



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta biomedicínského inženýrství
Katedra biomedicínské techniky**

Lokace izocentra lineárních urychlovačů

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský inženýr

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Andrlé

Vypracoval: Bc. Daniel Cejnar

Kladno, květen

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem

Lokace izocentra lineárních urychlovačů vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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 dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat pan Ing. Jaromíru Andrlu, který mi během zpracování diplomové práce velice ochotně pomáhal a poskytoval mi cenné náměty, konzultace a rady. Svým odborným dohledem mi pomohl ke zdárnému ukončení této práce. Zároveň děkuji panu Ing. Martinu Rožánkovi, Ph.D. za konzultace spojené s formou diplomové práce.

Děkuji také svým rodičům, bratrovi a přátelům, kteří mě podporují jak duševně, tak i hmotně během celého studia.

Anotace

Studijní program:	Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor:	Biomedicínský inženýr
Jméno autora:	Daniel Cejnar
Akademický rok:	2015/2016
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Jaromír Andrlé
Odborný konzultant:	Ing. Martin Rožánek, Ph.D.

Abstrakt

Tato diplomová práce má za cíl navrhnout novou, jednodušší, efektivnější a přesnější metodu lokace izocentra laserového a světelného zaměřovacího systému lineárních urychlovačů oproti současné standardní okometrické metodě. Využilo se radiologických přístrojů od firmy PTW a světlocitlivé sondy, která byla navržena v této diplomové práci. Pro lokaci záměrné osy světelného pole se využívá metody hran a následně se vytvořeným skriptem záměrná osa světelného pole porovnává s laserovým izocentrem.

Při použití vodního fantomu pro ověření parametrů lineárních urychlovačů se výrazně zrychlila celá metoda měření. Současně se lokalizovalo izocentrum, které má dané souřadnice v umístěném fantomu a je možné tento bod porovnávat s dalšími naměřenými údaji jako je například radiační pole. Velikost světelného pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$ v rovině SSD byla určena na $9,9 \times 9,8 \text{ cm}^2$. Současně úhel, který svírá světelná osa s rovinou X, Y, byl roven $89,74^\circ$.

Přínosem této práce je vytvoření metody, která definuje izocentrum pomocí souřadnic v prostoru, ke kterému je možné se vracet v průběhu měření. A dále je nezávislá na ostatních parametrech a na zkušenostech pracovníka, který ověřování provádí.

Klíčová slova: lokalizace izocentra, lineární urychlovač, záměrný kříž, laserové pole, PTW

Abstract

The aim of this thesis is invent new, simpler, more efficient and more accurate method for localization of laser and light field isocenter than widely used standard eye-detected light field quality assurance. For localization was used radiology equipment made by PTW and light probe designed and constructed in this thesis. Edge method is used for localization of shadow cross in light field. This cross is then compared with located laser isocenter by designated script.

With usage of water phantom and constructed light probe the quality assurance of parameters were much faster. Also the located isocenter was set in phantom with obtained coordinates so it is possible to work with them in further quality assurance such as radiation field. Size of light field set as $10 \times 10 \text{ cm}^2$ in SSD was detected as $9,9 \times 9,8 \text{ cm}^2$. Angle between axis of light field cross center and horizontal plane was 89.74° .

Contribution of this thesis is creation of new method, that defines isocenter in space with three coordinates. The method is independent on other parameters of linear accelerator and it is not influenced by experiences of staff executing the quality assurance of linear accelerator. Coordinates can be also used in further quality assurance such as radiation field.

Key words: localization of Isocenter, linear accelerator, aiming cross for light field, laser field, PTW

Obsah

1. Seznam obrázků	8
2. Úvod.....	11
3. Současný stav.....	13
3.1 Popis lineárního urychlovače	13
3.2 Polohy lineárního urychlovače	15
3.3 Zaměřovací systém	16
3.3.1 Radiační pole.....	16
3.3.1.1 Kontrola radiačního pole.....	16
3.3.2 Světelné pole	17
3.3.2.1 Kontrola světelného pole [1]	17
3.3.3 Laserové pole	18
3.3.3.1 Kontrola laserového pole [1]	19
3.3.3.2 Lasery.....	19
3.3.4 Mechanické izocentrum	21
3.4 Standardní metody měření.....	21
3.4.1 Laserové pole	21
3.4.2 Světelné pole	22
3.5 Použité nástroje.....	22
4. Realizační část.....	29
4.1 Návrh sondy	29
4.1.1 Vzhled sondy	30
4.1.2 Součástky	34
4.1.2.1 Fotodioda.....	34
4.1.2.2 Konektory	36
4.1.2.3 Propojovací kabel	36

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

4.1.2.4	Usazení fotodiody	37
4.2	Postup měření	39
5.	Výsledky	41
5.1	Přesnost sondy.....	42
5.2	Vyhodnocovací postup pro kontrolu polohy izocentra	47
5.2.1	Laserové pole	47
5.2.2	Světelné pole	50
5.2.2.1	Skript pro výpočet záměrného kříže, světelné osy a její vzdálenosti od laserového izocentra	51
5.3	Naměřené hodnoty polohy izocentra.....	54
5.3.1	První měření	54
5.3.1.1	Světelné pole.....	54
5.3.1.2	Laserové pole	57
5.3.1.3	Poloha laserového izocentra a osy záměrného kříže světelného pole	58
5.3.2	Druhé měření.....	60
5.3.2.1	Laserové pole	60
5.3.2.2	Světelné pole.....	60
5.3.2.3	Standardní okometrické měření světelného pole.....	63
5.3.2.4	Poloha laserového izocentra a osy záměrného kříže světelného pole	65
5.3.3	Porovnání prvního a druhého měření	66
6.	Porovnání metod měření sondou a běžnými postupy	68
6.1	Návrhy pro vylepšení.....	69
7.	Diskuse	71
8.	Závěr	73
9.	Zdroje.....	75

1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Cesta fotonového paprsku, hlava gantry otočená o 90°

Obrázek 2: Osy rotace lineárního urychlovače [3]

Obrázek 3: LAP laser, systém ASTOR

Obrázek 4: MP3 Water Phantom

Obrázek 5: Mephysto navigator

Obrázek 6: Okno pro zadání nové sondy

Obrázek 7 Mephysto mc^2 - Steps and Speeds

Obrázek 8: Mephysto mc^2 nastavení vůči lineárnímu urychlovači

Obrázek 9: Mephysto mc^2 measurement záložka

Obrázek 10 TNC/BNT spojení

Obrázek 11: Zasouvací typ

Obrázek 12: Sonda s krystalem

Obrázek 13: Další návrhy

Obrázek 14: Konečný návrh konstrukce sondy

Obrázek 15: Zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu

Obrázek 16: Rozměry trubičky pro usazení fotodiody

Obrázek 17: Sonda pro měření světelného a laserového izocentra

Obrázek 18: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 0°

Obrázek 19: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 90°

Obrázek 20: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 180°

Obrázek 21: Laserové izocentrum- profil X,Y laserového pole

Obrázek 22: Laserové izocentrum- souřadnice Z

Obrázek 23: Data analyze

Obrázek 24: Data analyze Process

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

Obrázek 25: Výběr maxima a minima

Obrázek 26: Vykreslení hran a záměrného kříže světelného pole

Obrázek 27: Výpočet vzdálenosti a svírajícího úhlu

Obrázek 28: Grafické zobrazení světelného pole pro $Z=0$ v Matlabu

Obrázek 29: Grafické zobrazení světelného pole pro $Z=-100$ v Matlabu

Obrázek 30: Graf detekce laserového izocentra pro vertikální rovinu

Obrázek 31: Graf detekce laserového izocentra pro horizontální rovinu

Obrázek 32: Výpočet skriptu v Matlabu pro nejmenší vzdálenost světelné osy od laserového izocentra

Obrázek 32: Výpočet skriptu v Matlabu pro nejmenší vzdálenost světelné osy od laserového izocentra a svírajícího úhel světelné osy se zemí, první měření

Obrázek 33: Naměřené profily pro nalezení laserového izocentra, druhé měření

Obrázek 34: Grafické zobrazení světelného pole pro $Z=0$ v Matlabu, druhé měření

Obrázek 35: Grafické zobrazení světelného pole pro $Z=-100$ v Matlabu, druhé měření

Obrázek 36: Ukázka měření světelného pole

Obrázek 37: Měření světelného pole okometrickou metodou a laserového izocentra

Obrázek 38: Výpočet skriptu v Matlabu pro nejmenší vzdálenost světelné osy od laserového izocentra a svírajícího úhel světelné osy se zemí, druhé měření

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

2. Úvod

S prodlužující se délkou života dochází k větší pravděpodobnosti získání nádorového onemocnění a tedy k nárůstu pacientů s daným onemocněním. V současnosti existuje několik druhů terapií. Základní rozdělení je na kurativní, paliativní a symptomatickou terapii. Cílem kurativní terapie je vyléčení a zamezení návratu nemoci po dobu 5 let. Paliativní terapie zpomaluje růst nádoru a zbavuje se provázejících se symptomů. U symptomatické terapie je snaha o udržení kvalit života, protože vyléčení již není možné. Postupy kurativní terapie u nádorových onemocnění můžeme rozdělit na chirurgickou léčbu, chemoterapii, hormonální terapii a radioterapii.

Radioterapie je založena na účincích aplikace ionizujícího svazku záření na nádor a okolní tkáň. Zdroj záření může přicházet do přímého kontaktu s nádorem, tato metoda se nazývá brachyterapie. Nebo lze zdroj záření umístit mimo tělo pacienta do vzdálenosti 80-100cm, pak se jedná o zevní radioterapii.

Zevní radioterapie je v současnosti zaměřena na ozařování nádoru a okolních tkání z více úhlů. Tím je docíleno snížení dodané dávky do okolních zdravých tkání, při zajištění celkové dávky záření, dopadající na nádor, podle potřeb dané terapie. Jedním z nejrozšířenějších přístrojů určený pro tento typ terapie je lineární urychlovač.

Lineární urychlovač obsahuje soustavu pohyblivých částí, které slouží právě k možnosti dávkování záření z více úhlů. Za tímto účelem existuje od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SUJB) Systém jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii, který obsahuje postupy pro testování správného nastavení lineárního urychlovače. Správné nastavení zabezpečuje nejvyšší efektivitu při radioterapii a zároveň nejvyšší ochranu okolních tkání.

Doporučení vznikla jako návod pro plnění povinností, které jsou uloženy zákonem 18/1997Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

záření, ve znění jeho pozdějších předpisů a zároveň vyhláškami, především vyhláškou 499/2005Sb., o radiační ochraně, v platném znění.

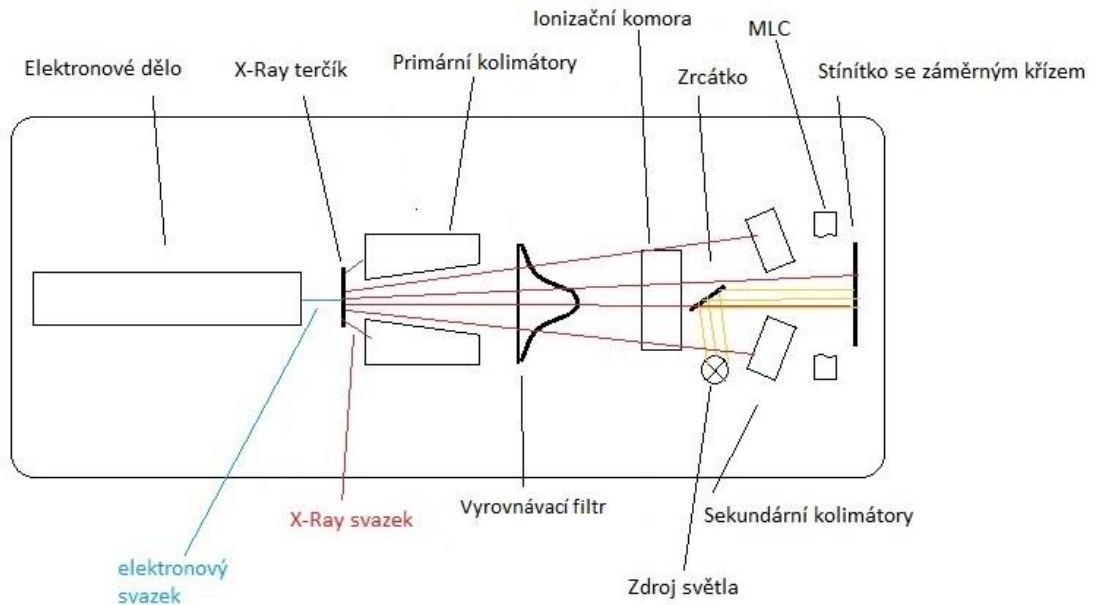
Cílem této diplomové práce je zjednodušit a zpřesnit měření některých parametrů, které jsou dány doporučením od SUJB. Výstupem diplomové práce je navrhnutí detektoru pro porovnání, kontrolu a ověření izocentra laserového zaměřovacího systému a záměrného kříže světelného zaměřovacího systému. Podle těchto dvou systémů se následně kontroluje radiační pole, jeho kvalita a souhlas s nastavenými parametry. Zároveň jsou to systémy, podle kterých se nastavuje samotná poloha pacienta před začátkem ozařování lineárním urychlovačem, v závislosti na požadavcích dané terapie.

3. Současný stav

3.1 Popis lineárního urychlovače

Lineární urychlovač jako lékařský přístroj vznikl roku 1956, kdy se profesor Henry Kaplan rozhodl předělat existující lineární urychlovač na nástroj k léčbě nádorových onemocnění. Po úspěšném prvním otestování se rychle začlenil mezi efektivní nástroje pro léčbu rakoviny. V současné době jsou jeho hlavními výrobci a inovátory firmy Siemens, Elekta, Accuray. Popis konstrukce (viz Obrázek 1) bude znázorněn na monoenergetickém 4 MeV lineárním urychlovači, nacházejícím se na pracovišti FN Motol v onkologickém centru.

V současné době jsou lineární urychlovače rozdělovány podle energií na takzvaně malé, které produkují fotonové záření do 6 MV a velké lineární urychlovače, které vytvářejí fotonové záření o 6-18 MV a elektronové záření o energiích do 25 MeV. Primární součástí lineárních urychlovačů je tedy urychlovací trubice, ve které jsou elektrony urychlovány, aby následně dopadaly na kovový terčik. Celá tato trubice je umístěna v rameni, kolmo na kolimátory. Při interakci takto urychlených elektronů na terčik dochází ke značnému zahřívání, proto musí být lineární urychlovač vybaven chlazením. Zdrojem tohoto chlazení je chladicí jednotka umístěna v technologické části za gantry. Následně jsou fotony vylétávající od terčiku usměřovány primárním kolimátorem, který vytváří svazek. Tento svazek dále prochází vyrovnávacím filtrem. Na obrázku (Obrázek 1) je vyrovnávací filtr nastaven tak, aby svazek fotonů byl homogenní v celé dopadající ploše. Takto homogenní svazek dopadá do ionizační komory pro měření velikosti a uniformity svazku. Svazek pak prochází přes čtyři sekundární kolimátory, které vytvářejí potřebný obdélníkový nebo čtvercový půdorys. Svazek je před výstupem z gantry kolimován multi-leaf kolimátory (MLC), jedná se o sérii bloků, které se nezávisle na sobě pohybují pro modifikaci velikosti a tvaru pole, pro co největší ochranu okolní tkáně pacienta od záření.



Obrázek 1: Cesta fotonového paprsku, hlava gantry otočená o 90°

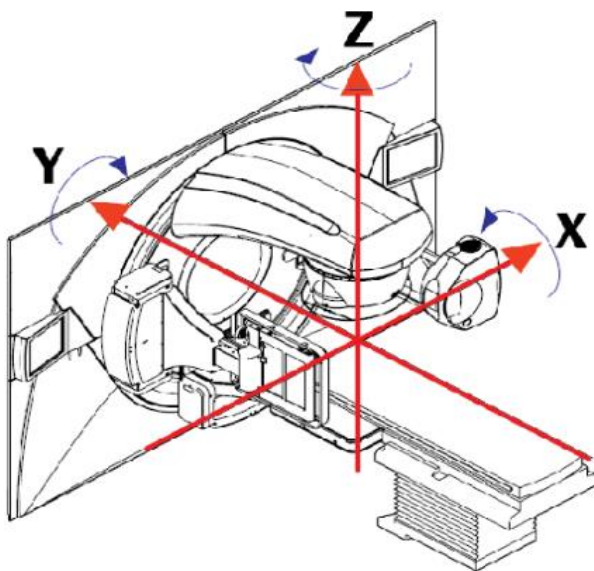
Kromě fotonových paprsků z gantry vychází i světelné pole. Toto záření je vytvořeno žárovkou na boku gantry mezi ionizační komorou a sekundárními kolimátory. Světlo je následně odraženo zrcátkem, které je propustné pro fotonové paprsky. Odražené viditelné záření prochází skrze sekundární kolimátory, kde je také jako fotonové paprsky zkolimováno. Záření dále prochází stínítkem, což je folie s vykresleným křížem. Stinný kříž, který toto stínítko vytváří, se využívá v ověřování a kontrolách radičního pole a zároveň při nastavování pacienta. Tento kříž se nazývá záměrným křížem. Průsečík středu tohoto kříže má být kolineární se středem fotonových paprsků a všech izocenter.

Izocentrum v radioterapii má mnoho názvů například mechanické izocentrum, radiční izocentrum, izocentrická rotace stolu a další. Jedná se o neviditelný bod v prostoru, kterým má dané záření procházet, nebo bod okolo kterého se má daná část lineárního urychlovače pohybovat. V ideálním případě by se mělo jednat o totožné body, to je v praxi ale obtížně dosažitelné. Proto jsou vytvořena doporučení, podle kterých se provádí kontroly měření jednotlivých izocenter. Při polohování pacienta pomocí laserového a světelného

systemu je podstatné, aby se střeďy těchto dvou systémů protínaly v tomto jediném bodě. Pouze v tomto případě, dojde ke správnému ověření radiačního pole při kontrolách a k nejefektivnějším účinkům plánované radioterapie. [1],[2]

3.2 Polohy lineárního urychlovače

Lineární urychlovač je sestaven k posunu a rotaci, aby mohl ozářit potřebné místo na pacientovi (viz Obrázek 2). Rameno slouží k hlavní rotaci okolo osy Y v rozsahu 0° až 360° . Současně je možné otáčet kolimátorem v rozsahu 0° - 360° . Ten slouží k přesnému zaměření a vybrání určité oblasti, která bude ozařována. Další polohovatelnou součástí je posuvný stůl, který se může pohybovat v osách X, Y, Z a zároveň je schopný rotovat kolem osy Z. Při kontrolách lineárního urychlovače jsou definovány polohy ve kterých kontrola má probíhat.



Obrázek 2: Osy rotace lineárního urychlovače [3]

První z poloh je takzvaná základní poloha, kdy úhel rotace kolimátoru je 0° a současně úhel rotace ramene je 0° . Další polohy jsou hlavní polohy, u kterých

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

je úhel rotace ramene 0° , 90° , 180° a 270° při úhlu rotace kolimátoru 0° . Naprostá většina kontrol probíhá v základní poloze, pokud se parametr má ověřovat i v jiných než základních polohách, je to zdůrazněno v Doporučení Zavedení jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii [1] od SUJB.

