

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**

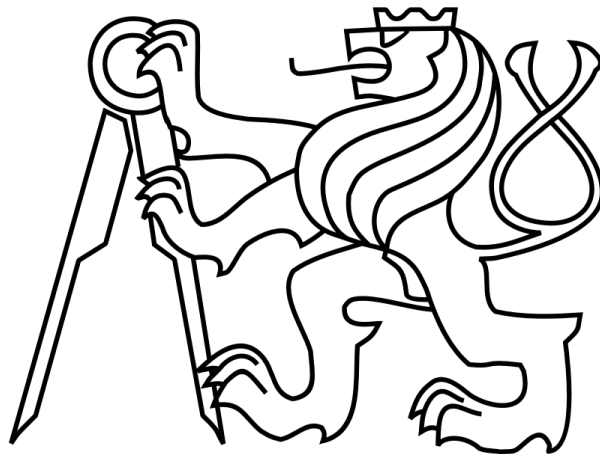


**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2019

**LUBOŠ
VESELÝ**

České vysoké učení technické v Praze
fakulta elektrotechnická
katedra mikroelektroniky



Bakalářská práce

**Program pro demonstraci vlastností optických prvků na základu
geometrické optiky**

Autor: Luboš Veselý

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Luboš** Osobní číslo: **434695**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektronika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Program pro demonstraci vlastností optických prvků na základu geometrické optiky

Název bakalářské práce anglicky:

Program to Demonstrate the Properties of Optical Elements on the Basis of Geometric Optics

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se zákonů geometrické optiky.
2. Na základu 1) navrhnete prostředí, ve kterém budete realizovat program, pomocí něhož bude možné navrhovat vhodný geometrický tvar pro realizaci optické soustavy tak, aby bylo možné demonstrovat dobré i špatné vlastnosti konkrétní soustavy včetně korekcí.
3. Program navrhnete i s ohledem na možnost použití ve výuce studentů.
4. Předpokládejte možnost volby geometrických parametrů soustavy, včetně fyzikálních parametrů prostředí.
5. Ověřte program na několika typech jednoduchých optických prvků i složitějších soustav.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Klimeš, B. - Kracík, J. - Ženíšek, A.: Základy fyziky II., Academia, Praha 1972, v pozdějších vydáních.
- [2] <http://www.handprint.com/ASTRO/ae1.html> (16.2.2018)
- [3] <http://www.astro.cz/rady/serialy/teleskopie.html?hledat=Teleskopie> (16.2.2018)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci Program pro demonstraci vlastností optický prvků na základu geometrické optiky zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 8. 1. 2019

Luboš Veselý

Poděkování

V úvodu bakalářské práce bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu ve studiu a dále vedoucímu práce za cenné rady a vedení při jejím psaní i v předcházejících semestrální projektech.

Anotace

Hlavním cílem práce je vytvoření prostředí pro návrh a vyšetřování vlastností optických soustav. V předložené práci je popsáno vytváření jednotlivých optických prvků, jejich umístění do soustavy a následně vyhodnocování jejich vlastností pomocí paprsků. Základ práce se opírá o zákony geometrické optiky. K popisování optických prvků a paprsků je v práci použita analytická geometrie, a proto vytvořené optické prvky mohou nabývat různých tvarů. Navržené prostředí bylo vytvořené s úmyslem toho, aby jej bylo možné využívat k výuce geometrické optiky pro studenty i středních nebo základních škol.

Abstract

The main objective of this thesis is to create an environment for design and detection of properties of optical systems. In the present work we study creation of optical elements, their placement into systems and examining their properties using rays. The thesis is based on the laws of geometric optics. Analytical geometry is used for description of optical elements and therefore the created optical elements can be of different shapes. The environment is created with intention of being used to teach student fundamentals of geometrical optics.

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Teoretický úvod.....	10
2.1 Kuželosečky	10
2.1.1 Kružnice.....	10
2.1.2 Elipsa	10
2.1.3 Hyperbola	10
2.1.4 Parabola.....	11
2.2 Snellův zákon.....	11
2.3 Čočka	12
2.3.3 Definice čočky.....	12
2.3.4 Otvorová vada čočky.....	12
2.3.5 Chromatická vada čočky	12
3 Tvorba optické soustavy	12
3.1 Parametry	13
3.2 Kulová plocha čočky.....	14
3.3 Plocha vytvořená rotací úseku elipsy kolem optické osy.....	16
3.4 Plocha vytvořená rotací úseku hyperboly kolem optické osy	18
3.5 Plocha vytvořená rotací části paraboly kolem optické osy	20
3.6 Vlastní plocha čočky	21
3.7 Rovinná plocha čočky	22
3.8 Kontrola průniku ploch čočky.....	22
4 Analýza optické soustavy	23
4.1 Základy průchodu	23
4.2 Dopad paprsku na kulovou plochu.....	24

4.3	Dopad paprsku na eliptickou plochu.....	26
4.4	Dopad paprsku na hyperbolickou plochu.....	27
4.5	Dopad paprsku na parabolickou plochu.....	28
4.6	Dopad paprsku na vlastní plochu čočky.....	28
4.7	Dopad paprsku na rovinnou plochu	29
4.8	Totální odraz	29
4.9	Ohnisko soustavy a otvorové vady.	30
4.10	Chromatické vady	31
5	Struktura programu	32
5.1	Základní informace	32
5.2	Vytváření optické soustavy	32
5.3	Analýza optické soustavy.....	34
6	Testování programu	36
6.1	Návrh testování	36
6.2	Sférická čočka	36
6.3	Eliptická čočka (bikonvexní)	39
6.4	Hyperbolická čočka (bikonkávní)	39
6.5	Parabolická čočka (konvexkonkávní)	39
6.6	Soustavy čoček.....	40
6.6.1	Jednoduchý dalekohled	40
7	Závěr	41

Seznam použitých zkratek a symbolů

a, b	m	hlavní a vedlejší poloosa elipsy a hyperboly
d, w	m	průměr a šířka čočky
D	m	posunutí středu čočky
e	m	excentricita hyperboly
F	-	ohnisko elipsy, hyperboly nebo paraboly
h	m	výška úseku křivky
k_d, k_l	-	směrnice dopadajícího a lomeného paprsku
n_1, n_2	-	index lomu prvního a druhého prostředí
p	-	parametr p paraboly
q_d, q_l	-	posunutí dopadajícího a lomeného paprsku
r	m	poloměr kružnice
$S [x_0, y_0]$	-	bod středu kružnice, elipsy nebo hyperboly se souřadnicemi x_0 a y_0
V	-	vrchol paraboly
x_d, y_d	-	souřadnice bodu dopadu
α	rad	úhel vymežující úsek
$\theta_1, \theta_2, \theta_m$	rad	úhel dopadu, úhel lomu a mezní úhel

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Základní parametry čočky

Obr. 2: Konvexkonkávní čočka s dvěma kulovými plochami

Obr. 3: Plocha vytvořená z úseku elipsy

Obr. 4: Plocha vytvořená z úseku hyperboly

Obr. 5: Plocha vytvořená z úseku paraboly

Obr. 6: Lom paprsku z prostředí n_1 do n_2

Obr. 7 Náhled na panel pro vytváření optické soustavy

Obr. 8 Diagram skriptu pro vykreslování optické soustavy

Obr. 9 Náhled na panel s paprsky a vlastnostmi optické soustavy

Obr. 10 Diagram skriptu pro výpočet bodů dopadu paprsků a vykreslování paprsků

Obr. 11 Grafický výstup programu při testování bikonvexní čočky

Seznam tabulek

Tab.1 - Testování sférické bikonvexní čočky

Tab. 2 - Testování sférické bikonkávní čočky

Tab. 3 - Testování sférické konvexkonkávní čočky

Tab. 4 - Testování sférické plankonvexní čočky

Tab. 5 - Testování rozsahu indexu lomu na sférické bikonvexní čočce

Tab. 6 - Testování soustavy pro různé vlnové délky paprsků na konvexkonkávní čočce

Tab. 7 - Testování eliptické bikonvexní čočky

Tab. 8 - Testování hyperbolické bikonkávní čočky

Tab. 9 - Testování hyperbolické bikonkávní čočky

Tab. 10 - Testování soustavy dvou čoček – spojky a rozptylky

1 Úvod

Cíl mojí bakalářské práce je navrhnutí prostředí, ve kterém bude možné vytvářet optické soustavy a testovat jejich vlastnost, jako jsou jejich různé chyby. Prostedí je navrženo v App Designeru, což je nástroj pro vytváření uživatelských prostředí obsahující plně integrovanou verzi Matlabu. Všechny skripty a funkce k prostředí jsou vytvořeny v Matlabu verze R2017a.

Prostedí by mělo být uživatelsky přívětivé, aby bylo možné používat při výuce na školách, proto je důraz na zpětnou vazbu s uživatelem.

V prostředí je možné navrhnout optickou soustavu až o pěti optických prvcích, kterou je možné analyzovat pomocí až deseti paprsků.

V úvodu práce je probrána teorie nutná k pochopení toho, jak se vytvářejí a analyzují optické soustavy. V následujících kapitolách je popsán nejprve postup vytváření optické soustavy a použité metody včetně vytváření jednotlivých optických prvků. V další kapitole je podrobně popsáno, jak se v programu analyzují vytvořené optické soustavy a všechny situace, které při této analýze mohou nastat. V následující kapitole je popsána struktura programu a znázorněny důležité části programu pomocí vývojových diagramů. Poté následuje kapitola, ve které jsou výsledky testování programu pro různé typy optických soustav. A nakonec práce obsahuje závěr.

2 Teoretický úvod

2.1 Kuželosečky

Strany čoček jsou nejčastěji tvořeny rotací některé z kuželoseček kolem optické osy. Stejně tomu tak je i u reálných čoček, jejichž strany jsou tvořeny nejčastěji sférickými plochami. Pro popis kuželoseček jsou důležité specifické parametry a jejich rovnice. [1] [4] [5]

2.1.1 Kružnice

Kružnice je množina všech bodů v rovině, která je ve stejné vzdálenosti od jednoho bodu. Tento bod je zvaný střed S a vzdálenost se nazývá poloměr r . [1] [4] [5]

2.1.2 Elipsa

Elipsa je množina všech bodů v rovině, které mají stejný součet vzdáleností od dvou pevně zvolených bodů, zvaných jako ohniska F . Střed elipsy S je střed úsečky, na jejíž konci jsou ohniska. Důležitými parametry elipsy jsou délky hlavní a a vedlejší poloosy b . Délka hlavní poloosy a je vzdálenost od středu elipsy do nejvzdálenějšího bodu na elipse a délka vedlejší poloosy b je vzdálenost od středu elipsy do nejbližšího bodu na elipse. [5]

2.1.3 Hyperbola

Hyperbola je množina všech bodů v rovině, které mají od dvou pevně zvolených bodů, zvaných ohniska F , stejnou absolutní hodnotu rozdílu vzdáleností. Střed hyperboly S je střed úsečky, na jejíž konci jsou ohniska. Přímka procházející ohnisky se nazývá hlavní osa $o1$ a přímka kolmá na hlavní osu procházející středem elipsy se nazývá vedlejší osa $o2$. Průsečíky hlavní osy a hyperboly se nazývají vrcholy hyperboly. Důležitým parametrem je délka hlavní poloosy a , což je vzdálenost od jednoho vrcholu hyperboly do středu hyperboly. Excentricita e je vzdálenost od jednoho z ohnisek hyperboly do středu hyperboly. Dalším důležitým parametrem je délka vedlejší poloosy b , který se vypočítá ze vztahu [5]

$$b^2 = e^2 - a^2.$$

2.1.4 Parabola

Parabola je množina všech bodů v rovině, které mají stejnou vzdálenost od dané přímky a od pevně daného bodu, který na této přímce neleží. Pevný bod se nazývá jako ohnisko F a daná přímka se nazývá jako řídicí přímka d . Důležitým parametrem je *parametr* p , což je vzdálenost ohniska F od přímky d . Vrcholem paraboly V je bod, který půlí vzdálenost přímky d a ohniska F . [5]

2.2 Snellův zákon

Snellův zákon je důležitý při určování chování paprsku při prostupu optickou soustavou. [1] [6]

2.2.1 Obecná formulace

Snellův zákon je jeden ze základních zákonů popisující šíření vlnění. Tento zákon popisuje chování vlnění při přechodů z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 . K lomu dochází na rozhraní těchto prostředí. Úhel dopadu θ_1 je úhel, který svírá normála na rozhraní a dopadající. Úhel lomu θ_2 je úhel, který lomený paprsek svírá s normálou na rozhraní. [1]

Vztah mezi úhlem dopadu θ_1 a úhlem lomu θ_2 je

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

V závislosti na indexech lomu mohou nastat 2 druhy lomu. Lom ke kolmici nastává, když paprsek prochází z opticky řidšího prostředí do opticky hustšího prostředí ($n_1 < n_2$) a lom od kolmice nastává, když paprsek prochází z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí ($n_1 > n_2$). [1] [6]

2.2.2 Totální odraz

Pokud prochází paprsek z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí (lom od kolmice), může se stát, že paprsek rozhraním neprojde a pouze se odrazí. Dochází k totálnímu odrazu. Tomu se stává vždy, když úhel dopadu θ_1 je větší než mezní úhel θ_m . [1]

$$\theta_m = \arcsin \frac{n_1}{n_2}$$

2.3 Čočka

2.3.3 Definice čočky

Čočka je základním prvkem v navrhovaném optickém prostředí. Jedná se o optickou soustavu tvořenou dvěma plochami, které vznikly rotací některé kuželosečky (nejčastěji kružnice) kolem středu čočky. Čočka je vyrobena z materiálu o určitém indexu lomu. Paprsků prostupující čočkou popisujeme pomocí Snellova zákona. [7]

2.3.4 Otvorová vada čočky

Jedná se o druh geometrické vady čočky. Tato vada je více znatelná u tlustých čoček. Čím blíže paprsky rovnoběžné s optickou osou budou optické ose, tím dále bude jejich průsečík s optickou osou a naopak. Otvorová vada se určuje jako rozdíl vzdáleností ohniska daného paprsku a paraxiálního ohniska. Paraxiální ohnisko je ohnisko čočky pro paprsky rovnoběžné s optickou osou s malou vzdáleností od optické osy. Otvorové vady se dají omezit odcloněním krajních paprsků. [7]

2.3.5 Chromatická vada čočky

Chromatické neboli barevné vady čočky závisí na materiálu, ze kterého je čočka vyrobena. Ohnisková vzdálenost čočky závisí na indexu lomu čočky. Ten je ale různý pro různé vlnové délky vlnění. Některé materiály mají při změnách vlnové délky malé změny indexu lomu a jiné zase naopak velké. Při průchodu světla čočkou se stává, že každá barva spektra má své vlastní ohnisko. Chromatické vady lze částečně odstranit takzvanou achromatizací optické soustavy, které se docílí vhodnou kombinací spojných a rozptylných čoček (čočkové multipty). [7]

3 Tvorba optické soustavy

V této kapitole je popsáno, jak se v programu vytváří optické soustavy a jakými metodami je tomu dosaženo.

