

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Bc. Jan Jakube

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh vhodné CT technologie pro analýzu strojních součástí, zejména  
zámkových systémů

Bc. Jan Jakube

Diplomová práce

2013

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Jakube**  
Osobní číslo: **D11841**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní prostředky: Silniční vozidla**  
Název tématu: **Návrh vhodné CT technologie pro analýzu strojních součástí,  
zejména zámkových systémů**  
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Nedestruktivní metody zkoušení materiálů
- 2) Metody CT ve strojírenství
- 3) Soudobé CT technologie
- 4) Porovnání různých CT zařízení a aplikací s ohledem na reálný výrobek

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího diplomové práce**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran textu a přílohy**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- 1) Kopec, B., et.al.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, CERM, Brno, 2008
- 2) Werth Messtechnik, Munchen: Rentgenová tomografie v průmyslové měřicí technice, 2011
- 3) Vyplél, Zdeněk: Metrologie v kostce. Vyd. 1. Praha : Sdělovací technika, 2002

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.**

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů


Datum zadání diplomové práce: **15. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2013**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.  
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. února 2013

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Nesouhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 5. 2013

Bc. Jan Jakube

### **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce doc Ing. Pavlu Švandovi, PhD. za cenné rady a připomínky při zpracování práce. Dále firmě Kiekert a hlavně Ing. Bohumilu Lapkovi a Ing. Pavlu Janouškovi za umožnění zpracování diplomové práce, poskytnutí materiálů a řady užitečných rad a informací.

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu „IVINTEP - Inženýrské vzdělávání jako interakce teorie a praxe“, reg. č. CZ.1.07/2.2.00/15.0352

**Anotace:**

Práce je věnována výběru vhodné CT technologie pro skenování strojních součástí především zámkových systémů firmy Kiekert. V teoretické části se zabývá popisem technologií nedestruktivního testování a hlubším popisem CT technologie. Experimentální část práce obsahuje vytipování vzorků a jejich měření na CT přístroji. Výsledkem experimentální části je vyhodnocení výsledků a doporučení vhodné technologie pro použití ve firmě Kiekert.

**Klíčová slova:**

nedestruktivní testování, RTG záření, CT technologie, vyhodnocení naměřených dat, měření

**Title:**

Propose of CT technology for the analysis of machine parts, particularly of locking systems

**Annotation:**

This diploma work deals with the choice of appropriate CT technology for component scanning, mainly latch locking systems of the company of Kiekert. The theoretical part describes technologies of non-destructive testing and a detailed description of CT technology. Experimental part of this work contains the selection of samples and their measurements on a CT device. The outcome of the experimental part is evaluation of the results, and recommendation of a suitable technology for implementation in the company of Kiekert.

**Keywords:**

Non-destructive testing, X-rays, CT technology, evaluation of the measured data, measurement

# Obsah

Úvod.....	12
1 Nedestruktivní testování.....	14
1.1 Druhy nedestruktivního testování strojních součástí .....	14
1.1.1 Penetrační kapilární metoda.....	14
1.1.2 Zkouška ultrazvukem.....	15
1.1.3 Zkouška prozařováním .....	16
1.1.4 Magnetická prášková metoda.....	17
1.1.5 Měření vířivých proudů.....	18
1.1.6 Metoda akustické emise .....	19
2 Popis funkce CT technologie .....	20
2.1 Druhy snímání CT .....	21
2.2 Popis jednotlivých částí CT.....	22
2.2.1 Rentgenka .....	22
2.2.2 Rotační osa.....	26
2.2.3 Rentgenové detektory .....	27
2.2.4 Lineární osy .....	28
2.3 Vliv na obsluhu.....	29
2.4 Legislativa.....	31
3 Průzkum trhu s CT technologií .....	32
3.1 Určení okrajových podmínek .....	32
3.2 Zmapování trhu a výběr vhodných dodavatelů .....	34
3.3 Využití evropských dotací na nákup této technologie .....	35
4 Určení typických vzorků zámkových systémů pro CT kontrolu.....	36
4.1 Výběr jednotlivých dílů a popis měřících úloh .....	36
4.2 Jednotlivé měřící úlohy .....	36
5 Vyhodnocení naměřených údajů .....	40



5.1	Vyhodnocení pomocí aditivní metody vícekriteriálního rozdělení .....	53
6	Zabudování CT přístroje do laboratoře .....	55
7	Závěr.....	57
8	Použitá literatura.....	59
9	Seznam příloh.....	60

## Seznam Ilustrací a tabulek

Obr. 1 - Portfolio firmy Kiekert [9] .....	13
Obr. 2 – Endoskop používaný ve firmě Kiekert .....	13
Obr. 3 - Postup detekce trhlin pomocí kapilární metody [7] .....	15
Obr. 4 - Znázornění tvaru siločar při výskytu vnitřní vady [6] .....	18
Obr. 5 - Princip metody vířivých proudů [5].....	19
Obr. 6 - Princip metody prozařování [10] .....	22
Obr. 7 - Jednotlivé části rentgenky [1] .....	25
Obr. 8- Rentgenový detektor (liniový, plošný) [1].....	27
Obr. 9 - Zvětšení skenovaného dílu [1] .....	28
Obr. 10 - Hlavní rozměry zámku.....	33
Obr. 11 - Měřicí úloha na díle VRH.....	40
Obr. 12 – VRH 4543_0159 – Výsledek od firmy Zeiss .....	41
Obr. 13 – VRH 4543_0159 – Výsledek od firmy Werth .....	41
Obr. 14 - Měřicí úloha na díle EKT – SANWA .....	42
Obr. 15 – EKT 4521_7185 – Výsledek od firmy Zeiss .....	42
Obr. 16 - EKT 4521_7185 – Výsledek od firmy GE.....	43
Obr. 17 - Měřicí úloha na díle DRF .....	43
Obr. 18 - Měřicí úloha na díle TAG.....	44
Obr. 19 – TAG 4051_9094 – Výsledky od firmy Zeiss.....	44
Obr. 20 – TAG 4051_9094 – Výsledky od firmy Werth .....	45
Obr. 21 - Měřicí úloha na dílech EKT - DAI .....	45
Obr. 22 – EKT 4101_3109 - Výsledky od firmy GE.....	46
Obr. 23 – EKT 4101_3109 – Výsledky od firmy Zeiss.....	47
Obr. 24 – EKT 4101_3109 – Výsledky od firmy Werth .....	47
Obr. 25 - Měřicí úloha na díle HKS .....	48
Obr. 26 - HKS 4055_7160 – Výsledek od firmy GE .....	49
Obr. 27 - HKS 4055_7160 – Výsledek od firmy Zeiss.....	49
Obr. 28 - Měřicí úloha na zámku GL1.....	50
Obr. 29 - GL1 4081_1210 – Výsledek od firmy GE .....	50
Obr. 30 - GL1 4081_1210 – Výsledek od firmy Zeiss .....	51
Obr. 31 - Záznam Z CT technologie a díl vytvořený z DMLS.....	51
Obr. 32 - Měření v programu analySIS.....	52
Obr. 33 - Rozmístění pracoviště + vyobrazení jednotlivých přístrojů .....	56
Tab. 1 - Rozměry zámků vyráběných v české pobočce firmy Kiekert .....	33
Tab. 2 - Aditivní metoda vícekriteriálního hodnocení.....	54

## **Seznam zkratek a značek**

CAD – Computer aided design

CT – Computer tomography – Počítačová tomografie

DRF – Drehfalle - Západka

DMLS – Direct Metal Laser Sintering – Přímé spékání kovů laserem

GL1 – Global Latch 1 – Globální zámek 1

GL2 – Global Latch 2 – Globální zámek 2

HKS – Heckklappenschloß – Zámek zadních dveří

IBH – Innenbetätigungshebel – Vnitřní ovládací páka

MKS – Mikroschalter - Mikrospínač

PSA-EKT – Elektrokomponententräger – Nosič elektrické vodivé dráhy

TAG – Türaußengriff – Vnější klika dveří

TSS1 – Tür System Schloss 1 – Dveřní zámkový systém

VRH – Verriegelungshebel - Páka centrálního zamykání

SUJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Kiekert – Kiekert CS s.r.o

RTG – Roentgen - Rentgen

DNA - Deoxyribonucleic acid - Deoxyribonukleová kyselina

## **Terminologie**

**DMLS:** Technologie DMLS je technologie umožňující vyrobit funkční kovové díly z 3D CAD dat. Kovové díly z DMLS jsou z hlediska mechanických vlastností stejné jako obráběný, nebo odlévaný kus. DMLS je založena na postupném tavení vrstev kovového prášku pomocí paprsku laseru. Výběr materiálu je velký, od lehkých slitin po oceli, super slitiny a kompozity. Technologií DMLS se vytváření například i náhrada kolenního kloubu.

