



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh výklopného přistávacího světlometu
a jeho zástavba do draku letadla**

**Design of a retractable landing light and its
integration into the airframe**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Martin POLÁK

Studijní program: N0716A270010 – Letectví a kosmonautika

Studijní obor: N071TLBS – Letadla a bezpilotní systémy

Vedoucí práce: Ing. Robert Theiner, Ph.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Polák** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **493567**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Specializace: **Letadla a bezpilotní systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh výklopného přistávacího světlometu a jeho zástavby do draku letadla.

Název diplomové práce anglicky:

Design of a tiltable landing light and its installation in the airframe.

Pokyny pro vypracování:

Proveďte:

1. Rešerši stávajících světelných systémů pro přistávací světlometry
2. Rozbor požadavků letové způsobilosti pro tato zařízení dle relevantních stavebních předpisů.
3. Návrh konstrukce výklopného přistávacího světlometu a jeho instalace do draku letadla
4. Průkaz letové způsobilosti navržené konstrukce

Seznam doporučené literatury:

Stavební předpis CS-25, CS-27, FAR-25, FAR-27

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Robert Theiner, Ph.D. ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Milan Dvořák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Martin Polák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval především své rodině a přítelkyni za neuvěřitelnou 5 let trvající podporu a shovívavost v náročných časech mého studia. Dále děkuji panu Ing. Robertu Theinerovi, Ph.D., který se zhostil vedení mé diplomové práce a nabídl cenné poznatky, ale zároveň i relativní volnost při zpracování. Rád bych poděkoval kolegiu společnosti Aveo Engineering, které mi poskytlo odborný dohled při zpracování optického návrhu a potřebné zdroje. Nakonec bych rád vyjádřil osobní díky panu Christianu Nielsenovi, který se stal mým mentorem a nasměroval mou kariéru směrem k letecké technice.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Martin Polák	
Název:	Návrh výklopného přístávacího světlometu a jeho zástavba do draku letadla	
Rok vypracování:	2024	
Studijní program:	N0716A270010 – Letectví a kosmonautika	
Obor studia:	N071TLBS – Letadla a bezpilotní systémy	
Název školy:	České vysoké učení technické v Praze	
Fakulta:	Fakulta strojní	
Ústav:	Ústav letadlové techniky	
Vedoucí:	Ing. Robert Theiner, Ph.D.	
Bibliografické údaje:	Počet stran	119
	Počet obrázků	62
	Počet grafů	16
	Počet tabulek	17
	Počet příloh	3
Klíčová slova	přístávací světlomet, šneková převodovka, pevnostní analýza, optický návrh, laboratorní testování	

Anotace:

Diplomová práce se zabývá kompletním návrhem přístávacího světlometu pro primární použití na letadlech společnosti Thrush aircraft, helikoptérách typu Bell 412, Sikorsky UH-60 Black Hawk a helikoptérách s podobnou maximální rychlostí letu, sekundárně na nákladních letounech Lockheed C-130 Hercules a další řadě nákladních letounů. Pro určení rozměrů bylo užito technologie 3D skenování ve spojení s reverzním inženýrstvím. Práce popisuje podrobně podmínky certifikace pro uvedení do provozu. Konstrukční návrh specifikuje konstrukci převodového ústrojí, jeho pevnostní kontrolu a optické zpracování. Práce je zakončena simulacemi – pevnostními a optickými.

Annotation page

Author:	Bc. Martin Polák
Title:	Design of a retractable landing light and its integration into the airframe
Year of creation:	2024
Study programme:	N0716A270010 – Aerospace Engineering
Field of study:	N071TLBS – Aircrafts and UAV
University:	Czech Technical University in Prague
Faculty:	Faculty of mechanical engineering
Department:	Department of Aerospace Engineering
Supervisor:	Ing. Robert Theiner, Ph.D.
Bibliographic details:	Number of pages 119 Number of images 62 Number of graphs 16 Number of tables 17 Number of attachments 3
Keywords	landing light, worm gear transmission, strength analysis, optical design, simulations, laboratory testing

Annotation:

The master's thesis deals with the complete design of a landing light for primary use on Thrush aircraft, Bell 412 helicopters, Sikorsky UH-60 Black Hawk helicopters, and helicopters with similar maximum flight speeds, secondarily on cargo aircraft such as Lockheed C-130 Hercules and other series of cargo aircraft. 3D scanning technology in conjunction with reverse engineering was used to determine the dimensions. The thesis describes the certification conditions for commissioning. The design specification specifies the construction of the gearing mechanism and its structural strength verification, optical processing. The thesis concludes with simulations – structural and optical.

Obsah

Obsah.....	1
Seznam obrázků, grafů, tabulek	4
Seznam použitého softwaru	7
Seznam zkratk.....	7
Seznam příloh	8
Seznam použitého značení	8
1 Úvod.....	11
2 Rešerše stávajících systémů	13
2.1 Podobné světlometry.....	13
2.1.1 PRF-4M	13
2.1.2 Grimes Aerospace P/N AN3095-11	14
2.1.3 Grimes Aerospace P/N 45-0190-7	16
2.1.4 Grimes Aerospace P/N: 3801A-1A.....	16
2.1.5 Grimes Aerospace P/N: G-5400-6	18
2.2 Současný trh	20
2.3 Závěr rešerše	22
3 Rozbor požadavků letové způsobilosti	24
3.1 Certifikační báze	24
3.1.1 Základní podmínky.....	24
3.1.2 Ideální případ.....	25
3.1.3 Běžný případ	26
4 Návrh konstrukce.....	29
4.1 Požadavky	29
4.1.1 Rozměry.....	29
4.1.2 Zatížení.....	32
4.1.3 Rychlost vyklápění	36
4.1.4 Certifikační požadavky a požadavky OEM	36
4.1.5 Požadavky na svícení	36

4.1.6	Požadavky na chlazení.....	42
4.2	Návrh uložení a mechanismu	43
4.2.1	Mechanismus vyklápění – popis	43
4.2.2	Příruba – hlavní chassis	51
4.3	Finální řešení mechanické podstavy	51
4.3.1	Vyvozené síly od převodových stupňů	54
4.3.2	Hřídele a silová rozložení.....	59
4.4	Návrh optické sestavy	74
4.4.1	Omezení, která jsou nutná respektovat.....	74
4.4.2	Volba čoček	75
4.4.3	Volba LED čipu	76
4.4.4	Návrh čočky	77
4.4.5	Návrh kompletního optického systému	80
4.5	Finální koncepce světlometu.....	82
5	Průkaz letové způsobilosti.....	85
5.1	Pevnostní kontrola ozubení.....	85
5.1.1	1. Převodový stupeň – šnekové soukolí A17U9	85
5.1.2	2. Převodový stupeň – šnekové soukolí A25U40	88
5.1.3	3. Převodový stupeň – přímé ozubení	90
5.2	Pevnostní kontrola hřídelí	93
5.2.1	1. Převodová hřídel	94
5.2.2	2. Převodová hřídel	95
5.2.3	3. Převodová hřídel	96
5.2.4	Hlavní vyklápěcí hřídel.....	97
5.2.5	Jistoty návrhu	98
5.3	Kontrola životnosti ložisek	99
5.3.1	Ložiska na 1. převodové hřídeli	99
5.3.2	Ložiska na 2. převodové hřídeli	100
5.3.3	Ložiska na 3. převodové hřídeli	101

5.4	Kontrola spojovacích dílů zajišťující transmisi točivého momentu	102
5.5	MKP analýzy kritických součástí	105
5.5.1	Vyklápěcí člen	105
5.5.2	Chassis	107
5.6	Laboratorní měření optické sestavy	108
5.6.1	Výsledné hodnoty	108
6	Závěr	110
	Reference.....	111

Seznam obrázků, grafů, tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1: Konečná podoba navrženého přistávacího světlometu	12
Obrázek 2: PRF-4M.....	14
Obrázek 3: Grimes P/N AN3095-11 – ze strany	15
Obrázek 4: Grimes P/N AN3095-11 – ze shora	15
Obrázek 5: Grimes P/N 45-0190-7	16
Obrázek 6: Cessna 310F v noci (4)	17
Obrázek 7: Grimes Aerospace P/N: 3801A-1A.....	17
Obrázek 8: Bell 412EF – Přistání (1)	18
Obrázek 9: Grimes P/N: G-5400-6	19
Obrázek 10: Rozpad sestavy Grimes P/N: G-5400-6 (2)	19
Obrázek 11: Honeywell C130 Retractable Landing Light (3)	20
Obrázek 12: Ukázka portfolia náhrad Aveo Engineering	21
Obrázek 13: Omega 64 - Aveo Engineering	22
Obrázek 14: Příklady náhrad od společnosti Whelen (4)	22
Obrázek 15: Detailní pohled na ozubené kolo	23
Obrázek 16: Skener využitý při skenovacím procesu.....	29
Obrázek 17: Vygenerované objemové tělo	30
Obrázek 18: Hlavní rozměr Grimes P/N AN3095-11 – naskenovaná data	30
Obrázek 19: Rozměry přistávacích světlometů dle MIL-L-81174-4A (palce) (9)	31
Obrázek 20: Způsob uložení světlometu na konci křídla	33
Obrázek 21: Pohled na detail uložení – patrné "vykousnutí" profilu	33
Obrázek 22: Vizualizace proudění – Pohled z boku	35
Obrázek 23: Vizualizace proudění – Izometrický pohled.....	35
Obrázek 24: Původní zdroj světla (11)	42
Obrázek 25: Převodové soukolí A17 (17).....	50
Obrázek 26: Převodové soukolí A25 (17).....	50
Obrázek 27: Pohled na kompletní mechanickou podsestavu.....	51
Obrázek 28: Pohled na mechanickou podsestavu s popisem.....	52
Obrázek 29: Pohled na mechanickou podsestavu zespodu	52
Obrázek 30: Schématický pohled na mechanickou podsestavu shora.....	53
Obrázek 31: Schématický pohled na mechanickou podsestavu zprava	54
Obrázek 32: Schématický pohled na mechanickou podsestavu zleva.....	54
Obrázek 33: Hlavní osa vyklápění	59
Obrázek 34: 1. Převodová hřídel.....	60
Obrázek 35: 2. Převodová hřídel.....	60
Obrázek 36: 3. Převodová hřídel.....	61
Obrázek 37: Schéma Hlavní osy vyklápění v rovině xz.....	62

Obrázek 38: Schéma Hlavní osy vyklápění v rovině yz.....	62
Obrázek 39: Schéma 1. Převodové hřídele v rovině xz	63
Obrázek 40: Schéma 1. Převodové hřídele v rovině yz	63
Obrázek 41: Schéma 2. Převodové hřídele v rovině xz	64
Obrázek 42: Schéma 2. Převodové hřídele v rovině yz	64
Obrázek 43: Schéma 3. Převodové hřídele v rovině xz	65
Obrázek 44: Schéma 3. Převodové hřídele v rovině yz	65
Obrázek 45: Optimalizovaný maximální rozměr čoček a jejich rozložení.....	74
Obrázek 46: LEDiL C16671_OLGA-RS (18).....	75
Obrázek 47: LEDiL OLGA-RS + CREE XP-E2 (18).....	76
Obrázek 48: OSRAM GW CSSRM3.PM (20).....	77
Obrázek 49: LED čip s importovaným "rayfilem"	78
Obrázek 50: Návrh čoček typu TIR – s nastavením proměnných parametrů	78
Obrázek 51: Příprava simulace se senzorem	79
Obrázek 52: Výsledná simulace s hledanými parametry	79
Obrázek 53: Transparentní pohled na osazení řídicí elektroniky	82
Obrázek 54: Finální koncepce světlometu	83
Obrázek 55: Finální koncepce světlometu – vyklopeno na 55°	83
Obrázek 56: Pohled na žebrování hlavy a ozubený segment.....	84
Obrázek 57: Světlomet osazený na zemědělském letounu	84
Obrázek 58: Vysíťovaný vyklápěcí člen	105
Obrázek 59: Výsledek statické MKP analýzy na vyklápěcí člen.....	106
Obrázek 60: Únavová životnost vyklápěcího členu v hodinách	106
Obrázek 61: Chassis – síťování společně s referenčními prvky.....	107
Obrázek 62: Výsledek MKP analýzy – chassis	108

Seznam grafů

Graf 1: Závislost odporové síly vzduchu na úhlu vyklopení při maximální rychlosti letu – Provozní zatížení.....	34
Graf 2: Závislost závěsového momentu na úhlu vyklopení při maximální rychlosti letu – Početní zatížení	34
Graf 3: Polární rozložení intenzity	38
Graf 4: Množství světla dopadající na ozářenou plochu	39
Graf 5: Chromatičnost zobrazená pomocí CIE 1391 diagramu s vyznačenou hranicí aviatické bílé barvy.....	41
Graf 6: Rozložení ohybového momentu Hlavní osy vyklápění v rovině XZ.....	70
Graf 7: Rozložení ohybového momentu Hlavní osy vyklápění v rovině YZ.....	70
Graf 8: Rozložení ohybového momentu 1. Převodové hřídele v rovině XZ.....	71
Graf 9: Rozložení ohybového momentu 1. Převodové hřídele v rovině YZ.....	71
Graf 10: Rozložení ohybového momentu 2. Převodové hřídele v rovině XZ.....	72
Graf 11: Rozložení ohybového momentu 2. Převodové hřídele v rovině YZ.....	72
Graf 12: Rozložení ohybového momentu 3. Převodové hřídele v rovině XZ.....	73
Graf 13: Rozložení ohybového momentu 3. Převodové hřídele v rovině YZ.....	73
Graf 14: Rozložení intenzity simulovaného zdroje v polárních souřadnicích	81
Graf 15: Rozložení intenzity simulovaného zdroje v kartézských souřadnicích	81
Graf 16: Faktor zóny (22)	90

Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučený počet přistávacích světel dle ARP693d dle kategorie letounů (7) 25	
Tabulka 2: Požadavky dle DO-160G	27
Tabulka 3: Ukázka z normy SAE8017 - 3.2.2 - Antikolizní světla letadel (13)	42
Tabulka 4: KHK Gears – skupiny přímého ozubení	45
Tabulka 5: KHK Gears SSGS1,5 - výběr polotovaru pro pastorek	45
Tabulka 6: KHK Gears SSG1,5 - výběr polotovaru pro segment	46
Tabulka 7: Motor ElectroCraft RPX40-125.....	47
Tabulka 8: Charakteristika šnekových převodů	55
Tabulka 9: Charakteristika čelního ozubení	58
Tabulka 10: Hodnota reakcí v podporách (ložiscích) hřídelí.....	69
Tabulka 11: Výsledky ze simulace zdroje s navrženými čočkami	80
Tabulka 12: Tabulka koeficientů pro kontrolu na dotyk šnekového ozubení (21)	86
Tabulka 13: Tabulka koeficientů pro kontrolu na ohyb šnekového ozubení A17U9 (21) ..	87
Tabulka 14: Tabulka koeficientů pro kontrolu na ohyb šnekového ozubení A25U40 (21)	89
Tabulka 15: Volba faktoru životnosti ozubení na dotyk	92
Tabulka 16: Nastavení kalkulátoru (23)	93
Tabulka 17: Výstupní hodnoty kalkulátoru (23)	93

Seznam použitého softwaru

SolidWorks
Ansys – Workbench, Static, Speos
OpenFOAM
SolidEdge
FreeScan_v2
Matlab
Microsoft Office
Inventor Professional

Seznam zkratk

SL . . . Search light (vyhledávací světlomety)
LED . . . Light-Emitting Diode
LL . . . Landing light (přistávací světlomety)
DC . . . Direct current (stejnoseměrný proud)
TL . . . Taxi light (taxi světlomety)
SAE . . . Society of Automotive Engineers
EASA . . . European Union Aviation Safety Agency
FAA . . . Federal Aviation Administration
SW . . . SolidWorks
P/N . . . Part Number
IR . . . Infra red
NVIS . . . Night Vision
DOA . . . Design Organization Approval
TC . . . Type Certificate
CAD . . . Computer aided design
FWTM . . . Full Width at Tenth Maximum
FWHM . . . Full Width at Half Maximum
PAR64(46,36) . . . Zažité rozměry světlometů kruhového průřezu
PMMA . . . Polymethylmethakrylát
IES . . . Illuminating Engineering Society (fotometrický soubor)
V . . . Volt (jednotka napětí)
TIR . . . Total internal reflection
ICD . . . Inspection control drawing

Seznam příloh

1. Příloha – Inspekčně kontrolní výkres
2. Příloha – Měřicí protokol z fotometrické laboratoře
3. Příloha – CAD model světlometu

Seznam použitého značení

b_p	[mm]	Šířka pera
b	[mm]	Šířka ozubení
C	[N]	Ekvivalentní dynamické zatížení
C_o	[N]	Ekvivalentní statické zatížení
$d_{w^{\prime}x^{\prime}}$	[mm]	Roztečný průměr ozubení
C_x	[-]	Koeficient aerodynamického odporu
$F_{a^{\prime}xx^{\prime}}$	[N]	Axiální síla v ozubení
$F_{axial^{\prime}x^{\prime}}$	[N]	Výsledné axiální síly v ložisku
$F_{rU^{\prime}x^{\prime}}$	[N]	Radiální síla na šnekovém kole a šneku
$F_{rad^{\prime}x^{\prime}}$	[N]	Výsledné radiální síly v ložisku
$F_{t^{\prime}x^{\prime}}$	[N]	Tečná síla v ozubení
F_{ξ}	[N]	Síla působící na lícovaný šroub
F_S	[N]	Maximální setrvačné síly na světlomet
F_{axial}	[N]	Výsledná axiální síla v podpoře
F_{rad}	[N]	Výsledná radiální síla v podpoře
g	$[\frac{m}{s^2}]$	Gravitační konstanta
h_p	[mm]	Výška pera
$I_{max^{\prime}xx^{\prime}}$	[cd]	Maximální intenzita (svítivost)
$i^{\prime}x^{\prime}$	[-]	Převodový poměr jednotlivých stupňů
$i^{\prime}_{př}$	[-]	Odhad převodového poměru převodové části
I_F	[A]	Proud na LED čipu

$J^{\prime\prime}X^{\prime\prime}_{dotyk}$	[-]	Jistota návrhu soukolí na dotyková napětí
$J^{\prime\prime}X^{\prime\prime}_{ohyb}$	[-]	Jistota návrhu soukolí na ohybová napětí
$K^{\prime\prime}X^{\prime\prime}$	[-]	Materiálové a geometrické součinitele pro dotyk
l_a	[mm]	Užitečná délka pera
L_h	[hodina]	Trvanlivost šnekového soukolí/ložisek
M	[Nm]	Potřebný točivý moment hlavní vyklápěcí hřídele
$M_{k^{\prime\prime}x^{\prime\prime}}$	[Nmm]	Točivý moment na hřídelích/ozubení
m	[-]	Modul ozubení
M_{max}	[Nm]	Moment (závěsový) od odporových sil prostředí
M_{nom}	[Nm]	Nominální moment DC motoru
M_o	[Nmm]	Výsledný ohybový moment
M_{ox}	[Nmm]	Ohybový moment v rovině x
M_{oy}	[Nmm]	Ohybový moment v rovině y
N_{E-x}	[-]	Ekvivalentní počet provozních cyklů
N_o	[-]	Základní počet cyklů
$n^{\prime\prime}X^{\prime\prime}_k$	$[\frac{ot}{min}]$	Otáčky ozubených kol
n_T	[-]	Maximální provozní násobek Turbo S-2R-T660
n_m	$[\frac{ot}{min}]$	Otáčky motoru
n_{ot}	$[\frac{ot}{min}]$	Otáčky hlavní vyklápěcí hřídele
p_{dp}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolený tlak
$R^{\prime\prime}X^{\prime\prime}_x$	[N]	Reakce ve směru osy x
$R^{\prime\prime}X^{\prime\prime}_y$	[N]	Reakce ve směru osy y
S_F	[-]	Bezpečnost na ohyb
S_H	[-]	Bezpečnost na dotyk
u	[-]	Počet prvků mechanismu
W_k	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu

W_o	$[mm^3]$	Modul průřezu v ohybu
$Y_{X''}$	$[-]$	Materiálové a geometrické součinitele pro ohyb
$Z_{X''}$	$[-]$	Faktory přímého ozubení
$Z_{H_{-}X''}$	$[-]$	Koeficient charakterizující úhly šroubovic
Z_M	$[-]$	Koeficient zohledňující styk kola se šnekem
$\Phi_{\lambda_{XX''}}$	$[lm]$	Minimální světelný tok
α_n	$[\circ]$	Úhel záběru
γ_S	$[\circ]$	Úhel stoupání
$\eta_{X''}$	$[-]$	Účinnosti převodů
η_l	$[-]$	Účinnost uložení hřídelí (ložiska)
η_{poly}	$[-]$	Odhad optické účinnosti polykarbonátu
σ_C	$[N \cdot mm^{-2}]$	Mez trvalé únavové pevnosti
σ_D	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolené napětí
$\sigma_{F_{X''}_{dov}}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolené ohybové napětí
$\sigma_{F_{-}X''}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Ohybové napětí
$\sigma_{H_{X''}_{dov}}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolené dotykové napětí
$\sigma_{H_{-}X''}$	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dotykové napětí
σ_o	$[N \cdot mm^{-2}]$	Ohybové napětí
σ_{red}	$[N \cdot mm^{-2}]$	Redukované napětí
τ_d	$[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolené napětí ve střihu
τ_k	$[N \cdot mm^{-2}]$	Napětí v krutu
τ_S	$[N \cdot mm^{-2}]$	Napětí ve střihu
φ'	$[\circ]$	Třecí úhel
η'	$[-]$	Odhad účinnosti převodové části

1 Úvod

V oblasti letectví, které představuje jeden z nejmladších a nejdynamičtěji se rozvíjejících odvětví strojírenství, je klíčové sledovat inovace a technologický pokrok, který umožňuje zdokonalování každého prvku letadla. Mezi tyto prvky patří i přistávací světlometry, které prošly výrazným vývojem, zejména díky implementaci LED technologie.

Začátek éry LED světlometů v letectví znamená zásadní změnu v konstrukci a výkonnosti těchto klíčových zařízení. Inovace ve světlometech jsou nezbytné pro dosažení vyšší efektivity, bezpečnosti a snížení nákladů.

LED technologie přinesla do světa přistávacích světel nespočet výhod. První a nejvýraznější výhodou je výrazné zlepšení energetické efektivity. LED světlometry jsou schopny poskytovat vysoký výkon při nízké spotřebě energie, což přispívá ke snižování celkových nákladů na provoz letadel a teoreticky zvyšuje jejich dolet.

Další klíčovou výhodou LED světel je dlouhá životnost a vysoká spolehlivost. To znamená, že letadla vybavená těmito moderními světlometry vyžadují méně údržby a jsou méně náchylná k poruchám, což v konečném důsledku přispívá k celkovému zvýšení bezpečnosti leteckého provozu a zejména k nižší finanční náročnosti, neboť nevyžadují náročnou údržbu a neustálé výměny žárovek.

Pokrok v oblasti LED technologie navíc umožňuje dosažení lepšího řízení a variability intenzity světla, což je klíčový faktor zejména při přistávání v různých atmosférických podmínkách. Moderní LED světla tak mohou být přizpůsobena různým situacím a poskytovat optimální osvětlení přistávací dráhy.

Celkově lze tedy konstatovat, že motivace za vývojem a výrobou světlometů s LED technologiemi v letectví spočívá v neustálém zlepšování bezpečnosti, efektivity a údržby letadel. Letectví je odvětvím, které nepřestává hledat inovativní řešení, a LED světlometry představují jedno z mnoha úspěšných technologických vylepšení, které posouvá celý průmysl vpřed.

Proč však nepoužít současnou zástavbu (např. 2.1.5) a nahradit pouze světelný zdroj?

K tomu se lze postavit zcela jednoznačně – v současnosti neexistují společnosti, vyjma Aveo Engineering a Honeywell, které by vyráběly plnohodnotné světlometry, a tak trh není dostatečně nasycen a dochází často k pouhému repasování původních

světlometů. Jedná se tedy o cílenou odpověď na současnou poptávku, kdy výrobci nových letadel a helikoptér „nemají kam sáhnout“.

Dále to však souvisí i s rozvojem avioniky. Původní světlometry nelze například nastavit na variabilní úhel výklopu dle požadavku mise, bez předchozí komplikované demontáže, která uzemní celý letoun/helikoptéru. Nebo nenabízí možnosti řízení intenzity osvětlení v podobě dimmingu či volbě spektra svícení, na což je potřeba již dodatečná elektroinstalace v podobě rozličných desek s čipy, které disponují komplexním firmwarem.

Moderní světlometry jsou také schopné přenášet informace zpět do kokpitu skrze BUS systém, což umožňuje například potenciální integraci kamer pro viditelné spektrum, ale také kamery usnadňující let při zhoršené viditelnosti jako jsou technologie NVIS a SWIR.

Nepříliš ohraničené pásmo světelných technologií používaných v leteckém průmyslu tak poskytuje prostor konstruktérům a designérům, kteří mohou v tomto odvětví pestře experimentovat a pomáhat ho tak posouvat vpřed.



Obrázek 1: Konečná podoba navrženého přistávacího světlometu

2 Rešerše stávajících systémů

2.1 Podobné světlometry

V průběhu počáteční přípravy jsem se zaměřil na důkladný průzkum světlometů, které se staly nedílnou součástí vnějšího osvětlení v helikoptérách a letadlech různých typů. Tyto světlometry hrají klíčovou roli při zabezpečení nočních operací a navigaci v nepříznivých povětrnostních podmínkách. Jejich správná funkce je zásadní pro bezpečnost letu a úspěšné provádění různých misí.

Při průzkumu jsem se věnoval nejen technickým specifikacím světlometů, ale také jejich designu a ergonomii. Různé modely světlometů mohou nabízet specifické funkce, jako je variabilní intenzita světelného paprsku, odlišné chromatičnosti světla a možnosti přizpůsobení různým úkolům a potřebám posádky.

Dalším důležitým aspektem bylo zkoumání nových technologií, které mohou být implementovány do světlometů, aby se zlepšila jejich efektivita a spolehlivost. Moderní helikoptéry a letadla často využívají pokročilé systémy, a je tedy klíčové, aby světlometry byly plně integrovány do těchto komplexních avionických sestav.

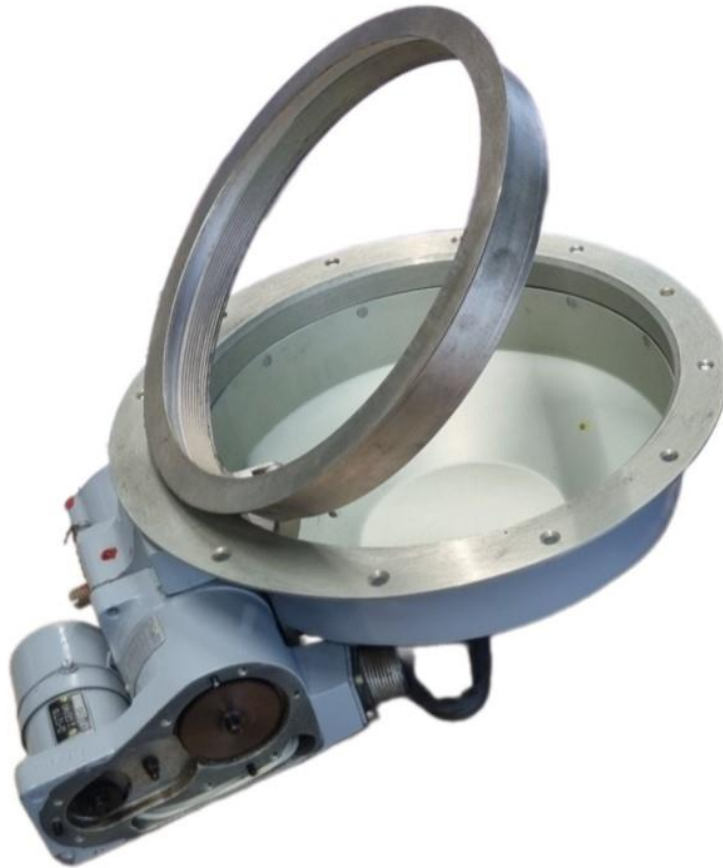
Celkově lze konstatovat, že průzkum světlometů v kontextu jejich využití v leteckém prostředí představuje klíčový krok při přípravě na následný vývoj, výběr parametrů a integraci do zavedených systémů.

Za účelem prozkoumání dílčích vlastností, jako jsou elektrické zapojení, pohonná jednotka a převodový systém, musely být všechny zde zmíněné světlometry zakoupeny či zapůjčeny, neboť jejich technické podklady jsou nedostatečně publikovány. Způsobeno je to především datem vývoje/výroby, kdy se naprostá většina světlometů datuje až do 70. let minulého století, anebo jsou předmětem know-how jednotlivých společností, které své poznatky velice neochotně sdílí.

2.1.1 PRF-4M

První světlomet, který bych zde rád představil, je jediným zástupcem světlometu vygenerovaným „východním inženýrstvím“. Jedná se o světlomet PRF-4M, za nímž stojí výrobce Antonov. Je postaven na duralové konstrukci, o vyklápění světlometu se stará pákový mechanismus poháněný stejnosměrným 24 V elektromotorem. Pomocí stavěcího šroubu, který polohuje koncové spínače, lze přibližně nastavit úhel výklopu v rozmezí od 0° do 88°. Světlomet je k draku letadla připojen 11 šrouby po obvodu vnějšího hliníkového kruhového rámu. K elektrosoustavě letounů, jako jsou An-124 a An-225, je připojen

pomocí konektoru **vnější svorkovnice** a lze vykonat nezávislé povely: vyklopit, zaklopit, zapnout svícení, vypnout svícení.



Obrázek 2: PRF-4M

2.1.2 Grimes Aerospace P/N AN3095-11

V „západní sféře“ se zpravidla jedná o světlometry vyrobené, dnes již neexistující společností, Grimes Aerospace (založeno v r.1933), která produkovala neuvěřitelné množství vyklápěcích přístávacích světlometů. Ty byly k dostání v různých specifikacích, lišících se zpravidla velikostí – PAR46 nebo PAR64, potažmo PAR36 (dnes již přežitě značení, neboť se jednalo o klasifikaci vztahující se ke kruhovému tvaru, který však s příchodem LED technologií pozbyl nutnosti) a způsobem uchycení. Takovéto světlometry můžeme v současnosti naléznout například na zemědělském práškovacím letounu vyráběném ve Spojených státech – Thrush 510P. Tento světlomet jsem si vytyčil za cíl plnohodnotně nahradit a výkonově předčit v rámci této diplomové práce.



Obrázek 3: Grimes P/N AN3095-11 – ze strany



Obrázek 4: Grimes P/N AN3095-11 – ze shora

2.1.3 Grimes Aerospace P/N 45-0190-7

Dalším představitelem výklopného přistávacího světlometu od společnosti Grimes je světlomet osazený na helikoptérách světoznámé společnosti Sikorsky, která jimi osadila většinu helikoptérů UH-60 Black Hawk vyráběné od roku 1974 až doposud.



Obrázek 5: Grimes P/N 45-0190-7

2.1.4 Grimes Aerospace P/N: 3801A-1A

Tento světlomet je demontován z dvumotorového letounu Cessna 310, kde je osazen v páru – každý je uložen na jednom konci křídla atypicky v blízkosti odtokové hrany.



Obrázek 6: Cessna 310F v noci (4)



Obrázek 7: Grimes Aerospace P/N: 3801A-1A

2.1.5 Grimes Aerospace P/N: G-5400-6

Jako poslední světlomet v tomto výčtu nesmí chybět Grimes Aerospace P/N: G-5400-6. Světlomet byl demontován z helikoptéry Bell 412, kde je standardně montován na spodku střední části trupu, a to zpravidla v ose symetrie.