V prostředí má uživatel možnost vytvoření optické soustavy tvořené až z pěti optických prvků. Každý prvek musí mít definované své geometrické rozměry. Optické prvky jsou postupně umísťovány na optickou osu. Soustava souřadnic je umístěna tak, aby optická osa byla totožná

s osou x . Uživatel musí následně určit vzdálenost mezi jednotlivými optickými prvky. Následně je nutné, aby uživatel zadal indexy lomu optických prvků a prostředí v okolí optických prvků. Délky se v programu jsou v milimetrech, ale protože program pracuje na základě geometrické optiky, může uživatel používat jiné jednotky délky s rozdílem, že výsledné hodnoty délky budou v této jednotce délky.

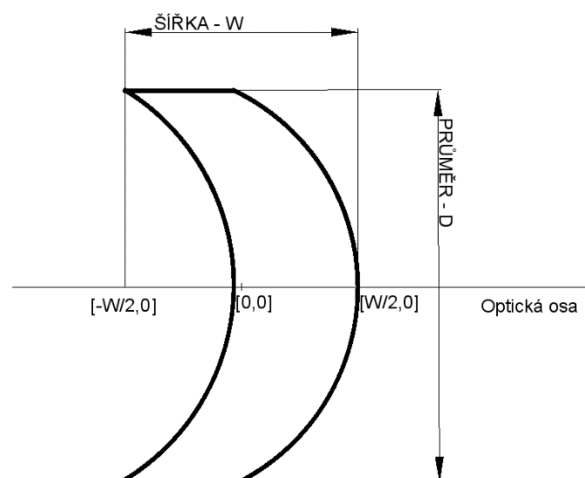
3.1 Parametry

Pro správné vykreslení je nutno zadat v programu požadované parametry pro jednotlivé čočky. Čočka je tvořena ze dvou centrovaných ploch, přední a zadní. Přední plocha je plocha, kterou vstupují paprsky do čočky a zadní čočka je čočka, kterou paprsky vystupují z čočky ven.

Prvním parametrem pro vytvoření čočky je **průměr čočky d** . Průměr čočky je dvojnásobek vzdálenosti od optické osy ke kraji čočky a pro všechny čočky v optické soustavě je stejný, kvůli zjednodušení.

Dalším parametrem je **šířka čočky w** . V prostředí je šířka čočky definovaná jako největší vzdálenost přední a zadní plochy čočky ve směru optické osy. Střed čočky je určen v polovině šířky čočky na optické ose.

Při vykreslování první čočky je tato čočka umístěna do středu souřadnic (viz obr. 1). Každá další čočka je posunuta zvolenou vzdáleností D , proto je souřadnice středu dalších čoček $[D,0]$.



Obr. 1 - základní parametry čočky

Při vytváření plochy čočky předpokládáme, že je plocha čočky tzv. rotační plocha, což je plocha vzniklá rotací určité křivky kolem optické osy. V programu má uživatel na výběr ze šesti možností:

- Kružnice
- Elipsa
- Hyperbola
- Parabola
- Vlastní křivka
- Přímka

Následně musí uživatel zvolit příslušné parametry pro danou křivku a určit, jestli má být plocha konvexní nebo konkávní.

3.2 Kulová plocha čočky

Kulová plocha vzniká rotací části kružnice kolem optické osy. Tuto kružnici definujeme pouze jedním parametrem, kterým je její poloměr r . Část kružnice, která bude vykreslena, je určena průměrem čočky d . Aby bylo možné kružnici vykreslit, je nutné, aby poloměr r byl větší nebo roven polovině průměru čočky d . Pro vykreslení je důležitý středový úhel α , pro který platí [8]:

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{d}{2r}$$

Dalším důležitým parametrem je výška kruhové úseče h , která udává rozdíl x-ové souřadnice kružnice na optické ose a kraji čočky. Výška kruhové úseče pro kruhovou úseč s délkou tětivy rovnou průměru čočky d a poloměrem r platí [4]:

$$h = r - r \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2r}\right)^2}$$

Souřadnice pro vykreslení určíme z parametrického vyjádření kružnice, kde $[x_0, y_0]$ jsou souřadnice středu kružnice, r je poloměr kružnice a φ je proměnný parametr, který pro celou kružnici nabývá hodnot od 0 do 2π .

$$x = x_0 + r \cos \varphi$$

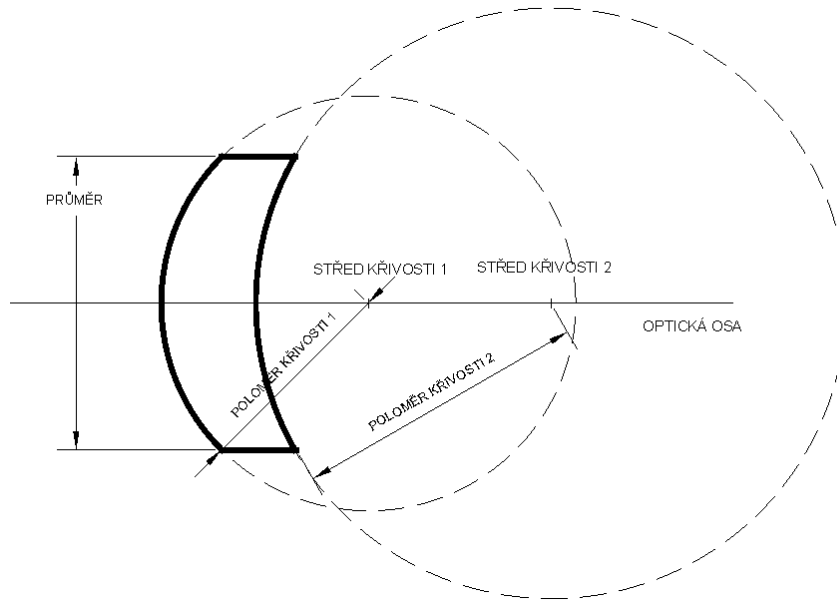
$$y = y_0 + r \sin \varphi$$

V programu je vždy střed kružnice umístěn na optické ose, proto je hodnota $y_0 = 0$. Hodnota x_0 je různá pro typy ploch

- $x_0 = r - \frac{w}{2} + D$, pro přední konvexní plochu
- $x_0 = -r - \frac{w}{2} + h + D$, pro přední konkávní plochu
- $x_0 = -r + \frac{w}{2} + D$, pro zadní konvexní plochu
- $x_0 = r + \frac{w}{2} - h + D$ pro zadní konkávní plochu

Kde r je poloměr křivosti, w je šířka čočky, h je výška kruhové úseče a D je vzdálenost od první čočky, která je pro první čočku nulová.

Protože není požadované vykreslit celou kružnici, ale jen část vymezenou středovým úhlem α , parametr φ nabývá hodnot v intervalu $\langle -\frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2} \rangle$ pro zadní konvexní plochu a přední konkávní plochu nebo hodnot v intervalu $\langle -\frac{\alpha}{2} + \pi, \frac{\alpha}{2} + \pi \rangle$ pro přední konvexní plochu a zadní konkávní plochu. Úsek kružnice je vykreslen osově souměrně podle optické osy.



Obr. 2 Konvexkonkávní čočka s dvěma kulovými plochami

3.3 Plocha vytvořená rotací úseku elipsy kolem optické osy

Pro vykreslení elipsy stáčí udát dva parametry, kterými jsou délka hlavní poloosy a a délka vedlejší poloosy b . Podobně jako u kružnice chce vykreslit jen úsek elipsy, který je vymezen průměrem čočky d a je souměrný podle optické osy. Je zde podmínka že délka hlavní poloosy elipsy a musí být větší nebo rovna polovině průměru čočky d .

Úsek elipsy je opět vymezen úhlem α , pro který platí [8],

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{d}{2a}$$

Dalším potřebným parametrem je parametr h_e , který označuji jako výšku eliptické úseče, který nabývá hodnoty délky vedlejší poloosy b v případě, že délka hlavní poloosy a je rovna polovině průměru čočky d . Pro h platí [5]:

$$h = b - \sqrt{\left(1 - \frac{d}{2a}\right)^2 \times b^2}$$

Nyní je pro vykreslení upravit parametrické vyjádření paraboly pro elipsu s délkou hlavní poloosy a , délkou vedlejší poloosy b , a středem v bodě $[x_0, y_0]$. V prostředí se používají pouze elipsy, mají hlavní poloosu rovnoběžnou s osou y [5].

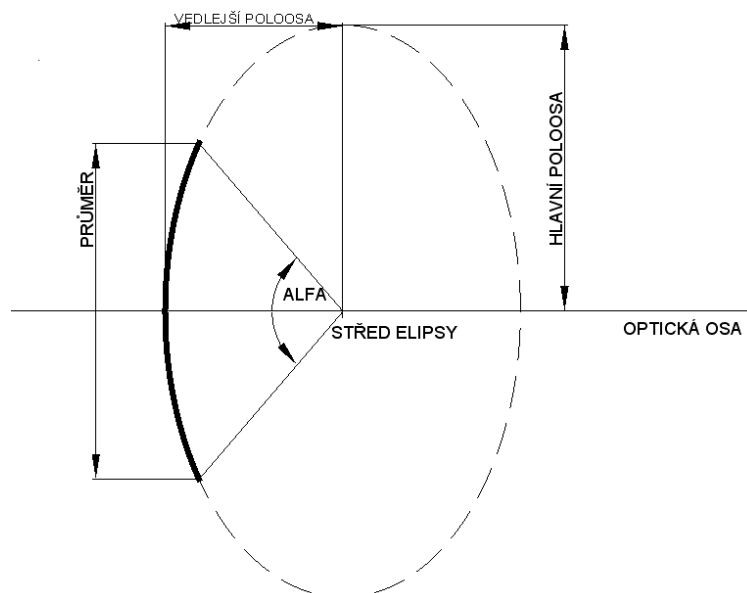
$$x = x_0 + b \cos \varphi$$

$$y = y_0 + a \sin \varphi \quad \text{pro } \varphi \in \langle 0, 2\pi \rangle$$

Protože se jedná o elipsu se středem v optické ose, je hodnota $y_0 = 0$. Hodnotu x_0 musíme zase upravit podle toho, o jaký typ plochy se jedná:

- $x_0 = b - \frac{w}{2} + D$ pro přední konvexní plochu
- $x_0 = -b - \frac{w}{2} + h + D$ pro přední konkávní plochu
- $x_0 = -b + \frac{w}{2} + D$ pro zadní konvexní plochu
- $x_0 = b + \frac{w}{2} - h + D$ pro zadní konkávní plochu

Jelikož nechceme vykreslit celou elipsu, ale jen úsek vymezený úhlem α , parametr φ bude nabývat hodnot v intervalu $\langle -\frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2} \rangle$ pro přední konkávní plochu a zadní konvexní plochu nebo hodnot v intervalu $\langle -\frac{\alpha}{2} + \pi, \frac{\alpha}{2} + \pi \rangle$ pro přední konvexní plochu a pro zadní konkávní plochu.



Obr. 3 Plocha vytvořená z úseku elipsy

3.4 Plocha vytvořená rotací úseku hyperboly kolem optické osy

Hyperbola je definovaná v prostředí dvěma parametry, kterými jsou délka hlavní poloosy a a délka vedlejší poloosy b . Používá se pouze hyperbola, která má hlavní poloosu a ležící na optické ose a vrchol hyperboly leží tudíž také na optické ose. Úsek hyperboly je vymezen průměrem čočky d a je souměrný podle optické osy. Oproti elipse může mít hlavní poloosa hyperboly libovolnou délku.

Úsek hyperboly je vymezen úhlem α , pro který platí [8]:

$$\alpha = 2 \arcsin \frac{d}{2b}$$

Parametr h je výška úseku hyperboly vymezeného úhlem α a platí pro něj [8]:

$$h = -a + \sqrt{\left(1 + \frac{d}{2b}\right)^2 \times a^2}$$

Dále musíme upravit parametrické vyjádření hyperboly s délkou hlavní poloosy a , délkou vedlejší poloosy b a středem v bodě $[x_0, y_0]$. Ve vyjádření pro x-ovou souřadnici dáváme znaménko podle toho, kterou část hyperboly chceme vykreslit. Pro část hyperboly před středem dáváme znaménko minus a pro část za středem znaménko plus.