**Dislokace:** Porucha krystalové mřížky. Mohou vznikat bodové, čárové, plošné, objemové.

**Lenzův zákon:** Je zákon, jenž popisuje vztah mezi elektrickým proudem a změnou magnetického indukčního toku.

## Úvod

Automobilový průmysl v České republice patří k jednomu z nejvýznamnějších strojních odvětví. Mezi největší tuzemské automobilky patří bezesporu Škoda Auto a.s. sídlící v Mladé Boleslavi. Dále na území České republiky jsou výrobci zahraničních automobilů Toyota, Peugeot, Citroen sídlící v Kolíně a Hyundai sídlící v Nošovicích. Mimo tyto výrobce automobilů se zde nachází i řada jiných firem, které dodávají své výrobky do automobilového průmyslu. Jednou z těchto firem dodávajících své produkty do automotive v Pardubickém kraji je i firma Kiekert, která dodává zámkové systémy vozidel.

Samotná firma Kiekert vznikla již v roce 1857, pochází z německého města Heiligenhaus. Firma se od svého počátku zabývala zámkem. V roce 1918 byla firma rozšířena a vznikla první konstrukční kancelář. V roce 1976 došlo ke koupi firmou Track&Gabel zabývající se výrobou zámkových systémů pro automobily. O několik let později došlo k dalšímu rozšiřování firmy Kiekert po celém světě. První rozšíření bylo v roce 1993, kdy firma zřídila novou pobočku v České republice v Přelouči. Další pobočka následovalo v roce 1994 ve Spojených státech ve městě Wixom, dále v roce 1995 v mexickém městě Puebla a poslední v roce 2008 v Číně ve městě Changschu. V roce 2012 byla firma Kiekert s.r.o. koupena čínskou firmou North Lingyun Industrial Group Corporation Limited.

Firma Kiekert se v největší míře zabývá zámkem bočních dveří, následují zámkem kufru. Dále firma vyrábí i různé pohonné jednotky jako jsou například pohony výsuvných dveří u osobních automobilů, ale i pohony na otevírání víčka nádrže. Firma Kiekert se zabývá i předvývojem nadstandardních produktů, které mají za účel usnadnit řidiči obsluhu automobilu. Mezi tyto systémy patří např. I-stay, I-hold, I-move, I-close, I-acces, I-fold.

Mezi největší odběratele zámků firmy Kiekert jsou např. koncern VW, Daimler, BMW, Peugeot, Citroen, Volvo, Ford a další. Denně se v přeloučském závodě vyrobí okolo 150 000 zámků, pohonů či zámkových systémů. Přeloučská pobočka zaměstnává kolem 1600 lidí a patří k jednomu z největších zaměstnavatelů v pardubickém kraji. Firma Kiekert v posledních dvou letech získala ocenění za nejlepšího zaměstnavatele roku.

Při takto velké složitosti zámkem a množství denní produkce zámků je i velké riziko vzniku vad a nefunkčnosti zámkem. Vady mohou mít různou příčinu. Ať už je to chyba na straně dodavatele v nekvalitě zpracování dílu, tak to může být i špatná montáž zámkem lidmi a stroji na výrobní lince. Bohužel jsou i takové závady, které nelze zjistit pouhým změřením, či rozebráním a prozkoumáním daného zámkem. Jsou zde vady, jako např. špatné tolerance dílu a následná nefunkčnost díky „zadrhávání“ nebo i praskání jednotlivých komponent z důvodu

vnitřní vady. Tyto vady se nedají zjistit běžnými metodami měření a musí se podrobit nedestructivnímu zkoumání jako je například ultrazvukové zkoušení či právě prozařování daných součástí či celých zámkových systémů pro automobily.

Na jednotlivých komponentech zámku nemusí být použito jenom rentgenové snímání, ale je možné použít i jiné alternativy zjišťování vnitřní vady dílu. Jednotlivé metody zjišťování vnitřních vad materiálu dokáží odhalit různé druhy vad.

Ve firmě Kiekert se nedestructivní zkoumání vzorku neprovádí. Veškeré nedestructivní testování se provádí v externích laboratořích. Ve firmě Kiekert se pro zjišťování závady v zámku používají dvě metody. První metoda je založena na zalití zámku pryskyřicí a následném rozříznutí a vyleštění rozříznuté plochy. Poté je možné sledovat vnitřní stavbu zámku. Druhým způsobem je možnost pozorování vnitřku zámku pomocí endoskopu při navrtání otvoru do zámku o průměru 8 mm. Obrázek endoskopu používaného v Kiekert lze vidět na Obr. 2.

Cílem diplomové práce je výběr vhodné CT technologie použitelné pro analýzu vnitřních vad plastových a kovových dílů a hotových výrobků ve firmě Kiekert. Diplomová práce bude sloužit jako podkladový materiál pro výběrové řízení a nákup CT technologie.



Obr. 1 - Portfolio firmy Kiekert [9]



Obr. 2 – Endoskop používaný ve firmě Kiekert

# 1 Nedestruktivní testování

Při defektoskopii se zjišťují vnitřní i vnější vady materiálů. Samotné zjišťování vad může probíhat buď destruktivní zkouškou, kdy se zkoumaný vzorek rozřízne, a sledují se vady ve zkoumaném vzorku. Tento způsob je zdoluhavý a nemusí se odhalit všechny vnitřní vady v celém průřezu materiálu. Druhým způsobem je zkoušení nedestruktivní, kde se zkoumaný materiál zkoumá pomocí různých technologií bez nutnosti destrukce materiálu. Výhodou tohoto zkoumání je možnost odhalení téměř všech vnitřních vad v materiálu a i velikost a počet těchto vad. Použití různých druhů nedestruktivního testování nám umožňuje odhalování různých druhů závad. Každá metoda dokáže odhalit jenom některé druhy vnitřních vad materiálu, a proto je zapotřebí různé kombinace jednotlivých metod pro komplexní kontrolu vnitřních vad v materiálu.

## 1.1 Druhy nedestruktivního testování strojních součástí

Mezi nedestruktivní zkoušky defektoskopie patří:

- penetrační kapilární metoda
- magnetická prášková metoda
- měření vířivých proudů
- zkouška ultrazvukem
- zkouška prozařováním
- metoda akustické emise

První tři jmenované metody spadají do povrchových metod, zbylé tři lze zařadit do metod objemových.

Všechny tyto metody a jejich základní principy budou popsány v následujících kapitolách a některé jsou doplněny o schematický obrázek metody.

### 1.1.1 Penetrační kapilární metoda

Tato metoda zkoušení se využívá pouze pro povrchové zkoušení. Princip této metody je založen na nanesení indikační kapaliny na povrch. Tato kapalina má vlastnost vzlínat do povrchových prasklin. Po nanesení indikační kapaliny a jejím následném působení se povrch zkoumaného vzorku očistí od přebytku indikační kapaliny a nanese se na něj detekční látka a nechá se působit. Tato látka nám zvýrazní místa, kde indikační kapalina prosákla do zkoumaného vzorku. Tento postup je podrobně znázorněn i na Obr. 3.

