Obr. P1.5-3 : Diagram pro určení součinitele koncentrace napětí pro tyč se zápichem namáhanou ohybem [7]

K meznímu stavu pružnosti tedy nedojde s bezpečností 1.36.

P1.6 - Výpočet průhybu profilu ramene upínáku v místě působení síly F_1

Vyjde se ze zjednodušeného předpokladu, že je profil v místě rotační vazby vetknut.



Znamé veličiny: $F_1 = 294.3$ N (tíhová síla lampy)

$$r_1 = 370 \text{ mm}$$

$$b = 16 \text{ mm (šířka profilu)}$$

$$h = 30 \text{ mm (výška profilu)}$$

$$E_d = 70000 \text{ MPa}$$

$$J_y := \frac{b \cdot h^3}{12} = 36000 \text{ mm}^4$$

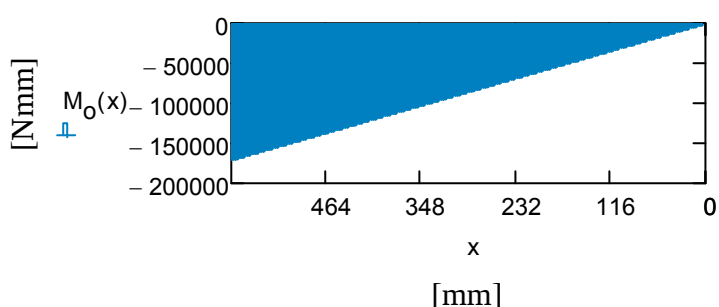
Obr. P1.6-1: Silové schéma ramena upínáku pro výpočet průhybu

Modul pružnosti hliníkové slitiny:

Osový kvadratický moment průřezu:

Ohybový moment M_o :

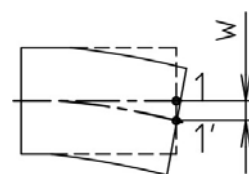
$$x = (0, r_1) = (0, 370) \text{ mm} \quad M_o(x) := -F_1 \cdot x \Rightarrow |M_o(r_1)| = 108891 \text{ Nmm}$$



Obr. P1.6-2: Průběh ohybového momentu na rameni univerzálního upínáku

Potom průhyb w_1 podle Castiglianovy věty [7]:

$$w_1 = \frac{1}{E \cdot J_y} \cdot \left[\int_0^{r_1} M_{o1} \cdot \left(\frac{d}{dF_1} M_{o1} \right) dx \right] = \frac{1}{E \cdot J_y} \cdot \left[\int_0^{r_1} (-F_1 \cdot x) \cdot (-x) dx \right]$$



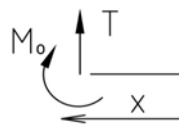
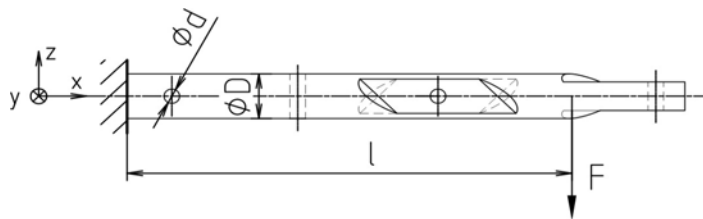
Obr. P1.6-3: Znázornění průhybu

Výsledný průhyb u ve směru síly F_1 :

$$w_1 := \frac{F_1 \cdot r_1^3}{3 \cdot E_d \cdot J_y}$$

$$w_1 = 1.972 \text{ mm}$$

P1.7 - Výpočet průhybu nosné hřídele upínáku



Znamé hodnoty:

$$l = 200 \text{ mm}$$

$$d = 772 \text{ mm}$$

$$D = 25 \text{ mm}$$

$$F_1 = 294.3 \text{ N (tíhová síla lampy)}$$

Obr. P1.7-1: Silové schéma hřídele upínáku

Modul pružnosti hliníkové slitiny EN AW 6082 v tahu:

$$E_d = 70000 \text{ MPa}$$

Modul pružnosti hliníkové slitiny EN AW 6082 ve smyku:

Osový kvadratický moment průřezu:

$$J_y := \frac{\pi \cdot D^4}{64} = 19174.76 \text{ mm}^4$$

$$G_d = 27000 \text{ MPa}$$

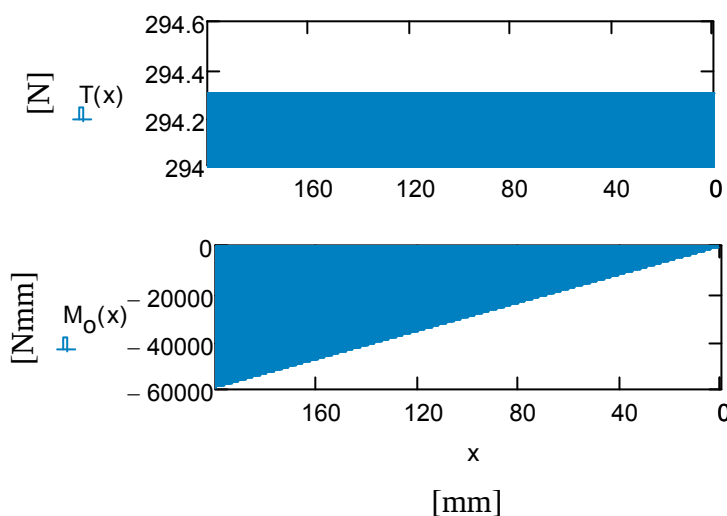
Nejedná se o štíhlý prut: $\frac{l}{D} = 8$, do výpočtu průhybu bude tedy zahrnut i vliv posouvající síly T.

Ohybový moment M_o :

$$x = (0, l) = (0, 200) \text{ mm} \quad M_o(x) := -F_1 \cdot x \Rightarrow |M_o(l)| = 58860 \text{ Nmm}$$

Posouvající síla T:

$$(\text{po celé střednici konstantní}) \quad T(x) := F_1 \Rightarrow T(l) = 294.3 \text{ N}$$

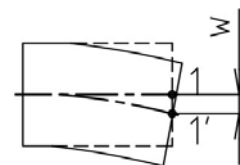


Obr. P1.7-2: Průběh posouvající síly a ohybového momentu a na hřídeli univerzálního upínáku

Potom průhyb w_2 podle Castiglianovy věty [7] (umožňuje zahrnout posouvající sílu):

$$w_2 = \frac{1}{E_d \cdot J_y} \int_0^l M_{o1} \cdot \left(\frac{d}{dF_1} M_{o1} \right) dx + \frac{\beta}{G_d \cdot S} \int_0^l T \cdot \left(\frac{d}{dF_1} T \right) dx$$

$$\Rightarrow \frac{1}{E_d \cdot J_y} \int_0^l (-F_1 \cdot x) \cdot (-x) dx + \frac{1}{G_d \cdot S} \int_0^l F_1 dx$$



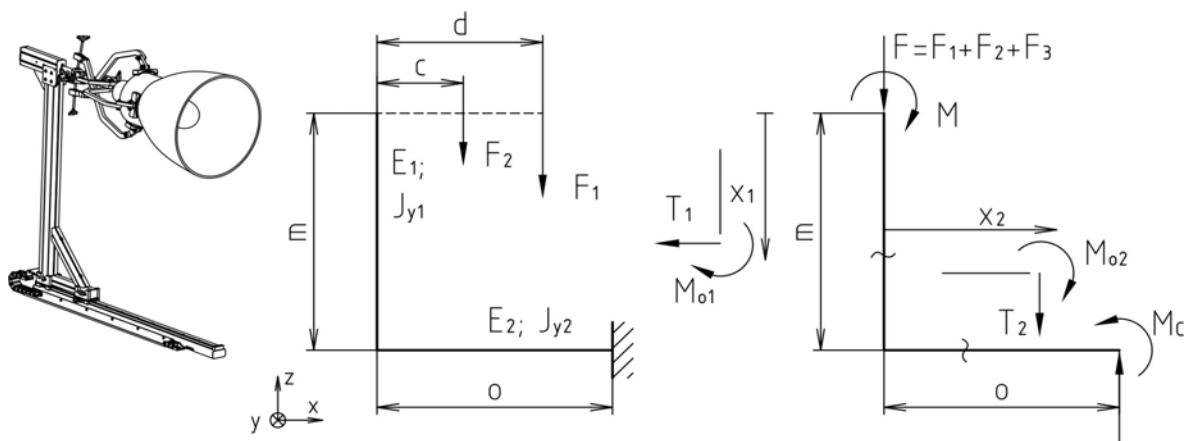
Obr. P1.7-3: Znázornění průhybu

Průřez hřídele: $S := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 490.874 \text{ mm}^2$. Součinitel β má pro kruhový průřez hodnotu: $\beta := \frac{32}{27}$, viz. [7].

