

Trendy v oblasti bezpečnostních rentgenů

Trends in area of security roentgens

Petr Barák

Bakalářská práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav elektrotechniky a měření

akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr BARÁK**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Trendy v oblasti bezpečnostních rentgenů**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte specifikaci bezpečnostních problémů, hrozeb a rizik současnosti
2. Analyzujte bezpečnostní rentgeny z pohledu bezpečnostního průmyslu
3. Provedte kategorizaci bezpečnostních rentgenů
4. Navrhněte možnosti využití bezpečnostních rentgenů v PKB

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Johan, Z. Rotter, R.-Slánský, E. Analýza látek rentgenovými paprsky. Praha : SNTL 1970, ISBN 04-619-70
2. Tureček, J. Dosavadní průběh výzkumu Rentgenová detekce výbušnin. Bezpečnostní teorie a praxe č. 1/2006, 91 100 str.
3. Johanidesová. J. Příspěvek k analýze vlivu lidského faktoru na úspěšnost hromadných bezpečnostních kontrol prováděných rentgenovými zařízeními. Bezpečnostní teorie a praxe č. 2/2007. 109 119 str.
4. Tureček, J.: Technické prostředky bezpečnostních služeb II – Detektory pro bezpečnostní prohlídku osob, zavazadel a zásilek. Praha, PA ČR, 1998, ISBN 80-85981-81-5.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Luděk Lukáš, CSc.

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

22. února 2008

Termín odevzdání bakalářské práce:

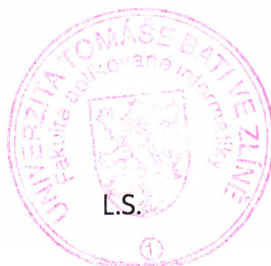
3. června 2008

Ve Zlíně dne 22. února 2008



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na současné využívání bezpečnostních rentgenů v oblasti bezpečnostního průmyslu. Dále se zabývá podrobnější analýzou principů činností, technologií na niž rentgeny pracují, a podle níž autor práce provedl rozdělení bezpečnostních rentgenů do jednotlivých kategorií. Část práce je věnována současným trendům v této oblasti. V závěrečné kapitole je uvedeno využití bezpečnostních rentgenů v ČR.

Klíčová slova: bezpečnostní rentgen, detekční kontrola, bezpečnostní detekce, rentgenové záření, bezpečnostní operátor

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the contemporary utilization of security x-ray machines in the area of the security industry. Then it deals with a detailed analysis of technology according to which x-ray machines work and according to which the author of this bachelor thesis performed a division of security x-ray machines into individual categories. One part of this bachelor thesis is devoted to contemporary trends in this area. In the final chapter there is introduced utilization of security x-ray machines in the Czech Republic.

Keywords: security X – ray machine, detection control, security detection, X – ray, security operator

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Luďkovi Lukášovi, Csc. za odborné vedení, podnětné rady, informace a připomínky, které mi poskytoval během zpracovávání bakalářské práce.

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
1 BEZPEČNOSTNÍ PROBLÉMY, HROZBY A RIZIKA SOUČASNOSTI	10
2 RENTGENY V BEZPEČNOSTNÍM PRŮMYSLU	13
2.1 KONTROLA POMOCÍ BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ	14
2.2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP RENTGENOVÉHO PŘÍSTROJE	15
2.2.1 Rentgenové záření.....	15
2.2.1.1 Elektromagnetické spektrum	15
2.2.1.2 Vznik rentgenové záření	17
2.2.1.3 Energie rentgenového záření	21
2.2.1.4 Vlastnosti rentgenového záření.....	22
2.2.2 Gama záření	23
2.3 KONSTRUKCE RENTGENOVÉHO PŘÍSTROJE	23
2.3.1 Rentgenový zářič.....	24
2.3.1.1 Rentgenka s rotační anodou.....	25
2.3.1.2 Rentgenka typu Straton.....	25
2.3.2 Zdroj elektrického napětí	26
2.3.3 Korektor rentgenového záření.....	27
2.3.4 Koncentrátor.....	27
2.3.5 Filtr.....	27
2.3.6 Rentgenový detektor	28
2.3.7 Stínění	28
2.4 SPECIFIKA BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ	28
3 TECHNOLOGIE BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ	30
3.1 INTERAKCE RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ S HMOTOU	30
3.1.1 Comptonův rozptyl.....	31
3.1.2 Fotoefekt	31
3.1.3 Tvorba elektronového páru	32
3.1.4 Jaderný fotoefekt.....	32
3.2 ANALÝZA BEZPEČNOSTNÍHO RENTGENU	33
3.2.1 Rentgenový zářič.....	34
3.2.2 Rentgenový detektor	35
3.2.2.1 Přímá přeměna	35
3.2.2.2 Nepřímá přeměna.....	35
3.2.3 Počítač	37
3.2.4 Programové vybavení.....	37
3.2.4.1 Technologie energetického rozlišení	38
3.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ	39
3.4 BEZPEČNOSTNÍ PŘEDPISY	39
3.4.1 Veličiny ionizačního záření	39
3.4.2 Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně.....	41
3.4.3 Používání bezpečnostních rentgenů na letištích.....	41
4 KATEGORIZACE BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ	43

4.1	DĚLENÍ Z HLEDISKA TECHNOLOGIE	43
4.1.1	Metoda jedné energie	43
4.1.2	Metoda duální energie.....	45
4.1.2.1	Metoda duální energie s více druhovým rozlišením.....	47
4.1.3	Metoda zpětného rozptylu.....	48
4.1.4	Metoda počítačové tomografie.....	50
4.1.4.1	Rentgenový systém.....	50
4.1.4.2	Počítačové zobrazení	51
4.1.4.3	Spirální metoda CT.....	52
4.1.5	Metoda vysoké energie	52
4.1.6	Metoda neutronové analýzy	53
4.1.6.1	Tepelná neutronová analýza	54
4.1.6.2	Rychlá neutronová analýza.....	55
4.1.6.3	Pulsní rychlá neutronová analýza	56
4.2	DĚLENÍ Z HLEDISKA AUTOMATICKÉ DETEKCE	57
4.2.1	Rentgeny s automatizovanou detekcí.....	57
4.2.2	Rentgeny s automatickou detekcí.....	57
4.3	DĚLENÍ Z HLEDISKA ÚČELU POUŽITÍ.....	58
4.3.1	Rentgeny pro zavazadla	58
4.3.1.1	Rentgeny pro kontrolu drobných zavazadel	60
4.3.1.2	Rentgeny pro kontrolu příručních zavazadel.....	60
4.3.1.3	Rentgeny pro kontrolu rozměrných zavazadel	61
4.3.1.4	Rentgeny pro kontrolu zapsaných zavazadel.....	62
4.4	RENTGENY PRO OSOBY	63
4.5	RENTGENY PRO DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY A JEJICH NÁKLAD.....	64
4.5.1	Mobilní rentgenová zařízení s rámem.....	65
4.5.2	Stacionární rentgenová zařízení	66
4.5.3	Přemístitelná rentgenová zařízení	67
4.6	MOBILNÍ RENTGENY.....	67
4.6.1	Přenosné rentgeny	67
4.6.2	Transportní rentgeny	67
5	SOUČASNÉ TRENDY BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ.....	69
5.1	AUTOMATICKÁ DETEKCE.....	69
5.2	NESTANDARDNÍ BEZPEČNOSTNÍ RENTGENY	70
5.3	MODERNÍ PŘENOSNÉ RENTGENY	71
5.3.1	Rentgenový zářič.....	71
5.3.2	Snímací box.....	72
5.3.3	Přenosný počítač	72
5.4	KONTROLA ČINNOSTI OPERÁTORŮ.....	73
5.4.1	Stručný popis funkce programu TIP	74
5.5	PROGNÓZA VÝVOJE BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ.....	75
5.5.1	LEXID (Lobster Eye X ray Imagine Device)	75
5.6	REX (ROADSIDE EXPLOSIV X RAY DETECTION)	76

6	VYUŽÍVÁNÍ BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ V ČESKÉ REPUBLICE.....	77
6.1	BEZPEČNOSTNÍ RENTGENY VE STÁTNÍM SEKTORU.....	77
6.2	BEZPEČNOSTNÍ RENTGENY V SOUKROMÉM SEKTORU	78
6.2.1	Návrh využití bezpečnostních rentgenů v PKB	78
	ZÁVĚR.....	80
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	82
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	86
	SEZNAM TABULEK.....	88

ÚVOD

Se stále rostoucí kriminalitou přibývá i stále větší počet trestných činů v podobě vyhrožování bombovými útoky na významná místa, teroristických útoků na leteckou dopravu, braní rukojmích nebo nelegálního obchodování. Tyto trestní činy jsou globálního charakteru a celosvětovým problémem je učinit taková protipatření, která by mohla těmto činům co nejvíce předejít.

Jako jeden z efektivních způsobů protipatření se jeví preventivní bezpečnostní kontroly. Velkým problémem totiž zůstává to, že většina útoků je způsobena pomocí pašovaného, různě ukrytého kontrabandu, který nejčastěji představuje zbraně, výbušniny, pyrotechniku nebo různé zakázané a nebezpečné látky. Bezpečnostní preventivní prohlídky by měly být proto prováděny s využitím dostupných technických prostředků, které bezpečnostní průmysl nabízí a pomocí nichž by měly být všechny výše zakázané předměty odhaleny.

Cílem bakalářské práce je analýza problematiky a využívání bezpečnostních rentgenů jako nejpoužívanějšího technického prostředku v již zmiňovaných preventivních bezpečnostních kontrolách. V úvodu práce se autor zaměřil na hlavní důvody, proč byly bezpečnostní rentgeny vůbec zavedeny a jaký plní účel. Další dvě kapitoly podávají přehled o principu činnosti, na kterém bezpečnostní rentgeny pracují. Stěžejní část práce je věnována kategorizaci bezpečnostních rentgenů, v níž jsou rentgeny rozděleny podle svých specifických parametrů a technologií, které využívají ke svému provozu. Pátá kapitola se zabývá současnými trendy a prognózováním vývoje bezpečnostních rentgenů. V závěru práce autor navrhuje možné využití bezpečnostních rentgenů v průmyslu komerční bezpečnosti.

1 BEZPEČNOSTNÍ PROBLÉMY, HROZBY A RIZIKA SOUČASNOSTI

Pocit bezpečí a pocit ohrožení jsou dva kontrastní psychické stavy, které doprovází každé lidské společenství již od nepaměti. Pocit bezpečí je jedním ze základních faktorů ovládající psychiku a chování každého jedince. Člověk je bytost společenská a velice zranitelná a k tomu, aby mohl nadále žít, tvořit a vůbec existovat potřebuje pocit jistoty, bezpečí, hmotného zabezpečení, sociálního zázemí a pořádku. Tyto veškeré potřeby můžeme integrovat do jednoho systému, který označujeme jako lidské společenství. Lidské společenství zahrnuje člověka jako jedince, lidskou společnost, životní prostředí a vymezené území, ve kterém všechny složky systému vzájemně spolupůsobí. Toto vymezené území lidského společenství nejčastěji představuje stát.[2]

V současné době je největším problémem ohrožující lidské společenství populační vývoj. Počet obyvatel na světě stále přibývá. Na začátku 20. století žilo na Zemi přes jednu miliardu lidí. Dnes je to takřka čtyřnásobek a v průběhu 21. století se počítá, že nárůst světové populace překročí hranici 10 miliard. Hlavním bezpečnostním rizikem u stále rostoucího počtu obyvatel je jejich migrace. Lidé i několikrát denně cestují z jednoho konce světa na druhý a jako efektivní dopravní prostředky volí leteckou přepravu. Dopravní letadla nesou na své palubě při každém letu i několik stovek cestujících a při vzniku krizové situace je velice obtížné zajistit jejich bezpečnost, o čemž také svědčí mnohé katastrofické nehody letadel z minulých let. Dalším problémem, z něhož plynou vysoká rizika, je bezpečnost státu jako územního celku, ve kterém lidské společenství působí a dosahuje svých základních cílů. Základním cílem lidského společenství je neustálý vývoj, zlepšování a usnadňování životních podmínek jedinců a lidské společnosti s využitím dostupné technologie a infrastruktury. Člověk již od začátku vývoje lidského společenství pochopil, že technologie a infrastruktura jsou jeho základním a současně nejzranitelnějším místem, které může být v případě pohromy zdrojem dalších nových pohrom. Přitom tyto pohromy mohou být skryté a na člověka mohou působit až s větším odstupem času (např. havárie jaderných elektráren a velkých průmyslových objektů, přerušování ropovodu, způsobení povodní, zhroutil ekonomiky státu, hospodářská krize atd.).

Výše uvedené bezpečnostní problémy by neměly své opodstatnění, kdyby neexistovaly faktory, které je způsobují. Tyto faktory nazýváme bezpečnostními hrozbami. Nejvážnější

hrozbu současnosti představuje globální terorismus. Terorismus ohrožuje bezpečnost států, organizací a celého lidského systému. Jedná se vlastně o formu utajované války, kdy se teroristé snaží násilnou činností dosáhnout svých cílů a vyhýbají se přímému boji, protože nemají k dispozici takovou techniku, jakou má potencionální protivník a útočí na něj skrytě a ze zálohy. Dle toho teroristické skupiny nemají žádnou pevnou teritoriální základnu a operují kdekoliv na světě, čímž se velice stěžuje jejich vystopování a také nemožnosti určení cíle příštího teroristického útoku. Terorismus rozlišujeme na několik druhů z nichž nejnebezpečnější je terorismus islámský fundamentalistický. Jeho hlavní myšlenkou je zajistit jednotné uspořádání světa podle náboženství islámu. Stoupenci tohoto terorismu odsuzují všechny západní vyspělé země a ostatní náboženství a cítí se být ve jménu Koránu oprávněni s nimi bojovat – „Svatá válka“. Své útoky nejčastěji vedou v rámci svých idejí proti civilnímu obyvatelstvu a nezúčastněným osobám. Hlavním cílem jejich útoků jsou místa mezinárodních přepravy, kde se shlukuje větší počet lidí z mnoha zemí.

Další hrozbu pro lidský systém přináší organizovaný zločin. Na organizovaný zločin lze nahlížet jako na zločinecké skupiny jejichž hlavním cílem je dosažení materiálního zisku, nebo určitého politického vlivu na veřejnost. Úzce souvisí s terorismem a často mu poskytuje zázemí. Hlavní rozdíl mezi organizovaným zločinem a terorismem je v tom, že skupiny organizovaného zločinu páchají trestní činnost skrytě a nechtějí být odhaleny, kdežto teroristické skupiny se ke svým útokům veřejně hlásí. Mezi hlavní formy organizovaného zločinu patří – výroba, pašování a distribuce drog, mezinárodní obchod se zbraněmi a výbušninami, organizování nelegální migrace, organizování prostituce a obchod s lidmi, praní špinavých peněz, vydírání a vybírání poplatků za ochranu, padělání. Mezi hlavní formy teroristický skupin patří – bombové útoky, sebevražedné bombové útoky, únosy a braní rukojmích, použití zbraní hromadného ničení.[11]

Největší rizika v současné době vyplývají z nebezpečí únosů letadel teroristickými skupinami, která by teroristé mohli použít jako účinnou zbraň ke zničení vytýčeného cíle. Jako příklad uveďme 11. září 2001, které se navždy snad každému člověku vrylo do paměti jako dosud největší teroristický útok v dějinách. Tento útok nebyl zaměřen pouze na USA jako velmoc reprezentující západní země, ale zničením budov Obchodního světového centra i na celý komplex mezinárodních vztahů. Celý incident byl způsoben tím, že útočníci pronesli na palubu letadla chladné zbraně pomocí kterých se ho zmocnili.

Nakonec se ukázalo, že učiněná bezpečnostní opatření, zejména bezpečnostní prohlídky, které útokům předcházely, byla shledána jako nedostačující, což se projevilo v selhání techniky a lidského faktoru. Bezpečnostní prohlídky byly, jsou a zůstávají velkým problémem při zajišťování bezpečnosti nejen v letecké dopravě, ale u všech důležitých objektů. I když u bezpečnostních vstupních kontrol stále ještě převažuje fyzická prohlídka (zejména kvůli finančním prostředkům), prakticky nelze každý kontrolovaný objekt, nebo osobu z časových, nebo etických důvodů dokonale prohlédnout. Proto je nutné stále více využívat moderní dostupné technické prostředky, které bezpečnostní průmysl nabízí. V boji proti terorismu a organizovanému zločinu se jako jeden z nejefektivnějších prostředků jeví bezpečnostní rentgeny. Bezpečnostní rentgeny jsou v poslední době stále více využívány u bezpečnostních prohlídek na hraničních přechodech, v přístavech, v jaderných elektrárnách, v průmyslových objektech s nebezpečnou havárií a zejména na mezinárodních letištích, kde je používání bezpečnostních rentgenů povinné, vycházející z příslušných leteckých předpisů.

2 RENTGENY V BEZPEČNOSTNÍM PRŮMYSLU

Rentgeny sehrávají v bezpečnostním průmyslu velkou roli zejména v oblastech, kde je kladen maximální důraz na preventivní bezpečnost. Hlavní úlohou bezpečnostních rentgenů je odhalování skrytých nebezpečných předmětů při rychlých a cílených prohlídkách objektů všeho druhu. Využívají se zejména ke kontrole:

- dopisních balíků
- poštovních zásilek
- zavazadel
- přepravních obalů
- nákladových prostorů
- dopravních vozidel
- osob
- všech dalších podezřelých předmětů

Bezpečnostní rentgeny slouží jako pomocný prostředek bezpečnostní kontroly v průmyslu komerční bezpečnosti i u pracovníků státních složek.

Základním úkolem bezpečnostního rentgenu je podávat přehlednou informaci o zkoumaném objektu bezpečnostnímu operátorovi prostřednictvím výstupního rentgenového obrazu při bezpečnostní detekci. Bezpečnostní detekci můžeme chápat jako proces odhalování a zjišťování neznámého skrytého objektu, který svým tvarem, popřípadě chemickým složením připomíná nebezpečný, nebo nežádoucí předmět.