Pro sjednocení kontrol lineárních urychlovačů jsou dále definovány dvě základní roviny v ose Z. Roviny se nazývají SAD (Source to Axis Distance) a SSD (Source to Surface Distance). SAD je vzdálenost od izocentra ke zdroji ionizujícího záření a SSD je vzdálenost od vstupního povrchu ozařovaného objektu ke zdroji ionizujícího záření. [1],[3]

3.3 Zaměřovací systém

Pro správné nastavení lineárního urychlovače a samotného pacienta slouží dva druhy zaměřovacích systémů. Prvním z nich je záměrný kříž světelného pole a druhým je laserové pole. Společně s těmito zaměřovacími systémy bude popsána i kontrola radiačního pole a mechanické izocentrum. Kontrolu radiačního pole je možné provést až po ověření správnosti průsečíku světelného a laserového pole pro správné umístění fantomu.

3.3.1 Radiační pole

Radiační svazek procházející vyrovnávacím filtrem pro zajištění homogenity v celé jeho dopadající ploše se následně měří, pro ověření souhlasu s nastavenými parametry. Pro určení hrany a rozložení tohoto pole je využito izodóz. Jedná se o grafické zobrazení, které spojuje stejné hodnoty dávky. Jednotlivé křivky se zakreslují v procentech vůči maximální a minimální naměřené dávce. [1]

3.3.1.1 Kontrola radiačního pole

Kontrola radiačního pole má zajišťovat souhlas mezi radiačním a světelným polem. Souhlas světelné osy a osy svazku záření se určuje ze vzdálenosti mezi

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

jejími průměty do roviny kolmé k ose svazku ve standardní ozařovací vzdálenosti SSD=100 cm. Tato vzdálenost má odpovídat vzdálenosti zdroje a průsečíku laserového zaměřování. Proto je nutné nejprve detekovat přesnou polohu laserového izocentra a následně z ní měřit ostatní parametry lineárního urychlovače. Přestože je velikost radiačního pole kolimována na určitou vzdálenost, bude mít v jiných vzdálenostech než SSD=100 cm jinou velikost. [4]

3.3.2 Světelné pole

Radiační pole se na pacientovi u většiny radioterapeutických přístrojů zobrazuje pomocí světelného pole. Zdrojem tohoto světla je obyčejná žárovka., která je usazena v gantry. Umístěna může být v místě vycházejících fotonových paprsků z vyrovnávacího filtru anebo po stranách kolimátoru, přičemž výsledné světelné pole vzniká odrazem světla od zrcadla. Toto pole je ohraničeno otvorem vytvořeným kolimátory, stejně jako je ohraničeno radiační pole. Středem světelného pole prochází od hran stínění ve tvaru kříže, jenž vytváří na pacientovi záměrný kříž. Kříž je vytvořený clonkou na výstupu z gantry. Tento kříž slouží pro dozimetrická měření a zároveň slouží jako nástroj pro přesné uložení pacienta ve správné pozici pro danou radioterapii. [5]

3.3.2.1 Kontrola světelného pole [1]

Kontrola světelného pole má zajišťovat souhlas mezi radiačním a světelným polem. Maximální povolená odchylka je dána Státním úřadem pro jadernou bezpečnost.

Shoda velikosti světelného pole s indikovanými údaji nám udává maximální vzdálenost mezi velikostí světelného pole a znázorněnou hodnotou velikosti světelného pole na gantry v dané SSD=100 cm. Tolerance pro toto měření je maximálně 2 mm pro pole menší a rovno 20×20 cm², pro pole větší než 20×20 cm², je tolerance do 3 mm. Zkouška se uvádí pro uvedené údaje, (viz Tabulka 1). Pro tuto práci bude testována shoda velikosti světelného pole s indikovanými údaji pro rotaci ramene a kolimátoru 0°, pro pole 10×10 cm² v SSD 100 cm.

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

Tabulka 1: Shoda velikosti světelného pole s indikovanými údaji [1]

Měsíc	Úhel ramene	Úhel kolimátoru	Radiační pole (cm×cm)	SSD (100mm)
1	0° nebo 90°	0°	5×5	100
2	0° nebo 90°	0°	10×10	100
3	0° nebo 90°	0°	20×20	100
4	0° nebo 90°	0°	30×30	100
5	90° nebo 270°	90°	10×10	100
6	90° nebo 270°	90°	30×30	100
7	90° nebo 0°	0°	Maximální	150

Rovnoběžnost, kolmost a přesnost polohování kolimačního systému slouží k ověření geometrie kolimátoru a rychlosti pohybu sekundárních clon či lamel. Pro tuto práci budou podstatné pouze parametry:

- a) Maximální úhlová odchylka od rovnoběžné polohy (v°) vůči protilehlé straně pro čtvercová pole tvarovanými konvenčními clonami kolimátoru. Tolerance je maximálně $0,5^\circ$.
- b) Maximální úhlová odchylka od pravého úhlu od sousedních kolmých clon. Tolerance je maximálně $0,5^\circ$.
- c) Symetrie clon kolimátoru daná vzdáleností mezi světelnou osou a středy stran světelného pole. Tolerance polohování lamel je maximálně do 1 mm.

3.3.3 Laserové pole

Aby terapeutický výkon byl co nejpřesnější, je potřeba pacienta umístit tak, jak byla daná terapie naplánována. K tomu slouží laserové pole, které je tvořeno třemi lasery, které se v ideálním případě protínají v jednom bodě,

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

takzvaném laserovém izocentru. Tyto tři lasery jsou umístěny po stranách místnosti, přičemž boční lasery vytváří laserový kříž, jehož průsečnice mají být totožné. Souřadnici x (viz Obrázek 2) určuje zadní laser, který vytváří pouze vertikální rovinu, která rozděluje průsečnici v polovině. Fantom anebo pacient se následně podle horizontálních a vertikálních os laseru nastavuje s pomocí ozařovacího stolu. [1]

3.3.3.1 Kontrola laserového pole [1]

Cílem je ověření správné funkce laserů v ozařovně. Pro světelné zaměřovače (lasery) se ověřuje:

- a) Koincidence bočních laserů v místě izocentra a ve vzdálenosti 20cm od izocentra v horizontální rovině, tolerance je maximálně 1 mm. T
- b) Souhlas světelné osy s rovinou laseru v sagitální rovině, odchylka je maximálně 1 mm.
- c) Seřízení světelných zaměřovačů do izocentra, odchylka laserů od izocentra smí být maximálně 1 mm.
- d) Ortogonalita světelné roviny. Světelné roviny se nesmí od přesně vodorovné či kolmé roviny odlišovat o více než $0,5^\circ$.

3.3.3.2 Lasery

Laserové pole na dětském onkologickém oddělení ve FN Motol je zajišťováno lasery od německé firmy LAP laser, která vyvíjí zaměřovací systémy od roku 1984. Zaměřovací systémy pro medicínské využití mohou být upevněny na zdi, popřípadě na vlastním vysouvacím stojanu, který bude spojen nepohyblivě se zemí.

Ve FN Motol se využívá systém ASTOR Roomlasers upevněný na zdi (viz Obrázek 3). Zaměřovač z tohoto systému má v sobě zabudované 2 lasery, kde jeden vytváří horizontální rovinu a druhý vertikální. Obě roviny je možné vůči sobě posouvat a natáčet v závislosti na požadavcích. Lasery jsou pojmenovány v Motole jako levý, pravý a zadní zaměřovač při pohledu v ose Y na lineární

urychlovač (viz Obrázek 2). Zadní laserový zaměřovač nemá aktivní laser v horizontální rovině a je posazen výše než zbylé lasery.

Rozptyl všech laserů je 60° , což je dostatek k pokrytí těla pacienta pro zaměření lineárního urychlovače. Lasery produkují záření o vlnové délce 635nm. Šířka laseru ve vzdálenosti 4 m je podle údajů výrobce menší než 1 mm, to je pro medicínské užití dostatečné. [7]



Obrázek 3: LAP laser, systém ASTOR

3.3.4 Mechanické izocentrum

Mechanické izocentrum je definováno jako průsečík osy otáčení kolimátoru, osy rotace gantry a zároveň osy otáčení stolu. Tato definice předpokládá, že se osy protínají, ve skutečnosti k tomu ale nemusí dojít. Popřípadě se mohou protínat, ale nebudou osy rotace stolu a kolimátoru vůči ose rotace gantry kolmé. V tomto případě se bere střed nejmenší koule, kterou průsečíky procházejí, jako izocentrum. [2],[4]

3.4 Standardní metody měření

Přesně dané nařízení pro měření světelného a laserového pole v radioterapii není. Existují ale doporučení (Katalog metodik pro zkoušky z radioterapie od SÚJB), která zde budou popsány. Zároveň má každé pracoviště vypracované místní radiologické standardy, podle kterých se zaměstnanci při práci s lineárním urychlovačem řídí, ať už jde o kontrolu anebo samotnou terapii. [1]

3.4.1 Laserové pole

Kontrola laserového pole se skládá ze dvou procesů. Prvním je nalezení mechanického izocentra. Pro to se může využít pointer, který se dá do přibližného středu otáčení gantry v ose otáčení kolimátoru. Následně se měří vzdálenost v základních polohách od kolimátoru k danému potencionálnímu izocentru. Přesná poloha tohoto mechanického izocentra je určena jako střed nejmenší kružnice opsané všemi zaznamenanými body. Podle [1] je povolený maximální poloměr této kružnice 3 mm.

Druhým krokem je nastavení ramena a kolimátoru do polohy 0° . Na ozařovací stůl se připevní magnetická tabule a k ní se přiloží stínítko tak, aby pata střední rysky stínítka ležela v získaném izocentru. Následně je třeba rozsvítit boční zaměřovače (lasery) a zakreslit jejich průmět na samolepku magnetické tabule. Podle [1] je povolená odchylka maximálně 1 mm.

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

Pro souhlas světelné osy a sagitálního zaměřovače je potřeba odsunout rovinu stolu, položit milimetrový papír na zem a zakreslit na něj záměrný kříž. Následně vložit kalibrovaný pointer, jehož hrot má představovat mechanické izocentrum. Tímto hrotem mají procházet lasery, osa záměrného kříže a zároveň má souhlasit s podélnou osou stolu.

Tato měření jsou závislá na správném nalezení mechanického izocentra, nelze je tedy měřit nezávisle na jiných parametrech. [1],[4]

3.4.2 Světelné pole

Milimetrový papír se upevní na povrch desky stolu. Rameno lineárního urychlovače se nastaví do polohy 0° . Poté se vysune povrch stolu s papírem do úrovně izocentra, tedy na úroveň levého a pravého horizontálního laseru. Toto vysunutí na úroveň laserů je kontrolováno okometricky. Následně se rozsvítí světelné pole, to se zakreslí vždy dvojicí rysek na milimetrový papír, zároveň se vyznačí i osy světelného kříže. Pro další měření se kolimátor otočí o 90° a proces se opakuje, následně se měří odchylka křížů i samotných čtyřúhelníků vůči sobě. Měří se rovnoběžnost lamel kolimátoru, která je povolena do odchylky 1° a zároveň i kolmost lamel kolimátoru, kde je maximální povolená odchylka také 1° . Dále je možné měřit shodu velikosti pole s indikovanou velikostí kolimátorem. Maximální povolená odchylka je 2mm.

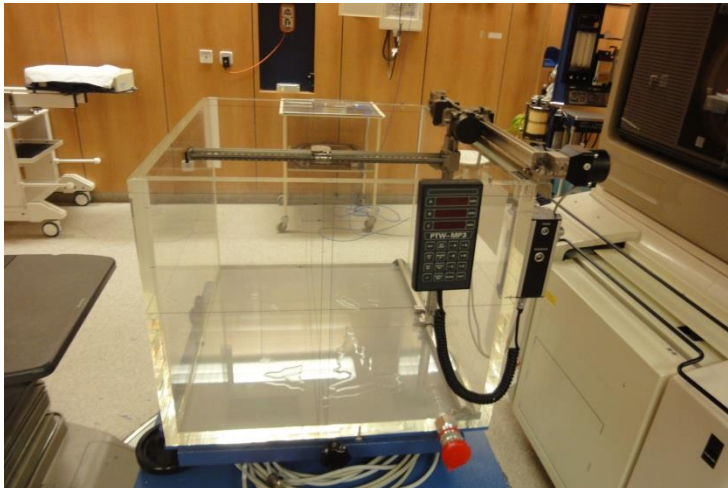
Toto měření může být až příliš ovlivněno chybou člověka, ať už okometrickou kontrolou výšky stolu v izocentru, rýsováním hran pole s milimetrovou přesností až po měření úhlu pomocí úhломěrů. [1],[4]

3.5 Použité nástroje

PTW MP3 Phantom Tank

Jedná se o vodní tank s pohybovými motory, které zajišťují pohyb držáku, do kterého lze usadit sondy od firmy PTW pro měření radiačního pole. Rychlost pohybu hlavice je variabilní od 1-50 mm/s, s přesností polohy na 0,1 mm. Držák

se s pomocí motorů může pohybovat na všech osách v rozsahu 60 cm. Hlavice zároveň umožňuje různá usazení sondy pro měření radiačního pole v různých polohách gantry. Společně s tankem je k dispozici ovladač pro manuální posouvání sondy a definování nulového bodu souřadnicové soustavy kdekoli v oblasti tanku. Tento ovladač má měřicí osy popsány A,B,C. Ty se určí v Mephysto mc² jako osy soustavy souřadnic podle potřeby obsluhy. [8]



Obrázek 4: MP3 Water Phantom

TBA Electronics

Zajišťuje automatický pohyb motorů vodního fantomu MP3 a tedy pohyb sondy. Zároveň detekuje její momentální pozici. Tuto informaci následně předává do připojeného počítače s programem Mephysto mc². Minimální možný krok je 0,1mm s variabilitou rychlosti pohybu od 1-50 mm/s.

PTW UNIDOS

Dozimetr v kombinaci se sondou slouží k naměření radiační dávky. Jeho předností je snadná obsluha a možnost ukládání jednotlivých sond. Dále disponuje knihovnou, kde jsou obsaženy parametry prostředí a nastavení sond od firmy PTW. Je schopen měřit radiologické a elektrické veličiny v různých jednotkách jako jsou Gy, R, Gy/min, R/min, Gy·m, C a A. Ovládání probíhá skrze LC displej a postranní tlačítka. Zároveň je na displeji vidět okamžitá hodnota, kterou měří sonda. Systém UNIDOS má blíže nespécifikované 3 druhy odporů na kterých měří úbytek napětí. Díky těmto odporům je možné rozdělit

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

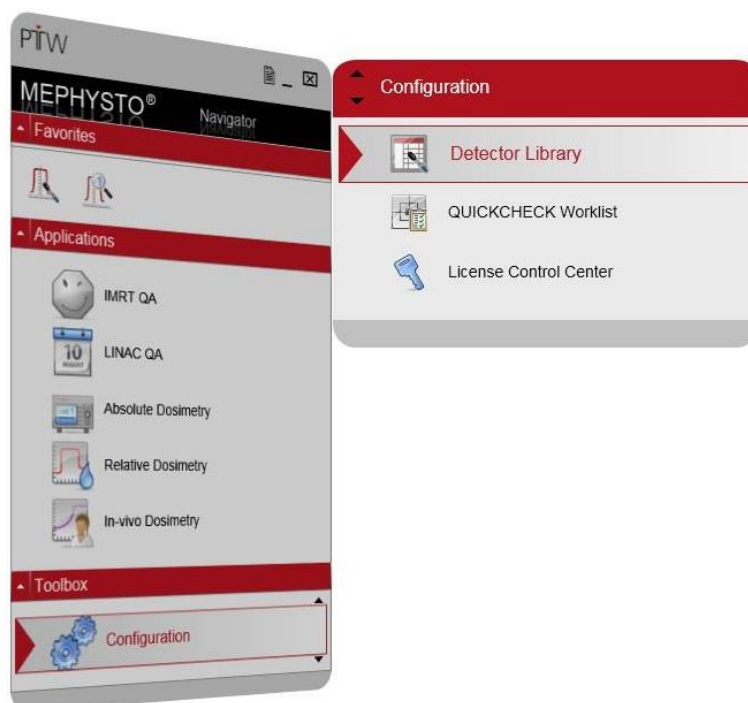
měřicí rozsah na nízký, střední a vysoký. Tento rozsah je určen měřeními proudy, které mohou být v rozsahu od 25 fA až po 2,5 μ A. Možnosti připojení k tomuto elektrometru jsou přes speciální konektory BNT,TNC,M od firmy PTW[9]

Mephysto mc²

Mephysto mc² je software, se kterým v kombinaci s PTW dozimetrem a PTW vodním fantomem je možné naplánovat kontrolu, následně ji samostatně provést, zpracovat do grafické i číselné podoby a vyhodnotit.

Uživatelské rozhraní Mephysto mc²

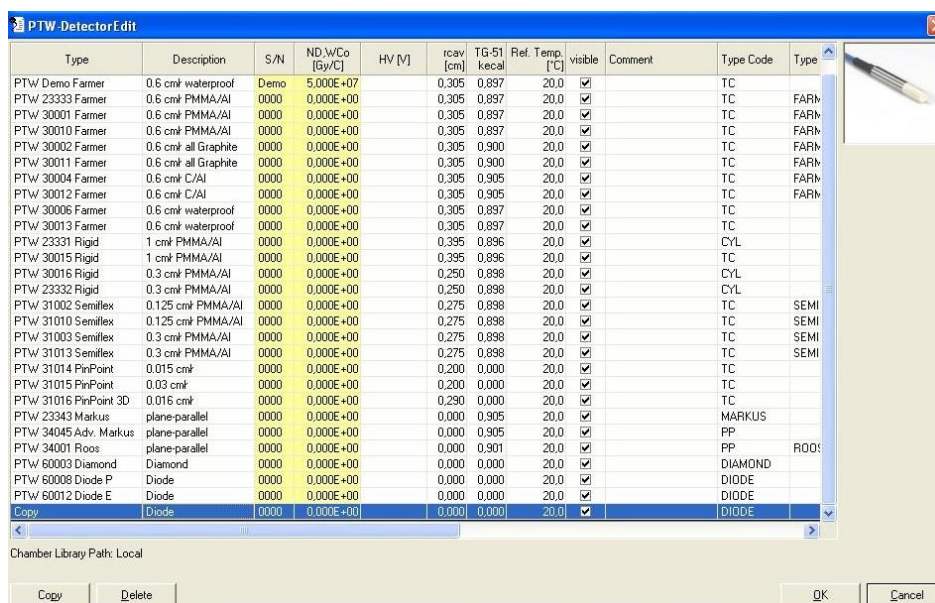
Na počátku je potřeba zadat sondu, se kterou se bude dále měřit. Systém Mephysto disponuje knihovnou s přednastavenými typy sond, které jsou kompatibilní se sondami PTW. Pokud by se používala jiná sonda, je potřeba u ní nastavit kalibrační faktor, což je přepočítání Gy/C, aby vycházely měřitelné hodnoty. Pro zadání nové sondy se v rozcestníku Mephysto Navigator (viz Obrázek 5) zvolí detector library.