Výsledný průhyb w_2 ve směru síly F_1 :

$$w_2 := \frac{F_1 \cdot l^3}{3 \cdot E_d \cdot J_y} + \frac{\beta \cdot F_1 \cdot l}{G_d \cdot S} \quad \boxed{w_2 = 0.59} \text{ mm}$$

P1.8 - Výpočet tuhosti rámu



Obr. P1.8-1.: Silové schéma rámu a úplné uvolnění vazby, schéma zjištění výsledných vnitřních účinku po délce střednice

Znamé veličiny:

Síla F_1 je tíhová síla od svítidla, působící v jeho těžišti, síla F_2 je tíhová síla od upínacího mechanismu, taktéž ve svém těžišti.

$$F_1 = 294.3 \text{ N} \quad c = 402 \text{ mm} \quad \text{Délka spodního profilu: } o := 1040 \text{ mm}$$

$$F_2 = 78.48 \text{ N} \quad d = 772 \text{ mm} \quad \text{Délka svislého profilu: } m := 1100 \text{ mm}$$

$$\text{Tíha montážního celku motoru: } F_3 := 26 \text{ N} \quad \text{Tíha svislého profilu: } F_4 := 40 \text{ N}$$

Silové účinky na rám jsou následující:

$$\text{Moment od svítidla a upínáku: } M := F_1 \cdot d + F_2 \cdot c = 258748.56 \text{ Nmm}$$

$$\text{Tíhová síla svítidla a upínáku: } F := F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = 438.78 \text{ N}$$

Reakce ve vazbě:

$$\sum_i F_C = 0 \quad F_C = F$$

$$\sum_i M_C = 0 \quad M = M_C$$

Síla a moment ve vazbě jsou rovny zatěžujícím účinkům M a F .

Pro výpočet kontrol bezpečnosti a posuvu koce profilu pomocí Castiglianovy věty, viz. [7], budou zavedeny ohybové momenty v tomto tvaru:

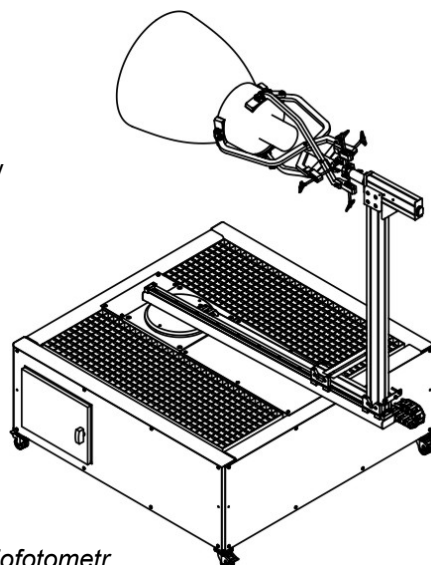
Tíhové zrychlení je $g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$

Ohybový moment jako funkce proměnné x_i :

$$M_{o1}(x_1) := -M \text{ Nmm} \quad x_1 = (0, m) = (0, 1100)$$

$$M_{o2}(x_2) := -M + F \cdot x_2 + g \cdot x_2 \text{ Nmm}$$

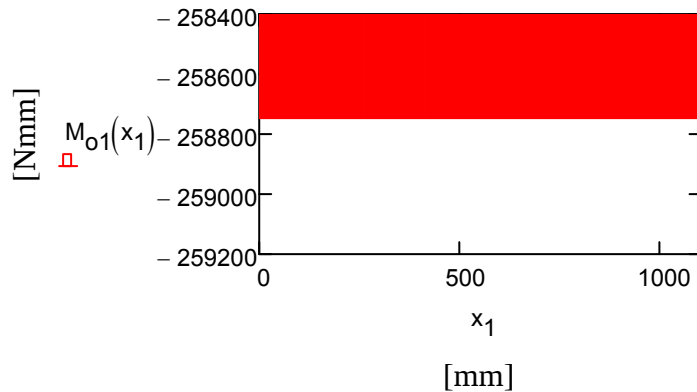
$$x_2 = (0, o) = (0, 1040)$$



Obr. P1.8-2.: Goniofotometr

Maximální ohybový moment je v místě přechodu profilů. Působí zde na maximální délce ramene tíhová síla F a konstantní moment M .

$$x_1 := 0 \dots 1100$$



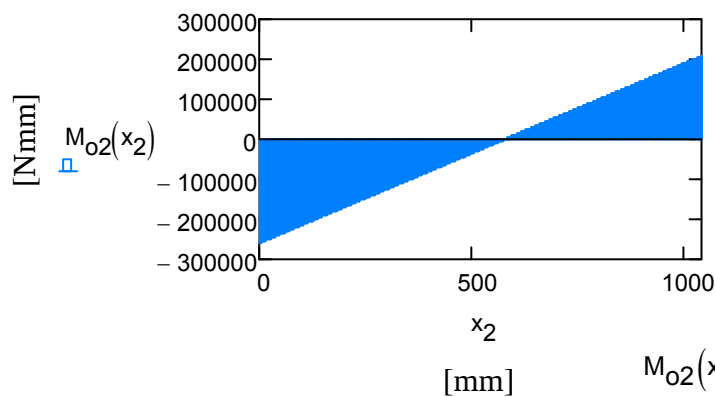
$$M_{o1}(0) = -258748.56 \text{ Nmm}$$

$$M_{o1}(m) = -258748.56 \text{ Nmm}$$

$$M_{o1max} = M$$

Obr. P1.8-3.: Průběh ohybového momentu po délce střednice m

$$x_2 := 0 \dots 1040$$



$$M_{o2}(0) = -258748.56 \text{ Nmm}$$

$$M_{o2}(o) = 207785.04 \text{ Nmm}$$

$$M_{o2max} = M$$

$$M_{o2}(x_2) = 0 \dots x_2 := \frac{M}{F} = 589.7 \text{ mm}$$

Obr. P1.8-4.: Průběh ohybového momentu po délce střednice o

Základní vztahy obecně, viz [7]:

Maximální ohybové napětí:
$$\sigma_{max} = \frac{M_{omax}}{W_o}$$

M_{omax} = maximální ohybový moment

W_o = modul průřezu v ohybu

Modul průřezu v ohybu:
$$W_o = \frac{J_o}{h_o}$$

J_o = osový kvadratický moment průřezu k charakteristické ose $\underline{o}$

h_o = charakteristický rozměr průřezu vzhledem k ose $\underline{o}$

Bezpečnost k MSP:
$$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}}$$

R_e = mez kluzu materiálu v tahu

V tomto případě $h = \frac{h_1}{2}$, potom vztah pro maximální ohybové napětí:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{omax} \cdot h_1}{2 \cdot J_y}$$

Výpočet:

Veškeré údaje o profilech jsou vybrány z katalogu MiniTec, viz [9].