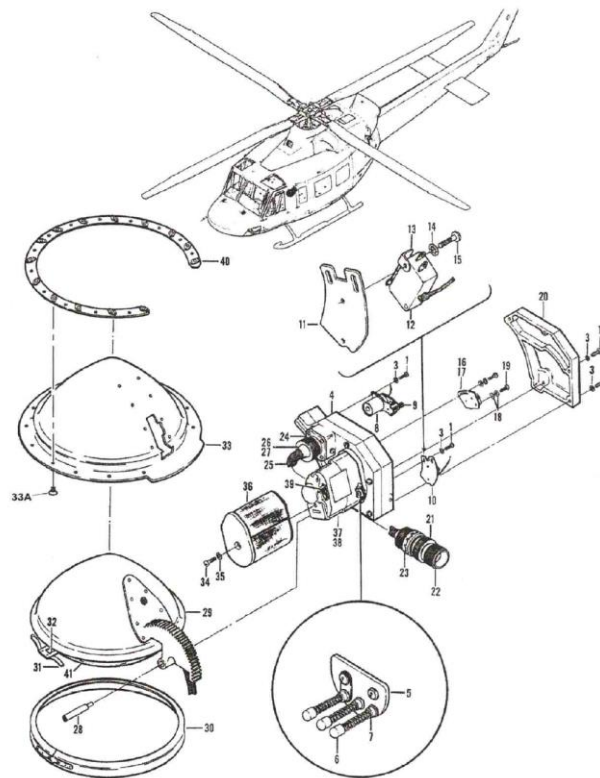


Obrázek 8: Bell 412EF – Přistání (1)

Na obrázku výše je možné vidět rozsvícený světlomet na policejním vrtulníku, který právě provádí přistávací manévry. Je vhodné si všimnout a uvědomit si, že vrtulník při přistání provádí mírně pozitivní klopení a pro osvětlení přistávacího prostoru je žádoucí vyklopení světlometu na 50° či méně (dle požadavků mise a posádky). V této poloze světlo dopadá pod správným úhlem na místo přistání a umožňuje pilotovi bezpečně přistát.



Obrázek 9: Grimes P/N: G-5400-6



Obrázek 10: Rozpad sestavy Grimes P/N: G-5400-6 (2)

Tento konkrétní světlomet je dokonalým příkladem neuvěřitelné variability výrobní řady G-5400, kdy například světlomet G-5400-5 je osazen na armádním dopravním letounu Lockheed C-130 Hercules, který přináší naprosto odlišné požadavky na misi a posádku.

2.2 Současný trh

Jak jsem již zmiňoval v minulých odstavcích, Grimes Aerospace je již dávno zaniklou společností – v roce 1997 byla skoupena společností AlliedSignal, která se později v roce 1999 stala akvizicí nadnárodní společnosti Honeywell.

Honeywell však stagnuje ve vývoji. Do roku 2024 uvedl na trh pouze aktualizovanou verzi světlometů řady G-5400, které pojmenoval prozaicky C-130 Retractable Landing Light (3) – název vypovídá o jeho aplikaci v letounech C-130 Hercules. Konstrukčně se jedná o pouhý derivát původního světlometu od Grimes Aerospace, avšak původní halogenovou žárovku s reflektorem nahradili již inovativní technologií LED. Jinak je však světlomet mnohem těžší než původní a nenabízí dobrou světelnou intenzitu.



Obrázek 11: Honeywell C130 Retractable Landing Light (3)

Dále je vhodné zmínit, že řada společností například Honeywell či Whelen, se zaměřily nikoliv na komplexní náhrady světlometů, ale vyvinuly pouhé přímé náhrady původních halogenových žárovek s reflektory. V tomto případě se pouze vymontuje původní reflektor a nahradí se platformou osazenou LED čipy a příslušnými čočkami,

případně drobnými reflektory, které však nejsou zdaleka tak efektivní pro získání větších světelných výkonů.

Pokud se porozhlédneme po nejvyšších nabízených světelných výkonech generovaných LED čipy, pak je na trhu naprosto dominantní společnost Aveo Engineering, která má ve svém portfoliu prozatím jednu plnohodnotnou náhradu s mechanismem vlastního vývoje. Tím je světlomet Omega 64, který jsem navrhl v roce 2022 a je koncipován jako plnohodnotné nahrazení PRF-4M. Dále je nabízeno několik „přímých náhrad“, které se odlišují tvarem, velikostí, účelem, výkonem a například i spektrem záření, přičemž některé splňují požadavky pro NVIS – IR svícení.



Obrázek 12: Ukázka portfolia náhrad Aveo Engineering



Obrázek 13: Omega 64 - Aveo Engineering



Obrázek 14: Příklady náhrad od společnosti Whelen (4)

2.3 Závěr rešerše

V rámci rešerše, kdy jsem fyzicky prozkoumal, rozebral a nafotil každý z výše zmíněných světlometů, jsem došel k několika závěrům, které mi pomohly udělat si ucelenější pohled pro další vývoj a návrh světlometu, který nahradí stávající Grimes Aerospace P/N AN3095-11.

- **Pohonná jednotka:** Původní pohonné jednotky jsou úzce spjaté s elektroinstalacemi jednotlivých letadel a helikoptér, kde se povětšinou

setkáváme 24V, či 28V architekturou. Ve všech zde zmíněných světloometech jsou použity stejnosměrné motory.

- **Převodové ústrojí:** Vyjma „východního“ světlometu PRF-4M jsou světlometry převodované integrovanou planetovou převodovkou, která převádí točivý moment z motoru na ozubené kolo (segment), které je hlavním výklopným členem světlometu.



Obrázek 15: Detailní pohled na ozubené kolo

- **Světelný zdroj:** Ač současný trh již reagoval na inovace v LED technologiích, stále ještě nedošlo k naprostému nahrazení a ve velké míře se užívá prapůvodních halogenových žárovek v kombinaci s reflektorem, jelikož se často jedná o finančně velice dostupnou variantu.
- **Odlišnosti:** Mezi společné rysy světlometů Grimes Aerospace patří: hliníková konstrukce rámu, připojené převodové a ovládací ústrojí, výklopný reflektor s halogenovou žárovkou. Navzájem se konstrukčně odlišují v pozici uchycovacích děr, které jsou definovány otvory v potahu letounu/helikoptéry a připojovacím konektoru, který je specifický pro každou aplikaci.

Závěrem je vhodné zmínit, že i původní světla od Grimes Aerospace má několik výrobců a přeprodejců v leteckém průmyslu stále naskladněné v nemalých počtech, a tudíž je stále hojně aplikují...

3 Rozbor požadavků letové způsobilosti

3.1 Certifikační báze

Certifikační předpoklady pro vývoj leteckého světloometu jsou klíčovým prvkem v leteckém průmyslu. Tyto předpoklady jsou pečlivě stanoveny a obsahují podrobné specifikace a požadavky, které musí být splněny pro získání certifikace od leteckých regulačních orgánů. Prvním krokem v procesu certifikace je pečlivá analýza a porozumění všem relevantním předpisům a normám, které se vztahují k leteckým světlometům. To zahrnuje technické specifikace, bezpečnostní standardy a ostatní požadavky na letadla a helikoptéry.

V rámci této diplomové práce se pokusím blíže popsat certifikační podmínky a požadavky pro EASA, která je zodpovědná za certifikační požadavky podávané v Evropě, žadatel však může požádat o schválení „za mořem“ v rámci organizace FAA, která řídí certifikační procesy spadající pod Severoamerický kontinent.

Certifikační proces je vždy dlouhou, komplikovanou a nesmírně nákladnou částí před uvedením nového produktu na trh. Od podání požadavku nezná kdy uplyne i několik let, než dojde k plnému schválení, avšak je nutné poznamenat, že v případě, když žadatel nesplní všechny požadavky a neopraví chyby vytkené pověřenou osobou z regulačního orgánu, pak mu může být žádost zcela odmítnuta.

3.1.1 Základní podmínky

EASA přesně nspecifikuje podmínky použití přistávacích světel, neboť nejsou považovány za povinnou výbavu letounů/helikoptér. Za příklad si tedy můžeme vzít americký předpis [FAA AIM 4-3-23], který vyjadřuje doporučení pilotům ohledně používání LL. Podle tohoto doporučení by pilot měl zapnout světlomet při vzletu a při letu (přistání) pod letovou hladinou 10 000 ft (3 000 m) kdekoli ve vzdálenosti do 10 námořních mil (přibližně 19 km) od kteréhokoliv letiště. LL však mohou být použita i k dalším účelům – let za snížené viditelnosti, let dle speciálních vizuálních podmínek, let v prostředí, kde je potenciál střetu s ptactvem. (5)

Oficiální nařízení ohledně LL říká pouze, že každé světlo by mělo být navrženo a instalováno tak, aby:

- a) Neoslňovalo pilota*
- b) Nesmí dojít k halaci, která by ovlivnila pilota*
- c) Generuje dostatek světla pro přistání v noci (Polák - (6))*

Splnění podmínek a) a b) je splněno vždy už jen díky poloze uchycení světloometu na draku letounu, které je definována polohou původního světloometu a v případě vývoje nových letounů se výrobce drží zažitých konvencí. Podmínka c) je v samotném zájmu konstrukční kanceláře, aby byla konkurenceschopná.

TABLE 2 - RECOMMENDED NUMBER OF LANDING LIGHTS FOR DIFFERENT CATEGORY AIRPLANES

Airplane Categories	Minimum Number of Landing Lights
Single engine personal and/or liaison type	2
Light twin engine	2
Large multiengine propeller	3
Large multiengine turbojet	4
Military high performance fighter and attack	2
Helicopter:	
Retractable landing light	1
Searchlight (may be used as landing light)	1

Tabulka 1: Doporučený počet přistávacích světel dle ARP693d dle kategorie letounů (7)

3.1.2 Ideální případ

Naprostο nejsnazším případem pro postup certifikace je přímá spolupráce s výrobcem konkrétního typu letouny/helikoptéry, kdy je výrobce držitelem tzv. typového certifikátu (nebo ho získá). Ten výrobce opravňuje certifikovat použitý světloomet v rámci certifikace celého letadla. Pokud je letadlo již certifikováno, pak je nutné projít „změnovým procesem“, aby mohl být světloomet osazen na letoun.

V každém případě však konstrukční kanceláři, která se zabývá vývojem a výrobou světloometu, odpadá povinnost procházet certifikačním procesem na vlastní náklady.

V praxi to například probíhá tak, že výrobce (pozn. autora: držitel typového certifikátu, nemusí být nutně výrobce) osloví konstrukční kancelář zabývající se světlomety s požadavkem na vývoj určitého produktu. Přesně stanovené požadavky jsou předmětem vzájemné smlouvy, která je výsledkem společné diskuse při hledání akceptovatelného řešení.

3.1.3 Běžný případ

V reálném světě se však málokdy podaří získat spolupráci s držitelem TC, nicméně náhrada světlometů zpravidla spadá do speciální kategorie „Minor change“, a tak konstrukční kancelář může žádat o tzv. Minor change of TC (mírná změna typového certifikátu). Mírná změna se týká drobných úprav a modifikací. U již certifikovaného designu předpokládá takovou změnu, která má omezený dopad na konstrukci, výkon nebo bezpečnost leteckého výrobku.

O změnu však nemůže žádat leckdo. Minimální požadavek je takový, aby byl žadatel držitelem DOA a musí splňovat minimálně podmínky dle 21.A.263 (c) 1: „Držitel DOA je kvalifikován rozhodnout, kterou změnu lze určit jako mírnou, a kterou jako velkou.“ a 21.A.109, který stanovuje držiteli „Malé změny TC“ postup mezi designem a výrobou, podmínky dokumentace, poskytnutí manuálu, instrukcí k údržbě, sjednocení značení, které musí striktně dodržovat a dále stanovuje povinnost poskytnout všechny dostupné informace příslušným orgánům v případě potřeby. (8)

V případě, že žadatel je držitelem DOA a splnil všechny výše uvedené požadavky, pak za účelem získání „Minor change of TC Approval“ musí splnit pouze minimální environmentální požadavky dle testovacích procedur, které jsou předmětem standardu DO-160G. V tomto dokumentu je přesně stanoveno, jakým způsobem a za jakých podmínek letecký výrobek testovat, aby se zjistilo, zda splňuje minimální požadavky pro použití v reálném provozu.

Kontaktní osoba zodpovědná za posouzení orgánu však zpravidla vyžaduje ještě optické a pevnostní simulace kritických prvků vnitřní struktury světlometu.

Potřebné požadavky dle DO-160G, jednotlivé kategorie představují specifikace příslušných požadavků:

Environment	Section	Category
Temperature / Altitude	4	B2
Temperature Variation	5	A
Humidity	6	C
Operational Shock and Crash Safety	7	B2
Vibration	8	U
Waterproofness	10	R
Fluids Susceptibility	11	F
Sand and dust	12	D
Fungus	13	F
Salt Spray	14	T
Magnetics Effects	15	A
Power Input	16	A
Voltage Spike	17	A
Audio Freq. Conducted Susceptibility	18	R
Induced Signal Susceptibility	19	ZC
Radiated and Conducted Susceptibility	20	TT
Radiated and Conducted Emissions	21	B
Lightning Induced Transient Susceptibility	22	A2E2XX
Icing	24	A
Electrostatic Discharge	25	A

Tabulka 2: Požadavky dle DO-160G

V praxi to tedy vypadá tak, že se objeví buď zákazník, který je koncovým uživatelem leteckého prostředku a potřebuje nahradit z jakéhokoliv důvodu svůj současný světlomet, anebo se konstrukční kancelář rozhodne na základě trhu připravit takovýto certifikát na celou konkrétní helikoptéru (letoun), kdy se připraví náhrada za všechny světlometry naráz (přistávací, poziční, logo...), aby to bylo výhodné z hlediska nákladů s tím spojených.

Certifikační postup:

- I. Vývoj, testování a vypracování potřebné výrobní dokumentace
- II. Příprava nezbytné dokumentace pro podání žádosti
- III. Podání žádosti – průběžné dodávání materiálů
- IV. Posouzení orgánu – komunikace, připomínky
- V. **Schválení** (Neschválení změny)
- VI. Neustálá aktualizace striktně vedené dokumentace



Je však nutné zmínit, že aby mohl žadatel požádat o „Minor change of TC Approval“, tak musí striktně dodržet rozměry, elektroinstalaci a zejména způsob a polohu uchycení původních světlometů, které se chystá na draku letounu nahradit. Pokud by zásah vyžadoval změnu uchycení, změnu vnitřní elektroinstalace, či jiný velký zásah do draku, pak se již nejedná o „Minor change“, ale o „Major change“, tedy konstrukční změna, kterou je velice složité a prakticky většinou nevýhodné z hlediska DOA zaměřené na světlometry certifikovat na vlastní náklady. Tento přístup tedy vyžaduje nemalou práci při získávání relevantních podkladů pro vývoj – výkresy, modely, instalační diagramy, letové obálky letounů a instalační manuály.

4 Návrh konstrukce

4.1 Požadavky

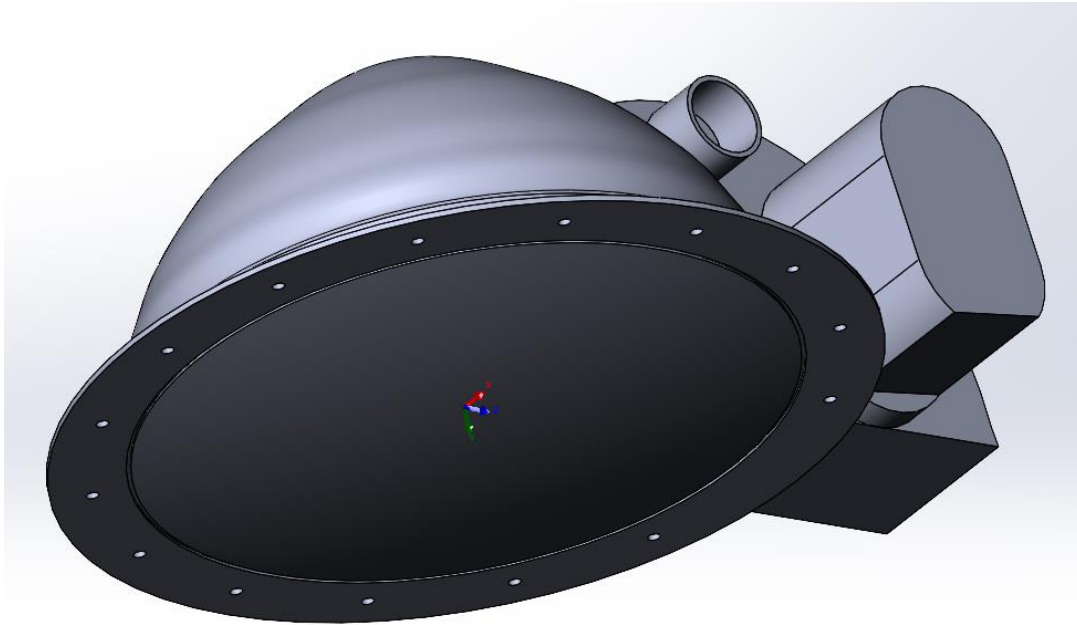
4.1.1 Rozměry

Rozměry jsou získány za pomoci přesného 3D skenování zařízením Shining FreeScan Combo. Následný 3D sken byl post-procesován v programu FreeScan_v2 a nutný reverzní inženýring, který vedl na referenční 3D CAD model, byl proveden v programu Shining SolidEdge. Pro referenci porovnávám model se starším vojenským standardem MIL-L-81174-4A (AN3095) (9).

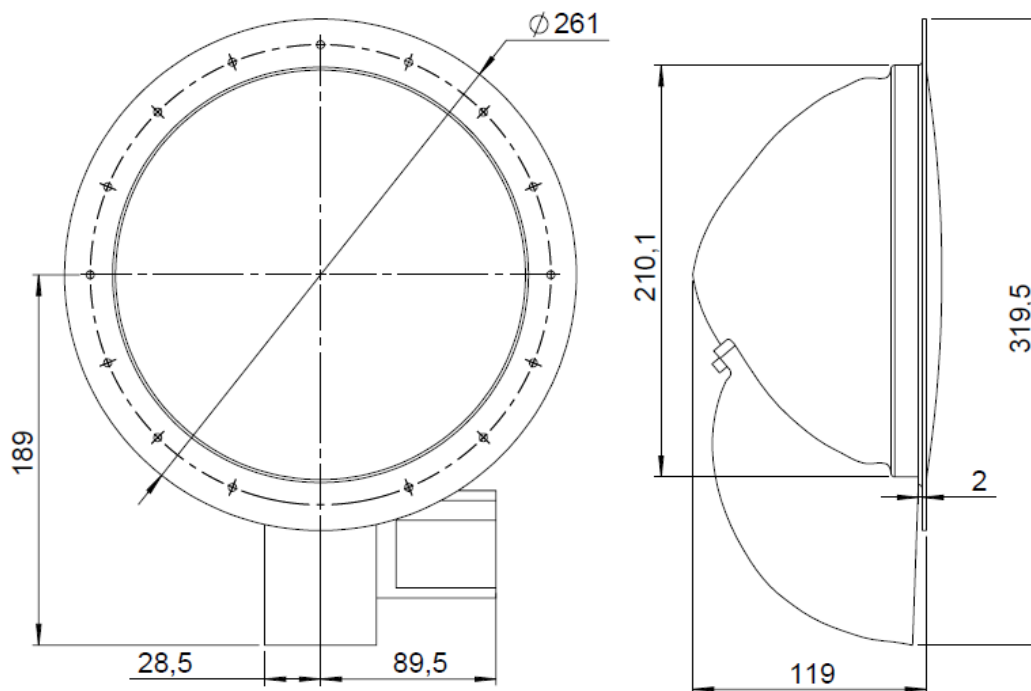


Obrázek 16: Skener využitý při skenovacím procesu

Popis práce s 3D skenerem – skenování probíhá využitím 27 křížů modrého laseru, což umožňuje přesnost skenování až na 0,025mm – produktem je rozsáhlá síť bodů, která se následně konvertuje pomocí triangulace sítě do formátu STL, což je plošné tělo, se kterým lze již pracovat ve vhodných programech jako je Geomagic Design X, QUICKSURFACE, či v tomto případě SolidEdge a vygenerovat objemové tělo.



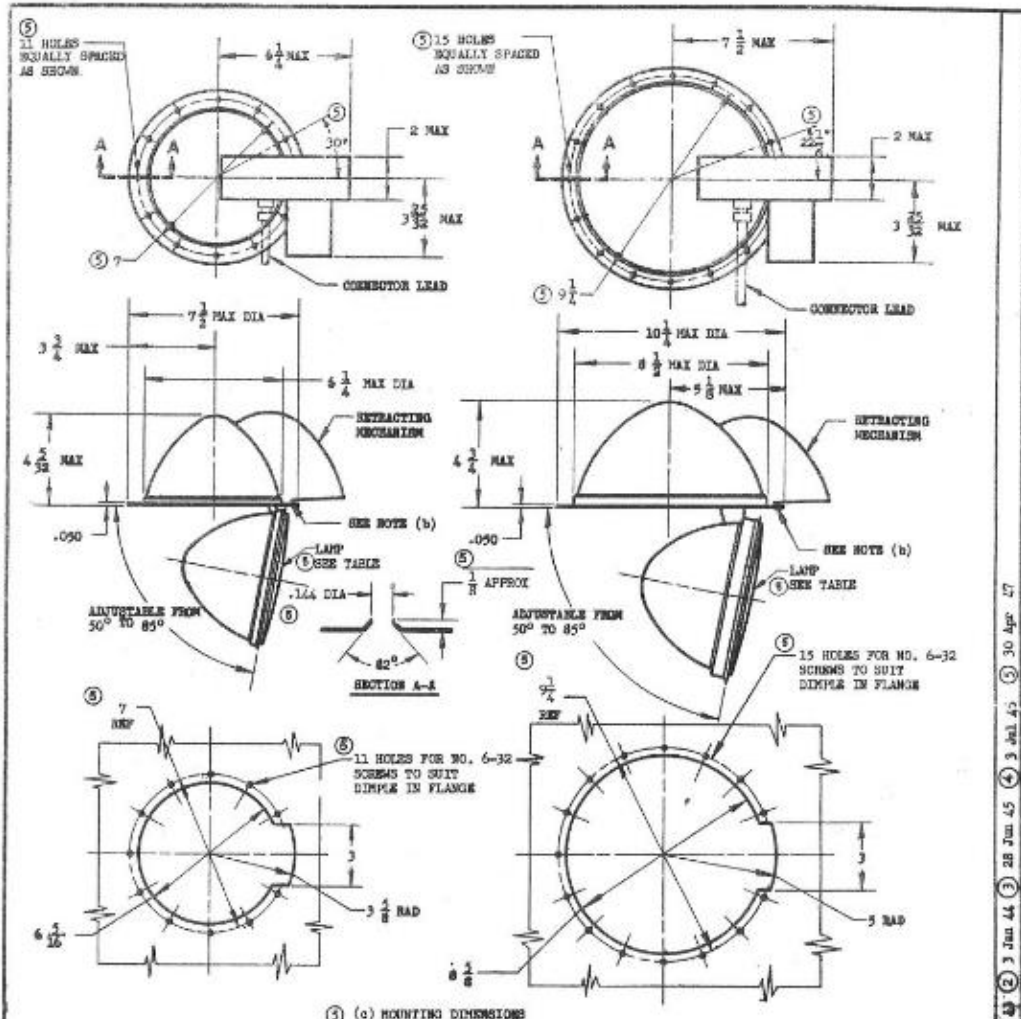
Obrázek 17: Vygenerované objemové tělo



Obrázek 18: Hlavní rozměr Grimes P/N AN3095-11 – naskenovaná data

NOTE: This drawing was approved by joint action of the War and Navy Departments as the Army-Navy standard for this product. This drawing represents all standard standard drawings for the same product and shall be used for all drawings of this product. It may be used for other products, however, at the discretion of the approving authority.

NOTE: When Government drawings, specifications, or other data are used for any purpose other than in connection with a Federal Government procurement operation, the Trademark Office Government should be notified in writing. The use of the name of any manufacturer or trade name may be necessary to describe a drawing, but it is not to be regarded as an endorsement, recommendation, or approval by the Government. It may be used for other purposes, however, at the discretion of the approving authority.



(c) MOUNTING DIMENSIONS

AN ASSY PART NO.		MOUNTING HORN CIRCLE DIA	LAMP	
WITH LAMP	WITHOUT LAMP		AN PART NO.	VOLTS WATTS
AN3095-7	(a) AN3095-4A	7	AN3129-4523	28 250
(a) AN3095-8	(a) AN3095-6A	9-1/4	AN3130-4562	28 250
(a) AN3095-9		9-1/4	AN3130-4560	28 600

- (a) PREVIOUS PART NUMBER AN3095-5A FOR 13 VOLT LIGHT ASSEMBLY WITHOUT LAMP INACTIVE FOR NEW DESIGN AND PROCUREMENT.
 - (b) AT THIS POINT THE FIXTURE SHALL ACCOMMODATE A TOTAL THICKNESS OF SKIN AND DOUBLER PLATE OF 0.100 INCH.
 - (c) MOUNTING RINGS TO BE USED AT CONTRACTORS OPTION.
 - (d) FOR ACCEPTABLE PRODUCTS, SEE ANA BULLETIN NO. 165.
- DIMENSIONS IN INCHES. UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, TOLERANCES: FRACTIONS ±1/64, DECIMALS ±.010, ANGLES ±1/2°.

PROCUREMENT SPECIFICATION AN-L-11	ARMY-NAVY AERONAUTICAL STANDARD LIGHT ASSEMBLY- ELECTRICALLY RETRACTABLE LANDING	AN3095
--------------------------------------	--	--------

APPROVED 3 JUN 43 REVISED 1 27 APR 43 2 3 JUN 44 3 28 JUN 45 4 3 JUL 45 5 30 APR 47

Obrázek 19: Rozměry přístávacích světlometů dle MIL-L-81174-4A (palce) (9)

4.1.2 Zatížení

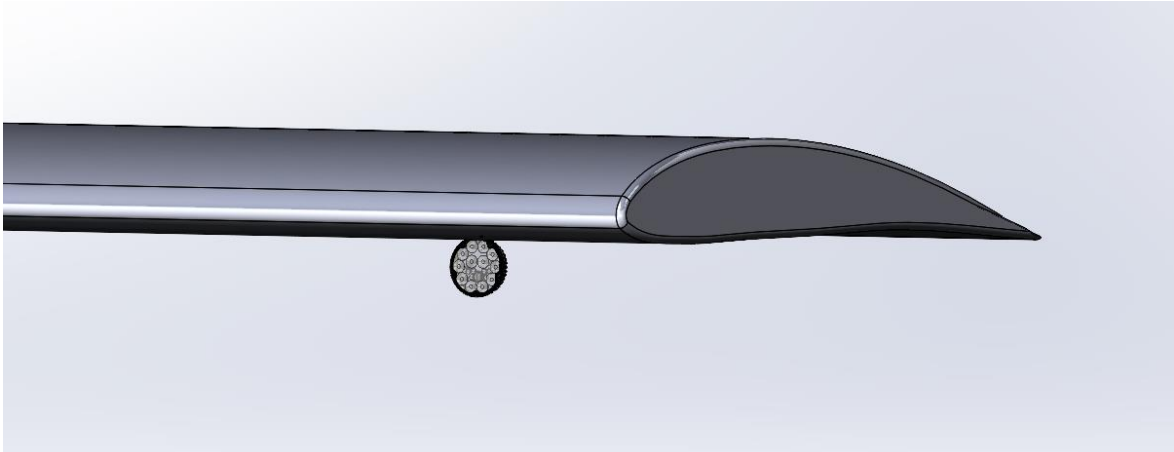
Jelikož je toto světlo zamýšleno pro všechna letadla výrobce Thrush Aircraft, byl jako referenční letoun vybrán: Thrush Turbo S-2R-T660, který disponuje nejvyšší maximální rychlostí letu ze všech uvažovaných letounů – **220 mph ≈ 191 knots**. Na základě maximálních rozměrů byl stanoven přibližný model výklopné části světlometu a při rychlosti 191kn byl simulován odpor vzduchu na lampu generující zatížení, který musí výklopný mechanismus překonat. Simulováno bylo za pomoci simulačního prostředí SolidWorks a OpenFoam, pro zpřesnění výsledku byl světlomet umístěn na 3D CAD model konce křídla, který jsem vymodeloval na základě dokumentace poskytnuté firmou Thrush Aircraft, pro jednoduchost sítě bylo křídlo uvažováno pouze jako nehmotné plošné tělo - aby síť nemusela být příliš komplexní. Simulace zatížení bez okrajových podmínek křídla by nám neposkytla adekvátní výsledek. Tvar výklopné části byl navržen fundovaným odhadem na základě maximálních rozměrů, které jsou dané skenovaným modelem a referenčním standardem MIL-L-81174-4A (AN3095). (9) (10)

Následující grafy zobrazují závislost odporové síly na úhlu vyklopení a závislost závěsového momentu na úhlu vyklopení. Závěsový moment uvažuji k hlavní ose vyklápění a všechny hodnoty jsou vztaženy k definované maximální rychlosti letu.