Obrázek 5: Mephysto navigator

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

Následně se v okně vybere Detector Library (viz Obrázek 6). V tomto okně se zvolí jedna z hotových sond a nakopíruje se tlačítkem Copy. Následně se může přejmenovat, změnit kalibrační faktor a uložit sondu kliknutím na OK.



Obrázek 6: Okno pro zadání nové sondy

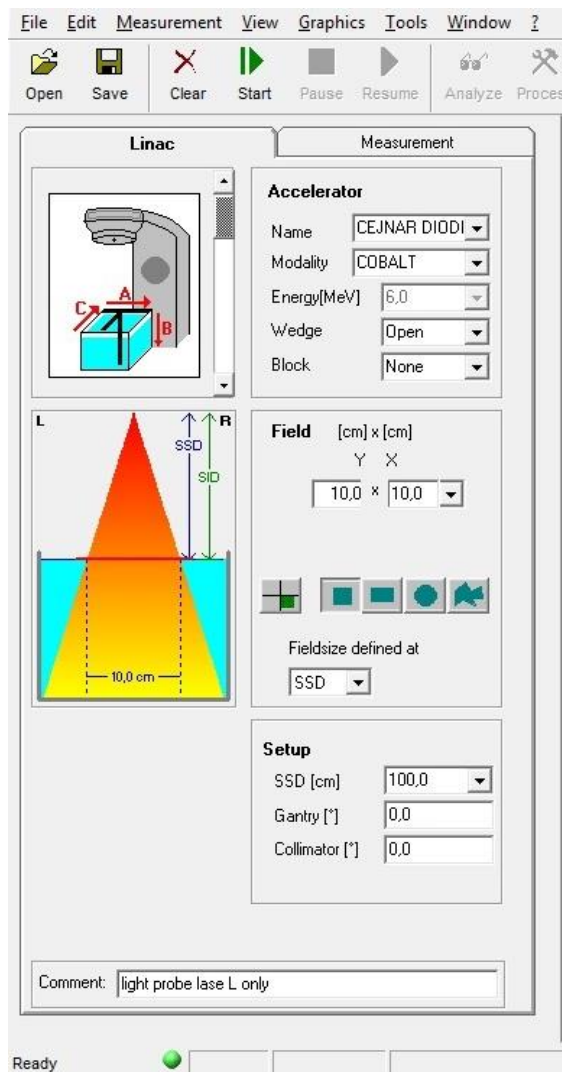
Nastavení daného měření a samotné měření probíhá v okně, které se spustí přes Relativ Dosimetry, kde se následně vybere fantom, ve kterém se měří, v tomto případě tedy MP3. Spustí se okno PTW-tbaScan.

Další úkon, který je potřeba udělat, je definování vzdálenosti po jakou se sonda bude pohybovat a zároveň velikost kroku, s kterým se bude pohybovat. V horní liště tools se vybere záložka steps and speeds. V otevřeném okně (viz Obrázek 7) lze v levé části vybírat už z přednastavených typů sond. V záložce Profile Steps v podokně Ranges se vybírá rozsah, ve kterém se má jezdec ve fantomu pohybovat vůči nastavenému bodu [0,0,0] a zároveň po jakém kroku. Toto nastavení se graficky zobrazuje v dolní části záložky Profile Steps. Na obrázku (Obrázek 7) je nastaven rozsah měření pole od -7 do 7 mm. Mezi -7 až -5 mm se sonda pohybuje s krokem 0,5 mm, v části -5 až 0 mm se sonda pohybuje s krokem 0,2 mm. Následně se postup symetricky opakuje od 0 do -7 mm, kvůli zaškrtnutí políčka Symmetrize Ranges. Nastavení se opět potvrdí tlačítkem OK.



Obrázek 7 Mephysto mc²- Steps and Speeds

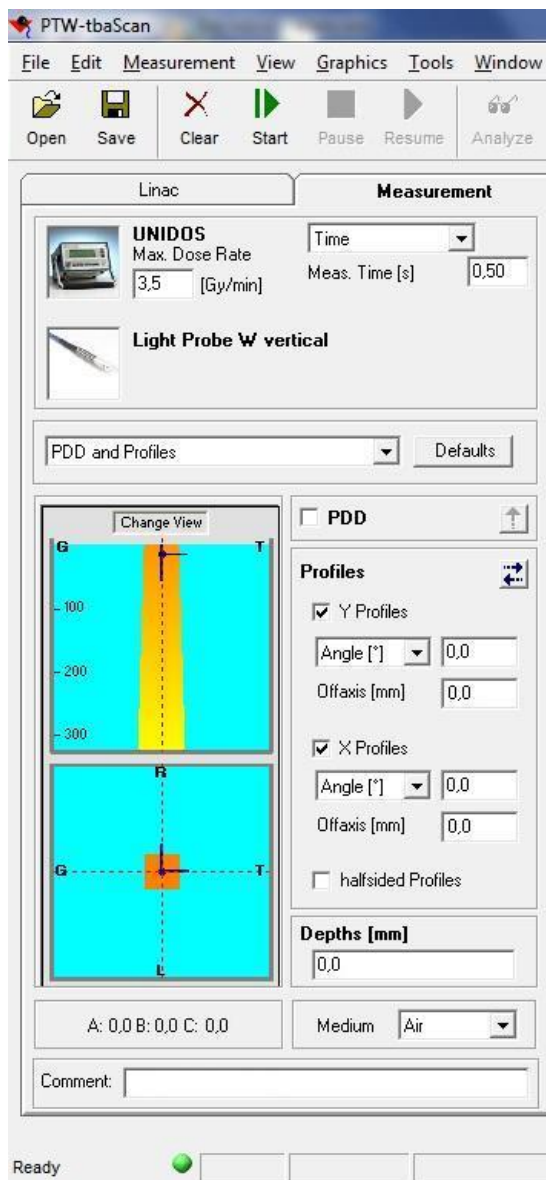
Nastavení linac je nastavení polohy ve fantomu vůči lineárnímu urychlovači. Podle obrázku (Obrázek 8) v levé horní části lze nastavit souřadnicový systém, který odpovídá ovladači na fantomu MP3. V oblasti accelerator se zadává sonda, se kterou se bude měřit. Field nám udává velikost pole, ve kterém se měří. Pro SSD se obvykle používá velikost $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Pokud by se změnilo pole na $20 \times 20 \text{ cm}^2$, přepočítaly by se hodnoty v okně Steps and Speeds tak, aby se menší šířka kroku v oblasti hran, přesunula z pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$ na předpokládanou polohu hran radiačního pole v $20 \times 20 \text{ cm}^2$. V dolní části se určuje nastavení SSD a zároveň nasměrování gantry. S gantry se pak otáčí souřadnicová soustava tak, aby hodnota B (pokud bude zvolena) byla vždy rovnoběžně s osou rotace kolimátoru, tedy s osu Z (viz Obrázek 2).



Obrázek 8: Mephysto mc² nastavení vůči lineárnímu urychlovači

V záložce Measurement v horní části se nastavuje čas, po který sonda měří dopadající záření na daném místě. To musí souhlasit s přepočteným kalibračním faktorem. Dále se nastavuje elektrometr a sonda, která se bude používat při daném měření.

V roletě, kde je na výběr (viz Obrázek 9) PDD and Profiles, se vybírá prostorová poloha, ve které se bude měřit. PDD and Profiles je základní orientace, kdy se měří profil radiačního pole. Sonda je tedy umístěna v ose Z a měří se profily v osách X a Y (viz Obrázek 2).



Obrázek 9: Mephysto mc² measurement záložka

V oblasti Profiles se zadává, který profil se bude měřit a jeho vyosení. Na obrázku (Obrázek 9) je zaškrtnuto měření v profilu Y a X, s vyosením o 0mm v obou osách. Toto zobrazení je znázorněno v levé části, kde oranžovožlutý hranol odpovídá radiačnímu svazku a oranžový kvádrík odpovídá profilu radiačního svazku při pohledu z kolimátoru. Na závěr se zadává Depths, což jsou hloubky, ve kterých se bude měřit. Nastavení 0,0 odpovídá SSD.

4. Realizační část

4.1 Návrh sondy

Podstatné informace

Sonda je určena pro měření záření ze žárovky z lineárního urychlovače a zároveň z laserů. Součástka, která toto záření bude detekovat, musí být schopna měřit na vlnových délkách pro tyto dva zdroje záření. Žárovka obsahuje rozžhavené wolframové vlákno o teplotě 2500°C. Vyzařované světlo odpovídá bílému světlu, obsahuje tedy všechny viditelné vlnové délky. Peak intenzity světla z žárovky se podle [10] nachází mezi 580 a 620nm. Pro laserové světlo je firmou LAP lasers definována vlnová délka 635nm. Měření bude probíhat v mírně osvětlené místnosti, citlivost musí být tedy výrazně vyšší pro vlnové délky zaměřovacích systémů.

Další informací je nutnost kompatibility s výrobky PTW. Prvním z nich je možnost usazení do PTW držáku, který se nachází uvnitř MP3 fantomu. Otvor pro vložení sondy má kruhový tvar s průměrem 7mm. Upevnění sondy v držáku je zajištěno plastovým šroubem.

Měření bude probíhat primárně se sondou usazenou ve směru osy Z, kolmo na předpokládaný směr laserových zaměřovacích průsečíků. Sonda tedy bude muset být schopná měřit v rozsahu 90° mezi rovinou Y, X a osou Z, a zároveň 360° kolem osy Z.

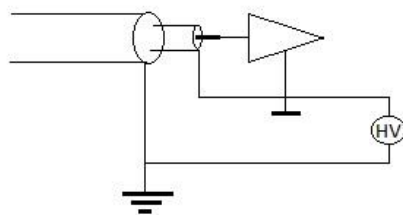
Dozimetrické sondy od firmy PTW využívají vždy jednoho ze tří fyzikálních principů pro měření radiační dávky.

První z nich je ionizační komůrka, která obsahuje plyn mezi dvěma elektrodami, které jsou připojeny na zdroj vysokého napětí 100 V až 1000 V.

Druhým typem je využití PN polovodiče, který při ozáření uvolní elektron, ten se následně přiblíží ke kladně nabitě části a vytváří proud.

Třetí metodou je využití diamantového detektoru, ve kterém ionizující záření nejprve uvolní elektron z valenční vrstvy na vyšší energetickou hladinu. Zaplnění elektronových děr, které vznikly nedokonalostmi ve struktuře diamantu, a následné přitáhnutí elektronů k vodivostnímu pásu. Tento detektor potřebuje externí proud pro vytvoření ionizačního pole v sondě. Stabilní proud je možné naměřit pouze po zaplnění děr.

Sonda bude dále napojena k systému PTW UNIDOS, který slouží jako elektrometr a zároveň může sloužit i jako zdroj elektrického proudu. Tento systém má speciální konektory BNT a TNC. Zvolený typ propojení kabelu a elektrometru UNIDOS je znázorněno na obrázku (viz Obrázek 10).



Obrázek 10 TNC/BNT spojení vodícím kabelem a systémem UNIDOS

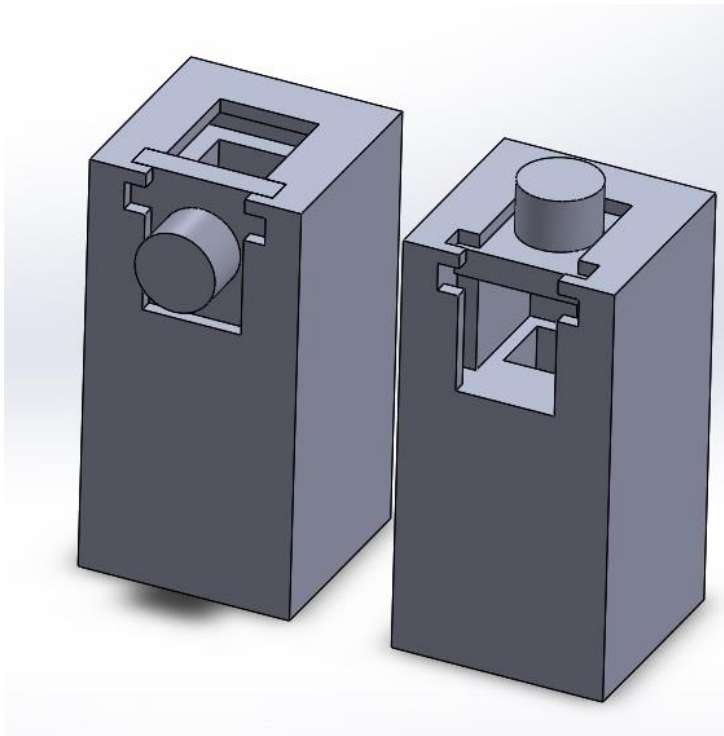
Sondy od firmy PTW využívají vlastní nízkošumové triaxiální kabely pro měření proudů s přesností na 10^{-15} A. Jejich systém propojení kabelů a konektorů se různí v závislosti na typu použité součástky.

4.1.1 Vzhled sondy

První návrhy sondy se snažily zajistit její schopnost detekovat laserové i světelné pole zároveň. Současně byly uzpůsobeny pro nasměrování měřených záření skrze horní část sondy, která je výrobcí udávána nejcitlivější z důvodů vodorovného uložení světlocitlivého čipu v horní části fotodiody. Také byla potřeba, aby se vzhled a konstrukce co nejvíce přibližovaly sondám od PTW.

Proto už na začátku byly zavrhnuty různé komůrky s polopropustnými skly pro rozklad a ohyb světla.

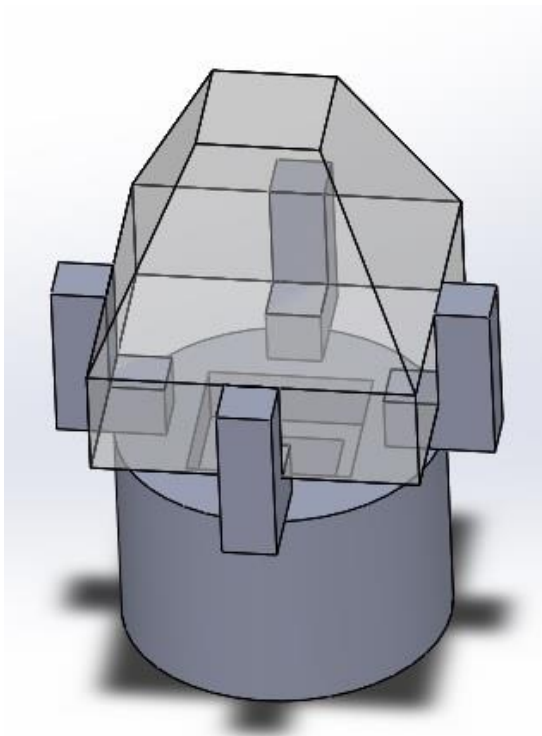
Prvním návrhem (viz Obrázek 11) byl zasunovací typ, kde fotodioda měla být ukotvena v destičce, která by následně mohla být zasouvána pro horizontální a vertikální polohu v závislosti na typu měřeného pole.



Obrázek 11: Zasouvací typ

Nevýhodou tohoto typu je jednak horší upevňování do PTW držáku, kde by se v kruhovém průřezu dotýkal pouze v hranách. Zároveň jeho dvojí uložení by znamenalo posunutí souřadnicové soustavy v závislosti na typu měření a také pro měření každého z laserů zvlášť.

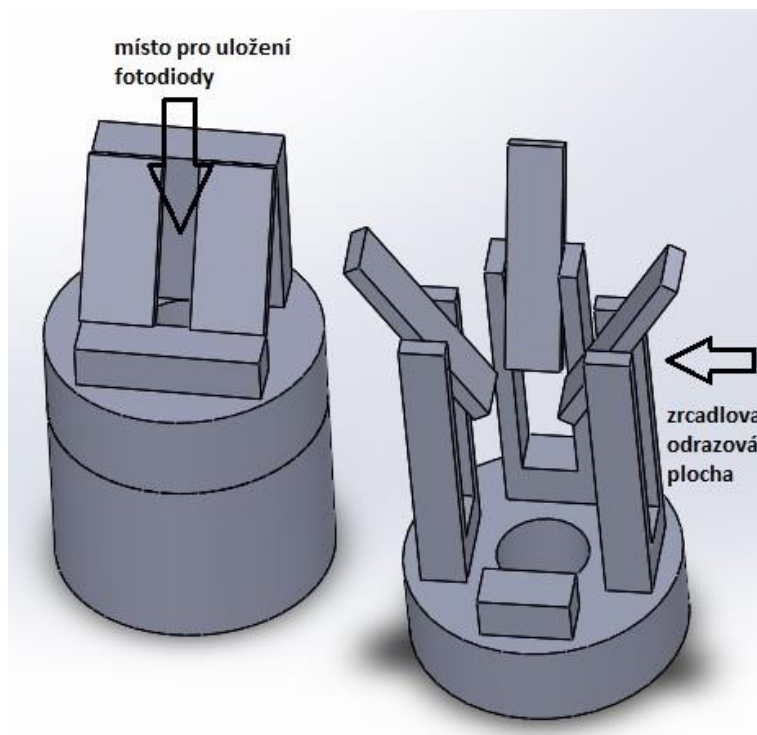
Druhým návrhem (viz Obrázek 12) bylo využití čirého krystalu, který by lámal paprsky laserového zaměřování do středu, v němž by se nacházela fotodioda. Stejně tak by bylo možné využití různých filtrů, uložených pod krystalem, pro odstranění nežádoucího okolního osvětlení místnosti.



Obrázek 12: Sonda s krystalem

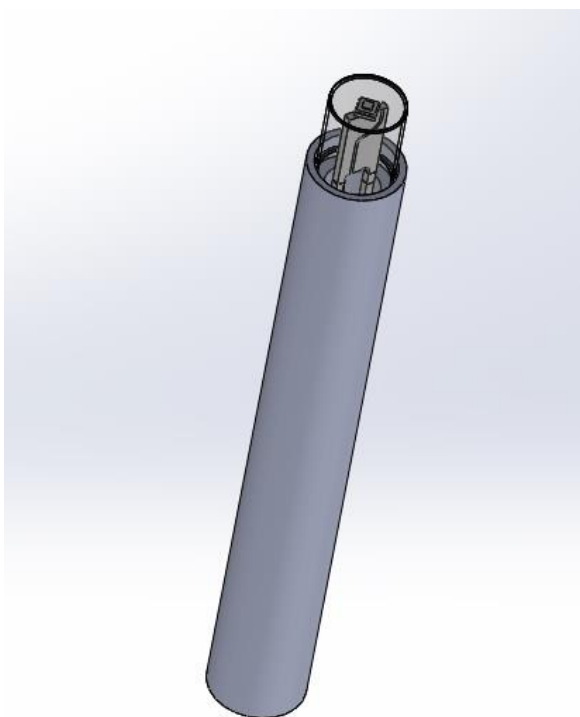
Nevýhodou tohoto návrhu je poměrně obtížná technická realizovatelnost. Zároveň tvorba tohoto hranolu by byla cenově nákladná. Proto se od tohoto návrhu upustilo.