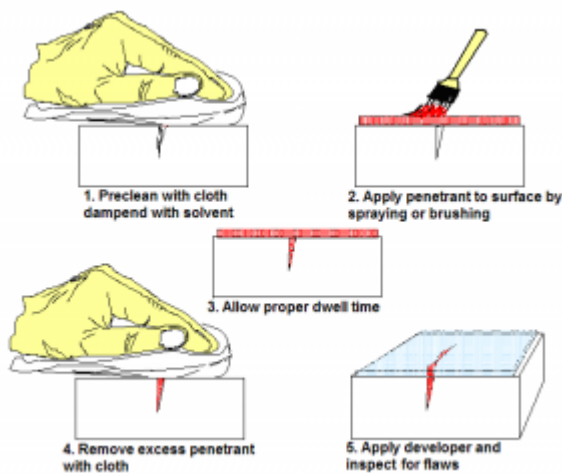
Zvýraznění povrchové vady musí být natolik velké, aby bylo ho možno pozorovat pouhým okem z pozorovací vzdálenosti přibližně 0,3m.

Druhy indikačních kapalin podle způsobu zviditelnění:

- fluorescenční
- fosforečné

Výhodou této metody zkoumání je takřka úplná nezávislost na zkoumaném materiálu. Je možné zkoumat materiály jak kovové tak i nekovové. Jediným omezením je nemožnost testu na velmi pórovitých materiálech. Výhodou jsou i nízké náklady na provedení testu a možnost testovat přímo na daném vzorku i bez nutnosti demontáže.

Nevýhodou této metody je možnost zkoumání pouze povrchových vad materiálu, nutnost přímého přístupu ke zkoumané věci a velká náročnost na správné očištění povrchu před testováním.



Obr. 3 - Postup detekce trhlin pomocí kapilární metody [7]

### 1.1.2 Zkouška ultrazvukem

V podstatě existují dvě metody na zjišťování vad materiálu ultrazvukem. První je založena na zeslabení ultrazvuku při průchodu místem s materiálovou vadou. Je to tzv. průchodová metoda, která vyžaduje dvě sondy umístěné proti sobě tak, že jedna jen vysílá vlnění a druhá jenom přímá jeho část prošlou materiálem. Je zřejmé, že použití průchodové metody je tím omezené na součástky s vhodnými protilehlými povrchy. Další nevýhodou je skutečnost, že když se vada nachází daleko od přijímací sondy a její průřez je menší než průřez ultrazvukového svazku, potom následkem ohybu vlnění se v určité vzdálenosti za vadou uzavírá akustický stín a přijímací sonda zaznamená stejný signál jako v místě bez vady.[3]



Velkou výhodou průchodové metody je fakt, že ultrazvuk prochází v porovnání s odrazovou metodou jenom poloviční dráhu, a tím se méně zeslabuje. Proto se průchodová metoda používá při zkoušení těžko prozvučitelných materiálů např. gumy (zkoušení pláštíků pneumatik)[3]

Odrazová metoda je založená na zjišťování odrazů (ech) způsobených vadami materiálu. Na příjem ech se obvykle využívá ten samý přístroj, kterým se ultrazvuk do materiálu i vysílá. Na zkoušení tudíž postačí pouze jeden volný povrch. Z doby příchodu echa po vyslání ultrazvukového impulsu se určí dráha, tj. vzdálenost k vadě a z velikosti amplitudy echa se usuzuje velikost vady. Při znalosti technologie výroby je možné z tvaru ech do určité míry odhadnout i typ vady.[3]

Nevýhodou je, že ultrazvuk překonává dvojnásobnou dráhu jaká je vzdálenost k vadě a dále existence tzv. mrtvého pásma omezující zjišťování vad při zkoušeném povrchu. Proto se odrazová metoda na rozdíl od průchodové nehodí na zkoušení tenkých plechů. Zlepšení zjistitelnost vad v blízkosti zkoušeného povrchu odrazovou metodou se dá dosáhnout pomocí dvojité sondy, kde teoreticky neexistuje mrtvé pásmo zapříčiněné vysílacím impulzem.[3]

Obě z uvedených metod mají více variant – tzv. technik zkoušení, lišících se uspořádáním sond. Všeobecně však platí, že žádná ultrazvuková metoda zkoušení neposkytuje skutečný obraz vad v materiálu, ale jenom obraz jejich průmětu do zkušební povrchu jako je tomu např. při prozařování. To je dané vlnovým charakterem ultrazvuku.[3]

### **1.1.3 Zkouška prozařováním**

Nedestruktivní zkoušení pomocí prozaření se primárně používá při zjišťování objemových defektů v materiálech. Používá se všude tam, kde nelze použít ultrazvukové zkoušení, a kde je potřeba pomocí rentgenových snímků zjistit rozsah defektů v materiálu.

Princip prozařování je založen na průchodu rentgenového nebo gama záření materiálem. V místě, kde se nachází defekt, nebo kde je síla materiálu menší, dochází k menšímu zeslabení záření. Na detektoru je zachycen tento rozdíl a následně je zobrazen.[8]

Jako zdroj rentgenového záření se používají rentgenové lampy s různými výkony a rozměry ohniska. Obecně lze říci, že čím menší ohnisko, tím lepší obraz a tím větší pravděpodobnost zachycení i těch nejmenších detailů.[8]

Záření je možno obecně definovat jako šíření energie prostorem. Pokud se tato energie šíří prostřednictvím vlnění, jde o elektromagnetické vlnění (rentgenové záření a záření gama).[3]

RTG záření (rentgenové) je označováno krátkovlnné fotonové záření, vznikající v elektronovém obalu atomu. Jde především o „brzdné“ záření, vznikající zpomalováním nabitých částic ve hmotě a dále o tzv. „charakteristické“ záření, vznikající při přechodech elektronů z vyšší energetické hladiny do nižší.[3]

Gama záření je označováno jako krátkovlnné fotonové záření, vznikající většinou při přechodu atomového jádra z vyššího energetického stavu do nižšího (radioaktivní přeměna v radioizotopech).[3]

Elektromagnetické vlny je možno rozdělit podle jejich schopnosti pronikat hmotou. Tato schopnost je závislá na jejich energii (vlnové délce). Zatímco viditelné světlo je pevnou látkou pohlcováno a odráženo, ultrafialové záření může pronikat například kůží (při opalování) a rentgenové záření proniká celým tělem a tudíž může procházet i kontrolovaným výrobkem.[3]

#### **1.1.4 Magnetická prášková metoda**

Principem metody je zmagnetování objektu a vyhodnocení rozptylu magnetického toku v okolí defektu. Fyzikální princip metody spočívá v lokálním zmenšení průřezu feromagnetického materiálu, a tím navýšení magnetického odporu v místě povrchové nebo podpovrchové nečelistvosti. V místě magneticky nevodivé vady s hodnotou permeability  $\mu > 1$  navíc dochází ke změně směru indukčních čar. Důsledkem uvedených jevů je vznik magnetického rozptylu tj. vystoupení magnetického toku do okolního prostoru (vzduchu).[6]

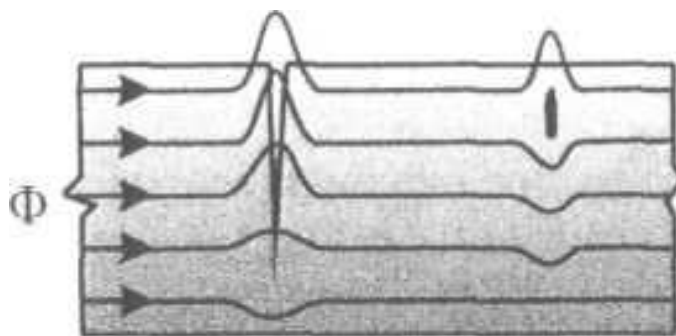
Defekt v materiálu lokalizujeme měřením magnetického rozptylu. Rozptyl magnetického toku je dán nejen velikostí, tvarem a umístěním defektu, ale také způsobem magnetování objektu, volbou magnetizačního proudu, hodnotou magnetické indukce a na orientací magnetického toku vůči trhlině.[6]