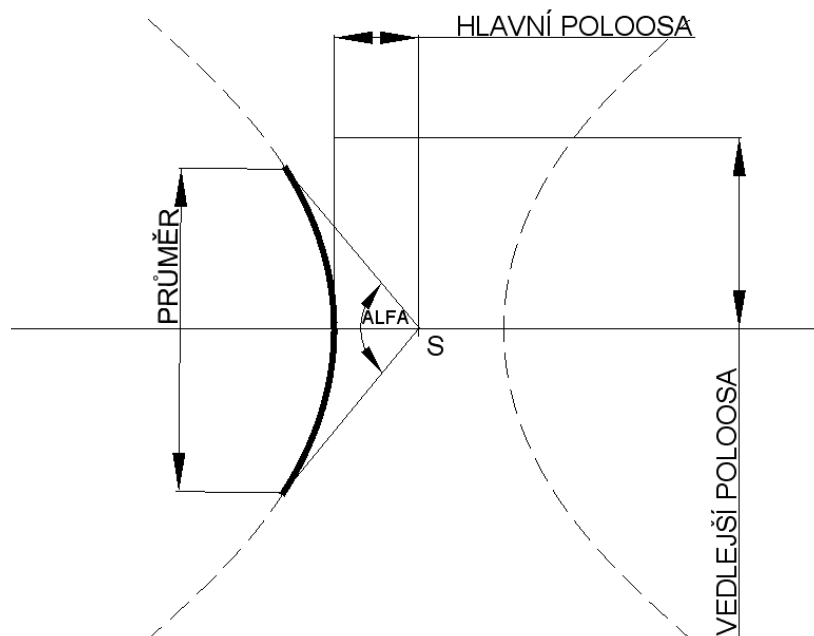
$$x = x_0 \pm a \cosh t$$

$$y = y_0 + b \sinh t \quad \text{pro } t \in \langle -\infty, \infty \rangle$$

Jelikož je střed hyperboly na optické ose, je hodnota y_0 rovna 0. Hodnota x_0 se určí podle toho, o jakou plochu čočky se jedná:

- $x_0 = -a - \frac{w}{2} + D$ pro přední konvexní plochu
- $x_0 = a - \frac{w}{2} + h + D$ pro přední konkávní plochu
- $x_0 = a + \frac{w}{2} + D$ pro zadní konvexní plochu
- $x_0 = -a + \frac{w}{2} - h + D$ pro zadní konkávní plochu

Protože není nutné vykreslit celou hyperbolu, ale jen úsek, který je vymezen úhlem α , bude parametr t nabývat hodnot $\langle -\frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2} \rangle$. Pro vykreslení přední konvexní plochy a zadní konkávní plochy se pro x-ovou souřadnici bude používat vyjádření s plusem a pro vykreslení zadní konvexní plochy a přední konkávní plochy vyjádření s minusem.



Obr. 4 Plocha vytvořená z hyperboly

3.5 Plocha vytvořená rotací části paraboly kolem optické osy

Jediným parametrem, kterým je parabola zadávána je parametr p . V prostředí jsou použity pouze paraboly mající osu totožnou s optickou osou. Parabola je omezena průměrem čočky d . Y-ová souřadnice úseku proto nabývá hodnot $\langle -\frac{d}{2}, \frac{d}{2} \rangle$. X-ovou souřadnici spočítáme z vrcholové rovnice přímky.

Pro přední konvexní plochu a pro zadní konkávní plochu se používá tvar vrcholové rovnice, který má osu paraboly totožnou s osou x mající minimum na této ose [5].

$$y^2 = 2p \times (x - x_0)$$

Pro zadní konvexní plochu a pro přední konkávní plochu se používá tvar rovnice s maximem na ose x [5].

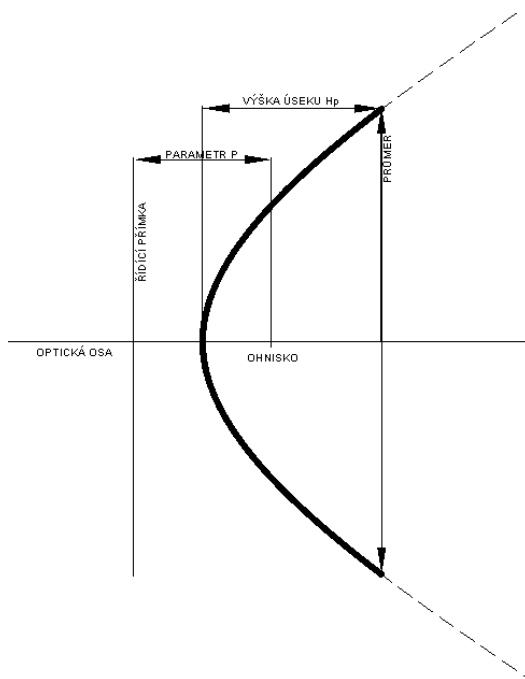
$$y^2 = -2p \times (x - x_0)$$

Hodnotu souřadnice vrcholu paraboly x_0 určíme podle typu plochy:

- $x_0 = -\frac{w}{2} + D$ pro přední konvexní plochu
- $x_0 = -\frac{w}{2} + h + D$ pro přední konkávní plochu
- $x_0 = \frac{w}{2} + D$ pro zadní konvexní plochu
- $x_0 = \frac{w}{2} - h + D$ pro zadní konkávní plochu

Parametr h je výška parabolické úseče vymezená průměrem čočky [4].

$$h = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2}{2p}$$



Obr. 5 Plocha vytvořená z úseku paraboly

3.6 Vlastní plocha čočky

Pro tvorbu vlastní plochy čočky slouží tabulka s body. Je možné zadat libovolný počet bodů, ale je zde omezující podmínka, že první bod musí mít y-ovou souřadnici rovnu polovině průměru čočky d a poslední bod musí mít y-ovou souřadnici $-d$.

Vykreslování probíhá tak, že se vezme bod z největší y-ovou souřadnicí a spojí se úsečkou s následujícím bodem a tento bod se spojí zase s dalším bodem, dokud se nedojde k bodu s nejmenší y-ovou souřadnicí.

Aby byla dodržena zadaná šířka čočky w , je x-ová souřadnice následovně přepočítávána. Ze všech bodů se najde bod s největší x-ovou souřadnicí. Pokud se jedná o přední plochu čočky, tak se od středu čočky odečte polovina šířky w a x-ová souřadnice daného bodu a přičte se největší x-ová souřadnice. Pro zadní plochu se od středu čočky odečte největší x-ová souřadnice a přičte se polovina šířky w a x-ová souřadnice daného bodu. Vzdálenost bodu s největší x-ovou souřadnicí od kolmice na optickou osu procházející středem čočky pak bude rovna polovině šířky čočky w .

Pro výpočet výšky úseče h této plochy je nutné nalézt bod s nejmenší x-ovou souřadnicí. Výška h je rovna rozdílu největší a nejmenší souřadnice x-ové souřadnice.

3.7 Rovinná plocha čočky

Pro rovinnou plochu není třeba udávat žádný parametr. Plocha se vždy vykreslí ve vzdálenosti rovné polovině šířky čočky w od středu čočky. Průměr této plochy má velikost d .

3.8 Kontrola průniku ploch čočky

Po zadání parametrů obou ploch čočky by se mohlo stát, že plochy mezi sebou kolidují. Kvůli tomu jsou zde omezující podmínky. Máme-li dvě konvexní nebo dvě konkávní plochy, musí být šířka čočky w větší než součet výšek úseků obou ploch h . Při jedné konvexní a jedné konkávní ploše musí být obě výšky úseků ploch h menší než součet druhé výšky úseku plochy a šířky čočky w . Při použití rovinné plochy a jiné čočky musí být výška úseku plochy h menší než šířka čočky w .

4 Analýza optické soustavy

Tato kapitola se zabývá tím, jak je v programu řešena analýza optické soustavy a jak se zjišťují její vlastnosti.

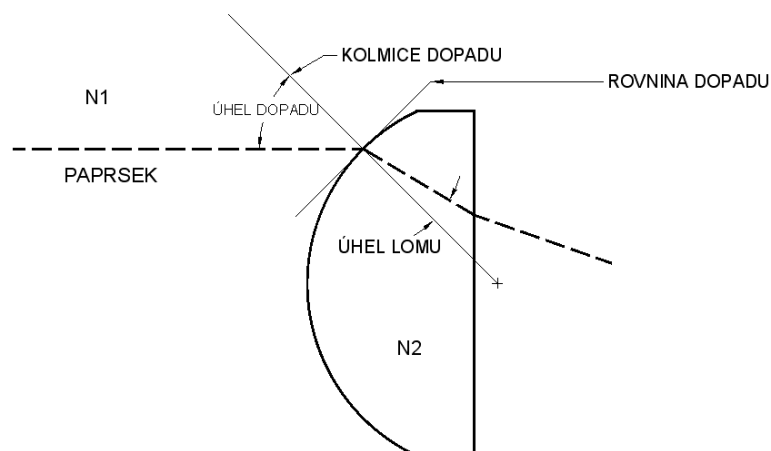
Pro zjištění vlastností zvolené optické soustavy používáme soustavu paprsků rovnoběžných s optickou osou ve zvolených vzdálenostech od optické osy. Pomocí těchto paprsků zjišťujeme údaje jako jejich body průniku s optickými prvky nebo ohnisko dané soustavy.

Paprsky se definují pouze jedním parametrem, který je vzdálenost od optické osy, které říkáme výška paprsku pro zkrácení. Počáteční směrnice je vždy rovna nule, protože paprsky jsou na začátku optické soustavy rovnoběžné s optickou osou. Paprsky s větší vzdáleností od optické osy, než je poloměr čoček, nebudou procházet žádným optickým prvkem a jsou pro analýzu soustavy nepodstatné.

4.1 Základy průchodu

Při dopadu paprsku na rozhraní dvou prostředí dojde většinou k lomu daného paprsku. V programu lze proces průchodu paprsku z jednoho prostředí do druhého popsat ve třech krocích:

1. Výpočet bodu dopadu paprsku na rozhraní
2. Nalezení kolmice na rovinu dopadu a tím i úhel dopadu
3. Výpočet úhlu lomu podle Snellova zákona lomu



Obr. 6 Lom paprsku z prostředí N1 do N2

Pro použití Snellova zákona najít rovinu dopadu paprsku a následně kolmici na tuto rovinu. Úhel, který svírá dopadající paprsek a kolmice dopadu se nazývá úhel dopadu a značíme ho θ_1 . Úhel lomu θ_2 , který svírá paprsek po průchodu rozhraním s kolmicí dopadu, se vypočítá ze Snellova zákona, kde n_1 je index lomu prostředí před bodem dopadu a n_2 je index lomu prostředí po bodu dopadu [6].

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \times \sin \theta_1\right)$$

Pro popis paprsku potřebujeme dva parametry, kterými jsou směrnice k , což je tangens úhlu, který paprsek svírá s optickou osou, a číslo q , což je výška, kde paprsek prochází osou y .

Dále se budeme zabývat jednotlivými případy dopadu paprsků na různé druhy plochy.

4.2 Dopad paprsku na kulovou plochu

Souřadnice bodu dopadu se naleznou pomocí rovnice kružnice, ze které je vytvořena sférická plocha, a z rovnice paprsku.

$$\sqrt{r^2 + (x_d - x_0)^2} = |k_d x_d + q_d|$$

Mohou nastat dvě možnosti. V první z nich rovnice nemá řešení. To znamená, že paprsek neprochází plochou čočky a pokračuje dál ve svém směru.

Další možnost je taková, že rovnice má jedno nebo dvě řešení. Dále postupujeme podle toho, o jaký typ plochy se jedná. V těchto případech se konvexita a konkavita plochy rozlišuje podle toho, jaký tvar má plocha ze směru dopadu paprsku, takže zadní konvexní plocha čočky bude brána jako plocha konkávní a přední konkávní plocha bude brána jako konvexní.

Pro konvexní plochu nezáleží, jestli má rovnice jedno nebo dvě řešení. Při dvou řešení se vždy vezme to s menší hodnotou.

Pokud má rovnice pro konkávní plochu jen jedno řešení, paprsek plochu minul, protože řešení rovnice je pro bod, který je sice na kružnici, ale není na úseku kružnice, ze kterého je plocha vytvořena. Při dvou řešeních se vezme to s větší hodnotou.

Hodnota řešení, která byla spočítána, je souřadnice bodu dopadu x_d a nyní se musí spočítat souřadnice y_d pomocí parametru dopadajícího paprsku k_d a q_d .

$$y_d = k_d x_d + q_d$$

Je nutné zkontrolovat vypočtenou souřadnici y_d . Pokud absolutní hodnota této souřadnice větší, než je poloměr plochy čočky, paprsek opět danou plochu mine a bude pokračovat svým směrem dále. V opačném případě je souřadnice bodu dopadu rovna $[x_d, y_d]$.

Při dopadu paprsku na kulovou plochu se bere úhel dopadu θ_I jako úhel, který svírá dopadající paprsek a přímka procházející bodem dopadu a středem křivosti plochy. Pro výpočet θ_I se používají vztahy, které se liší pro konkávní a pro konvexní plochy. Pro úhel θ_I při platí:

- $\theta_1 = \arcsin \frac{y_d}{r} + \arctan k_d$ pro konvexní plochu
- $\theta_1 = \arcsin \frac{y_d}{r} - \arctan k_d$ pro konkávní plochu

k_d je směrnice, y_d je výška v místě dopadu a r je poloměr křivosti plochy.

Úhel lomu θ_2 spočítáme pomocí Snellova zákona, jak je ukázáno v předchozí kapitole.