Další návrhy (viz Obrázek 13) Byly naklonění fotocitlivého čipu pod úhlem 45° , nebo využití soustavy zrcadel pro nasměrování laserových paprsků do středu, ve kterém by se sbíhaly společně se záměrným křížem. Opět zde byl problém s pohybem pevně dané soustavy souřadnic a konstrukční náročností.



Obrázek 13: Další návrhy

Nakonec se zvolil nejpodobnější model sondě od firmy PTW a tím je usazení fotodiody do kruhové trubičky (viz Obrázek 14). Důvodem ke zvolení tohoto typu je minimalizace odchylek, které vzniknou při záměně sondy pro měření radiačního pole. Kvalita usazení fotodiody bude popsána v kapitole 5.1.



Obrázek 14: Konečný návrh konstrukce sondy

4.1.2 Součástky

V následujících kapitolách budou popsány části, ze kterých se sonda skládá, a důvody, proč byly vybrány ať už z hlediska funkčního nebo materiálového.

4.1.2.1 Fotodioda

Jak bylo shrnuto v první části kapitoly (4.1), pro měření daných vlnových délek je na výběr ze tří fyzikálních principů, pro zajištění kompatibility mezi sondou a měřícím systémem UNIDOS. Kvůli cenové a konstrukční náročnosti byl použit polovodičový typ, který je zapojen ve fotovoltaickém režimu. Sama dioda je tedy generátorem proudu, který je měřitelný systémem UNIDOS.

Podstatné parametry pro výběr fotodiody jsou rozsah vlnových délek, na kterých fotodioda měří, vlnovou délku pro kterou má maximální citlivost a relativní spektrální citlivost pro vlnovou délku 630nm. Zároveň je důležitý úhel, pod kterým je dioda schopná snímat a s tím spojený úhel poloviční citlivosti.

ČVUT	Lokace izocentra Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	---	---------------

Jako vedlejším parametrem je minimální generovaný proud při daném ozáření (minimal light current) viz tabulky (Tabulka 2, Tabulka 3). Fotodiody je zapojena v závěrném směru jako fotovoltaický článek. Protože systém Unidos měří úbytek napětí na odporu, je potřeba znát parametr fotodiody minimal light current. Jedná se o velikost generovaného proudu fotodiody při daném ozáření. Tato hodnota je uvedena v tabulce (Tabulka 3). Unidos může měřit na třech různých odporech, proto se předpokládá, že vždy bude možné změřit generovaný proud a tento parametr je pouze informativní. Posledním důležitým parametrem je Dark Current, to je proud, který je generovaný vždy i při neosvětlení fotodiody a dané teplotě okolí. Snahou výrobce je, aby tento proud byl co nejnižší a neovlivňoval měření. Všechny hodnoty Dark Current jsou velmi malé a nebudou ovlivňovat měření.

Jako nejvhodnější fotodiody pro měření vychází fotodiody SFH203 P s dobrou spektrální citlivostí v požadované oblasti, zároveň s nejlepším úhlem pro poloviční citlivost a s celkovým úhlem pro detekci. Proud, který vzniká při ozáření okolo $1\text{mW}/\text{cm}^2$ je u většiny fotodiody podobný.

Tabulka 2: Parametry fotodiody

název diody	rozsah [nm]	peak [nm]	relativní spektrální citlivost na 630nm [%]	úhel poloviční citlivosti [°]
OPL900SL	600-1100	890	40	15
SFH203 P	400-1100	850	75-80	75
BPV10	400-1100	920	70	20
SFH213	400-1100	850	65	10
TEFD4300	400-1100	950	60	20
SD1420-002L	400-1100	935	50	24
PDB-C142	400-1000	660	-	-
BPW24R	600-1050	900	60	12
OP906	500-1000	935	55	20
PD333-3C/H0/L2	400-1100	940	70	40
MTD3610D3	400-1060	940	42	60
PD204-6C/L3	400-1100	940	70	20
MTD1114M3B	400-1100	925	42	65

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

Tabulka 3: Druhá část parametrů fotodiody

název diody	view angle [°]	Minimal light current [μA]	dark current [μA]
OPL900SL	40	8; 20mW/cm ²	0,001
SFH203 P	95	9,5; 1mW/cm ²	0,001
BPV10	-	38; 1mW/cm ²	0,001
SFH213	-	135; 1mW/cm ²	0,001
TEFD4300	-	9; 1mW/cm ²	0,003
SD1420-002L	-	5; 5mW/cm ²	0,005
PDB-C142	-	-	0,03
BPW24R	-	45; 1mW/cm ²	0,01
OP906	-	16; 0,5mW/cm ²	0,06
PD333-3C/H0/L2	80	36; 1mW/cm ²	0,005
MTD3610D3	80	15; 5mW/cm ²	0,01
PD204-6C/L3	45	10; 1mW/cm ²	0,01
MTD1114M3B	80	38; 5mW/cm ²	0,005

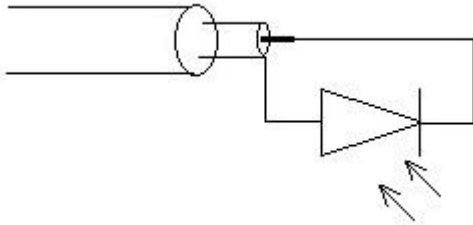
4.1.2.2 Konektory

S přihlédnutím na propojení fotodiody s vodičem a vodičem se systémem UNIDOS se zvolil typ konektoru BNT od firmy PTW z důvodu kompatibilní impedance konektoru a kabelu. Pro tyto konektory byly dostupné datasheety, ovšem pouze pro potřebu při výběru konektoru. Informace slouží pro vnitřní potřeby firmy, a proto jsem nedostal svolení tyto informace publikovat v diplomové práci.

4.1.2.3 Propojovací kabel

Jako propojovací kabel je použit triaxiální kabel od firmy PTW pro zajištění kompatibility a stejných impedancí s konektorem BNT. Jedná se o souosý elektrický kabel se dvěma válcovými vodiči a jedním středním drátovým vodičem. Všechny tři vodivé části jsou od sebe odděleny dielektrikem. Triaxiální kabel využívá jednoho vodiče k dodávání elektrické energie a zbylé dva vodiče k detekování radiačního pole. Protože fotodiody slouží jako zdroj elektrické energie, není potřeba ji nijak napájet a proto triaxiální kabel bude využit jako koaxiální. Bude využit střední drátový vodič a vnitřní válcový vodič. Na obrázku

(Obrázek 15) je ukázáno propojení fotodiody a kabelu pro fotovoltaické zapojení, které je použito. Lze vidět, že vnější válcový vodič není propojený s fotodiódou a nijak tedy neovlivňuje měření.

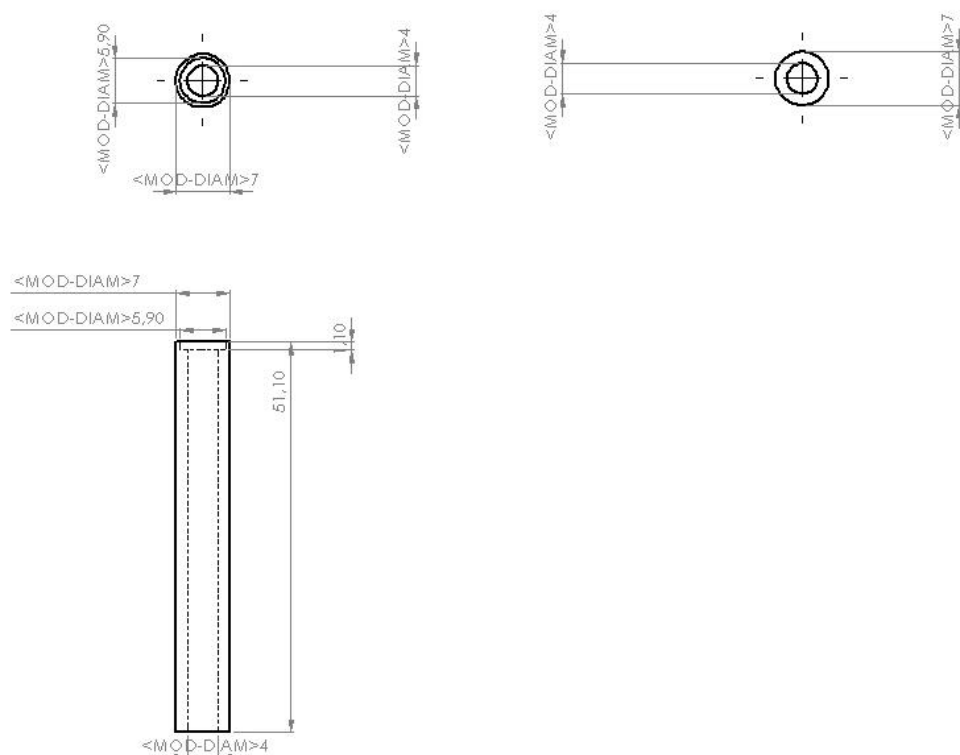


Obrázek 15: Zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu

4.1.2.4 Usazení fotodiody

Trubička byla zkonstruována pomocí 3D tiskárny z termoplastického materiálu se zkratkou ABS. Tento materiál byl zvolen, vzhledem ke své pevnosti a odolnosti vůči mechanickému poškození, které by mohlo vzniknout utahováním plastového šroubku, popřípadě neopatrnou manipulací. Rozměry trubičky (viz Obrázek 16) jsou udány v milimetrech a jsou navrženy pro fotodiódu SFH 203 P. Vyvýšení horního okraje trubičky má pomoci k lepšímu usazení fotodiody do středu. Průměr otvoru vyvýšení odpovídá průměru podstavy fotodiody SFH203 P. Kvalita jejího usazení v centrální poloze byla testována a popsána v kapitole 5.1.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------



Obrázek 16: Rozměry trubičky pro usazení fotodiody

4.2 Postup měření

K měření izocentra budou potřeba následující pomůcky: Water Phantom MP3 s držákem a TBA electronic, měřicí přístroj PTW UNIDOS v.č. 20 188, notebook s nainstalovaným programem Mephysto mc², sonda pro měření světelného a laserového pole.

Příprava k měření

- 1) Fantom MP3 nastavte tak, aby všechny lasery procházely černými ryskami na fantomu. Po umístění je potřeba zajistit kola fantomu, aby se v průběhu měření nepohyboval a tím nedošlo k posunutí dané souřadnicové soustavy.
- 2) Následně fantom vysuňte do větší výšky, aby laserové zaměřování neprocházelo skrze rysky.
- 3) Přístroje propojte přiloženými propojovacími kabely a zapojte do zásuvek.
- 4) Sondu umístěte do držáku a ten nastavte pomocí ovladače od fantomu PTW do předpokládaného laserového izocentra.
- 5) Na systému UNIDOS nastavte měření se sondou #19 Diode LIGHT CEJNAR.
- 6) V místnosti nechte svítit pouze kolimované zářivky ze stropu. Běžná světla se žárovkami vypněte.
- 7) Spusťte program Mephysto mc² navigator a spusťte PTW-tbaScan
- 8) V podokně Linac vyberte souřadnicovou soustavu tak, aby osa C směřovala do gantry, osa B z kolimátoru k zemi a osa A ve směru od levého k pravému laseru.
- 9) V části Accelerator navolte diodu Cejnar Diode, velikost měřeného pole zadejte 10×10 cm². Gantry i kolimátor nastavte na 0° a vzdálenost SSD dejte také na 0.
- 10) V podokně Measurements navolte sondu Light Probe W vertical, measuring time zvolte na 0,5s.

Měření laserového pole

- 1) Navolte metodu měření PDD and Profiles a pro profily X a Y zvolte offaxis 0mm, Depths 0 mm.
- 2) Ve steps and speeds zvolte oblast od -5 do 5 mm s krokem 0,2 mm.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

- 3) Po naměření profilů X a Y uložte soubor jako Laser_Iso_X_Y_Datum měření a vyhodnoťte polohu izocentra v osách X a Y.
- 4) Zadejte v oblasti Linac gantry= 90°, tím se rovina, ve které se měří, otočí o 90°. Dále měřte pouze profil X. Získané maximum v tomto profilu odpovídá hodnotě Z. Zároveň zvyšte oblast ve steps and speed od -10 do 10 mm, aby se pokryla celá oblast fotodiody a zároveň šířka laserů.
- 5) Po naměření uložte soubor jako Laser_Iso_Z_Datum a vyhodnoťte polohu izocentra v ose Z.

Měření světelného pole

- 1) Sondu pomocí ovladače nastavte do pozice do nalezených souřadnic laserového izocentra a nastavte tento bod jako nulový. Tedy jako počáteční bod soustavy souřadné.
- 2) Navolte metodu měření PDD and Profiles a pro profily X a Y zvolte offaxis 25mm, Depths zvolte 0 a 100 mm.
- 3) Ve steps and speeds zvolte buď Fine Light Probe, nebo navolte hodnoty -80 až -55 s krokem 10; -55 až -45 s krokem 0,2; -45 až 45 s krokem 10; 45 až 55 s krokem 0,2; 55 až 80 s krokem 10.
- 4) Soubor uložte jako Light_Field_25x25
- 5) Navolte metodu měření PDD and Profiles a pro profily X a Y zvolte pro oba profily offaxis -25mm, Depths zvolte 0 a 100 mm.
- 6) Soubor uložte jako Light_Field_-25x-25
- 7) Soubory spusťte v Data Analyze.
- 8) Následně zkopírujte naměřené intenzity a jejich polohy do připravené excelové tabulky Light Field.
- 9) Zjemněte krok na 0,5mm v celé oblasti a opět data zkopírujte na přiřazené místo v tabulkách Light Field
- 10) Spusťte Matlab a v něm spusťte připravené skripty LightfieldSSD, LightfieldDepth100.
- 11) Nakonec použijte skript pro měření vzd_isocenter a zadejte po dotázání polohu laserového izocentra [0,0,0].
- 12) Vyhledejte potřebné hodnoty v Matlabu (délka stran, úhly mezi stranami, souřadnice středů záměrných křížů) a ověřte pozici izocentra.

5. Výsledky

Sonda byla zkonstruována na pracovišti Canberra- Pacard ve firemní dílně. Pro spájení fotodiody a vodivého kabelu byla použita běžná cínová pájka. Následně odhalené vodivé části fotodiody byly stáhnuty smršťovací bužírkou, čímž bylo zamezeno jakémukoli vodivému propojení.

Fotodioda s kabelem byly následně usazeny do trubičky vytvořené na 3D tiskárně z ABS materiálu a silikonem upevněny, aby nedocházelo k protáčení a vysouvání. Následně byl na druhý konec kabelu připojen BNT konektor. Finální podoba sondy pro měření světelného a laserového izocentra je na obrázku (Obrázek 18).



Obrázek 17: Sonda pro měření světelného a laserového izocentra

Kalibrační faktor sondy byl nastaven po dohodnutí délky měření v jedné pozici na 0,5 s. S tímto měřením byl detekován proud pod světelným polem o velikosti $81 \cdot 10^{-9}$ A. Ze znalostí těchto dvou hodnot se vypočítal náboj, který se rovnal $4,05 \cdot 10^{-8}$ C. Protože systém UNIDOS a Mephysto zobrazují hodnoty v Gy/C, bylo potřeba vynásobit hodnotu náboje odpovídajícím kalibračním faktorem (ND), aby vycházely pro UNIDOS a Mephysto mc^2 zpracovatelné hodnoty ve vhodném rozsahu.

$$(ND) = \frac{Gy}{C}$$

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

$$(ND) = \frac{1}{4,05 \cdot 10^{-8}}$$

$$(ND) = 24 \cdot 10^6$$

Kalibrační faktor byl tedy nastaven na 10^7 .

5.1 Přesnost sondy

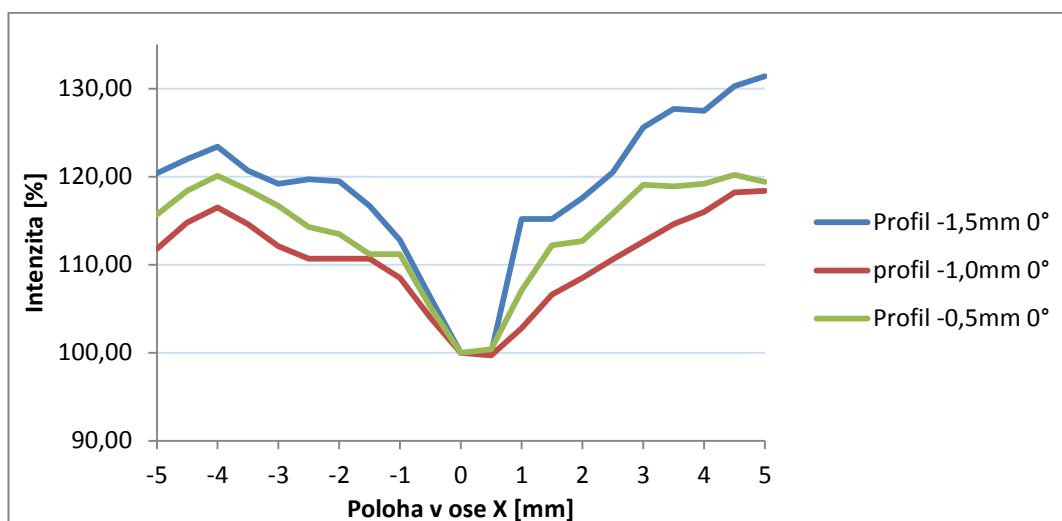
Pro určení závislosti rotace sondy v ose Z na naměřené intenzitě bylo použito mapování světelného pole se záměrným křížem, kdy se měřily profily Y, které byly od sebe vzdálené 0,5 mm. Pole, které se měřilo, mělo velikost $10 \times 10 \text{ mm}^2$. Kvůli záměrnému kříži se neměřila maximální intenzita ale minimální, která nám v daném profilu určovala čáru záměrného kříže v ose X (viz Obrázek 2). V tabulce (Tabulka 4) jsou v prvním a druhém sloupci zapsány měřené profily a celkové součty intenzit v daném profilu. Třetí a čtvrtý sloupec popisuje minimální intenzitu v daném profilu a zároveň pro ní odpovídající souřadnici x. Pokud se nachází v daném profilu více souřadnic x, znamená to, že minimální intenzita v daném profilu byla naměřena ve dvou místech. Dá se předpokládat, že skutečná minimální intenzita by se měla nacházet mezi těmito dvěma x souřadnicemi.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