Mezi nebezpečné předměty lze řadit zejména takové předměty, které svým charakterem v souladu s neoprávněným nakládáním mohou způsobit nebezpečnou ujmu na životě, zdraví, osobní svobodě lidí, životním prostředí, majetku a veřejném blahu, technologii nebo celkové infrastruktuře. Jedná se zejména o:

- střelné zbraně
- chladné zbraně
- keramické zbraně
- výbušniny ve všech skupenstvích

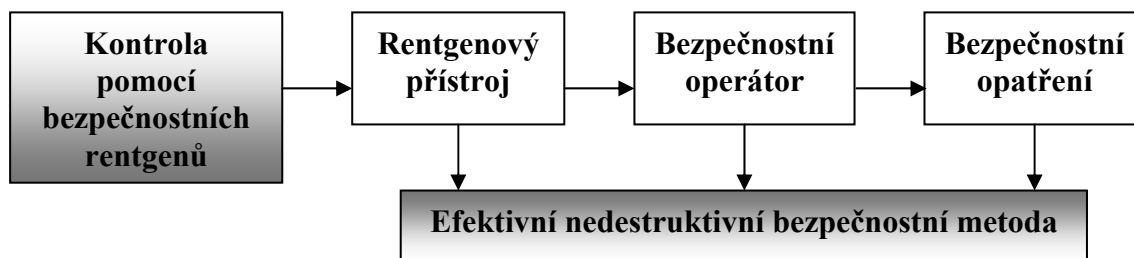
- biologické zbraně
- nukleární zbraně hromadného ničení
- všechny ostatní nebezpečné látky (hořlavé, toxické)

Nežádoucí předměty jsou takové, které by při volném pohybu a neoprávněném nakládání mohly porušovat mezinárodní dohody, úmluvy, nebo zákony jiných států. Jedná se zejména o:

- drogy, alkohol a další omamné látky
- zboží pašované přes hraniční přechody
- ilegální imigranty
- jiný skrytý kontraband

2.1 Kontrola pomocí bezpečnostních rentgenů

V praxi je často pojem bezpečnostní detekce nahrazován výrazem „kontrola pomocí bezpečnostních rentgenů“ nebo „detekční kontrola“. Bezpečnostní detekci můžeme všeobecně rozdělit na dvě oblasti. První oblast tvoří rentgenový přístroj (bezpečnostní rentgen), který dnes pracuje buď v automatizovaném, nebo automatickém režimu. Jeho hlavním úkolem je obstarávat optickou signalizaci přítomnosti nebezpečí nebo nežádoucího jevu. Druhou oblast bezpečnostní detekce tvoří bezpečnostní operátor, který rentgenový přístroj ovládá, vyhodnocuje jeho optickou signalizaci (v tomto případě rentgenový snímek) a dle dostupných informací provádí příslušná bezpečnostní opatření. Pokud spojíme tyto dvě oblasti do jednoho celku, dostaneme efektivní nedestruktivní bezpečnostní detekční metodu.



Obr. 1. Schéma kontroly pomocí bezpečnostních rentgenů

2.2 Fyzikální princip rentgenového přístroje

Jak již z názvu vyplývá, každý bezpečnostní rentgen pracuje s rentgenovým zářením. Abychom lépe pochopili jednotlivé technologie činností bezpečnostních rentgenů, je nejprve nutné vysvětlit základní fyzikální princip činnosti detekčního rentgenového přístroje.

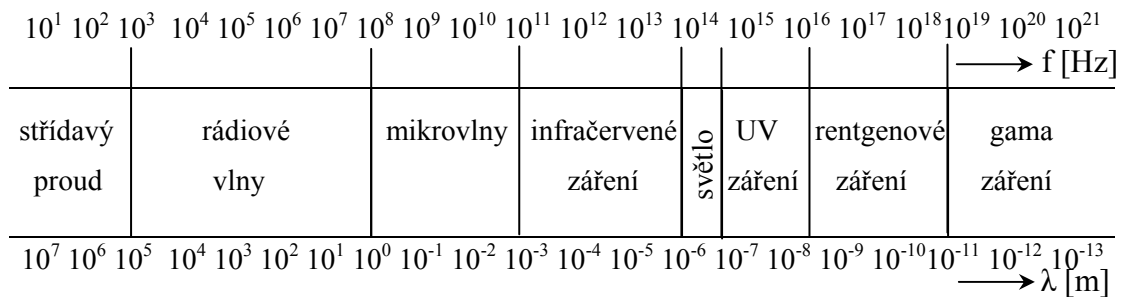
2.2.1 Rentgenové záření

Na rentgenové záření je nahlíženo jako na elektromagnetické záření, které se vyznačuje určitou frekvencí. Elektromagnetické záření můžeme definovat jako vzájemné působení střídavých magnetických a elektrických polí. Při tomto spolupůsobení je do okolí vydáváno kvantum neviditelné energie, které se šíří volným prostředím. Pro názornost si uveďme příklad: *„Bude-li vodičem procházet střídavý elektrický proud konstantní rychlostí, vodič bude do okolí vyzařovat elektromagnetické záření o frekvenci procházejícího proudu“*. Odtud plyne, že každé elektromagnetické záření je tvořeno periodicky se měnícími elektrickými a magnetickými poli. Bude-li se měnit perioda tzn. frekvence změn těchto polí, budou se také měnit fyzikální vlastnosti elektromagnetického záření. Díky těmto frekvenčním změnám můžeme elektromagnetické záření rozdělit do několika oblastí tzv. elektromagnetického spektra.

Na elektromagnetické záření se dá tedy nahlížet buď jako na vlnu, nebo jako na proud částic – fotonů. K myšlence rozvoje teorie fotonů přispěl Einstein, který definoval elektromagnetické záření jako proud balíčků energie v podobě fotonů. Je tedy zcela jasné, že elektromagnetické záření je tvořeno elektromagnetickými vlnami, které jsou tvořeny elektrickými a magnetickými poli a tato pole jsou pak tvořena fotony. Na elektromagnetické záření se nahlíží jako na vlnu spíše v oblasti radiových vln a jako na proud fotonů v oblasti fyziky elementárních částic.

2.2.1.1 Elektromagnetické spektrum

V případě elektromagnetického spektra nahlížíme na elektromagnetické záření jako na vlnění o různých vlnových délkách a frekvencích. Elektromagnetické spektrum je tvořeno elektromagnetickými vlnami v širokém rozmezí frekvencí a vlnových délek.



Obr. 2. Elektromagnetické spektrum

Jak z obrázku 2 vyplývá, spektrum je rozděleno na několik oblastí. A protože se všechny vlny spektra šíří ve vakuu stejnou rychlostí, pak frekvenci příslušného elektromagnetického záření získáme ze vztahu:

$$f = \frac{c}{\lambda} [Hz] \tag{1}$$

c – rychlost světla ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

λ – vlnová délka

Elektromagnetické spektrum bylo sestaveno na základě pojmenování elektromagnetických vln pro jejich vzájemné rozlišení podle velikosti vyzařované energie. V praxi často dochází k vzájemnému prolínání sousedících záření. Je to způsobeno tím, že spektrum je rozděleno podle původu vzniku jednotlivých záření a nikoli podle jejich vlnové délky a frekvence. Elektromagnetické spektrum rozdělujeme na rádiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelné spektrum, ultrafialové záření, rentgenové záření, gama záření a záření kosmické.

Pozn. Každá část záření elektromagnetického spektra má v oblasti bezpečnostního průmyslu své využití. Rádiové vlny jsou využívány pro bezdrátové komunikační účely jednotlivých komponentů bezpečnostního systému, nejčastěji na frekvenci 433 a 868 MHz. Oblast mikrovln je využívána u elektromagnetických detektorů prostorové a perimetrické ochrany EZS. Infračervené záření slouží jako detekční médium pro senzor v PIR detektorech EZS. Ultrafialové záření slouží jako detekční prostředek pro zajištění biologických stop. A nakonec rentgenové a gama záření nachází své využití v oblasti kontroly pomocí bezpečnostních rentgenů.

2.2.1.2 Vznik rentgenové záření

Jak již bylo řečeno, rentgenové záření je druhem elektromagnetického záření. Toto záření je charakterizováno velmi vysokými frekvencemi v rozmezí 10^{15} až 10^{18} Hz a velmi malými vlnovými délkami v rozmezí 10^{-8} až 10^{-11} m.

Rentgenové záření může vzniknout dvěma způsoby, a to buď pomocí působení vnějšího elektromagnetického vlnění na atomy těžkých jader, nebo pomocí srážky vnějších elektronů s atomy těžkých kovů. Působí-li na atom vnější elektromagnetické vlnění určité vlnové délky, dojde k tomu, že některý elektron přeskočí z vnitřní slupky do vnější. Atom s takto vybuzeným elektronem má přebytek energie a jeho celkový stav je nestabilní. Po určité době vybuzený elektron přeskočí zpět do vnitřní slupky a atom svoji přebytečnou energii vyzáří v podobě fotonů rentgenového záření. Druhý způsob vzniku rentgenového záření je jeho umělé vyvolávání. K tomuto se nejčastěji používají rentgenové trubice.

Jedná se o trubici s vysokým stupněm vakua, jejíž základem jsou dvě elektrody – anoda a katoda. Připojíme-li mezi tyto dvě elektrody zdroj elektrického napětí o vysokém napětí (dále jen anodové napětí), řádově desítky *kV*, pomocí žhavicího transformátoru dojde ke žhavení katody, která vlivem teplotní změny (termoemise) emituje elektrony. Elektrony jsou vysokým napětím urychlovány na vysokou energii a dopadají na anodu rychlostí až $165\,000\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Část anody, z níž pak vychází kvantum energie rentgenového záření, nazýváme ohnisko. Z fyzikálního hlediska dochází k přeměně potenciální energie na energii kinetickou.

$$E_p = e \cdot U \Rightarrow E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 [J] \quad (2)$$

E_p – potenciální energie

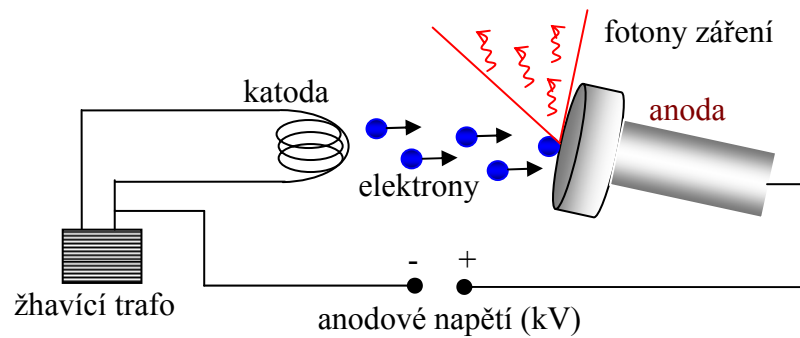
e – náboj elektronu

U – anodové napětí

E_K – kinetická energie

m – hmotnost elektronu

v – rychlost elektronu



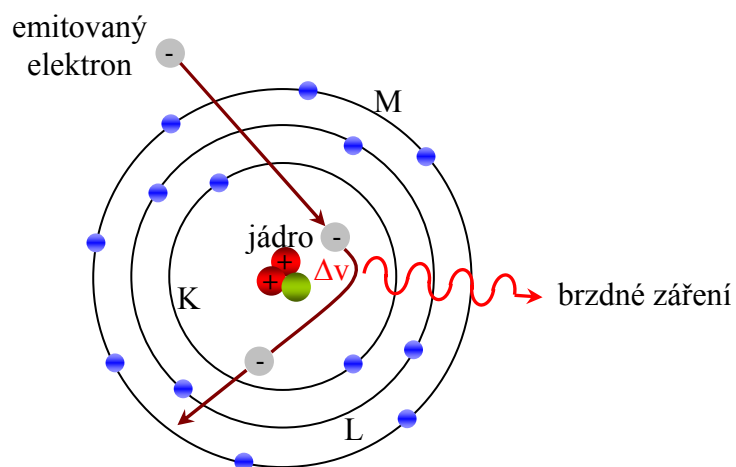
Obr. 3. Princip vzniku rentgenového záření

Při dopadu urychlených elektronů na anodu dochází ke vzniku dvou interakcí s materiálem anody:

- interakce s polem jádra atomu
- interakce s obalovými elektrony

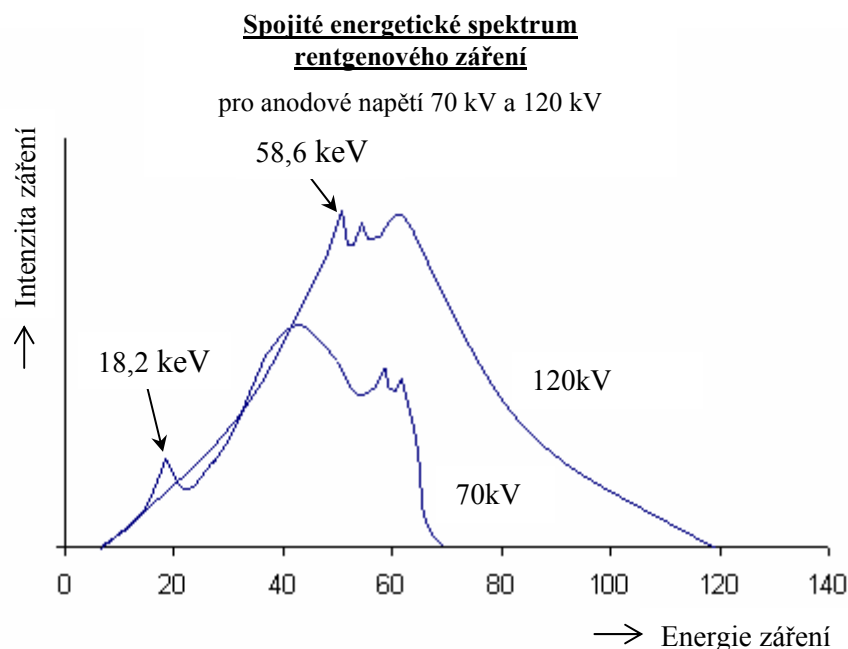
1. Interakce s polem jádra

Při dopadu urychlených elektronů na anodu se elektrony zabrzdí a jejich kinetická energie se přemění z části na energii tepelnou, z části na fotony elektromagnetického záření o vysokých frekvencích. Toto elektromagnetické záření nazývané brzdné rentgenové záření. Brzdné rentgenové záření vzniká při zbrzdění kinetické energie letícího elektronu v blízkosti jádra atomu prvku materiálu, z něhož je katoda tvořena. Jádro atomu je kladně nabitě, přitahuje opačně nabitý letící elektron a mění jeho směr pohybu – vektor rychlosti.



Obr. 4. Vznik brzdného záření

Energie brzdného záření je závislá na kinetické energii letících elektronů. Čím větší rychlost budou urychlené elektrony mít, tím více budou pronikat hlouběji k jádru atomu. Proniknou-li až na hranici slupky K , dojde vlivem velkých elektrických silových vazeb k velice rychlé změně vektoru rychlosti elektronu, přičemž dojde k vyzáření kvanta rentgenového záření o vysoké energii. Naopak proniknou-li elektrony vlivem malé rychlosti pouze k vnějším slupkám atomu, dojde k jejich pomalému zabrzdění a malému vyzáření rentgenového záření. Z toho vyplývá, že čím více urychlené elektrony pronikají do pole atomu, tím více je uvolňováno rentgenového záření o větší intenzitě. Účinnost interakce s polem jádra atomu je poměrně malá, asi 1 – 2 %. Je to způsobeno tím, že opravdu málo urychlených elektronů pronikne hluboko k jádru atomu, kde způsobí brzdné záření. Zbytek elektronů je ztraceno termoemisní reakcí, kdy letící elektrony narážejí na ostatní elektrony krystalové mřížky materiálu anody, které kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Protože urychlené elektrony jsou různě bržděny na energetických hladinách atomu, dochází ke vzniku vzájemně od sebe odlišných záření dle velikosti jejich vlnových délek. Brzdné záření tvoří spojité spektrum.



Obr. 5. Graf energetického spektra rentgenového záření

Spojité záření obsahuje celé spektrum vlnových délek od určité minimální hodnoty $\lambda_{min.}$. Při zabrzdění elektronů na anodě dochází ke snížení energie, která je obecně dána vztahem

$E = e \cdot U$, kde e je náboj elektronu a U napětí mezi elektrodami. Přemění-li se veškerá energie elektronů ve fotony rentgenového záření, pak je minimální vlnová délka dána vztahem:

$$\lambda_{MIN} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U} [\text{m}] \quad (3)$$

h – Planckova konstanta ($6,65 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)

c – rychlost světla ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Z uvedeného vztahu tedy vyplývá, že intenzita rentgenového záření určité vlnové délky závisí na velikosti napětí U mezi anodou a katodou. Maximální energii fotonu brzdného záření získáme potom ze vztahu:

$$E_{MAX} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{MIN}} [e \cdot V] \quad (4)$$

λ_{min} – minimální vlnová délka brzdného záření

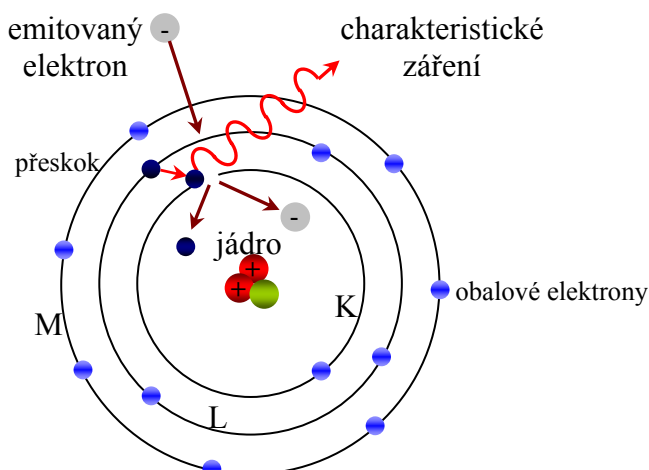
h – Planckova konstanta

c – rychlost světla ($3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2. Interakce s obalovými elektrony

Kromě brzdného záření zároveň vzniká při dopadu na anodu i druhotná forma rentgenového záření. Toto záření je nazýváno jako záření charakteristické. Vzniká na vnitřních energetických hladinách atomů v důsledku přeskoků elektronů ze vzdálenějších slupek, přechodem na nižší energetickou hladinu.

Urychlený emitovaný elektron na své dráze narazí na původní elektron ve slupce K a vyrazí ho ven ze své vazby. Vznikne díra, která je následně zaplněna elektronem ze vzdálenější slupky L . Při tomto elektronovém přeskoku je uvolněno kvantum energie rentgenového záření. Množství uvolněné energie závisí na rozdílu energetických hladin při přeskokách elektronů z vazeb. Charakteristické záření má frekvenci, která pak plyne z rozdílu energie před přeskokem a po přeskoku. Charakteristické záření je vyzařováno narozdíl od brzdného jen v malém množství a ve spojitém spektru rentgenového záření tvoří špičky.