Základním požadavkem při magnetování je správná orientace indukčních čar ve směru kolmém na směr předpokládané nečelistvosti. Podélné magnetování detekuje trhliny v materiálu příčně orientované a příčné magnetování podélně orientované.[6]

Zviditelnění rozptylových polí je založeno na pokrytí tělesa barevným nebo fluorescenčním feromagnetickým práškem. Pokrytí práškem lze provést suchou metodou s ručním nebo elektrostatickým naprášením nebo mokrou metodou poléváním, nástřikem ze spreje, stříkácí pistolí nebo ponořováním do suspenze prášku v oleji, vodě nebo jiné kapalině. V místě vady je nad objektem rozptylové magnetické pole a na částice prášku působí síla, jež je přitahuje na místo největší koncentrace siločar.[6]

Indikace vad se vyhodnocuje vhodným osvětlením povrchu. Archivace obrazu se provádí fotograficky prostřednictvím digitálních fotoaparátů a kamer.[6]

Magnetizace se realizuje stejnosměrným proudem dvojicí cívek, mezi nimiž je přibližně homogenní magnetické pole.[6]



Obr. 4 - Znáornění tvaru siločar při výskytu vnitřní vady [6]

### 1.1.5 Měření vířivých proudů

Střídavé pole snímače indukuje v materiálu vířivé proudy. Dle Lenzova zákona pole vířivých proudů působí proti poli původnímu. Výsledná pole jsou dána vektorovým součtem obou polí.[5]

Koncový bod výsledného vektoru je zobrazován ve fázové rovině na displeji přístroje.[5]

Trhlina na povrchu, kolmo k toku vířivých proudů nejvíce ovlivňuje výsledné pole. Ve fázové rovině měřicího přístroje je koncový bod výsledného vektoru maximálně vzdálen od počátku souřadnic.[5]

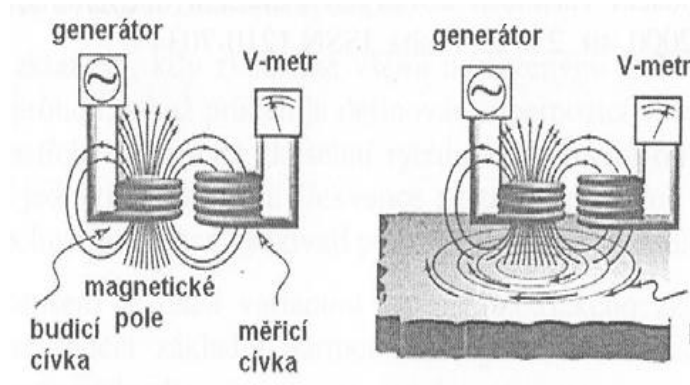
Hustota vířivých proudů je největší na povrchu a klesá exponenciálně s hloubkou. Při rozdílném kmitočtu budícího pole snímače pronikají vířivé proudy do rozdílných hloubek.[5]

Zatímco stejnosměrný proud prochází vodivým prostředím v celém objemu, střídavý proud prochází povrchem tzv. „skin efekt“. Při rostoucí frekvenci je hloubka penetrace nižší. O charakteru vady vypovídá amplituda a fáze.[5]

Přiblížením a oddálením snímače od povrchu materiálu je signalizováno odlišnou fází, zvanou „lift off“ – oddálení. Při vyhodnocování je vhodné konfigurovat tento směr do vodorovného směru.[5]

Pro detekci povrchových vad by měla být budící frekvence co možná nejvyšší, aby bylo dosaženo maximálního rozlišení a vysoké citlivosti. Pro zjištění vad uvnitř

materiálu je pro dosažení požadované hloubky vniku nutné použít nižší frekvence, což má za následek nižší rozlišení a citlivost. Zejména defektoskopie feromagnetických materiálů nebo vysoce vodivých materiálů vyžaduje použití nižších frekvencí, aby bylo možné dosáhnout potřebné hloubky vniku.[5]



Obr. 5 - Princip metody vířivých proudů [5]

### 1.1.6 Metoda akustické emise

K akustické emisi dochází ve zdroji akustické emise při uvolnění energie působené vnitřními nebo vnějšími silami. Vznik akustické emise je generován nevratnými dislokačními a degradačními procesy v mikrostruktuře a makrostruktuře materiálu, kavitačními procesy v hydrodynamických systémech, turbulencí při úniku kapaliny z potrubí, degradaci dielektrika atd. Uvolněná energie se transformuje na mechanický napěťový impulz šířící se materiálem jako elastická napěťová podélná nebo příčná vlna.[4]

Složka vlny kolmá k povrchu tělesa je nejčastěji detekována širokopásmovým piezoelektrickým senzorem s rezonanční frekvencí nad měřeným spektrem akustické emise nebo citlivějším rezonančním senzorem s více rezoncemi.[4]

U moderního provedení senzorů je v pouzdru zabudován předzesilovač a snímač je tak schopný, i když je energie vlny velmi malá, vyhodnotit dislokace v řádech  $10^{-14}$ m.[4]

Výhodou akustické emise oproti jiným defektoskopickým metodám je kontinuální monitorování objektu a úspora času v porovnání s postupným testováním jinými metodami.[4]

Nevýhodou metody je, že příčinu akustické vlny přesně neznáme, neboť uvolněná energie je ovlivněná řadou faktorů jako je tvar a povrch tělesa, přenosová cesta vlny daná strukturou a homogenitou materiálu.[4]

## 2 Popis funkce CT technologie

### Vznik rentgenového záření

Rentgenové záření vzniká, když katodou rentgenky emitované elektrony ztrácí část své energie v oblasti atomů anody (antikatomy) rentgenky. Terčíky jsou vyrobeny z kovů s vysokým protonovým číslem, u průmyslové tomografie obvykle z wolframu. Tato část energie je přitom vyzářena jako RTG záření a je tím větší, čím je větší dopadová rychlost elektronů.[3]

Rozžhavená wolframová spirála katody produkuje termoemisi elektrony. Ty jsou urychlovány mezi katodou a anodou pomocí vysokého napětí přivedeného k těmto elektrodám. Elektrony dopadají na wolframový terčík umístěný na anodě. Z důvodu nutnosti intenzivního provozního chlazení anody, je její těleso obvykle vyrobeno z mědi. Kinetická energie dopadajících elektronů se mění na teplo a pouze asi 1% se mění na RTG záření. Elektrony, které dopadly na terčík, jsou zbrzděny, přičemž postupný pokles jejich kinetické energie lze popsat dvojím způsobem:[3]

- srážka s elektronovým obalem atomu terčíku. Dochází k vyražení elektronů atomu terčíku ze slupky, a tím se postupně ztrácí kinetická energie dopadových elektronů. Uvedený děj se opakuje až do snížení energie na takovou hodnotu, kdy je zbytek energie přeměněn na teplo nebo UV záření
- zbrzdění urychleného elektronu pozitivně nabitým elektronovým polem jádra atomu

Protože energie rentgenového záření závisí na provozním vysokém napětí rentgenky, jeví se jako praktické vyjadřovat hodnotu energie v jednotkách elektronvolt [eV], což je kinetická energie 1 elektronu získaná při napětí 1V. Aby se např. dosáhlo hraniční energie rentgenového záření  $2 \cdot 10^5 \text{eV}$ , musí být mezi katodou a anodou vysoké napětí  $2 \cdot 10^5 \text{V}$ . [3]

Samotné rentgenové záření je elektromagnetické vlnění, jehož vlnové délky leží v intervalu  $10^{-8} \text{ m}$  až  $10^{-12} \text{ m}$ .