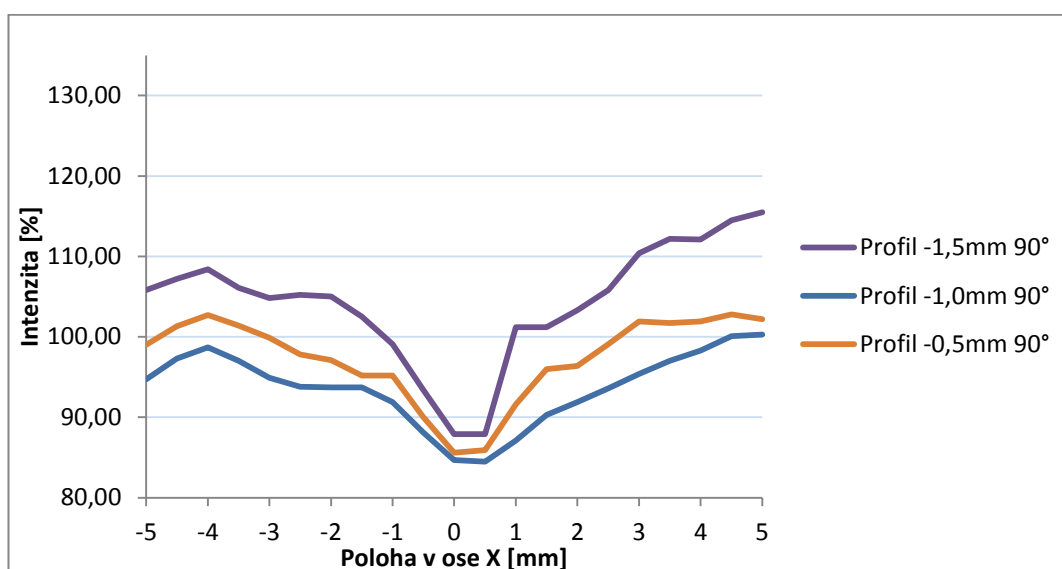
Tabulka 4: Hodnoty intenzit a poloh při detekci záměrného kříže světelného pole

0°			
Profil y [mm]	Suma intenzit [%]	min intenzita v profilu [%]	souřadnice x [mm]
-1,5	2491,7	100,0	0,0 ; 0,5
-1,0	2322,4	99,7	0,5
-0,5	2389,8	100,0	0,0
90°			
Profil y [mm]	Suma intenzit [%]	min intenzita v profilu [%]	souřadnice x [mm]
-1,5	2189,5	87,9	0,0 ; 0,5
-1,0	1967,0	84,5	0,5
-0,5	2044,7	85,6	0,0
180°			
Profil y [mm]	Suma intenzit [%]	min intenzita v profilu [%]	souřadnice x [mm]
-1,5	2184,6	86,1	0,5
-1,0	1951,0	83,7	0,5
-0,5	1953,2	84,6	0,5

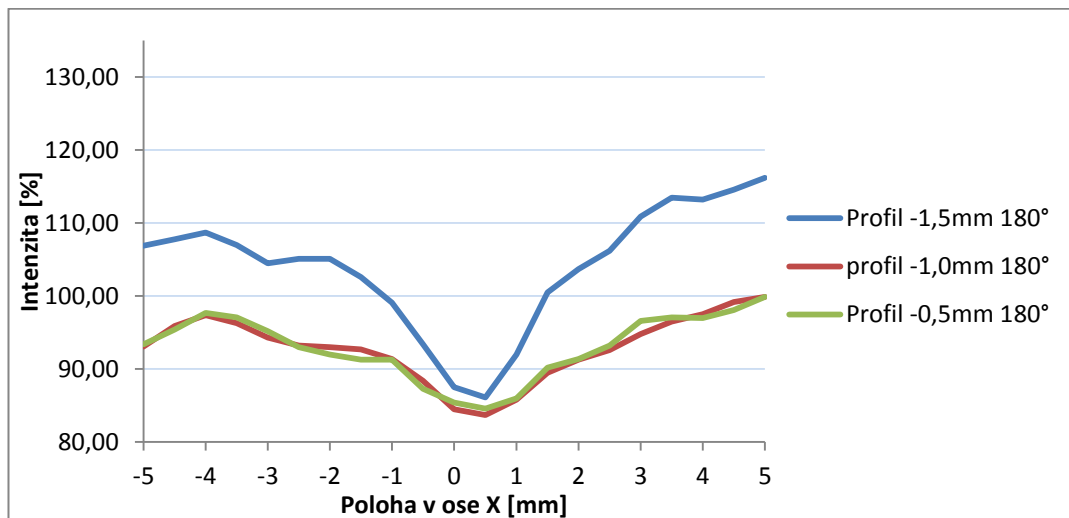
Tabulka (Tabulka 4) ukazuje, že pro všechna natočení sondy v ose Z bylo vždy nalezeno minimum sumy intenzit pro profil $y = -1,0\text{mm}$. Přestože rozdíl intenzit byl velmi malý. Zároveň minimum v daném profilu bylo vždy určeno v poloze $x = 0,5\text{mm}$. Při natočení sondy pro 0° , 90° a 180° byla nalezena minimální intenzita v naměřených datech na souřadnicích $[0,5; -1,0]$ viz (Tabulka 4, Obrázek 18, Obrázek 19, Obrázek 20).



Obrázek 18: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 0°



Obrázek 19: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 90°



Obrázek 20: Graf naměřené intenzity a pozice, rotace sondy = 180°

Ze zobrazených grafů lze usuzovat, že fotodioda nebo světlocitlivý čip není přesně uložen ve středu a vodorovně se zemí. Křivky by pro 0° a 180° měly být totožné. Zároveň rozdíl intenzit, je příliš nízký. Z pozdějších měření světelného a laserového pole vyplynulo, že okolní osvětlení má až příliš velký vliv, pokud se měří stín záměrného kříže. První měření světelného a laserového pole (viz kapitola 5.3.1) nicméně probíhalo za běžného utlumeného osvětlení, jehož zdrojem byla klasická žárovka. Ve druhém měření (viz kapitola 5.3.2) bylo použito pro okolní svícení zatemněných a kolimovaných zářivek, které neměly takový vliv na měření. Za těchto podmínek by bylo vhodné opakovat měření pro vliv rotace sondy na detekované intenzitě záření světelného pole.

Sonda nicméně vždy určila stejný profil s celkovou minimální intenzitou $y=-1,0$ při kroku 0,5mm a zároveň určila minimální intenzitu v daném profilu na stejném místě $x=0,5$. Z dat se dá usuzovat, že sonda měří přesně, protože pro opakovaná měření bylo dosaženo stejných výsledků při kroku 0,5mm. U nižší šířky kroku, se nedá z naměřených dat určit, jestli by sonda měřila stejně kvalitně ve třech různých natočeních. Bohužel z nedostatku volných termínů pro měření na lineárním urychlovači nebylo možné provést měření i pro nižší krok a menší intenzitu okolního světla.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

Koeficient FWHM slouží k popisu šířky objektu v obraze, pokud nemá ostré hrany. Tato vzdálenost odpovídá plné šířce v polovičním maximu na křivce. Pro nekonečně malý světlocitlivý detektor a záření, ve kterém nedochází k rozptylu, by při přechodu z neosvětlené části do osvětlené části měla být detekována ostrá hrana z minima do maxima. V reálných podmínkách je toto nemožné. Velikost tohoto koeficientu je měřena na laserovém zaměřovacím systému. Proto by šířka tohoto koeficientu měla odpovídat šířce laseru od firmy PTW šířka=±1 mm. Měření probíhalo přes sklo fantomu, na kterém dochází k rozptylu laserového paprsku. Zároveň laser v prvním měření procházel přes rysky fantomu, tím docházelo k dalším vlivům, které ovlivňovaly měření.

Tabulka 5: Tabulka pro koeficient FWHM

Detekce laseru	Zadní		Boční	
	Osa X	Chyba kroku	Osa Y	Chyba kroku
<u>první měření (krok 0,2)</u>				
FWHM (mm)	1,4	0,4	1	0,4
<u>druhé měření (krok 0,1)</u>				
FWHM (mm)	1	0,2	1	0,2

Data byla naměřené při lokaci laserového izocentra. Toto izocentrum se hledalo ve dvou měřeních pro ověření shody laserového izocentra a světelné osy (viz kapitola 5.3). Sonda byla umístěna jako při běžném měření, laserové paprsky tedy dopadaly rovnoběžně s rovinou uložení čipu. Proto se tyto údaje nedají aplikovat na kvalitu měření světelného pole vycházejícího z lineárního urychlovače. Naměřených dat je příliš málo k bezpečnému určení kvality detekce laserového paprsku, ale jako pilotní měření odpovídají předpokládaným hodnotám. FWHM bylo naměřeno ve třech případech jako 1mm (hledala se nejbližší naměřená hodnota, která odpovídala polovině maximální hodnoty) s chybou kroku 0,2 mm a 0,4 mm. Chyba kroku odpovídá dvojnásobku kroku měření. Není do toho započtena chyba pohybového systému PTW.

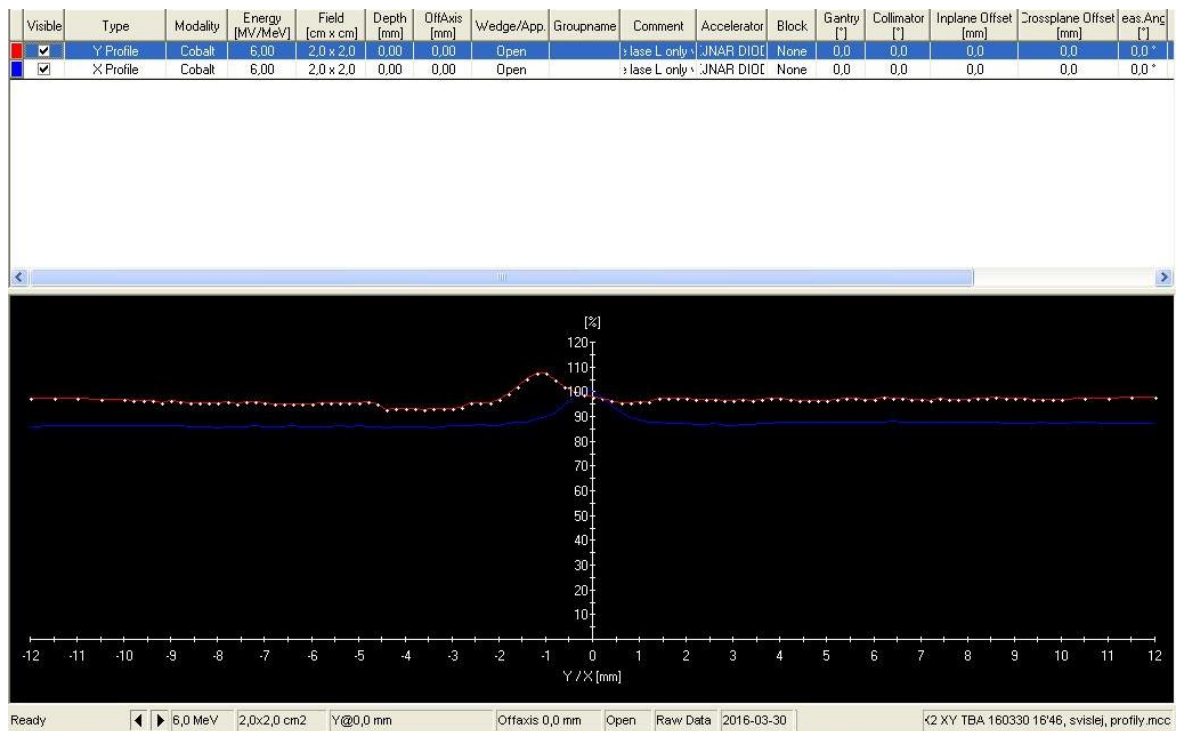
V tabulce (viz Tabulka 5) lze vidět, že v jednom případě došlo k naměření FWHM = 1,4mm s chybou kroku 0,4. Tato odchylka od předchozích

naměřených hodnot naznačuje, že fotodioda nemusí být kvalitně umístěna v trubici tak, aby světlocitlivý čip byl ve vodorovné pozici. Laserové paprsky ze zadního laseru, při měření profilu X, neprocházejí při dopadu na světlocitlivý čip fotodiody hranou fantomu, ale otevřeným vrškem. V prvním měření bylo zároveň zapnuto běžné osvětlení místnosti pomocí necloněných žárovek. V druhém měření už byly použity cloněné zářivky, které přímo neovlivňovaly měření sondou.

5.2 Vyhodnocovací postup pro kontrolu polohy izocentra

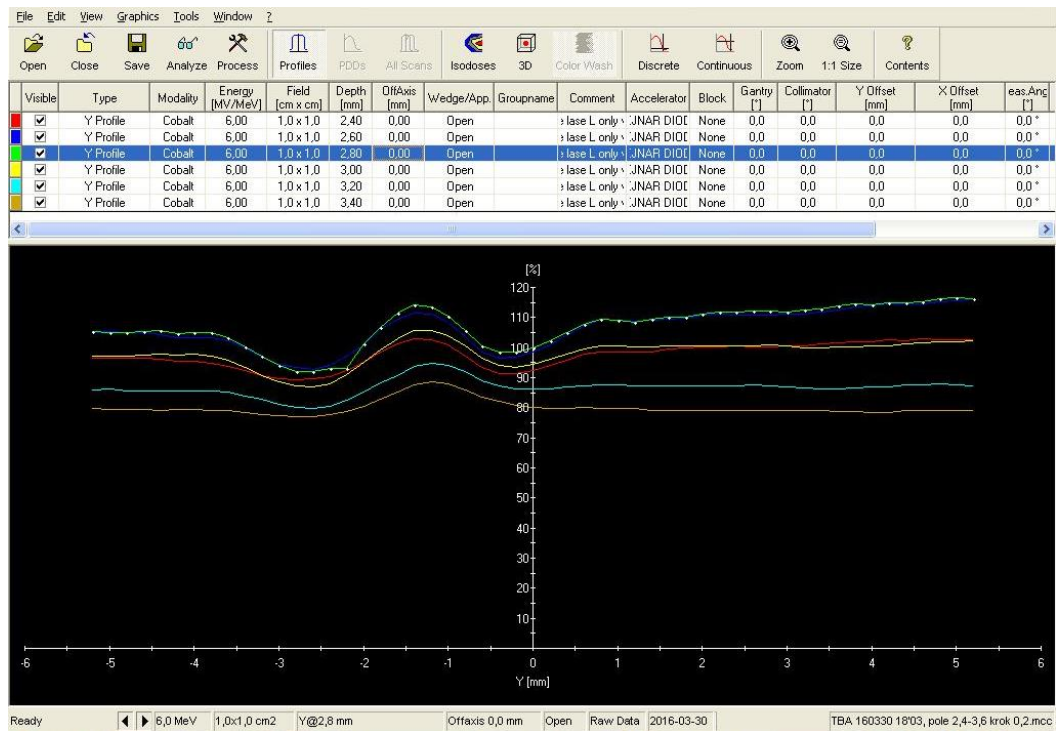
5.2.1 Laserové pole

Vyhodnocení laserového pole bude probíhat pouze v rozhraní programu PTW Mephysto. V první části měření laserového pole se detekovaly hodnoty naměřené v profilu X a Y (viz Obrázek 21). Maximální hodnota naměřená v profilu X, nám udává souřadnici laserového izocentra na ose X. Zároveň maximum naměřené v profilu Y nám udává souřadnici laserového izocentra Y. Poklesy křivky před nárůstem do maximálních hodnot vznikly pravděpodobně černými ryskami na fantomu, kterými lasery prochází. Poklesy tedy odpovídají interferenčním minimům. Tento vliv byl následně eliminován pro druhé měření vysunutím fantomu v ose Z.



Obrázek 21: Laserové izocentrum- profil X,Y laserového pole

Pro měření osy Z se taktéž vychází z naměřených profilů, ovšem nyní Z polohu izocentra určuje hloubka daného profilu, který odpovídá celkové maximální intenzitě, na obrázku (Obrázek 22) odpovídají maximální intenzity profilu zelené barvy. Tento profil má hloubku 2,8mm a to odpovídá souřadnici Z.

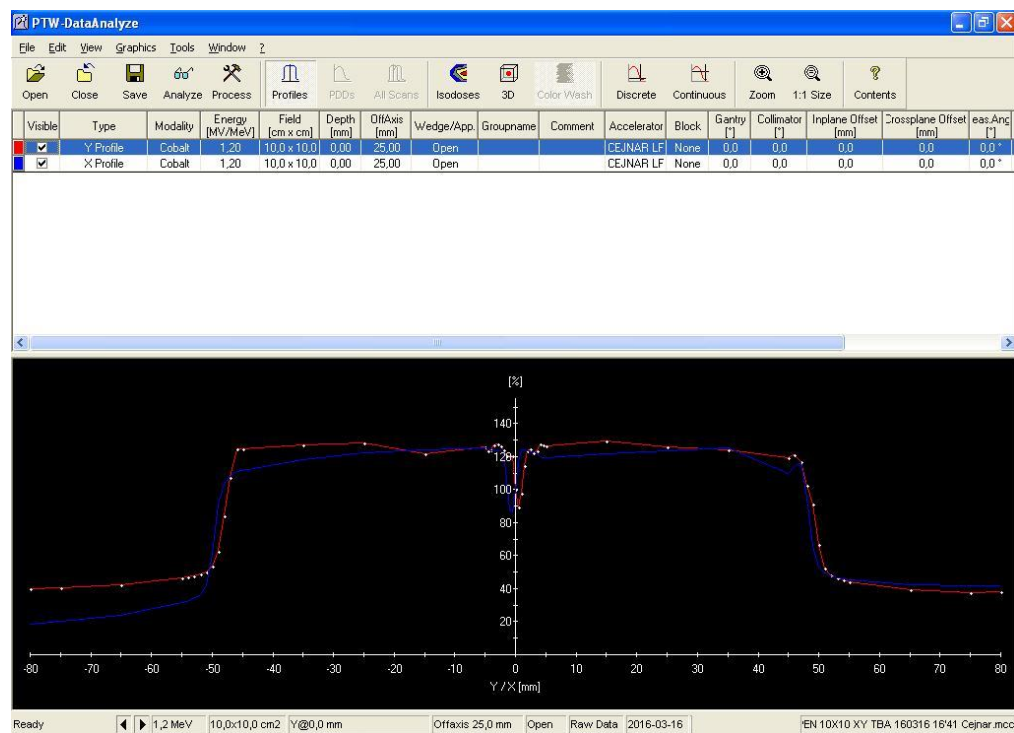


Obrázek 22: Laserové izocentrum- souřadnice Z

Zelený profil je v oblasti -3 až -2 mm pod modrou křivkou, ale celkově je intenzita v celé délce (-6 až 6 mm) větší. Zároveň tento pokles opět odpovídá interferenčním minimům, ty ale nevypovídají o intenzitě laserů v daném místě ve fantomu. Postup byl pro druhé měření upraven tak, jak je zapsáno v kapitole 0, tedy nastavením gantry pro úhel 90° a následně měřen profil X.