Obr. 6. Vznik charakteristického záření

2.2.1.3 Energie rentgenového záření

Energie rentgenového záření je závislá na velikosti anodového napětí rentgenové trubice. Protože spektrum rentgenového záření je tvořeno převážně brzdným zářením, energii fotonu brzdného záření můžeme vyjádřit ze vztahu:

$$E = h \cdot f [e \cdot V] \quad (5)$$

E – energie rentgenového záření

f – frekvence záření

h – Planckova konstanta

Jednotku velikosti energie rentgenového záření tvoří jeden elektronvolt – eV . „Jeden eV můžeme definovat jako množství energie, kterou získá elektron procházející elektrickým polem s rozdílem potenciálů $1V$ “^[1]. Energie vyzařovaného rentgenového záření z trubice je odvozena od velikosti kinetické energie urychlených elektronů. Čím bude jejich kinetická energie větší, tím větší bude energie vyzařovaných fotonů. V praxi rozlišujeme několik energetických úrovní rentgenového záření :

^[1] Jaderná energetika [online]. [cit. 2008-04-14]. Dostupný z WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/nuklear.htm>

- měkké záření (50 eV – 10 keV)
- tvrdé záření (10 keV – 300 keV)
- velmi tvrdé záření (nad 300 keV a více nad 1 MeV)

Pro vysoké energie rentgenového záření je třeba urychlit dopadající elektrony na anodu na velmi vysokou rychlost. Tato rychlost musí být větší, než je tomu u rentgenových trubic. Proto se u bezpečnostních rentgenů pracujících s rentgenovým zářením v oblastech nad 1 MeV používá jako zdroje lineárního urychlovače částic. Vysoké energie slouží pro hlubší prozařování materiálů s vysokými protonovými čísly (nejčastěji ocel). V praxi tuto hloubku označujeme jako penetraci ocelí.

2.2.1.4 Vlastnosti rentgenového záření

Rentgenové záření je záření ionizační. To znamená, že kvantum fotonů při průchodu látkou vyrazí jeden, nebo více elektronů atomu a tím látku ionizují. Energie záření, při které již dochází k ionizaci látky činí 5 keV. Rentgenové záření, stejně jako záření gama nazýváme zářeními nepřímo ionizujícími. Fotony rentgenového záření nenesou žádný elektrický náboj a tudíž nemohou přímo způsobovat žádné přímé ionizační změny elektrickými silami. Fotony nejprve předávají část své energie elektronům, které pak působí na atomy dané látky a dochází tak k její ionizaci.[15]

Kvanta rentgenového záření se šíří ze zdroje přímočaře s určitou intenzitou, která se čtvercem vzdálenosti ubývá. Fotony rentgenového záření jsou při průchodu látkou různě pohlcovány. Velikost (intenzita) pohlcení fotonů závisí na jejich energii a na protonovém čísle látky, kterou procházejí. Obecně platí, že čím menší bude energie fotonů rentgenového záření a protonové číslo prvku materiálu, kterým záření prochází větší, tím více budou tyto fotony pohlceny a obráceně.

Mezi další vlastnosti rentgenového záření patří jeho fluorescenční účinky. Při dopadu rentgenového záření na některé materiály (sirník zinečnatý, wolfram vápenatý) dojde k vybuzení fluorescenčního záření o vlnových délkách ležící ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra. Intenzita fluorescence těchto látek roste s intenzitou dopadajícího rentgenového záření. Této vlastnosti rentgenového záření se zejména využívá u snímačů polovodičových detektorů rentgenového záření. V neposlední řadě je důležité zmínit, že rentgenové záření způsobuje vážné zdravotní riziko.[1]

2.2.2 Gama záření

Záření gama je stejně jako rentgenové vysoké energetické povahy o ještě menších vlnových délkách. Frekvence gama záření se pohybuje v rozmezí 10^{18} až 10^{21} Hz. Na rozdíl od záření rentgenového, které vzniká při procesech v elektronovém obalu atomu, záření gama vzniká při procesech uvnitř atomového jádra při radioaktivních přeměnách a jaderných reakcích. Radioaktivní přeměna vzniká samovolně při nukleonových procesech, kdy dochází k přeskokům nukleonů z vyšších energetických hladin na nižší, přičemž jsou uvolňovány fotony gama záření. Základní veličinou radioaktivní přeměny je aktivita, která udává počet nepřeměněných jader za časovou jednotku. Nebo-li udává rychlost přeměny radionuklidu na nuklid.

$$A(t) = -\frac{\partial N(t)}{\partial t} [Bq] \quad (6)$$

A – aktivita

N – počet nepřeměněných jader

t – čas [s]

Při radioaktivních přeměnách současně také vzniká záření alfa a beta. Při jaderných reakcích dochází k jaderné přeměně vlivem působení vnější částice. Částice je jádrem pohlcena, dojde ke změně vnitřní struktury jádra (změna nukleonového, nebo protonového čísla atomu), při které je uvolněno množství fotonů gama záření. Záření gama tvoří čárové energetické spektrum. U bezpečnostních rentgenů se gama záření využívá při technologii neutronové analýzy, která je popsána v kapitole Kategorizace bezpečnostních rentgenů.

2.3 Konstrukce rentgenového přístroje

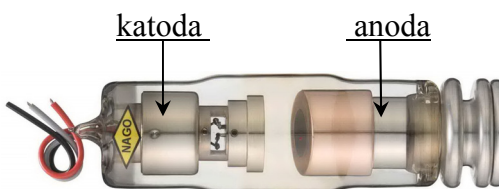
Základní stavba každého rentgenového přístroje je v zásadě stejná. Ať už jde o rentgen bezpečnostní, lékařský, průmyslový, pro defektoskopii nebo pro analýzu látek, jeho konstrukční prvky se sice pro každý obor navzájem liší, ale v základním principu plní stejný účel, pro jaký byly vyrobeny. Každý rentgenový přístroj se skládá z šesti hlavních částí:

- rentgenový zářič
- zdroj elektrického napětí

- korektor rentgenového záření
- koncentrátor
- filtr
- rentgenový detektor

2.3.1 Rentgenový zářič

Rentgenový zářič je nejčastěji tvořen rentgenovou trubicí (dále jen rentgenka) a slouží jako přímý zdroj rentgenového záření. Rentgenka se skládá z hermeticky uzavřené trubice s vysokým stupněm vakua. V ose rentgenky jsou umístěny dvě elektrody – katoda a anoda. Pro zjednodušení si lze rentgenovou trubicí představit jako polovodičovou diodu s velmi vysokým napětím v propustném směru. Katoda je tvořena vláknem z materiálu s vysokým bodem tání a má spirálovitý tvar. Materiálem katody je nejčastěji wolfram pro svoje vysoké protonové číslo. Anodu tvoří kruhová plocha, která se skládá ze tří vrstev různých druhů materiálu. Povrch anody je pokryt tenkou vrstvou těžkého kovu, pod níž následuje vrstva z materiálu, který má vysokou teplotu tání a odvádí teplo vznikající interakcí dopadových elektronů. Třetí vrstva tvoří základ celé konstrukce anody.

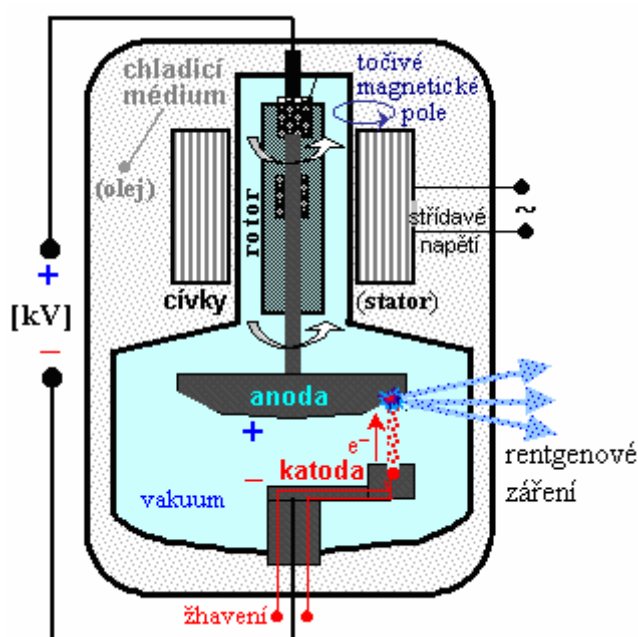


Obr. 7. Rentgenka

Pro směrovost rentgenového záření (záření vychází z jednoho bodu anody) se žhavené vlákno umísťuje na katodě do fokusační štěrbině. Emitované elektrony potom letí v úzkém svazku a dopadají na anodě do jednoho lokalizovaného místa, které má obdélníkový průmět. Anoda je skloněna pod úhlem 19° . To zajišťuje zkrácení dopadového ohniska. Protože elektronový paprsek dopadá na anodu stále do stejného místa, dochází k lokálnímu přehřívání anody a k snižování výsledného rentgenového záření. Proto jsou dnes využívány rentgenky s rotační anodou a rentgenky typu Straton.

2.3.1.1 Rentgenka s rotační anodou

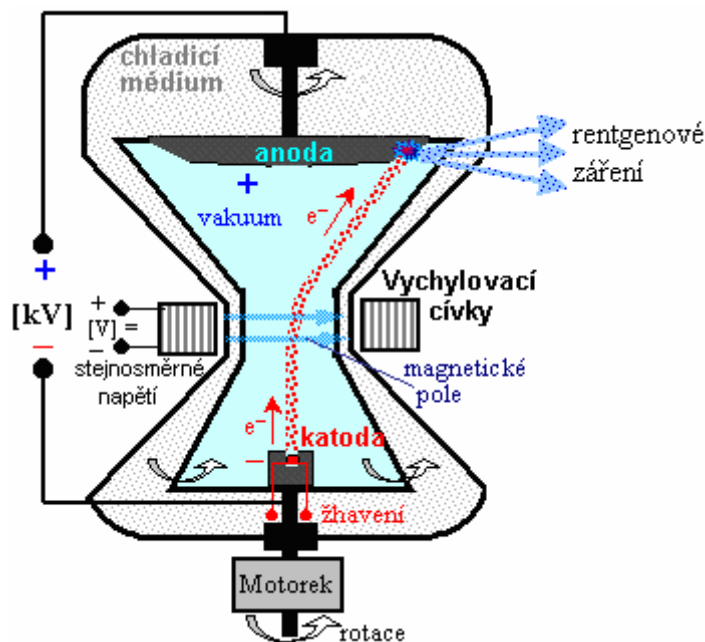
Anodu tvoří disk rotující kolem své osy, přičemž úzký svazek emitovaných elektronů dopadá po každé na jinou část anody a dochází tak k rovnoměrnému rozložení tepla. Otáčení anody pracuje na principu asynchronního motoru. Uvnitř anodového hrdla je umístěný kovový váleček spojený hřídelí s anodou, který slouží jako rotor. Postranní cívky tvoří stator a jsou buzeny střídavým proudem. Vlivem elektromagnetické indukce dochází k otáčení rotoru. Rychlost otáčení rotoru je 3000 až 20 000 ot. \cdot min⁻¹. Pro větší rentgenové výkony se používá anoda s dutinou, kterou protéká chladicí kapalina.[13,14]



Obr. 8. Průřez rentgenky s rotační anodou

2.3.1.2 Rentgenka typu Straton

Nevýhodou rotující anody je opotřebení ložiska rotoru. Protože je rentgenka hermeticky uzavřena, výměna ložiska je prakticky nemožná. Rentgenka typu Straton tento problém odstraňuje a navíc umožňuje lepší chlazení anody. Na vnějších stranách rentgenky jsou umístěny cívky, které zajišťují vychýlení urychlených elektronů a usměrní jejich pohyb do dopadového ohniska anody. Anoda je z jedné strany v přímém kontaktu s chladicí kapalinou a dochází tak k jejímu lepšímu a rychlejšímu chlazení. Další výhodou oproti rentgence s rotační anodou je, že za pomoci motorku rotuje rentgenka celá a tudíž uvnitř rentgenky nejsou potřeba žádné pohyblivé části.

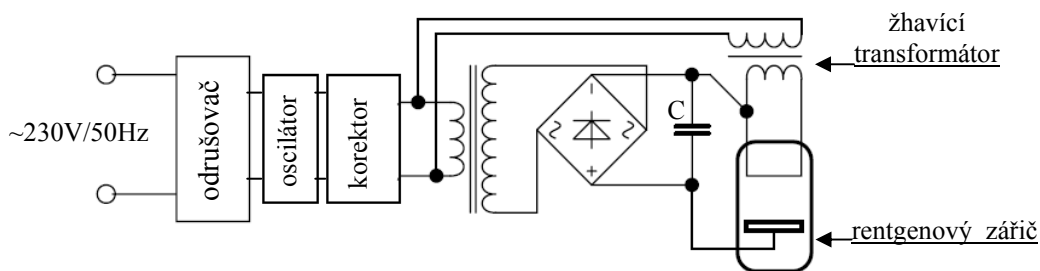


Obr. 9. Průřez rentgenky Straton

Stále se zlepšující metody chlazení ale opět vedou k návratu a k paralelnímu využívání rentgenek se stacionární anodou.

2.3.2 Zdroj elektrického napětí

Rentgenový zářič potřebuje ke svému provozu zdroj vysokého napětí a zdroj žhavení. K tomuto účelu slouží jednofázový síťový a žhavicí transformátor. Úkolem síťového zdroje je převádět napětí ze sítě 230 V/ 50Hz na napětí desítek až stovek kV. Skládá se z odrušovače, z regulačních prvků, primárního a sekundárního vinutí, usměrňovače a filtru. Úkolem žhavicího transformátoru je přivádět na elektrody katody proud několika desítek ampérů. Žhavicí transformátor představuje transformátor s výstupem na krátko při minimálním výstupním napětí a maximálním výstupním proudu. Pro přenosné rentgenové přístroje (bez možnosti připojení do sítě) se používají spínané zdroje o vysokých kmitočtech. Jako zdroj napětí na primárním vinutí pak slouží akumulátor. Dnes se u rentgenových přístrojů používají zdroje výhradně středofrekvenční. Tyto zdroje převádí napětí na vstupu transformátoru při vysokých kmitočtech (kHz) přičemž dochází ke zmenšení ztrát v železe a ke zmenšení celkových rozměrů transformátoru.



Obr. 10. Schéma zdroje elektrického napětí

2.3.3 Korektor rentgenového záření

Korektorem lze nazývat blok elektrických obvodů pro nastavování parametrů rentgenového záření. Základní parametry tvoří velikost anodového napětí a velikost anodového proudu. Pomocí anodového napětí se nastavuje tvrdost výsledného rentgenového záření. Nastavuje se v širokém rozmezí hodnot. Čím více se anodové napětí zvyšuje, tím více je záření tvrdší a je málo absorbováno materiály s vyšším protonovým číslem. Pomocí anodového proudu lze nastavit intenzitu vyzářeného záření z rentgenky. Anodový proud protéká rentgenkou a lze jej měnit pomocí změny žhavicího proudu vlákna katody. Při zvýšení žhavicího proudu je katodou emitováno více elektronů, roste anodový proud a tím se zvyšuje intenzita vyzářeného rentgenového záření.

2.3.4 Koncentrátor

Koncentrátor slouží k tomu, aby se rentgenové záření nešířilo od zářiče v širokém rozptylu. Koncentrátor tvoří součást konstrukce krytu rentgenového zářiče a transformuje vycházející záření dle požadavků (podle tvaru koncentrátoru) do úzkého svazku.

2.3.5 Filtr

Filtr se u rentgenových přístrojů používá pro zachycení určité energetické úrovně rentgenového záření vycházejícího od zářiče. Spojité spektrum rentgenového záření je na začátku tvořeno nízkoenergetickými fotony. Tyto fotony označujeme jako měkká složka rentgenového záření. Úkolem filtru je měkkou složku zachytit a propustit pouze složku tvrdou, protože měkká složka by způsobovala na rentgenovém detektoru nežádoucí rušení.

2.3.6 Rentgenový detektor

Detektor rentgenového záření poskytuje podklad pro zhotovení rentgenového snímku. Detektor je umístěn naproti rentgenovému zářiči. Mezi zářičem a detektorem je umístěn zkoumaný objekt. Zářičem je expandováno rentgenové záření, které prochází přes zkoumaný objekt. Část fotonů se v objektu absorbuje, část jím projde a dopadne na detektor. Opět zde velice záleží na energii fotonů a na protonovém čísle materiálu z něhož je zkoumaný objekt zhotoven. Detektor je tvořen buď klasickým filmem, který se po pořízení rentgenového snímku musí nechat vyvolat, nebo je tvořen speciální světlocitlivou maticí, která dopadající rentgenové záření převádí na elektrické signály. V praxi rozlišujeme detektory analogové a digitální. Analogové jsou tvořeny filmy a paměťovými fóliemi, digitální detektory pak tvoří polovodičové matice. Základním faktorem ovlivňující kvalitu detektoru je jeho expozice, kontrast a ostrost. Expozici lze chápat jako čas potřebný k vystavení detektoru rentgenovému záření. Čím je expozice menší, tím je výsledný snímek kvalitnější. Velikost expozice závisí na anodovém proudu rentgenového zářiče. Kontrast detektoru představuje poměr mezi nejtmaším a nejsvětlejším místem rentgenového snímku. Ostrost detektoru představuje jeho rozlišovací schopnost a udává kvalitu rentgenového snímku.

2.3.7 Stínění

Každý rentgenový přístroj by měl mít zajištěno kvalitní stínění proti unikajícímu rentgenovému záření do okolí. Jako stínící materiál se používají olovo, nebo wolfram. Tyto materiály mají vysokou hustotu a zachytí téměř všechny procházející rentgenové fotony. Podle energetické velikosti rentgenového záření se používají různé tloušťky stínícího materiálu.

2.4 Specifika bezpečnostních rentgenů

Hlavním specifikem u bezpečnostního rentgenu je zpracovávání rentgenového snímku. Po bezpečnostním rentgenu se žádá, aby zobrazoval vnitřní prostor zkoumaného objektu a vše v něm obsažené. Takové zobrazení musí být co neostřejší, s co největším rozlišením a pokud možno v barevném provedení. Pro takové kvalitní zobrazení využívá bezpečnostní rentgen výpočetní techniku. Rentgenový detektor je výhradně digitální a dopadající záření

se převádí na elektrické signály. Tyto signály jsou zpracovávány a vyhodnocovány počítačovou jednotkou a výsledný rentgenový snímek je zobrazen na monitoru.

Postup při pořizování rentgenového snímku:

- akvizice (pořízení rentgenového snímku)
- převod na elektrické signály a následná digitalizace
- zpracování snímku počítačem
- archivace snímku
- přenos a výstupní zobrazení na monitoru

Podrobnější popis technologie bezpečnostního rentgenu je proveden v následující kapitole.