Šířka hliníkového profilu: $h_1 := 90 \text{ mm}$. $J_{y1} := 1128220 \text{ mm}^4$ $R_{ep} := 200 \text{ MPa}$

$$\sigma_{max1} := \frac{M \cdot h_1}{2 \cdot J_{y1}} = 10.32 \text{ MPa} \quad \text{Bezpečnost k MSP: } k_1 := \frac{R_{ep}}{\sigma_{max1}} = 19.379$$

Pozn.1: Zkratka MSP znamená: mezní stav pružnosti tělesa. To je takový stav, při jehož překročení vznikají plastické deformace (po uskutečnění zatěžovacího cyklu) [7], jak už bylo řečeno v úvodu.

Pro vodorovný profil je zvolena bezpečnost $k_2 := 1.5$ a dále bude hledán kvadratický moment průřezu J_{y2} při vzdálenosti extrémního místa od neutrálné osy (charakteristická vzdálenost) $h_2 := 30$, $R_{e2} := 240$ MPa. Vzdálenost neutrálné osy je stanovena jako předpoklad stejně tak i mez pevnosti v tahu je stanovena podle předpokládaného materiálu S235JRG2 (ocel 11 375) viz. [10].

Pozn.2: Neutrálná osa je přímka procházející těžištěm příčného průřezu. Je geometrickým místem bodů příčného průřezu s nulovým délkovým přetvořením a tím i nulovým napětím. [7]

$$\sigma_{\max 2} = \frac{M \cdot h_2}{2 \cdot J_{y2}} \quad \begin{array}{l} \text{Modul pružnosti hliníkového profilu (svislá část o délce } m): E_d = 70000 \text{ MPa} \\ \text{Modul pružnosti ocelového profilu (vodorovná část o délce } o): E = 210000 \text{ MPa} \end{array}$$

$$k_2 = \frac{2 \cdot J_{y2k} \cdot R_{e2}}{h_2 \cdot M} \Rightarrow J_{y2b} := \frac{k_2 \cdot h_2 \cdot M}{2 \cdot R_{e2}} = 24257.677 \text{ mm}^4$$

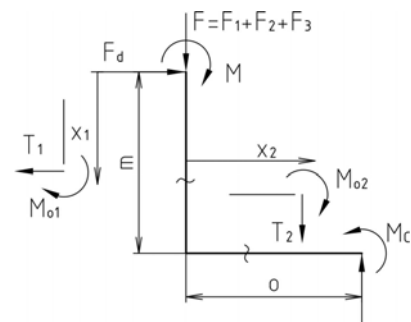
Z uvedeného výpočtu vyplývá, že by vzhledem k bezpečnosti $k_2 = 1.5$ k meznímu stavu pružnosti stačil profil s kvadratickým momentem $J_{y2b} = 24257.677 \text{ mm}^4$. Vyjdeme však ještě ze druhého kritéria a tím je stanovený dovolený průhyb v koncových bodech profilů. Toto kritérium je důležitější, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti měření. Bezpečnost k MSP je podmínkou nutnou, ale nepostačující. Proto bude i přes vysokou bezpečnost k meznímu stavu pružnosti upřednostněno následující kritérium.

Dovolený průhyb: - ve směru síly F , $w_d := 0.75 \text{ mm}$

Ohybové momenty:

$$M_{o1}(x_1) = -M$$

$$M_{o2}(x_2) = -M + F \cdot x_2 + g \cdot x_2$$



Obr. P1.8-5: Úplné uvolnění rámu

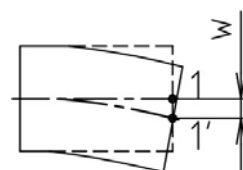
Výpočet osového kvadratického momentu J_{y2w} z podmínky $w_d = 0.75 \text{ mm}$:

$$w = \frac{1}{E_d \cdot J_{y1}} \cdot \int_0^m M_{o1}(x_1) \cdot \left(\frac{d}{dF} M_{o1}(x_1) \right) dx_1 + \frac{1}{E \cdot J_{y2w}} \cdot \int_0^o M_{o2}(x_2) \cdot \left(\frac{d}{dF} M_{o2}(x_2) \right) dx_2$$

$$w = \frac{1}{E_d \cdot J_{y1}} \cdot \int_0^m (-M) \cdot (0) dx_1 + \frac{1}{E \cdot J_{y2w}} \cdot \int_0^o (-M + F \cdot x_2 + g \cdot x_2) \cdot (x_2) dx_2$$

$$J_{y2w} := -\frac{o^2 \cdot (3 \cdot M - 2 \cdot F \cdot o - 2 \cdot g \cdot o)}{6 \cdot E \cdot w_d}$$

$$J_{y2w} = 179490.112 \text{ mm}^4$$



Obr. P1.8-6: Znázornění posuvu w

Pro konstrukci bude tedy zvolen uzavřený ocelový profil 80x40x4, na který bude přišroubována kolejnice pro lineární kluzné vedení. Ocel S235JRH/IT (1.0039) dle EN 10219-1:42 1052, Obdobná: 11 375.[viz. 18]

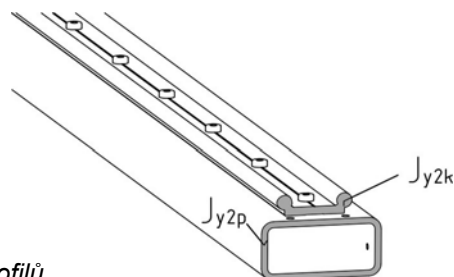
Celkový osový kvadratický moment vodorovné části rámu:

Osový kvadratický moment profilu: $J_{y2p} := 214853 \text{ mm}^4$

Osový kvadratický moment kolejnice: $J_{y2k} := 5041 \text{ mm}^4$

$$J_{y2} := J_{y2p} + J_{y2k} = 219894 \text{ mm}^4$$

Obr. P1.8-7: Průřezy profilů

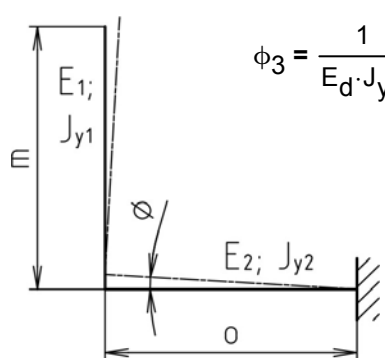


Konečný posuv rámu ve směru tíhové síly při zatížení svítidlem o váze 30 kg.

$$w_3 := -\frac{o^2 \cdot (3 \cdot M - 2 \cdot F \cdot o - 2 \cdot g \cdot o)}{6 \cdot E \cdot J_{y2}} \quad \boxed{w_3 = 0.612 \text{ mm}}$$

Výpočet natočení na konci rámu:

$$\phi_3 = \frac{1}{E_d \cdot J_{y1}} \cdot \int_0^m M_{o1}(x_1) \cdot \left(\frac{d}{dM} M_{o1}(x_1) \right) dx_1 + \frac{1}{E \cdot J_{y2w}} \cdot \int_0^o M_{o2}(x_2) \cdot \left(\frac{d}{dM} M_{o2}(x_2) \right) dx_2$$



$$\phi_3 = \frac{1}{E_d \cdot J_{y1}} \cdot \int_0^m (-M) \cdot (-1) dx_1 + \frac{1}{E \cdot J_{y2w}} \cdot \int_0^o (-M + F \cdot x_2 + g \cdot x_2) \cdot (-1) dx_2$$