Setrvačné síly působící na světlomet není třeba uvažovat, neboť hmotnost výklopné části lampy je orientačně $m_l = 1,1kg$. Maximální násobek, na který je toto letadlo certifikováno – $n_T = 3,8$.

$$F_S = m_l \cdot n_T \cdot g \quad 4.1$$

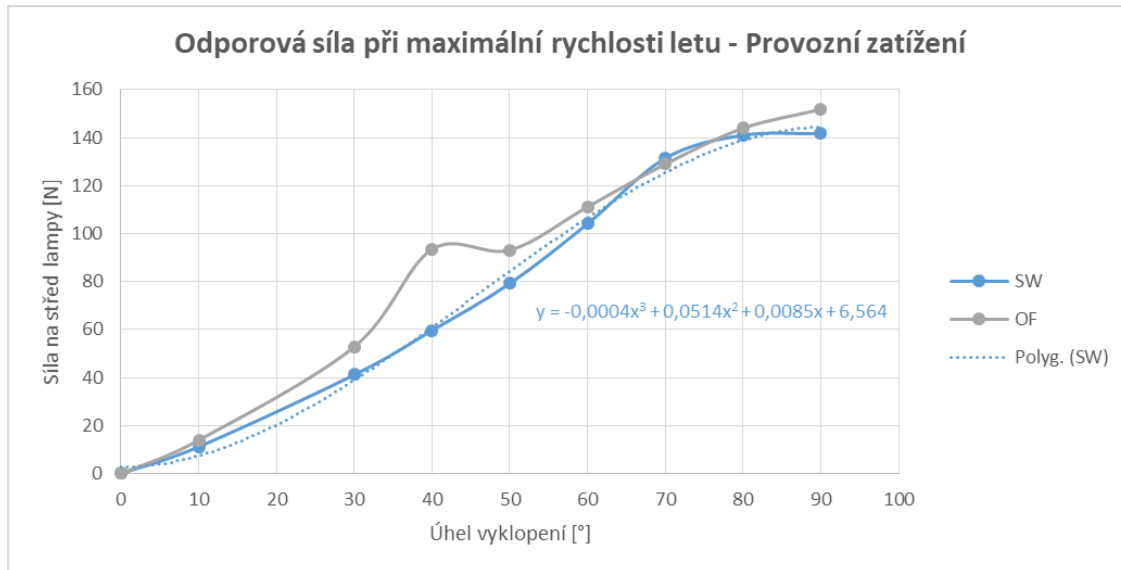
$$F_S = 1,1 \cdot 3,8 \cdot 9,81 = 41 N$$



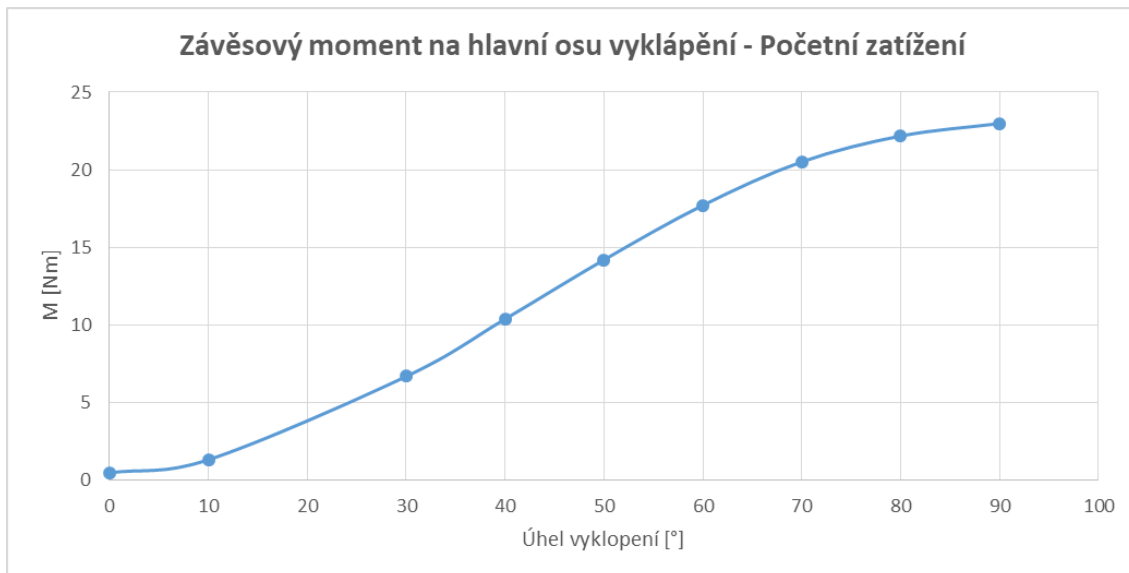
Obrázek 20: Způsob uložení světlometu na konci křídla



Obrázek 21: Pohled na detail uložení – patrné "vykousnutí" profilu



Graf 1: Závislost odporové síly vzduchu na úhlu vyklopení při maximální rychlosti letu – Provozní zatížení

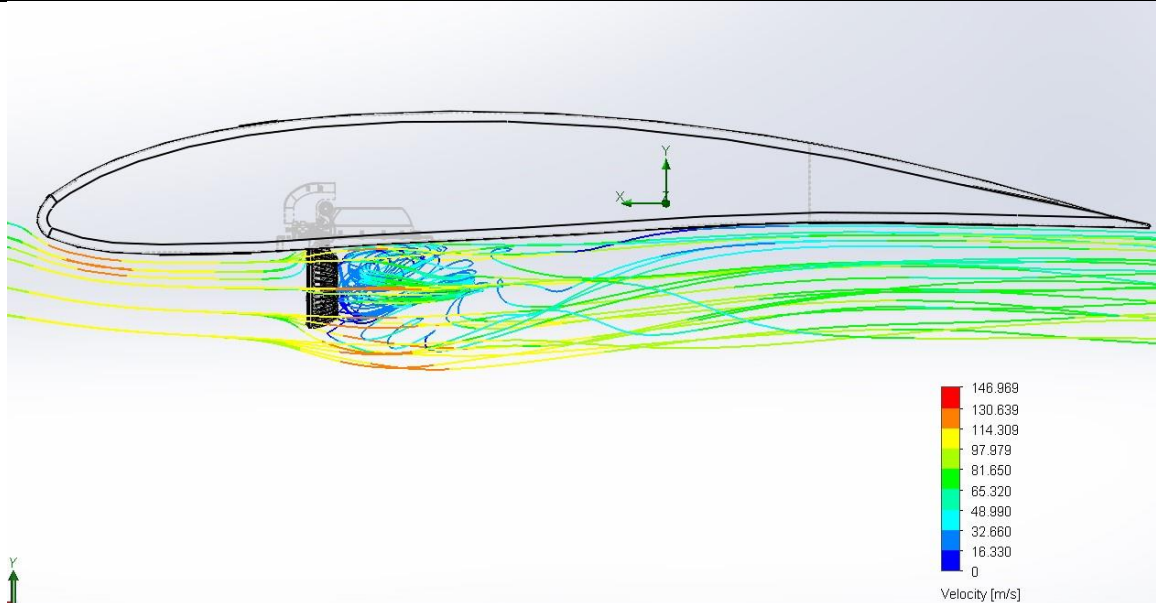


Graf 2: Závislost závěsového momentu na úhlu vyklopení při maximální rychlosti letu – Početní zatížení

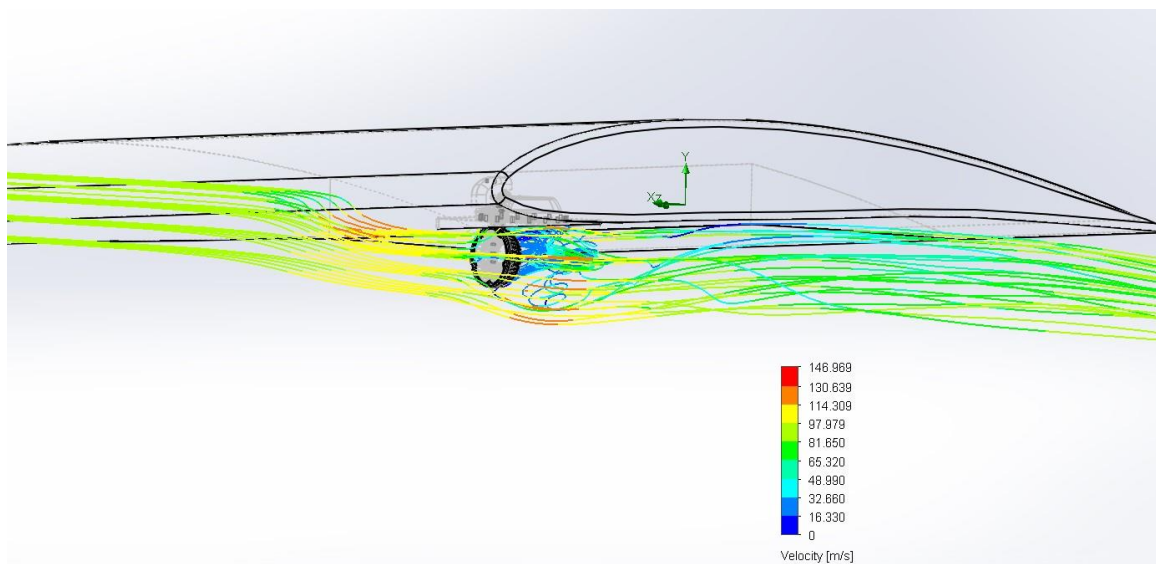
Definice provozního zatížení na střed lampy pomocí polynomické regrese 3. stupně výsledků získaných pomocí CFD analýzy:

$$F_{\text{provozní}} = -0,0004 \cdot x_{\text{úhel}}^3 + 0,0514 \cdot x_{\text{úhel}}^2 + 0,0085 \cdot x_{\text{úhel}} + 6,564$$

$$F_{\text{provozní}} = -0,0004 \cdot 90^3 + 0,0514 \cdot 90^2 + 0,0085 \cdot 90 + 6,564 = 132,069 \text{ N}$$



Obrázek 22: Vizualizace proudění – Pohled z boku



Obrázek 23: Vizualizace proudění – Izometrický pohled

Definice početního zatížení, jako závěsového momentu na hlavní osu vyklápění, při vzdálenosti od osy vyklapené lampy $d = 0,116 \text{ m}$:

$$M_{max} = (F_{provozní} \cdot SF) \cdot d$$

$$M_{max} = (132,069 \cdot 1,5) \cdot 0,116 = 22,98 \doteq 23 \text{ Nm}$$

Pro následující výpočty uvažuji tedy kritický případ: vyklopení na 90°
→ $M_{max} = 23 \text{ Nm}$. Pro konstrukční návrh je nutné také uvažovat turbulence vzniklé v úplavu vyklopené lampy (viditelné na **Obrázek 22**: Vizualizace proudění) – bude nutné vhodné utěsnění, ale také to bude mít pozitivní dopad na proces chlazení.

Jelikož žádný předpis nspecifikuje bezpečnostní násobek pro návrh světlometu, ani pro jeho uložení, byl tedy zvolen obecně uvažovaný bezpečnostní koeficient $SF = 1,5$. Pro sestavení grafu „**Graf 2**“ bylo využito polynomické proložení dat vygenerovaných pomocí programu SW. Využito bylo také simulace v OpenFOAM – jedná se o volně přístupný program, který je ideální pro referenční hodnocení výsledků vygenerovaných skrze SW. Nastavení simulace v OpenFOAM je obtížnější, ale v případě vhodného nastavení může poukázat na faktor „mesh independence“ – popisující konvergenci zvolené sítě.

4.1.3 Rychlost vyklápění

Maximální přípustná doba vyklápění (zaklápění) lampy do maximálního úhlu (do výchozí pozice – 90°) je dle doporučení ARP693E – 3.4.5.3 maximálně 15 sekund. Prakticky však piloti preferují alespoň 10 sekund, proto pro návrh uvažuji vyklopení za 10 s. (7)

4.1.4 Certifikační požadavky a požadavky OEM

Společnost Thrush Aircraft, LLC. vyrábí jednomotorová letadla pro agrární a hasičské účely. Tato letadla tudíž z hlediska EASA i FAA spadají do „Restricted Category“, která není striktně vázána na žádný konkrétní předpis, kterého by se konstrukční návrh měl nezbytně držet.

Předpokládám spolupráci s Thrush Aircraft, LLC., jež je držitelem typového certifikátu. V případě zájmu o světlomet, který je předmětem návrhu této diplomové práce, by – jakožto OEM – provedl změnové řízení popsané v kapitole: 3.1.2. Aby toto bylo možné, je nezbytně nutné použít stejné připojovací rozměry a stejný připojovací konektor – **Amphenol 97-3102A-18-5P**.

Svůj návrh podřizuji předpisům CS-23, CS-25, doporučujícímu předpisu ARP693D a americké vojenské normě AN-3095. Návrh zohledňuje Part 21.

4.1.5 Požadavky na svícení

Z hlediska řešení použitého světelného systému je nutné dosáhnout minimálně stejné intenzity a vyzařovacích úhlů, jako nabízel původní světlomet. V původním

světlometu se nacházela halogenová žárovka s reflektorem od firmy GE Lighting – GE4559 typu PAR 64 postavená na 28V architektuře, která disponovala maximální intenzitou 600 000 cd a vyzařovacím úhlem 11° horizontálně x 12° vertikálně na 10% intenzity. (11)

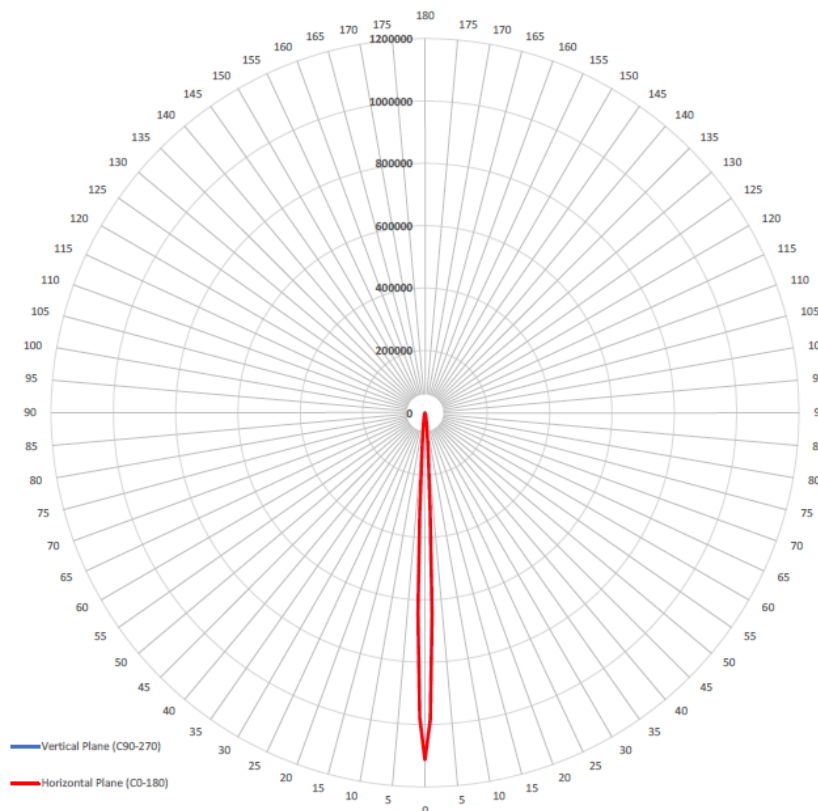
- ***Vysvětlení vyzařovacích úhlů a použití jednotky candela***

Světlo vyzážené ze zdroje je posuzováno několika parametry. Základním pojmem pro porovnání různých světelných zdrojů je intenzita světla neboli jeho svítivost. Ta je validována na základě standardizované jednotky SI **candela [cd]**. Posuzuje se jaké maximální úrovně intenzity zkoumaný zdroj dosahuje. Následně se zpravidla zkoumá, jakého vyzařovacího úhlu při 50% a 10% maximální intenzity zdroj dosahuje, protože běžný světelný zdroj negeneruje homogenní paprsek. FWTM (Full Width at Tenth Maximum) je anglické označení pro šířku úhlu při 10% maximální intenzity. Pro koncového uživatele je takto popsán světelný zdroj představitelný pro konkrétní použití. V rámci letectví by se dalo jednoduše říct, že čím větší úhel při 10% intenzity zdroje, tím širší zorné pole pilot získá pro operace za snížené viditelnosti. (11)

1. Main Light Measurement Results:

Output lumens	12888 lm
Peak Intensity	1137465 cd
Beam Angle 0°-180° (FWHM, 50%)	4.5°
Beam Angle 90°-270° (FWHM, 50%)	4.5°
Field angle 0°-180° (FWTM, 10%)	9.6°
Field angle 90°-270° (FWTM, 10%)	9.7°
Correlated Color Temperature	5727 K

Candela Polar Plot, full range:



Graf 3: Polární rozložení intenzity

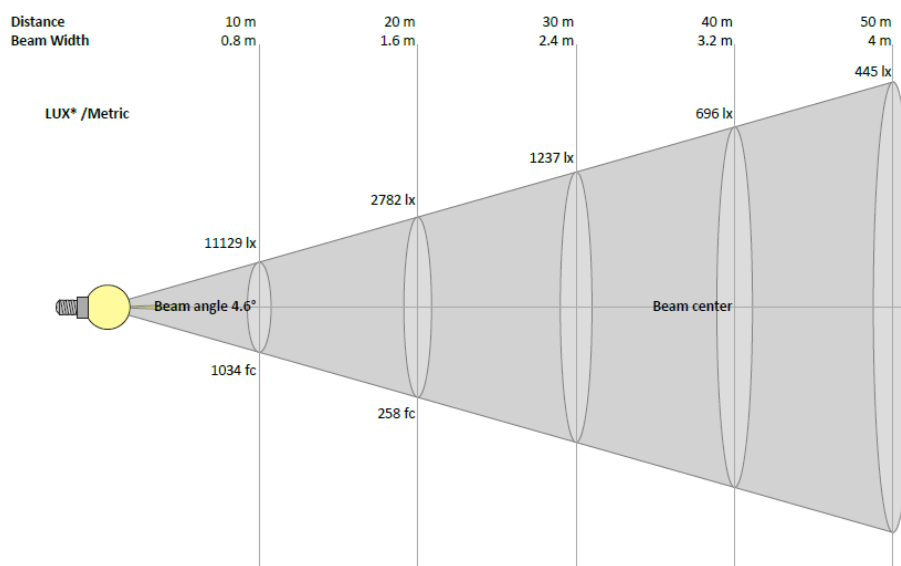
Na „**Graf 3**“ je zobrazeno polární rozložení intenzity zdroje. Jedná se o graf z měření odlišného světloometru, avšak je z něj patrné že v horizontální a vertikální rovině bude vykazovat symetrické charakteristiky rozložení intenzity s maximální intenzitou 1 137 465cd a úhlem vyzařování při 10% intenzity (113 746,5cd) 9,7°. V této diplomové práci budeme cílit na minimální úhel vyzařování 12°. Rozložení intenzity lze zobrazit i v kartézských souřadnicích, tato vizualizace však není vhodná k bližšímu představení zdroje.

- **Lumen a jeho charakteristika**

Dalším zkoumaným parametrem je světelný tok udávaný v jednotce **lumen[lm]**. Obecně lze říci, že čím více lumenů daný zdroj má, tím více světla vyprodukuje, avšak tento údaj není vztážen k vyzařovacímu úhlu, čímž se stává poněkud zavádějící... Nicméně je velice příhodný pro rychlé porovnání zdrojů světla. Například při výběru vhodného LED čipu, či pro hrubou představu zákazníka.

- **Lux a jeho charakteristika**

Neméně důležitou vlastnost hraje množství světla dopadající na osvětlovanou plochu vyjádřenou v **luxech [lx]**. Na grafu níže (**Graf 4**, který pochází ze stejného měření jako **Graf 3**) je vidět, jak prudce hodnota klesá s rostoucí vzdáleností od zdroje, neboť s rostoucí vzdáleností při konstantním úhlu vyzařování se stále zvětšuje ozařovaná plocha.



Graf 4: Množství světla dopadající na ozařenou plochu

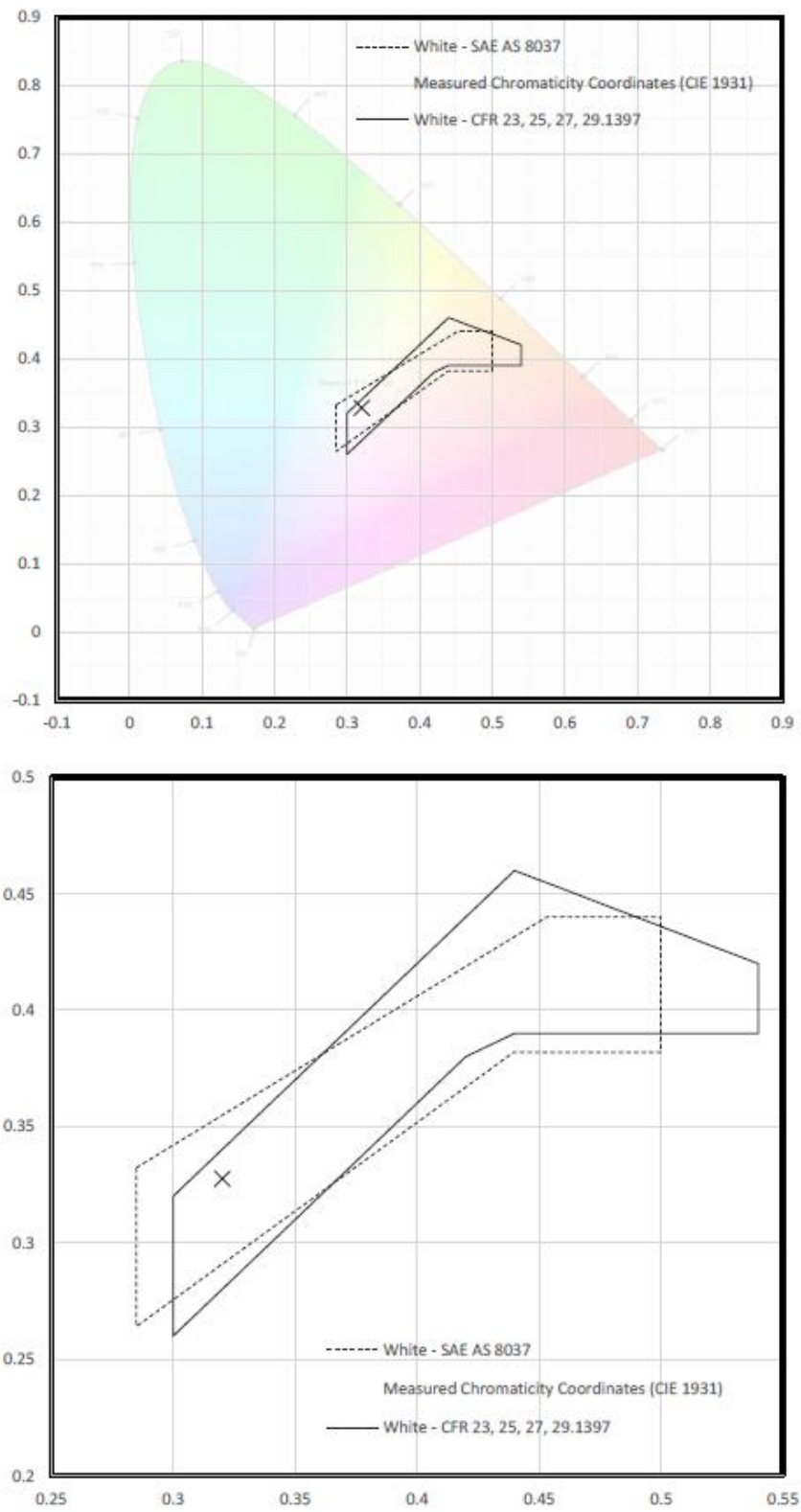
Doporučení dle ARP693E zní: „Každé přistávací světlo by mělo poskytnout dostatečné osvětlení dráhy pro noční přistání. Jako cíl návrhu by mělo být dosaženo minimálně 21,5 luxů (2 ft-c) ve vzdálenosti 122 metrů (400 stop) před pilotem při přistání a minimálně 5,4 luxu (0,5 ft-c) ve vzdálenosti 91 metrů (300 stop) před pilotem během provádění vzletu. Úrovně luxů (ft-c) jsou měřeny kolmo k paprsku světla.“ (SAE Aerospace,2018, 3.1.1.5) (12)



Těmto hodnotám se budu snažit přiblížit, nebo je překonat.

- Barva světla

Posledním, avšak velice podstatným parametrem, který nelze opomenout, je barva světla, kterou lze vyjádřit pomocí jeho teploty popisované v **kelvinech [K]**. Percepce barvy je velice subjektivní a z hlediska přistávacích světlometů existuje pouze doporučení dle ARP693E, že by mělo být bílé. Pro ideální vnímání bychom se měli tedy pohybovat na středu CIE 1391 diagramu chromatičnosti. Za cíl si lze vzít nařízení 3.3.1 standardu SAE8037, které specifikuje koordináty v CIE 1391 diagramu pro aviatickou bílou barvu.



Graf 5: Chromatičnost zobrazená pomocí CIE 1931 diagramu s vyznačenou hranicí aviatcké bílé barvy

Na závěr musím však podotknout, že například pro antikolizní a poziční světlomety existují specifické normy – SAE8017 a SAE8037 – věnující se vyzařovacím úhlům v závislosti na hodnotě efektivní candela, a tak zde neplatí generálně – čím širší, tím lepší. Primárním důvodem je potenciální ozáření pilotů či nesprávná distribuce paprsku pro konkrétní účel. (13), (14)

Angle above or below the horizontal plane	Effective Intensity (Candelas)
0° - 5°	400
5° - 10°	240
10° - 20°	80
20° - 30°	40
30° - 75°	20

Tabulka 3: Ukázka z normy SAE8017 - 3.2.2 - Antikolizní světla letadel (13)



GENERAL CHARACTERISTICS	
Lamp Type	Sealed Beam - PAR
Bulb	PAR64
Base	Screw Terminals
Filament	CC-8
Rated Life	25.0 hrs
Primary Application	Aircraft; Very Narrow Spot
PHOTOMETRIC CHARACTERISTICS	
Beam Spread - Horizontal	11.0 - 10.0 °
Beam Spread - Vertical	12.0 - 10.0 °
Max. Beam Candlepower (MBCP) (MAX)	600000.0
ELECTRICAL CHARACTERISTICS	
Wattage	600.0
Voltage	28.0
DIMENSIONS	
Maximum Overall Length (MOL)	3,7500 in(95,2 mm)
Bulb Diameter (DIA)	8,000 in(203,2 mm)
PRODUCT INFORMATION	
Product Code	40578
Description	4559
ANSI Code	4559
Standard Package	Case
Standard Package GTIN	10043168405789
Standard Package Quantity	12
Sales Unit	Unit
No Of Items Per Sales Unit	1
No Of Items Per Standard Package	12
UPC	043168405782

Obrázek 24: Původní zdroj světla (11)

4.1.6 Požadavky na chlazení

LED čipy a řídicí elektronika generují neopomenutelné množství tepla. Pro správnou funkčnost čipů je tedy nezbytné udržovat teploty v rozumných mezích (max.

90°C na LED čipu). Vyšší teploty mohou znamenat ztrátu intenzity, změnu barvy a v krajních případech úplnou destrukci čipu vyhořením substrátu.

4.2 Návrh uložení a mechanismu

Vzhledem k malým rozměrům využitelným k zástavbě daného světloometu je nezbytně nutné, věnovat se návrhu s komplexním pohledem na problematiku, snažit se minimalizovat počet použitých dílů a náležitě se vypořádat s daným závěsovým momentem vzniklým od odporových sil vzduchu.

4.2.1 Mechanismus vyklápění – popis

Mechanismus musí dovolovat maximální úhel vyklápění 90° a zároveň hlavní osa otáčení musí být umístěna těsně k opláštění letounu tak, aby umožňovala plné vyklopení a zároveň nenarušovala čistotu aerodynamického návrhu křídla (pozn. aut.: případně trupu). Což z hlediska koncepce neumožňuje mít masivní hlavní osu vyklápění, tak je žádoucí ji nezatěžovat kombinovaně.

Hlavní osa je tedy v tomto návrhu zatěžována pouze tlakem, respektive symetrickým ohybem, a není tedy zatěžována krutem. K ní je připojen vyklápěcí adaptér, který je osazen segmentem přímého ozubení. Následně je tento segment poháněn pastorkem na výstupu ze šnekové převodovky navržené přesně pro tento účel.

- **Výběr ozubeného segmentu**

Segment byl záměrně vybrán s přímým ozubením, aby zatěžoval hlavní vyklápěcí hřídel pouze jedním směrem, a tím vyvozoval symetrický ohybový moment vůči uložení hřídele v bronzových pouzdrech.

Aby se ušetřily náklady, hmotnost i rychlost výroby, vybral jsem z katalogu japonského výrobce KHK Gears (15) ozubené kolo SSG1,5-56, které je vhodné k dodatečnému obrábění a z něj se vytvořil segment použitelný pro účely převodu závěsového momentu.

$$M_{max} = 23 \text{ Nm} \dots \text{ Maximální závěsový moment (4.1.2)}$$

$$90^\circ = \frac{1}{4} \text{ otáčky} \dots \text{ Rychlost vyklápění (4.1.3)}$$

Výpočet maximální rychlosti otáčení zubného segmentu:

$$n_{ot.} = \frac{\text{úhel vyklopení}}{\text{čas vyklopení} \cdot 360^\circ} \cdot 60$$

$$n_{ot.} = \frac{90^\circ}{10 \cdot 360^\circ} \cdot 60 = 1,5 \frac{ot}{min}$$

Z hlediska maximální rychlosti otáčení neplyne žádné omezení, neboť přímá ozubení nabízená KHK Gears jsou omezena pouze nad rychlosti $100 \frac{ot}{min}$ pro určité typy. Rozhodl jsem se použít řadu SSG s modulem $m = 1,5$, neboť k ní lze párovat pastorek SSGS se stejným modulem. Mohu tak využít tato ozubení jako polotovary bez nutnosti návrhu a obrábění nového přímého ozubení.

Vybral jsem ozubené kolo SSG1,5-56, které mělo největší přípustný roztečný průměr → počet zubů, a tak mi nabízelo v kombinaci s SSGS1,5-13 největší převodový poměr:

$$i_3 = \frac{56}{13} = 4,31$$

Calculation of Bending Strength of Gears

Item	MSGA MSGB	SSGS	SSG SSAG	SSS,SS SSA,SSY SSAY,SSR	SS-H	SUS SUSA SUSF	BSS	KSG	KS	KS-H	SSG SSCPG Note 6	ZSTP Note 6	NSU	PU PS PSA	DSF DS			
Formula ^{NOTE 1}	Formula of spur and helical gears on bending strength (JGMA401-01)												The Lewis formula					
No. of teeth of mating gears	Same number of teeth (30 for SSGS, SSS, SSR)								Racks				—					
Rotational Speed	600rpm ^{NOTE 2}			100rpm				400rpm		100rpm								
Design Life (Durability)	Over 10 ⁷ cycles																	
Impact from motor	Uniform load												Allowable bending stress (kgf/mm ²)					
Impact from load	Uniform load												—					
Direction of load	Bidirectional load (calculated with allowable bending stress of 2/3)												1.38 (40°C with no lubrication)		1.15 (40°C with no lubrication)		m 0.5 4.0 m 0.8 4.0 m 1.0 3.5 (40°C with grease lubrication)	
Allowable bending stress at root σ_{Flim} (kgf/mm ²)	47	24.5	19 (24.5) ^{NOTE 3}	19 (24.5) ^{NOTE 4}	19	10.5	4	30	32	32	30	19						
Safety factor S_{Ft}	1.2																	

Calculation of Surface Durability (Except where it is common with bending strength)

Formula ^{NOTE 1}	Formula of spur and helical gears on surface durability (JGMA402-01)														
Kinematic viscosity of lubricant	100cSt (50°C)														
Gear support	Symmetric support by bearings ^{NOTE 5}								Supported on one end.						
Allowable Hertz stress σ_{Hlim} (kgf/mm ²)	166	99	90 (62.5) ^{NOTE 3}	49 (62.5) ^{NOTE 4}	90	41.3	—	112	79	112	112	90			
Safety factor S_{Ht}	1.15														

[NOTE 1] The gear strength formula is based on JGMA (Japanese Gear Manufacturers Association) specifications, "MC Nylon Technical Data" by Mitsubishi Chemical Advanced Materials and "Duracon (R) Gear" by Polyplastics Co. The units for the rotational speed (rpm) and the stress (kgf/mm²) are adjusted to the units needed in the formula.

[NOTE 2] For semi-custom gears, the rotation speed is based on 300rpm.

[NOTE 3] For SSG Ground Spur Gears, with module under 1, thermal refining is applied. Allowable bending stress and allowable hertz stress values are shown in parentheses.

[NOTE 4] For SSS Spur Pinion Shafts, with module over 1.5, tooth induction hardening is not applied. Allowable bending stress and allowable hertz stress values are shown in parentheses.


[NOTE 5] SSS Spur Pinion Shafts with module 1 or less (SA configuration) are set to cantilever support as they are single shaft types.

[NOTE 6] For Nabtesco GH Series.

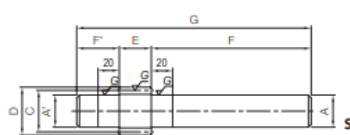
Tabulka 4: KHK Gears – skupiny přímého ozubení

SSGS Module 1.5, 2, 2.5, 3

Ground Spur Pinion Shafts



Specifications	
Precision grade	JIS grade N7 (JIS B1702-1: 1998)
Gear teeth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	S45C
Heat treatment	Thermal refined, gear teeth induction hardened
Tooth hardness	50 to 60HRC
Surface treatment	Black oxide coated except for ground part



Catalog Number	Module	No. of teeth	Profile shift coefficient	Shape	Shaft diameter (L)		Pitch dia.	Outside dia.		Face width	Shaft diameter (R)		Total Length
					A'	F'		C	D		A	F	
SSGS1.5-10	m1.5	10	+0.5	S7	12.2	25	15	19.35	15	12.2	100	140	
SSGS1.5-11		11	+0.5		13.7		20.85						
SSGS1.5-12		12	0		12.7		19.5						
SSGS1.5-13	13	0	15.2	19.5	22.5	15.2							
SSGS2-10	m2	10	+0.5	S7	16.2	30	20	25.8	20	16.2	120	170	
SSGS2-11		11	+0.5		18.2		27.8						
SSGS2-12		12	0		18.2		28						
SSGS2-13		13	0		20.2		30						
SSGS2.5-10	m2.5	10	+0.5	S7	20.2	35	25	32.25	25	20.2	135	195	
SSGS2.5-11		11	+0.5		22.7		34.75						
SSGS2.5-12		12	0		22.7		35						
SSGS2.5-13		13	0		25.2		37.5						
SSGS3-10	m3	10	+0.5	S7	24.2	40	30	38.7	30	24.2	150	220	
SSGS3-11		11	+0.5		27.2		41.7						
SSGS3-12		12	0		27.2		42						
SSGS3-13		13	0		30.2		45						

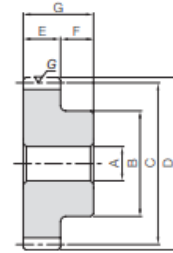
Tabulka 5: KHK Gears SSGS1,5 - výběr polotovaru pro pastorek

SSG Module 1.5
Ground Spur Gears



Specifications	
Precision grade	JIS grade N7 (JIS B1702-1: 1998)*
Gear teeth	Standard full depth
Pressure angle	20°
Material	S45C
Heat treatment	Gear teeth induction hardened
Tooth hardness	50 to 60HRC
Surface treatment	Black oxide coated except for teeth

* The precision grade of J Series products is equivalent to the value shown in the table.