3 TECHNOLOGIE BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ

Jak už bylo řečeno, základním účelem bezpečnostního rentgenu je detekovat vnitřní obsah kontrolovaného objektu. Na jedné straně zkoumaného objektu je zdroj rentgenového záření a na straně protilehlé rentgenový detektor. Při snímání rentgenového záření jsou velice důležité interakce, které vykonávají rentgenové fotony s materiálem zkoumaného objektu. Tyto interakce pak mají rozhodující vliv na výsledný rentgenový snímek.[3]

3.1 Interakce rentgenového záření s hmotou

Při zkoumání určitého objektu je velice důležitá intenzita rentgenového záření. I když je rentgenové záření pronikavé, jeho původní intenzita se od zdroje záření (od rentgenového zářiče) po průchodu látkou určité tloušťky snižuje. Obecně lze zeslabenou intenzitu rentgenového záření vyjádřit absorpčním vzorcem:

$$I = I_0 \cdot e^{-m \cdot d} [W \cdot m^{-2}] \quad (7)$$

I – velikost zeslabené intenzity rentgenového záření

*I*₀ – velikost původní intenzity rentgenového záření od zdroje

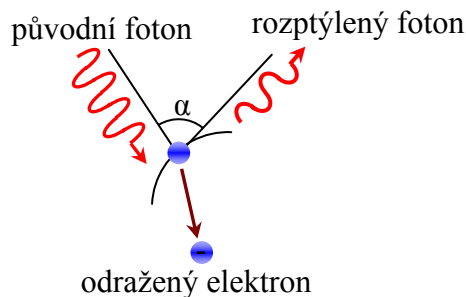
m – celkový lineární koeficient zeslabení

d – tloušťka látky, přes kterou rentgenové záření prošlo

Celkový lineární koeficient zeslabení se skládá ze součtů tří jednotlivých koeficientů – koeficientu Comptonova rozptylu, koeficientu fotoelektrického jevu a koeficientu tvorby elektronového páru. Hodnota lineárního koeficientu je závislá na velikosti protonového čísla látky, kterou rentgenové záření prochází. Rentgenové fotony při dopadu na jakoukoli látku s ní vzájemně reagují. Tyto vzájemné reakce nazýváme interakcemi. Rentgenové záření může projít látkou bez interakce, kdy fotony proletí mezi atomy látky a pokračují dále ve svém přímočarém pohybu. Většinou se bude jednat o případ průchodu tvrdého záření látkami o nízkých hustotách. U průchodu záření látkami vyšších hustot již ale budou fotony záření narážet na jejich obalové elektrony a atomová jádra a budou s nimi způsobovat vzájemné interakce. Tyto interakce nazýváme elektromagnetické a jsou způsobeny čtyřmi ději – Comptonovým rozptylem, fotoefektem, tvorbou elektronového páru a jaderným fotoefektem.[3]

3.1.1 Comptonův rozptyl

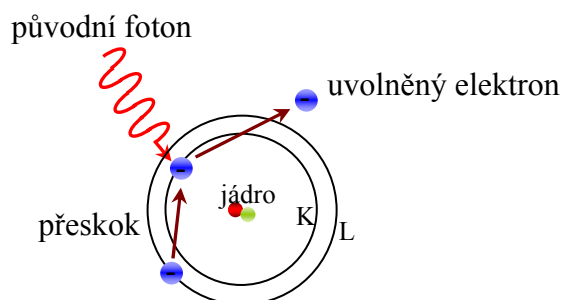
Comptonův rozptyl představuje děj, při kterém se rentgenové fotony při dopadu na obalové elektrony atomů látky odrážejí a mění svou vlnovou délku. Při průchodu rentgenového záření o nízké energii (desítky keV) látkou s nízkým protonovým číslem narážejí rentgenové fotony na nízkoenergetické obalové elektrony atomů. Tyto elektrony jsou na vnějších slupkách velice slabě vázány a chovají se téměř jako volné. Při srážce se rentgenový foton odrazí od obalového elektronu pod určitým úhlem α , přičemž ztratí určitou část své energie. Velikost tohoto úhlu závisí na velikosti ztracené energie fotonu. Čím více energie srážkou foton ztratí, tím větší bude jeho úhel odrazu.



Obr. 11. Comptonův rozptyl

3.1.2 Fotoefekt

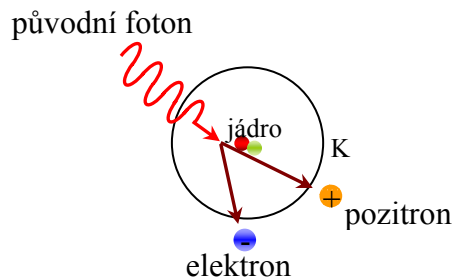
Fotoefektem se nazývá děj, kdy dochází ke srážce rentgenového fotonu s obalovým elektronem na energeticky nižší slupce atomu látky. Foton spotřebuje veškerou svou energii na vyražení elektronu z vazby a zanikne. Energie s jakou uvolněný elektron vyletí z vazby závisí na energii původního fotonu. Po vyraženém elektronu vznikne prázdné místo na které záhy přeskočí elektron z nejbližší slupky. Při fotoefektu tedy dochází k absorpci rentgenového záření.



Obr. 12. Fotoefekt

3.1.3 Tvorba elektronového páru

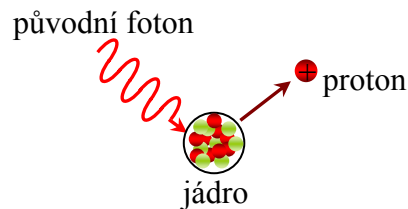
Tvorba elektronového páru vzniká při energiích rentgenových fotonů větších než 1,022 MeV. Při těchto energiích fotony procházejí v látce v blízké těsnosti kolem atomového jádra. Silné elektrické pole jádra způsobí rozpad letícího fotonu na pár elektron a pozitron. Elektron zůstává v látce, pozitron reaguje s dalšími elektrony a zaniká.



Obr. 13. Elektronový pár

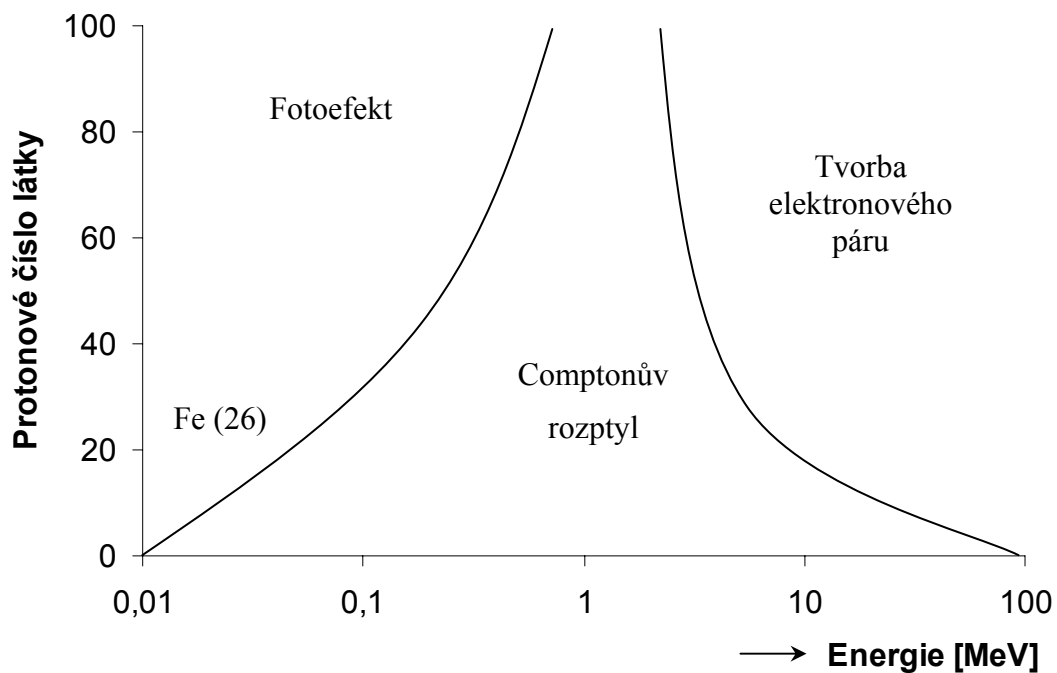
3.1.4 Jaderný fotoefekt

Jaderný fotoefekt vzniká při energiích fotonů větších než 2,2 MeV. Fotony způsobují velmi silné interakce v jádře, kdy dochází k vyražení protonů a neutronů.



Obr. 14. Jaderný fotoefekt

Pro technologii snímání rentgenového záření prošlého zkoumaným objektem mají význam první tři interakce. Následující graf popisuje při jaké energii rentgenového záření a v jakých materiálech tyto interakce nastávají.

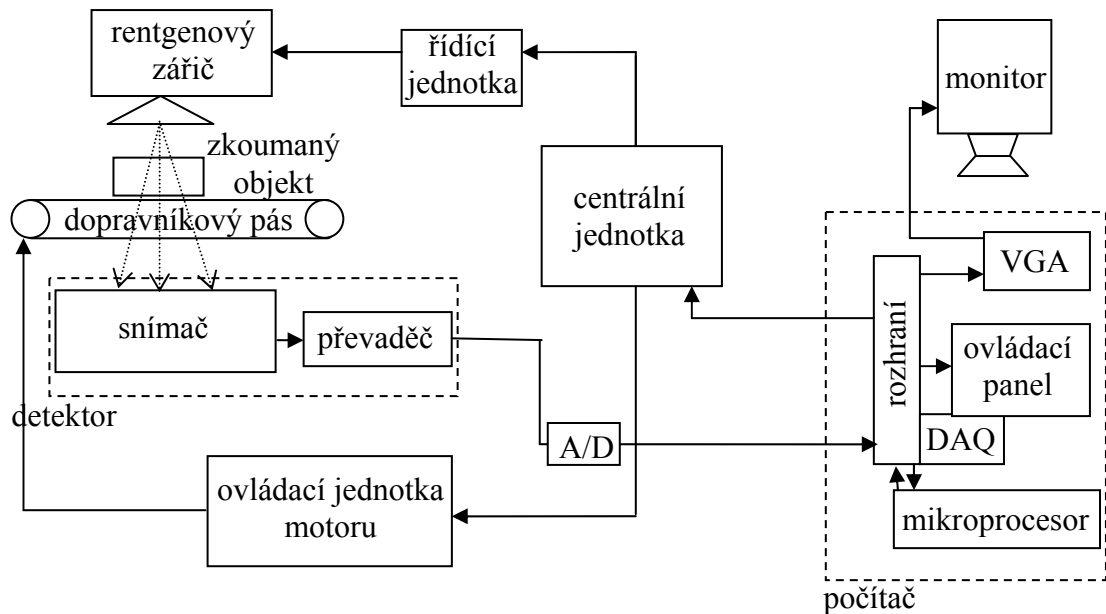


Obr. 15. Graf závislosti energie rentgenového záření na protonovém čísle látky

Graf vyjadřuje závislost energie rentgenového záření a hustoty látky, kterou záření prochází. V grafu si lze povšimnout, že fotoefekt (absorpce rentgenových fotonů) nastává při nízkých energiích záření v látkách s vyššími protonovými čísly. Comptonův rozptyl nastává při nízkých až středních energiích rentgenového záření v látkách o nízkých protonových číslech a tvorba elektronového páru vzniká při vysokých energiích záření v látkách s vysokými protonovými čísly.

3.2 Analýza bezpečnostního rentgenu

Bezpečnostní rentgen je jako rentgenový přístroj charakterizován čtyřmi základními prvky. Tyto jsou rentgenový zářič, snímač, počítač a jeho programové vybavení (software). Všechny tyto prvky mezi sebou komunikují pomocí počítače a centrální jednotky. Vzájemná komunikace je znázorněna na zjednodušeném blokovém schématu.

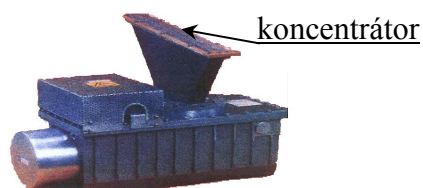


Obr. 16. Blokové schéma bezpečnostního rentgenu

Základem celého systému je centrální jednotka, která je napojena na počítač, pomocí něhož provádí příkazy z ovládacího panelu. Centrální jednotka ovládá rentgenový zářič na němž pomocí řídicí jednotky nastavuje jeho parametry (anodové napětí, aktivaci rentgenky atd.). Centrální jednotka rovněž ovládá dopravníkový pás, po kterém se pohybuje zkoumaný objekt. Prošlé fotony zkoumaným objektem dopadají na snímač, kde jsou převaděčem zpracovávány na analogový signál. V analogově číslicovém převodníku je poté signál převeden do číslicové podoby pro počítačové zpracování.

3.2.1 Rentgenový zářič

Rentgenový zářič má rentgenku zapouzdřenou v silné ocelové konstrukci. Anoda je chlazená olejovou lázní a vnitřní vzduchovou cirkulací. Součástí konstrukce může být i zabudovaný koncentrátor. Základním parametrem zářiče je penetrace, nebo-li prozářitelnost materiálu. Zářič nemá žádné vedlejší účinky. Rentgenové záření je emitováno jen při jeho aktivaci.



Obr. 17. Rentgenový zářič

3.2.2 Rentgenový detektor

Bezpečnostní rentgeny využívají pro snímání rentgenového záření polovodičové detektory. Polovodičové detektory jsou tvořeny snímačem se světlocitlivými elementy, které převádějí dopadající rentgenové fotony na elektrický analogový signál. V praxi se můžeme u těchto detektorů setkat s označením ploché detekční panely (flat panel detektors). Polovodičové detektory pracují se snímači na principu přímé a nepřímé přeměny rentgenového záření.

3.2.2.1 Přímá přeměna

Snímač detektoru je založen na bázi amorfního selenu. Selen vyniká vodivostí při působení světla. Rentgenové záření dopadá na fotovodivou selenovou vrstvu, přičemž dochází k tvorbě elektron – děrových párů. Elektrony se pohybují ke katodě a v obvodu vznikne proudový impuls. Tento impuls je přiveden ke sběrací elektrodě kondenzátoru odkud je sejmut tranzistorovým polem.[12]

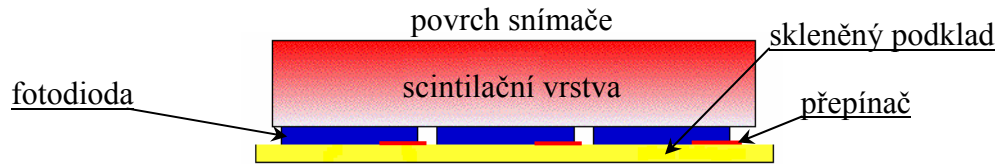


Obr. 18. Řez detektorem s přímou přeměnou

3.2.2.2 Nepřímá přeměna

Snímač detektoru je založen na bázi amorfního křemíku. Rentgenové záření je při dopadu na povrch snímače převedeno pomocí scintilační vrstvy na viditelné světlo, které je následně detekováno maticí fotodiod. Scintilační vrstva je tvořena materiálem s vysokým

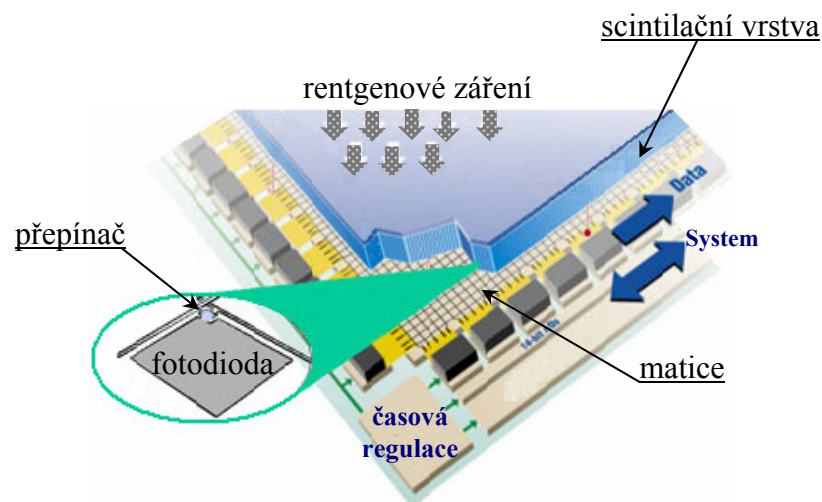
protonovým číslem, aby pohltila všechny rentgenové fotony. V praxi je nejpoužívanější jodid cesný.



Obr. 19. Řez detektorem s nepřímou přeměnou

Polovodičové detektory s nepřímou přeměnou na bázi amorfního křemíku jsou více využívány, protože se svým principem přibližují analogovým rentgenovým filmům a poskytují tak daleko lepší rentgenový obraz než detektory s přímou přeměnou. Výsledný detektor je potom tvořen (pro oba případy) soustavou segmentů z nichž každý poskytuje oddělený signál.[12]

Trendem v oblasti polovodičových detektorů jsou CCD snímače. CCD snímače obsahují několik stovek až tisíců fotodiód uspořádaných do matice, přičemž čtení obrazové informace probíhá po sloupcích a s přenosem z každého řádku. Každá fotodioda představuje jeden snímací bod (pixel). Na počtu fotodiód tedy závisí rozlišovací schopnost snímače.



Obr. 20. CCD snímač

Parametry polovodičového detektoru:

- **celkový rozměr** – udává velikost detektoru pro různé aplikace (bezpečnostní rentgeny)
- **rozlišovací schopnost** – udává nejmenší rozdíl mezi dvěma blízkými energetickými úrovněmi dopadajícího rentgenového záření, závisí na počtu fotoelementů
- **citlivost** – udává schopnost detektoru produkovat signál při určité minimální energii rentgenového záření
- **časová odezva** – rychlost záznamu a čtení, nebo-li závislost rychlosti vytváření výstupního signálu na dopadajícím záření
- **tvar výstupního signálu** – průběh signálu (pravoúhlý – náběžná, sestupná hrana)
- **dynamický rozsah** – odolnost proti přeexponování / podexponování

3.2.3 Počítač

Počítač tvoří v bezpečnostním rentgenu základní řídicí jednotku. Pomocí něj je celý rentgenový systém ovládán. Počítač má kvůli náročnému grafickému zpracování a archivaci snímků status moderního osobního počítače (PC) s vysokým výkonem.

Příklad: procesor Intel Pentium, paměť 1 GB RAM, grafická paměť 256 MB, pevný disk 160 GB, DVD mechanika.

Na počítač je napojena dvojice CRT / LCD monitorů nejčastěji o velikosti 17". Jeden monitor slouží pro černobílé a druhý pro barevné zobrazení. Monitory používají minimální rozlišení 1280 x 1024 a vyšší.