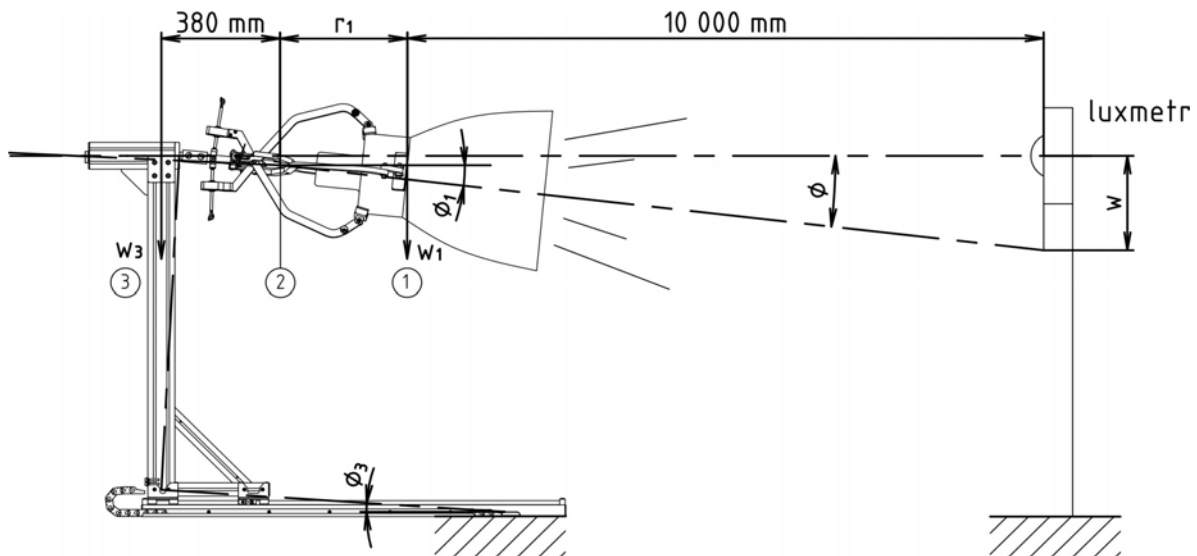
$$\phi_3 := \left(\frac{M \cdot m}{E_d \cdot J_{y1}} - \frac{F \cdot J_{y1} \cdot o^2 + J_{y1} \cdot g \cdot o^2 - 2 \cdot J_{y1} \cdot M \cdot o}{2 \cdot E \cdot J_{y1} \cdot J_{y2w}} \right)$$

$$\boxed{\phi_3 = 0.247^\circ}$$

Obr. P1.8-8: Natočení rámu

Natočení rámu, tedy vychýlení z původní polohy je $\phi_3 = 0.247^\circ$, jak se toto natočení spolu s vypočtenými posuvy projeví na luxmetru pojednává příloha P1.9.

P1.9 - Výpočet důsledků posuvů a natočení rámu a svítidla



Obr. P1.9-1: Schéma posuvů a natočení s luxmetrem 1

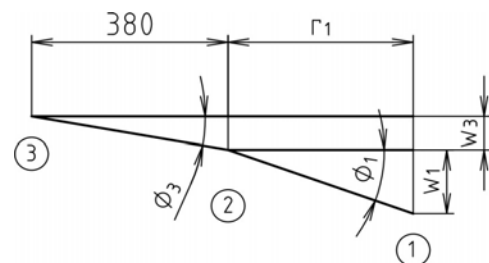
$$w_1 = 1.972 \text{ mm} \quad r_1 = 370 \text{ mm}$$

S pomocí základních goniometrických funkcí:

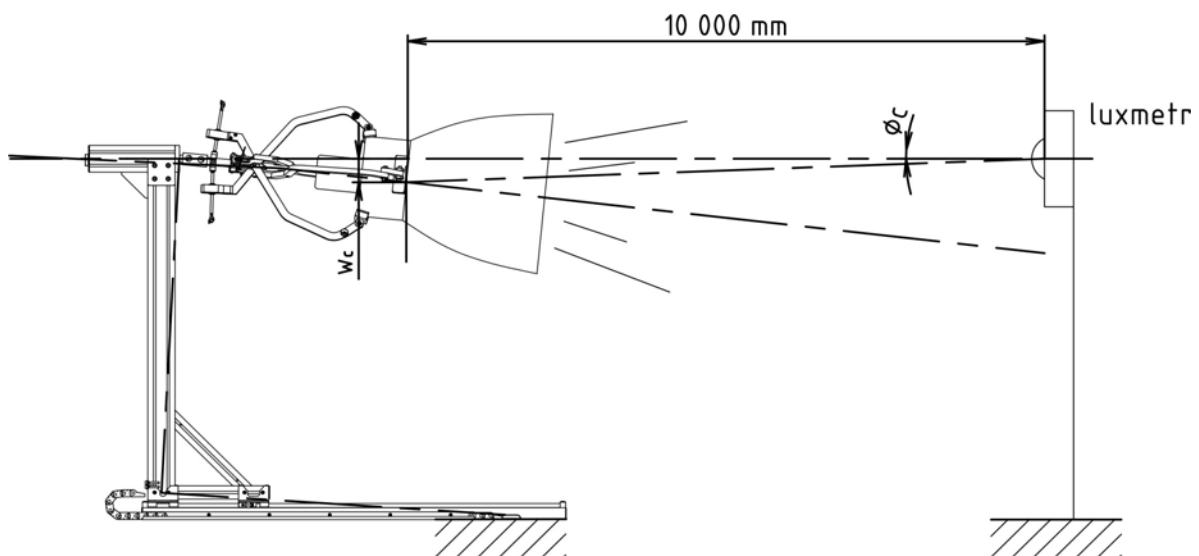
$$\phi_1 := \operatorname{atan}\left(\frac{w_1}{r_1}\right) \quad \boxed{\phi_1 = 0.305^\circ} \quad \boxed{\phi := \phi_1}$$

$$w_3 + \tan(\phi_3) \cdot 380 = 2.249 \text{ mm}$$

$$w := (r_1 + 10000) \cdot \tan(\phi_1) + w_3 \quad \boxed{w = 55.877} \text{ mm}$$



Obr. P1.9-2: Detail



Obr. P1.9-3: Schéma posuvů a natočení s luxmetrem 2

Zorný úhel luxmetru na zdroj světla:

$$w_c := w_1 + w_3 = 2.584 \text{ mm}$$

$$\phi_c := \operatorname{atan}\left(\frac{w_c}{10000}\right) \quad \boxed{\phi_c = 0.015^\circ}$$

Příloha P 2 – Výpis z výpočtového programu životnosti ložisek firmy IGUS [11]

Ložisko A

Sliding bearing analysis iglidur® G

Application parameter

Measurement:

Type: Type F

Shaft diameter $d_1 = 25 \text{ mm}$

Bearing width $b_1 = 25 \text{ mm}$

Wall thickness $s = 0,5 \text{ mm}$

Flange thickness $b_2 = 0,5 \text{ mm}$

Load:

Maximum bearing load $F = 2529 \text{ N}$

Average surface pressure $P = 4,129 \text{ N/mm}^2$

Type of motion: Rotating

Speed:

Number of revolutions = 1 RPM

Rotating speed = 0,001 m/s

Pure motion time per hour = 60 min

Temperature:

Maximum ambient temperature = 20 °C

Max. Temperature = 20 °C

Minimum temperature = 20 °C

Mating surface:

Shaft material: CF 53 / 1.1213

Average peak to valley height $R_a = 0,2 \mu\text{m}$

Thermal conductivity = 48 W/m*K

Housing:

Housing material: Steel

Thermal conductivity = 48 W/m*K

Intermittent service:

Turn-on time $t_1 = 0 \text{ Seconds}$

Standstill period $t_2 = 0 \text{ Seconds}$

Wear limits:

Wear limit = max. 0,25 mm

Expert result

Overall result

The material is suitable for use under the specified conditions.

The lifetime of the application predicted by the expert is 13665 hour(s).

The kilometric performance determined is 64,4 km.

The wear-and-tear determined is 3,9 $\mu\text{m/km}$.

35 (of 100) points were allocated for the evaluation of costs per sliding bearing.

For this material, expert recommends the product with article number GFM-2526-25.

Test of actual sliding speeds

The applicable type of motion is Rotating .

The rotational speed /oscillating rate of the application is 0,001 m/s.

The maximum permissible rotational speed during continuous operation is 1 m/s.