Abychom mohli popsat lomený paprsek potřebujeme vypočítat směrnici k_l a číslo q_l . Směrnici vypočítáme podle vztahu:

- $k_l = \tan \left(\theta_2 - \arcsin \frac{y_d}{r} \right)$ pro konvexní plochu
- $k_l = \tan \left(\arcsin \frac{y_d}{r} - \theta_2 \right)$ pro konkávní plochu

Číslo q_l už se poté snadno spočítá z bodu dopadu $[x_d, y_d]$ a ze směrnice k_l .

$$q_l = y_d - x_d \times k_l$$

4.3 Dopad paprsku na eliptickou plochu

Podobně jako u kulové plochy nejdříve je třeba najít bod dopadu z rovnice elipsy a rovnice paprsku.

$$\sqrt{\left(1 - \frac{(x_d - x_0)^2}{b^2}\right) \times a^2} = |k_d x_d + q_d|$$

Kde a je hlavní poloosa elipsy, b je vedlejší poloosa elipsy, x_0 střed elipsy, k_d je směrnice dopadajícího paprsku a q_d posunutí paprsku. Po vyřešení rovnice mohou nastat stejné situace jako u kulové plochy. Dále vypočítáme souřadnici y_d .

$$y_d = k_d x_d + q_d$$

Nyní je jen třeba spočítat úhel dopadu θ_1 . Ten zjistíme z normály na tečnu na elipsu v bodě dopadu. Z rovnice tečny na elipsu bude stačit vypočítat pouze směrnice k_t .

$$k_t = -\frac{a^2 \times (x_d - x_0)}{y_d \times b^2}$$

Jelikož jsme spočítali směrnici tečny k_t , musíme ji nyní přepočítat na směrnici normály k_n .

$$k_n = -\frac{1}{k_t}$$

Výpočet úhlu dopadu θ_1 .

- $\theta_1 = \arctan k_n - \arctan k_d$ pro konvexní plochu
- $\theta_1 = \arctan k_n + \arctan k_d$ pro konkávní plochu

Úhel lomu θ_2 se určí podle Snellova zákona stejně jako v předchozí kapitole. Nakonec se musí do počítat směrnice a posunutí lomeného paprsku k_l a q_l .

- $k_l = \tan(\arctan k_n - \theta_2)$ pro konvexní plochu
- $k_l = \tan(\theta_2 - \arctan k_n)$ pro konkávní plochu
- $q_l = y_d - x_d \times k_l$

4.4 Dopad paprsku na hyperbolickou plochu

Opět začneme tím, že si najdeme bod dopadu paprsku z rovnice hyperboly a rovnice dopadajícího paprsku.

$$\sqrt{\left(\frac{(x_d - x_0)^2}{a^2} - 1\right) \times b^2} = |k_d x_d + q_d|$$

Kde a je hlavní poloosa elipsy, b je vedlejší poloosa elipsy, x_0 střed elipsy, k_d je směrnice dopadajícího paprsku a q_d posunutí paprsku.

Na rozdíl od kulové a eliptické plochy se u hyperbolické konkávní plochy bere vždy kořen rovnice s menší hodnotou. U konvexní plochy je vždy potřeba, aby rovnice měla dva kořeny a vybere se ten s větší hodnotou. Dále vypočítáme souřadnici y_d .

$$y_d = k_d x_d + q_d$$

Úhel dopadu vypočítáme podobně jako u eliptické plochy pomocí směrnice normály tečny na hyperbolu v bodě dopadu k_n .

$$k_n = -\frac{b^2 \times (x_d - x_0)}{y_d \times a^2}$$

Podobně jako u eliptické plochy vypočteme úhel dopadu θ_l .

- $\theta_1 = \arctan k_n - \arctan k_d$ pro konvexní plochu
- $\theta_1 = \arctan k_n + \arctan k_d$ pro konkávní plochu

Parametry lomeného paprsku k_l a q_l .

- $k_l = \tan(\arctan k_n - \theta_2)$ pro konvexní plochu
- $k_l = \tan(\theta_2 - \arctan k_n)$ pro konkávní plochu
- $q_l = y_d - x_d \times k_l$

4.5 Dopad paprsku na parabolickou plochu

Nejdeme bod dopadu paprsku $[x_d, y_d]$ pomocí rovnice paraboly a rovnice paprsku.

U paraboly používáme vždy první řešení této rovnice.

$$\sqrt{2p \times (x_d - x_0)} = |k_d x_d + q_d|$$

$$y_d = k_d x_d + q_d$$

Pro nalezení úhlu dopadu budeme potřebovat najít směrnici kolmice na tečnu v bodě dopadu k_n a poté už můžeme spočítat samotný bod dopadu θ_1 .

- $k_n = -\frac{y_d}{p}$
- $\theta_1 = \arctan k_n - \arctan k_d$ pro konvexní plochu
- $\theta_1 = \arctan k_n + \arctan k_d$ pro konkávní plochu

Pomocí u úhlu lomu θ_2 vypočteného ze Snellova zákona, můžeme dopočítat parametry lomeného paprsku.

- $k_l = \tan(\arctan k_n - \theta_2)$ pro konvexní plochu
- $k_l = \tan(\theta_2 - \arctan k_n)$ pro konkávní plochu
- $q_l = y_d - x_d \times k_l$

4.6 Dopad paprsku na vlastní plochu čočky

Vlastní plocha čočky je tvořena ze spojených úseček, které propojují body zadané do tabulky. Abychom našli bod dopadu paprsku, musíme nejdříve najít, mezi kterými dvěma body paprsek prochází. To zjistíme tak, že z každých dvou sousední bodů plochy udělám rovnici přímky a položíím jí rovnu rovnici paprsku. Pokud řešení bude z intervalu mezi body, ze kterých byla přímka vytvořena, prochází paprsek právě mezi těmito dvěma body a řešení této soustavy rovnic je souřadnice bodu dopadu.

Jako rovina dopadu se vezme přímka vytvořená těmito dvěma body. Jelikož jsem z řešení předchozích rovnic získali bod dopadu, můžeme vypočítat úhel dopadu θ_1 ze směrnice dopadajícího paprsku k_d a ze směrnice kolmice na rovinu dopadu k_p .

$$\theta_1 = \arctan k_p - \arctan k_d$$

Po vypočtení úhlu lomu θ_2 ze Snellova zákona, už můžeme dopočítat parametry lomeného paprsku.

$$k_l = \tan(\arctan k_p - \theta_2) \quad q_l = y_d - k_l x_d$$

4.7 Dopad paprsku na rovinnou plochu

Dopad paprsku na rovinnou plochu je nejjednodušší ze všech dopadů. Nejdříve zjistíme, jestli paprsek bude procházet plochou. To zjistíme pomocí rovnice paprsku a rovnice plochy, kde k_d je směrnice dopadajícího paprsku, q_d je posunutí dopadajícího paprsku, D je posunutí středu čočky a w šířka čočky.

$$\frac{y - q_d}{k_d} = D \mp \frac{w}{2}$$

Pro přední plochu čočky se používá rovnice s minuse a pro zadní čočku rovnice s plusem. Pokud by se stalo, že je absolutní hodnota kořenu rovnice větší než poloměr čočky d . Paprsek nebude procházet plochou a bude pokračovat se svým směrem.

Úhel dopadu θ_1 je vlastně směrnice dopadajícího paprsku k_d , protože normála na plochu dopadu je rovnoběžná s optickou osou a úhel lomu θ_2 se opět vypočítá ze Snellova zákona.

Nakonec jen zbývá dopočítat směrnici k_l a posunutí q_l .

$$k_l = \tan \theta_2 \quad q_l = y_d - x_d \times k_l$$

4.8 Totální odraz

Při průchodu z jednoho prostředí do druhého se může stát, že paprsek neprosteupí, ale pouze se odrazí, jak je popsáno v kapitole 2.2.2. Při zjišťování, jestli paprsek odrazí nebo ne použijeme výpočtu úhlu lomu pomocí Snellova zákona [6].

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \times \sin \theta_1\right)$$

Funkce arkus sinus je definována pro argumenty na intervalu $\langle -1, 1 \rangle$, ale v Matlabu je možné ji spočítat pro všechny argumenty s tím, že výsledky funkce mimo interval mají imaginární složku.

V programu platí, že pokud má úhel lomu θ_2 po výpočtu imaginární složku nastává pro daný dopadající paprsek totální odraz a dále už v optické soustavě nepokračuje.

4.9 Ohnisko soustavy a otvorové vady.

Při výstupu paprsku z posledního optického prvku mohou nastat tři situace. První z nich nastane, když je vycházející paprsek rovnoběžný s optickou osou. V této situaci optická soustava nemá ohnisko pro tento paprsek.

Druhá situace je při tom, když paprsek směřuje od optické osy tzv. neprotíná optickou osu. V tomto případě se ohnisko soustavy pro daný nachází před výstupem paprsku z posledního prvku optické soustavy.

Poslední situace je při tom, když paprsek optickou osu protíná. V tomto případě je optické soustavy pro daný paprsek rovné průsečíku paprsky a optické osy a můžeme ho snadno spočítat ze směrnice paprsku a z posunutí. Souřadnice ohniska jsou $[F_x, 0]$.

$$F_x = -\frac{q_l}{k_l}$$

Otvorová vada se u optické soustavy zjišťuje z rozdílu ohnisek dvou paprsků. Pro zjištění otvorové vady čočky pro paprsky v určité vzdálenosti od optické osy se pošle přes soustavu jeden paprsek v požadované výšce a druhý paprsek se pošle velmi blízko optické osy. Vzdálenost těchto ohnisek Δx je otvorová vada v dané výšce.

4.10 Chromatické vady

Pro zjištění chromatických vad je v prostředí možnost zadávání různých indexů lomu pro různé vlnové pro optické prvky. Je možnost až tří různých indexů lomu pro jeden prvek s tím, že ze základu je zde připravena tabulka pro modré, zelená a červené světlo.

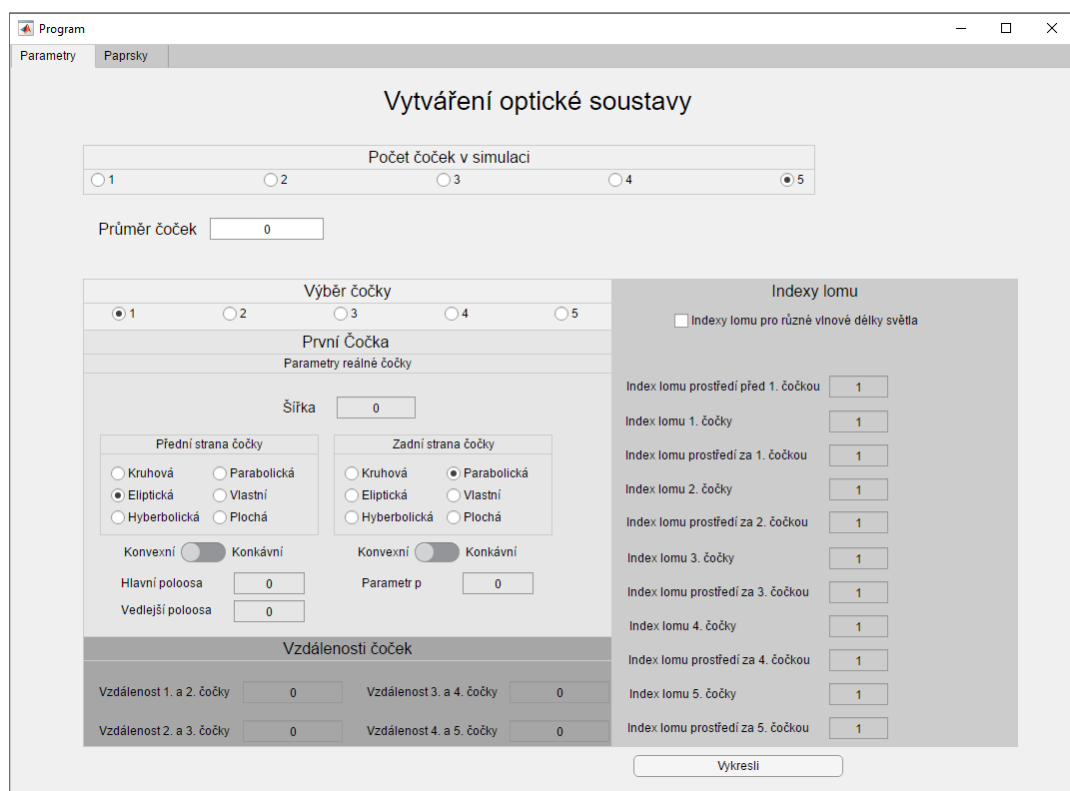
Chromatické vady se zjišťují z rozdílu ohnisek dvou paprsků ve stejné vzdálenosti od optické osy s rozdílnou vlnovou délkou. Vzdálenost těchto ohnisek Δx je chromatická vada.