3.2.4 Programové vybavení

Základní programové vybavení počítače tvoří operační program. Starší rentgeny využívaly OS 2, nebo MS – DOS. Dnes rentgenový počítač pracuje se standardním vybavením operačního programu Windows. V základním operačním programu jsou nainstalovány moderní softwarové produkty, které umožňují operátorovi nejrůznější funkce pro práci s rentgenovým obrazem. Jedná se o:

- černobílé a barevné zobrazení – lepší rozlišitelnost, nebo odlišitelnost materiálů

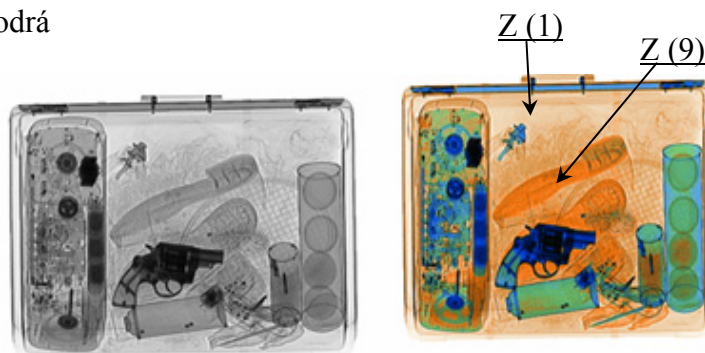
- černobílé reverzní zobrazení – zvýraznění tmavých míst obrazu
- zvýraznění kontrastu a hran – zvýraznění okrajů předmětů
- zooming obrazu – digitální zvětšení/ zmenšení obrazu
- pseudobarevné zobrazení – přiřazení různých barev různým odstínům šedi monochromatického obrazu
- technologii energetického rozlišení
- archivace rentgenových obrazů

3.2.4.1 Technologie energetického rozlišení

Technologie energetického rozlišení představuje zlepšenou identifikaci všech materiálů uvnitř zkoumaného objektu. Počítačem je na základě absorpčního vzorce vypočítána velikost úbytku intenzity rentgenového záření v každém bodě zkoumaného objektu a podle jeho velikosti protonového čísla Z je mu přiřazen určitý barevný odstín. Jednotlivé druhy materiálů uvnitř zkoumaného objektu jsou tak pak rozděleny do tří druhů barev – oranžová, zelená a modrá. Intenzita každé barvy se stupňuje s velikostí protonového čísla, které spadá pro každou barvu do vyhrazeného rozsahu.

Rozsahy protonového čísla Z pro přiřazení určité barvy ke každé látce:

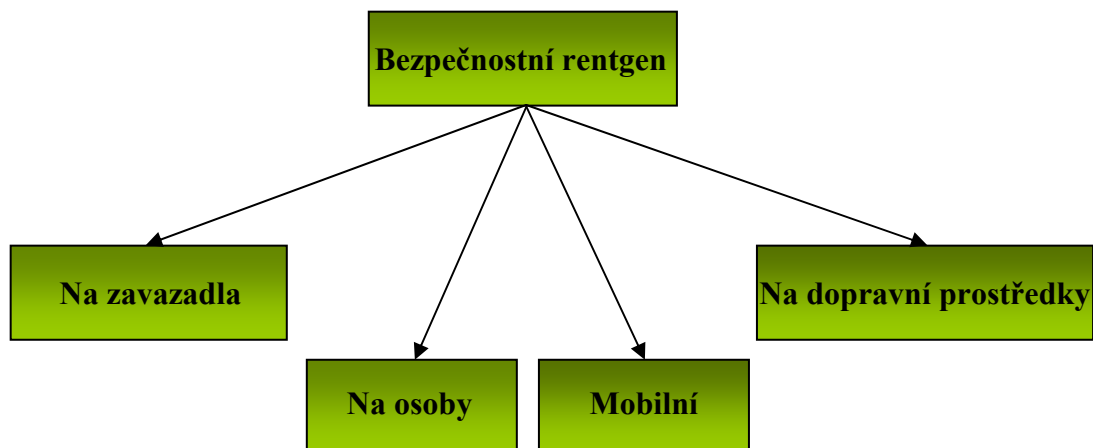
- $0 < Z < 10$ oranžová
- $10 < Z < 18$ zelená
- $18 < Z$ modrá



Obr. 21. Výsledný rentgenový obraz (vlevo monochromatické provedení, vpravo technologie energetického rozlišení)

Technologie energetického rozlišení se využívá u metody duální energie, která je popsána v kapitole Kategorizace bezpečnostních rentgenů.

3.3 Základní rozdělení bezpečnostních rentgenů



Obr. 22. Schéma základního rozdělení bezpečnostních rentgenů

3.4 Bezpečnostní předpisy

Bezpečnostní rentgeny pracují s ionizačním zářením a při provozu mohou způsobovat potenciální radiační riziko. Proto musí být podrobeny přísným bezpečnostním předpisům, které upravují jejich činnost tak, aby při svém provozu nemohly způsobovat žádnou újmu na zdraví lidského organismu. Bezpečnostní rentgeny představují komoditu, která spadá do regulovatelné sféry. Výrobky, které spravuje regulovatelná sféra jsou obecně specifikovány jako výrobky, které by mohly svými vlastnostmi, bez dalšího přičinění ohrozit zdraví osob a majetku. Odpovědnost za regulovatelnou sféru nese stát a v oblasti bezpečnostních opatření před ionizujícím zářením tuto činnost konkrétně přebírá Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Bezpečnostní předpisy se týkají hlavně rentgenového zářiče jako zdroje vydávající ionizační záření.

3.4.1 Veličiny ionizačního záření

Základním prostředkem k definování míry velikosti ionizačního záření (v našem případě rentgenového záření) je fyzikální obor dozimetrie. Dozimetrie se zabývá měřením ionizačních záření a stanovuje pro ně příslušné veličiny, které určují jeho míru a velikost. Následující tabulka uvádí základní veličiny ionizujícího záření.

Veličina	Jednotka SI	Zvláštní název	Stará jednotka	Převodní vztah
dávka	$J \cdot kg^{-1}$	Gy (gray)	rad	1 rad = 0,01 Gy
dávkový ekvivalent	$J \cdot kg^{-1}$	Sv (sievert)	rem	1 rem = 0,01 Sv
aktivita	s^{-1}	Bq (becquerel)	Ci (curie)	1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Tab. 1. Základní jednotky dozimetrie

Základní veličinou, která stanovuje energii ionizačního záření absorbovaného v látce, je *dávka*. Tato veličina je vyjádřena jako podíl střední energie ionizujícího záření předané látce o hmotnosti m .

$$D = \frac{\partial E}{\partial m} [J \cdot kg^{-1}] \quad (8)$$

D – dávka

E – energie ionizujícího záření

m – hmotnost látky

Pro univerzálnost se jako jednotka dávky používá 1 Gy – jeden gray.

Další veličinou je *dávkový ekvivalent*. *Dávkový ekvivalent* vyjadřuje různou biologickou účinnost ionizačního záření pro různé druhy záření.

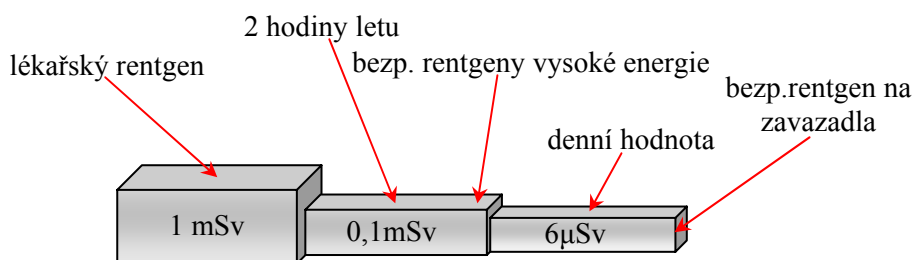
$$H = Q \cdot D [J \cdot kg^{-1}] \quad (9)$$

Q – činitel jakosti, udává rozdílnou biologickou účinnost pro různé druhy záření

D – dávka

Jako jednotka dávkového ekvivalentu se používá 1 Sv – jeden sievert.

V praxi se používá pro vyjádření velikosti absorpce ionizačního záření v látce veličina *příkon dávkového ekvivalentu*. Ten je definován jako přírůstek *dávkového ekvivalentu* za čas s jednotkou $Sv \cdot h^{-1}$. *Dávkový ekvivalent* je často mylně nazýván jako *dávka* ionizujícího záření.[8]



Obr. 23. Příklady dávkových ekvivalentů

3.4.2 Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně

Aby mohly být veškeré bezpečnostní rentgeny provozovány na území České republiky, musí dostat povolení od Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Stejně tak pro dodávky bezpečnostních rentgenů musí být dodávající subjekt držitelem oprávnění k nakládání se zdroji ionizujícího záření. Provozování rentgenových záříčů upravuje vyhláška o radiační ochraně č.499/2005 Sb. Podle této vyhlášky můžeme rozdělit bezpečnostní rentgeny na tři druhy podle rentgenového záříče – rentgeny s drobnými zdroji, rentgeny s jednoduchými zdroji a rentgeny s významnými zdroji.

Bezpečnostní rentgeny s drobnými zdroji upravuje § 7 dané vyhlášky a nejčastěji se používají pro kontrolu zavazadel na letištích a jiných tomu určených místech. Bezpečnostní rentgeny s jednoduchými zdroji upravuje § 8 dané vyhlášky a používají se zejména pro kontrolu dopravních zdrojů. Významnými zdroji jsou pak lineární urychlovače částic, které se v bezpečnostních rentgenech používají pro vysoké rentgenové energie na hlubokou penetraci ocelí. Jejich parametry upravuje § 9.

Poznámka: Všechny bezpečnostní rentgeny jsou do České republiky distribuovány ze zahraničních zemí. Mezi největší dodavatele patří Spojené státy americké. Výrobu bezpečnostních rentgenů upravuje americká mezinárodní instituce Úřad pro kontrolu potravin a léků (Food and Drug Administration – FDA).

3.4.3 Používání bezpečnostních rentgenů na letištích

Bezpečnostní rentgeny mají své největší uplatnění bezpochyby na letištích a místech mezinárodní dopravy. V České republice spadá mezinárodní letiště pod správu Úřadu pro civilní letectví, který je státním zřízením, ustanoven ve shodě s Chicagskou úmluvou řízenou Mezinárodní organizací o civilním letectví.

Mezinárodní letecká doprava je v České republice upravena zákonem č. 439/2006 Sb. o civilním letectví a prováděcím předpisem vyhláškou č. 410/2006 Sb. Jelikož mezinárodní letiště v České republice spadají pod státní dozor, musí veškerá technická bezpečnostní zařízení, která se podílejí na chodu letištního komplexu, projít bezpečnostní certifikací, kterou schvaluje Úřad pro civilní letectví. Konkrétní požadavky na bezpečnostní rentgeny a na jejich operátory upravuje letecký předpis L17, který pojednává o bezpečnosti mezinárodního civilního letectví.

4 KATEGORIZACE BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ

Protože v současné době existuje na trhu několik desítek různých typů bezpečnostních rentgenů lišících se vzájemně v jednotlivých principech činnosti a způsobech použití, je v této kapitole provedena jejich kategorizace. Kategorizace se týká nejrozšířenějších a nejpoužívanějších typů.

Bezpečnostní rentgeny můžeme dělit dle následujících hledisek:

- z hlediska technologie
- z hlediska automatické detekce
- z hlediska účelu použití

4.1 Dělení z hlediska technologie

Podle technologie můžeme bezpečnostní rentgeny rozdělit na metody různě využívající rentgenového záření šířící ho se od zdroje přes zkoumaný objekt ke snímači. Rozhodující faktor zde sehrávají interakce rentgenového záření s látkou. Tyto metody dělíme na:

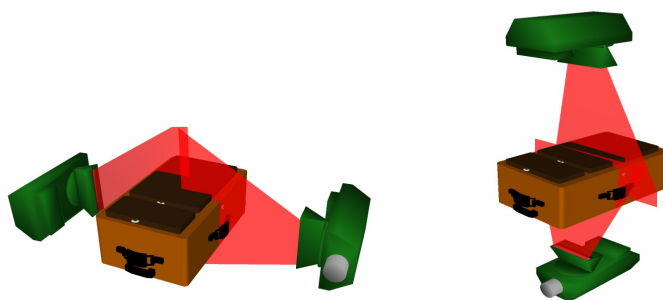
- metodu jedné energie
- metodu duální energie
- metodu zpětného rozptylu
- metodu počítačové tomografie
- metodu vysoké energie
- metodu neutronové analýzy

4.1.1 Metoda jedné energie

Metoda jedné energie využívá principu klasického průniku rentgenového záření látkou. Rentgenové fotony se šíří od zdroje záření se stejnou energií v rozsahu energetického spektra a procházejí zkoumaným objektem. Z následných interakcí se využívá převážně fotoelektrického jevu. Při průniku fotonů zkoumanou látkou se buď fotony na základě absorpčního vzorce pohltní, nebo pokračují dále ve svém přímočarém pohybu ke snímači rentgenového detektoru. Metoda jedné energie je také označována jako „*single energy*“. Bezpečnostní rentgeny s jednou energií můžeme rozdělit na rentgeny bez a s pásovým

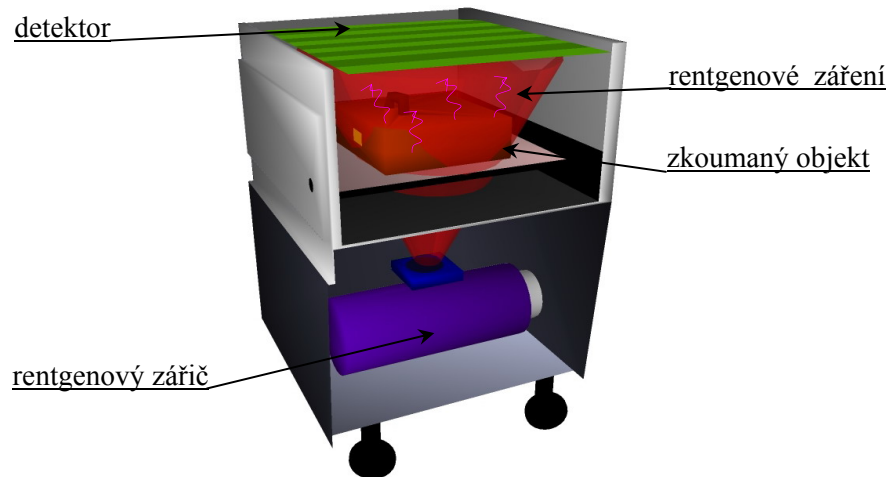
dopravníkem. U rentgenů bez pásového dopravníku je zkoumaný objekt vložen do komory, přičemž je celý vnitřní prostor komory konstantně ozářen rentgenovým zářením. Rentgenové záření prochází přes zkoumaný objekt a dopadá na detektorový snímač, který je tvořen obdélníkovou plochou poskládanou ze soustavy detekčních elementů. U pásových rentgenů dochází k ozařování zkoumaného objektu rentgenovým zářením postupně v kombinaci s podélným pohybem objektu, který zajišťuje dopravníkový pás v inspekčním tunelu. Inspekční tunel je odstíněný prostor do kterého zkoumaný objekt vjíždí na dopravníkovém pásu (viz. Obr.29). Rychlost pohybu pásu je kolem 20 cm za sekundu. Rentgenové záření je pomocí koncentrátoru zeslabeno na velice úzký podlouhlý paprsek, který postupně prozařuje zkoumaný objekt a dopadá na rentgenový detektor. Ten je tvořen svislými sloupcovými detekčními elementy poskládané ve tvaru *L*. Každý detekční element je tvořen fotodiodami poskládanými lineárně pouze v jednom řádku. To umožňuje mnohem rychlejší čtení a přenos signálu. Tyto detektory nazýváme lineárními. Výhodou pásových rentgenů je, že snímač detektoru není zašuměn Comptonovým rozptylem, které se při procházejícím zářením odráží od zkoumaného objektu a šíří se všemi směry. Na rozdíl od rentgenů bez dopravníkového pásu dopadá na detektor pouze úzký rentgenový paprsek v dané svislé rovině a tím zajišťuje kvalitnější rentgenový obraz ve vodorovné směru pohybu zkoumaného objektu. Příčný pohyb zkoumaného objektu nemusí zajišťovat pouze dopravníkový pás. U rentgenů pro dopravní prostředky například zkoumané vozidlo rentgenovým paprskem konstantně projíždí.

Rentgenový zářič se v bezpečnostních rentgenech instaluje s orientací paprsku buď ve vertikálním, nebo horizontálním směru na pohyb zkoumaného objektu.

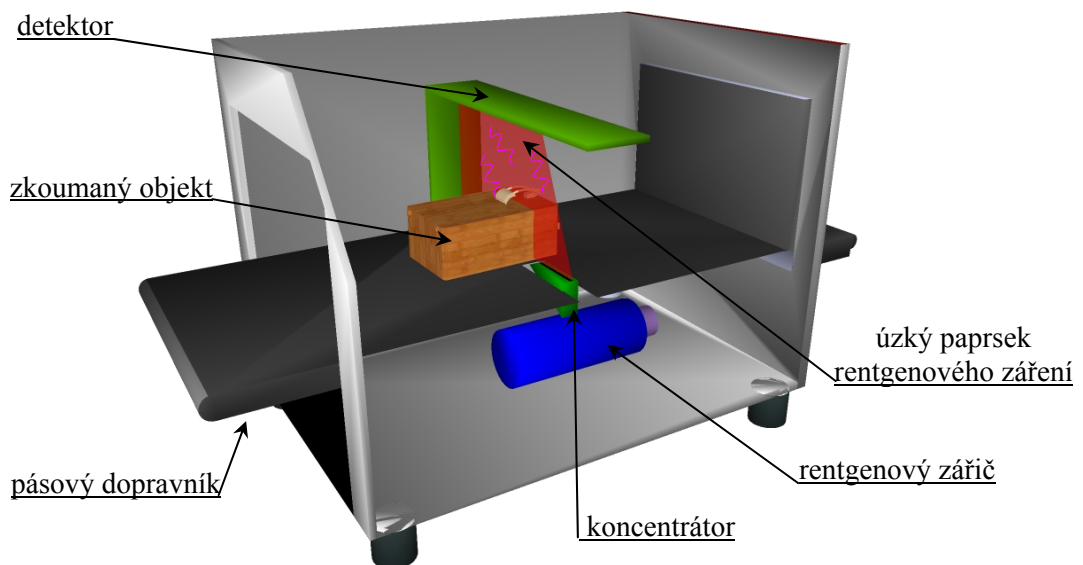


Obr. 24. Orientace rentgenového paprsku (vlevo horizontální zleva/ zprava, vpravo vertikální seshora/zespod)

Počítač umožňuje výsledné zobrazení rentgenového snímku pouze v monochromatickém zobrazení. Případné barevné zobrazení, které výrobci u těchto rentgenů nabízejí je pouze pseudobarevné.