The material is suitable for use at the specified sliding speed.

Test of the maximum permissible surface pressure

The applicable surface pressure is 4,129 N/mm².

The surface pressure permissible for the material at the specified temperature is 80 N/mm².

The material is suitable for use at the specified surface pressure.

Test of the maximum permissible PV value

The P*V value of the described application is 0,004 N/mm² * m/s.

The maximum permissible P*V value is 0,42 N/mm² * m/s.

The P*V value of the arrangement lies within the permissible limits.

Test of the temperatures occurring under real operating conditions

The ambient temperature during operation is 20 °C.

The highest permissible temperature for this application is 20 °C.

The minimum temperature for this application is 20 °C.

The maximum temperature permissible for the material is 130 °C.

The minimum temperature permissible for the material is -40 °C.

The material can withstand a temperature of 220 °C for brief periods.

The material is suitable for use at the specified temperatures.

igidur sliding bearings are maintenance-free. A lubrication system improves the run-in response, but often increases susceptibility to soiling, as dirt particles then tend to adhere to the bearings.

Ložisko B

Sliding bearing analysis iglidur® G

Application parameter

Measurement:

Type: Type F

Shaft diameter $d_1 = 25 \text{ mm}$

Bearing width $b_1 = 25 \text{ mm}$

Wall thickness $s = 0,5 \text{ mm}$

Flange thickness $b_2 = 0,5 \text{ mm}$

Load:

Maximum bearing load $F = 2156 \text{ N}$

Average surface pressure $P = 3,52 \text{ N/mm}^2$

Type of motion: Rotating

Speed:

Number of revolutions = 1 RPM

Rotating speed = 0,001 m/s

Pure motion time per hour = 60 min

Temperature:

Maximum ambient temperature = 20 °C

Max. Temperature = 20 °C

Minimum temperature = 20 °C

Mating surface:

Shaft material: CF 53 / 1.1213

Average peak to valley height $R_a = 0,2 \mu\text{m}$

Thermal conductivity = 48 W/m*K

Housing:

Housing material: Steel

Thermal conductivity = 48 W/m*K

Intermittent service:

Turn-on time $t_1 = 0 \text{ Seconds}$

Standstill period $t_2 = 0 \text{ Seconds}$

Wear limits:

Wear limit = max. 0,25 mm

Expert result

Overall result

The material is suitable for use under the specified conditions.

The lifetime of the application predicted by the expert is 13117 hour(s).

The kilometric performance determined is 61,8 km.

The wear-and-tear determined is 4 $\mu\text{m/km}$.

35 (of 100) points were allocated for the evaluation of costs per sliding bearing.

For this material, expert recommends the product with article number GFM-2526-25.

Test of actual sliding speeds

The applicable type of motion is Rotating .

The rotational speed /oscillating rate of the application is 0,001 m/s.

The maximum permissible rotational speed during continuous operation is 1 m/s.

The material is suitable for use at the specified sliding speed.

Test of the maximum permissible surface pressure

The applicable surface pressure is 3,52 N/mm².

The surface pressure permissible for the material at the specified temperature is 80 N/mm².

The material is suitable for use at the specified surface pressure.

Test of the maximum permissible PV value

The P*V value of the described application is 0,004 N/mm² * m/s.

The maximum permissible P*V value is 0,381 N/mm² * m/s.

The P*V value of the arrangement lies within the permissible limits.

Test of the temperatures occurring under real operating conditions

The ambient temperature during operation is 20 °C.

The highest permissible temperature for this application is 20 °C.

The minimum temperature for this application is 20 °C.

The maximum temperature permissible for the material is 130 °C.

The minimum temperature permissible for the material is -40 °C.

The material can withstand a temperature of 220 °C for brief periods.

The material is suitable for use at the specified temperatures.

Iglidur sliding bearings are maintenance-free. A lubrication system improves the run-in response, but often increases susceptibility to soiling, as dirt particles then tend to adhere to the bearings.

Příloha P3 - Stanovení ceny za materiál

Cena stanovená na základě pohledávky firmou Hennlich, obchodním partnerem IGUS pro Českou republiku. Viz. [20].

Počet ks.	Katalog. číslo	Popis	Poznámka	Cena za 1 ks	Cena celkem
2	GFM-2526-25	Kluzné pouzdro		97,00 Kč	194,00 Kč
1	B15.038.038.0	Energ. Řetěz E2 Mini	délka 793 mm		783,19 Kč
1	WS-10-40,1364	Kolej lin. vedení	délka 1364 mm		2 578,40 Kč
1	WW-10-40-10 HKA	Vozík		2 241,00 Kč	2 241,00 Kč
1	WW-10-40-10	Vozík		1 422,00 Kč	1 422,00 Kč
Celkem					7 218,59 Kč

Pozn.: Společnost Hennlich je ochotna v rámci studenkové práce poskytnout objednané zboží pouze za cenu dopravy

Cena stanovená na základě pohledávky firmou Uzimex Praha, spol. s.r.o., obchodním partnerem Firmy Maxon Motor AG pro Českou republiku [16]

Počet ks.	Katalog. číslo	Popis	Cena za 1 ks	Cena celkem
1	VUT53 / Pohon RE 30 + GP 32 C + MR Typ L	310009 - Motor RE 30, GB, 60W, KL, 2WE, FS5x20, BS3x15.7, 48V; 166970 - Převodovka GP 32 C, 6.0Nm, 5St, KL, 2548:1, keramika; 225783 - Inkrementální snímač MR, typ L, 256 imp./ot., 3 kanály, LD	791,18 CHF	791,18 CHF
1	VUT54 / Pohon EC 45 + GP 62 A + HEDL 9140	136209 - Motor EC 45, BL, 250W, KL, 2WE, FS8x33, BS, 48V; 110508 - Převodovka GP 62, 50Nm, 3St, KL, 236:1; 137959 - Snímač HEDL 9140, 500 imp./ot., 3 kanály, LD - RS 422	1 749,14 CHF	1 749,14 CHF
1	347717 / EPOS2 50/5	Řídicí jednotka rychlosti i polohy EPOS2 50/5, pro DC a EC motory. Druhá generace EPOS jednotky, USB port	738,21 CHF	738,21 CHF
1	323232 / EPOS P 24/5	Programovatelná řídicí jednotka polohy EPOS P 24/5	810,70 CHF	810,70 CHF

Cena celkem CHF: 4 089,23 CHF
 Celkem cena bez DPH: (Valuty prodej: CHF = 15,60 Kč, zdroj Exchange, s.r.o. ke dni 19.5.2008) 63 792,05 Kč
 Celkem s DPH: 75 912,54 Kč

Přibližná cena hliníkových profilů a příslušenství podle stránek společnosti AME Systém Pty. Ltd. Viz. [17]

Počet ks.	Č. výrobku	Označení výrobku	Poznámka	Cena za 1 ks	Cena celkem
1	20.1006/0	Profil 45 x 45	délka 310 mm	122,76 Kč	122,76 Kč
1	20.1009/0	Profil 45 x 90	délka 1100 mm	834,90 Kč	834,90 Kč
1	20.1080/0	Profil 45 x 90 S	délka 280 mm	212,52 Kč	212,52 Kč
1	21.1017/0	Schraubverbindung		41,25 Kč	41,25 Kč
1	21.1135/0	Montagenwinkel 45 x 90 GD	se spojovacím materiálem	272,25 Kč	272,25 Kč
8	21.1204/0	Zylinderschraube M8 x 25		8,25 Kč	66,00 Kč
2	21.1220/0	Zylinderschraube M5 x 12		4,95 Kč	9,90 Kč

2	21.1320/2	Gleitmutter mit Federblech M5		13,20 Kč	26,40 Kč
8	21.1351/2	Gleitmutter mit Federblech M8		46,20 Kč	369,60 Kč
2	21.1473/0	Verbindungsplatte 90 x 90	se spojovacím materiálem	214,50 Kč	429,00 Kč
1	21.1761/0	Verspannelement 45	se spojovacím materiálem	277,20 Kč	277,20 Kč
4	21.1892/0	Gelenkfuss PA M10 80		240,90 Kč	963,60 Kč
1	22.1067/1	Abdeckkappe 45 x 45		24,75 Kč	24,75 Kč
1	28.0094/0	Abdeckkappe		33,00 Kč	33,00 Kč

Celkem 3 683,13 Kč

Cena zboží z online ceníku firmy Feron a.s. Viz [18].