Rentgenové záření je ionizující elektromagnetické záření, o energiích desítek až stovek keV. Přírodními zdroji rentgenového záření jsou hvězdy. Na zemi je tímto zdrojem v malé míře úder blesku. Člověk ovšem dokáže uměle vyrobit rentgenové záření v rentgence nebo v betatronu. Mimo těchto zdrojů se však rentgenové záření objevuje jako nežádoucí produkt při provozu elektronových mikroskopů nebo při sváření kovových materiálů elektronovým paprskem.[3]

Využití průmyslové rentgenové tomografie se zásadně liší od CT technologie používaných v lékařství. Pro možnost snímání rentgenových snímků z různých směrů se u klinického CT přístroj otáčí okolo nehybného pacienta z důvodu možného špatného zdravotního stavu pacienta. Naproti tomu v průmyslové tomografii je zářič ve stacionární poloze a pohybuje se (otáčí) pouze rentgenovaný předmět v dráze paprsků zářiče.[1]

Objekty zkoumané v průmyslové praxi většinou obsahují i materiály, které vyžadují jiné parametry zařízení, než je tomu v oblasti lékařství. Zejména se liší požadavky na rozlišení a přesnost. Pro dlouhodobé skenování v průmyslové praxi není problém vystavovat předmět záření po delší dobu, naopak v lékařství zatížení lidského organismu na RTG záření je omezené. Díky této možnosti lze v průmyslové praxi skenovat objekty s vyšší intenzitou záření.[1]

## **2.1 Druhy snímání CT**

### Základní princip rentgenové tomografie

Základním principem rentgenové tomografie je schopnost proniknutí rentgenového záření objektem. Pomocí rentgenového zdroje je možnost realizace takřka bodového zdroje záření. Toto rentgenové záření při průchodu skenovaným dílem částečně sníží svoji intenzitu podle pohltivosti materiálu a následně dopadá na detektor. Velikost snížení záření průchodem zkoumaného vzorku je také ovlivněna délkou dráhy skrz objekt. Čím delší je dráha průchodu záření skrz objekt, tím je intenzita záření nižší.[1]

Princip rentgenové tomografie lze jednoduše popsat jako prosvícení částečně průsvitného objektu bodovým zdrojem světla, kde hodnoty jasu prošlého světla odpovídají průsvitnosti objektu a jsou závislé na jejich optické hustotě.[1]

Kuželový případně jehlanový rentgenový paprsek vytváří dvourozměrné rentgenové snímky objektu. Rentgenový detektor pracuje na podobném principu jako obrazový snímač v digitálním fotoaparátu. Zachytává intenzitu záření a následně předává naměřené hodnoty k dalšímu zpracování.[1]

Pro možnost tomografického snímání je zapotřebí vytvoření několika set až několika málo tisíc dvourozměrných snímků v krocích za sebou při různém pootočení snímku. Množství snímků na otočku objektu má velký vliv na přesnost následného vypočítání 3D modelu.[1]

V takovémto množství vytvořených plošných snímků je ukryta prostorová informace o měřeném objektu. Pomocí vhodné matematické metody lze z těchto plošných snímků vytvořit prostorový model, který popisuje geometrii dílce.[1]

Tento způsob snímání se nazývá snímání „v obraze“. Je to z důvodu toho, že snímáný objekt se pouze otáčí v kuželu rentgenového záření a celý objekt je snímán pouze v tomto kuželu bez nutnosti pohybu v osách x a y.

### Rastrová tomografie

Tato metoda je založena na podobném principu snímání pomocí rentgenového záření. Rozdíl oproti snímání „v obraze“ je v tom, že snímáný objekt je větší než velikost detektoru.

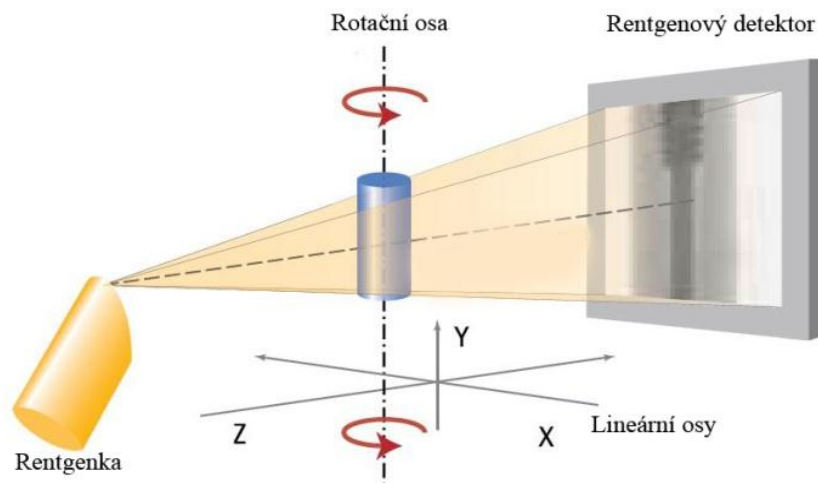
V tomto případě se daný předmět snímá stejným způsobem, ale vedle otáčení předmětu kolem rotační osy se tento předmět pohybuje i v osách x a y.

Nevýhodou tohoto způsobu snímání je velká časová náročnost.

## **2.2 Popis jednotlivých částí CT**

Při realizaci měřicí úlohy pomocí rentgenové tomografie je potřeba brát v úvahu požadavky měření na konkrétním díle. Nejdůležitější roli při výběru vhodného stroje hrají rozměry měřeného dílu, požadovaná přesnost měření, ale i složení materiálu a to z důvodu volby dostatečně silného zdroje záření.[1]

Na Obr. 6 je možnost vidět jednotlivé části CT rentgenu, jejichž funkci si v následujícím textu popíšeme. Na obrázku je znázorněna rentgenka, rotační osa, rentgenový detektor a lineární osy.



Obr. 6 - Princip metody prozařování [10]

### **2.2.1 Rentgenka**

Rentgenky, které se používají pro vznik rentgenového záření, jsou jednou z nejdůležitějších částí samotného přístroje. Pracují jako trubkové zářiče vyzařující elektrony.

Rentgenka je vakuově uzavřená. Ve vakuu vznikají volné elektrony působením termoemise. Díky napětí mezi anodou a katodou se tyto elektrony urychlují a tím vzniká elektronový svazek. V rentgence tyto elektrony narážejí na kovový terčik umístěný na anodě. Při dostatečném napětí mezi anodou a katodou se získá dostatečná kinetická energie elektronů a tím vzniká rentgenové záření (tzn. vysokofrekvenční elektromagnetické záření). Kmitočtové spektrum rentgenového záření souvisí s velikostí napětí mezi katodou a anodou rentgenky (katodové napětí).[1]

Záření rentgenky je možné považovat za proud fotonů různé frekvence. Protože energie fotonů je proporční k jeho frekvenci, ovlivňuje volba elektronového napětí na rentgence spolu s frekvencí i energii fotonů. To je důležité pro výběr rentgenky, neboť určité materiály se dají optimálně měřit jen s poměrně nízkou energií záření. Jinými materiály naproti tomu proniká jen záření s vysokou energií a tím vyšším napětím mezi anodou a katodou. V praxi se napětí rentgenky pohybuje podle typu mezi  $9 \cdot 10^4$  až  $45 \cdot 10^4$  V. Pro měření běžných plastových dílu postačí napětí přibližně od  $9 \cdot 10^4$  do  $13 \cdot 10^4$  V. Pro měření dílů zpracovaných z kovu, je za potřebí napětí rentgenky navýšit. Pro vyšší energii rentgenového záření než je možné na rentgence vyrobit, se používá synchrotronový zdroj. Tyto zdroje se díky vysoké ceně používají pouze ve vědecké oblasti. Vysokofrekvenčním synchrotronovým zařízením je možné prozařovat a tomograficky snímat i velmi velké objekty z kovu, jako například kompletní bloky motorů.[1]

Terče rentgenky lze rozdělit na odrazové a transmisní terče. Hlavní rozdíl mezi použitím odrazového a transmisního terčiku je ve velikosti katodového napětí. Při příliš vysokém napětí u transmisního terčiku by docházelo k trvalé destrukci terčiku, proto se u těchto terčiků musí používat nižší napětí, tím se snižuje výkon rentgenky a prodlužuje se čas měření. Velikost napětí a velikost zdroje elektronového paprsku u transmisního terčiku ovlivňuje ostrost snímaného obrazu. Při velkém zdroji elektronového paprsku je možnost použít vyšší napětí, ale výsledný obraz není ostrý. Naopak při použití takřka bodového zdroje elektronového paprsku dosahujeme velké ostrosti, ale je zapotřebí snížit velikost napětí, a tím se prodlužuje čas měření. Snížení napětí u bodového zdroje paprsku je z důvodu velkého namáhání malé plochy terčiku, čímž může docházet při vyšším napětím k rychlé destrukci.[1]