5 Struktura programu

5.1 Základní informace

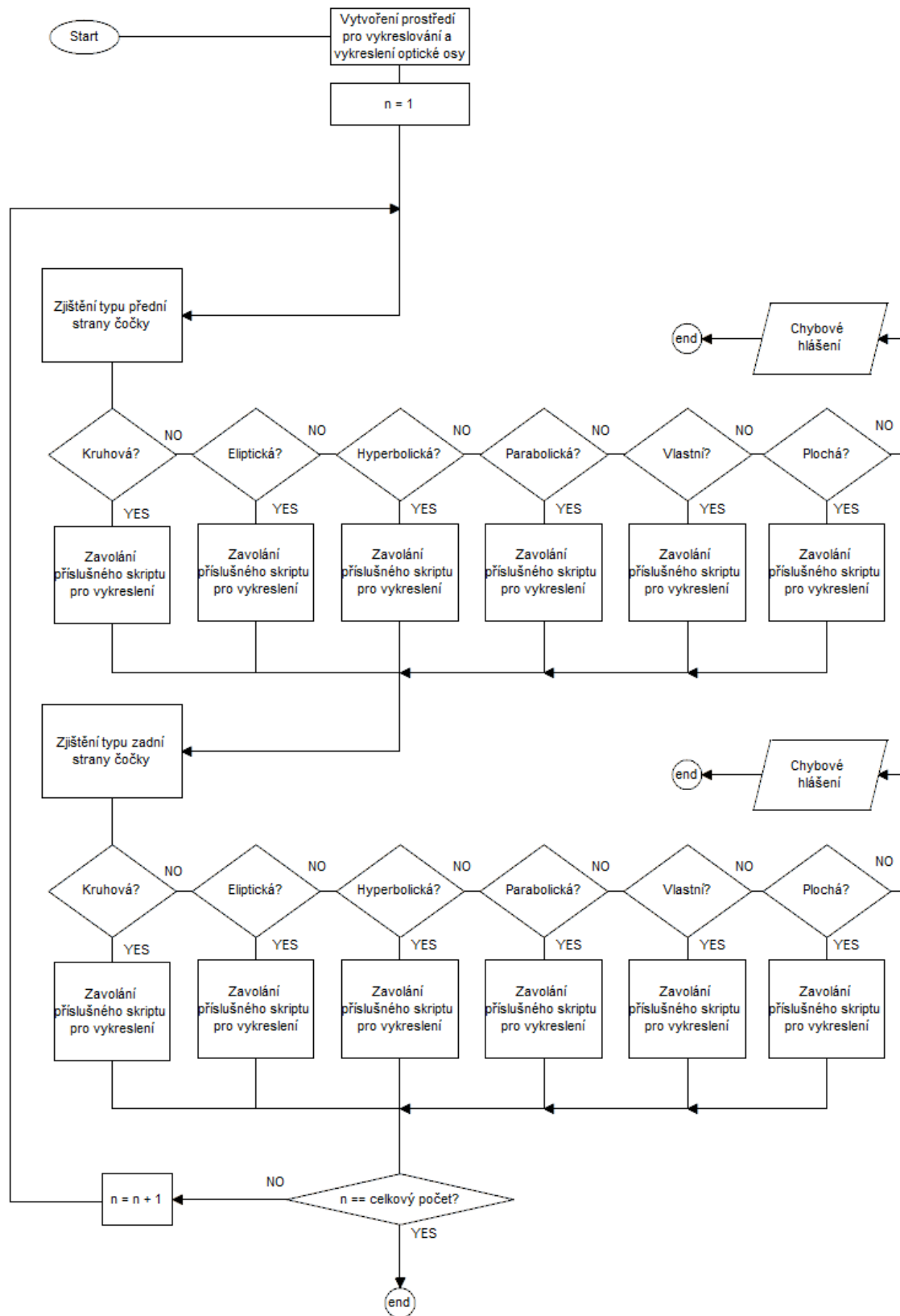
Program byl navržen a vytvořen v programovém prostředí Matlab2017a od společnosti MathWorks. Prostředí Matlab2017a bylo zvoleno kvůli předchozím zkušenostem s tímto programovým prostředím. Grafické uživatelské rozhraní je navrženo v rozšíření k Matlab2017a s názvem App Designer.

5.2 Vytváření optické soustavy



Obr. 7 Náhled na panel pro vytváření optické soustavy

První část programu je panel pro vytváření optické soustavy. Uživatel má možnost nastavení počtu čoček a všech parametrů potřebných k vytvoření jednotlivých čoček popsanych v třetí kapitole. V panelu se také nastavují indexy lomu pro prostředí optické soustavy potřebné pro analýzu optické soustavy. Po zadání parametrů a stisknutí tlačítka “Vykresli“ dojde k uložení hodnot do paměti a spustí se skript pro vykreslení optické soustavy, který je znázorněn na vývojovém digramu na obr. 8 [11]. Vykreslení jednotlivých stran je popsáno ve třetí kapitole.



Obr. 8 Diagram skriptu pro vykreslování optické soustavy

5.3 Analýza optické soustavy

Papřek	Výška Papřku	Ohmška	Vstup do 1. čočky	Výstup z 1. čočky	Vstup do 2. čočky	Výstup z 2. čočky	Vstup do 3. čočky	Výstup z 3. čočky
Papřek 1	18 [2509 7154, 0]		[-4.243, 18]	[4.2663, 18.2561]	[10.8916, 18.8633]	[19.3463, 19.109]	[25.9746, 19.7208]	
Papřek 2	15 [2534.8624, 0]		[-3.9946, 15]	[4.0098, 15.2006]	[10.6174, 15.7033]	[19.005, 15.9077]	[25.6747, 16.4141]	
Papřek 3	12 [2555.4145, 0]		[-3.7917, 12]	[3.8009, 12.1521]	[10.3943, 12.5521]	[18.836, 12.7155]	[25.4307, 13.1184]	
Papřek 4	8 [2575.6932, 0]		[-3.5914, 8]	[3.5953, 8.0959]	[10.1749, 8.3612]	[18.6108, 8.47]	[25.1909, 8.7372]	
Papřek 5	5 [2585.5722, 0]		[-3.4939, 5]	[3.4953, 5.0583]	[10.0682, 5.2237]	[18.5014, 5.2916]	[25.0745, 5.4582]	
Papřek 6	-5 [2585.5722, 0]		[-3.4939, -5]	[3.4953, -5.0583]	[10.0682, -5.2237]	[18.5014, -5.2916]	[25.0745, -5.4582]	
Papřek 7	-8 [2575.6932, 0]		[-3.5914, -8]	[3.5953, -8.0959]	[10.1749, -8.3612]	[18.6108, -8.47]	[25.1909, -8.7372]	
Papřek 8	-12 [2555.4145, 0]		[-3.7917, -12]	[3.8009, -12.1521]	[10.3943, -12.5521]	[18.836, -12.7155]	[25.4307, -13.1184]	
Papřek 9	-15 [2534.8624, 0]		[-3.9946, -15]	[4.0098, -15.2006]	[10.6174, -15.7033]	[19.005, -15.9077]	[25.6747, -16.4141]	
Papřek 10	-18 [2509 7154, 0]		[-4.243, -18]	[4.2663, -18.2561]	[10.8916, -18.8633]	[19.3463, -19.109]	[25.9746, -19.7208]	

Papřek	Vstup z 3. čočky	Vstup do 4. čočky	Vstup z 4. čočky	Vstup do 5. čočky	Výstup z 5. čočky	Totální odraz
Papřek 1	[34.0029, 19.9457]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 2	[34.3086, 16.6157]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 3	[34.558, 13.2889]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 4	[34.8038, 8.8569]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 5	[34.9234, 5.5348]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 6	[34.9234, -5.5348]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 7	[34.8038, -8.8569]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 8	[34.558, -13.2889]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 9	[34.3086, -16.6157]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Papřek 10	[34.0029, -19.9457]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]

Ohmška	Červená	Zelená	Modrá	Chromatická chyba	Otvorová chyba
Papřek 1	2.5097e+03	2.6161e+03	2.7319e+03	222.1799	82.1870
Papřek 2	2.5349e+03	2.6432e+03	2.7613e+03	226.3961	57.0401
Papřek 3	2.5554e+03	2.6654e+03	2.7853e+03	229.8623	36.4879
Papřek 4	2.5757e+03	2.6873e+03	2.8090e+03	233.3002	16.2092
Papřek 5	2.5856e+03	2.6979e+03	2.8206e+03	234.9814	6.3303
Papřek 6	2.5856e+03	2.6979e+03	2.8206e+03	234.9814	6.3303
Papřek 7	2.5757e+03	2.6873e+03	2.8090e+03	233.3002	16.2092
Papřek 8	2.5554e+03	2.6654e+03	2.7853e+03	229.8623	36.4879
Papřek 9	2.5349e+03	2.6432e+03	2.7613e+03	226.3961	57.0401
Papřek 10	2.5097e+03	2.6161e+03	2.7319e+03	222.1799	82.1870

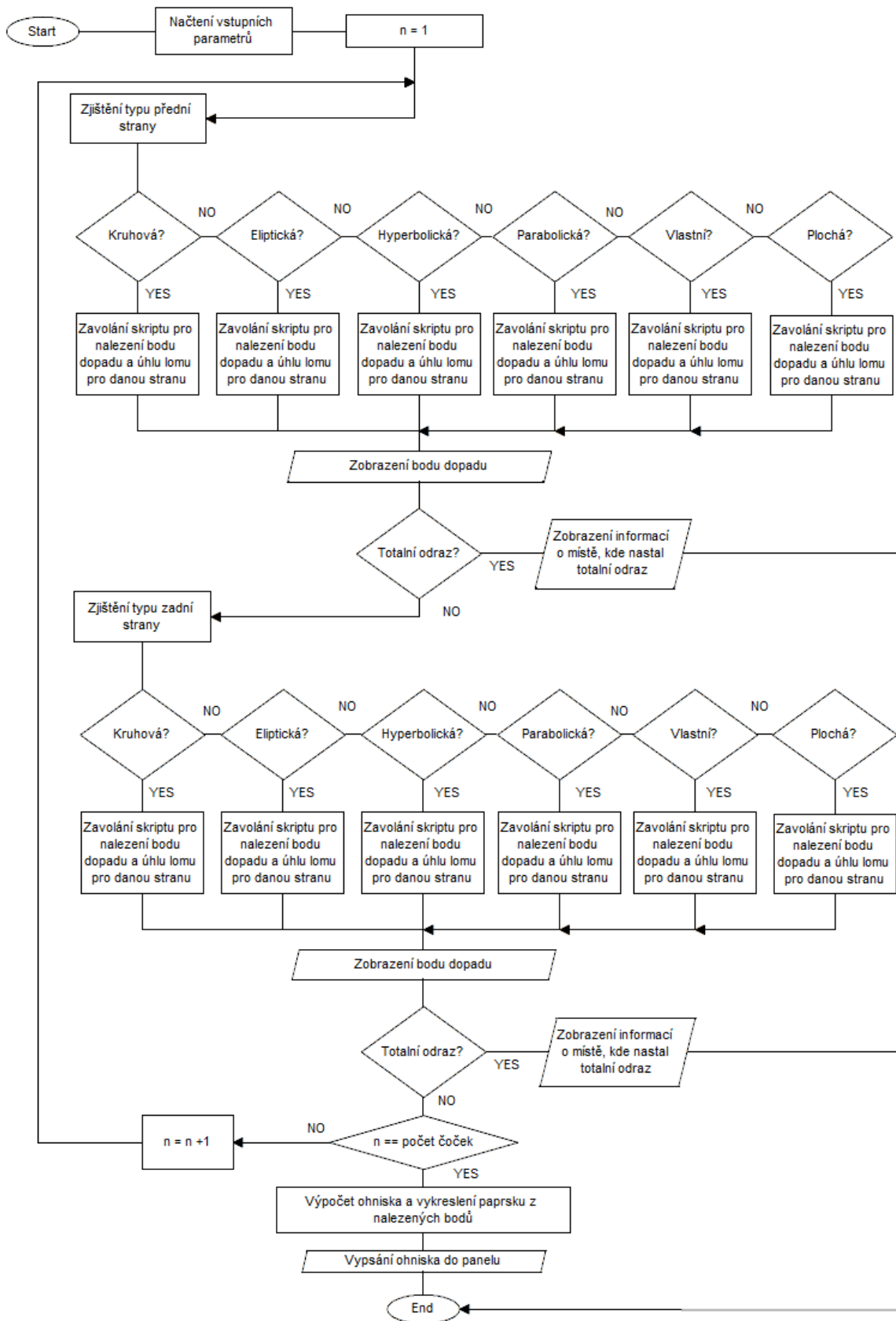
Paraxiální ohnisko
2592

Poslat papřsky

Obr. 9 Náhled na panel s papřsky a vlastnostmi optické soustavy

Druhá část programu je část analýzy optické soustavy. Jak je popsáno ve čtvrté kapitole, analýza se provádí pomocí papřků rovnoběžných s optickou osou. Vzdálenost papřků od optické osy se nastavuje v prostředí v panelu s Papřsky a vlastnostmi čoček. Pro spuštění analýzy je nutné, aby uživatel nastavil všechny parametry optické soustavy v panelu s parametry a určil alespoň jednu nenulovou vzdálenost papřku od optické osy. Analýza se spustí stiskem tlačítka “Poslat papřsky“.

Analýza probíhá ve skriptu, který je znázorněn na obr. 9 [11]. Tento skript je volán pro každý papřek s nenulovou vzdáleností od optické osy. Po průběhu tohoto skriptu se v panelu Papřků a vlastností čoček zobrazí body dopadů papřků na všechna rozhraní v soustavě nebo se zobrazí místo, kde došlo k totálnímu odrazu. Pokud byla zvolena analýza pro různé vlnové délky, může uživatel přepínat mezi jednotlivými vlnovými délkami. Nakonec se zobrazí chyby optické soustavy a paraxiální ohnisko.



Obr. 10 Diagram skriptu pro výpočet bodů dopadu paprsků a vykreslování paprsků

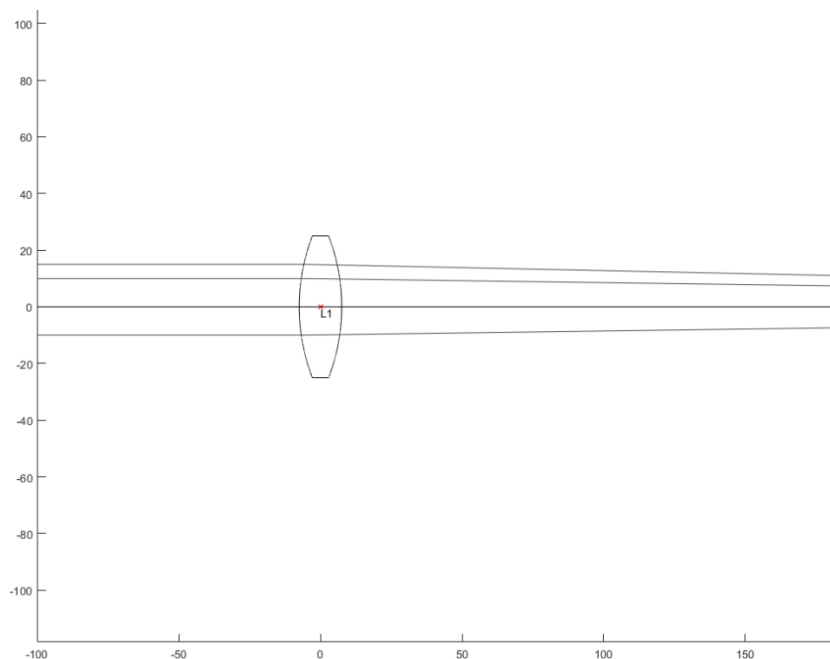
6 Testování programu

6.1 Návrh testování

Program byl testován porovnáváním výstupních hodnot programu určitých optických soustav s hodnotami vypočítanými. Postup výpočtů je v příloze k bakalářské práci. Test probíhal vytvořením optické soustavy s parametry a následně analýzou soustavy určitým počtem paprsků. Testovali se body dopadu na jednotlivá rozhraní, ohniska optické soustavy pro jednotlivé paprsky, paraxiální ohnisko, otvorové chyby a případně i chromatické chyby. Před výslednou tabulkou jsou uvedeny vstupní parametry soustavy. Index lomu okolí byl při testování vždy roven jedné, proto je uváděn pouze index lomu čoček. Testovány byly základní optické soustavy většinou tvořené jedním optickým prvkem vzhledem k obtížným manuálním výpočtům.