Obr. 25. Rentgen bez pásového dopravníku



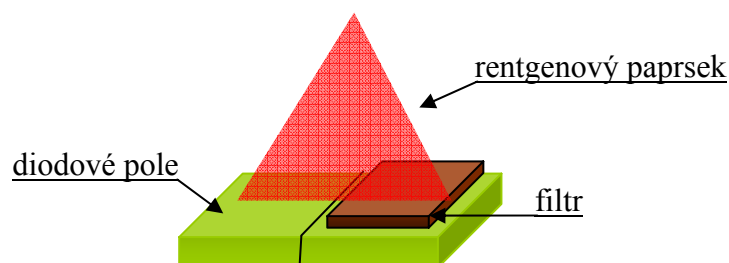
Obr. 26. Pásový rentgen

4.1.2 Metoda duální energie

Metoda duální energie je založena na principu snímání rentgenového paprsku rentgenovým detektorem ve dvou různých energiích. Necháme-li procházet dva paprsky rentgenového záření zkoumaným materiálem, každý o různé energii, zjistíme, že materiál s určitou

hodnotou protonového čísla působí na útlum těchto paprsků rozdílně. Rentgenové fotony o nižší energii budou pohlceny materiály s nižším protonovým číslem (plasty, papír, textil). Naopak rentgenové fotony s vyšší energií těmito materiály prostoupí až k materiálům s vyšším protonovým číslem (kovy). U metody jedné energie je paprsek rentgenového záření tvořen různými energiemi od začátku až do konce spojitého spektra rentgenového záření. Měkká složka rentgenové záření (nízkoenergetické fotony na začátku spektra) je filtrem odstraněna a zkoumaným materiálem prochází pouze složka tvrdá (fotony o energii odpovídající anodovému napětí). Takto vyfiltrované rentgenové záření pak zobrazuje pouze materiály s vyšším protonovým číslem, nejčastěji kovy. Kdyby totiž na snímač dopadaly rentgenové fotony celého spektra, docházelo by k velkému šumu a výslednému zkreslení rentgenového snímku. Problém nastává v případě, kdy bude zkoumaný objekt obsahovat umělohmotné zbraně, plastické trhaviny atd. Tento problém odstraňuje metoda duální energie.

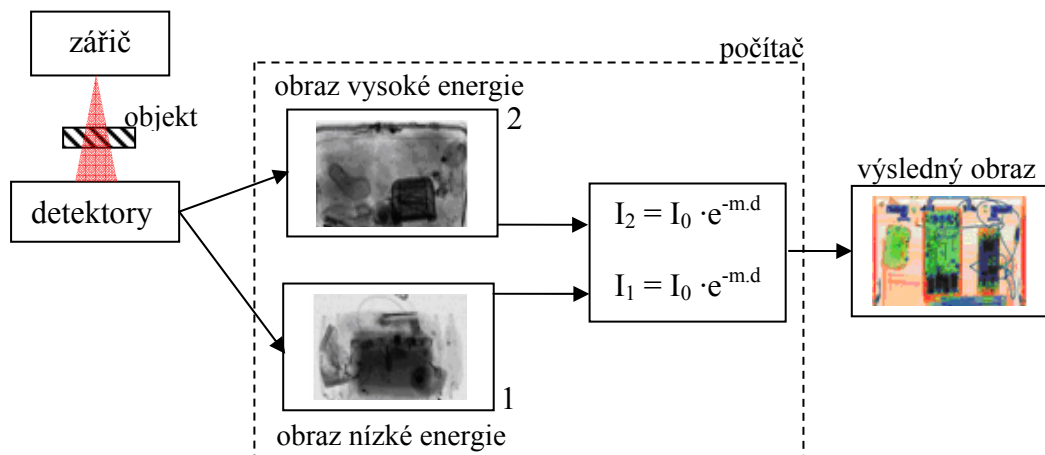
U metody duální energie je rentgenový detektor je tvořen více detekčními elementy, které roztřídí rentgenové záření do více energetických hladin. Snímač je tvořen dvojnásobným lineárním diodovým polem. Fotodiody jsou umístěny ve dvou řádcích. Na fotodiody v horním řádku dopadá nízkoenergetická složka rentgenového záření tvořené na začátku spojitého spektra, na fotodiody ve druhém řádku pak dopadá pouze složka vysokoenergetická. Vysokoenergetické složky se dosahuje umístěním měděného filtru před fotodiody. Filtr zajišťuje, aby na snímač dopadaly jen rentgenové fotony v příslušných energetických hladinách.



Obr. 27. Metoda duální energie

Z každého detekčního elementu jsou počítačem zpracovávány dva rentgenové snímky. Tyto snímky jsou vzájemně porovnávány vyhodnocovací logikou podle příslušných

algoritmů. Vyhodnocování probíhá na základě absorpčního vzorce, kdy jsou ve výsledku jednotlivým materiálům přiřazeny barevné odstíny – technologie energetického rozlišení.

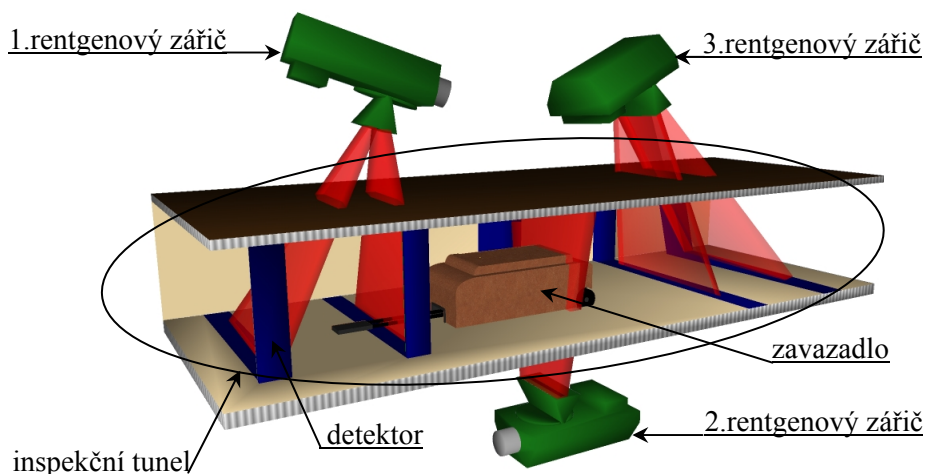


Obr. 28. Schéma principu metody duální energie

4.1.2.1 Metoda duální energie s více druhovým rozlišením

Metoda duální energie s více druhovým rozlišením využívá systém několika rentgenových zářičů. Bezpečnostní rentgen pak zpravidla obsahuje dva až pět rentgenových zářičů. Každý zářič může pracovat v konstantním nebo impulsním režimu. Konstantní režim představuje zářič, který emituje rentgenové záření konstantně o jedné energii. V kombinaci více zářičů potom spadá každý do jiné energetické úrovně. Impulsní režim představuje zářič, který emituje dvě energetické úrovně rentgenového záření ve střídavých impulzech.

Metoda duální energie s více druhovým rozlišením poskytuje ještě lepší technologii než je metoda duální energie. Široké spektrum energetických úrovní z jednotlivých zářičů poskytuje více obrazových informací a ve výsledném zobrazení je tak možnost bezpečnostnímu operátorovi odhalit velice jemné obrysy hran kovových materiálů, papíru, textilu, bankovek, drog nebo výbušnin. Při různě umístěných rentgenových zářičích (horizontálně, vertikálně) umožňuje počítač zpracovat ze všech snímků z každého detektoru výsledný třídimensionální rentgenový obraz zkoumaného objektu.

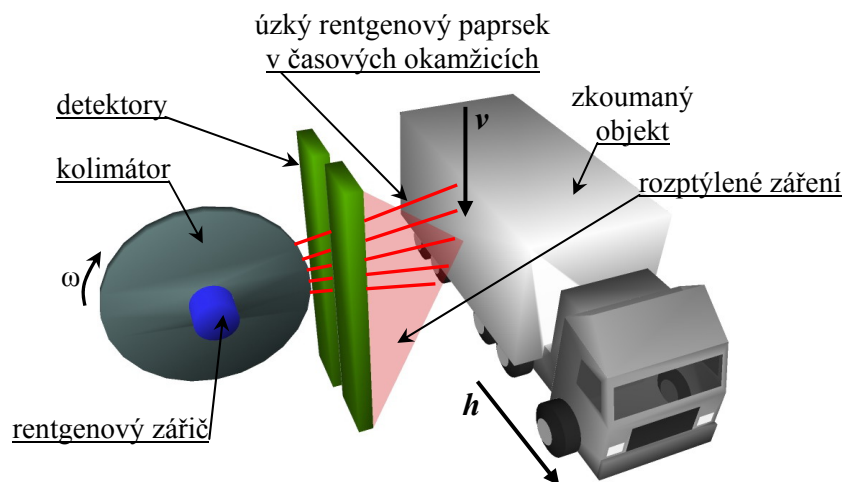


Obr. 29. Metoda s vícedruhovým rozlišením

4.1.3 Metoda zpětného rozptylu

Metoda zpětného rozptylu je založena na interakcích rentgenového záření s hmotou využívající Comptonova rozptylu. Jak už bylo řečeno Comptonův rozptyl vzniká nejvíce v materiálech s nízkými protonovými čísly. Necháme-li těmito materiály procházet rentgenové záření o nízkých až středních energiích, budou zpětně rozptýlené fotony dopadat na stranu rentgenového zářiče. Z tohoto důvodu se rentgenový detektor pro zpětný rozptyl umísťuje před zářič.

Zkoumaný objekt je nutné ozařovat velmi úzkým paprskem. Kdybychom objekt ozářili rentgenovým paprskem o stejné velikosti jako u metody jedné nebo duální energie, na detektor by dopadalo velké kvantum rozptýlených fotonů a docházelo by k velkému zašumění snímáče. Rentgenový paprsek je proto umístěn ve štěrbinách rotačního kolimátoru a nepřesahuje velikost 10 mm v průměru. Kolimátor ozařuje zkoumaný objekt v horizontální poloze. Vertikální ozařování zajišťuje pohyb zkoumaného objektu. Intenzita zpětně rozptýleného záření je rovna intenzitě Comptonova rozptylu šířícího se od materiálu, který je v každý časový okamžik prozařován úzkým rentgenovým paprskem. Je proto důležité připomenout, že Comptonův rozptyl vzniká i u materiálů s vysokým protonovým číslem, ale už ne s takovou intenzitou. V tomto případě musí být použity daleko citlivější detektory.



Obr. 30. Princip metody zpětného rozptylu

v – směr vertikálního pohybu rentgenového paprsku

h – směr horizontálního pohybu zkoumaného objektu

Hlavní výhodou metody zpětného rozptylu je, že dokáže zobrazit téměř všechny organické materiály s nízkými protonovými čísly, přičemž se používá reverzní obraz. Pro názorný příklad si uvedeme dva rentgenové obrázky, kdy jeden je proveden metodou duální energie a druhý pomocí zpětného rozptylu. Do nákladového prostoru letadla byly umístěny dva pytle simulující výbušninu. Výsledný rentgenový snímek duální energie nedokázal pytle odhalit, protože byly umístěny před řadou krabic naplněny látkami stejné hustoty a s protonovým číslem jen o něco málo větším, než měla simulující výbušnina. Naopak metoda zpětného rozptylu nebezpečný předmět dokázala jednoznačně odhalit.



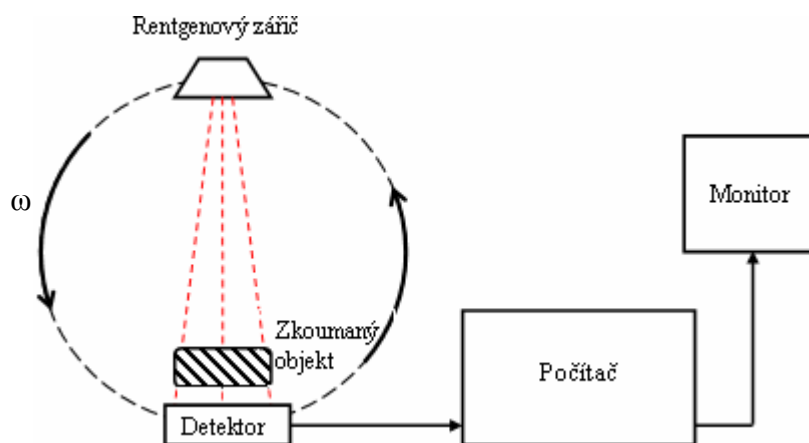
Obr. 31. Srovnání metody duální energie a zpětného rozptylu

Dnešní technologie jsou již většinou vzájemně provázány pro zajištění co možná největší úrovně bezpečnostní detekce. Zejména se jedná o rentgeny s metodou duální energie doplněné o metodu zpětného rozptylu.

4.1.4 Metoda počítačové tomografie

Bezpečnostní rentgeny pracující na principu počítačové tomografie nesou název CT rentgeny z anglického označení *Computer Tomography* – CT.

Bezpečnostní CT rentgeny byly vyvinuty na základě lékařských tomografií, odkud také vychází jejich podobný princip činnosti. Skládají se z rentgenového systému a z vysoce výkonné počítačové jednotky. Na rozdíl od předchozích metod pořizuje metoda počítačové tomografie rentgenové snímky z více směrů, nejčastěji kolem dokola zkoumaného objektu. Výhodou metody počítačové tomografie je, že dokáže odhalit všechny nebezpečné látky, různě zakamuflované v přepravních obalech stejných hustot (například v útrobách zmražených ryb)[3].



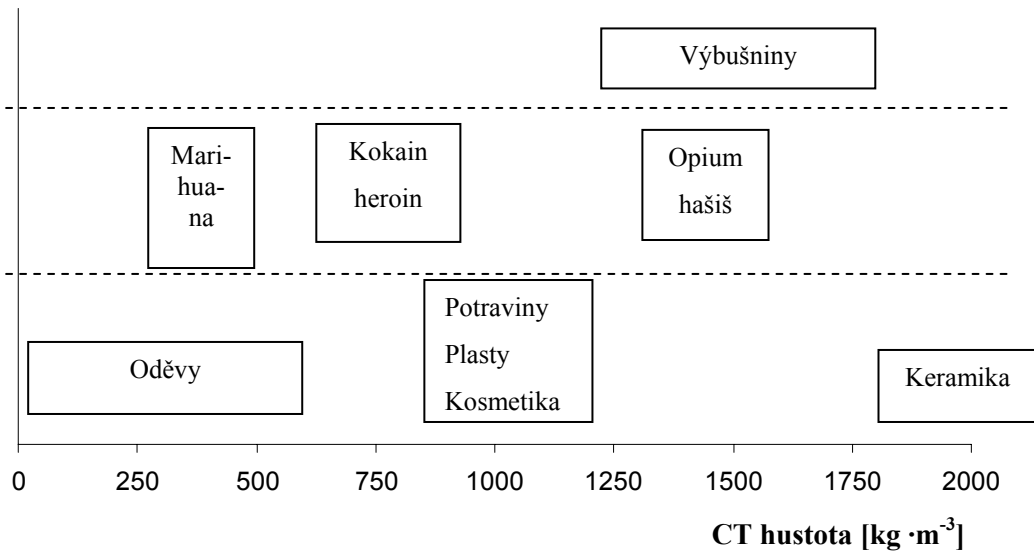
Obr. 32. Blokové schéma principu metody počítačové tomografie

4.1.4.1 Rentgenový systém

Rentgenový systém je tvořen inspekčním tunelem, ve kterém rentgenový zářič rotuje kolem zkoumaného objektu po kruhové ose. Zkoumaný objekt je prozařován úzkým svazkem rentgenového záření pod různými úhly v rozsahu 0 – 360°. Svazek rentgenového záření dopadá na detektor (rotuje společně se zářičem), kde je jeho intenzita převáděna na elektrické signály a vyhodnocována počítačem. Opět se zde využívá absorpčního vzorce

$I = I_0 \cdot e^{-m \cdot d}$. Absorpce rentgenových fotonů v různých látkách je označována jako CT hustota.

CT hustota různých materiálů



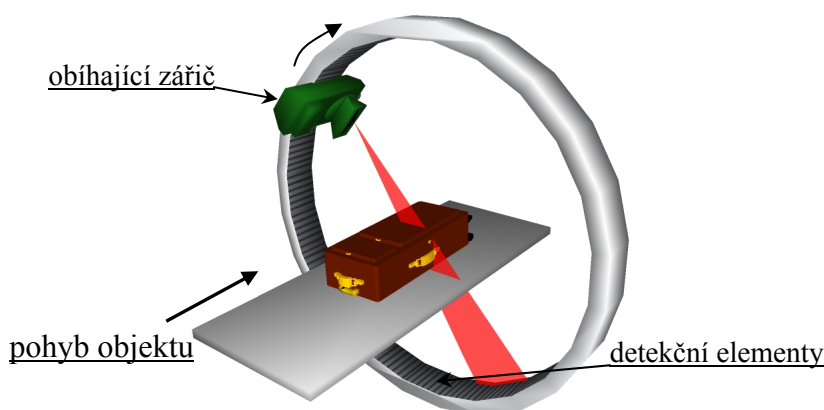
Obr. 33. Graf CT hustot

4.1.4.2 Počítačové zobrazení

Metoda počítačové tomografie umožňuje zobrazit zkoumaný objekt na monitoru ve třídimensionálním zobrazení. Zkoumaný objekt se v inspekčním tunelu pohybuje na dopravníkovém pásu po určitých úsecích. Po určité délce pohybu je objekt zastaven a je provedeno jeho skenování. Počítač zpracovává rentgenové snímky prozařováním ze všech úhlů a metodou zpětné projekce zrekonstruuje tzv. obraz absorpční mapy. Ten pak tvoří výsledný průřez zkoumaným materiálem. Průřez je pokryt maticí objemových bodů nebo-li voxelů, na základě kterých počítač pomocí integrálních rovnic vypočítá míru absorpce rentgenového záření v každém definovaném bodě zkoumaného objektu. Odtud je každému materiálu přiřazen určitý stupeň CT hustoty. Bezpečnostní CT rentgeny mají hodnoty CT hustot pro tzv. zájmové látky (výbušniny, kovy, drogy atd.) uloženy v paměti. Pokud tedy zkoumané zavazadlo obsahuje látku odpovídající velikosti CT hustoty uložené v paměti počítače, je tato látka vyhodnocena jako podezřelá.