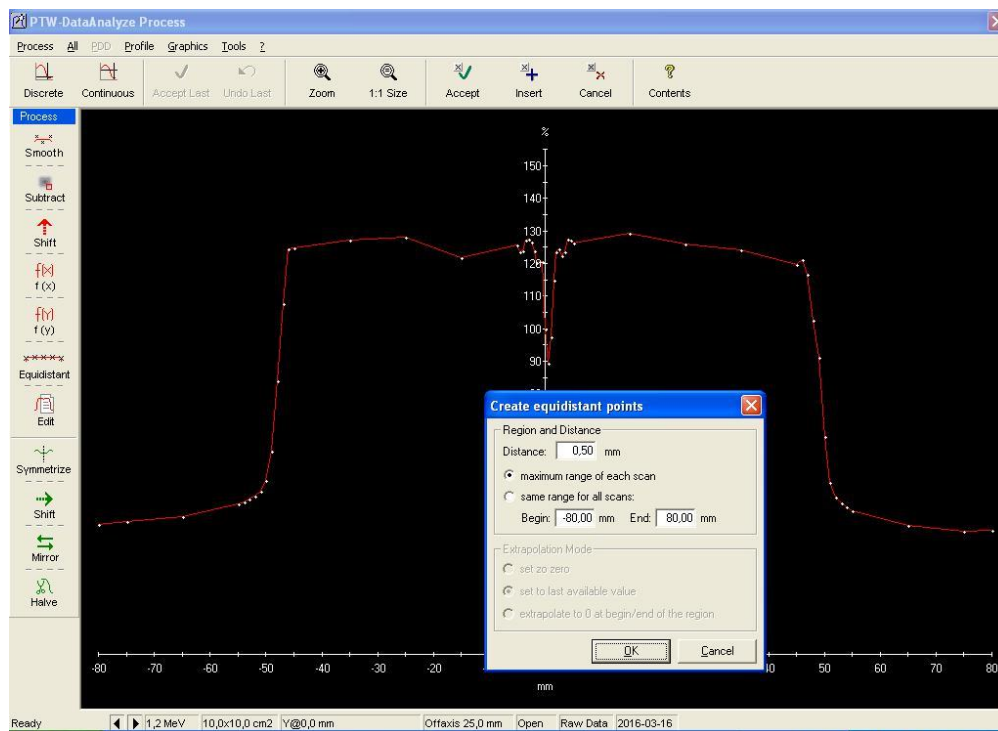
5.2.2 Světelné pole

Pro výpočet izocentra světelného pole se využije metoda hran, tedy z naměřených hodnot se naleznou hrany světelného pole a následně se dopočte poloha záměrného kříže. V první části je potřeba naměřená data spustit v Mephysto Data analysis (viz Obrázek 23), kde se vykreslí naměřené profily.



Obrázek 23: Data analyze

Nyní se vybere požadovaný profil a klikne se na ikonu Process. Otevře se nové okno (viz Obrázek 24), ve kterém se klikne na Equidistant a navolí se k dopočítání zbývajících bodů krok 0,5mm.

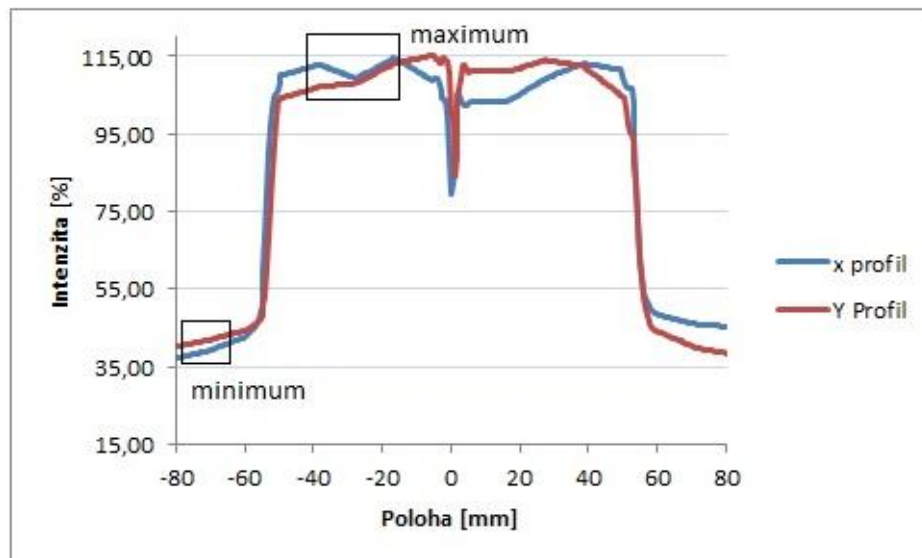


Obrázek 24: Data analyze Process

Po zjemnění kroku následuje export do tabulkového editoru Microsoft Excel, který je nutné provést ručně, protože program Mephysto automatickým exportem nedisponuje. Export probíhá kliknutím na Edit, kde se otevře po levé straně okno s dopočtenými hodnotami, které se následně překopírují do tabulkového editoru. Dále se na data použijí skripty v Matlabu LightFieldSSD.m, LightFieldDepth100.m a na závěr vzd_isocenter.m. Postup výpočtu a informace, které se ze skriptu získají, jsou popsány v následující kapitole.

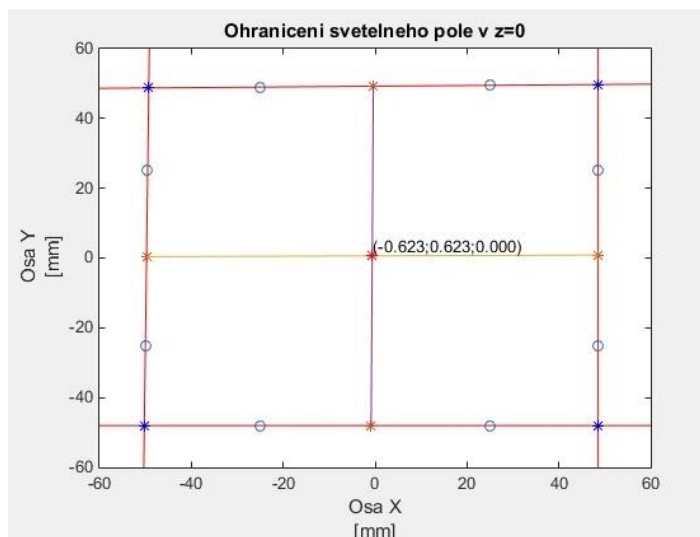
5.2.2.1 Skript pro výpočet záměrného kříže, světelné osy a její vzdálenosti od laserového izocentra

Skript LightFieldSSD.m nejprve načte data z excelové tabulky, do které byla data manuálně zkopírována. Následně se využije výpočet 50% izodózy [6], což je zaběhnutý postup při měření radiačních polí. Jde o polovinu z rozdílu maximální a minimální naměřené hodnoty v dané oblasti (viz Obrázek 25) a následně přičtení k minimální hodnotě. Pro 50% izodózu se jedná o klasický průměr. Jako maximum a minimum bylo vybráno 30 hodnot z dané oblasti a ty byly následně zprůměrovány.



Obrázek 25: Výběr maxima a minima

Touto metodou se našel bod, který ležel na hraně světelného pole v dané rovině. Naměřeny jsou vždy 4 křivky v dané rovině SSD, tím se získá 8 bodů. Předpokládá se, že hrany světelného pole budou složeny z přímek, každá přímka je pevně definována dvěma body, tyto body jsou zobrazeny kolečkem na obrázku (Obrázek 26). Po vykreslení přímek se vypočtou jejich průsečíky, tedy rohy světelného pole, které jsou zobrazeny modrou hvězdičkou.



Obrázek 26: Vykreslení hran a záměrného kříže světelného pole

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

Nyní jsou pevně definovány délky hran světelného pole. Následně se vypočtou středy každé hrany, které jsou zobrazeny červenou hvězdičkou, a ty se spojí s protější stranou. Tyto úsečky odpovídají záměrnému kříži. Průsečík těchto dvou úseček je definován jako bod, který leží na ose záměrného kříže světelného pole.

Druhý skript LightFieldDepth100.m je totožný ale s přepsanými neznámými, ten se použije pro hloubku -100mm. Tím se získají 2 body, které leží na světelné ose.

Poslední skript vzd_isocenter.m tyto dva body v SSD a v SSD-100 propojí přímkou a vypočte úhel, který přímka svírá se zemí. Zároveň se vypočte nejmenší vzdálenost této přímky od bodu laserového izocentra, jehož souřadnice se zadají v Command Window (viz Obrázek 27).

```
>> vzd_isocenter
Isocentrum Laseru [x,y,z]: [-0.2,-1.2,2.8]

BodLaser =

    -0.2000    -1.2000     2.8000

vzdISO =

    0.3055

uhleldg =

    89.3833
```

Obrázek 27: Výpočet vzdálenosti a svírajícího úhlu světelné osy se zemí

Výsledkem těchto skriptů jsou polohy jednotlivých bodů, vzdálenosti hran, úhly mezi jednotlivými úsečkami, úhel mezi světelnou osou a vodorovnou rovinou.

5.3 Naměřené hodnoty polohy izocentra

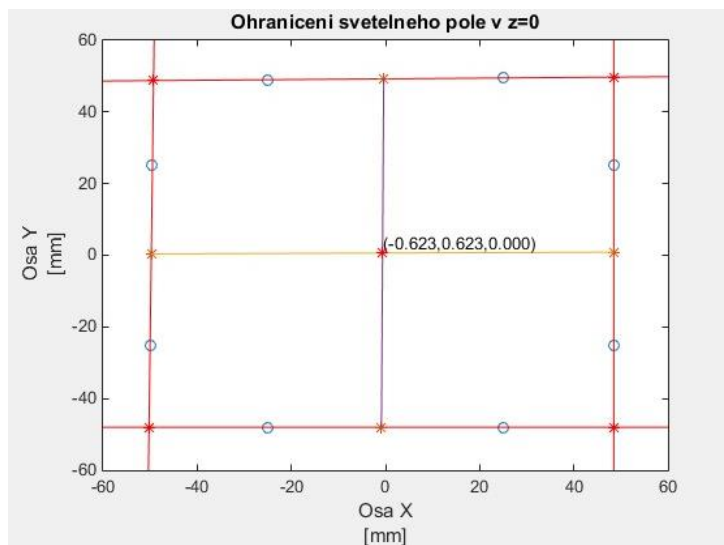
5.3.1 První měření

První měření laserového a světelného izocentra probíhalo nadvakrát. Důvodem bylo seznamování se s technikou a sestavení měřící aparatury. Proto jsou tyto hodnoty brány jako přibližné a informativní, jelikož vodní fantom nemusel být umístěn přesně ve stejném místě. Tím mohlo vzniknout posunutí počátečního umístění sondy a tedy i počátku soustavy souřadné vůči zaměřovacím laserům a světelnému poli z gantry. Zároveň umístění sondy do laserového izocentra bylo provedeno okometricky, a proto nemusela být nejcitlivější oblast sondy umístěna přímo do průsečíku laserů. Další vadou v průběhu měření bylo využití běžného osvětlení, které mohlo příliš ovlivňovat měření. První měření je psáno v diplomové práci chronologicky, kdy nejdříve bylo naměřeno světelné pole a následně laserové izocentrum. V postupu měření (kapitola 0) a ve druhém měření (kapitola 5.3.2) se nejprve detekuje laserové izocentrum a s jeho znalostí je teprve možné měřit světelné pole, protože se tím dostaneme do roviny SAD, tedy SSD=100 mm.

5.3.1.1 Světelné pole

Naměřené hodnoty byly zkopírovány do excelového souboru SSDdepth-100. Měření probíhalo ve výšce osy $z=0$ mm a -100 mm. Nastavení měřící aparatury bylo podle popsaného návodu, kromě nulového bodu soustavy souřadnic, který byl nastaven okometricky.

Na obrázku (Obrázek 28) lze vidět ohraničení světelného pole společně s vyznačeným záměrným křížem. Střed tohoto kříže se nachází v souřadnicích $[-0,62; 0,62; 0,00]$. I když se sonda nepohybovala v definované SSD vzdálenosti, data v tabulce (Tabulka 6) naznačují, že velikost světelného pole není v toleranci s indikovanými údaji. Jejich odchylka by podle [1] neměla pro pole 10×10 cm² přesahovat 2 mm a pro pole větší než 20×20 cm² 3 mm. V našem případě levá strana je o 3,34 mm kratší, než je povolený limit.



Obrázek 28: Grafické zobrazení světelného pole pro Z=0 v Matlabu, první měření

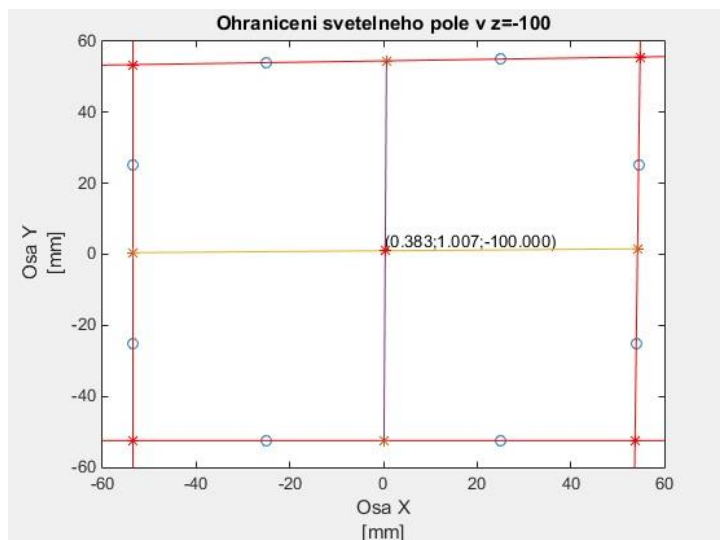
Maximální úhlová odchylka v rozích světelného pole je povolena na hodnotu 0,5°. Horní levý, horní pravý a dolní levý bod mají odchylku od pravého úhlu 1,14 °, 0,58° a 0,57 ° což opět nesouhlasí s maximální povolenou tolerancí.

Měření vzdálenosti mezi středem hrany kolimátoru a světelné osy není možné, protože v našem skriptu získáváme světelnou osu z vypočtených středů hran kolimátorů. Proto vzdálenost od středu jedné hrany k ose záměrnému kříži světelného pole bude vždy stejná vůči vzdálenosti opačné hrany k ose záměrného kříže světelného pole.

Tabulka 6: Hodnoty světelného pole v ose z=0, první měření

rohý pole	HL	HP	DP	DL
úhel okraj (°)	91,14	89,42	90,00	89,43
úhel střed (°)	89,42	90,57	89,42	90,57
	Horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	97,76	97,73	98,73	96,76
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	98,24		97,24	
Souřadnice středu [mm]	[-0,62;0,62;0,00]			

Pro vzdálenost v ose $z=-100$ jsme získali údaje stejnou metodou. Velikosti stran se zvýšily z důvodu lomu světla, protože zdroj žárovky vytváří rozbíhavý svazek, který je na úrovni kolimátorů lámán a dále se rozbíhá. Úhly by v ideálním případě měly zůstat zachovány, ovšem ohybem světla na hranách kolimátorů došlo ke změnám, jak je ukázáno v tabulce (Tabulka 7).



Obrázek 29: Grafické zobrazení světelného pole pro Z=-100 v Matlabu, první měření

Tabulka 7: Hodnoty světelného pole v ose z=-100, první měření

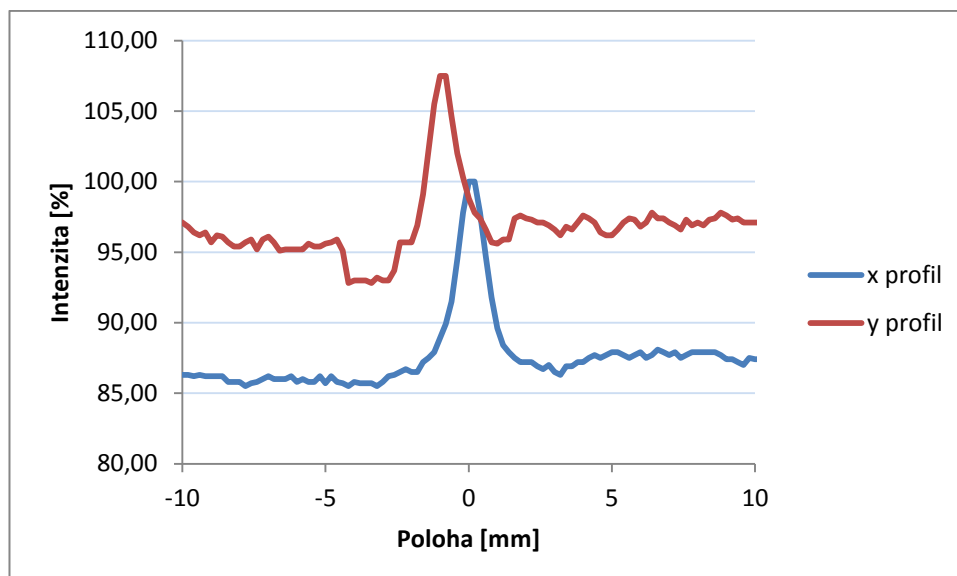
rohý pole	HL	HP	DP	DL
úhel okraj (°)	91,14	88,28	90,57	90,00
úhel střed (°)	89,13	90,86	89,13	90,86
	Horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	108,33	108,1	107,23	105,93
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	107,77		107,01	
Souřadnice středu [mm]	[0,38;1,01;-100,00]			

Na tyto změny může mít vliv kromě nekoherentního světelného paprsku i způsob vzniku tohoto paprsku. Jak je uvedeno v kapitole 3.1 a obrázku (Obrázek 1), světlo se odráží od zrcadla, které je pod úhlem přibližně 45 stupňů. Paprsky odražené v dolní oblasti zrcátka jsou odraženy pod jiným úhlem než paprsky ve vyšší části. Současně je nemožné vytvořit dokonale rovnou plochu zrcadla, tento vliv se sice projeví, ale měl by být zanedbatelný.

Zároveň na tyto změny mají vliv i sekundární kolimátory, které jsou na sobě položeny ve dvou rovinách, aby bylo možné ohraničit čtvercové pole. Paprsky, které se lámou na kolimátorech kolmých k ose X se lámou ve větší vzdálenosti, než paprsky lámající se na kolimátorech kolmých k ose Y. Tato vzdálenost je rovna právě výšce jednoho kolimátoru.