Množství	Číslo	Popis	Cena za jednotku	Cena celkem
74,6 kg	5R0528H	PROFIL UZAVŘENÝ SVAŘOVANÝ ČERNÝ EN 10219, zn. S235JRH - rozměr:80x80x5	39,98 Kč	2 982,51 Kč
4,5 kg	5M0431P	PROFIL UZAVŘENÝ SVAŘOVANÝ ČERNÝ EN 10219, zn. S235JRH - rozměr:20x20x2	37,51 Kč	168,80 Kč
3,38 m	5M0634K	PROFIL UZAVŘENÝ SVAŘOVANÝ ČERNÝ EN 10219, zn. S235JRH - rozměr:80x40x4	266,69 Kč	901,41 Kč
35 kg	210057A	PLECH VÁLC.ZA TEPLA EN 10029-A-N, EN 10025-2, zn. S235JR - rozměr:30x1000x2000	41,08 Kč	1 437,80 Kč
2 kg	212163A	PLECH VÁLC.ZA TEPLA DIN 1543, zn. QStE 380 TM DLE SEW 092 - rozměr:12x1000x2000	37,71 Kč	75,42 Kč
20 kg	250068P	PLECH VÁLC.ZA STUDENA ČSN 42 6317.22, ČSN 42 0117, zn. 11 375.21 DLE ČSN, matný, maštěný - rozměr:1x1000x2000	37,14 Kč	742,80 Kč
0,5 m	141112R	TYČ KRUHOVÁ VÁLC. ZA TEPLA EN 10060, EN 10025-2, zn. S355J2 - rozměr:28	122,67 Kč	61,34 Kč
0,3 m	9M0536U	TYČ KRUHOVÁ LISOVANÁ EN 755-3, EN 755-1, zn. AW-2007 T4 [AlCu4PbMgMn] dle EN 573-3 - rozměr:25	199,28 Kč	59,78 Kč
20 kg	9O0231D	PLECH HLINÍKOVÝ EN 485-3, EN 485-1, zn. AW-6082 T651 [AlSi1MgMn] dle EN 573-3 - rozměr:20x1020x2020	224,91 Kč	4 498,20 Kč
1,2 kg	420629D	PLECH NEREZ VÁLC. ZA TEPLA, EN ISO 9445, EN 10028-7, zn. 1.4301+1D (MOŘENÝ) - rozměr:2x1000x2000	132,09 Kč	158,51 Kč
1 ks	8Y0128N	Podlahový rošt DIN 24537, SP 230-34/38-bez povrchové úpravy, nosná délka 1100mm - rozměr:1100x1000	1 192,38	1 192,38 Kč

Celkem 12 278,94 Kč

Cena stanovena odhadem podle počtu kusů spojovacího materiálu, který byl získán 3D modelovacím programem SolidWorks, a s pomocí internetového obchodu se spojovacím materiálem.Viz. [19]. Jako referenční byl stanoven níže uvedený šroub.

Množství	Číslo	Popis	Cena za jednotku	Cena celkem
500 ks		Šroub DIN 912 M8-100-8N	6,00 Kč	3 000,00 Kč

Celkem 3 000,00 Kč

Cena stanovena podle internetového obchodu <http://eshop.adoz.cz>, 19.5.2008.

Množství	Číslo	Popis	Cena za jednotku	Cena celkem
1 ks	LV0103010099	Kuličkové axiální ložisko ZKL KINEX - 51122A	596,19 Kč	596,19 Kč
Celkem				596,19 Kč

Cena stanovena odhadem, podle cen podobných typů jiných výrobců.

Množství	Číslo	Popis	Cena za jednotku	Cena celkem
1 ks	355 01	Coffrets RAL 7035 (suite) 300 x 400 x 200 (www.legrand.cz)	3 500,00 Kč	3 500,00 Kč
Celkem				3 500,00 Kč

Celková cena za materiál:			106 189,39 Kč	
---------------------------	--	--	---------------	--

Příloha P4 – Parametry pohonů

Pohon horizontální osy

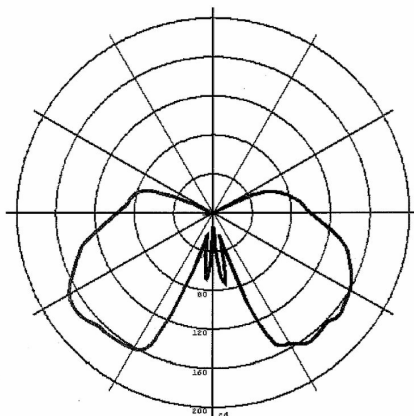
maxon motor	Selected items		
	Gear		166970
	Motor		310009
	Tacho/enc./res.		225783
	Combination order no.		upon request
	Combination data		
	No load speed at gear output	min ⁻¹	4
	Max. cont. torque at gear output	Nm	6.0
	Interm. perm. torque at gear output	Nm	7.5
	Length	mm	135.8
	Gear order no.		166970
	Planetary Gearhead GP 32 C Ø32 mm 6 Nm, ball bearing, Ceramic		
	Gear data		
	Reduction		2548:1
	Number of stages		5
	Max. cont. torque	Nm	6.0
	int. permissible Torque	Nm	7.5
	Sense of rotation, drive to output		=
	Max. efficiency	%	50
	Average backlash, unloaded	deg	1.0
	Mass inertia	gcm ²	0.7
	Gearhead length	mm	56.4
	Weight	g	258
	Max. motor shaft diameter	mm	4.0
	Motor order no.		310009
	RE 30 Ø 30 mm, Graphite brushes, 60 Watt		
	Motor data		
	Power rating	W	60
	Nominal voltage	Volt	48.0
	No load speed	min ⁻¹	8490
	Stall torque	Nm	1.02
	Speed/torque gradient	min ⁻¹ mNm ⁻¹	8.33
	No load current	mA	79
	Starting current	A	19
	Terminal resistance	Ohm	2.52
	Max. permissible speed	min ⁻¹	12000
	Max. continuous current	mA	1720
	Max. continuous torque	mNm	88.2
	Max. power output at nominal voltage	W	226
	Max. efficiency	%	88
	Torque constant	mNm A ⁻¹	53.8
	Speed constant	min ⁻¹ V ⁻¹	178
	Mechanical time constant	ms	3
	Rotor inertia	gcm ²	34.5
	Terminal inductance	mH	0.513
	Thermal resistance housing-ambient	KW ⁻¹	6.0
	Thermal resistance rotor-housing	KW ⁻¹	1.7
	Thermal time constant winding	s	16.2
	Length	mm	68.0
	Weight	g	238
	Tacho / resolver order no.		225783
	Digital MR-Encoder Type L, 256-1024 counts per turn, 3 channels, line driver		
	Tacho / resolver data		
	Counts per turn		256
	Number of channels		3
	Max. operating frequency	kHz	80
	Length	mm	11.4