4.1.4.3 Spirální metoda CT

Dnešní bezpečnostní CT rentgeny využívají metodu spirální počítačové tomografie. Tato metoda je odlišná od původní metody tím, že kolem zkoumaného objektu krouží pouze rentgenový zářič a detektor rentgenového záření je stacionární. Detektor je tvořen velkým počtem detekčních elementů uspořádaných do kruhu kolem zkoumaného zavazadla. Výhodou spirální metody je její rychlost, kdy doba snímání jednoho řezu nepřesáhne 1 sekundu. Zkoumaný objekt se totiž pohybuje po dopravníkovém pásu malou konstantní rychlostí a nezastavuje, přičemž rentgenový zářič obíhá kolem jeho osy pohybu a detekční elementy snímají současně několik tenkých vrstev řezů vedle sebe. Analogií může být případ, kdy se zkoumané zavazadlo nepohybuje a v ose zavazadla se naopak pohybuje po spirále rentgenový zářič. Rentgenové záření musí být opět zeslabeno na velice tenký paprsek podobně jako u metody zpětného rozptylu. Comptonův rozptyl by totiž způsoboval zašumění snímačů detekčních elementů.

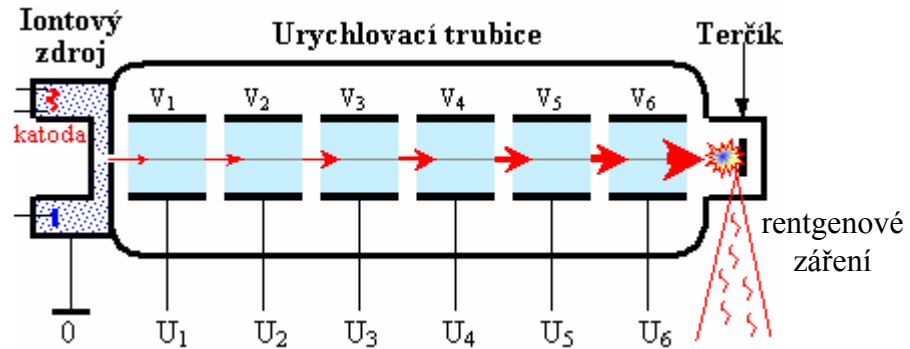


Obr. 34. Náčrt spirální metody CT

4.1.5 Metoda vysoké energie

Metoda vysoké energie zahrnuje rentgenové záření o energiích pohybujících se nad 1 MeV. Takto vysoké energie jsou navrhovány pro vysokou penetraci ocelí až do hloubky 500 mm. Jako zdroje rentgenového záření jsou využity lineární urychlovače částic, protože je třeba dopadající elektrony na anodu urychlit na mnohem vyšší rychlost, než je tomu u rentgenových trubíc. V lineárním urychlovači jsou elektrony urychlovány pomocí elektrického pole po přímkové dráze v urychlovací trubici. Trubice je tvořena několika válcovými elektrodami $V_1 - V_6$ seřazenými v jedné ose. Na tyto elektrody je přiváděno postupně se zvyšující napětí $U_1 - U_6$. Z iontového zdroje, jenž je tvořen žhavenou katodou

jsou emitovány elektrony. Ty jsou pak ve svém pohybu urychlovány na vyšší a vyšší kinetickou energii. Při dopadu na terčik je vyzářeno množství brzdného rentgenového záření.[15]



Obr. 35. Schéma lineárního urychlovače částic

Kinetickou energii elektronů lze vypočítat ze vztahu:

$$E_K = q \cdot (U_1 + U_2 + U_3 \dots) [eV] \quad (10)$$

E_k – kinetická energie elektronů

q – náboj elektronu

U – napětí na válci

4.1.6 Metoda neutronové analýzy

Neutronová analýza určuje kvalitativní a kvantitativní zastoupení vybrané látky ve zkoumaném objektu. Představuje identifikační techniku pro přímé odhalení makroskopických stop explozivního materiálu. Metoda neutronové analýzy pracuje s neutronovým a gama zářením. I když by bylo možné namítat, že tato metoda do oblasti bezpečnostních rentgenů nepatří, bývá do nich často implementována pro zesílení bezpečnostní detekce.

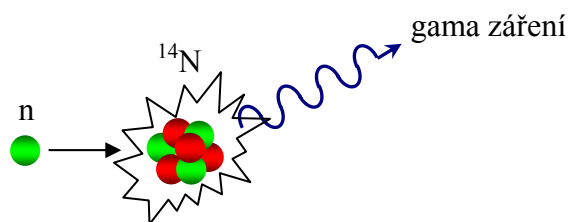
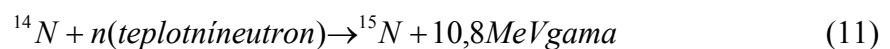
Základem metody neutronové analýzy je zdroj neutronového záření a detektory gama záření. Neutronové záření lze chápat jako proud neutronů šířících se od zdroje ke zkoumanému objektu s různými energiemi. Neutronové záření je řazeno mezi záření nepřímě ionizující, protože neutronové částice nenesou žádný elektrický náboj a po vstupu do látky reagují výhradně s jádry atomů.

Metodu neutronové analýzy rozdělujeme do tří kategorií:

- tepelná neutronová analýza
- rychlá neutronová analýza
- pulsní rychlá neutronová analýza

4.1.6.1 Tepelná neutronová analýza

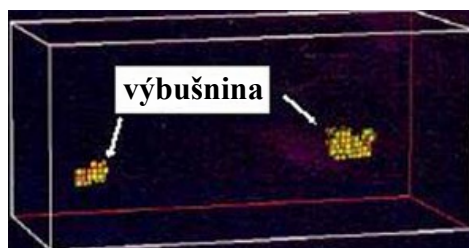
Tepelná neutronová analýza (Thermal Neutron Analysis – TNA) pracuje na principu ozařování zkoumaného objektu neutronovým zářením o velmi nízké energii. Při ozařování se využívá speciální interakce neutronů s jednotlivými chemickými prvky materiálů, které jsou ve zkoumaném objektu obsaženy. Tuto interakci nazýváme radiační záchyt. Při radiačním záchytu je letící neutron pohlcen jádrem atomu, přičemž vlivem vnitřní nestability jádra dochází k vyzáření jednoho nebo více fotonů záření gama. Energie vyprodukovaného gama záření závisí na typu chemického prvku. V praxi se pro TNA používá chemický prvek dusík. Je to z toho důvodu, že dusík je většinou zastoupen alespoň z jedné čtvrtiny ve všech výbušných látkách. Atomové jádro dusíku tedy pohltí nízkooenergetický neutron, dojde ke zvýšení jeho relativní hmotnosti přičemž je následně emitováno záření gama o energii 10.8 MeV. Tento děj můžeme vyjádřit následující rovnicí:



Obr. 36. Radiační záchyt neutronu

Emitované záření gama je registrováno detektory, jejichž detekční elementy spadají do příslušného energetického spektra. Pro dusík je to energie 10.8 MeV. Ostatní energie záření jsou vyfiltrovány. Pokud tedy detektor zaregistruje určité (systémem stanovené)

množství gama záření o energii 10.8 MeV, dojde k vyvolání poplachu, protože zkoumaný objekt obsahuje látku s vysokou koncentrací dusíku, která by mohla představovat potenciální výbušninu. Signály z detektoru jsou dále počítačově zpracovávány a příslušný software poskytuje obraz objektu s dusíkovým obsahem.



*Obr. 37. Výsledný obraz
neutronové analýzy*

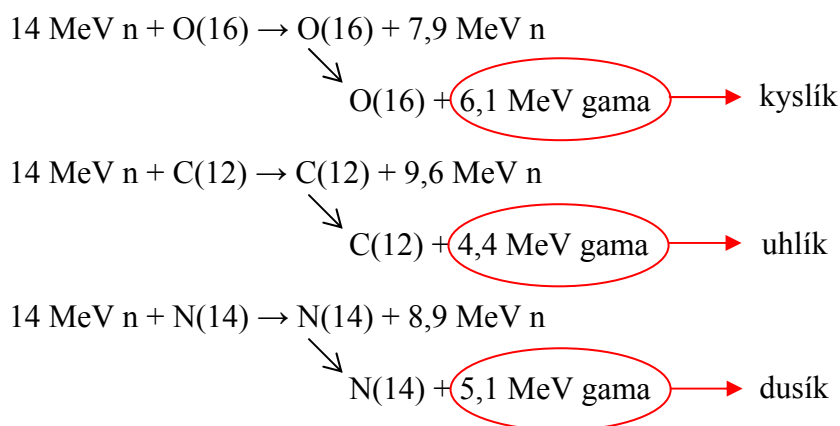
Jako zdroje neutronového záření se využívá radioizotopového umělého prvku California s označením ^{252}Cf . Californium se samovolně štěpí, přičemž uvolňuje neutrony o různých energiích. Průměrná energie neutronů je 2 MeV. Pro radiační záchyt je ale potřeba energii neutronů snížit na malou hodnotu, aby mohly vykonat interakci s dusíkem. Jako efektivní energie se jeví 0,025 eV. Této energie se dosahuje pomocí termalizace. Při termalizaci je mezi zdroj neutronového záření a zkoumaný objekt vložen moderátor, který je tvořen materiálem s vysokým obsahem vodíku. Neutrony procházejí moderátorem a jejich kinetická energie je snižována do té doby, dokud není v tepelné rovnováze s okolím.[3]

Výhodou teplotní neutronové analýzy je, že energie neutronů není tolik vysoká, a proto nemusí být kladeny vysoké nároky na stínění. Jako stínících prvků se využívá kadmia a bóru.

4.1.6.2 Rychlá neutronová analýza

Rychlá neutronová analýza (Fast Neutron Analysis – FNA) umožňuje na rozdíl od tepelné identifikovat ve zkoumaném objektu více chemických prvků. Tyto prvky tvoří uhlík, kyslík a dusík. Opět se jedná o chemické prvky, které jsou zastoupeny ve výbušninách, drogách nebo jiných nebezpečných látkách. FNA umožňuje přesnější stanovení nebezpečného předmětu uvnitř zkoumaného objektu, což více eliminuje plané popluchy.

Zkoumaný objekt je bombardován rychlými neutrony o vysoké kinetické energii, které mají schopnost více pronikat materiály vyšších hustot. Jako zdroje neutronového záření je využito urychlovačů, kdy jsou pomocí silného elektrického pole urychlovány ionty deuteronu bombardujícího těžká jádra vodíku tricia. Při těchto reakcích vzniká neutronové záření o energii 14 MeV. Při průchodu neutronů látkou dochází k jejich nepružnému rozptylu. Neutrony předají část své kinetické energie atomům, která se spotřebuje na zvýšení energie uvnitř jejich jádra. Při vrácení jádra do původního stavu je přebytečná energie vyzářena ve formě fotonů gama záření. Energie fotonů gama je pro každý prvek různá. Hodnoty těchto energií popisují následující rovnice.[3]



Obr. 38. Schéma rovnic

Bude-li zkoumaný objekt obsahovat materiál, který bude současně tvořen určitým množstvím kyslíku, uhlíku a dusíku, dojde k vyvolání poplachu. Detektory opět snímají fotony gama záření spadající do vyhrazených energetických úrovní (6,1 MeV; 4,4 MeV; 5,1MeV).

Nevýhodou FNA jsou požadavky na stínění. Rychlé neutrony musí být nejprve zpomaleny moderátorem a po té zachyceny stínícími prvky. Další nevýhodou je příliš vysoká cena urychlovače.

4.1.6.3 Pulsní rychlá neutronová analýza

Pulsní rychlá neutronová analýza (Pulsed Fast Neutron Analysis – PFNA) je svým principem činnosti podobná rychlé analýze jen s tím rozdílem, že zdroj neutronového záření (lineární urychlovač) pracuje v impulsním režimu. Zdroj emituje neutronové záření

do úzkého svazku v nanosekundových impulsech. Z tohoto důvodu jsou vyžadovány velice citlivé gama detektory s rychlou odezvou a výkonové počítače pro rychlé zpracovávání výsledného obrazu.

4.2 Dělení z hlediska automatické detekce

Z hlediska automatické detekce můžeme bezpečnostní rentgeny rozdělit podle toho, zda je rentgen při skenování zkoumaného objektu ovládán operátorem, nebo nikoliv.

4.2.1 Rentgeny s automatizovanou detekcí

Rentgeny s automatizovanou detekcí představují konvenční bezpečnostní rentgeny. U nich operátor ovládá celý průběh skenování zkoumaného objektu a vyhodnocuje potenciálně nebezpečné předměty.

4.2.2 Rentgeny s automatickou detekcí

U rentgenů s automatickou detekcí operátor vykonává jen nezbytně důležité úkony (uvedení rentgenu do provozu). Rentgeny s automatickou detekcí již využívají specifické softwarové vybavení pro automatickou detekci nežádoucích předmětů. Počítačové programy používají pokročilé a náročnější algoritmy pro určování výbušnin, chladných zbraní nebo drog. Rentgeny s automatickou detekcí jsou výhradně pásové a využívají technologie metody duální energie s více druhovým rozlišením nebo metody počítačové tomografie. V případě CT rentgenu zkoumané zavazadlo vjíždí po pásu do inspekčního tunelu. Zde je pořízen rentgenový obraz z několika směrů kolem dokola zkoumaného objektu. Z rentgenových detektorů je počítačem zanalyzován výstupní signál podle něhož je sestaveno několik snímků příčných řezů objektu. Snímky jsou seskládány vedle sebe a vytvářejí tak celkový obraz zkoumaného objektu. Obraz je pokryt maticí objemových bodů – voxelů na jejichž základě je vyhodnocena CT hustota každé výrazné položky. Počítač sleduje, zda-li některá položka nespadá do zájmové oblasti CT hustot. Pokud ano, vyhodnotí její množství a při překročení limitní hranice vyhlásí poplach informující operátora.[3]

4.3 Dělení z hlediska účelu použití

V následující kapitole je provedeno podrobnější roztrídění základního rozdělení bezpečnostních rentgenů. V základu bezpečnostní rentgeny dělíme na:

- rentgeny pro zavazadla
- rentgeny pro osoby
- rentgeny pro dopravní prostředky a jejich náklad
- mobilní rentgeny

4.3.1 Rentgeny pro zavazadla

Rentgeny pro zavazadla tvoří v praxi asi nejpočetnější část. K tomuto faktu přispívá zejména jejich oblíbenost mezi uživateli z hlediska nízké pořizovací ceny (i když i ta je okolo desítek až stovek tisíc). Na trhu existuje velká řada těchto rentgenů a způsob jejich využívání bude mít pro uživatele často rozdílný význam. Někteří uživatelé budou vyžadovat rentgen pouze pro dopisní balíčky, papírové dokumenty, nebo drobné předměty, zatímco jiní uživatelé budou od bezpečnostního rentgenu vyžadovat rozměrné inspekční tunely pro kontrolu příručních zavazadel, kufrů, beden a palet. Proto obecnou skupinu rentgenů pro zavazadla můžeme ještě rozdělit do několika podkategorií:

- rentgeny pro drobná zavazadla
- rentgeny pro příruční zavazadla
- rentgeny pro kontrolu rozměrných zavazadel
- rentgeny pro kontrolu zapsaných zavazadel

Základní parametry rentgenů

Každý rentgen disponuje základními parametry pomocí nichž by se měl každý, kdo uvažuje o nákupu bezpečnostního rentgenu, snadněji orientovat v jeho různých typech.

Parametry bezpečnostního rentgenu pro zavazadla:

1) Celkové rozměry bezpečnostního rentgenu

- určuje maximální velikost konstrukce bezpečnostního rentgenu

2) Velikost inspekčního tunelu

- jeho velikost závisí na velikosti zkoumaného zavazadla

3) Způsob skenování zavazadla

- trendem je stále více přecházet na rentgeny s pásovým dopravníkem se zpětným chodem

4) Zatížení zavazadly

- maximální váha zavazadla

5) Technologie

- využití jedné nebo více metod rentgenového záření

6) Napájecí napětí

- připojení bezpečnostní rentgeny k síti – dimenzovaný přívod 230V AC/ 50 Hz plus záložní zdroj

7) Rentgenový zářič

- počet rentgenových zářičů

- udává velikost anodového napětí, proud zářičem, penetraci ocelí

- orientace rentgenového paprsku – vertikální, horizontální

8) Detektor rentgenového záření

- udává rozlišení, kontrast a rozlišení rentgenového snímku

9) Počítač

- jeho výkon má vliv na rychlost a kvalitu detekce

10) Softwarové vybavení

- programové vybavení počítače – funkce pro rozšířené práce s rentgenovým obrazem a jeho archivaci

11) Dávkový ekvivalent

- udává maximální hodnotu příkonu dávkového ekvivalentu zkoumanému zavazadlu, řadíme sem i bezpečnou odolnost filmů (ISO 1600)

4.3.1.1 Rentgeny pro kontrolu drobných zavazadel

Jedná se většinou o kompaktní a snadno přemístitelné pásové bezpečnostní rentgeny. Slouží k prověřování malých předmětů, poštovních zásilek, balíčků, batohů, dámských kabelek, cestovních tašek a příručních zavazadel malých rozměrů. Jednotlivá rentgenová zařízení se pohybují v rozměrech od 1 m na výšku a 1,2 m na šířku a většinou nepřesáhnou v obou parametrech 2 metry. Jak je patrné z obrázku, rentgeny pro kontrolu drobných zavazadel mají velikost inspekčního tunelu pro zavazadla zpravidla obdélníkového tvaru. Rentgeny jsou koncipovány a navrženy pro časté přesuny tak, aby se vešly i do úzkých dveří pro provádění vstupních kontrol. K tomuto účelu slouží dopravník, na kterém je celé rentgenové zařízení posazeno. Dopravník zároveň funguje jako uzamykatelný skladovací prostor, například pro monitor. Rentgeny pro kontrolu drobných zavazadel pracují často na technologii metody jedné a duální energie.



*Obr. 39 Pásový rentgen
pro kontrolu drobných
zavazadel*

4.3.1.2 Rentgeny pro kontrolu příručních zavazadel

Rentgeny se využívají především pro kontrolu kabinových zavazadel na letištích. Často jsou používány i pro kontrolu zavazadel při vstupech do vládních budov, soudů a různých přísně střežených objektů. Oproti rentgenům pro kontrolu drobných zavazadel poskytují větší velikost inspekčního tunelu. Převážně využívají technologie metody duální energie,

často v kombinaci s metodou zpětného rozptylu. Na rozdíl od předchozích rentgenů představují vyšší stupeň bezpečnosti odkud se také odvíjí jejich vyšší cena.



Obr. 40. Pásový rentgen pro kontrolu příručních zavazadel

Inspekční tunel má obdélníkový nebo čtvercový tvar o velikosti až 1x1 m.