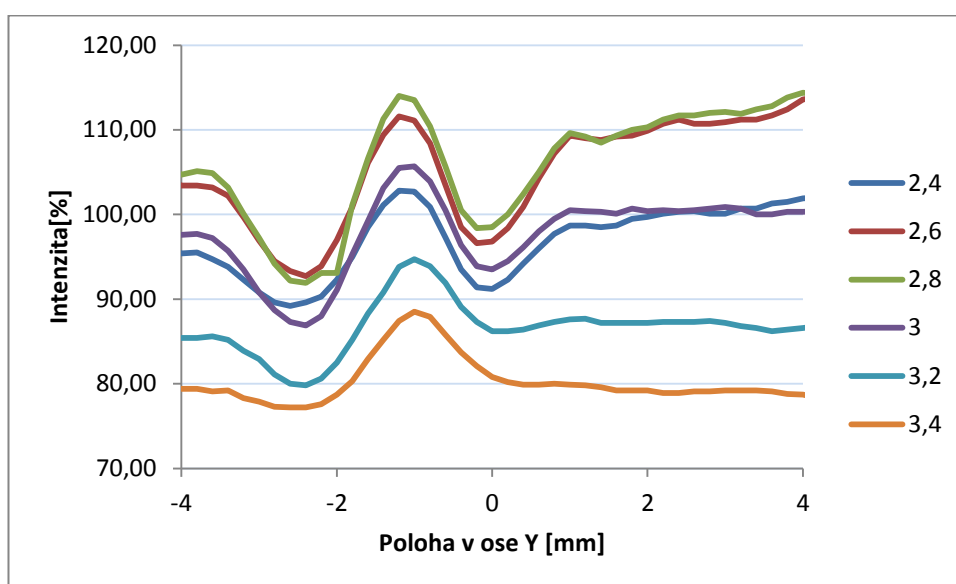
5.3.1.2 Laserové pole

K nalezení izocentra postačí profily zobrazené v PTW Mephystu. Pro názornost jsou ale zobrazeny v grafu vytvořeném v excelu. Z naměřených dat a grafu (Obrázek 30) vyplývá, že v X profilu je maximum v $x=-0,2$. Pro Y profil se maximum nachází v hodnotě $y=-1,2$. Toto jsou skutečné hodnoty X, Y laserového izocentra = $[-0,2; -1,2; ?]$.



Obrázek 30: Graf detekce laserového izocentra pro vertikální rovinu, první měření

Hledání polohy Z probíhalo jinou metodou, než je popsána v kapitole 0. Taktéž měřily profily v ose X, ale pootočení gantry bylo nastaveno na 0° . Zároveň byla na místo PDD and Profiles zvoleno Plane parallel to central beam. Následně se zobrazila možnost pro zadání rozsahu a kroku v ose Z, ve které probíhalo měření. Každá křivka tedy odpovídá stejnému profilu X, ale jiné hodnotě Z. Pro hodnotu v ose Z je podle obrázku (Obrázek 31) maximální profil $z=2,8$. Zároveň se maximum v ose Y nachází mezi body $-1,2$ a $-1,4$. Což odpovídá nalezenému maximu, které se hledalo současně pro profily X a Y. Úplné souřadnice laserového izocentra jsou tedy $[-0,2; -1,2; 2,8]$.



Obrázek 31: Graf detekce laserového izocentra pro horizontální rovinu, první měření

5.3.1.3 Poloha laserového izocentra a osy záměrného kříže světelného pole

Přestože bylo zmiňováno, že hodnoty laserového a světelného pole byly naměřeny v různé dny a tedy i za různých nastavení vodního fantomu, využije se skript pro nalezení vzájemné polohy rovnice přímky světelného pole a bodu laserového izocentra. Ve skriptu je potřeba zadat izocentrum z měření laserového pole. Správný postup, který je popsán v postupu měření (viz kapitola 4.2), je naměřit laserové izocentrum a následně tento bod uložit jako střed souřadnicové osy. Jak je vidět na obrázku (Obrázek 32) nejmenší vzdálenost mezi osou záměrného kříže světelného pole a laserovým

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

izocentrem je 0,306 mm. Zároveň skript vypočítal, že světelná osa dopadá na rovinu rovnoběžnou se zemí pod úhlem 89,38°.

```
BodLaser =
    -0.2000   -1.2000    2.8000

vzdISO =
    1.8677

uhleldg =
    89.3833
```

Obrázek 32: Výpočet skriptu v Matlabu pro nejmenší vzdálenost světelné osy od laserového izocentra a svírajícího úhel světelné osy se zemí, první měření

Hodnota poloměru nejmenší kružnice, která je opsaná bodem laserového izocentra a nejbližším bodem na přímce záměrného kříže je 0,93 mm, průměr je 1,87 mm. To podle Doporučení od SUJB nesplňuje podmínku, protože poloměr opsané kružnice izocentra nesmí přesahovat 0,5 mm. Je potřeba pamatovat na to, že laserové pole a světelné pole byly měřeny v jiné dny, tedy byla i pravděpodobně jiné nastavení fantomu MP3.

Úhel, který svírá osa záměrného kříže světelného pole se zemí, by měl být v základní poloze 90°. Dle skriptu je tento úhel 89,38°. Tento rozdíl může být způsoben posunutím stínítka, které vytváří záměrný kříž světelného pole. Zároveň na tento úhel může mít vliv i samotné natočení celého ramene lineárního urychlovače, kdy všechny součásti kterými světelné pole prochází (zrcátko, kolimátory, stínítka), mohou být pootočeny. To by znamenalo, že ukazované hodnoty na gantry neodpovídají jeho skutečnému natočení. Pro přesnější určení, kde se chyba nachází, by bylo potřeba naměřit stejným způsobem i radiační pole a zároveň detekovat mechanické izocentrum lineárního urychlovače. Zároveň by tato chyba mohla nastat i při samotném umístění vodního fantomu, který se dorovná podle zaměřovacích laserů. Fantom byl nicméně umístěn podle vyznačených rysek. Kvůli rovnoběžnosti

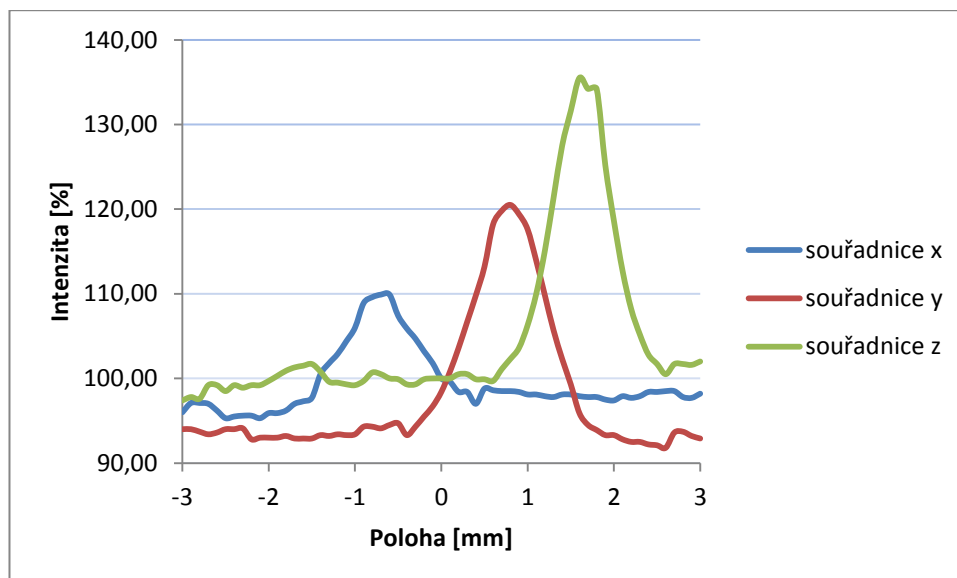
laserových zaměřovacích laserových systémů se dá usuzovat, že odchylka od 90° vznikla špatným seřízením některé z částí lineárního urychlovače.

5.3.2 Druhé měření

Měření probíhalo dne 10. 5. 2016 podle postupu měření (viz kapitola 4.2).

5.3.2.1 Laserové pole

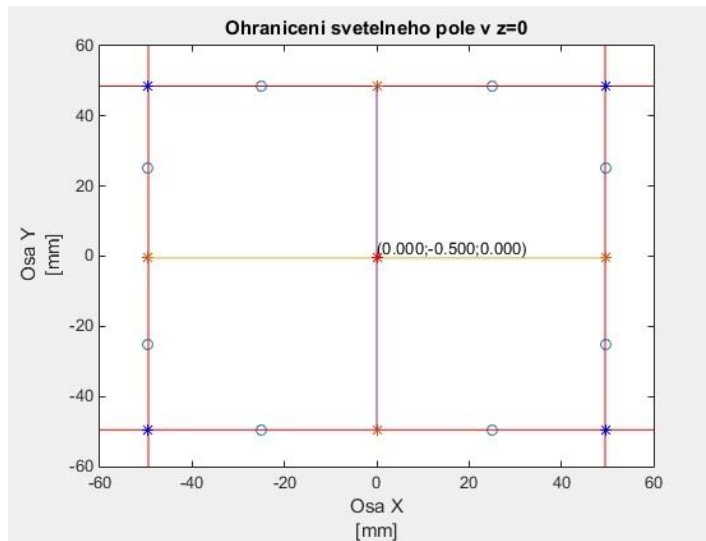
K nalezení izocentra opět postačí profily zobrazené v PTW Mephystu. Pro názornost jsou zobrazeny v grafu vytvořeném v excelu. Z naměřených dat a grafu (viz Obrázek 33) vyplývá, že v X profilu je maximum $x=-0,7$. Pro Y profil se maximum nachází v hodnotě $y=0,8$ a pro profil Z se jeho maximum nachází v $z= 1,7$. Poloha laserového izocentra byla při daném umístění fantomu MP3 určena souřadnicemi $[-0,7;0,8;1,7]$.



Obrázek 33: Naměřené profily pro nalezení laserového izocentra, druhé měření

5.3.2.2 Světelné pole

Na obrázku (Obrázek 34), lze vidět ohraničení světelného pole společně s vyznačeným záměrným křížem. Střed tohoto kříže se nachází v souřadnicích $[0,00;-0,50;0,00]$. Střed záměrného kříže je tedy vzdálen od laserového izocentra, neboli nulového bodu soustavy souřadné 0,5 mm.



Obrázek 34: Grafické zobrazení světelného pole pro Z=0 v Matlabu, druhé měření

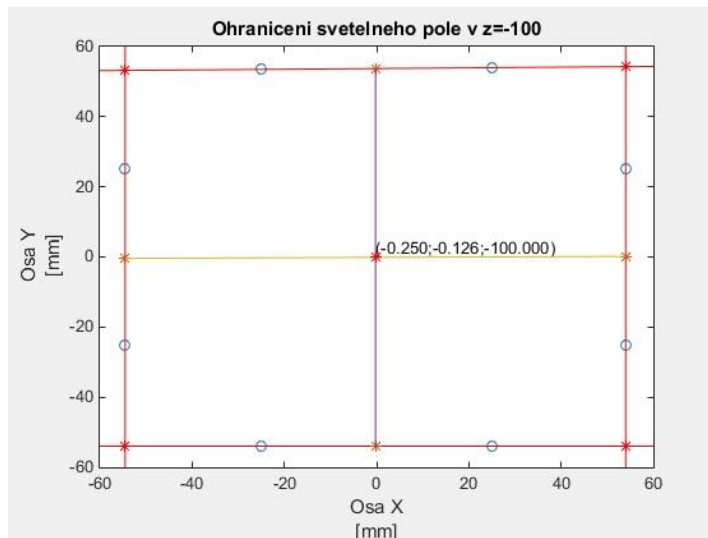
Data v tabulce (Tabulka 8) naznačují, že velikost světelného pole je v toleranci s nastavenými údaji. Jejich odchylka délky stran nepřesahuje pro pole $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 2 mm, jak je uvedeno v doporučení [1]. Zároveň i všechny úhly mají velikost 90° .

Tabulka 8: Hodnoty světelného pole v ose z=0, druhé měření

roh y pole	HL	HP	DP	DL
úhel okraj ($^\circ$)	90,00	90,00	90,00	90,00
úhel střed ($^\circ$)	90,00	90,00	90,00	90,00
	Horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	99,00	98,00	99,00	98,00
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	99,00		98,00	
Souřadnice středu [mm]	[0,00;-0,50;0,00]			

Pro vzdálenost v ose $z=-100$ jsme získali hodnoty stejnou metodou. Poloha středu záměrného kříže je v této rovině $[-0,25;-0,13;100,00]$. Vliv na naměřené hodnoty (Tabulka 9) má opět rozbíhavost světelného pole vycházejícího

z kolimátoru lineárního urychlovače a ohyb světelného pole na hranách kolimátorů.



Obrázek 35: Grafické zobrazení světelného pole pro Z=-100 v Matlabu, druhé měření

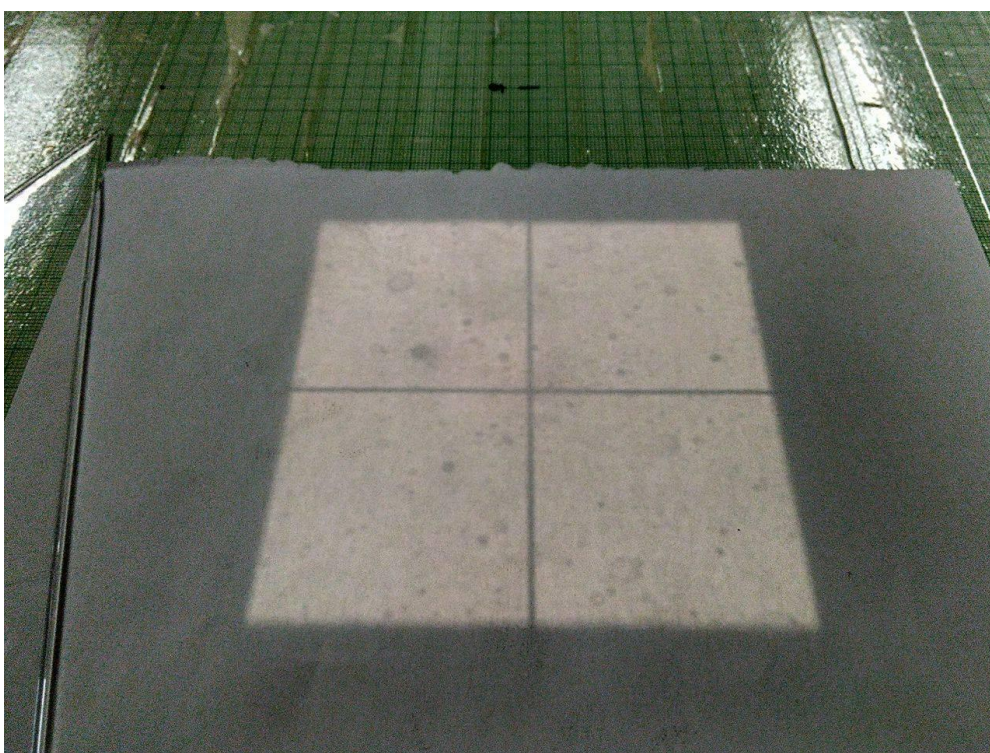
Protože záření s větší vzdáleností od jeho zdroje z lineárního urychlovače slábne, roste s tím vliv okolního osvětlení na sondou detekovaný hranový přechod světelného systému a okolí. Tím klesá přesnost této sondy v detekování přesné hrany světelného systému. V doporučení [1] nejsou definovány povolené limity v naměřené rovině, proto toto měření slouží jen jako přibližné a k detekování osy záměrného kříže světelného pole.

Tabulka 9: Hodnoty světelného pole v ose z=-100, druhé měření

rohý pole	HL	HP	DP	DL
úhel okraj (°)	90,57	89,49	90,00	90,00
úhel střed (°)	89,71	90,28	89,71	90,28
	Horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	108,51	108,29	108,50	107,21
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	108,50		107,75	
Souřadnice středu [mm]	[-0,25;-0,13;-100,00]			

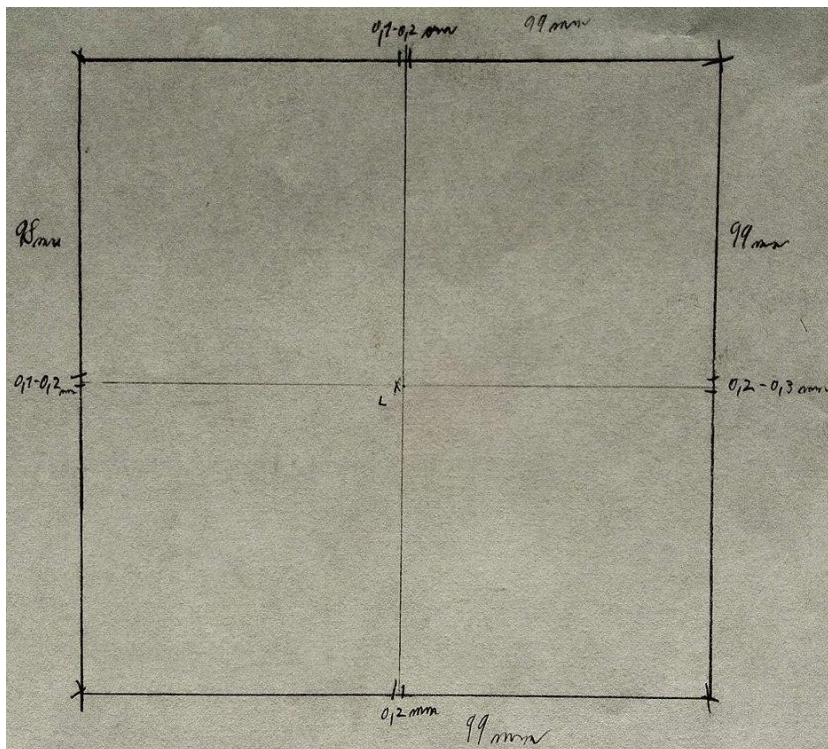
5.3.2.3 Standardní okometrické měření světelného pole

V posledním měření zároveň proběhlo určení světelného pole pomocí užívané okometrické metody (viz Obrázek 36). Tato metoda, jak bylo otestováno, je velmi nepřesná a záleží na zkušenostech a odhadu měřícího. Měření probíhalo vložím papíru na desku stolu. Vysunutím stolu do přibližné výšky SAD podle laserů a následně zakreslením obrysů světelného pole diplomantem.



Obrázek 36: Ukázka měření světelného pole

Délka (viz Obrázek 37) horní a dolní strany byla 99 mm , boční levá strana měřila 98 mm a pravá 99 mm. Šířka úsečky záměrného kříže se pohybovala od 0,1 do 0,2 mm.



Obrázek 37: Měření světelného pole okometrickou metodou a laserového izocentra

	horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	99	99	99	98
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	98-99		99	
Souřadnice středu [mm]	[X ; Y ; Z]			

Vzdálenost středu záměrného kříže a laserového průsečíku (nemusí se jednat o izocentrum) odpovídala necelému 1 milimetru. Měřeno pomocí běžného rýsovacího pravítka s rozlišovací schopností na úrovni milimetrů. Při méně přesném rýsování, by nebyl problém získat výrazně nepřesnější výsledky. Nepřesnější výsledky mohly způsobit, že vzdálenost laserového průsečíku a středu světelné osy nejsou v normě s doporučením [1], přestože by Lineární urychlovač byl seřízen. Naopak by rozladěné zaměřovací systémy lineárního

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

urychlovače mohly být určeny jako přípustné podle doporučení [1] při špatném zakreslení a naměření.