Pohon vertikální osy

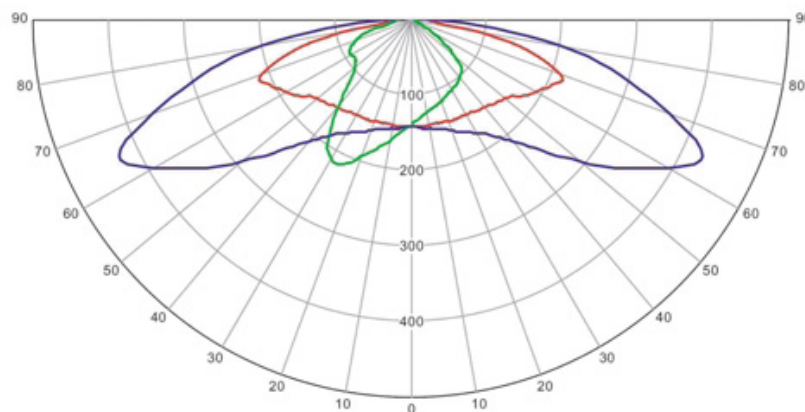
maxon motor

Selected items		
Gear	110508	
Motor	136209	
Tacho/enc./res.	137959	
Combination order no.		upon request
Combination data		
No load speed at gear output	min ⁻¹	28
Max. cont. torque at gear output	Nm	50
Interm. perm. torque at gear output	Nm	75
Length	mm	295.0
Gear order no.		110508
Planetary Gearhead GP 62 A Ø62 mm 50 Nm, ball bearing		
Gear data		
Reduction		236:1
Number of stages		3
Max. cont. torque	Nm	50
int. permissible Torque	Nm	75
Sense of rotation, drive to output		=
Max. efficiency	%	70
Average backlash, unloaded	deg	2.0
Mass inertia	gcm ²	89
Gearhead length	mm	104.2
Weight	g	154
Max. motor shaft diameter	mm	8.0
Motor order no.		136209
EC 45 Ø 45 mm, brushless, 250 Watt, CE		
Motor data		
Power rating	W	250
Nominal voltage	Volt	48.0
No load speed	min ⁻¹	6460
Stall torque	Nm	3.22
Speed/torque gradient	min ⁻¹ mNm ⁻¹	2.02
No load current	mA	311
Starting current	A	46
Terminal resistance phase to phase	Ohm	1.05
Max. permissible speed	min ⁻¹	12000
Max. continuous current at 5,760min ⁻¹	mA	4720
Max. continuous torque at 5,760min ⁻¹	mNm	316
Max. efficiency	%	85
Torque constant	mNm A ⁻¹	70.4
Speed constant	min ⁻¹ V ⁻¹	136
Mechanical time constant	ms	4
Rotor inertia	gcm ²	209
Terminal inductance phase to phase	mH	0.448
Thermal resistance housing-ambient	KW ⁻¹	1.7
Therm. Resistance winding-housing	KW ⁻¹	1.1
Thermal time constant winding	s	30.8
Therm. time constant stator	s	1570
Length	mm	144.0
Weight	g	115
Tacho / resolver order no.		137959
Digital-Encoder HP HEDL 9140 Ø 10 mm 500 counts per turn, 3 channels, line driver RS 422		
Tacho / resolver data		
Counts per turn		500
Number of channels		3
Max. operating frequency	kHz	100
Diameter	mm	10
Length	mm	46.8

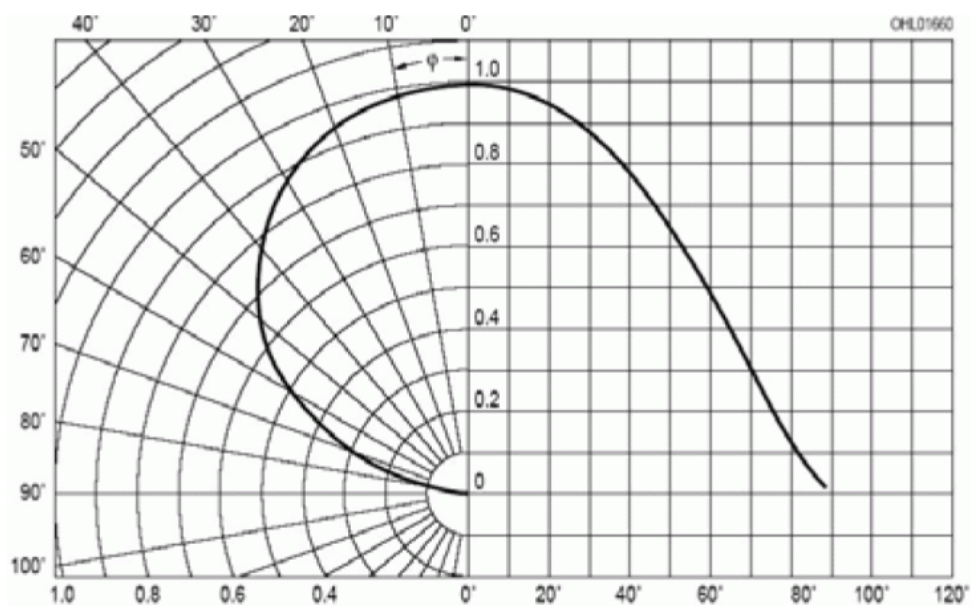
Příloha P5 – Ukázky vyzařovacích charakteristik



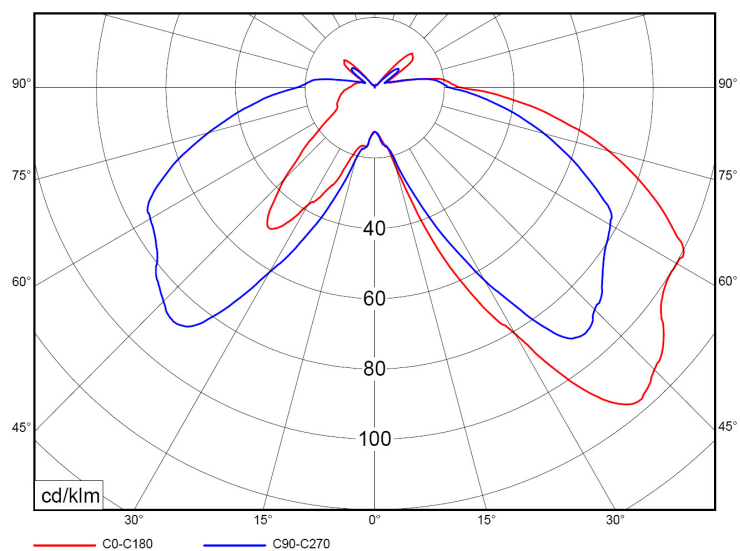
Vyzařovací charakteristika plynové lampy
(<http://www.e-architekt.cz/index.php?PIId=1997&KatId=131>)



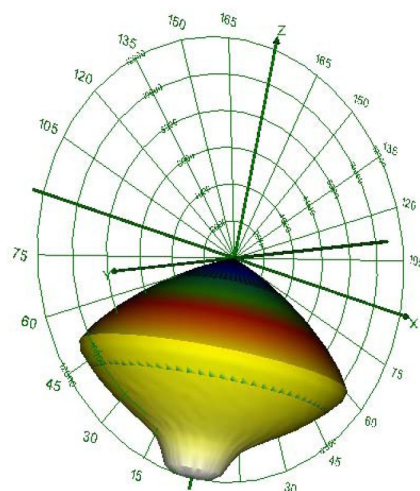
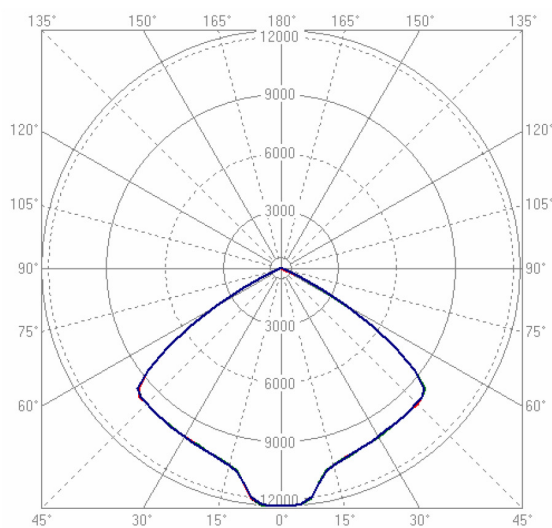
Pouliční lampa
(<http://www.ps-svetelnezdroje.cz/katalog/dokument/61-Z1%20CZ.pdf>)