6.2 Sférická čočka

1.2.1 Bikonvexní čočka



Obr. 11 Grafický výstup programu při testu 6.2.1

$D = 50 \text{ mm}, w = 15 \text{ mm}, r_1 = 70 \text{ mm}, r_2 = 70 \text{ mm}, h_1 = 10 \text{ mm}, h_2 = 15 \text{ mm}, h_3 = -15 \text{ mm}, n =$

	Výška paprsku[mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	10	[-6,782; 10]	[6,8075; 9,8218]	349,6533	4,4041
Výpočet		[-6,782; 10]	[6,8075; 9,8218]	345,936	5,5631
Program	15	[-5,874; 15]	[5,9251; 14,7651]	344,0404	10,017
Výpočet		[-5,874; 15]	[5,9251; 14,7652]	342,02	8,4791
Program	-10	[-6,782; -10]	[6,8075; -9,8218]	349,6533	4,4041
Výpočet		[-6,782; -10]	[6,8075; -9,8218]	345,936	5,5631

Tab.1 - Testování sférické bikonvexní čočky

1.2.2 Bikonkávní čočka

$D = 60 \text{ mm}, w = 13 \text{ mm}, r_1 = 80 \text{ mm}, r_2 = 80 \text{ mm}, h_1 = 12 \text{ mm}, h_2 = 18 \text{ mm}, h_3 = -12 \text{ mm}, n = 1,2$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	12	[-1,5671; 12]	[1,5792; 12,0794]	-195,8781	3,7354
Výpočet		[-1,5671; 12]	[1,5792; 12,0794]	-193,945	3,854
Program	18	[-2,7133; 18]	[2,7621; 18,21]	-191,0347	8,5787
Výpočet		[-2,7133; 18]	[2,7621; 18,21]	-190,0984	6,815
Program	-12	[-1,5671; -12]	[1,5792; -12,0794]	-195,8781	3,7354
Výpočet		[-1,5671; -12]	[1,5792; -12,0794]	-193,945	3,854

Tab. 2 - Testování sférické bikonkávní čočky

1.2.3 Konvexkonkávní čočka

$D = 70 \text{ mm}, w = 10 \text{ mm}, r_1 = 90 \text{ mm}, r_2 = 90 \text{ mm}, h_1 = 15 \text{ mm}, h_2 = 20 \text{ mm}, h_3 = -15 \text{ mm}, n = 1,3$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	15	[-3,7412; 15]	[1,9176; 14,7798]	19383,7985	858,7726
Výpočet		[-3,7412; 15]	[1,9176; 14,7798]	19375,1124	862,3364
Program	20	[-2,7496; 20]	[2,8794; 19,7053]	18728,3374	1514,21
Výpočet		[-2,7496; 20]	[2,8794; 19,7053]	18725,0138	1512,435
Program	-15	[-3,7412; -15]	[1,9176; -14,7798]	19383,7985	858,7726
Výpočet		[-3,7412; -15]	[1,9176; -14,7798]	19375,1124	862,3364

Tab. 3 - Testování sférické konvexkonkávní čočky

1.2.4 Plankonvexní čočka

$D = 65 \text{ mm}, w = 16 \text{ mm}, r = 85 \text{ mm}, h_1 = 15 \text{ mm}, h_2 = 20 \text{ mm}, h_3 = -15 \text{ mm}, n = 1,4$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	17	[-6,2827; 17]	[8; 16,1705]	206,5633	2,5082
Výpočet		[-6,2827; 17]	[8; 16,1705]	205,9913	2,5204
Program	22	[-5,1036; 22]	[8; 21,004]	204,842	4,2294
Výpočet		[-6,2827; -17]	[8; 21,004]	204,372	4,1397
Program	-17	[-6,2827; -17]	[8; -16,1705]	206,5633	2,5082
Výpočet		[-6,2827; -17]	[8; -16,1705]	205,9913	2,5204

Tab. 4 - Testování sférické plankonvexní čočky

1.2.5 Testování rozsahu indexu lomu (bikonvexní čočka)

$D = 50 \text{ mm}$; $w = 15 \text{ mm}$; $r_1 = 100 \text{ mm}$; $r_2 = 100 \text{ mm}$; $h = 20 \text{ mm}$; $n_1 = 1,5$; $n_2 = 2$; $n_3 = 2,5$;
 $n_4 = 3$

	Index lomu [-]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	1,5	[-5,4796; 20]	[5,6302; 19,2475]	98,5486	6,3873
Výpočet		[-5,4796; 20]	[5,6302; 19,2475]	97,1498	7,1253
Program	2	[-5,4796; 20]	[5,7046; 18,8644]	47,7983	7,7536
Výpočet		[-5,4796; 20]	[5,7046; 18,8644]	46,9902	8,2355
Program	2,5	[-5,4796; 20]	[5,749; 18,6316]	29,0189	10,2439
Výpočet		[-5,4796; 20]	[5,749; 18,6316]	28,5656	10,7521
Program	3	[-5,4796; 20]	[5,7786; -16,1705]	16,3321	14,8521
Výpočet		[-5,4796; 20]	[5,7786; -16,1705]	15,8001	15,0054

Tab. 5 - Testování rozsahu indexu lomu na sférické bikonvexní čočce

1.2.6 Testování soustavy pro různé vlnové délky (konvexkonkávní čočka)

$D = 60 \text{ mm}$; $w = 12 \text{ mm}$; $r_1 = 120 \text{ mm}$; $r_2 = 120 \text{ mm}$; $h = 15 \text{ mm}$; $n_r = 1,513$; $n_g = 1,519$;
 $n_b = 1,525$

	Barva	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Chromatická chyba[mm]
Program	Červená	[-5,0588; 15]	[3,0874; 14,6526]	9668,6025	359,6351
Výpočet		[-5,0588; 15]	[3,0874; 14,6526]	9675,2332	360,5124
Program	Zelená	[-5,0588; 15]	[3,0871; 14,65]	9488,9708	359,6351
Výpočet		[-5,0588; 15]	[3,0871; 14,65]	9494,119	360,5124
Program	Modrá	[-5,0588; 15]	[3,0868; 14,6474]	9308,9674	359,6351
Výpočet		[-5,0588; 15]	[3,0868; 14,6474]	9314,7208	360,5124

Tab. 6 - Testování soustavy pro různé vlnové délky paprsků na konvexkonkávní čočce

Poznámka: Při tomto testování byly použity hodnoty indexu lomu skla BK7 (Borokřemičité sklo) [10], které se používá u jednoduchých dalekohledů.

6.3 Eliptická čočka (bikonvexní)

$D = 50 \text{ mm}, w = 10 \text{ mm}, a_1 = 80 \text{ mm}, b_1 = 40, \text{ mm}, a_2 = 80 \text{ mm}, b_2 = 40, \text{ mm}, h_1 = 12 \text{ mm},$

$h_2 = 16 \text{ mm}, h_3 = -12 \text{ mm}, n = 1,3$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	12	[-4,5474; 12]	[4,5594; 11,8407]	265,9482	3,7815
Výpočet		[-4,5474; 12]	[4,5594; 11,8407]	265,9497	3,8342
Program	16	[-4,1918; 16]	[4,2119; 15,8023]	262,9627	6,767
Výpočet		[-4,1918; 16]	[4,2119; 15,8022]	262,9641	6.8198
Program	-12	[-4,5474; -12]	[4,5594; -11,8407]	265,9482	3,7815
Výpočet		[-4,5474; -12]	[4,5594; -11,8407]	265,9497	3,8342

Tab. 7 - Testování eliptické bikonvexní čočky.

6.4 Hyperbolická čočka (bikonkávní)

$D = 50 \text{ mm}, w = 14 \text{ mm}, a_1 = 30 \text{ mm}, b_1 = 80, \text{ mm}, a_2 = 30 \text{ mm}, b_2 = 80, \text{ mm}, h_1 = 10 \text{ mm},$

$h_2 = 17 \text{ mm}, h_3 = -10 \text{ mm}, n = 1,2$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	10	[-5,8027; 10]	[5,8069; 10,09]	-541,0253	3,8137
Výpočet		[-5,8027; 10]	[5,8069; 10,09]	-541,0015	4,0976
Program	17	[-6,2391; 17]	[6,2518; 17,1622]	-533,8883	10,9508
Výpočet		[-6,2391; 17]	[6,2518; 17,1623]	-534,7091	10,39
Program	-10	[-5,8027; -10]	[5,8069; -10,09]	-541,0253	3,8137
Výpočet		[-5,8027; -10]	[5,8069; -10,09]	-541,0015	4,0976

Tab. 8 - Testování hyperbolické bikonkávní čočky

6.5 Parabolická čočka (konvexkonkávní)

$D = 60 \text{ mm}, w = 13 \text{ mm}, p_1 = 50 \text{ mm}, p_2 = 50 \text{ mm}, h_1 = 15 \text{ mm}, h_2 = 20 \text{ mm},$

$h_3 = -15 \text{ mm}, n = 1,1$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do čočky	Výstup z čočky	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]
Program	15	[-4,25; 15]	[4,3193; 14,7672]	250,7303	2,7798
Výpočet		[-4,25; 15]	[4,3193; 14,7672]	245,4581	4,1574
Program	20	[-2,5; 20]	[2,573; 19,8167]	248,4252	5,0849
Výpočet		[-2,5; 20]	[2,573; 19,8167]	244,0023	5,6132
Program	-15	[-4,25; -15]	[4,3193; -14,7672]	20999,2369	2,7798
Výpočet		[-4,25; -15]	[4,3193; -14,7672]	245,4581	4,1574

Tab. 9 - Testování hyperbolické bikonkávní čočky

6.6 Soustavy čoček

6.6.1 Jednoduchý dalekohled

$D = 60 \text{ mm}$; $w_1 = 10 \text{ mm}$; $w_2 = 10 \text{ mm}$; $r_{11} = 500 \text{ mm}$; $r_{12} = 500 \text{ mm}$; $r_{21} = 500 \text{ mm}$; $r_{22} = 500 \text{ mm}$, $h_1 = 5 \text{ mm}$; $h_2 = 10 \text{ mm}$; $n_1 = 1,5$; $n_2 = 1,5$; $\text{distance} = 30 \text{ mm}$

	Výška paprsku [mm]	Vstup do 1. čočky	Výstup z 1. čočky	Vstup do 2. čočky	Výstup z 2. čočky
Program	5	[-4,975; 5]	[4,9753; 4,96668]	[25,8782; 4,7585]	[34,1216; 4,7298]
Výpočet		[-4,975; 5]	[4,9753; 4,96668]	[25,8787; 4,7584]	[34,1214; 4,7295]
Program	10	[-4,9; 10]	[4,9013; 9,9346]	[25,8102; 9,5176]	[34,1887; 9,4594]
Výpočet		[-4,9; 10]	[4,9013; 9,9346]	[25,8101; 9,5175]	[34,1889; 9,4592]
	Výška paprsku [mm]	Ohnisko[mm]	Otvorová chyba[mm]		
Program	5	9916,5442	3,9784		
Výpočet		9908,5771	4,7366		
Program	10	9904,6092	15,9133		
Výpočet		9897,2923	16,0214		

Tab. 10 - Testování soustavy dvou čoček – spojky a rozptylky

7 Závěr

Cíl mojí práce bylo navrhnout prostředí pro návrh optických soustavy a zjišťování jejich vlastností. V prostředí je možné navrhovat čočky s pěti základní druhy ploch. Dále je možné určit index lomu materiálu optických prvků až pro tři různé vlnové délky a najednou si zobrazit procházející paprsky o těchto vlnových délkách.

Prostředí bylo navrženo v App Designeru, což je nástroj pro vytváření uživatelského prostředí v Matlabu. Kdybych měl práci dělat znova, asi bych si App Designer pro návrh prostředí znova nevybral, protože v něm je spousta omezení. V App Designeru se přepíná mezi designovým a kódovým pohledem a v každém pohledu se zobrazují u komponent jen určité atributy, a proto se musí často mezi těmito dvěma pohledy přepínat, což značně zdržovalo při práci. Dále při práci v App Designeru chyběla funkce vytváření sekcí, což je u skriptů v Matlabu možné.

Program byl testován na základních typech čoček i na složitějších soustavě. Hodnoty při testování všech typů čoček se shodovali s hodnotami vypočtenými, kromě hodnot při testování vlastní čočky (čočka, která se zadává množinou bodů do tabulky). Tento problém nebyl vyřešen a v programu zůstává, a proto možnost zadávání vlastního typu čočky není splněna.

Další věc, která by se na programu dala zlepšit, je jeho časová náročnost. Při analýze s pěti optickými prvky a s deseti paprsky s režimem pro různé vlnové délky byla délka kompilace a běhu programu na mém počítači 2 minuty a 52 sekund.