Naopak u odrazového terče se svazek elektronů od terče odráží a díky této konstrukci je možné lepší chlazení terčiku a tím je možnost vyššího katodového napětí, vyššího výkonu a kratšího času měření. Díky obdélníkové cloně je paprsek oříznut do tvaru jehlanu a toto oříznutí koresponduje s velikostí a tvarem rentgenového detektoru.[1]



Velikost ohniska dosažitelné u rentgenek s odrazovým terčem dosahují několika mikronů, což naprosto dostačuje pro běžné měřicí úkony. Dělením voxelů se dají měřit odchylky na desetiny mikrometru.[1]

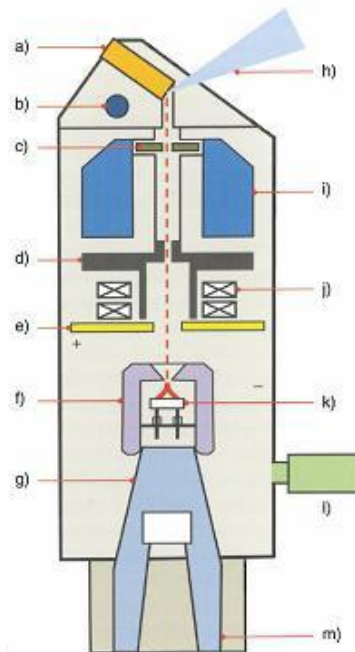
Minimální velikost ohniska se, jako u odrazových terčů, zvětšuje přímo úměrně na nastaveném výkonu. Malé ohnisko je možné nastavit jen při nízkých výkonech, což velmi silně omezuje praktické použití. Jsou-li měřené objekty ve směru svazku paprsků větší než několik málo milimetrů, je nutno se buď smířit s velmi dlouhou dobou měření, nebo se musí rentgenka provozovat s vyšším výkonem.[1]

Rentgenky existují jak s otevřenou tak i s uzavřenou konstrukcí. U uzavřené konstrukce rentgenky se vakuum vytvoří jednou u výrobce a zůstane díky hermetickému uzavření vakuové baňky zachováno po velmi dlouhou dobu. Použití těchto rentgenek je vhodné do  $150 \cdot 10^3 \text{V}$ . V tomto případě se mohou rentgenky používat po dobu životnosti v trvání několika let bez údržby. Po uplynutí této životnosti je potřeba výměna kompletní rentgenky. Rentgenky s velikostí ohniska v mikronové oblasti, které se provozují s napětími vyššími než  $150 \cdot 10^3 \text{V}$ , jsou obvykle provedeny jako otevřený systém, protože opotřebení na elektrodách je vyšší. Proto je nutná pravidelná údržba. U otevřené rentgenky se vakuum vytváří při provozu samostatným vakuovým čerpadlem. Tak je možné rentgenky v případě servisu otevřít a provést na nich údržbu a potom znovu vytvořit vakuum trvalým provozem vakuového čerpadla.[1]

Při srovnání nákladů na provoz a servis uzavřených systémů a otevřených systémů jsou tyto náklady velmi odlišné. Při výměně uzavřeného systému je zapotřebí vyměnit kompletní rentgenovou trubici, což je přibližně čtvrtina pořizovací ceny stroje. Při poruše otevřeného systému je zapotřebí vyměnit pouze filament ve formě žhavicího vlákna v katodě. Přičemž tato výměna je pouze zlomek pořizovací ceny stroje.

Na Obr. 7 je možnost vidět konstrukce rentgenky. Mimo zmíněných elektrod má i početné součástky pro zaostřování paprsku, vyhřívání elektrod a pro další funkce.

Kvůli potřebné přesnosti měření hraje při použití rentgenek v souřadnicových měřicích strojích stěžejní roli teplota. Protože obecně rentgenky mají nízkou účinnost, vzniká poměrně vysoký ztrátový výkon. Ten se odvádí z měřicího přístroje vhodnými kapalinovými chladicími systémy s výměníky tepla.[1]



Obr. 7 - Jednotlivé části rentgenky [1]

Popis Obr. 8:

- |                   |                                      |
|-------------------|--------------------------------------|
| a) odrazový terč  | h) užitečný kužel paprsku            |
| b) chlazení vodou | i) zaostřovací cívka                 |
| c) středící clona | j) středící a vychylovací cívka      |
| d) clonící terč   | k) filament (katoda)                 |
| e) anoda          | l) vakuové čerpadlo                  |
| f) mřížka         | m) pouzdro pro vysokonapětové kabely |
| g) izolátor       |                                      |

Z hlediska konstrukce je možné rentgenky rozdělit na jednopólové a dvoupólové. U jednopólové rentgenky je anoda uzemněna přes chladicí kapalinu, což je v tomto případě voda. Vyrábí se pro maximální napětí  $225 \cdot 10^3 \text{V}$ . [3]

Dvoupólové rentgenky se konstruují do max. energie  $460 \cdot 10^3 \text{V}$ . Oba typy rentgenek se dnes dodávají v provedení jako kovokeramické, na rozdíl od rentgenek starších typů, které byly skleněné. [3]

Pro napájení rentgenových strojů se obvykle používá střídavé napětí 240V/50Hz, které je dále transformováno do oblasti kV, proto je součástí každého rentgenového stroje transformátor. [3]

V případě že je rentgenka napájena vysokonapětovým zdrojem střídaného napětí, bude rentgenka fungovat pouze v případě, pokud je na anodě kladné napětí. Z toho vyplývá, že pro vznik rentgenového záření je využito pouze půlperrody.[3]

Pro zvýšení výkonu rentgenky a pro zkvalitnění radiografie je vhodné použít pro napájení dvojnásobně usměrněný zdroj vysokého napětí.[3]

Rozlišujeme proto RTG přístroje jako střídavé (nejlacinější) nebo půlvlnné, popř. dvojnásobně usměrněné.[3]

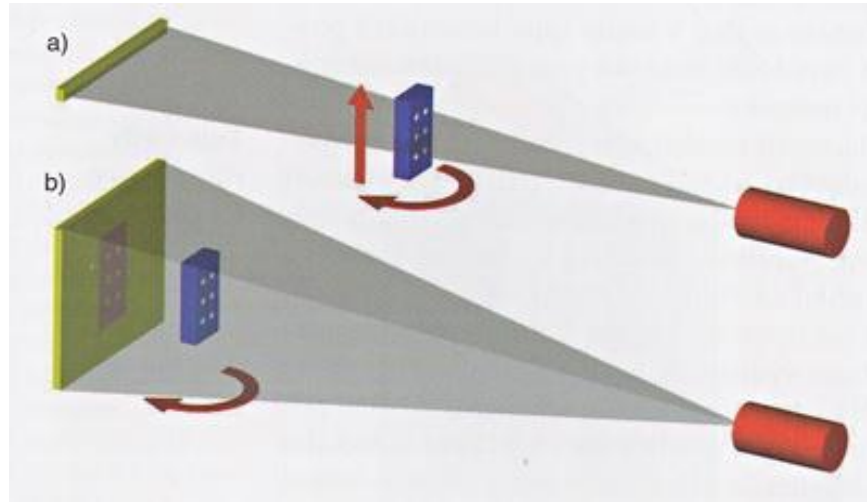
### **2.2.2 Rotační osa**

V principu je jedno jestli se zdroj rentgenového záření s detektorem otáčí kolem měřeného objektu nebo se měřený objekt otáčí v dráze paprsků. Pro použití v měřicí technice se dává přednost konstrukci stroje s nepohyblivou rentgenovou jednotkou a rotační osou pro dílec, protože stroje je možné vyrobit s dostatečnou přesností s rozumnými náklady. Mimoto se dají v tomto typu konstrukce použít osvědčené součástky ze souřadnicové měřicí techniky.[1]