S1

Catalog Number	No. of teeth	Shape	Bore A _{H7}	Hub dia. B	Pitch dia. C	Outside dia. D	Face width E	Hub width F	Total length G	Allowable torque (N-m)		Allowable torque (kgf-m)		Backlash (mm)	Weight (kg)
										Bending strength	Surface durability	Bending strength	Surface durability		
SSG1.5-14	14	S1	10	17	21	24	15	14	29	11.1	3.73	1.13	0.38	0.08-0.16	0.048
SSG1.5-15	15			18	22.5	25.5				12.5	4.35	1.27	0.44		0.057
SSG1.5-16	16			20	24	27				13.8	5.02	1.41	0.51		0.070
SSG1.5-17	17			21	25.5	28.5				15.2	5.74	1.55	0.58		0.080
SSG1.5-18	18			22	27	30				16.6	6.51	1.69	0.66		0.091
SSG1.5-19	19			23	28.5	31.5				18.0	7.33	1.83	0.75		0.10
SSG1.5-20	20			24	30	33				19.4	8.20	1.98	0.84		0.12
SSG1.5-21	21			25	31.5	34.5				20.8	9.12	2.12	0.93		0.13
SSG1.5-22	22			26	33	36				18.6	8.41	1.89	0.86		0.13
SSG1.5-23	23			27	34.5	37.5				19.8	9.27	2.02	0.95		0.15
SSG1.5-24	24	12	15	28	36	39	15	14	29	21.0	10.2	2.14	1.04	0.08-0.16	0.16
SSG1.5-25	25			30	37.5	40.5				22.2	11.1	2.27	1.13		0.18
SSG1.5-26	26			32	39	42				23.5	12.1	2.39	1.23		0.20
SSG1.5-27	27			34	40.5	43.5				24.7	13.1	2.52	1.33		0.21
SSG1.5-28	28			36	42	45				26.0	14.1	2.65	1.44		0.23
SSG1.5-29	29			37	43.5	46.5				27.3	15.2	2.78	1.55		0.25
SSG1.5-30	30			38	45	48				28.5	16.3	2.91	1.66		0.27
SSG1.5-32	32			40	48	51				31.1	18.6	3.17	1.90		0.31
SSG1.5-34	34	42	51	54	33.6	21.1	3.43	2.15	0.35						
SSG1.5-35	35	42	52.5	55.5	34.9	22.4	3.56	2.29	0.37						
SSG1.5-36	36	45	54	57	36.2	23.8	3.70	2.43	0.40						
SSG1.5-38	38	45	57	60	38.8	26.6	3.96	2.71	0.44						
SSG1.5-40	40	50	60	63	41.5	29.6	4.23	3.02	0.51						
SSG1.5-42	42	50	63	66	44.1	32.8	4.50	3.35	0.54						
SSG1.5-44	44	50	66	69	46.7	36.2	4.77	3.69	0.58						
SSG1.5-45	45	50	67.5	70.5	48.1	37.9	4.90	3.86	0.58						
SSG1.5-48	48	50	72	75	52.0	43.4	5.31	4.42	0.64						
SSG1.5-50	50	60	75	78	54.7	47.2	5.58	4.82	0.77						
SSG1.5-55	55	60	82.5	85.5	61.4	57.7	6.26	5.88	0.88						
SSG1.5-56	56	60	84	87	62.8	59.9	6.40	6.11	0.91						
SSG1.5-60	60	60	90	93	68.1	69.2	6.95	7.06	0.99						
SSG1.5-64	64	60	96	99	67.9	73.2	6.92	7.46	1.09						
SSG1.5-70	70	60	105	108	75.4	88.4	7.69	9.01	1.26						
SSG1.5-75	75	60	112.5	115.5	81.7	102	8.33	10.4	1.41						
SSG1.5-80	80	70	120	123	88.0	117	8.97	12.0	1.68						
SSG1.5-90	90	70	135	138	101	150	10.3	15.3	2.04						
SSG1.5-100	100	70	150	153	113	187	11.6	19.1	2.43						

Tabulka 6: KHK Gears SSG1,5 - výběr polotovaru pro segment

• **Motor – zdroj točivého momentu**

Pro další postup je nutné zvolit si hnací jednotku, která bude systému dodávat dostatečný zdroj točivého momentu. Při výběru je potřebné vzít v úvahu potenciální ovlivnění elektroinstalace letounu elektromagnetickým rušením, a tak je vhodné vybírat

bezkartáčové motory, které generují velmi slabá elektromagnetická pole – není tedy nutné se zabývat komplikovaným EMI odstíněním.

V rámci zvolené zástavby a elektronické architektury volím stejnosměrný 24V bezkartáčový motor: **RPX40-125V24-010-X**, který disponuje nominálním točivým momentem $M_{nom} = 0,125Nm$. (16)

RPX40			
Specifications	RPX40-125V12	RPX40-125V24	RPX40-125V48
Design Voltage (VDC)	12	24	48
No load speed (RPM)	6,000		
Peak Torque (oz-in)	56.4		
Peak Torque (mNm)	398.0		
Peak Current (Amps)	19.7	9.8	4.9
Continuous Stall Torque* (oz-in)	17.7		
Continuous Stall Torque* (mNm)	125.0		
Continuous Stall Current (Amps)	6.6	3.3	1.6
Continuous Rated Torque* (oz-in)	15.3		
Continuous Rated Torque* (mNm)	108.0		
Continuous Rated Current (Amps)	5.7	2.8	1.4
Continuous Rated Speed (RPM)	4,775		
Voltage Constant (V / kRPM)	2.0	4.0	8.0
Torque Constant (oz-in / Amp)	2.7	5.4	10.8
Torque Constant (mNm / Amp)	19.1	38.1	76.3
Resistance (Ohms)	0.4	1.5	5.8
Inductance (mH)	0.043	0.170	0.680
Motor Constant (oz-in / √ Watt)	4.5		
Motor Constant (mNm / √ Watt)	31.6		
Electrical Constant (msec)	0.33		
Mechanical Constant (msec)	1.11		
Thermal Time Constant (sec)	430.0		
Rotor inertia (oz-in ²)	0.0383		
Rotor inertia (g-cm ²)	7.0		
Thermal Resistance (C / Watt)	4.77		
Axial Load (N) 5mm from face	7.0		
Radial Load (N) 5mm from face	30.0		
Weight (oz)	5.6		
Weight (g)	160.00		
Length (inch)	1.2		
Length (mm)	30.0		
Number of Poles	14.0		

Tabulka 7: Motor ElectroCraft RPX40-125

- **Převodové ústrojí**

Převodovku použitou v tomto světlometu navrhuji jako třístupňovou, kde jsou první dva převody tvořeny šnekovým soukolím a třetí převod je tvořen dvojicí pastorku a ozubeného segmentu. Účinnost odhaduji na $\eta' = 20\%$.

Odhad minimálního potřebného převodového čísla:

$$i'_{př} = \frac{M_{max}}{M_{nom} \cdot \eta'}$$

$$i'_{př} = \frac{23}{0,125 \cdot 0,2} = 920$$

Jako první převodový stupeň volím soukolí **A17U9** s převodovým číslem $i_1 = 9$ disponující účinností $\eta_1 = 0,71$. Pro druhý převodový stupeň jsem zvolil soukolí **A25U40** s převodovým číslem $i_2 = 40$ a to disponuje účinností $\eta_2 = 0,35$. Poslední převod točivého momentu je popsán ve „**Výběr ozubeného segmentu**“: $i_3 = 4,31$ a $\eta_3 = 0,98$. Účinnost uložení předpokládám $\eta_l = 0,95$. (17)

Výsledný točivý moment soustavy a rychlost otáčení motoru:

$$i_{př} = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_l$$

$$i_{př} = 9 \cdot 40 \cdot 4,31 \cdot 0,71 \cdot 0,35 \cdot 0,98 \cdot 0,95 = 355,378$$

$$M_{k_{max}} = M_{nom} \cdot i_{př}$$

$$M_{k_{max}} = 0,125 \cdot 355,378 = 44,42 \text{ Nm}$$

$$M_{k_{max}} \ll M_{max} \rightarrow \text{Dostatečné}$$

$$n_m = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot n_{ot.}$$

$$n_m = 9 \cdot 40 \cdot 4,31 \cdot 1,5 = 2327,4 \frac{ot}{min} \rightarrow \text{volím } n_m = 2400 \frac{ot}{min}$$

Reálné točivé momenty na jednotlivých stupních pro zjištěné zatížení

$$M_{k_3} = \frac{M_{max}}{i_3 \cdot \eta_3 \cdot \eta_l}$$

$$M_{k_3} = \frac{23}{4,3 \cdot 0,98 \cdot 0,95} = 5,75 \text{ Nm}$$

$$M_{k_2} = \frac{M_{k_3}}{i_2 \cdot \eta_2 \cdot \eta_l}$$

$$M_{k_2} = \frac{5,75}{40 \cdot 0,35 \cdot 0,95} = 0,43 \text{ Nm}$$

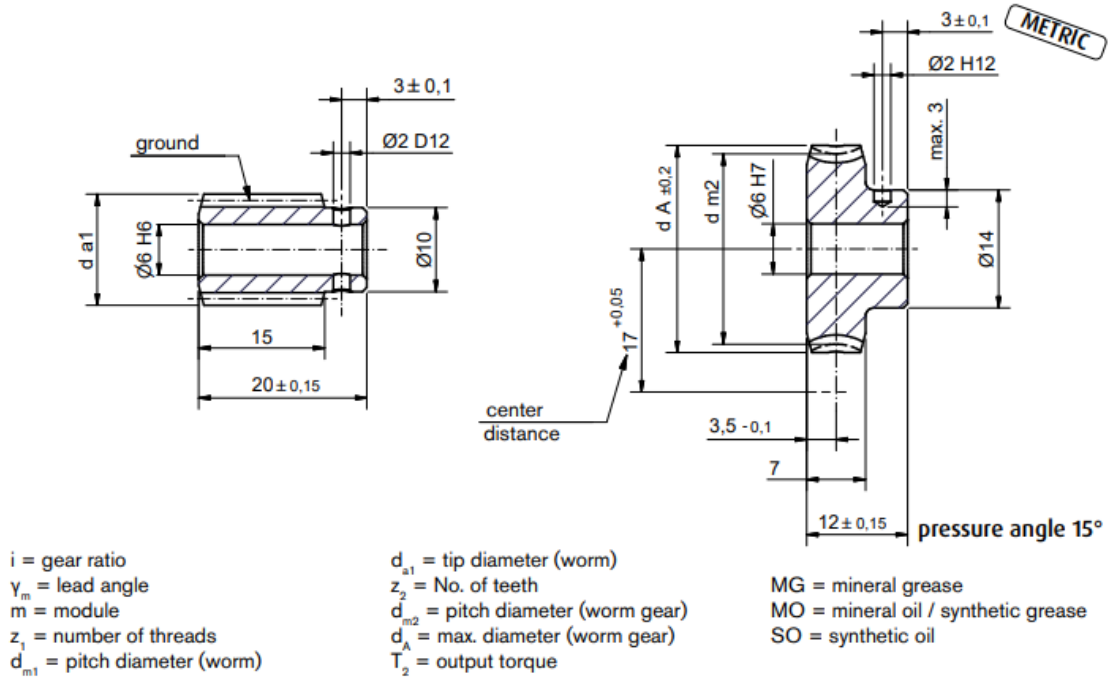
$$M_{k_1} = \frac{M_{k_2}}{i_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_l}$$

$$M_{k_1} = \frac{0,43}{9 \cdot 0,71 \cdot 0,95} = 0,071 \text{ Nm}$$

Otáčky motoru jsou zvolené s respektem k rozsahu otáček motoru tak, aby byly vyšší než potřebné otáčky pro dostatečnou rychlost vyklopení a nižší než maximální rychlost otáčení motoru.

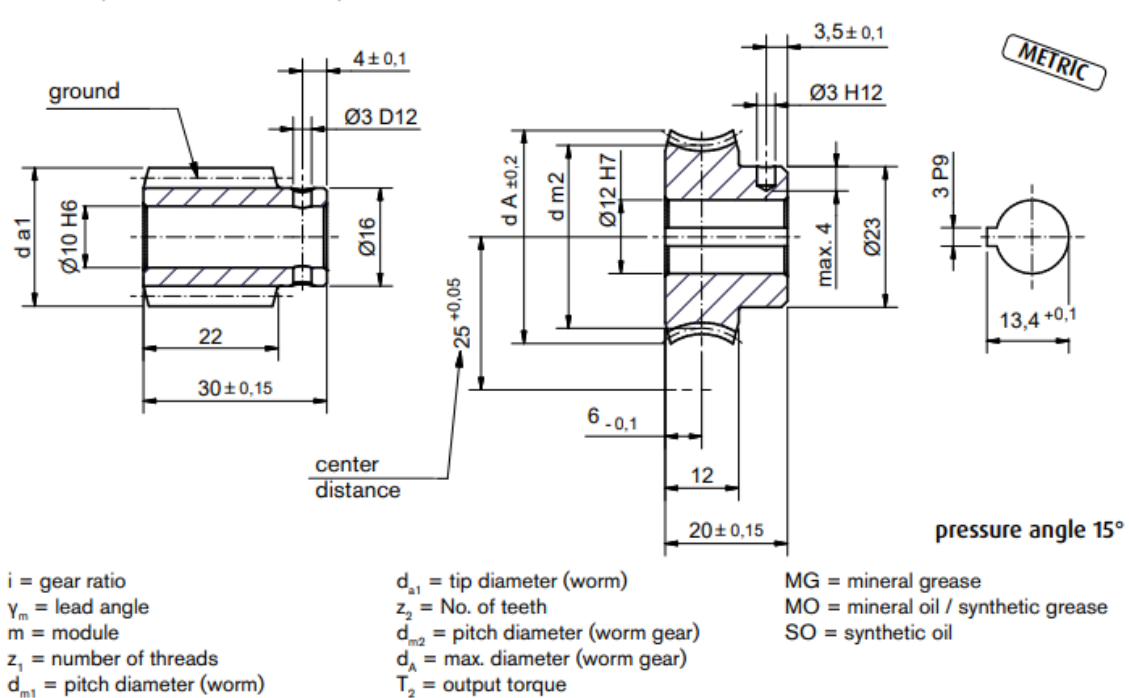
Soukolí A25U40 je zvolené záměrně s vyšším převodovým číslem, než je nezbytné pro zjištěnou zátěž systému, aby bylo možné převod škálovat například pro výklopné lampy větších průřezů a aby byl převod samosvorný, díky čemuž nemusí být motor v záběru po dokončení vyklopení světloometu. Zároveň je nežádoucí volit nižší převodová čísla, protože by docházelo k příliš rychlému vyklápění s negativním dopadem na životnost použitých součástí, které by se notně otáčely/vyklápěly vyšší rychlostí. Optimálním řešením by bylo ponížít otáčky motoru, nicméně ty je ideální výkonově regulovat až od 20 % maximálních otáček (v tomto případě více než $1200 \frac{ot}{min}$).

A17 (17 mm center distance)



Obrázek 25: Převodové soukolí A17 (17)

A25 (25 mm center distance)



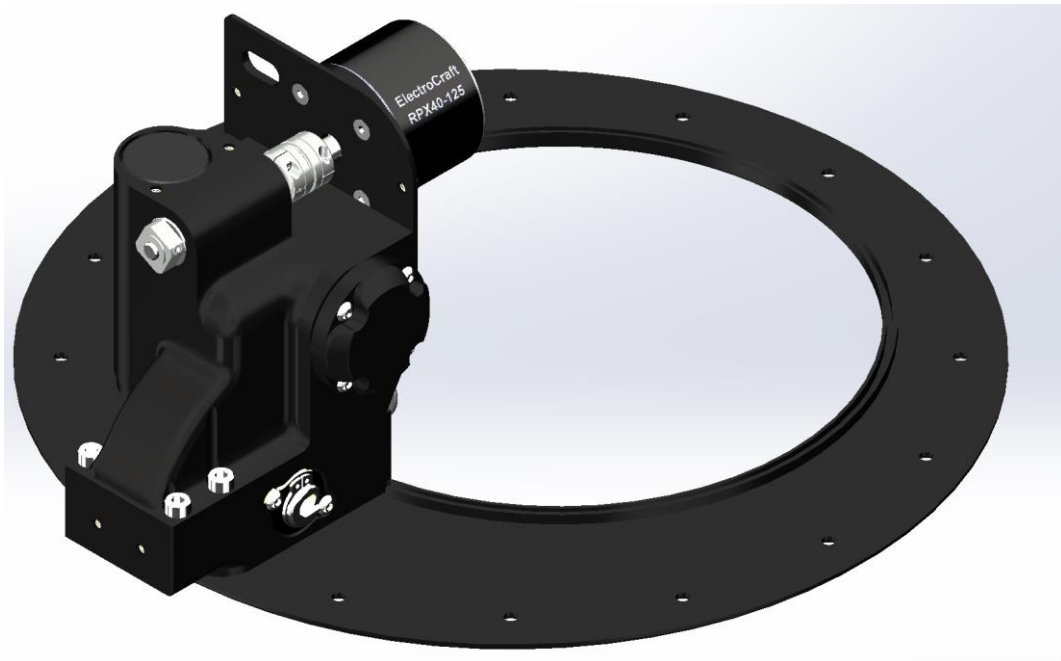
Obrázek 26: Převodové soukolí A25 (17)

4.2.2 Příruba – hlavní chassis

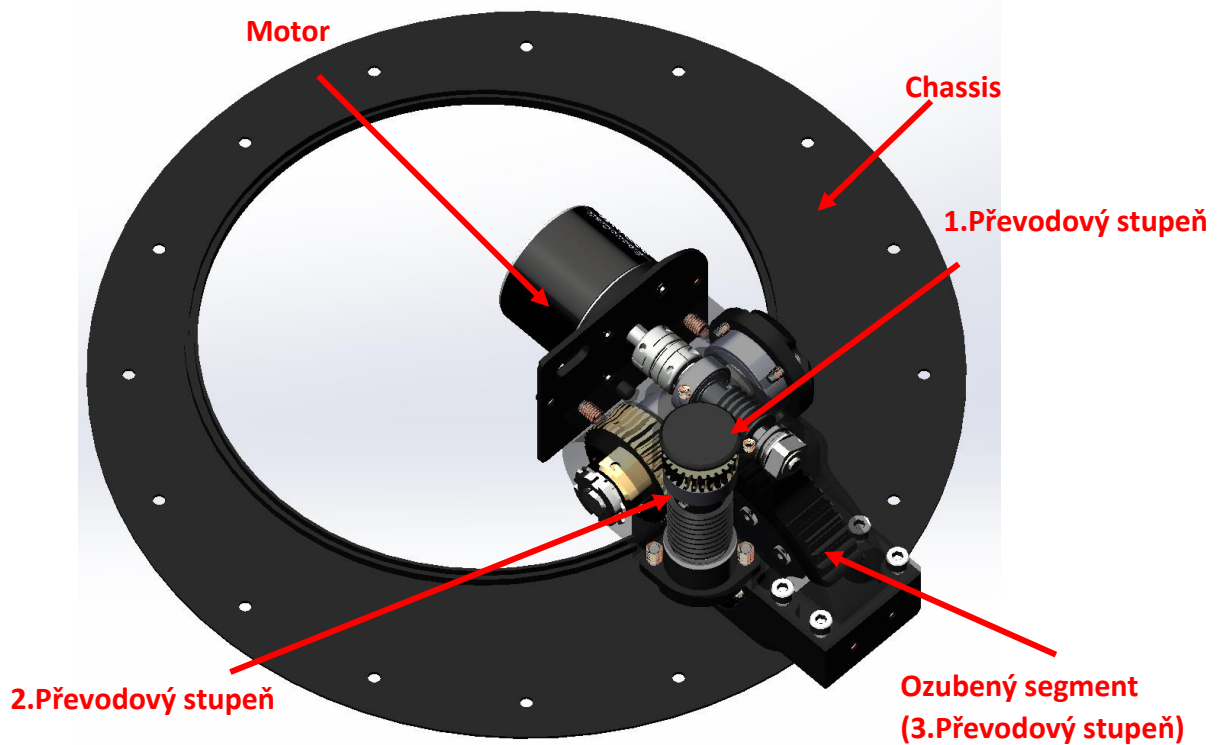
Celý mechanismus a řídicí elektronika jsou připojeny k hlavnímu chassis světlometu, které je v podstatě přírubou s vnějšími rozměry a pozicí připojovacích děr k opláštění křídla dle AN3095. Jako materiál je zvolena hliníková slitina: EN AW-6082 T6, která poskytuje dobrou obrobitelnost, vysokou pevnost a obecně výbornou odolnost proti korozi. Tu lze vylepšit ještě anodickou oxidací. Pro tento případ byla součást opískována, aby získala matný vzhled a eloxována dle vojenského standardu MIL-A-8625, Type II, Class 2 (tzv. tvrdé eloxování), aby se stal povrch odolnějším vůči vnějším vlivům.

4.3 Finální řešení mechanické podsestavy

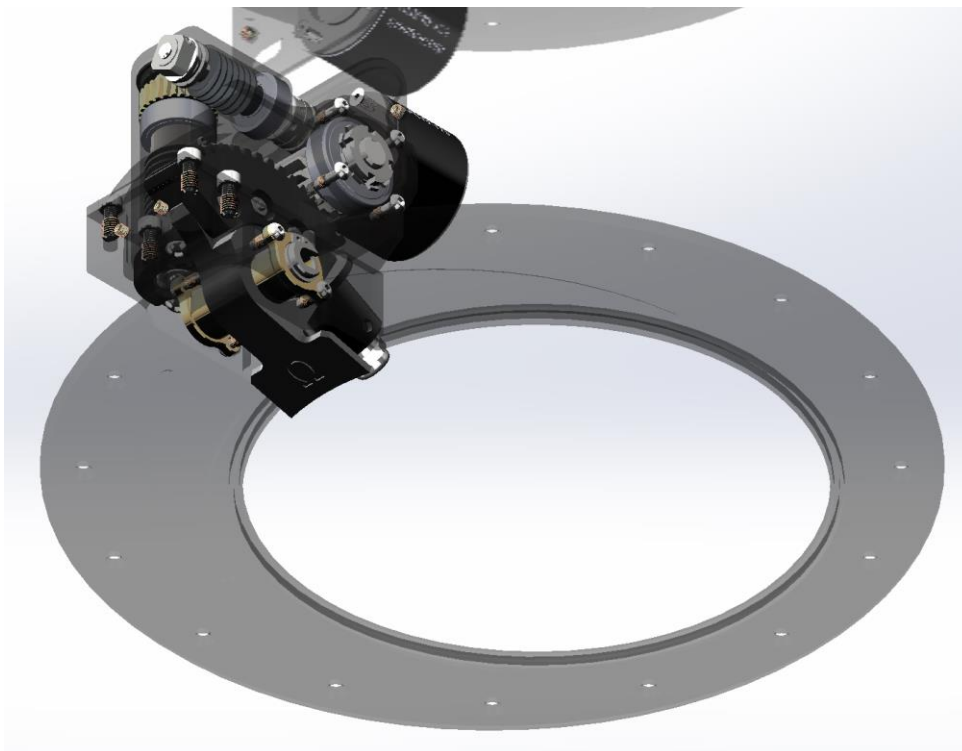
Na základě výše uvedených požadavků a zvolených převodových stupňů jsem navrhl řešení převodovky se všemi hřídeli, potřebnými ložisky, uložením, krytováním a spojovacím materiálem. Návrh byl vypracován s ohledem na pozici a velikost výklopné části světlometu (hlavy s LED čipy a čočkami) v programu SolidWorks.



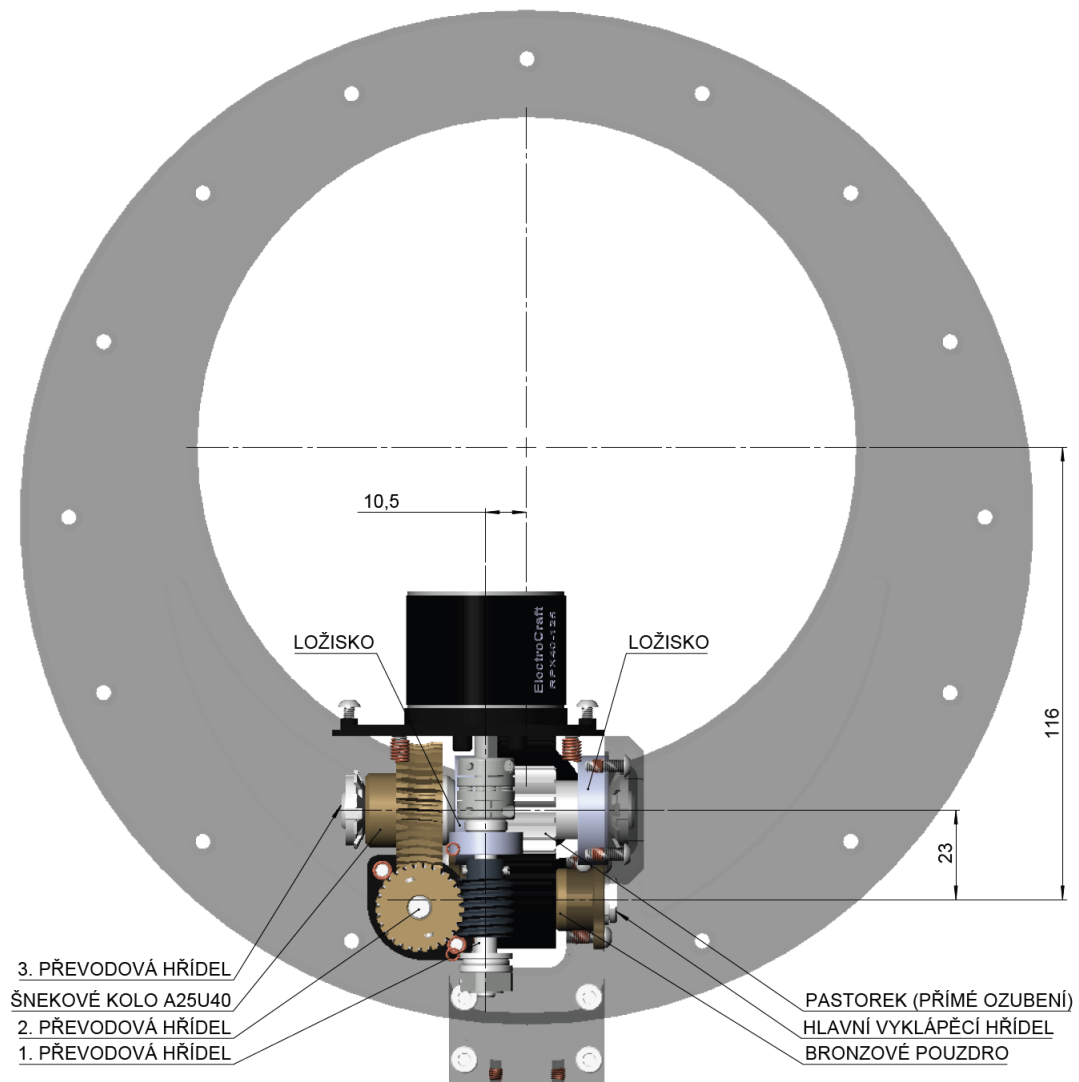
Obrázek 27: Pohled na kompletní mechanickou podsestavu



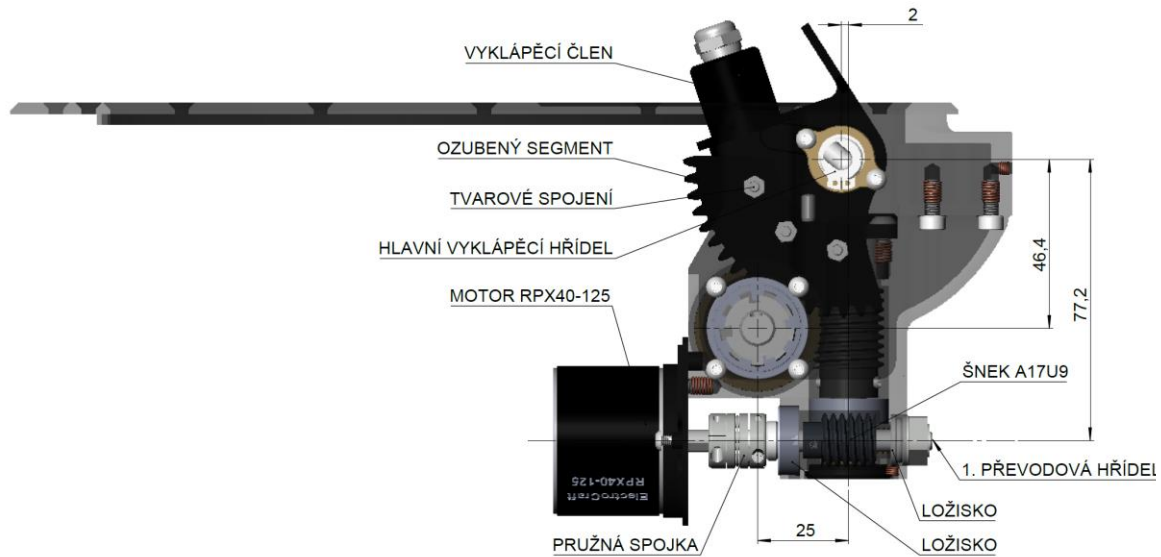
Obrázek 28: Pohled na mechanickou podsestavu s popisem



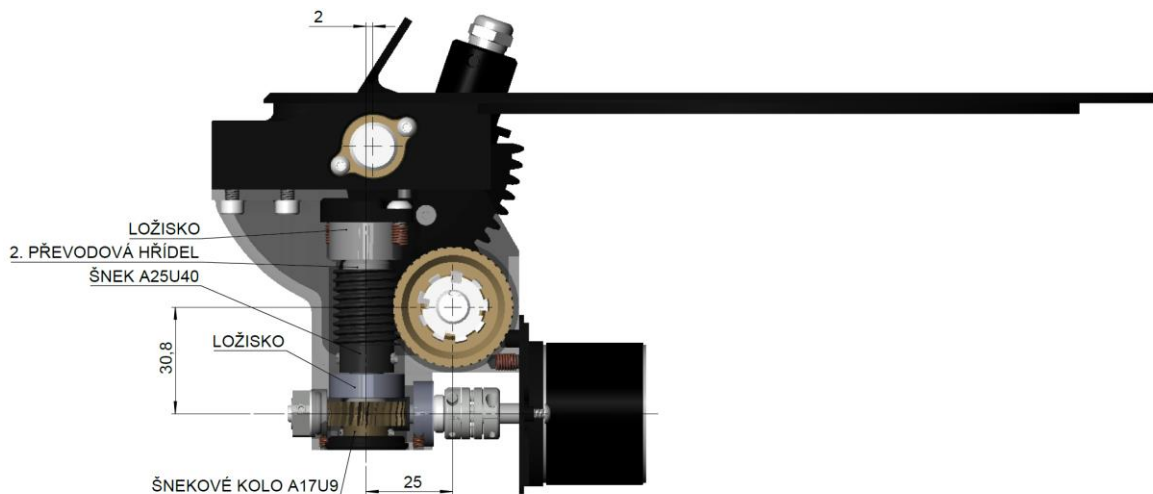
Obrázek 29: Pohled na mechanickou podsestavu zespodu



Obrázek 30: Schématický pohled na mechanickou podsestavu shora



Obrázek 31: Schématický pohled na mechanickou podsestavu zprava



Obrázek 32: Schématický pohled na mechanickou podsestavu zleva

4.3.1 Vyvozené síly od převodových stupňů

Pro návrh a pevnostní kontrolu potřebných hřídelí je třeba zjistit jaké síly vznikají od zvoleného ozubení na jednotlivých převodových stupních při požadovaném točivém, respektive závěsovém, momentu. U šnekových převodů vznikají tangenciální, radiální i axiální síly. U 3. převodového stupně, který tvoří přímé ozubení se objevují pouze tangenciální a radiální síly.