Vedoucí práce navrhoval, aby program obsahoval další funkci. Funkcí měla být schopna vypočítat tvar jedné strany optického prvku, tak aby všechny paprsky rovnoběžné s optickou osou procházející tímto prvkem měli stejné ohnisko. Problém jsem se snažil řešit a však vyzkoušení několika řešení bylo od tohoto návrhu odstoupeno.

Další funkce, kterou požadoval vedoucí práce, měla být funkce, která by uměla určovat indexy lomu speciální čočky, která by byla rozdělena do části s tím, že každá část má vlastní index lomu. Uživatel by do této funkce zadal požadované ohnisko a tvar této čočky a byly by mu navraceny hodnoty indexů lomu pro jednotlivé části čočky. Problém této funkce byl takový, že pokud by části speciální čočky nebyly nekonečně krátké, tak by existoval vždy jen jeden paprsek

pro každou část, který by měl požadované ohnisko. Dále byl problém, že u některých čoček by musel být index lomu u části čočky vzdálených od optické osy velmi velký (řádově desítky). Po konzultaci s vedoucím práce bylo od požadavku odstoupeno.

Program splňuje zadání pro vytváření a analýzy optických soustavy různých typů čoček, kromě typu čočky zadávané uživatelem pomocí tabulky bodů. Tento typ čočky je program schopen vykreslit, ale provedená analýza této čočky je chybná. Aby bylo tento program možné použít pro výuku, jak je zamýšleno, muselo by se udělat testování na subjektech v cílové věkové skupině.

Seznam použité literatury

- [1] Klimeš, B. – Kracík, J. – Ženíšek, A.: Základy fyziky II., Academia, Praha 1972, v pozdějších vydáních.
- [2] <http://www.handprint.com/ASTRO/ae1.html>(16.2.2018)
- [3] <http://www.astro.cz/rady/serialy/teleskopie.html?hledat=Teleskopie>(16.2.2018)
- [4] Pomykalová, Eva: Matematika pro gymnázia: Planimetrie, Prometheus, 2004, ISBN 80-7196-174-4
- [5] https://www.karlin.mff.cuni.cz/~portal/analyticka_geometrie/kuzelosecky.php
- [6] Lepil, Oldřich.: Fyzika pro gymnázia: Optika, Prometheus, 2004, ISBN: 978-80-7196-444-5
- [7] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/471-zobrazovani-optickymi-soustavami>
- [8] <https://maths.cz/>
- [9] <https://lifeinplaintextblog.wordpress.com/matlab-app-designer-tutorial-1-english/>
- [10] <https://refractiveindex.info/>
- [11] <https://www.itnetwork.cz/navrh/uml/vyvojove-diagramy>

Seznam příloh

- I. Příklad výpočtu při testování programu pro test 6.2.1
- II. Grafický výstup programu při testování v šesté kapitole
- III. CD s pdf kopií práce a programem

Příloha I. – Příklad výpočtu při testování programu pro test 6.2.1

Pro paprsek ve výšce $h_1 = 10$ mm

Bodu dopad paprsku na vstup 1. čočky:

$$\{(x - 62.5)^2 + y^2 = 70^2, y = 10\}$$

$$x \approx -6.78203, \quad y = 10$$

$$\mathbf{D}_1 [x_1, y_1] = [-6,782; 10]$$

$$\text{Úhel dopadu paprsku: } \alpha_d = \arcsin \frac{y_1}{r_1} \approx 0,14334$$

$$\text{Úhel lomu paprsku: } \alpha_l = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} * \sin \alpha_d \right) \approx 0,13024$$

$$\text{Úhel paprsku s optickou osou po lomu: } \alpha_p = -\arcsin \frac{y_1}{r_1} + \alpha_l \approx -0,01311$$

$$\text{Směrnice paprsku: } k_1 = \tan \alpha_p \approx -0.01311$$

$$\text{Posunutí paprsku: } q_1 = y_1 + kx_1 = 9,911$$

Bodu dopad paprsku na výstup 1. čočky:

$$\{(x + 62.5)^2 + y^2 = 70^2, y = -0.0131x + 9.911\}$$

$$x \approx 6.80752, \quad y \approx 9.82182$$

$$\mathbf{D}_2 [x_2, y_2] = [6,80752; 9,82182]$$

$$\text{Úhel dopadu paprsku: } \alpha_d = \arcsin \frac{y_2}{r_2} - \arctan k_1 \approx 0,153887$$

$$\text{Úhel lomu paprsku: } \alpha_l = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} * \sin \alpha_d \right) \approx 0,169418$$

$$\text{Úhel paprsku s optickou osou po lomu: } \alpha_p = \arcsin \frac{y_1}{r_1} - \alpha_l \approx -0,0286418$$

$$\text{Směrnice paprsku: } k = \tan \alpha_p \approx -0.02865$$

$$\text{Posunutí paprsku: } q = y_1 + kx_1 = 9,911069$$

Výpočet ohniska

$$-0.02865x + 9.911069 = 0$$

$$x \approx 345.936$$

Pro paprsek ve výšce $h_2 = 15 \text{ mm}$

Bodu dopadu paprsku na vstup 1. čočky:

$$\{(x - 62.5)^2 + y^2 = 70^2, y = 15\}$$

$$x \approx -5.87397, \quad y = 15$$

$$\mathbf{D_1 [x_1, y_1] = [-5,87397; 15]}$$

$$\text{Úhel dopadu paprsku: } \alpha_d = \arcsin \frac{y_1}{r_1} \approx 0,21596$$

$$\text{Úhel lomu paprsku: } \alpha_l = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} * \sin \alpha_d \right) \approx 0,19606$$

$$\text{Úhel paprsku s optickou osou po lomu: } \alpha_p = -\arcsin \frac{y_1}{r_1} + \alpha_l \approx -0,019902$$

$$\text{Směrnice paprsku: } k_1 = \tan \alpha_p \approx -0.0199$$

$$\text{Posunutí paprsku: } q_1 = y_1 + kx_1 = 14,88308$$

Bodu dopadu paprsku na výstup 1. čočky:

$$\{(x + 62.5)^2 + y^2 = 70^2, y = -0.0199x + 14.88308\}$$

$$x \approx 5.92507, \quad y \approx 14.7652$$

$$\mathbf{D_2 [x_2, y_2] = [5,92507; 14,7652]}$$

$$\text{Úhel dopadu paprsku: } \alpha_d = \arcsin \frac{y_2}{r_2} - \arctan k_1 \approx 0,23416$$

$$\text{Úhel lomu paprsku: } \alpha_l = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} * \sin \alpha_d \right) \approx 0,25808$$

$$\text{Úhel paprsku s optickou osou po lomu: } \alpha_p = -\arcsin \frac{y_1}{r_1} + \alpha_l \approx -0,043831$$

$$\text{Směrnice paprsku: } k = \tan \alpha_p \approx -0.04386$$

$$\text{Posunutí paprsku: } q = y_1 + kx_1 = 15,001$$

Výpočet ohniska:

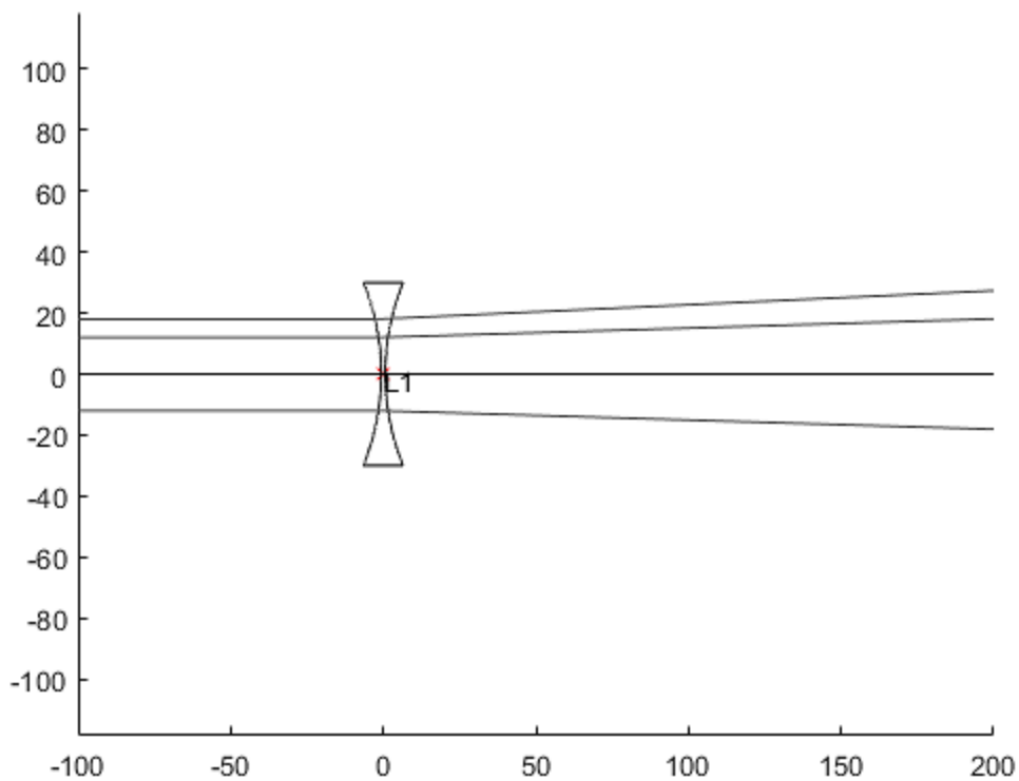
$$-0.04386x + 15.001 = 0$$

$$x \approx 342.02$$

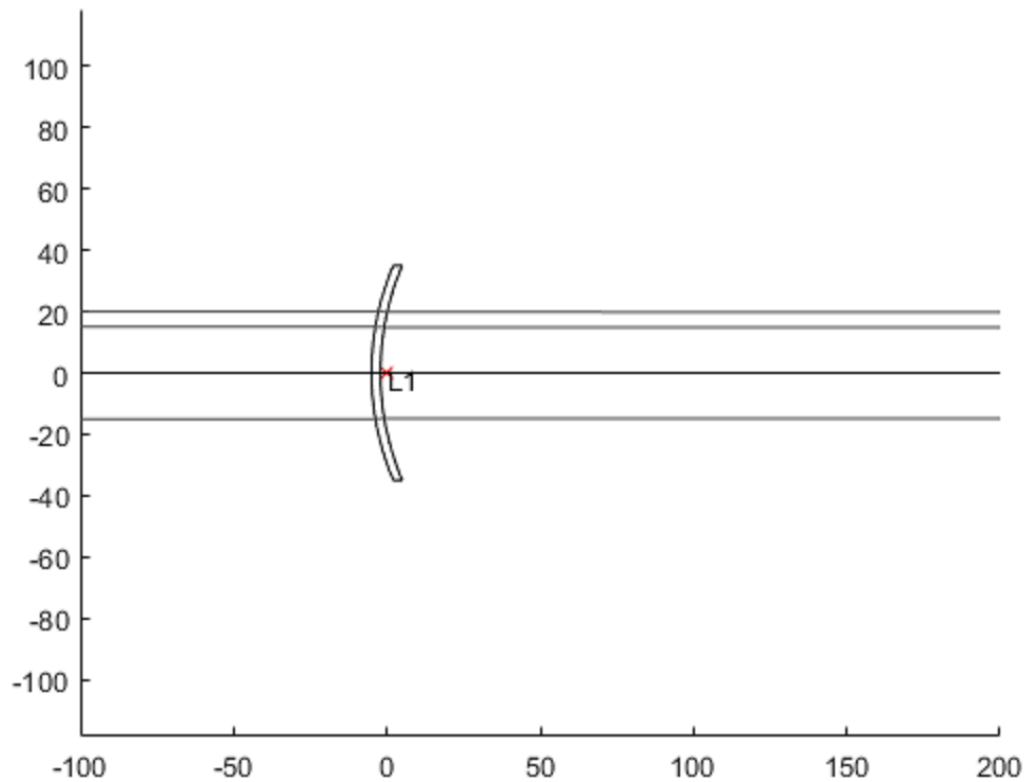
Pro paprsek ve výšce $h_3 = -10 \text{ mm}$

Postup je stejný jako v případě pro paprsek ve výšce 10 mm s tím rozdílem, že y-ové hodnoty jsou opačné.