Vlastnosti rotační osy, jako je otáčení bez obvodového házení, pohyb v rovině a přesnost dělení stupnice, přímo ovlivňují výsledky měření. Například odchylka v úhlu o obloukovou vteřinu na poloměru 0,2m vede k tangenciální odchylce měření asi 1 $\mu$ m. Z toho se dá přímo vyvozovat dosažitelná nejistota měření při tomografickém snímání, neboť k tomu přistupují další zdroje chyb, jako je radiální odchylka, axiální odchylka a házení otočné osy a také vlivy dalších částí stroje. To znamená, že se obzvláště u měřicích strojů s velkým průměrem měřicí oblasti musí používat velmi přesné rotační osy. U menších průměrů jsou požadavky trochu nižší. Rotační osa musí být také vhodná k zajištění požadované přesnosti při zatížení hmotnosti dílce a upínacího zařízení.[1]

### 2.2.3 Rentgenové detektory

Rentgenové detektory se vyrábí ve variantách jako liniové detektory (viz. Obr. 8 pozice a), nebo jako plošné detektory (viz. Obr. 8 pozice b)



Obr. 8- Rentgenový detektor (liniový, plošný) [1]

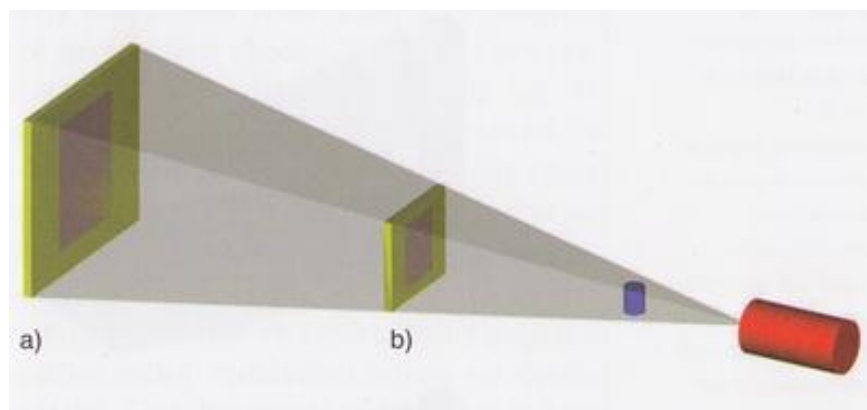
Z čistě geometrického pohledu by bylo lepší snímání pomocí liniových senzorů a to z důvodu, že zdroj rentgenového záření by byl neustále kolmo k měřenému předmětu a nevznikalo by zkreslení v okrajových částech dílu. Ovšem díl by se musel snímat v každé rovině zvlášť a to by znamenalo mnohonásobně prodloužení snímaného času oproti plošnému detektoru. Při stejných provozních parametrech v porovnání s 1000 řádkovým plošným detektorem by se měřící doba prodloužila až 1000 krát. Přitom energie rentgenky by byla málo využita z důvodu použití pouze řádkového výřezu z kuželového paprsku.[1]

Z tohoto důvodu jsou více používány plošné detektory. U těchto detektorů, jak již bylo dříve psáno, dochází se vzdáleností od střední osy k značnému zkreslení. Z toho vyplývá, že čím menší je kužel rentgenového záření, tím je vyšší přesnost měření a menší odchylky. Z těchto důvodů je vhodné vyrábět vysoce přesné přístroje s velkou vzdáleností mezi zdrojem rentgenového záření a detektorem. To ovšem snižuje účinnost rentgenky, protože se snižuje pracovní kužel paprsků.[1]

V průmyslové praxi se převážně používají detektory se scintilátorem. Scintilátor nám převádí rentgenové záření dopadající na detektor na světlo. To probíhá tak, že dopadající fotony rentgenového záření, jež jsou bohaté na energii, dopadají na scintilátor a aktivují částice materiálu, které vyzařují světlo ve viditelném spektru. Pomocí toho je možné pro snímání využít běžné světlo citlivé snímače na bázi křemíku.[1]

Citlivost jednotlivých pixelů detektoru však není stejná a proto se v praxi provádí kalibrace senzoru na světle a ve tmě a následně se provádí softwarové korekce. Běžně používané senzory mají rozlišení 1024x1024 až 2048x2048 obrazových bodů. Rozměry samotných pixelů senzoru se pohybují v rozmezí 50 až 400\*10<sup>-6</sup>m. Velikost detektoru nám určuje maximální velikost snímaného předmětu při malém zvětšení bez použití rastrové tomografie.[1]

Měřítko zobrazení mezi rovinou detektoru a objektem je u velkých detektorů s velkými pixely principiálně větší, protože je při stejném úhlu kužele potřebná větší vzdálenost k zobrazení objektu. Měřítko zobrazení se musí vždy posuzovat v souvislosti s velikostí pixelů detektoru. Rozhodující pro rozlišení a nejistotu měření je velikost voxelů v rovině objektu. Při stejném počtu pixelů je možné s malým detektorem na menším konstrukčním prostoru dosáhnout stejného rozlišení v rovině objektu, jako u velkého detektoru s velkým konstrukčním prostorem. Rozlišení se dá zvýšit např. větším počtem pixelů v detektoru nebo snímáním rastrovou tomografií.[1]



Obr. 9 - Zvětšení skenovaného dílu [1]

#### 2.2.4 Lineární osy

Pokud není měřicí přístroj již dopředu zkonstruován pro jeden určitý dílec, je zapotřebí, aby byl flexibilní, k tomu se právě využívají lineární osy. Tyto lineární osy nám slouží k upnutí jakéhokoliv dílce a usazení v měřicím stoju. Dále slouží při použití rastrové tomografie. Nejjednodušší způsob lineární osy je pouze posuv rotační osy v ose rentgenového paprsku, čímž je pouze možná změna měřítka zobrazení. Tímto způsobem lze snímat dílec pouze tzv. „v obraz“, tzn., že velikost snímaného dílu je závislá na velikosti detektoru a nelze s tímto druhem lineární osy používat rastrovou tomografií.[1]

Pro optimální umístění dílce do dráhy záření je potřeba, aby byl umožněn pohyb rotační osy a zdroje rentgenového záření. To lze řešit dvěma způsoby a to buď pohyblivou rotační osou, nebo pohyblivým zdrojem záření a detektorem. V případě pohybu rotačních os je kladena vysoká přesnost na jejich pohyb, což ovlivňuje výslednou chybu měření.[1]

Při možnosti zkrácení vzdálenosti mezi zdrojem záření a detektorem se zkracuje i doma snímání, ale zvyšuje se úhel kužele rentgenky, a tím i přesnost měření. Při zkrácení vzdálenosti o faktor dva se výsledný měřený čas zkrátí o faktor čtyři.[1]

Pro možnost udržení stále stejného zvětšení i při větší vzdálenosti zdroje záření a detektoru je potřebné nastavení rotační osy ve směru plošného detektoru.[1]

U strojů s měřicí přesností okolo několika mikronů mohou být lineární osy vybavené pouze mechanickými ložisky. U strojů s požadovanou vyšší přesností, řádově ve spodním mikronovém a submikronovém rozsahu se používají vzduchová ložiska.[1]

### **2.3 Vliv na obsluhu**

Účinky ionizačního záření na člověka jsou nežádoucí a ve větším vystavení tomuto záření i životu nebezpečné, protože způsobují poškození organismu, především stavby DNA. Přirozené záření v přírodě má pro lidský organismus zanedbatelný vliv.[2]

Ionizující záření ve formě krátkodobého intenzivního tak i dlouhodobého slabého má negativní účinky na živě organismy i na člověka. Působí-li záření na biologický materiál, dochází k absorpci tohoto záření. To způsobuje vyrážení elektronů z elektronových drah a tvorbu negativně nabitých aniontů. Ionizované částice se stávají vysoce reaktivními a vedou k chemickým reakcím, které buď buňku usmrtí, nebo vedou k reakcím volných radikálů s DNA a porušují jí.[2]