	Šnek A17U9	Kolo A17U9	Šnek A25U40	Kolo A25U40
Tečný průměr - $d_w [mm]$	13,4	20,6	17,96	32,04
Vnější průměr - $d_a [mm]$	14,9	22,7	19,56	34,8
Šírka ozubení - $b [mm]$	15	7	22	12
Kroutící moment - $M_k [Nmm]$	$M_{k_1} = 71$	$M_{k_2} = 430$	$M_{k_2} = 430$	$M_{k_3} = 5\,750$
Převodové číslo - $i [-]$	9		40	
Účinnost - $\eta [-]$	0,71		0,35	
Stoupání šroubovice - $\gamma_s [^\circ]$	9,75		2,55	
Třecí úhel - $\varphi' [^\circ]$	4,21		5,099	
Rychlost otáčení - $w_o [ot/min]$	2400	266,67	266,67	6,67
Modul - $m [-]$	0,75		0,8	
Úhel profilu - $\alpha_n [^\circ]$	15			

Tabulka 8: Charakteristika šnekových převodů

1. Převodový stupeň – SÍLY na soukolí A17U9

 ○ **Tečné síly**

$$F_{t_{\text{šnek}U9}} = \frac{2 \cdot M_{k_1}}{d_{w_{\text{šnek}U9}}}$$

$$F_{t_{\text{šnek}U9}} = \frac{2 \cdot 71}{13,4} = 10,59N$$

$$F_{t_{koloU9}} = \frac{2 \cdot M_{k2}}{d_{wkoloU9}}$$

$$F_{t_{koloU9}} = \frac{2 \cdot 430}{20,6} = 41,75N$$

○ **Axiální síly**

$$F_{a_{\text{šnek}U9}} = \frac{F_{t_{\text{šnek}U9}}}{\tan(\gamma_{sU9} + \varphi'_{U9})}$$

$$F_{a_{\text{šnek}U9}} = \frac{10,59}{\tan(9,75^\circ + 4,21^\circ)} = 42,6N$$

$$F_{a_{koloU9}} = F_{t_{koloU9}} \cdot \tan(\gamma_{sU9} + \varphi'_{U9})$$

$$F_{a_{koloU9}} = 41,75 \cdot \tan(9,75^\circ + 4,21^\circ) = 10,38N$$

○ **Radiální síly**

$$F_{r_{U9}} = \frac{F_{t_{\text{šnek}U9}} \cdot \tan(\alpha_n)}{\sin(\gamma_{sU9}) + \cos(\gamma_{sU9}) \cdot \tan(\varphi'_{U9})}$$

$$F_{r_{U9}} = \frac{10,59 \cdot \tan(15)}{\sin(9,75^\circ) + \cos(9,75^\circ) \cdot \tan(4,21^\circ)} = 11,73N$$

2. Převodový stupeň – SÍLY na soukolí A25U40

○ **Tečné síly**

$$F_{t_{\text{šnek}U40}} = \frac{2 \cdot M_{k2}}{d_{w_{\text{šnek}U40}}}$$

$$F_{t_{\text{šnek}U40}} = \frac{2 \cdot 430}{17,96} = 47,88N$$

$$F_{t_{koloU40}} = \frac{2 \cdot M_{k3}}{d_{W_{koloU40}}}$$

$$F_{t_{koloU40}} = \frac{2 \cdot 5\,750}{32,04} = 358,92N$$

○ **Axiální síly**

$$F_{a_{šnekU40}} = \frac{F_{t_{šnekU40}}}{\tan(\gamma_{sU40} + \varphi'_{U40})}$$

$$F_{a_{šnekU40}} = \frac{47,88}{\tan(2,55^\circ + 5,099^\circ)} = 356,52N$$

$$F_{a_{koloU40}} = F_{t_{koloU40}} \cdot \tan(\gamma_{sU40} + \varphi'_{U40})$$

$$F_{a_{koloU40}} = 358,92 \cdot \tan(2,55^\circ + 5,099^\circ) = 48,15N$$

○ **Radiální síly**

$$F_{r_{U40}} = \frac{F_{t_{šnekU40}} \cdot \tan(\alpha_n)}{\sin(\gamma_{sU40}) + \cos(\gamma_{sU40}) \cdot \tan(\varphi'_{U40})}$$

$$F_{r_{U9}} = \frac{47,88 \cdot \tan(15)}{\sin(2,55^\circ) + \cos(2,55^\circ) \cdot \tan(5,099^\circ)} = 96N$$

3. Převodový stupeň – SÍLY na pastorku a ozubeném segmentu

	Pastorek – SSGS1,5-13	Ozubené kolo (segment) – SSG1,5-56
Tečný průměr - d_w [mm]	19,5	84
Úhel profilu - α_n [°]	20	
Počet zubů - n [-]	13	56
Modul – m [-]	1,5	
Převodové číslo - i [-]	4,31	
Kroutící moment - M_k [Nm]	Vstup: $M_{k_3} = 5\,750$	Výstup: $M_{k_{max}} = 23\,000$

Tabulka 9: Charakteristika čelního ozubení

○ **Tečné síly**

$$F_{t_{\text{přímé}}} = \frac{2 \cdot M_{k_3}}{d_{w_{\text{pastorek}}}}$$

$$F_{t_{\text{přímé}}} = \frac{2 \cdot 5\,750}{19,5} = 589,74\text{N}$$

○ **Axiální síly**

Zvolené ozubení je přímé, negeneruje tedy žádnou axiální sílu, na kterou by bylo třeba hřídel kontrolovat, či pojistit vůči axiálnímu posunu.

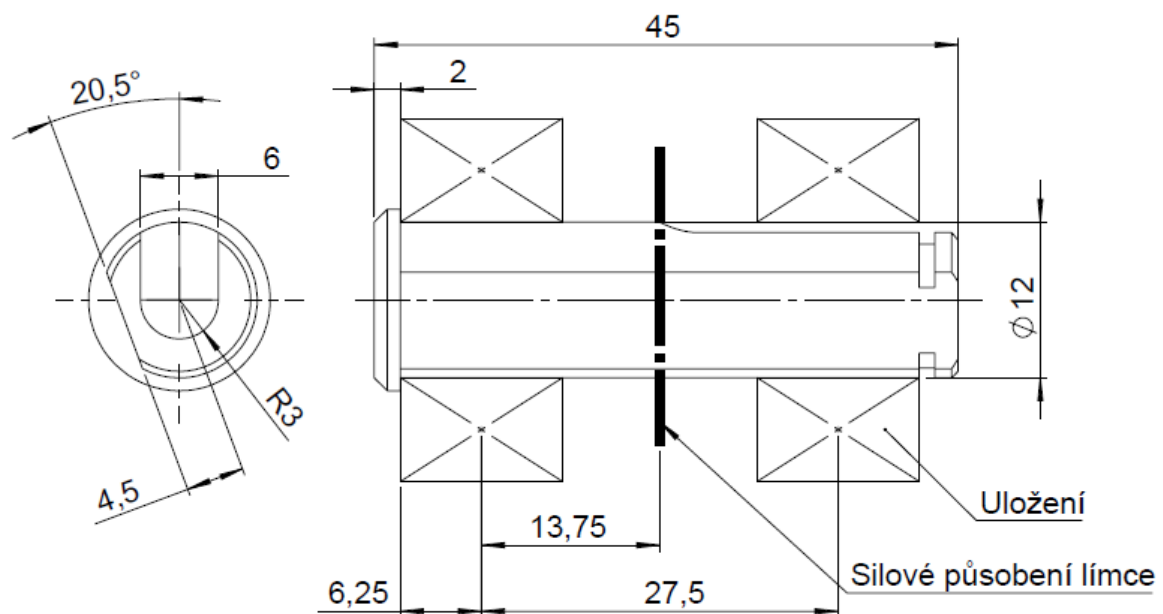
○ **Radiální síly**

$$F_{r_{\text{přímé}}} = F_{t_{\text{přímé}}} \cdot \tan(\alpha_n)$$

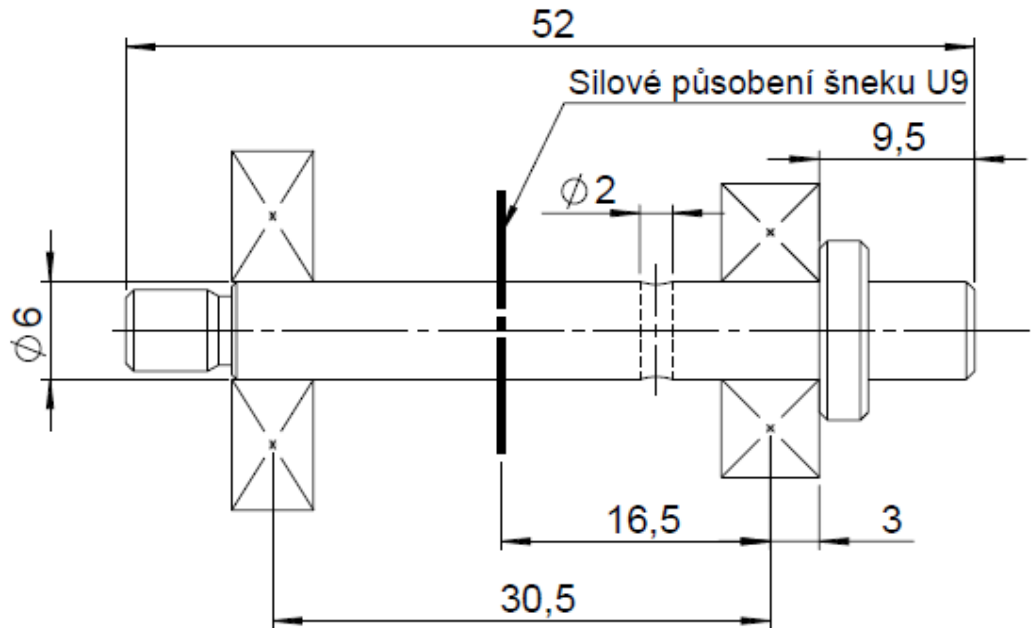
$$F_{r_{\text{přímé}}} = 589,74 \cdot \tan(20^\circ) = 214,65\text{N}$$

4.3.2 Hřídele a silová rozložení

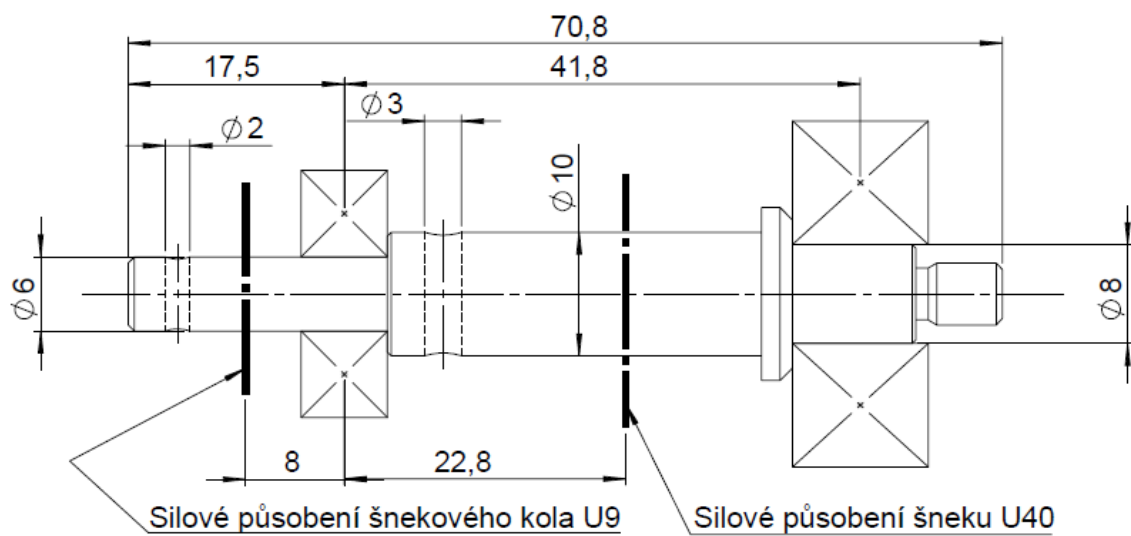
Pro bližší popis návrhu hřídelí v této kapitole připojuji náhradní schémata staticky určitých nosníků s pozicí působíšť sil a zjednodušených výkresových pohledů se základními rozměry jednotlivých hřídelí pro přesné určení ohybových momentů a reakcí v uložení (ložiscích) tak, aby bylo následně možné provést jejich pevnostní kontrolu a kontrolu životnosti zvolených ložisek. Stanovení reakcí provádím pomocí jednoduchých analytických mechanických výpočtů, které předpokládají výslednici sil vždy veprostřed šířky ozubení/ložiska.



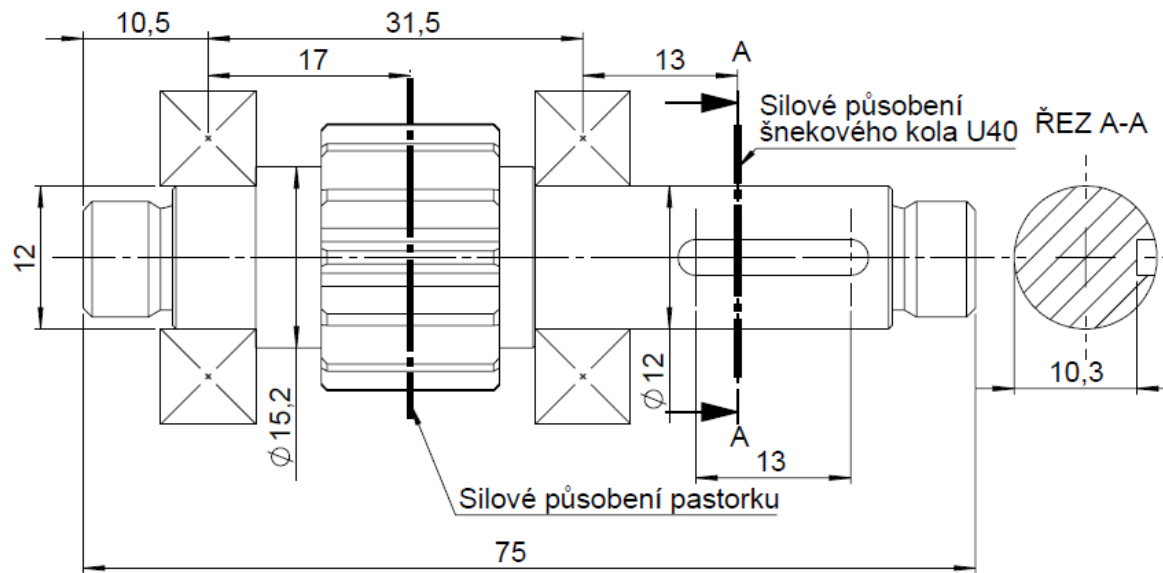
Obrázek 33: Hlavní osa vyklápění



Obrázek 34: 1. Převodová hřídel

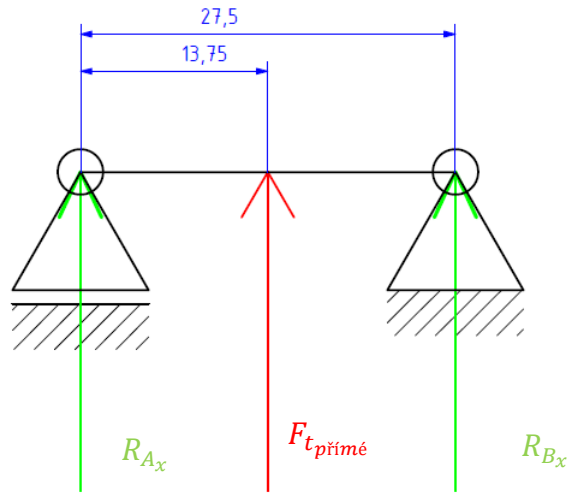


Obrázek 35: 2. Převodová hřídel

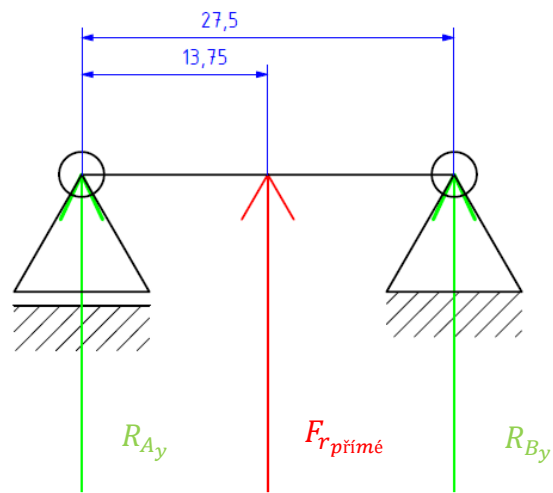


Obrázek 36: 3. Převodová hřídel

- *Náhradní schéma Hlavní osy vyklápění*

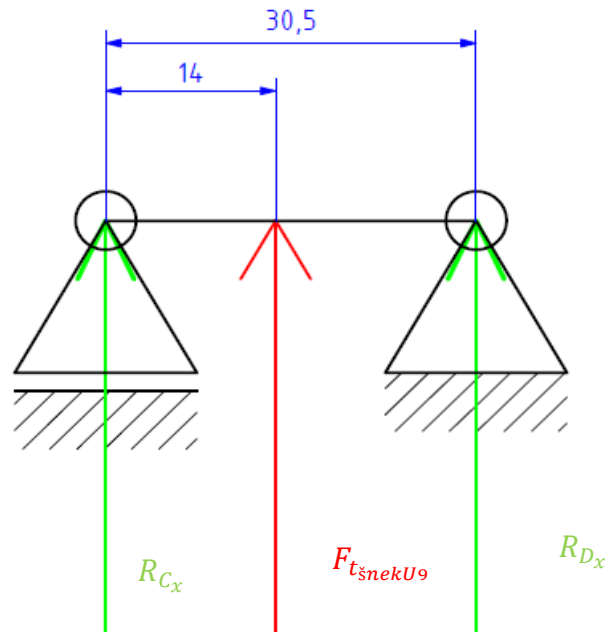


Obrázek 37: Schéma Hlavní osy vyklápění v rovině xz

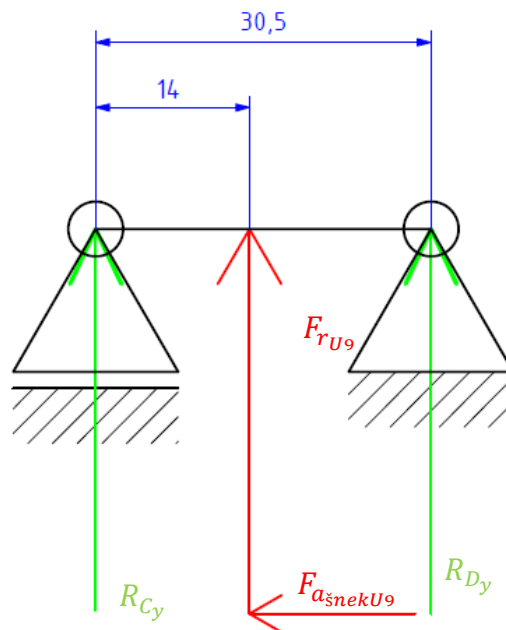


Obrázek 38: Schéma Hlavní osy vyklápění v rovině yz

- Náhradní schéma 1. Převodové hřídele

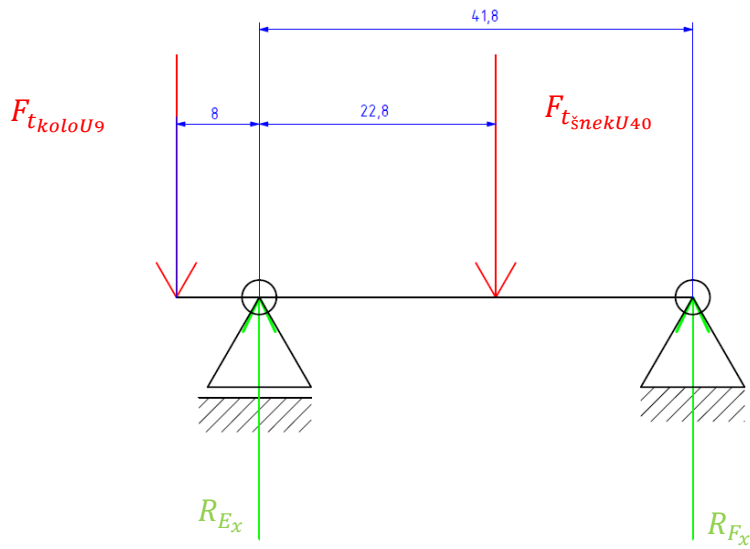


Obrázek 39: Schéma 1. Převodové hřídele v rovině xz

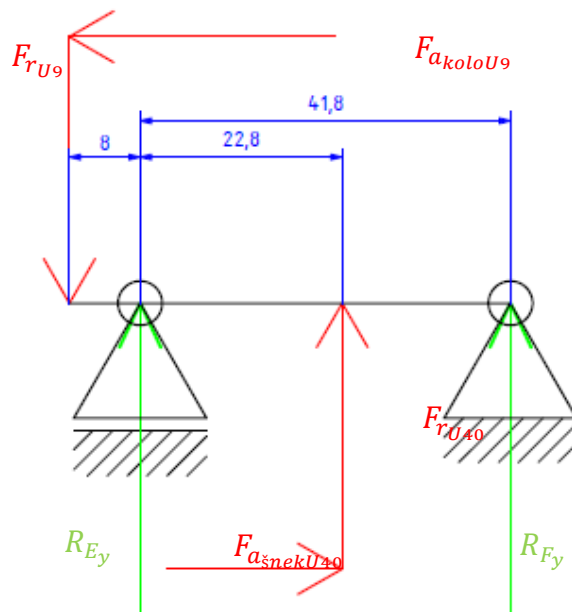


Obrázek 40: Schéma 1. Převodové hřídele v rovině yz

• Náhradní schéma 2. Převodové hřídele

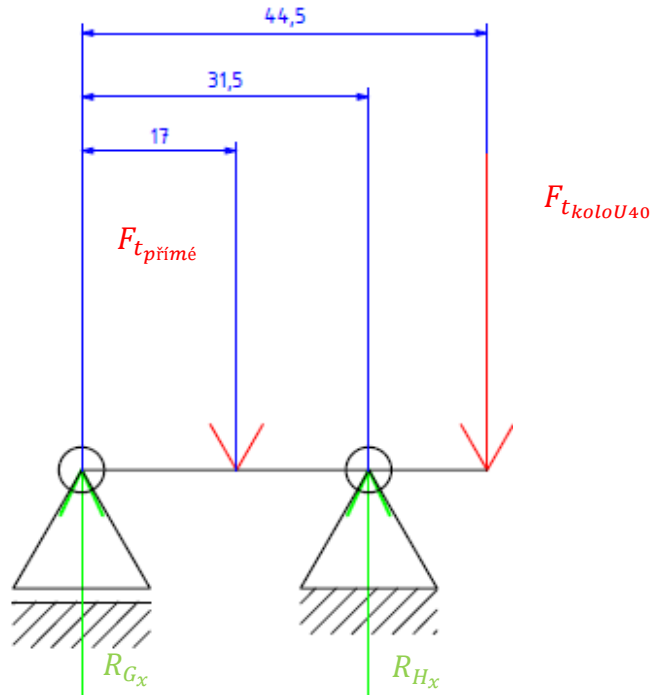


Obrázek 41: Schéma 2. Převodové hřídele v rovině xz

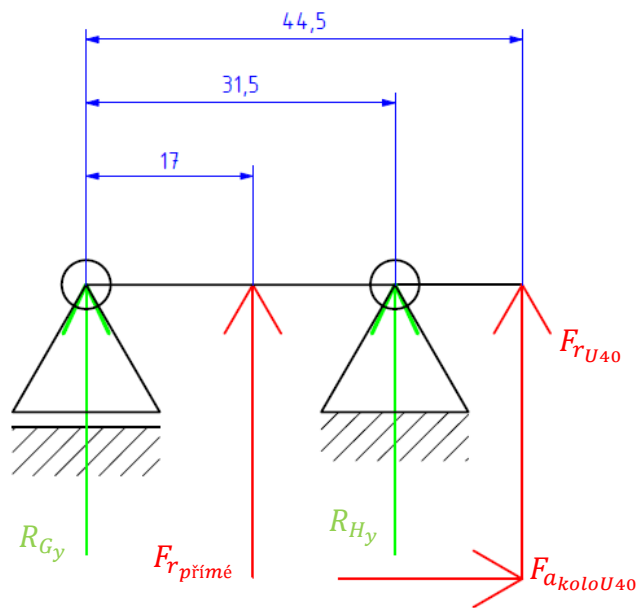


Obrázek 42: Schéma 2. Převodové hřídele v rovině yz

- Náhradní schéma 3. Převodové hřídele



Obrázek 43: Schéma 3. Převodové hřídele v rovině xz



Obrázek 44: Schéma 3. Převodové hřídele v rovině yz

○ **Rovnice pro rovinu xz**

$$R_{Ax} + F_{t_{přímé}} + R_{Bx} = 0$$

$$F_{t_{přímé}} \cdot 0,01375 + R_{Bx} \cdot 0,0275 = 0$$

$$R_{Cx} + F_{t_{šnekU9}} + R_{Dx} = 0$$

$$F_{t_{šnekU9}} \cdot 0,014 + R_{Dx} \cdot 0,0305 = 0$$

$$R_{Ex} + R_{Fx} - F_{t_{koloU9}} - F_{t_{šnekU40}} = 0$$

$$R_{Fx} \cdot 0,0418 + F_{t_{koloU9}} \cdot 0,008 - F_{t_{šnekU40}} \cdot 0,0228 = 0$$

$$R_{Gx} + R_{Hx} - F_{t_{přímé}} - F_{t_{koloU40}} = 0$$

$$F_{t_{přímé}} \cdot 0,0145 - R_{Gx} \cdot 0,0315 - F_{t_{koloU40}} \cdot 0,013 = 0$$

○ **Rovnice pro rovinu yz**

$$R_{Ay} + F_{r_{přímé}} + R_{By} = 0$$

$$F_{r_{přímé}} \cdot 0,01375 + R_{By} \cdot 0,0275 = 0$$

$$R_{Cy} + F_{r_{U9}} + R_{Dy} = 0$$

$$F_{r_{U9}} \cdot 0,014 + R_{Dy} \cdot 0,0305 - F_{a_{šnekU9}} \cdot \frac{d_{w_{šnekU9}}}{2} = 0$$

$$R_{Ey} + R_{Fy} - F_{r_{U9}} + F_{r_{U40}} = 0$$

$$R_{Fy} \cdot 0,0418 + F_{r_{U9}} \cdot 0,008 + F_{r_{U40}} \cdot 0,0228 + F_{a_{koloU9}} \cdot \frac{d_{w_{koloU9}}}{2} + F_{a_{šnekU40}} \cdot \frac{d_{w_{šnekU40}}}{2} = 0$$

$$R_{Gy} + R_{Hy} + F_{r_{přímé}} + F_{r_{U40}} = 0$$

$$F_{r_{U40}} \cdot 0,013 + F_{a_{koloU40}} \cdot \frac{d_{w_{koloU40}}}{2} - F_{r_{přímé}} \cdot 0,0145 - R_{Gy} \cdot 0,0315 = 0$$



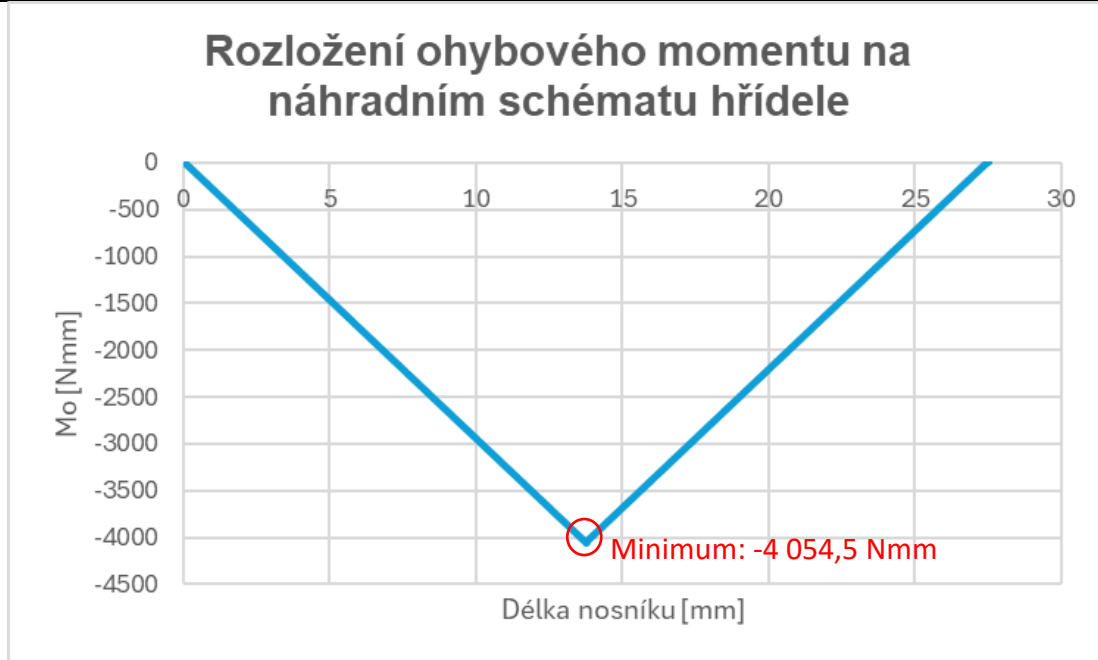
-FR_U9*0.014+FA_snekU9*dW_snekU9
FR_U9-FR_U40
-FR_U9*0.008-FR_U40*0.0228-FA_snekU40*dW_snekU40-
FA_koloU9*dW_koloU9
-FR_prime-FR_U40
-FR_U40*0.013-FA_koloU40*dW_koloU40+FR_prime*0.0145];

X = Vektor_reakci\Vektor_pravych_stran;

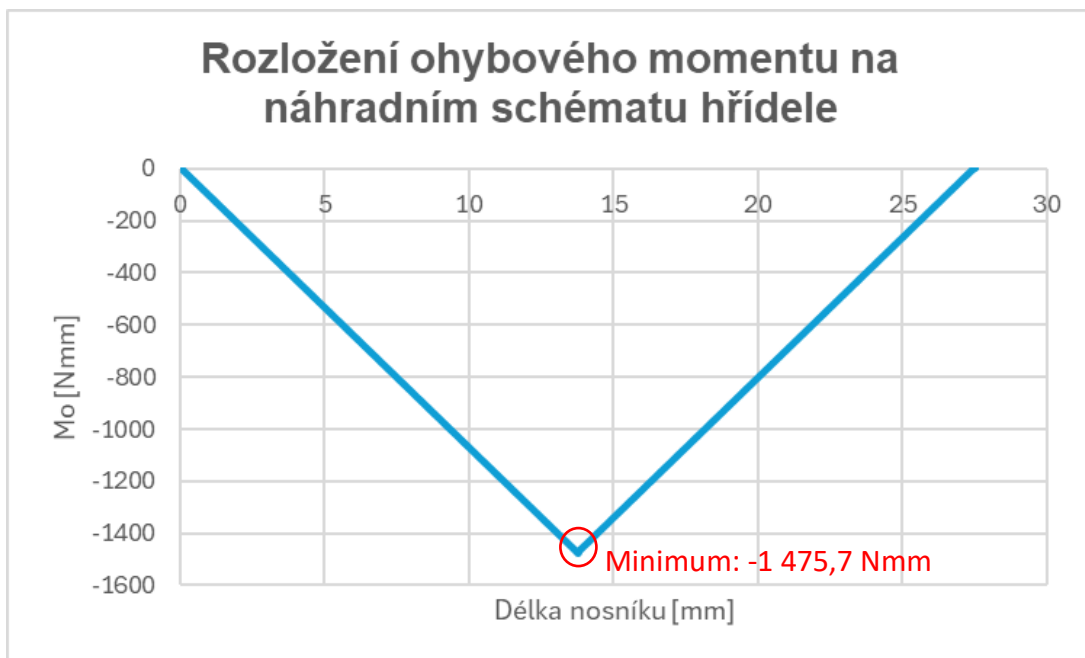
R_A_xy = [X(1),X(2)]
R_B_xy = [X(3),X(4)]
R_C_xy = [X(5),X(6)]
R_D_xy = [X(7),X(8)]
R_E_xy = [X(9),X(10)]
R_F_xy = [X(11),X(12)]
R_G_xy = [X(13),X(14)]
R_H_xy = [X(15),X(16)]