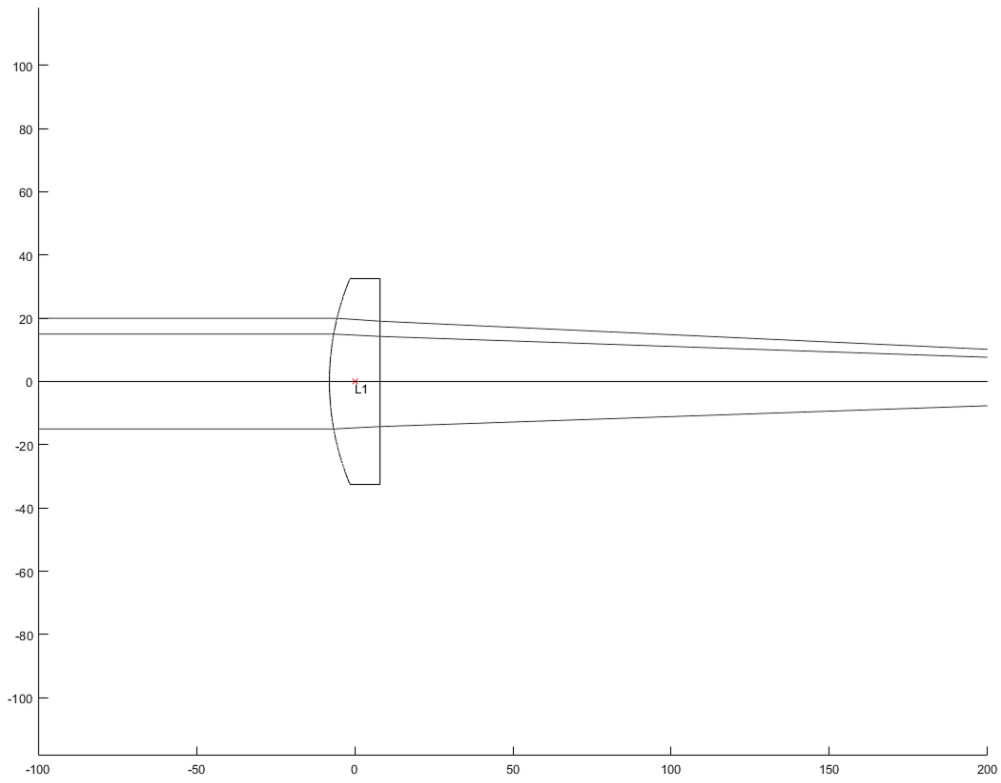
Příloha II. - Grafické výstupy programu při testování



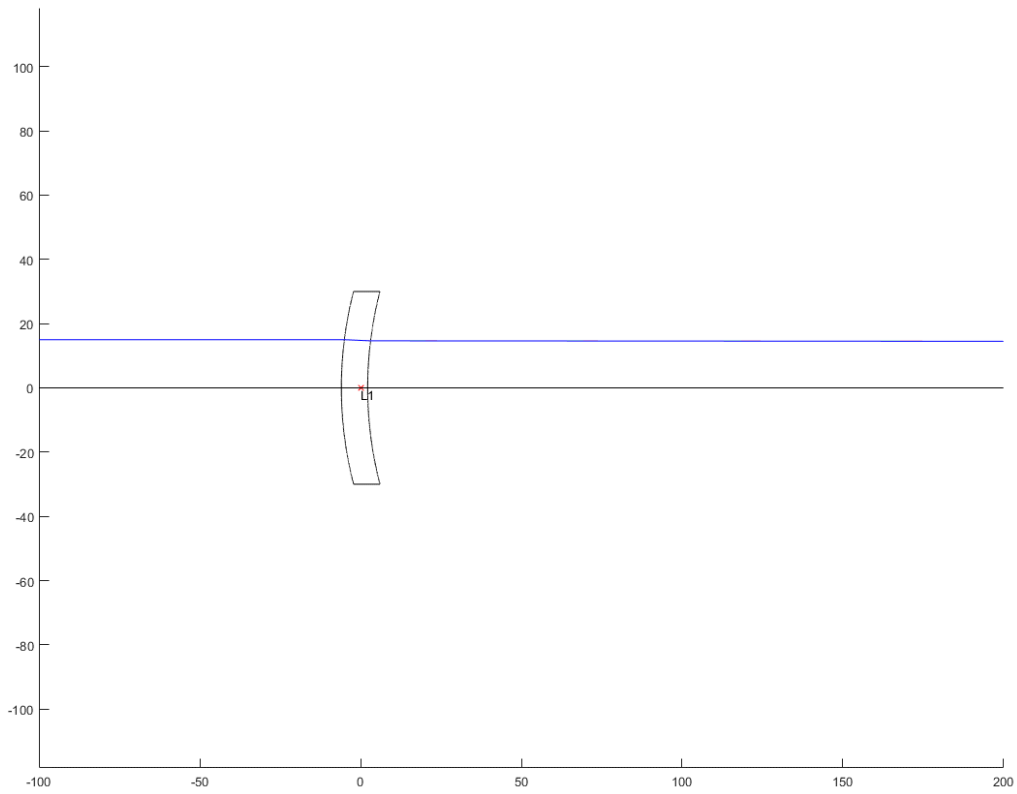
Grafický výstup programu při testování 6.2.2



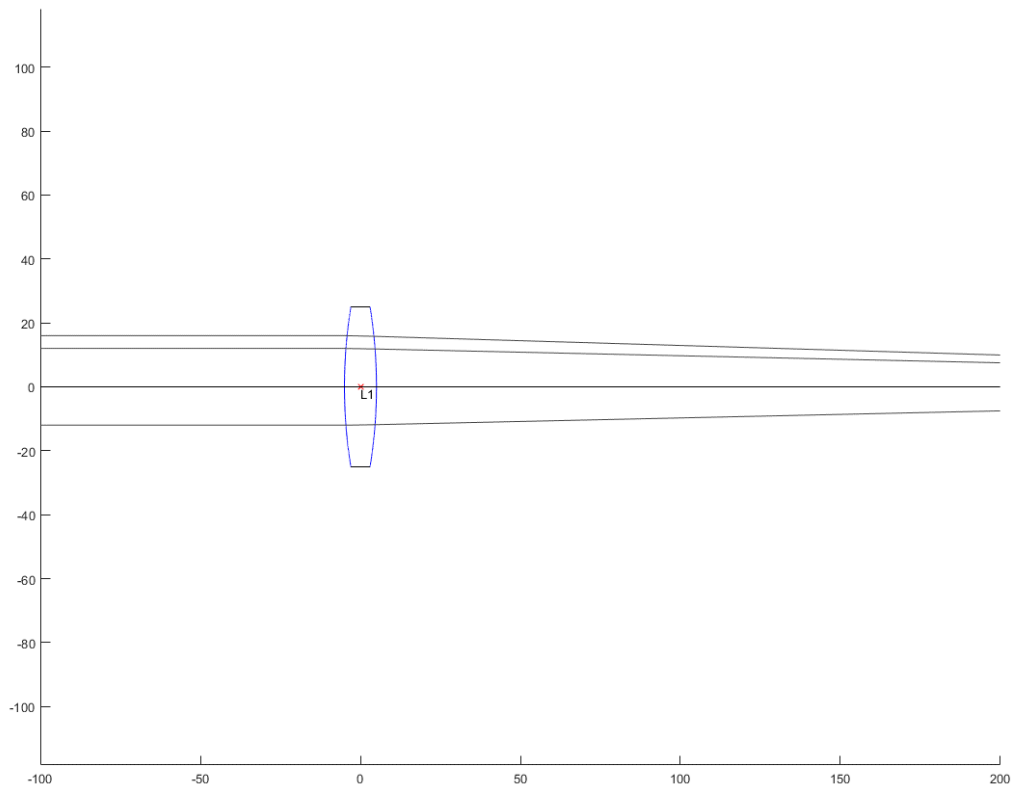
Grafický výstup programu při testování 6.2.3



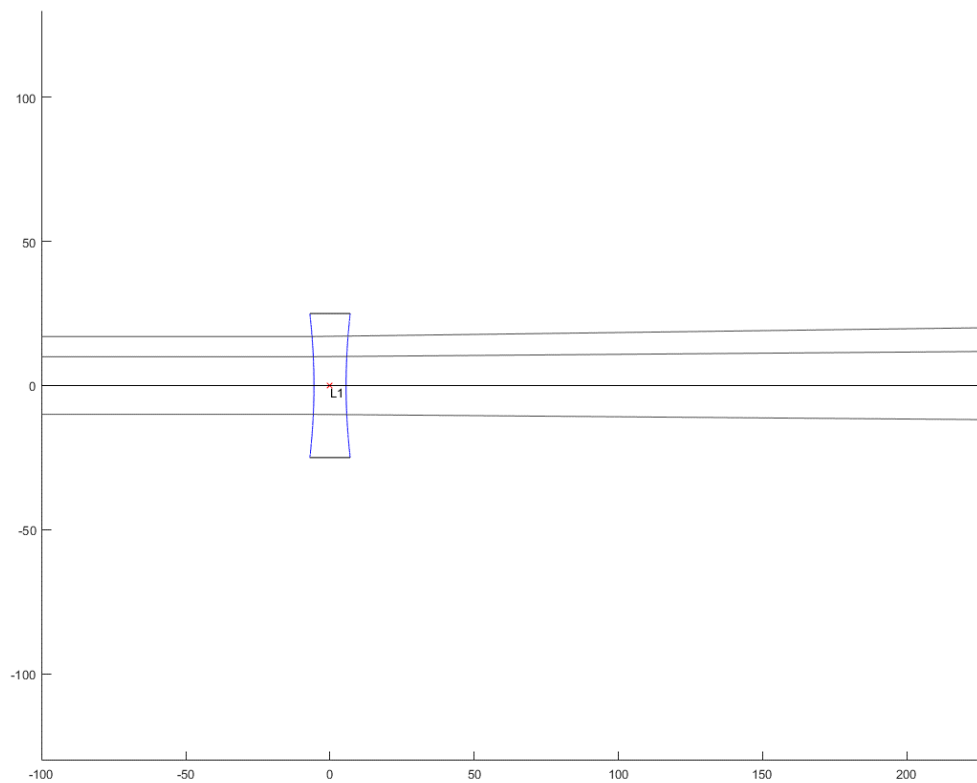
Grafický výstup programu při testování 6.2.4



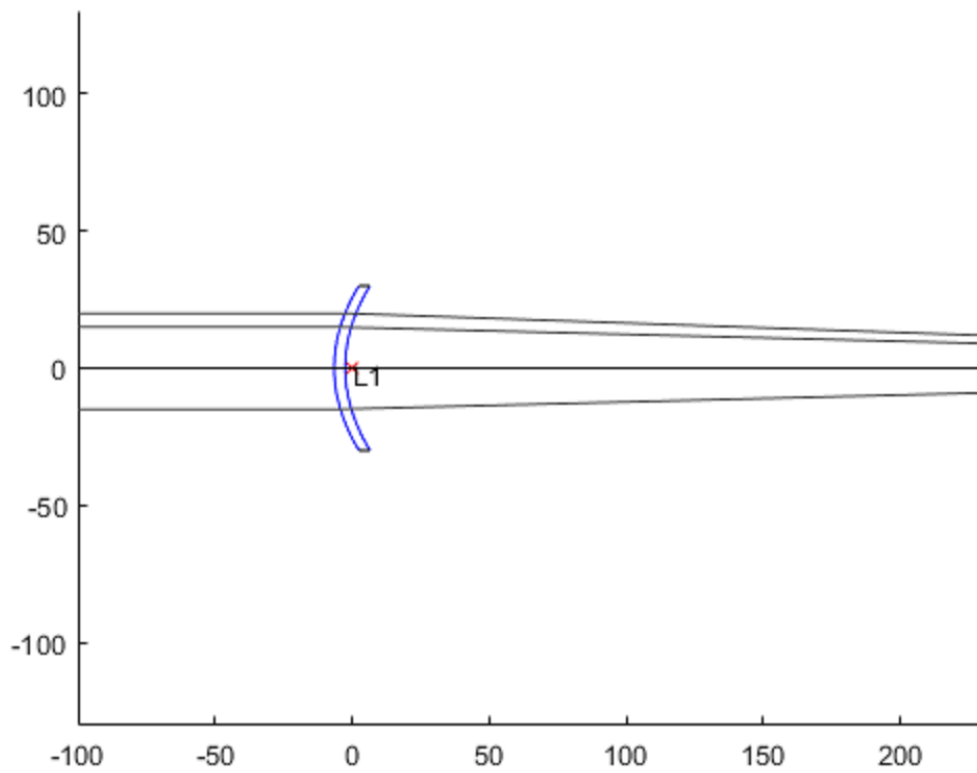
Grafický výstup programu při testování 6.2.6



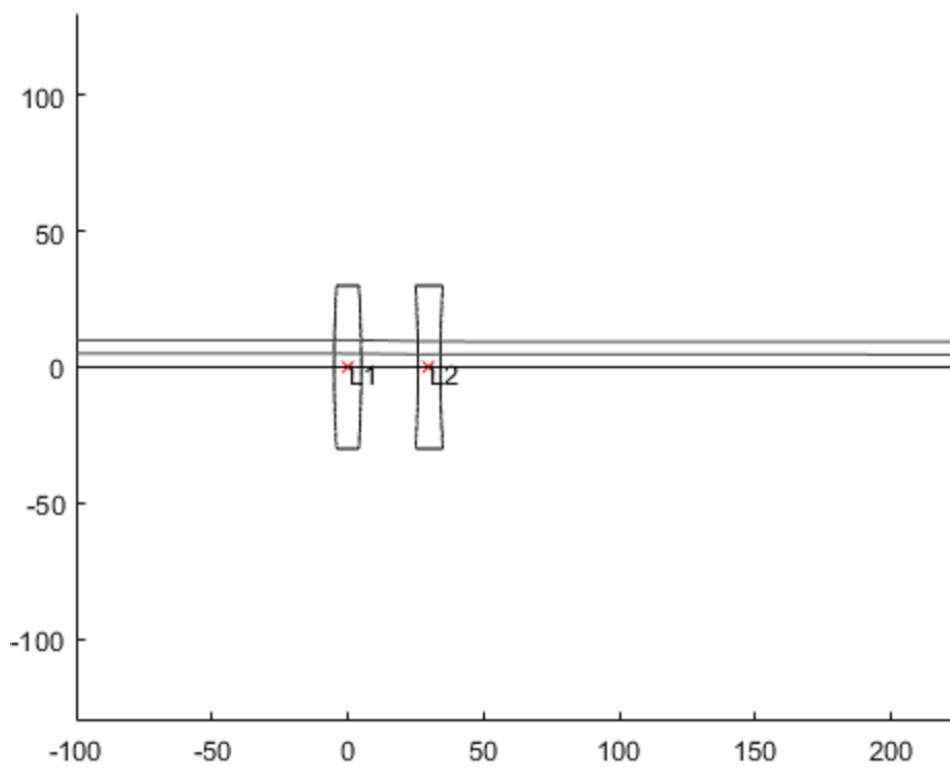
Grafický výstup programu při testování 6.3



Grafický výstup programu při testování 6.4



Grafický výstup programu při testování 6.5



Grafický výstup programu při testování 6.6.1