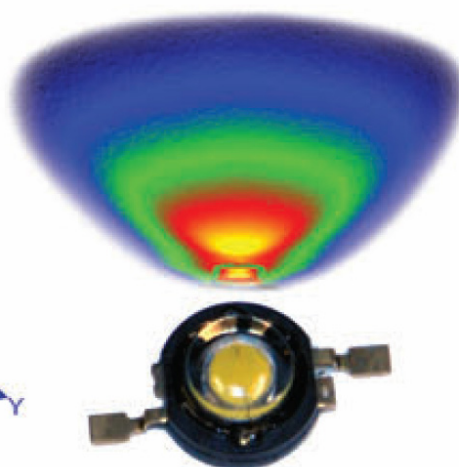
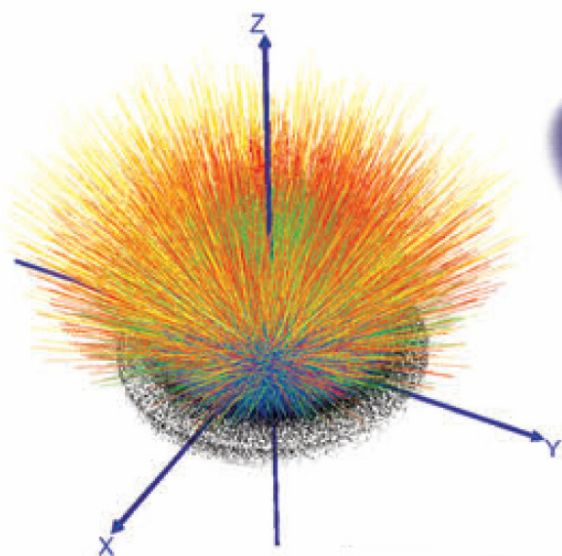
Vyřazovací charakteristika modulu OSRAM-Lighting bez čočky
(<http://automatizace.hw.cz/ostar-budoucnost-domaciho-osvetleni-patri-led>)



Vyzařovací charakteristika pouličního svítidla[4]



3D Vyzařovací charakteristika [4]



3D model pole svítivosti [28]

Příloha P6 – Komerčně vyráběné goniofotometry

Sortiment výrobce TechnoTeam, řada Near-field goniofotometrů **RIGO 801**, informace přeloženy z katalogu, viz [28].

Goniofotometr na LED a žárovky:



Velikost měřených objektů: 6 x 6 x 6 mm - 50 x 50 x 50 mm

Požadavky na prostor: 600 x 600 x 800 mm

Pohyb: Kamera se pohybuje okolo zdroje po kruhové dráze (horizontální osa ν) v rozsahu -140° až 140° a zdroj světla rotuje kolem své osy (vertikální osa φ) v rozsahu 0° až 360°

Měřicí pozice zdroje: Pevná, rotace kolem osy φ .

Vzdálenost měření: 100 mm

Přesnost pohybu: $\varphi < 0.02^\circ, \nu < 0.05^\circ$

Přesnost opakovaného pohybu: $\varphi < 0.01^\circ, \nu < 0.02^\circ$

Goniofotometr na žárovky a malá svítidla:



Velikost měřených objektů: 20 x 20 x 20 mm - 300 x 300 x 300 mm

Požadavky na prostor: 1300 x 1300 x 1900 mm

Pohyb: Kamera se pohybuje okolo zdroje sférickým pohybem (dvě na sobě nezávislé a na sebe kolmé osy ν, φ) v rozsahu 0° až 360° a -2° až 362°

Měřicí pozice zdroje: Pevná, ale celé zařízení se může kolem zdroje otáčet, což dovoluje různé měřicí pozice.

Vzdálenost měření: 270 mm

Přesnost pohybu: $\varphi < 0.02^\circ, \nu < 0.05^\circ$

Přesnost opakovaného pohybu: $\varphi < 0.01^\circ, \nu < 0.02^\circ$

Goniofotometr na velká svítidla:



Velikost měřených objektů: $\leq 2000 \times 2000 \times 2000$ mm

Požadavky na prostor: 4000 x 4000 x 4900 mm

Pohyb: Kamera se pohybuje okolo zdroje upevněného k rámu sférickým pohybem (dvě na sobě nezávislé a na sebe kolmé osy ν, φ) v rozsahu 0° až 360° a -2° až 362°

Měřicí pozice zdroje: Pevná, nevykonává žádný pohyb.

Vzdálenost měření: 500 - 2000 mm

Přesnost pohybu: $\varphi < 0.02^\circ, \nu < 0.05^\circ$

Přesnost opakovaného pohybu: $\varphi < 0.01^\circ, \nu < 0.02^\circ$

Další výrobci goniofotometrů:

Lighting Sciencis (<http://www.lightingsciences.com>)

Hoffman engineering (<http://www.hoffmanengineering.com>)

X-rite Optronik (<http://www.optronik.de>)

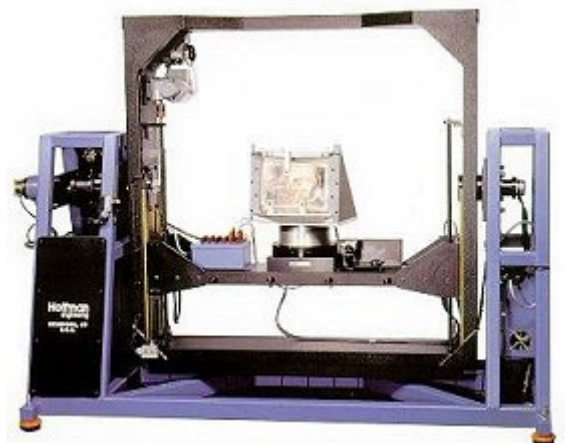
ITL boulder (<http://www.itlboulder.com>)

Cardiff E.T.T. (<http://www.cardiff.org>)

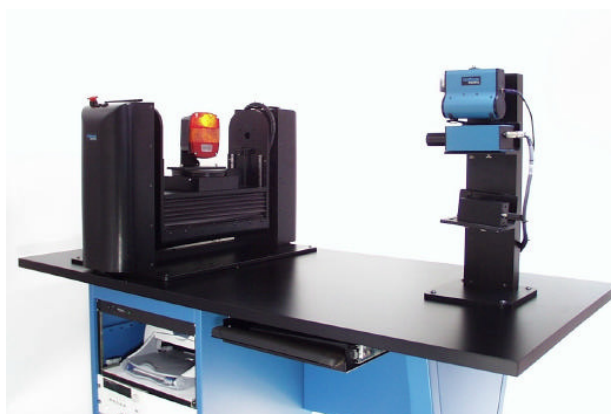
LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin (<http://www.lmt-berlin.de>)



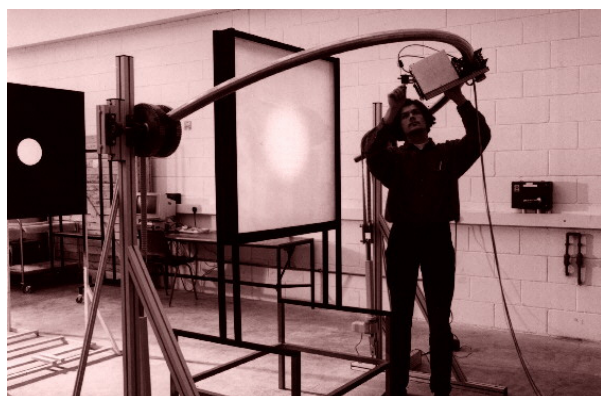
Lighting Sciencis



Hoffman engineering



X-rite Optronik



Cardiff E.T.T.



LMT Lichtmesstechnik GmbH Berlin