REAKCE	VELIKOST [N]
R_{Ax}	-294.87
R_{Ay}	-107.325
R_{Bx}	-294.87
R_{By}	-107.325
R_{Cx}	-5.728
R_{Cy}	-15.7
R_{Dx}	-4.86
R_{Dy}	3.97
R_{Ex}	71.5
R_{Ey}	49.51
R_{Fx}	18.13
R_{Fy}	-133.8
R_{Gx}	123.34
R_{Gy}	-34.7
R_{Hx}	825.32
R_{Hy}	-275.95

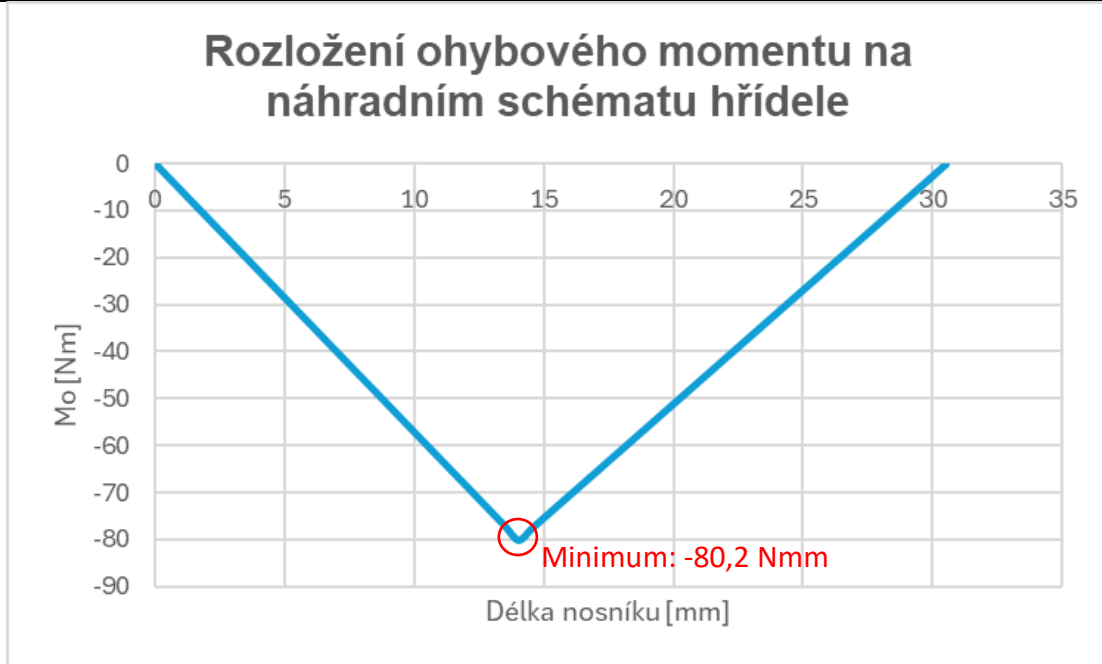
Tabulka 10: Hodnota reakcí v podporách (ložiscích) hřídelí



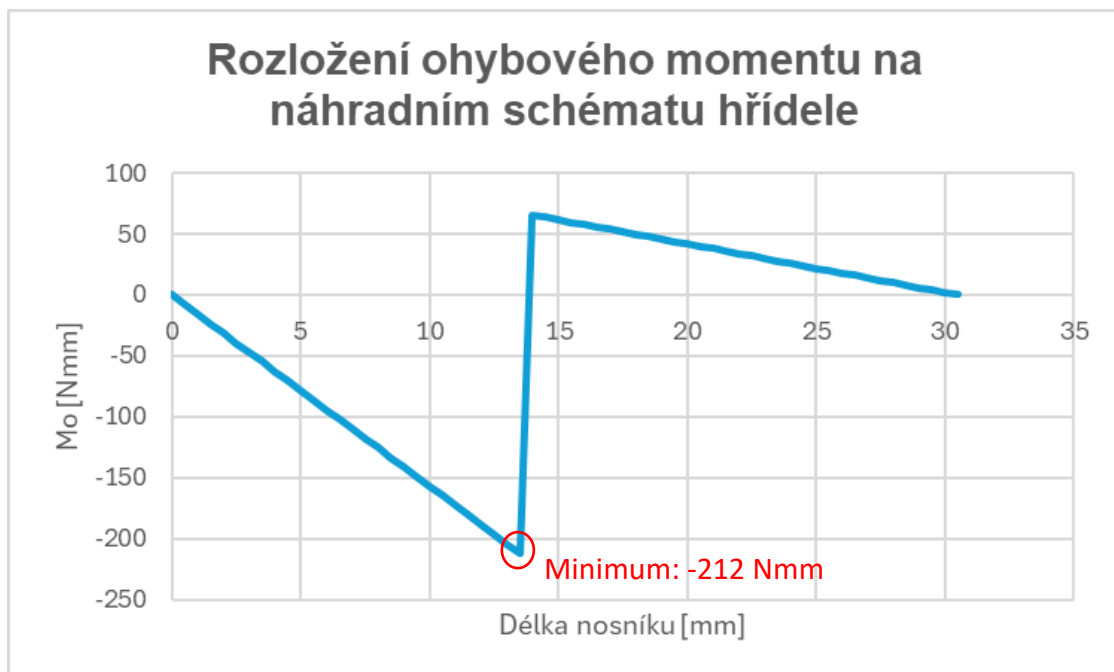
Graf 6: Rozložení ohybového momentu Hlavní osy vyklápění v rovině XZ



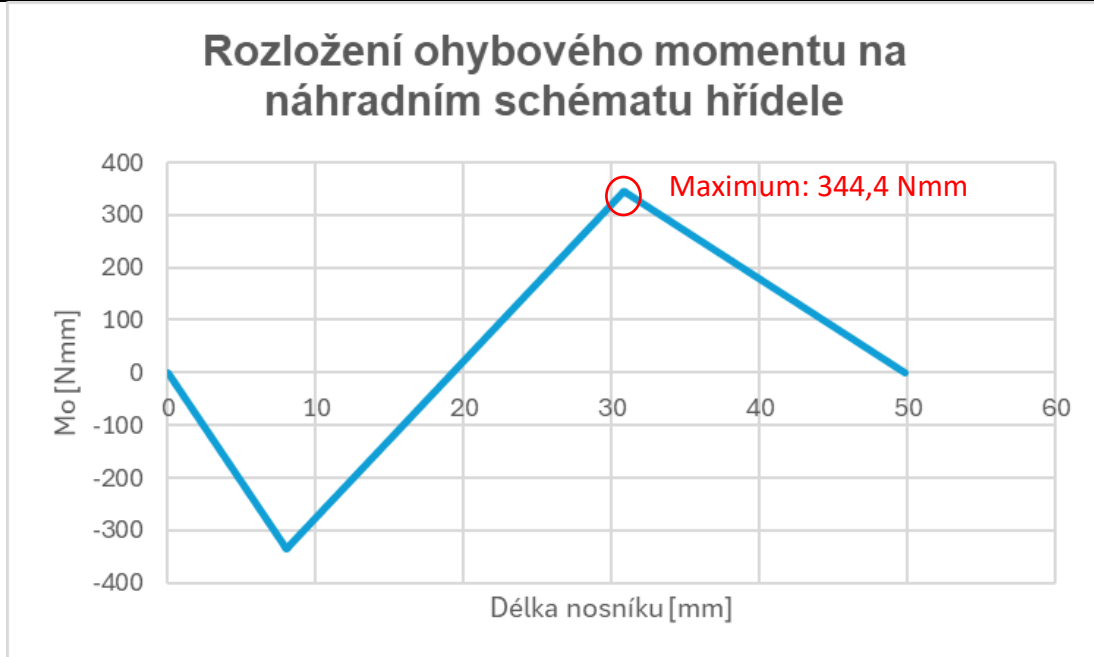
Graf 7: Rozložení ohybového momentu Hlavní osy vyklápění v rovině YZ



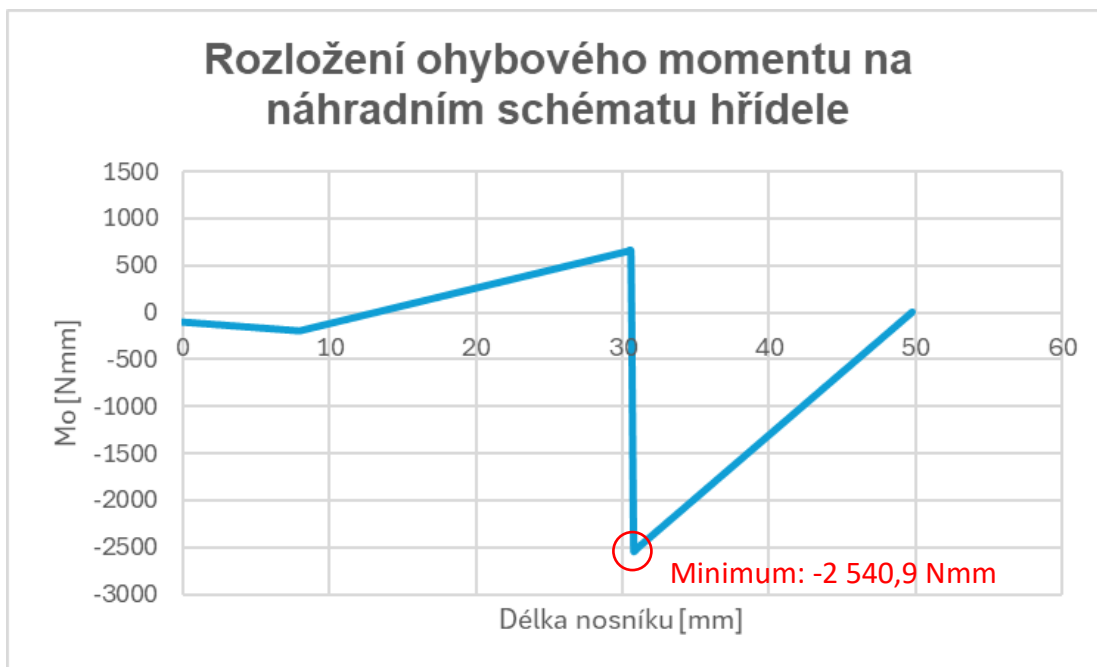
Graf 8: Rozložení ohybového momentu 1. Převodové hřídele v rovině XZ



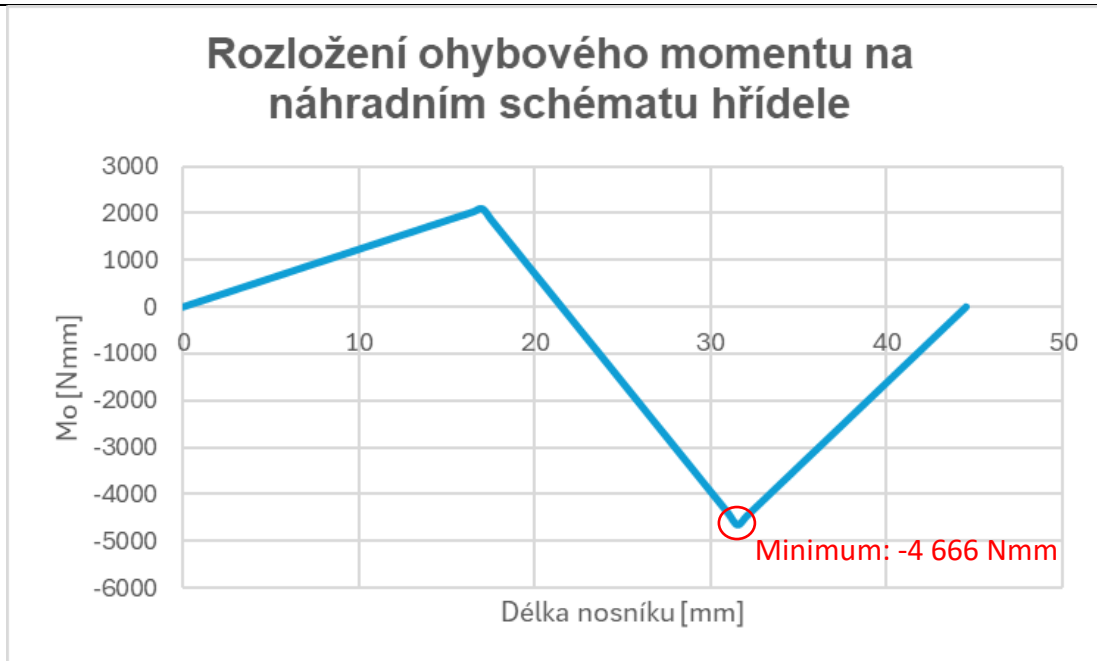
Graf 9: Rozložení ohybového momentu 1. Převodové hřídele v rovině YZ



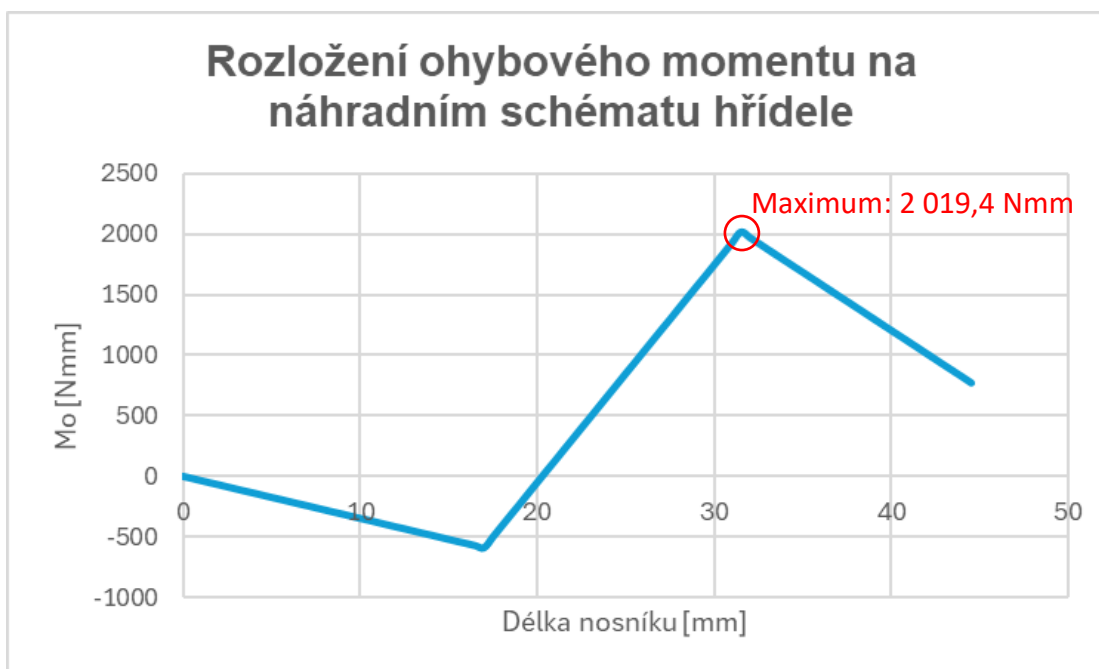
Graf 10: Rozložení ohybového momentu 2. Převodové hřídele v rovině XZ



Graf 11: Rozložení ohybového momentu 2. Převodové hřídele v rovině YZ



Graf 12: Rozložení ohybového momentu 3. Převodové hřídele v rovině XZ



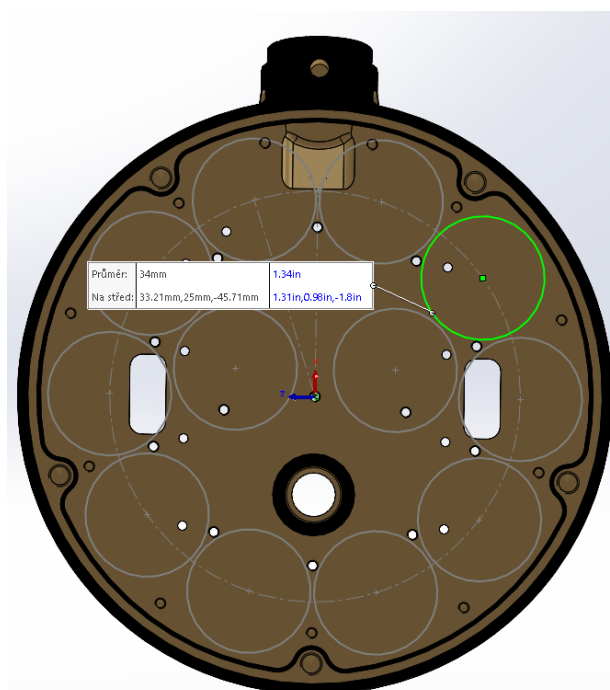
Graf 13: Rozložení ohybového momentu 3. Převodové hřídele v rovině YZ

4.4 Návrh optické sestavy

Základem je zvolit vhodnou kombinaci LED čipu a čočky. Jedná se o komplexní disciplínu, kterou nelze generálně popsat a vyžaduje jisté znalosti z praxe, kterým se věnují rozsáhlé publikace a předmětem této diplomové práce je přiblížit čtenáři uchopitelný přístup k řešení této problematiky.

4.4.1 Omezení, která jsou nutná respektovat

Primární omezení představuje tvar a velikost výklopné části světlometu – hlavy, který omezuje rozměry a počet kombinací LED čip + čočka. V tomto návrhu jsem optimalizoval tvar hlavy velikosti PAR46 tak, aby ji bylo možné náležitě utěsnit před vnějším prostředím a zároveň její komponenty nesnižovaly účinnost optické sestavy. Jelikož mi tento tvar vstupoval do CFD simulací (**Obrázek 23**: Vizualizace proudění – Izometrický pohled) a bral jsem ho jako vstup pro zatížení celého převodového systému, je tedy žádoucí, aby zůstal neměnný a aby nebylo nutné přepočítávat veškerá zatížení. Důvody pro zvolení hlavy velikosti typu PAR46, i když původní světlomet byl typu PAR64, byly dva: za 1. lze demonstrovat diametrálně vyšší účinnost LED světél oproti obyčejným žárovkám a za 2. se jedná o hlavu menšího průřezu – menší odporové síly vzduchu, menší rozrušení proudnic konce křídla.



Obrázek 45: Optimalizovaný maximální rozměr čoček a jejich rozložení

Jako maximální rozměr použitelných čoček s rozumným rozložením a počtem byl zvolen průměr 34 mm a 12 kusů. Je vhodné volit sudý počet LED čipů, aby bylo možné rovnoměrně rozložit proudovou zátěž jednotlivých LED čipů v napájecí elektronice.

4.4.2 Volba čoček

Zvolit vhodné čočky s vhodnou kombinací LED čipů je často iterativní proces, který nelze jednoduše automatizovat. Z hlediska dispozic optiky je vhodné volit co možná největší čočky, které dokážou usměrnit více světla než ty malé.

Jako materiál je zde v dominantním zastoupení plast PMMA, nebo sklo s vysokou optickou čistotou. Jelikož se však jedná o letecký světlomet, je nežádoucí z hlediska vysoké měrné hmotnosti používat skleněné čočky (dvojnásobně vyšší hmotnost) oproti PMMA. Materiál čoček tedy volím PMMA, která poskytuje potřebné parametry při zachování nízké hmotnosti.

Vždy je žádoucí volit čočky již vyrobené s detailním popisem – například formou IES grafů, hodnot maximálních intenzit a FWTM, které jsou referenčně vztažené ke konkrétnímu LED čipu.

Mnou zvoleným parametrům vyhovují například čočky **LEDiL C16671_OLGA-RS**, které mají i s držákem průměr 31 mm a rozsah vyzařovaných úhlů vyhovuje požadavkům (4.1.5 – Požadavky na svícení).

LEDiL[®]
PRODUCT DATASHEET
C16671_OLGA-RS

OLGA-RS


~9° spot beam with flange. Optimized for high-power 3535 size LED packages.

SPECIFICATION:

Dimensions	Ø 29.7 mm
Height	18.4 mm
ROHS compliant	yes

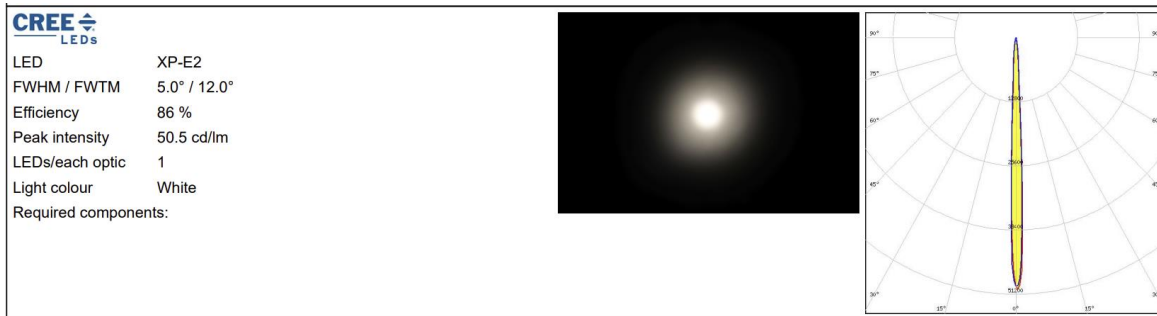
MATERIALS:

Component	Type	Material	Colour	Finish
OLGA-RS	Single lens	PMMA	clear	



Obrázek 46: LEDiL C16671_OLGA-RS (18)

Jako nejvýkonnější kombinace z následujícího výčtu se jeví kombinace s LED čipem CREE XP-E2, kde získáváme:



Obrázek 47: LEDiL OLGA-RS + CREE XP-E2 (18)

Můžeme provést orientační výpočet maximální intenzity sady čoček, který předpokládá dokonalé podmínky – 100% účinnost napájecí elektroniky, teploty v požadovaném rozsahu a opticky dokonalé prostředí za výstupem z čočky:

- Minimální světelný tok LED čipu CREE XP-E2 při protékajícím proudu $I_F = 1A$ (jedná se maximální použitelný proud pro tuto LED) a chromatičnosti 5700 K (19):

$$\Phi_{\lambda_{XP-E2}} = 340lm$$

- Orientační výpočet maximální intenzity (svítivosti) pro všechny čočky:

$$I_{max_{XP-E2+OLGA}} = \Phi_{\lambda_{XP-E2}} \cdot \text{počet kombinací} \cdot \frac{I_{peak}}{lm_{XP-E2+OLGA}}$$

$$I_{max_{XP-E2+OLGA}} = 340 \cdot 12 \cdot 50,5 = 206\,040cd$$

Jelikož je $I_{max_{XP-E2+OLGA}} < I_{max_{požadované}} = 600\,000cd$ (4.1.5), tak ani tato nejvýkonnější varianta od výrobce LEDiL není vhodná pro mou aplikaci. **Rozhodl jsem se tedy navrhnout vlastní čočku v návrhovém prostředí Ansys Speos.**

4.4.3 Volba LED čipu

Pro návrh čočky je třeba nejprve vybrat vhodný LED čip. Pro volbu velikosti je ideální se inspirovat nabídkou trhu, z čehož v tomto případě vyplývá, že vybírám čipy o maximálním rozměru 3535. Dalším kontrolním parametrem je minimální světelný tok, který čip dokáže generovat při konkrétním napájecím proudu a napětí. Poslední hodnotou, která je pro mě v návrhu důležitá je chromatičnost daného čipu taková, aby vyhovovala aviatické bílé – popsáno v 4.1.5.

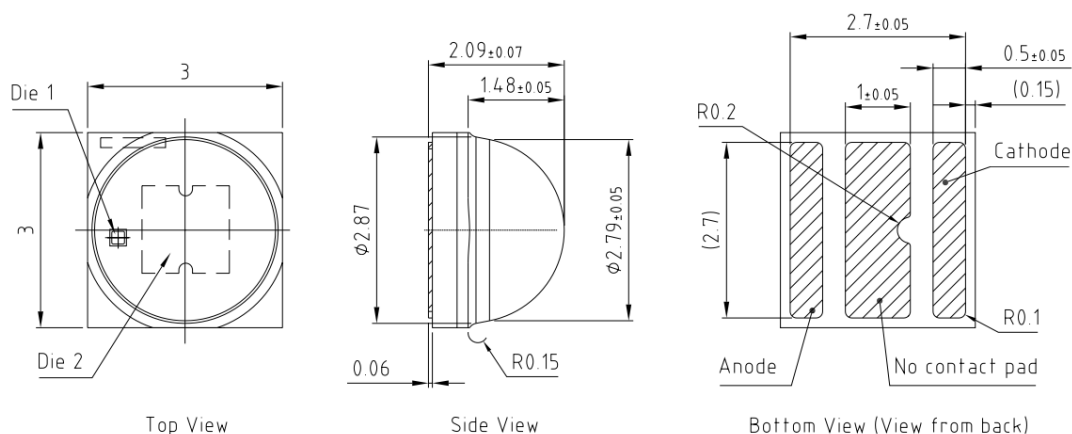
Výše lze vidět, že čip CREE XP-E2 nedosahoval dostatečných parametrů, a proto jsem se rozhodl zvolit výkonnější čip od společnosti OSRAM – **GW CSSRM3.PM-N9P2-XX53-1**. Tento čip disponuje parametry (20):

$$\Phi_{\lambda_{min}} = 360 \text{ lm} @ I_F = 700 \text{ mA}$$

Chromatičnost: 5 700K

Fakt, že tento čip dosahuje vyššího minimálního světelného toku při protékání menšího proudu, je podstatný z hlediska chlazení. Oba čipy jsou 3 V a čip od OSRAMu bude tedy generovat méně tepla při vyšších hodnotách světelného toku.

Dimensional Drawing ⁹⁾



C67062-A0160-A1-0.

Obrázek 48: OSRAM GW CSSRM3.PM (20)

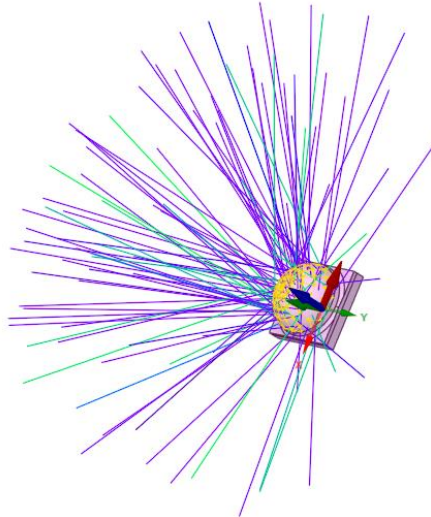
4.4.4 Návrh čočky

Ansys Speos disponuje výkonným nástrojem uzpůsobeným pro návrh čoček. Osram jako řada dalších renomovaných výrobců zpřístupňuje na svých webových stránkách takzvané „rayfily“ nabízených LED čipů, které jsou nezbytné pro provedení simulací a CAD data, která obsahují tvarové a rozměrové dispozice.

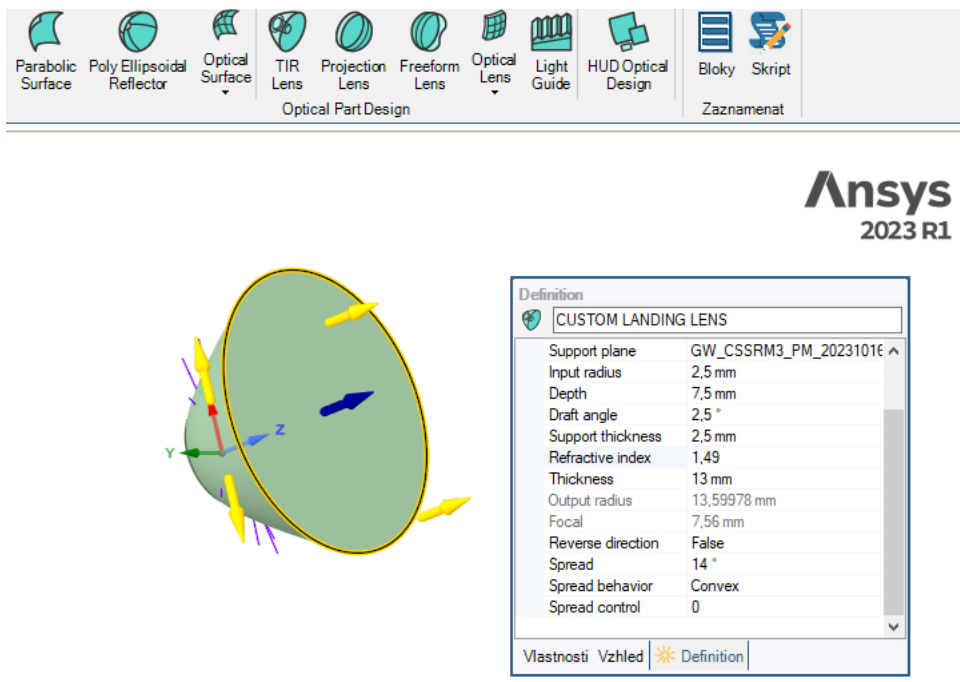
Rayfile popisuje způsob, jakým světlo opouští zdroj světla formou paprsku.

Čočku navrhují jako TIR. Návrh spočívá v pečlivém výběru parametrů, jako je její hloubka, tloušťka, poloměr na vstupu, vnitřní a vnější průměr, případně její konkávnost či konvexnost.

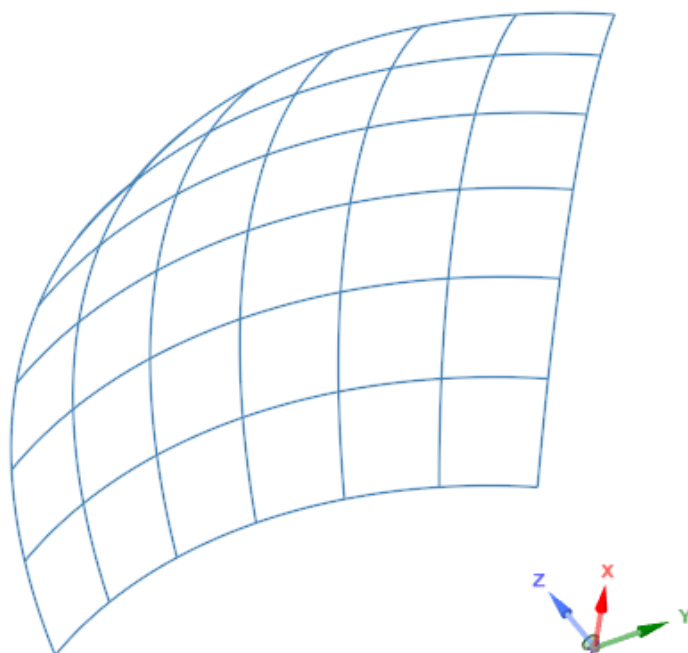
Při simulování je třeba vytvořit sensor intenzity umístěný před čočkou a vytvořit například několik čoček s rozdílnými parametry, které je třeba následně porovnávat. Výstupem každé simulace je maximální intenzita a FWTM.