Při měření pomocí rentgenového záření je nutno mít na paměti zdravotní škodlivost tohoto záření. Souřadnicové měřicí stroje s rentgenovou tomografií, které odpovídají předpisům pro přístroje s úplnou ochranou podle nařízení o rentgenovém záření, jsou vybaveny olověnou clonou v plášti přístroje. Odclonění rentgenového záření je provedeno vrstvami olova v opláštění, pozorovací okénko rovněž chrání před zářením olověným povrchem. Tím se dosahuje toho, že z přístroje vystupuje jen minimální množství rentgenového záření. Zatížení záření pro obsluhu se pohybuje v rozsahu přirozeného zatížení zářením na hladině moře. Aby byla obsluha vystavena stejné dávce záření, jako pasažér při dálkovém letu musela by s přístrojem pracovat mnoho měsíců. Bezpečný provoz navíc zajišťuje opatření a další bezpečnostní zapojení, které zabraňují nechtěnému otevření přístroje při zapnutém zdroji rentgenového záření.[1]

Popsaná konstrukce se osvědčila pro měřicí přístroje do  $225 \cdot 10^3 \div 300 \cdot 10^3 \text{V}$  napětí rentgenky. Stroje provozované s vyšším napětím emitující záření s velmi vysokou energií musí být umístěny ve speciálních ochranných místnostech.[1]

Pro běžné rentgenové snímání se používají měřicí přístroje s napětím rentgenky do  $225 \cdot 10^3 \text{V}$  a nemusejí se používat dozimetry.

K samotnému zjištění velikosti ionizačního záření se používají dozimetry různých druhů:

- Filmové dozimetry:

Nejčastěji používaný je osobní filmový dozimetr. Skládá se ze světlotěsně zabaleného políčka fotografického filmu. Samotné ionizační záření prochází přes kovové filtry, obal filmu a způsobuje zčernění samotného fotografického filmu. Filmy se používají k odhadu energie záření, velikost zčernění se fotometricky vyhodnotí a tak se zjišťuje dávka ozáření na obsluhujícího pracovníka.[2]

- Tužkové dozimetry:

Druhý z používaných dozimetrů je dozimetr tužkový, který se nabíjí ve speciálním zařízení a účinkem ionizačního záření dochází k jeho vybíjení. Tento nosí dozimetr pracovník v náprsní kapse oděvu. K jedné elektrodě komůrky je přichyceno tenké pokovené křemenné vlákno. Po nabití je vlákno odpuzováno elektrostatickou silou a je v poloze označené na stupnici nulou. Vlivem záření je vlákno odpuzováno menší silou a tato výchylka odpovídá absorbované dávce.[2]

## 2.4 Legislativa

Jelikož CT technologie pracuje na principu vyzařování ionizujícího záření, spadají veškeré zařízení, která emitují ionizující záření pod dohled státního ústavu pro jadernou bezpečnost. Manipulace a zacházení s těmito přístroji je stanoveno pomocí zákonů, vyhlášek SÚJB a nařízeními vlády:

- Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, v platném znění. V tomto zákoně se pro naše účely vztahují § 9 až 18.
- Zákon č. 19/1997 Sb., o některých opatřeních souvisejících se zákazem chemických zbraní a o změně a doplnění zákona č. 50/1976 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon), ve znění pozdějších předpisů, zákona č. 455/1991 Sb., o živnostenském podnikání (živnostenský zákon), ve znění pozdějších předpisů, a zákona č. 140/1961 Sb., trestní zákon, ve znění pozdějších předpisů, v platném znění.
- Zákon č. 281/2002 Sb., o některých opatřeních souvisejících se zákazem bakteriologických (biologických) a toxinových zbraní a o změně živnostenského zákona, v platném znění.
- Vyhláška 307/2002 Sb., o radiační ochraně (ruší vyhlášku č. 184/1997 Sb.) ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb., kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně.
- Vyhláška 195/1999 Sb., o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.
- Vyhláška 309/2005 Sb., o zajišťování technické bezpečnosti vybraných zařízení.
- Nařízení vlády č. 416/2002 Sb., kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování.
- Nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování.
- Nařízení vlády č. 399/2011 Sb., o poplatcích na odbornou činnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.



Diplomová práce od kapitoly 3 po kapitolu 7 je utajená  
z důvodu Know-How firmy Kiekert

## 8 Použitá literatura

- [1] WERTH MESSTECHNIK. *Rengenová tomografie v průmyslové měřící technice*. Munchen, 2011.
- [2] MARTYKÁNOVÁ, Eva. *Rtg záření, jeho vlastnosti a využití*. Brno, 2007. Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ. Vedoucí práce Prof.RNDr.VladislavNavrátil,CSc.
- [3] *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno: CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [4] Akustická emise. In: [online]. 2009 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: [http://www.ndt.cz/prilohy/49/emise\\_principy.pdf](http://www.ndt.cz/prilohy/49/emise_principy.pdf)
- [5] Principy EC. In: [online]. 2009 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: [http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy\\_EC.pdf](http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy_EC.pdf)
- [6] Principy metody MT. In: [online]. 2009 [cit. 2012-11-24]. Dostupné z: [http://www.ndt.cz/prilohy/10/princip\\_metody\\_MT.pdf](http://www.ndt.cz/prilohy/10/princip_metody_MT.pdf)
- [7] NDT Methods. *Http://liquidpenetrant.com/penetrant-inspection-process/* [online]. [cit. 2013-05-14].
- [8] Zkoušky prozařováním. In: [online]. [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.bvd-ndt.cz/cz/rentgen.php>
- [9] Interní materiály firmy Kiekert
- [10] Interní materiály firmy GE

## **9 Seznam příloh**

Příloha 1 – Tabulka přehledu strojů a jejich parametry

Příloha 2 – Výkres č. 1 – Layout M5, CT pozice 1

Příloha 3 – Výkres č. 2 – Layout M5, CT pozice 2

Příloha 4 – Cenová nabídka stroje Zeiss Metrotom 1500

Příloha 5 – Cenová nabídka stroje GE Vtomex S240

Příloha 6 – CD

## Vysvětlivky

- I-stay:** U většiny dnešních vozidel je otevření dveří a jejich následné držení v klidové poloze zajištěno dvěma polohami. Systém I-stay nám umožňuje otevření a držení dveří v klidové poloze v jakémkoliv poloze otevření dveří.
- I-hold:** Systém I-hold je obdoba systému I-stay, ale systém I-stay je pouze mechanická varianta, přičemž I-hold je doplněno o elektromotor, který usnadňuje otevírání dveří.
- I-move:** Systém I-move je nástavbou systému I-stay a I-hold, přičemž tento systém umožňuje plně elektronické zavírání dveří z jakékoliv polohy.
- I-close:** Systém I-close umožňuje automatické dovření dveří při zavření dveří na jednu západku. Zámky jsou vybaveny přitahovačem dveří.
- I-access:** Systém I-access umožňuje bezkontaktní otevření dveří. Pokud řidič přijde k automobilu a má u sebe klíček, tak se automobil odemkne. Celý proces je bezdrátový.
- I-fold:** Systém I-fold usnadňuje práci řidiče při nakládání zavazadel do kufru při nutnosti sklopení sedaček. Při aktivaci systém v zavazadlovém prostoru se automaticky sklopí zadní sedačky.

## Jednotky

m	Délková jednotka
mm	Odvozená délková jednotka $1000\text{mm}=1\text{m}$
Pixel	Velikost plošného (2D) zobrazovacího bodu
Voxel	Velikost prostorového (3D) zobrazovacího prvku, který vznikne matematickým dopočítáním z pixelu, jedná se o prostorovou krychli
eV	Elektronvolt, je roven kinetické energii, jež získá jeden elektron urychlený ve vakuu při napětí jednoho voltu
°C	Teplotní jednotka
kg/m <sup>2</sup>	Parametr zatížení podlahy
V	Volt – jednotka elektrického napětí