5.3.2.4 Poloha laserového izocentra a osy záměrného kříže světelného pole

Opsaná kružnice laserovým izocentrem a nejbližším bodem na ose záměrného kříže je rovna 0,5 mm, to je v normě s doporučením[1]. Úhel, který osa záměrného kříže světelného pole svírá se zemí, je roven 0,26° (viz Obrázek 38).

```
BodLaser =
    0    0    0

vzdISO =
    0.5000

uhleldg =
    89.7424
```

Obrázek 38: Výpočet skriptu v Matlabu pro nejmenší vzdálenost světelné osy od laserového izocentra a svírajícího úhel světelné osy se zemí, druhé měření

Na velikost tohoto úhlu má jednak vliv okolní osvětlení, které, jak bylo zmíněno v kapitole 5.3.2.2, v hloubce SSD+100 (od nulového bodu soustavy souřadné z=-100) může ovlivnit detekovaný přechod na hraně světelného pole z lineárního urychlovače. Zároveň to ale může být i indikace špatného polohování gantry a tedy nesoulad jeho polohy s ukazovanými parametry rotace. Pro přesnější určení osy záměrného kříže světelného pole by bylo vhodné snížit vzdálenost hloubky od SAD, aby se zmenšil vliv okolního osvětlení. Chyba opět mohla vzniknout špatným umístěním fantomu a tím natočením celé souřadnicové soustavy tak, že osy X a Y nebyly rovnoběžné se zemí. Tato chyba je ale opět vyloučena kvůli rovnoběžnosti bočních laserových systémů a správnému umístění fantomu.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

Dva nezávislé zdroje potvrdily nepřesnost světelného pole, která je ale stále v normě podle doporučení [1]. Proto odchylka 0,5 mm laserového izocentra od středu záměrného kříže odpovídá.

5.3.3 Porovnání prvního a druhého měření

Pokud data porovnáme s naměřenými údaji světelného pole v prvním měření, je patrný výrazný rozdíl. To může být způsobeno jednak zapnutým osvětlením místnosti, kdy v prvním měření byly použity klasické žárovky a ve druhém kolimované zářivky. Tím mohl být rozmělněn přechod mezi tmou a světlem světelného pole.

Pro porovnání zanedbáme okometrické uložení sondy do laserového izocentra v prvním měření. Jediný rozdíl, který toto vyvolává je naměření špatné roviny v ose Z, přičemž tento rozdíl se bude pohybovat maximálně ve výšce světlocitlivé oblasti fotodiody, která je 3,8 mm.

Tabulka 10: Rozdíl naměřených hodnot světelného pole z=0 v prvním a druhém měření

rohý pole	HL	HP	DP	DL
úhel okraj (°)	-1,14	0,00	0,57	
úhel střed (°)	0,58	0,58	-0,57	
	Horní	pravá	dolní	levá
délka stran (mm)	1,24	0,27	0,27	1,24
	horizontální		vertikální	
délka stran kříže (mm)	0,76		0,76	
Souřadnice středu [mm]	[0,62;-0,12;0,00]			

Naměřené hodnoty vzdáleností mají větší rozdíl, než kterou byla sonda schopná měřit (viz kapitola 5.1). Proto se dá předpokládat, že důvodem tak velké nepřesnosti bude pravděpodobně rozdílné okolní osvětlení. Světlo

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

z žárovek nebylo nijak kolimováno a dopadalo na sondu společně s měřeným světelným polem z lineárního urychlovače v prvním měření. Toto světelné záření se následně odráželo od lesklého vodního fantomu a mohlo ovlivňovat měření. Společně s ním se odráží i měřené světelné pole z lineárního urychlovače, to lze eliminovat pohlcujícím materiálem, kterým by musel být polepen vodní fantom.

Pro bezpečné určení vodorovnosti světlocitlivého čipu by bylo vhodné naměřit profil X nebo Y několikrát a vypočítat z něj naměřenou vzdálenost hran světelného pole. Tuto vzdálenost následně mezi sebou porovnat.

Pro přesné určení nejcitlivějšího bodu sondy by bylo potřeba vycloněného svazku o šířce světlocitlivého čipu fotodiody. Tím by se určila správná pozice sondy pro detekování největšího rozdílu intenzit na hraně pole.

Z porovnání dat měření s okometrickou metodou ovšem vyplývá, že co se týče velikosti stran, tak měření odpovídá zaběhnutým měřicím metodám, kvůli vysoké nepřesnosti která je způsobená ručním zakreslováním. Dá se předpokládat, že nepatrnou změnou při zakreslování by se dalo dostat k oběma výsledkům naměřených sondou pro detekci laserového a světelného pole.

6. Porovnání metod měření sondou a běžnými postupy

Standardní doporučené metody detekce izocenter lineárního urychlovače (viz kapitola 3.4) jsou zaměřeny především na detekci mechanického izocentra. Následně z jeho polohy se hledá laserový průsečík. Pokud tedy bude špatně detekováno mechanické izocentrum, další měření budou zatížena chybou. Dle nejnovějšího doporučení od SUJB maximální průměr koule, kterými prochází body mechanického izocentra může být 3mm. Vzdálenost světelného a laserového pole od mechanického izocentra může být maximálně 1mm. Při určitých nastavení lineárního urychlovače tedy může dojít k rozdílu předpokládaného mechanického izocentra a zaměřovacích systémů o 2,5mm při přesném měření. Například jedno z měření světelného pole podle [4] probíhá detekcí záměrného kříže. Tento kříž vytváří linky o tloušťce 1,5mm (měřeno posuvným měřítkem). Průsečík se tedy nedá přesně označit jedním nekonečně malým bodem.

Samotné měření zde provádí člověk, který využívá různé pomůcky (tužka, vodováha, milimetrový papír, úhloměr) k určení polohy izocentra. Člověk není schopen rýsovat a zakreslovat s podmilimetrovou přesností. Zároveň samotná tuha, která slouží k zakreslení, není schopná vytvořit nekonečně tenkou čáru. Každý člověk, tedy nalezne jinou polohu izocentra a tím v konečném důsledku je ovlivňována kvalita terapie, kterou by pacient podstupoval.

Naproti tomu využití PTW vybavení a sondy eliminuje jakoukoli lidskou chybu, která by v průběhu měření mohla vzniknout. Zároveň se jednotlivá měření laserového izocentra a záměrného kříže nevztahují k jinému parametru a jsou tedy nezávislé. Tím se dá mnohem přesněji určit přibližný zdroj vzniklé chyby. Pokud navíc necháme fantom ve stejné poloze, můžeme se stále vracet k nalezenému izocentru při měření jiných parametrů, protože touto metodou máme přesně daný jediný bod se známými souřadnicemi.

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

Nevýhodou měření je poměrně větší časová náročnost, pokud se hledá pouze světelné a laserové pole. Pokud se ale následně bude pokračovat v měření a ověřování radiologických parametrů s pomocí fantomu PTW, čas se výrazně urychlí. Nebude totiž nutné měnit pomůcky a různě nastavovat ozařovací stůl pro položení pomůcek.

6.1 Návrhy pro vylepšení

Při měření laserového pole dochází na hraně fantomu k rozptylu. Ten je způsoben samotným sklem a černými ryskami pro nastavení fantomu v prostoru. Ideálním řešením by bylo odstranění bočnick hran fantomu pro pravý a levý laser. Zadní laser je umístěn výše a jeho detekce nemusí probíhat přes sklo. Tím by byly odstraněny všechny překážky pro laserové pole a přesnost jeho měření by záležela pouze na kvalitě samotné sondy. Zároveň by tím bylo i možné měřit světelné pole lineárního urychlovače v hlavních polohách. Momentálně to není možné, protože není zajištěno dopadání světelné pole z lineárního urychlovače kolmo na stěnu fantomu. Pokud nedopadá kolmo, dochází k příliš velkému rozptylu a jeho posunu na přechodu vzduch-sklo a sklo-vzduch. To by ovlivnilo výslednou polohu osy záměrného kříže světelného pole při jiných než základních polohách.

Další úpravou by bylo minimalizování odrazu od lesklých hran fantomu polepením materiálu, který by záření pohlcoval.

Samotná sonda nebyla dostatečně otestována pro správnost měření. Bylo by potřeba naměřit kvalitu usazení čipu, popřípadě samotné fotodiody. Zda při uložení sondy v PTW držáku je rovinný vršek fotodiody a čip rovnoběžně s osami X a Y (viz Obrázek 2). Zároveň by bylo vhodné otestovat citlivost na světelný paprsek v různých dopadajících úhlech. Jak bylo naměřeno, osa záměrného kříže světelného pole v SAD a SAD+100 nedopadala kolmo na rovinu X, Y.

Zároveň by bylo vhodné otestovat velikost vlivu okolního osvětlení na detekování světelného pole. Ideální postup by bylo naměření se zapnutými

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

zářivkami a následně naměření v co nejvíce dosažitelné tmě. Společně s tím by se musely zakrýt i zapnuté monitory v místnosti.

Pro detekování větší kolmosti náběžných hran světelného pole by bylo vhodné minimalizovat velikost světlocitlivého čipu. To by bylo možné vytvořením části sondy, která by směřovala světelné pole do středu, který by byl odstíněn ze stran. Trochu se tomu podobá návrh sondy s krystalem (viz Obrázek 12), ale bylo by potřeba všechno výrazně zmenšit a vyhledat čip o menší velikosti. Podobná sonda již existuje pro CyberKnife, ale slouží k detekci pouze laserového zaměřovacího systému a k interním materiálům firmy, zajišťující tvorbu této sondy, se není možné dostat.

7. Diskuse

Důvodem navrhnutí sondy pro nalezení, ověření a naměření průsečíku světelného a laserového zaměřovacího systému bylo zefektivnění a zrychlení metody pro měření izocentra s vybavením od firmy PTW. Tyto zaměřovací systémy slouží nejen ke správnému ověření radiačního pole, ale zároveň i k nastavení pacienta pro požadavky dané terapie. Nebudou-li tyto systémy v koincidenci, bude do ověření radiačního pole zanesena chyba. To samé platí i pro uložení pacienta těmito systémy, kdy radiační pole by působilo na jinou oblast, než která byla plánována.

Pro měření zaměřovacích systémů byly navrženy různé konstrukce sondy. Jejich častým problémem byla konstrukční náročnost, na druhou stranu by některé návrhy zmenšily vliv umístění světlocitlivého čipu a zároveň vliv kvality pláště fotodiody. Pro zvolení vhodného návrhu bylo přihlédnuto k sondám od PTW tak, aby navržený tvar odpovídal těmto sondám a tím se minimalizovala chyba při výměně sondy pro měření radiačního pole. Při výběru fotodiody byly podstatné parametry především odezva na vlnové délky 630 nm, které odpovídají zaměřovacím laserům, její celkový vlnový rozsah pro detekci a úhel, pod kterým je fotodioda schopná detekovat záření. Po zvolení vhodné fotodiody bylo nutné vytvořit konstrukci pro její usazení. Trubicovitý tvar odpovídá sondám PTW a zároveň je možné upevnění do držáku pro vodní fantom MP3. Trubicovitý tvar má vyvýšený okraj o průměru spodní části fotodiody, pro její zapadnutí do trubice. Tím mělo být zabezpečeno vodorovné usazení fotodiody. Pro propojení fotodiody a elektrometru UNIDOS byl zvolen kabel s konektorem BNT, obojí od firmy PTW.

Samotné měření probíhalo ve Fakultní nemocnici Motol onkologickém centru na monoenergetickém 4 MeV lineárním urychlovači. Počet měření, která mohla být na lineárním urychlovači provedena, byl příliš malý pro lepší statistické zpracování a vyhodnocení. Důvodem byla obsazenost lineárního urychlovače pacienty, kteří podstupovali terapii, obsazenost techniky kteří měřili

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

pro potřeby firmy případně Motola a pracovní vytíženost vedoucího diplomové práce, který pro mě ovládal a nastavoval lineární urychlovač.

Pro vyhodnocení naměřených dat byl navíc vytvořen skript, který usnadňoval porozumění výsledků a graficky zobrazoval světelné pole se záměrným křížem, jenž nebyl v zadání diplomové práce. Současně vypočítal vzdálenosti a úhly mezi stranami pro lepší určení zdroje chyby.

První měření bylo z důvodu získávání zkušeností a seznamování se s použitým vybavením rozděleno na dva dny. Nebylo tedy možné zaručit, že vodní fantom se nachází vždy ve stejné pozici, to mělo za následek různou polohu souřadnicové soustavy, která byla dána fantomem. Proto je měření bráno pouze orientačně.

Naměřená data z prvního měření naznačují rozladění zaměřovacích systémů lineárního urychlovače, protože vzdálenost izocentra od záměrné osy přesahovala povolenou vzdálenost podle doporučení [1]. Rozladění zaměřovacích systémů potvrdilo i druhé měření. Vzdálenost izocentra nicméně byla určena na 0,5mm. Tato vzdálenost je podle doporučení [1] v pořádku.

Vliv na samotná měření mělo několik faktorů. Prvním a největším byl vliv osvětlení místnosti, kdy v prvním měření bylo použito běžné osvětlení nestíněných žárovek. Toto osvětlení mohlo mít vliv na detekci přechodu hrany světelného pole. Tento vliv se minimalizoval využitím kolimovaných zářivek, při dalším měření.

Dalším negativním vlivem na měření byl lesklý povrch fantomu, který odrážel dopadající světelné záření do různých směrů a mohl tím ovlivňovat měřící sondu.

Z nabytých zkušeností následně v kapitole 6.1 byly navrženy postupy pro zlepšení a zefektivnění měření světelného a laserového zaměřovacího systému pro lineární urychlovač. Jedná se především o upravení PTW fantomu, aby nedocházelo k rozptylu pro laserové záření a dále návrh konstrukce sondy, která by lépe detekovala přechod z neosvětlené do osvětlené části světelného pole.

8. Závěr

V této práci bylo vytvořeno pět návrhů pro konstrukci sondy (viz kapitola 4.1), která by byla schopná detekovat zaměřovací laserový a světelný systém lineárního urychlovače. Podle těchto systémů se polohuje vodní fantom, který slouží k měření radiačního pole. Vznikne-li tedy chyba už při ověření těchto dvou systémů, chyba se přenesení i do měření radiačního pole. Zároveň jsou tyto systémy používány při polohování pacientů. Pokud tedy bude špatně určené radiační pole a zároveň bude i špatně uložen pacient pomocí těchto systémů, bude mít léčba jiné účinky.

Pro návrh sondy byly vybrány součástky, které jsou popsány v kapitole 4.1.2. Fotodiody byly vybírány podle několika kritérií, které jsou taktéž popsány v dané kapitole. Propojovací konektor a kabel byly vybrány s ohledem na použitý elektrometr UNIDOS.

Současně byly vytvořeny skripty pro detekci laserového a světelného pole v programovacím prostředí Matlab, které nebyly v zadání diplomové práce. Tyto skripty napomáhali k interpretaci a výpočtům pro ověření laserového a světelného pole. Zároveň pole porovnávaly vůči sobě, tím bylo možné ověřit jejich koincidenci.

Měření proběhlo ve Fakultní nemocnici Motol v onkologickém centru na monoenergetickém 4 MeV lineárním urychlovači. Z důvodu velkého obsazení urychlovače (popsáno v kapitole 0), byla provedena pouze dvě měření, přičemž první měření bylo rozděleno do dvou dnů.

V prvním se měřilo světelné pole v přibližné rovině SAD. Kvůli tomu se hodnoty musí brát jako orientační. Nicméně naznačovali, že zaměřovací systém nebude seřízen. Odchyly stran byly větší než 2 mm a odchyly úhlů přesahovaly 1°. Zároveň bylo světelné pole naměřeno v přibližné rovině SAD+100 mm. Toto měření sloužilo k určení osy záměrného kříže světelného pole, která byla vypočtena jako průsečnice středů záměrných křížů v rovině SAD a SAD+100 mm. Tato osa záměrného kříže světelného pole svírala

ČVUT	Detekce Lineárního urychlovače	Daniel Cejnar
------	--------------------------------	---------------

s rovinou země, tedy rovinou X, Y úhel $89,38^\circ$. V další části měření, při jiném nastavení vodního fantomu, byl naměřen laserový zaměřovací systém. Tím bylo určeno laserové izocentrum, které se následně porovnávalo s osou záměrného kříže světelného pole. Toto porovnání bylo pouze orientační, kvůli rozdílnému nastavení vodního fantomu. Nejmenší vzdálenost mezi osou záměrného kříže světelného pole a laserovým izocentrem byla vypočtena na 1,87mm. Tato hodnota není v normě s doporučením [1].

Druhé měření proběhlo podle postupu měření, který je popsán v kapitole 0. V první části se našlo laserové izocentrum. Tento bod se definoval jako nulový bod souřadnicové soustavy a následně se měřilo světelné pole. Velikosti stran světelného pole nepřesahovaly 2 mm a všechny úhly úseček svíraly 90° . Poté bylo světelné pole naměřeno v SAD+100 mm pro zjištění osy záměrného kříže. Tato osa svírala s rovinou X, Y úhel $89,74^\circ$. Následně bylo měření světelného pole v SAD provedeno používanou okometrickou metodou. Volnost při zakreslování byla značná a je ovlivněna zkušenostmi pracovníka, který ověřování světelného pole okometrickou metodou provádí. Rozdíl velikosti světelného pole naměřeného sondou PTW ve druhém měření a velikosti jedné hrany pole naměřeného okometrickou metodou byl 1mm, zbylé strany byly stejně naměřené oběma metodami. V kapitole 5.3.2.3 je porovnáno měření světelného pole těmito dvěma postupy. Vzdálenost osy záměrného kříže světelného pole od laserového izocentra byla určena na 0,5mm. Tato hodnota je hraniční pro používání lineárního urychlovače podle doporučení [1].

Na závěr byly popsány v kapitole 6.1 návrhy pro zlepšení detekce záměrné osy světelného pole. Návrhy jsou zaměřeny především na vodní fantom a úpravu samotné sondy a na další postupy pro otestování sondy. Práce připravila podklad pro zavedení elektronického postupu ověření laserového a světelného pole lineárního urychlovače.

9. Zdroje

- [1] DUFEK, Vladimír a kol. *Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/publikace-sujb
- [2] ZHANG, Mutian a kol. What Do We Mean When We Talk about the Linac Isocenter? *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology* [online]. 2015, Vol.4(No.3), 233-242 [cit. 2016-11-02]. ISSN 2168-5444. Dostupné z: www.scirp.org
- [3] JANEČKOVÁ, Lenka a kol. *Zavedení systému jakosti při využívání významných zdrojů ionizujícího záření v radioterapii-kilovoltážní zobrazovací systémy pro igrt* [online]. Praha, 2009 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: www.sujb.cz/dokumenty-a-publikace/publikace-sujb
- [4] *Metodika, první část přijímací zkoušky, zkoušky dlouhodobé stability lineárního urychlovače* [online]. Praha, 2005 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: www.sujb.cz/radiacni-ochrana/dokumenty
- [5] NJEH, Christopher a kol. A simple quality assurance test tool for the visual verification of light and radiation field congruent using electronic portal images device and computed radiography. *Radiation Oncology* [online]. 2012, 7 [cit. 2016-11-02]. DOI: 10.1186/1748-717X-7-49. Dostupné z: www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc
- [6] Ulman, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm
- [7] *LAP LASER* [online]. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: www.lap-laser.com
- [8] *PTW* [online]. Freiburg, 2012 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: www.ptw.de
- [9] *Uživatelský manuál UNIDOS webline*. 2006.
- [10] KUBERA, Mirek. *Emisní spektra různých zdrojů* [online], 7 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: www.vernier.cz/experimenty/gml/fyzika/f44.pdf