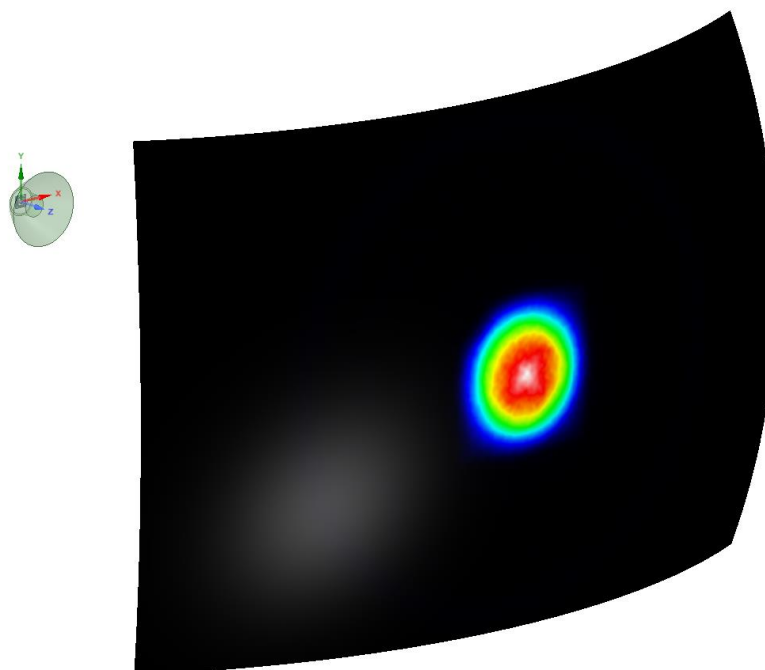
Obrázek 49: LED čip s importovaným "rayfilem"



Obrázek 50: Návrh čoček typu TIR – s nastavením proměnných parametrů



Obrázek 51: Příprava simulace se senzorem



Obrázek 52: Výsledná simulace s hledanými parametry

Výsledná čočka, která je zobrazena na **Obrázek 50** a **Obrázek 52** disponuje s voleným LED čipem parametry:

$$I_{max_{OSRAM+CUSTOM}} = 60\,700\,cd$$

$$FWTM = 16^\circ \times 18^\circ$$

Teoretická maximální intenzita světlometu:

$$I_{max_{teor}} = \text{počet kombinací} \cdot I_{max_{OSRAM+CUSTOM}}$$

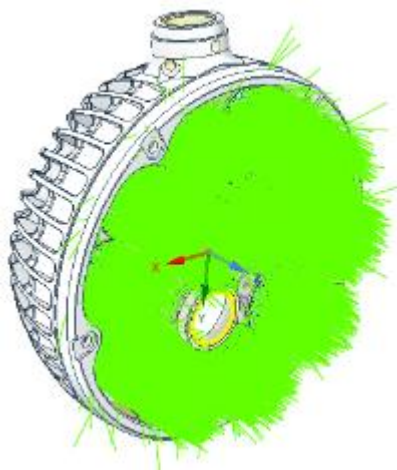
$$I_{max_{teor}} = 12 \cdot 68\,245 = 818\,940\,cd$$

$$I_{max_{teor}} > I_{max_{požadované}} \rightarrow \text{PLATÍ}$$

4.4.5 Návrh kompletního optického systému

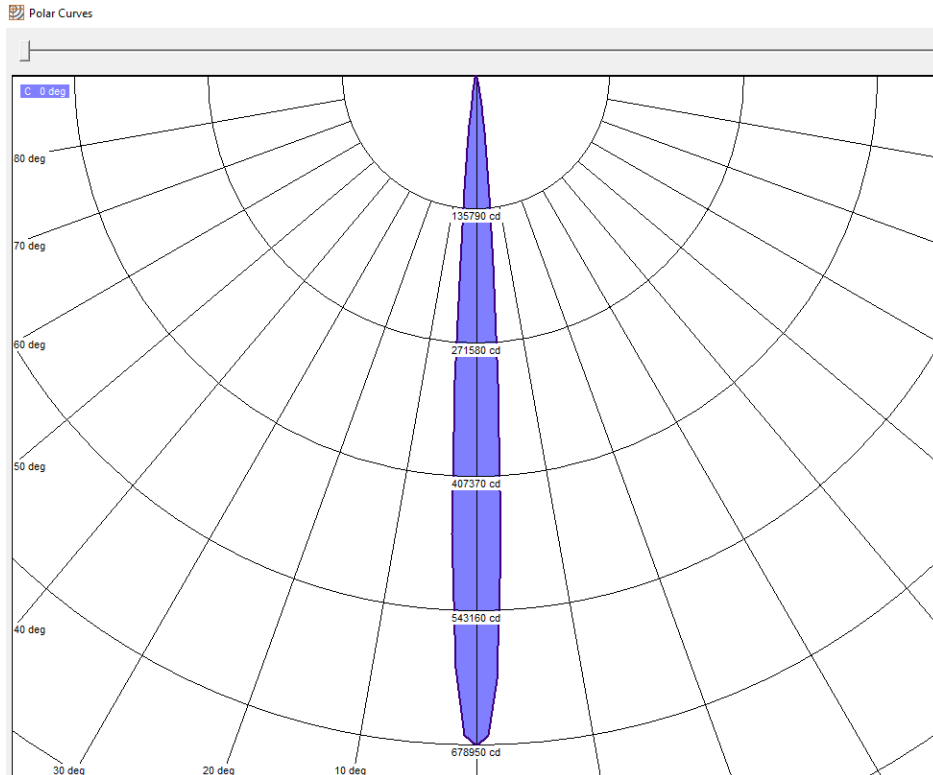
Poté co jsem navrhl ideální čočku a vybral k ní vhodný LED čip, je vhodné uskutečnit simulaci se všemi 12 kombinacemi LED + čočka a krycího skla, které je třeba volit opět z opticky čistého termoplastu – vysoká účinnost a nízká hmotnost. Jako krycí sklíčko celé sestavy byl zvolen polykarbonát s účinností $\eta_{poly} = 0,88$.

Simulace proběhla opět v prostředí Ansys Speos:

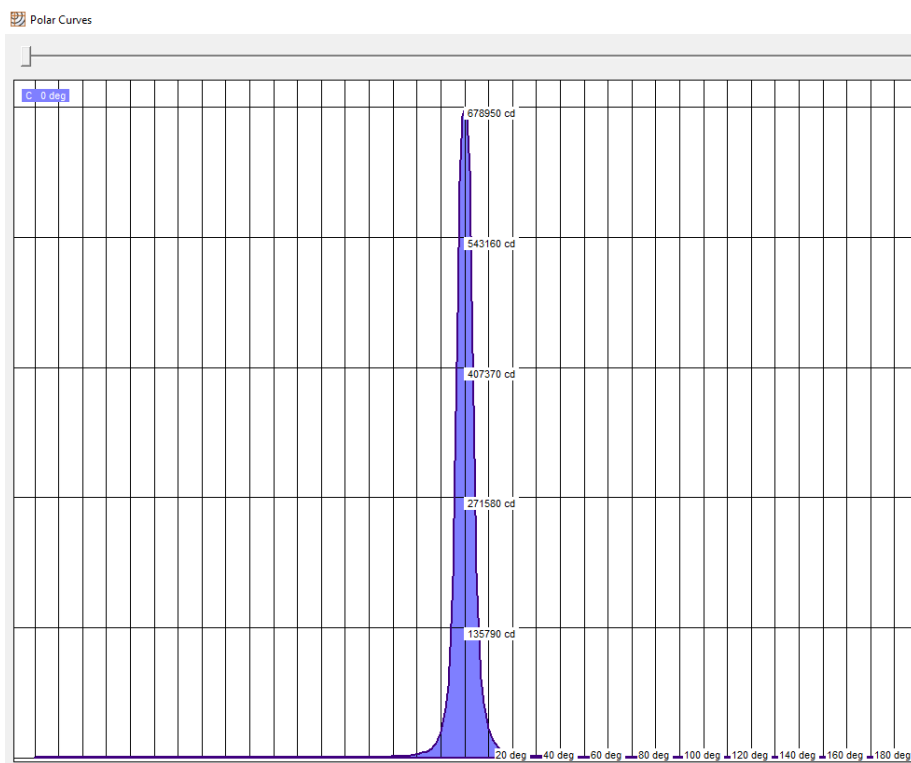


LED	OSRAM – GW CSSRM3.PM-N9P2-XX53-1
Proud	$I_F = 700mA$
Max. intenzita	$I_{max_{sim}} = 678\,950\,cd$
FWHM (@50 %)	8°
FWTM (@10 %)	14°

Tabulka 11: Výsledky ze simulace zdroje s navrženými čočkami



Graf 14: Rozložení intenzity simulovaného zdroje v polárních souřadnicích



Graf 15: Rozložení intenzity simulovaného zdroje v kartézských souřadnicích

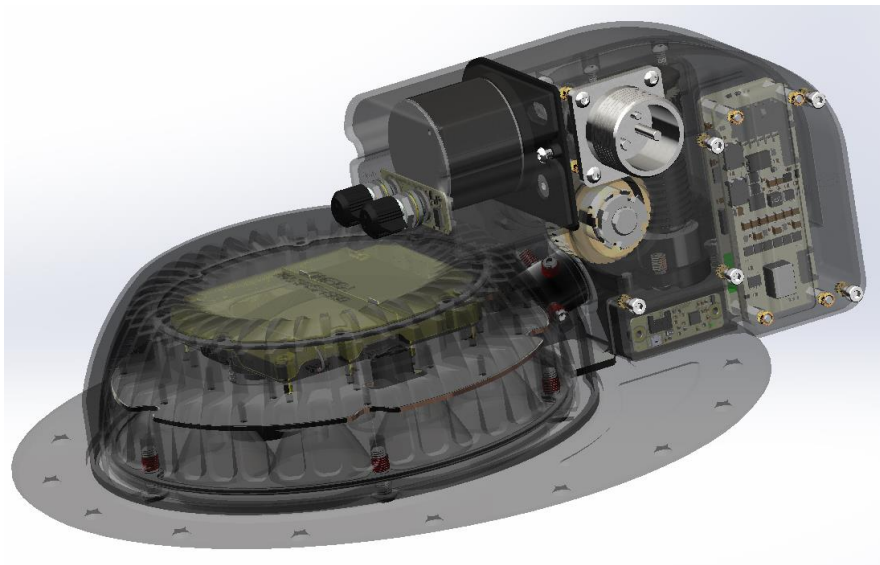
4.5 Finální koncepce světlometu

Po přípravě výklopného mechanismu a rozložení a velikosti optického systému je třeba vytvořit finální model světlometu.

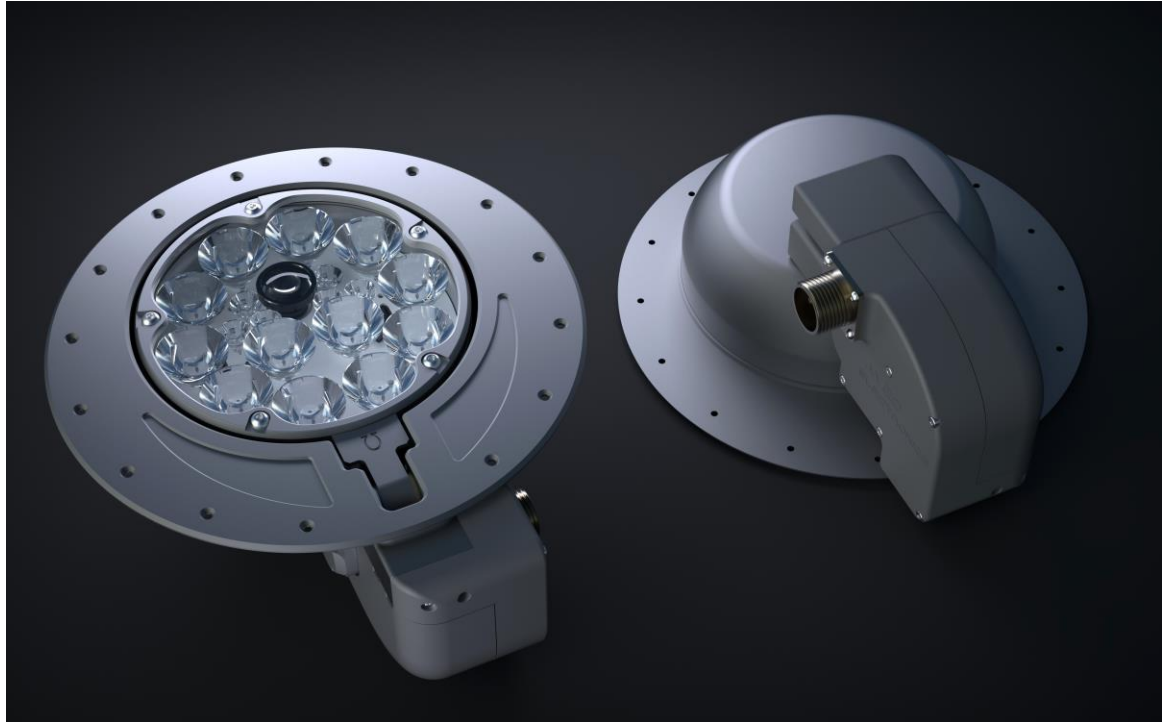
LED čipy jsou strojově pájené na desku s tištěnými spoji a ta je uložena společně řídicí a napájecí deskou s filtrem přímo ve výklopné části světlometu – tzv. hlavě. Výše jsem zmiňoval potřebu udržení limitních teplot na LED čípech potažmo řídicí elektronice – toho lze dosáhnout buď aktivním, nebo pasivním chlazením hlavy. Využívat zde aktivní chlazení, když je světlo operativní pouze za letu, a tudíž je vystaveno mase chladného vzduchu, je nežádoucí. Veškeré ventilátory či kompresory apod. mají vysokou hmotnost a generují nežádoucí EMI rušení, které je v přítomnosti antén rovněž nežádoucí. Proto je lampa z jednoho kusu obráběné eloxované hliníkové slitiny EN AW6082. Chlazení probíhá nejprve kondukcí mezi deskou s LED čipy a tělem, následně dochází ke konvekci mezi hliníkovým tělem a okolním prostředím – vzduchem. Je žádoucí zajistit co možná nejméně přestupů mezi díly (materiály).

Ve zbytku světlometu, v části, která je ukryta uvnitř profilu křídla, se nalézají ovládací deska motoru, deska rozdělující napětí ze vstupního konektoru, potřebná kabeláž, deska se selektory maximálního úhlu vyklopení a krytování, které musí náležitě utěsnit celý systém tak, aby odolal testům v solné komoře.

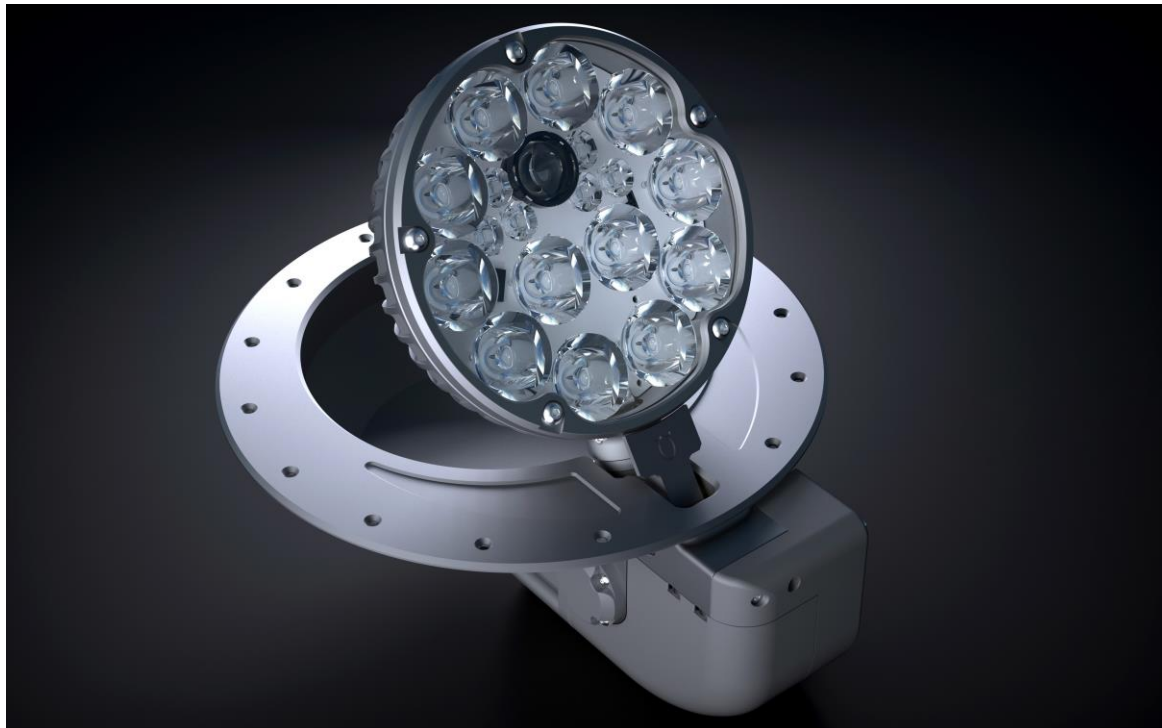
Rozměrové dispozice jsou předmětem 1. Přílohy – ICD výkres.



Obrázek 53: Transparentní pohled na osazení řídicí elektroniky



Obrázek 54: Finální koncepce světlometu



Obrázek 55: Finální koncepce světlometu – vyklapeno na 55°



Obrázek 56: Pohled na žebrování hlavy a ozubený segment



Obrázek 57: Světlo osazený na zemědělském letounu

5 Průkaz letové způsobilosti

Pro pevnostní kontroly bylo využito **početní zatížení** $M_{max} = 23 Nm$. Získaná napětí porovnávám s **mezí kluzu** zvoleného materiálu, potažmo s dovolenou hodnotou napětí (poniženou hodnotou meze kluzu dle adekvátních metodik výpočtu). Neprovádím tedy kontrolu napětí na provozním zatížení s důsledkem vyšší hmotnosti navrhované součásti. Důvodem je výběr normalizovaných spojovacích prvků a zejména použití nakupovaného ozubení, které mi definuje minimální průměry hřídelí, což má za důsledek snížení finanční náročnosti výsledného produktu.

Nestandardním přístupem k pevnostní kontrole sice zvýším hmotnost, avšak zvýším možnou variabilitu navržené konstrukce, která bude způsobilá pro provoz při použití lamp větších průřezů (PAR 64, případně atypické tvary) a snížím náročnost obrábění a počet dílů.

5.1 Pevnostní kontrola ozubení

Ozubení kontroluji na ohybová napětí a napětí v dotyku. Je klíčové kontrolovat napětí v dotyku zejména pro šnekové převody, kde dochází ke styku bronzových šnekových kol se šneky z tvrzených ocelí, protože v případě vysokých zatížení může docházet k pittingu.

Metodiku výpočtu volím dle skript *Projekt – III. Ročník – Doc. Ing. Otmar Kugl, CSc.*(21).

Pro celé převodové ústrojí uvažuji životnost 30 let provozu, kdy předpokládám, že se světlo vyklopí a zaklopí alespoň 6x denně.

$$L_h = \text{rok} \cdot \text{počet vyklopení} \cdot \text{dny} \cdot \text{rychlost vyklápění}$$

$$L_h = 30 \cdot 6 \cdot 365 \cdot \frac{10}{3600} \doteq 182,5 h$$

5.1.1 1. Převodový stupeň – šnekové soukolí A17U9

Vstupními parametry pro výpočet jsou hodnoty uvedené v **Tabulka 8:** Charakteristika šnekových převodů. Kde jsou popsány geometrie a zatížení šnekových ozubení. Dalšími potřebnými parametry jsou koeficienty popisující provoz, zatížení převodu a kombinace materiálů.

$Z_M = 210 \text{ MPa}^{1/2}$	$K_1 = 1$	$K_{H\alpha} = 0,74$	$K_{H\beta} = 1$	$K_v = 1$
-------------------------------	-----------	----------------------	------------------	-----------

Tabulka 12: Tabulka koeficientů pro kontrolu na dotyk šnekového ozubení (21)

- Upřesňující součinitel

$$K_{H1} = K_1 \cdot K_v \cdot K_{H\alpha} \cdot K_{H\beta}$$

$$K_{H1} = 1 \cdot 1 \cdot 0,74 \cdot 1 = 0,74$$

- Otáčky šnekového kola

$$n_{1,k} = \frac{n_m}{i_1}$$

$$n_{1,k} = \frac{2\,400}{9} = 266,67 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

- Ekvivalentní počet provozních cyklů

$$N_{E_1} = 60 \cdot n_{1,k} \cdot L_h$$

$$N_{E_1} = 60 \cdot 266,67 \cdot 182,5 = 2\,920\,036,5$$

- Základní počet cyklů

$$N_0 = 25 \cdot 10^7$$

- Koeficient charakterizující úhly šroubovic

$$Z_{H_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\gamma_{sU40})^2}{\sin(2\alpha_n)}}$$

$$Z_{H_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(9,75)^2}{\sin(2 \cdot 15)}} = 1,971$$

- Dotykové napětí

$$\sigma_{H_1} = Z_M \cdot Z_{H_1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K_H \cdot M_{k2}}{d_{w_{koloU9}}^2 \cdot b_{kolo_U9}}}$$

$$\sigma_{H_1} = 210 \cdot 1,971 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,74 \cdot 430}{20,6^2 \cdot 7}} = 191,58 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$\sigma_c = 170 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ – mez únavové pevnosti na dotyk (17)

$$\sigma_{H1_dov} = \sigma_c \cdot \sqrt[8]{\frac{N_o}{N_{E_1}}}$$

$$\sigma_{H1_dov} = 170 \cdot \sqrt[8]{\frac{25 \cdot 10^7}{2\,920\,036,5}} = 296,495 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Jistota v dotyku

$$J_{1_dotyk} = \frac{\sigma_{H1_dov}}{\sigma_{H_1}}$$

$$J_{1_dotyk} = \frac{296,495}{191,58} = \mathbf{1,548}$$

Kontrola na ohyb vyžaduje také tabulkové součinitele popisující geometrii a materiály:

$K_F = K_F = 0,74$	$Y_F = 1,78$	$Y_\beta = 0,93$	$k_\beta = 1,8$
--------------------	--------------	------------------	-----------------

Tabulka 13: Tabulka koeficientů pro kontrolu na ohyb šnekového ozubení A17U9 (21)

- Ohybové napětí

$$\sigma_{F_1} = \frac{2 \cdot K_F \cdot Y_F \cdot Y_\beta \cdot M_{k_2}}{d_{wkoloU9} \cdot b_{kolo_U9} \cdot m_{U9}}$$

$$\sigma_{F_1} = \frac{2 \cdot 0,74 \cdot 1,78 \cdot 0,93 \cdot 430}{20,6 \cdot 7 \cdot 0,75} = 9,74 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Dovolené ohybové napětí

$$\sigma_{F1_dov} = \frac{\sigma_c}{k_\beta} \cdot \sqrt[9]{\frac{N_o}{N_{E_1}}}$$

$$\sigma_{F1_dov} = \frac{170}{1,8} \cdot \sqrt[9]{\frac{25 \cdot 10^7}{2\,920\,036,5}} = 154,85 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Jistota v ohybu

$$J_{1_ohyb} = \frac{\sigma_{F1_dov}}{\sigma_{F_1}}$$

$$J_{1_ohyb} = \frac{154,85}{9,74} = \mathbf{15,9}$$

5.1.2 2. Převodový stupeň – šnekové soukolí A25U40

Vstupními parametry pro výpočet druhého převodového stupně jsou opět hodnoty uvedené v **Tabulka 8**: Charakteristika šnekových převodů. Součinitele popisující materiály a geometrii pro kontrolu v dotyku jsou převzaty z **Tabulka 12**: Tabulka koeficientů pro kontrolu na dotyk šnekového ozubení (21).

- Otáčky šnekového kola

$$n_{2_k} = \frac{n_{1_k}}{i_2}$$

$$n_{2_k} = \frac{266,67}{40} = 6,67 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

- Ekvivalentní počet provozních cyklů

$$N_{E_2} = 60 \cdot n_{2_k} \cdot L_h$$

$$N_{E_2} = 60 \cdot 6,67 \cdot 182,5 = 73\,036,5$$

- Základní počet cyklů

$$N_o = 25 \cdot 10^7$$

- Koeficient charakterizující úhly šroubovic

$$Z_{H_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\gamma_{sU40})^2}{\sin(2\alpha_n)}}$$

$$Z_{H_2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(2,55)^2}{\sin(2 \cdot 15)}} = 1,998$$

- Dotykové napětí

$$\sigma_{H_2} = Z_M \cdot Z_{H_2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K_H \cdot M_{k_3}}{d_{w_{koloU40}}^2 \cdot b_{kolo_{U40}}}}$$

$$\sigma_{H_2} = 210 \cdot 1,998 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,74 \cdot 5\,750}{32,04^2 \cdot 12}} = 348,74 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$\sigma_C = 170 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ – mez únavové pevnosti na dotyk (17)

$$\sigma_{H2_dov} = \sigma_C \cdot \sqrt[8]{\frac{N_O}{N_{E_2}}}$$

$$\sigma_{H2_dov} = 170 \cdot \sqrt[8]{\frac{25 \cdot 10^7}{73\,036,5}} = 470,164 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Jistota v dotyku

$$J_{2_dotyk} = \frac{\sigma_{H2_dov}}{\sigma_{H_2}}$$

$$J_{2_dotyk} = 348,74 = \mathbf{1,35}$$

Kontrola na ohyb vyžaduje také tabulkové součinitele popisující geometrii a materiály:

$K_F = K_F = 0,74$	$Y_F = 1,55$	$Y_\beta = 0,98$	$k_\beta = 1,78$
--------------------	--------------	------------------	------------------

Tabulka 14: Tabulka koeficientů pro kontrolu na ohyb šnekového ozubení A25U40 (21)

- Ohybové napětí

$$\sigma_{F_2} = \frac{2 \cdot K_F \cdot Y_F \cdot Y_\beta \cdot M_{k_3}}{d_{w_{koloU9}} \cdot b_{kolo_{U40}} \cdot m_{U40}}$$

$$\sigma_{F_2} = \frac{2 \cdot 0,74 \cdot 1,55 \cdot 0,98 \cdot 5\,750}{32,04 \cdot 12 \cdot 0,8} = 42,03 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Dovolené ohybové napětí

$$\sigma_{F2_dov} = \frac{\sigma_C}{k_\beta} \cdot \sqrt[9]{\frac{N_0}{N_{E,2}}}$$

$$\sigma_{F2_dov} = \frac{170}{1,78} \cdot \sqrt[9]{\frac{25 \cdot 10^7}{73\,036,5}} = 235,907 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Jistota v ohybu

$$J_{2_ohyb} = \frac{\sigma_{F2_dov}}{\sigma_{F,2}}$$

$$J_{2_ohyb} = \frac{235,907}{42,03} = 5,61$$

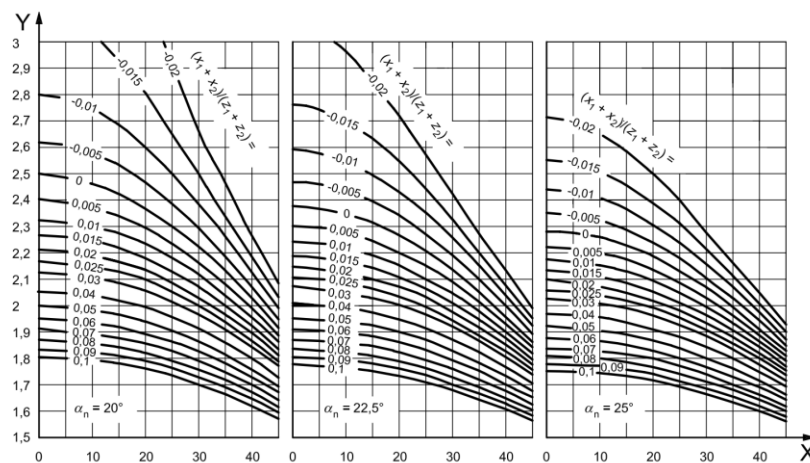
5.1.3 3. Převodový stupeň – přímé ozubení

Pro výpočet napětí v dotyku a ohybu využívám normu ISO 6336-2. Všechny níže uvedené vztahy čerpám z tohoto dokumentu. (22)

Kontrola napětí v dotyku

- Faktor zóny

Faktor zóny určím graficky:



Graf 16: Faktor zóny (22)

$$Z_H = 2,5$$

- Faktor dotyku dvojice

Faktor dotyku dvojice zubů lze uvažovat pro soukolí s přímým ozubením $Z_B = 1$ a $Z_D = 1$.

- Faktor elasticity

Faktor elasticity uvažuje vliv materiálu, ze kterých je soukolí vyrobeno. Zvolené soukolí je vyrobeno z oceli S45C a hodnota poissonovy konstanty je $\nu = 0,269$ a modul pružnosti je $E = 209\,000\text{ MPa}$.

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}}$$

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \left(\frac{1 - 0,269^2}{209\,000} + \frac{1 - 0,269^2}{209\,000} \right)}} = 189,36 \sqrt{N \cdot \text{mm}^{-2}}$$

- Faktor poměrného dotyku

Pro přímé ozubení je možné volit faktor poměrného dotyku: $Z_\varepsilon = 1$

- Faktor šroubovice

Pro čelní ozubení ho lze zanedbat, protože zvolené soukolí nemá žádný sklon zubů β . Volím: $Z_\beta = 1$.

- Faktor životnosti

$$n_{3_k} = \frac{n_{2_k}}{i_3}$$

$$n_{3_k} = \frac{6,67}{4,31} = 1,55 \frac{\text{ot}}{\text{min}}$$

$$N_{E_3} = 60 \cdot n_{3_k} \cdot L_h$$

$$N_{E_3} = 60 \cdot 1,55 \cdot 182,5 = 16\,972,5$$

Material ^a	Number of load cycles	Life factor, Z_{NT}
St, V, GGG (perl., bai.), GTS (perl.), Eh, IF; only when a certain degree of pitting is permissible	$N_L \leq 6 \times 10^5$, static	1,6
	$N_L = 10^7$	1,3
	$N_L = 10^9$	1,0
	$N_L = 10^{10}$	0,85 up to 1,0 ^b
St, V, GGG (perl., bai.), GTS (perl.), Eh, IF	$N_L \leq 10^5$, static	1,6
	$N_L = 5 \times 10^7$	1,0
	$N_L = 10^9$	1,0
	$N_L = 10^{10}$	0,85 up to 1,0
GG, GGG (ferr.), NT (nitr.), NV (nitr.)	$N_L \leq 10^5$, static	1,3
	$N_L = 2 \times 10^6$	1,0
	$N_L = 10^{10}$	0,85 up to 1,0
NV (nitrocar.)	$N_L \leq 10^5$, static	1,1
	$N_L = 2 \times 10^6$	1,0
	$N_L = 10^{10}$	0,85 up to 1,0

^a See ISO 6336-1:2006, Table 2 for explanation of abbreviations used.
^b The lower value of Z_{NT} may be used for critical service, where pitting must be minimal. Values between 0,85 and 1,0 may be used for general purpose gearing. With optimum lubrication, material, manufacturing and experience 1,0 may be used.

Tabulka 15: Volba faktoru životnosti ozubení na dotyk

$$Z_{NT} = 1,6$$

- Ostatní faktory

Jelikož výrobce neuvádí další nezbytné údaje o geometrii ozubení, drsnosti povrchu, tvrdosti apod., tak uvažují ostatní koeficienty jako ideální $K = 1$.

- Nominální hodnoty dotykového napětí

$$\sigma_{H0_prime} = Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_{t_přímé}}{d_{w_pastorek} b_{prime}} \cdot \frac{u+1}{u}}$$

$$\sigma_{H0_prime} = 2,5 \cdot 189,36 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{589,74}{15 \cdot 15} \cdot \frac{4,31+1}{4,31}} = 850,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$\sigma_{C_prime} = 844,226 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} - \text{mez únavové pevnosti na dotyk (15)}$$

$$\sigma_{H3_dov} = \sigma_{C_prime} \cdot Z_{NT}$$

$$\sigma_{H3_dov} = 844,226 \cdot 1,6 = 1\,350,76 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Jistota v dotyku

$$J_{3_dotyk} = \frac{\sigma_{H3_dov}}{\sigma_{H0_prime}}$$

$$J_{3_dotyk} = \frac{1\,350,76}{850,7} = \mathbf{1,588}$$

Kontrola na napětí v ohybu

Pro správnou kontrolu dle ISO 6336 výrobce ozubení (KHK Gears) nezveřejňuje potřebné informace, nabízí však online kalkulátor, který vygeneruje maximální zatížení pro zvolené soukolí při použití japonské normy **JGMA401-01**. (23)

Mating type	[Spur Gears]
Meshing number of teeth	[56]
Meshing Face Width	[15]
Meshing Surface finish	[Ground]
Rotating Speed	[1.5] rpm
Number of repetitions	[Approx.100,000]
Direction of Load	[Bidirectional]
Dimension Factor of Root Stress	[1.0]
Kinematic Viscosity of Lubricant	[ISO VG 100] cSt
Method of Gear shaft Support	[Bearing on Both Ends]
Safety Factor	[1.5]

Tabulka 16: Nastavení kalkulátoru (23)

--- Bending Strength [JGMA401-01] ---	
Allowable Tangential Force(N)	1722.1226
Allowable torque(N·m)	72.3292
Allowable power (kW)	0.0114

Tabulka 17: Výstupní hodnoty kalkulátoru (23)

$$F_{t_{přímé}} < F_{t_{allowable}}$$

5.2 Pevnostní kontrola hřídelí

Všechny hřídele jsem navrhl z kalené martenzitické nerezové oceli 1.4021 (DIN X20Cr13), která má vysokou mez kluzu a vysokou korozní odolnost.

$$Rp_{0,2} = \sigma_D = 500 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

5.2.1 1. Převodová hřídel

1. Převodová hřídel je nejvíce namáhána ohybovým momentem v působišti sil šneku A17U9.

$$M_{k_1} = 71 \text{ Nmm}$$

- *Průřezové moduly*

$$W_{o1} = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32}$$

$$W_{o1} = \frac{\pi \cdot 6^3}{32} = 21,21 \text{ mm}^3$$

$$W_{k1} = \frac{\pi \cdot d_1^3}{16}$$

$$W_{k1} = \frac{\pi \cdot 6^3}{16} = 42,41 \text{ mm}^3$$

- *Ohybové momenty v rovinách xz a yz*

$$M_{o_{x1}} = -80,2 \text{ Nmm}$$

$$M_{o_{y1}} = -212 \text{ Nmm}$$

$$M_{o1} = \sqrt{M_{o_{x1}}^2 + M_{o_{y1}}^2}$$

$$M_{o1} = \sqrt{(-80,2)^2 + (-212)^2} = 226,6 \text{ Nmm}$$

Výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_{o1} = \frac{M_{o1}}{W_{o1}}$$

$$\sigma_{o1} = \frac{226,6}{21,21} = 10,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Výpočet napětí v krutu:

$$\tau_{k1} = \frac{M_{k1}}{W_{k1}}$$

$$\tau_{k1} = \frac{71}{42,41} = 1,67 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Redukované napětí pomocí energetické hypotézy:

$$\sigma_{red1} = \sqrt{\sigma_{o1}^2 + 3 \cdot \tau_{k1}^2}$$

$$\sigma_{red1} = \sqrt{10,7^2 + 3 \cdot 1,67^2} = 11,08 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

5.2.2 2. Převodová hřídel

2. Převodová hřídel je nejvíce namáhána ohybovým momentem v působišti sil šneku A25U40.

$$M_{k2} = 430 \text{ Nmm}$$

- *Průřezové moduly*

$$W_{o2} = \frac{\pi \cdot d_2^3}{32}$$

$$W_{o2} = \frac{\pi \cdot 10^3}{32} = 99,17 \text{ mm}^3$$

$$W_{k2} = \frac{\pi \cdot d_2^3}{16}$$

$$W_{k2} = \frac{\pi \cdot 10^3}{16} = 196,35 \text{ mm}^3$$

- *Ohybové momenty v rovinách xz a yz*

$$M_{o_{x2}} = 344,4 \text{ Nmm}$$

$$M_{o_{y2}} = -2 540,9 \text{ Nmm}$$

$$M_{o2} = \sqrt{M_{o_{x2}}^2 + M_{o_{y2}}^2}$$

$$M_{o2} = \sqrt{344,4^2 + (-2 540,9)^2} = 2 564,13 \text{ Nmm}$$



Výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_{o2} = \frac{M_{o2}}{W_{o2}}$$

$$\sigma_{o2} = \frac{2\,564,13}{99,17} = 25,86 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Výpočet napětí v krutu:

$$\tau_{k2} = \frac{M_{k2}}{W_{k2}}$$

$$\tau_{k2} = \frac{430}{196,35} = 2,19 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Redukované napětí pomocí energetické hypotézy:

$$\sigma_{red2} = \sqrt{\sigma_{o2}^2 + 3 \cdot \tau_{k2}^2}$$

$$\sigma_{red2} = \sqrt{25,86^2 + 3 \cdot 2,19^2} = 26,14 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

5.2.3 3. Převodová hřídel

3. Převodová hřídel je nejvíce namáhána ohybovým momentem v pravé poloze R_H .

$$M_{k3} = 5\,750 \text{ Nmm}$$

- *Průřezové moduly*

$$W_{o3} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{32}$$

$$W_{o3} = \frac{\pi \cdot 10,3^3}{32} = 107,28 \text{ mm}^3$$

$$W_{k3} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{16}$$

$$W_{k3} = \frac{\pi \cdot 10,3^3}{16} = 214,56 \text{ mm}^3$$

- *Ohybové momenty*

$$M_{o_{x3}} = -4\,666 \text{ Nmm}$$

$$M_{o_{y3}} = 2\,019 \text{ Nmm}$$

$$M_{o3} = \sqrt{M_{o_{x3}}^2 + M_{o_{y3}}^2}$$

$$M_{o3} = \sqrt{(-4\,666)^2 + 2\,019^2} = 5\,084,1 \text{ Nmm}$$

Výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_{o3} = \frac{M_{o3}}{W_{o3}}$$

$$\sigma_{o3} = \frac{5\,084,1}{107,28} = 47,4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Výpočet napětí v krutu:

$$\tau_{k3} = \frac{M_{k3}}{W_{k3}}$$

$$\tau_{k3} = \frac{5\,750}{214,56} = 26,8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Redukované napětí pomocí energetické hypotézy:

$$\sigma_{red3} = \sqrt{\sigma_{o3}^2 + 3 \cdot \tau_{k3}^2}$$

$$\sigma_{red3} = \sqrt{47,4^2 + 3 \cdot 26,8^2} = 66,34 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

5.2.4 Hlavní vyklápěcí hřídel

Vyklápěcí hřídel je nejvíce namáhána ohybovým momentem v místě upnutí segmentu s přímým ozubením. Hřídel není namáhána krutem.

$$M_{k3} = 23\,000 \text{ Nmm}$$

- *Průřezový modul*

$$W_{o4} = \frac{\pi \cdot d_4^3}{32}$$

$$W_{o4} = \frac{\pi \cdot 12^3}{32} = 169,65 \text{ mm}^3$$

- *Ohybové momenty*

$$M_{ox4} = -4\,054,5 \text{ Nmm}$$

$$M_{oy4} = -1\,475,7 \text{ Nmm}$$

$$M_{o4} = \sqrt{M_{ox4}^2 + M_{oy4}^2}$$

$$M_{o4} = \sqrt{(-4\,054,5)^2 + (-1\,475,7)^2} = 4\,314,7 \text{ Nmm}$$

Výpočet napětí v ohybu:

$$\sigma_{o3} = \frac{M_{o3}}{W_{o3}}$$

$$\sigma_{o3} = \frac{4\,314,7}{169,65} = 25,43 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

5.2.5 Jistoty návrhu

$$J_1 = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red1}}$$

$$J_1 = \frac{500}{11,08} = 45,13$$

$$J_2 = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red2}}$$

$$J_2 = \frac{500}{26,14} = 19,13$$

$$J_3 = \frac{\sigma_D}{\sigma_{red3}}$$

$$J_3 = \frac{500}{66,34} = 7,54$$

$$J_4 = \frac{\sigma_D}{\sigma_{o1}}$$

$$J_4 = \frac{500}{25,43} = 19,7$$

5.3 Kontrola životnosti ložisek

5.3.1 Ložiska na 1. převodové hřídeli

Ložisko v podpoře R_D

Ložisko v podpoře R_D je axiálně volné a je tedy zatěžováno pouze radiální výslednou silou:

$$F_{rad_D} = \sqrt{R_{Dx}^2 + R_{Dy}^2}$$

$$F_{rad_D} = \sqrt{(-4,86)^2 + (3,97)^2} = 6,28 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentního dynamického zatížení:

$$C_D = F_{rad_D} \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_m \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_D = 6,28 \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 2\,400 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 18,67 \text{ N}$$

V podpoře R_D se nalézá ložisko **SKF 626 - 2RS1**, kde $C = 1\,530 \text{ N}$. **Toto ložisko splňuje $C_D < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

Ložisko v podpoře R_C

Ložisko v podpoře R_C je axiálně pevné, je tedy zatěžováno axiální i radiální silou:

$$F_{rad_C} = \sqrt{R_{Cx}^2 + R_{Cy}^2}$$

$$F_{rad_C} = \sqrt{(-5,73)^2 + (-15,7)^2} = 16,7 \text{ N}$$

$$F_{axial_C} = F_{a_{šnekU9}}$$

$$F_{axial_C} = 42,6 \text{ N}$$

Zjistím ekvivalentní dynamické zatížení:

$$C_C = (X \cdot F_{rad_C} + Y \cdot F_{axial_C}) \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_m \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_C = (0,56 \cdot 16,7 + 1 \cdot 42,6) \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 2\,400 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 136\,N$$

Zvolil jsem ložisko opět **SKF 626 - 2RS1**, kde $C = 1\,530\,N$. **Toto ložisko splňuje $C_C < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

5.3.2 Ložiska na 2. převodové hřídeli

Ložisko v podpoře R_E

Ložisko v podpoře R_E je axiálně volné a zatěžováno je tedy pouze radiální výslednou silou:

$$F_{rad_E} = \sqrt{R_{E_x}^2 + R_{E_y}^2}$$

$$F_{rad_E} = \sqrt{(71,5)^2 + (49,51)^2} = 86,97\,N$$

Výpočet ekvivalentního dynamického zatížení:

$$C_E = F_{rad_E} \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_{1-k} \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_E = 86,97 \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 266,67 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 124,31\,N$$

V podpoře R_E se nalézá ložisko **SKF 636 - 2RS1**, kde $C = 1\,990\,N$. **Toto ložisko splňuje $C_E < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

Ložisko v podpoře R_F

Ložisko v podpoře R_F je axiálně pevné, je tedy zatěžováno axiální i radiální silou:

$$F_{rad_F} = \sqrt{R_{F_x}^2 + R_{F_y}^2}$$

$$F_{rad_F} = \sqrt{(18,13)^2 + (-133,78)^2} = 135\,N$$

$$F_{axial_F} = F_{akoloU_9} - F_{ašnekU40}$$

$$F_{axial_F} = 10,38 - 356,52 = -346,14\,N$$

Zjistím ekvivalentní dynamické zatížení:

$$C_F = (X \cdot F_{rad_F} + Y \cdot F_{axial_F}) \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_{1_k} \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_F = (0,56 \cdot 135 + 1 \cdot 346,14) \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 266,67 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 602,8 \text{ N}$$

Zvolil jsem ložisko **ZEN 30/8-B-2RS**, kde $C = 2\,600 \text{ N}$. **Toto ložisko splňuje $C_F < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

5.3.3 Ložiska na 3. převodové hřídeli

Ložisko v podpoře R_G

Ložisko v podpoře R_G je axiálně volné a zatěžováno je tedy pouze radiální výslednou silou:

$$F_{rad_G} = \sqrt{R_{G_x}^2 + R_{G_y}^2}$$

$$F_{rad_G} = \sqrt{(123,34)^2 + (-34,7)^2} = 128,13 \text{ N}$$

Výpočet ekvivalentního dynamického zatížení:

$$C_G = F_{rad_G} \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_{2_k} \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_G = 128,13 \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 6,67 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 53,56 \text{ N}$$

V podpoře R_G se nalézá ložisko **SKF 6001 - 2RSH**, kde $C = 2\,360 \text{ N}$. **Toto ložisko splňuje $C_G < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

Ložisko v podpoře R_H

Ložisko v podpoře R_H je axiálně pevné, je tedy zatěžováno axiální i radiální silou:

$$F_{rad_H} = \sqrt{R_{H_x}^2 + R_{H_y}^2}$$

$$F_{rad_H} = \sqrt{(825,32)^2 + (-275,95)^2} = 870,23 \text{ N}$$

$$F_{axial_H} = F_{a_{koloU40}}$$

$$F_{axial_H} = 48,18 \text{ N}$$

Zjistím ekvivalentní dynamické zatížení:

$$C_H = (X \cdot F_{rad_H} + Y \cdot F_{axial_H}) \cdot \sqrt[3]{L_h \cdot n_{z_k} \cdot 60 \cdot 10^{-6}}$$

$$C_H = (0,56 \cdot 870,23 + 1 \cdot 48,18) \cdot \sqrt[3]{182,5 \cdot 6,67 \cdot 60 \cdot 10^{-6}} = 223,85 \text{ N}$$

Zvolil jsem opět **SKF 6001 – 2RSH**, kde $C = 2\,360 \text{ N}$. **Toto ložisko splňuje $C_H < C$ a je tedy vhodně navrženo pro tuto aplikaci.**

5.4 Kontrola spojovacích dílů zajišťující transmisi točivého momentu

Pružný kolík na 1. Převodové hřídeli

Pro převod točivého momentu ze hřídele na šnek A17U9 je použit pružný kolík s průměrem 2 mm dle ISO 8752 z ocele 1.4310, kde definovaná maximální únosnost ve stříhu pro dvojici sil v závislosti na průřezu kolíku: $F_{k_{max}} = 2\,820 \text{ N}$.

$$F_k = \frac{M_{k_1}}{\frac{D}{2}}$$

$$F_k = \frac{71}{\frac{6}{2}} = 23,67 \text{ N}$$

$$F_k < F_{k_{max}} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Pružné kolíky na 2. Převodové hřídeli

Pro převod točivého momentu ze šnekového kola A17U9 na hřídel je také použit pružný kolík s průměrem 2 mm dle ISO 8752 $F_{k_{max}} = 2\,820 \text{ N}$.

$$F_k = \frac{M_{k_1}}{\frac{D}{2}}$$

$$F_k = \frac{430}{\frac{6}{2}} = 143,33 \text{ N}$$

$$F_k < F_{k_{max}} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Pro převod točivého momentu ze hřídele na šnek A24U40 je použit pružný kolík s průměrem 3 mm dle ISO 8752 je $F_{k_max} = 6\,320\text{ N}$.

$$F_k = \frac{M_{k1}}{\frac{D}{2}}$$

$$F_k = \frac{430}{\frac{10}{2}} = 86\text{ N}$$

$$F_k < F_{k_max} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Pero na 3. Převodové hřídeli

Pro převod točivého momentu ze šnekového kola A25U40 na hřídel je použito těsné pero s šířkou a výškou 3 mm dle DIN 6885 A, materiál ocel C45: $p_{dp} = 120\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a $\tau_D = 225,17\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Kontrola na otláčení:

$$p = \frac{4 \cdot M_{k3}}{d \cdot h \cdot l_a}$$

$$p = \frac{4 \cdot 5\,750}{12 \cdot 3 \cdot 13} = 49,15\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

$$p < p_{dp} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Kontrola na stříh:

$$\tau = \frac{2 \cdot M_{k3}}{d \cdot b \cdot l_a}$$

$$\tau = \frac{2 \cdot 5\,750}{12 \cdot 3 \cdot 13} = 24,57\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Jistota:

$$J_{P1} = \frac{\tau_D}{\tau}$$

$$J_{P1} = \frac{225,17}{24,57} = 9,16 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Lícované šrouby spojující ozubený segment s vyklápěcím členem

Pro převod točivého momentu z ozubeného segmentu na výklopnou část světlometu slouží *vyklápěcí člen*, který je spojen s ozubeným segmentem pomocí 3 lícovaných šroubů (tvarový styk) – ISO 7379. Šrouby je třeba kontrolovat na stříh a uložení (spojované součásti) na otláčení. $\tau_d = 277 \text{ MPa}$ a $p_{dp} = 75 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$

$$F = \frac{M_{k_{max}}}{D}$$

$$F = \frac{23\,000}{25} = 920 \text{ N}$$

$$F_s = \frac{F}{3}$$

$$F_s = \frac{920}{3} = 306,67 \text{ N}$$

Kontrola na stříh:

$$\tau_s = \frac{F_s}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}$$

$$\tau_s = \frac{306,67}{\frac{\pi \cdot 4^2}{4}} = 24,4 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Jistota:

$$J_{P2} = \frac{\tau_D}{\tau}$$

$$J_{P2} = \frac{277}{24,4} = 11,35 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Kontrola na otláčení:

$$p = \frac{F_s}{l \cdot d}$$

$$p = \frac{153,33}{5,5 \cdot 4} = 6,96$$

$$p < p_{dp} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

5.5 MKP analýzy kritických součástí

V rámci návrhu tohoto světlometu se zde nachází hned několik součástí, které nelze jednoduše analyticky kontrolovat na pevnost a životnost. Dvě z nich by mohly být kritické pro celou konstrukci a potenciálně ohrozit letoun. Proto je nezbytné tyto součásti kontrolovat skrze výpočetní nástroje MKP (Ansys Static, nebo SW simulation).

5.5.1 Vyklápěcí člen

Vyklápěcí člen, ke kterému je připojena celá výklopná část světlometu (hlava), je připojen k segmentu s přímým ozubením, nesmí tedy dojít k selhání tohoto dílu, neboť by to mělo za následek ztrátu hlavy. Jedná se o obráběný díl z hliníkové slitiny EN AW6082 T6.

Sítování



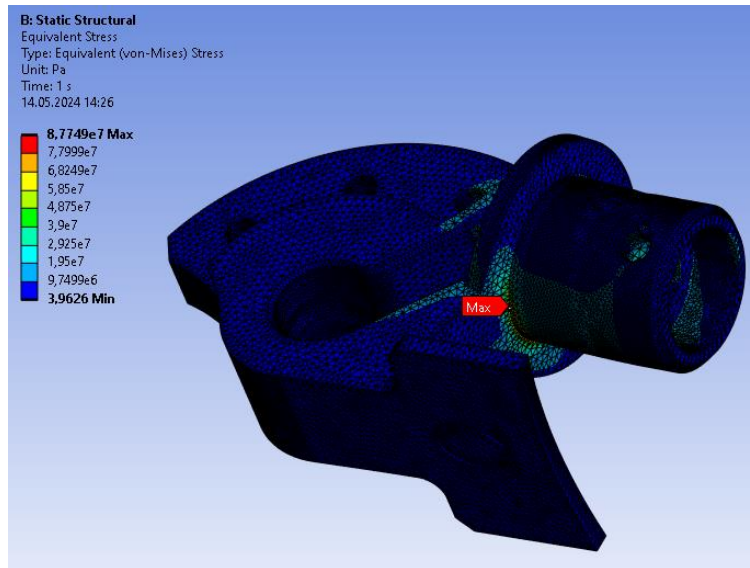
Obrázek 58: Vysítovaný vyklápěcí člen

Výše zobrazené sítování obsahuje 133 459 elementů a takto vysítované řešení nevykazuje divergentní chování sítě. Zatížení je **početní zatížení** aplikované formou externí síly na střed lampy.

$$J_{VYKL} = \frac{\sigma_{6082}}{\sigma_{\max MKP}}$$

$$J_{VYKL} = \frac{250}{87,75} = 2,85$$

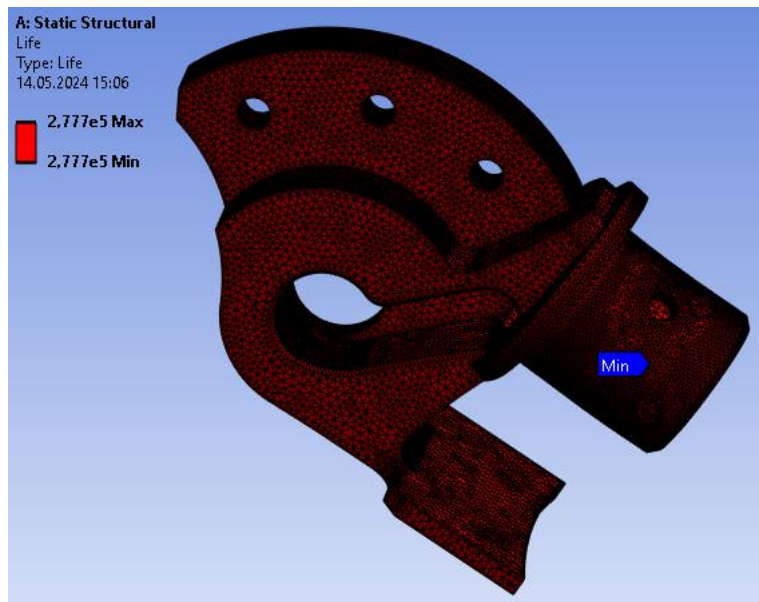
Výsledek analýzy staticky zatěžené součásti



Obrázek 59: Výsledek statické MKP analýzy na vyklápěcí člen

Cyklické namáhání

Jelikož se jedná o cyklicky namáhanou součást, tak je třeba zkontrolovat únavovou životnost.



Obrázek 60: Únavová životnost vyklápěcího členu v hodinách

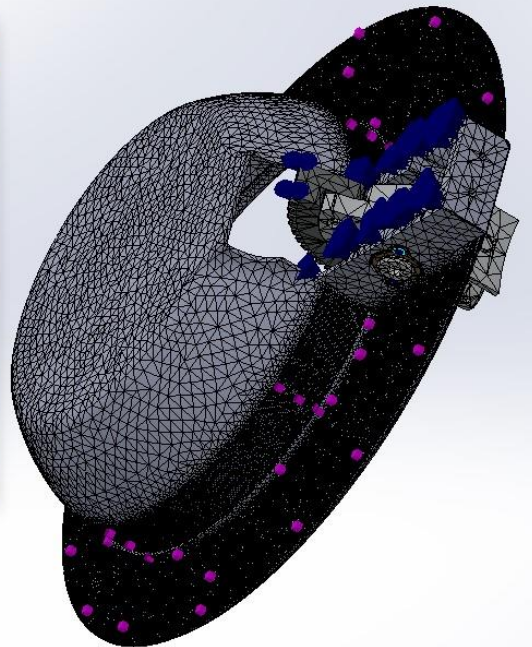
$$L_{h_MKP} = 277\,700h > L_h (= 182,5h)$$

5.5.2 Chassis

Celý světlomet je upnut na křídlo skrze přírubu popsanou v 4.2.2 – Příruba – hlavní chassis. Tento díl musí být správně připevněn k opláštění a v žádném případě nesmí dojít k selhání konstrukce. Okolní konstrukce (opláštění křídla) bylo uvažováno jako dokonale tuhé.

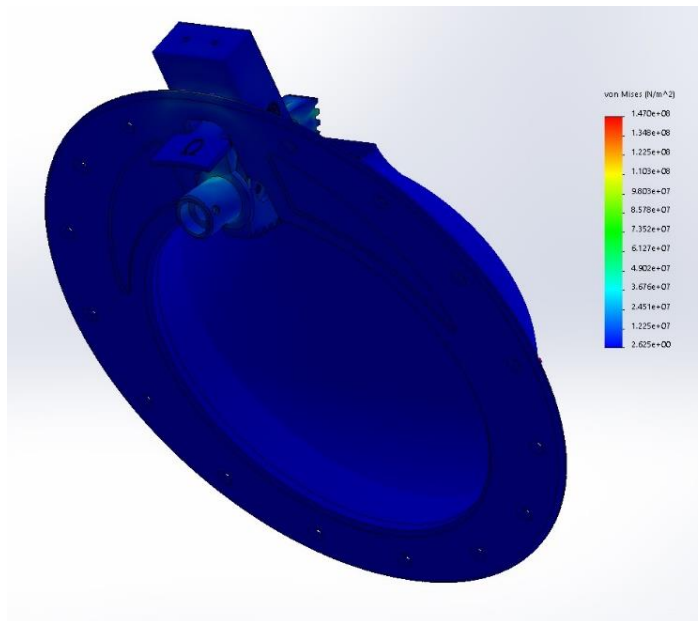
Sítování

Mesh Details	
Study name	staticmod (-Modified-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Curvature-based mesh
Jacobian points	4 points
Mesh Control	Defined
Max Element Size	0.0251098 m
Min Element Size	0.00502197 m
Mesh quality	High
Total nodes	413527
Total elements	211388
Maximum Aspect Ratio	153.55
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	61.4
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	1.52
% of distorted elements (Jacobian)	0
Remesh failed parts with incompatible mesh	On
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:51
Computer name	DESIGN2



Obrázek 61: Chassis – sítování společně s referenčními prvky

Výsledek analýzy staticky zatěžená součásti



Obrázek 62: Výsledek MKP analýzy – chassis

$$J_{VYKL} = \frac{\sigma_{6082}}{\sigma_{\max MKP}}$$

$$J_{VYKL} = \frac{250}{147} = 1,7$$

5.6 Laboratorní měření optické sestavy

V rámci průkazu letové způsobilosti je třeba prokázat základní optické vlastnosti navrženého optického systému světloometu. Pro účely této diplomové práce byla sestavena jedna „hlava“. Její optické vlastnosti jsem naměřil v optické laboratoři Aveo Engineering. Výsledný report z měření je k nahlédnutí v rámci 2. přílohy, zde uvádím pouze klíčové parametry.

5.6.1 Výsledné hodnoty

$$I_{\max \text{měřené}} = 886\,875 \text{cd} > I_{\max \text{požadované}}$$

$$\text{Chromatičnost} = 6\,115 \text{K}$$

$$FWTM(@10\%) = 11,8^\circ$$

Návrh dosáhl maximální intenzity vyšší, než bylo požadováno, chromatičnost zdroje odpovídá parametrům aviatické bílé. Hodnota je $FWTM(@10\%)$ je nižší o $0,2^\circ$, což je mírná odchylka, která mohla být způsobena špatným vycentrováním měřícího goniospektrometru.

6 Závěr

V této diplomové práci jsem přiblížil problematiku návrhu leteckého světlometu nové generace, který využívá jako zdroj světla LED čipy. Ty disponují mnohem vyšší účinností než běžné žárovky, či xenonové výbojky.

V první části (*Rešerše stávajících systémů*) jsem provedl detailní rešerši s analýzou trhu a vysvětlil potřebu vývoje takovýchto světlometů. Ve druhé části (*Rozbor požadavků letové způsobilosti*) jsem popsal certifikační bázi, na jejíž základě lze takovýto světlomet certifikovat pro letecký provoz. Ve třetí části (*Návrh konstrukce*) jsem se snažil co nejlépe ilustrovat úskalí při návrhu, vysvětlit nejen mechanické, ale také optické řešení světlometu, kdy jsem postupoval dle kritérií rozličných předpisů a zároveň reflektoval požadavky trhu.

Závěrečnou část jsem věnoval kontrole pevnosti návrhu a finální kontrole optického systému, který je podložen reportem získaným v optické laboratoři. Návrh vyhověl pevnostním podmínkám ve všech bodech a zvolené cíle optického systému byly naplněny. Aby mohl být tento světlomet potenciálně uznán způsobilým pro letecký provoz, je nezbytně nutné vyrobit prototypový kus a provést enviromentální zkoušky dle DO-160G v příslušných kategoriích v závislosti na účelu dané jednotky. A bylo by zapotřebí formálně připravit nezbytnou dokumentaci včetně instalačního manuálu.

Pro vypracování této práce bylo užito nejmodernějších nástrojů v podobě 3D skenování, podrobných MKP a CFD analýz, programování v Matlabu a CAD modelování v prostředí SolidWorks 2024.

Výsledkem této práce je vysvětlení komplexní problematiky leteckých světlometů a návrh LED světlometu, který splňuje veškerá nařízení a předpisy, které se ho týkají, pro umístění do křidel letadel společnosti Thrush Aircraft. V příloze této diplomové práce se nalézá 3D model světlometu, inspekčně kontrolní výkres se základními rozměry a report z laboratorního optického měření.

Reference

1. **Airforce Technology.** Airforce-technology-projects. *Airforce-technology*. [Online] 2024. [Citace: 28. 1 2024.] <https://www.airforce-technology.com/wp-content/uploads/sites/6/2015/09/Image-3-Bell-412EP-Twin-Engine-Helicopter.jpg>.
2. **Bell Helicopter.** Bell Helicopter - Electrical Installation. *BHT - Technical Publications*. [Online] 2023. [Citace: 26. 7 2023.] www.bellhelicopter.net/tp/ietm/PMC-412-97499-07000-00.
3. **Honeywell.** Honeywell Aerospace Products. *Honeywell Aerospace*. [Online] Honeywell International Inc., 2024. [Citace: 28. 1 2024.] <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/lighting/c-130-led-retractable-landing-light>.
4. **WHELEN.** flywat.com/collections. *flywat.com*. [Online] 2024. [Citace: 28. 1 2024.] <https://flywat.com/collections/twin-cessna-products>.
5. **Administration, Federal Aviation.** AIM-Chapter 3.AIRSPACE. [Online] 2. 12 2021. [Citace: 10. 12 2021.] https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aim_html/chap4_section_3.html.
6. **Polák, Martin.** *Návrh výklopného mechanismu přistávacích světlometů typu PAR64 pro nákladní letadla*. [editor] Ph. D. Ing. Robert Theiner. Praha : Fakulta strojní, ČVUT, 2022.
7. **SAE International.** SAE International Recommended Practice. *Landing and Taxiing Lights - Design Criteria for Installation*. [Online] 2. Červenec 2018. [Citace: 6. Říjen 2020.] <http://standards.sae.org/ARP693E>.
8. **EASA in cooperation.** Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification. *EASA Europa*. [Online] 31. 3 2023. [Citace: 28. 1 2024.] <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-airworthiness-and-environmental-certification>.
9. **Department of the NAVY.** MIL-L-81174/4A. [autor knihy] Department of the NAVY. *Engineering Specifications and Standards Department*. Philadelphia : Naval Air Engineering Center, 1971.
10. **EASA.** EASA Product certification. *EASA Europa*. [Online] 27. 5 2020. [Citace: 28. 3 2024.] <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/type-certificates/aircraft-cs-25-cs-22-cs-23-cs-vla-cs-lsa/easaima040-thrush-s2r#group-easa-related-content>. TCDS EASA.IM.A.040.

11. **GE Lighting.** GELighting.com. [Online] 1. Květen 2012. [Citace: 10. 12 2023.] genet.gelighting.com/LightProducts/Dispatcher?REQUEST=CUSTOMPD.
12. **SAE International.** SAE International Technical Standard. *Minimum Performance Standard for Aircraft Position Lights*. [Online] 2. Únor 2022. [Citace: 5. Duben 2023.] <https://saemobilus.sae.org/standards/as8037d-minimum-performance-standard-aircraft-position-lights>.
13. **SAE International.** SAE International Technical Standard. *Minimum Performance Standard for Anticollision Light Systems*. [Online] 24. 8 2017. [Citace: 25. 1 2024.] <https://saemobilus.sae.org/standards/as8017d-minimum-performance-standard-anticollision-light-systems>.
14. **Q. T. Vinh (Editor), T. Q. Khan (Editor), P. Bodrogi (Editor), H. Winkler (Editor).** *LED Lighting: Technology and Perception*. Weinheim : Wiley-VCH, 2015. ISBN: 978-3-527-67017-8.
15. **KHK GEARS.** khkgears.net. [Online] 10. Únor 2023. [Citace: 1. Prosinec 2023.] <https://khkgears.net/pdf/2023/spur-gears.pdf>.
16. **ElectroCraft.** *ElectroCraft, Inc.* [Online] 2022. [Citace: 2. Únor 2022.] <https://www.electrocraft.com/products/bldc/RPX40/>.
17. **Group, Franz Morat.** Framo Morat. *Framo Morat*. [Online] [Citace:] <https://framomorat.com>.
18. **LEDiL.** LEDiL: Single lenses - OLGA. [Online] 8. Listopad 2023. [Citace: 17. Duben 2024.] <https://www.ledil.com/data/prod/Olga/16671/16671-ds.pdf>.
19. **Cree LED.** Cree LED downloads. *Cree LED XP-E2 LEDs*. [Online] 2024. [Citace: 1. Květen 2024.] <https://downloads.cree-led.com/files/ds/x/XLamp-XPE2.pdf>. CLD-DS56 REV 22.
20. **ams- OSRAM AG.** AMS OSRAM GW-CSSRM3-PM. *AMS OSRAM LOOK*. [Online] 11. Prosinec 2023. [Citace: 25. Leden 2024.] <https://look.ams-osram.com/m/178495cd104a0543/original/GW-CSSRM3-PM.pdf>.
21. **Doc. Ing. Otmar Kugl, CSc., a další.** *Projekt - III. ročník*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03205-1.
22. **BSi British Standards.** *Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 2*. místo neznámé : BSI 2008, 2006. ISBN: 978 0 580 63409 3.
23. **KHK Gears.** KHK web Calculator. [Online] Kohara Gear Industry Co.,Ltd., 2015. [Citace: 25. Únor 2024.] <https://www.khkgears.co.jp/khkweb/calc/FFCalc.do?catalogno=SSG1.5-56&lang=en>.

24. **Leinveber, Jiří a Vávra, Pavel.** *Strojnické tabulky.* Úvaly : Albra-pedagogické vydavatelství, 2017. ISBN 978-80-7361-111-8.

25. **Ian Moir, Allan Seabridge.** *Aircraft Systems - Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration.* Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-05996-8.