4.3.1.3 Rentgeny pro kontrolu rozměrných zavazadel

Tyto rentgeny se používají všude tam, kde dochází k pohybu objemných balíků nebo zavazadel a kde je nutné provádět jejich důslednou kontrolu. Do této oblasti můžeme především řadit rozměrné zásilky pro kamionovou či vlakovou přepravu a různé palety, velké balíky dopravované do věznic nebo velké zásilky převážené přes hranice. Stejně jako rentgeny pro kontrolu příručních zavazadel pracují s technologií duální energie a zpětného rozptylu. Ojediněle využívají i metody tepelné neutronové analýzy.



Obr. 41. Rentgen pro kontrolu rozměrných zavazadel

Rentgenem je možno kontrolovat zásilky nebo palety až o hmotnosti 3000 kg. K těmto úkonům je také přizpůsoben nízký dopravník pro snazší a jednodušší manipulaci při vkládání a vykládání zásilek a nákladů. Velikost inspekčního tunelu se pohybuje od 1 až do 2,5 m.

4.3.1.4 Rentgeny pro kontrolu zapsaných zavazadel

Tyto rentgeny slouží pro kontrolu zapsaných zavazadel a představují velmi vysokou úroveň bezpečnostní detekce. Zapsaná zavazadla tvoří většinou dobře uzamčené kufry a jiná pevně uzavíratelná zavazadla, která jsou převážena v nákladovém prostoru letadla. Zavazadla, která se mají přepravovat jako zapsaná, se registrují a odevzdávají na odbavovací přepážce, kde je cestujícímu vydán zavazadlový lístek za každý jeden kus zapsaného zavazadla. Po té je zavazadlo zkontrolováno bezpečnostním rentgenem. Rentgeny jsou zabudovány v soustavě pásových dopravníků po kterých putují zapsaná zavazadla. Požadavky na bezpečnostní rentgeny stanovuje letecký předpis L17. Podle něj se kontrola zapsaných zavazadel pomocí bezpečnostních rentgenů dělí nejméně na dvě úrovně. První úroveň zajišťuje pásový rentgen s automatickou detekcí. Pokud tento rentgen vyhodnotí prozkoumané zavazadlo jako nebezpečné, zavazadlo putuje po soustavě dopravníkových pásů k druhému stupni kontroly. Druhý stupeň již tvoří konvenční rentgen, na kterém operátor podrobněji prohlídne zavazadlo a vzájemně porovnává rentgenové snímky z automatického a konvenčního rentgenu. Pokud operátor stanoví, že zavazadlo obsahuje podezřelý předmět, putuje k fyzické prohlídce za přítomnosti jeho majitele.

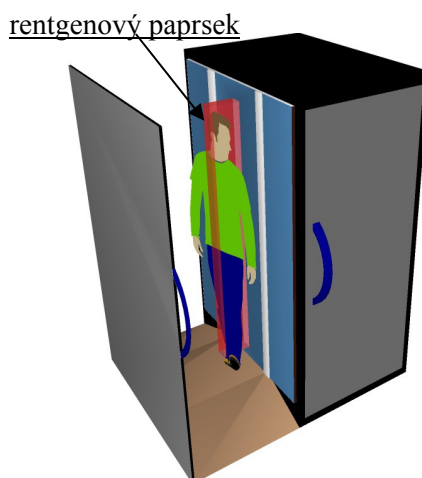


Obr. 42. Rentgen pro kontrolu zapsaných zavazadel

4.4 Rentgeny pro osoby

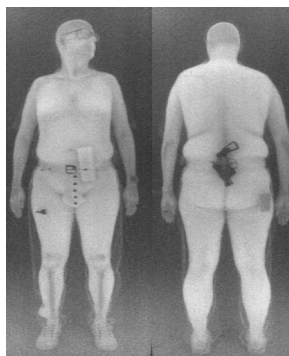
Používání bezpečnostních rentgenů pro kontrolu osob je stále diskutabilním tématem, které má své výhody a nevýhody.

Rentgeny pro kontrolu osob jsou navrženy tak, aby mohly identifikovat nebezpečné „skryté“ předměty pod svrchním oděvem osob při minimálním ozáření. Rentgeny pracují na technologii zpětného rozptylu.



Obr. 43. Rentgen pro kontrolu osob

Rentgenový paprsek o velmi nízké energii je umístěn v kolimátoru, který se pohybuje ve vertikálním a horizontálním směru. Osoba je skenována zepředu i zezadu. Rentgenový paprsek projíždí lidským tělem jen do hloubky několika málo milimetrů a ve výsledku počítač poskytuje rentgenový snímek siluety postavy v reverzním zobrazení s odhalením nebezpečných předmětů. Dávkový ekvivalent při jedné kontrole nepřesáhne hodnotu 0,1 μSv .



*Obr. 44. Rentgenový
obraz naskenované
osoby*

Rentgeny pro kontrolu osob se jeví jako vynikající prostředek pro odhalování nebezpečných předmětů, které má člověk připevněné přímo na těle a které nedokáže odhalit ruční detektor kovů. Zejména půjde o keramické nože, plastické trhaviny nebo výbušniny v tekutém stavu. Personální rentgeny byly poprvé nasazeny na mezinárodních letištích ve Spojených státech a ve Velké Británii. Dlouho však nevydržely a byly z provozu staženy, protože cestující se značně pohoršovali rentgenovými snímky jejich nahých těl, které odhalovaly intimní partie. Dále většinu pasažérů znepokojuje, je-li dávka ozáření, kterou při bezpečnostní kontrole rentgenem podstoupí, bezpečná. Co se týče výsledného zobrazení, výrobci přistoupili k návrhu opatření, jejímž výsledkem bylo zmenšení rozlišení výsledného rentgenového snímku na pouhý obrys siluety postavy a všech předmětů umístěných na lidském těle. Co se týče velikosti dávky ozáření, hodnota dávkového ekvivalentu je prakticky zanedbatelná. Dnes mají cestující na mezinárodních letištích na výběr zda podstoupí osobní fyzické prohlídce, nebo prohlídce pomocí bezpečnostního rentgenu. Většina volí rentgen.

4.5 Rentgeny pro dopravní prostředky a jejich náklad

Bezpečnostní rentgeny pro dopravní prostředky a jejich náklad jsou jedny z největších. Konstrukčně jsou uspořádány tak, aby mohly kontrolovat nejen všechny pozemní dopravní prostředky, ale i menší letadla, vrtulníky nebo části dopravních letadel. Rentgeny se nejvíce používají pro kontrolu kamióňů, nákladních automobilů, dodávek, osobních automobilů, vlaků a jejich nákladních vagónů. Jako hlavní technologii pro odhalování nebezpečného kontrabandu využívají metodu jedné a duální energie, metodu neutronové

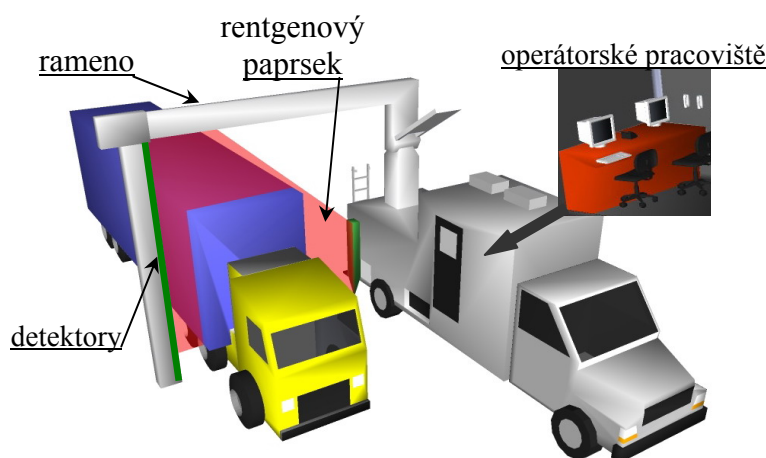
analýzy a metodu vysoké energie pro hlubokou penetraci. Rentgeny jsou často také využívány pro kontrolu deklarovaného a skutečně převáženého zboží.

Rentgenová zařízení pro kontrolu dopravních prostředků můžeme podle potřeby použití rozdělit do tří skupin a to na:

- mobilní rentgenová zařízení
- přemístitelná rentgenová zařízení
- stacionární rentgenová zařízení

4.5.1 Mobilní rentgenová zařízení s rámem

Mobilní rentgenová zařízení se skládají z rentgenového systému nainstalovaného na povrchu nákladního automobilu a z vyhodnocovacího pracoviště umístěného uvnitř automobilu. Rentgenový systém je tvořen výsuvným a otočným ramenem, ve kterém je umístěn rentgenový paprsek. Detektory jsou umístěny na straně vozidla, kterým se kontroluje.



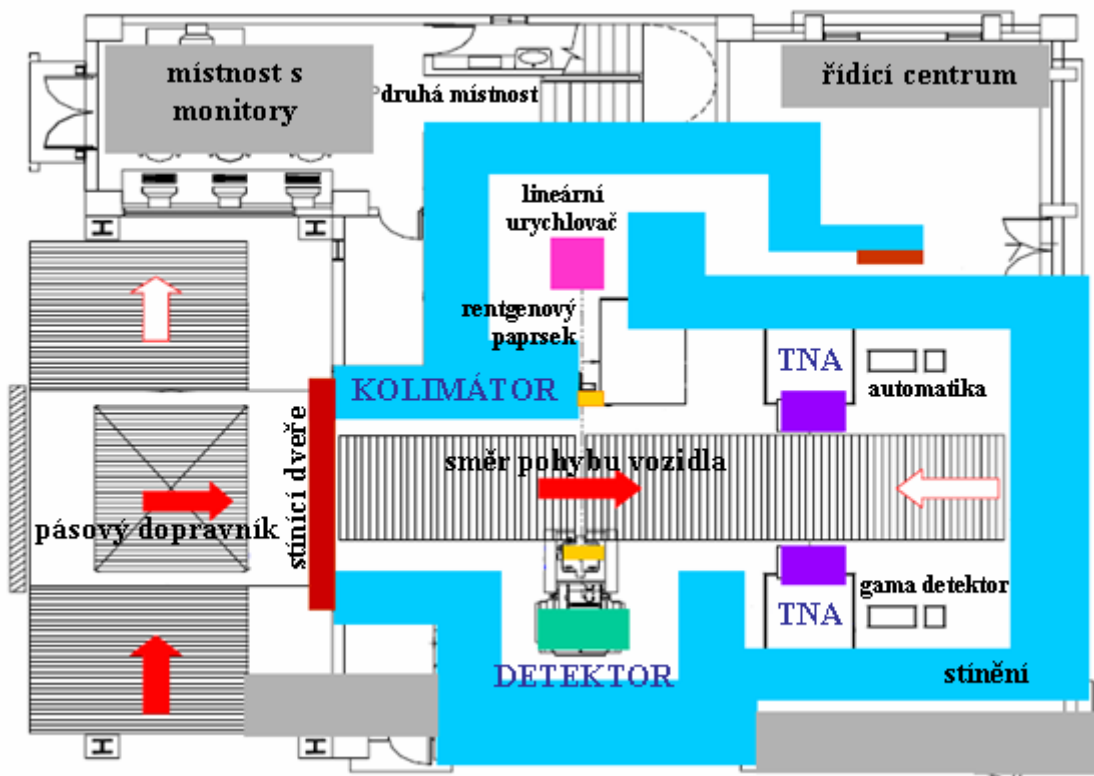
Obr. 45. Mobilní rentgenová zařízení s rámem

Kontrolované vozidlo je postupně skenováno pomalým a konstantním pohybem nákladního automobilu. Operátor se nachází uvnitř rentgenového pracoviště, odkud ovládá celý systém a vyhodnocuje rentgenové snímky. Celé zařízení pracuje s rentgenovým zářením ve volném prostoru a není nijak stíněno. Při provozu musí být proto dodrženy všechna bezpečnostní opatření včetně vyklizení a dodržení dostatečné vzdálenosti v rámci bezpečnostní zóny. Bezpečnostní zóna vymezuje prostor, za který již rentgenové záření neproniká. V případě využití rentgenových zářičů o vysokých energiích musí operátoři

používat osobní dozimetry. Výhodou mobilních rentgenových zařízení s rámem je jejich snadná a rychlá přemístitelnost na jakoukoliv vzdálenost.

4.5.2 Stacionární rentgenová zařízení

Stacionární rentgenová zařízení představují komplexní rentgenový systém instalovaný do nově postavených nebo již existujících budov. Budovy mohou obsahovat několik rentgenových systémů pracujících na odlišných technologických metodách nebo na různých úrovních bezpečnostní detekce. Dopravní vozidla putují do inspekčního tunelu po dopravníkovém pásu. Vozidlo je kontrolováno v několika úrovních a podle rozhodnutí operátora putuje buď k další kontrole, nebo přímo k výstupu. Protože zde není žádný problém se stíněním, které tvoří celá budova, používá se jako zdrojů rentgenového záření lineárních urychlovačů částic. Ty dodávají záření pro vysokou penetraci ocelí až do energií 10 MeV. Stacionární rentgenová zařízení se používají ve velkých přístavech, na velkých vlakových nádražích a velkých průmyslových objektech.



Obr. 46. Půdorys budovy pro kontrolu kamionové dopravy

4.5.3 Přemístitelná rentgenová zařízení

Přemístitelná rentgenová zařízení představují komplexní rentgenové zařízení, které je možné rozebrat na několik částí a dílů, tyto díly naložit na těžká nákladní vozidla a převést je na jiné, vzhledem k náročné přepravě ne příliš vzdálené místo. Přemístitelná rentgenová zařízení se většinou skládají z odděleného operátorského pracoviště a rentgenového systému. Rentgenový systém je tvořen podobně jako u mobilních zařízení rámem pohybujícím se po kolejnici. Jelikož lineární urychlovač částic umožňuje dodávat rentgenové záření o energiích nad 2 MeV, je třeba kolem kontrolního stanoviště postavit stínící zeď.

4.6 Mobilní rentgeny

Jak už z názvu vypovídá mobilní rentgeny jsou určeny pro rychlou, snadno přenosnou detekční kontrolu. Mobilní rentgeny rozdělujeme na přenosné a transportní.

4.6.1 Přenosné rentgeny

Tyto rentgeny jsou velice kompaktní a vynikají svými malými rozměry. Uplatnění najdou zejména v terénu pro rychlou identifikaci hrozeb v podobě poštovních obálek, malých zásilek nebo různých volně ležících neidentifikovatelných předmětů. Přenosné rentgeny jsou lehké a uzpůsobené pro ruční přenášení. Jejich velikost se pohybuje v desítkách centimetrů.

4.6.2 Transportní rentgeny

Mobilní transportní rentgeny poskytují plné rentgenové pracoviště včetně inspekčního tunelu umístěné uvnitř dodávkového automobilu. Jedná se o klasické pásové rentgeny pro zavazadla pracující na metodě duální energie. Velikost zkoumaného objektu závisí na velikosti inspekčního tunelu, kterým projíždí zkoumaný objekt skrz dodávku.



Obr. 47. Mobilní transportní rentgen

Parametry bezpečnostních rentgenů jsou pouze orientační. Každý výrobce vyrábí rentgeny v různých modifikacích a tak se může stát, že například bezpečnostní rentgen pro kontrolu rozměrných zásilek bude využívat rentgenový zářič o vysokých rentgenových energiích, pro větší penetraci ocelí.

5 SOUČASNÉ TRENDY BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ

Trendem v oblasti bezpečnostních rentgenů je snaha o stále větší minituarizaci a propustnost rentgenových systémů. Stále zvyšovaný tlak na bezpečností detekci vede k vzájemnému prolínání a vývoji automatických a automatizovaných rentgenových systémů. Dnes jsou proto dodávány na trh bezpečnostní rentgeny pracující na více technologických metodách činnosti. Světovým trendem je snaha výrobců posunovat hranici bezpečnostní detekce s pomocí bezpečnostních rentgenů stále na vyšší úroveň. Mezi hlavní trendy v oblasti bezpečnostních rentgenů patří:

- zlepšování automatické detekce
- různé nestandardní modifikace rentgenů
- snižování energií rentgenového záření pro bezpečnostní detekci
- rychlost zpracování rentgenového snímku
- zlepšování kvality rozlišení rentgenového snímku
- zmenšování rozměrů rentgenů
- bezdrátová komunikace s možností dálkového ovládání a servisu
- softwarové produkty omezující chybu lidského faktoru

5.1 Automatická detekce

Automatická detekce je u bezpečnostních rentgenů jedním z prvořadých cílů pro odhalování výbušnin. V letištních kontrolách jsou dokonce požadavky na automatickou detekci stanoveny v leteckých předpisech a jsou klasifikovány jako zařízení pro detekci výbušnin a výbušného zařízení. Zařízení pro detekci výbušnin je označováno zkratkou EDS (Explosiv Detection System) a je charakterizováno jako bezpečnostní systém pracující na více technologických metodách rentgenového záření, jehož úkolem je signalizovat přítomnost výbušniny uvnitř zkoumaného objektu. Zkratka EDDS má stejný význam, jen s tím rozdílem, že místo výbušniny jako látky chemického složení, musí bezpečnostní rentgen s automatickou detekcí odhalit nástražné výbušné zařízení nebo alespoň jeho část. Hlavní předpoklad pro zvyšování kvality automatické detekce je v kombinaci více druhů technologií. Jako nejeфекtivnější se jeví kombinace metody duální energie s více druhovým rozlišením a s metodou zpětného rozptylu. Nutností je instalace

pěti až osmi rentgenových zářičů v různých směrech na pohybu zkoumaného objektu. Limitujícím faktorem ovšem zůstává rychlost bezpečnostní detekce. Proto je důležité pro automatickou detekci volit ty nejlepší prvky. Rentgenový detektor by měl mít co nejmenší časovou odezvu a co největší rozlišovací schopnost. Trendem u rentgenových detektorů je stále více zvyšovat počet fotodiod pro vysoký kontrast rentgenového snímku. U počítačů je nutné neustále zvyšovat výkonovou hranici, aby časová prodleva od aktivace rentgenového zářiče až po zobrazení rentgenového snímku na monitoru byla co nejmenší. Jako zesilujícím prvkem lze automatickou detekci doplnit metodou neutronové analýzy. Dalším způsobem zajištění automatické detekce jsou bezpečnostní CT rentgeny. U nich je třeba klást důraz na snižování časů pro stanovení jednoho nebo více řezů zkoumaným objektem. CT rentgeny jsou totiž pro zdlouhavou detekční kontrolu často zatracovány.

5.2 Nestandardní bezpečnostní rentgeny

Jako standardní bezpečnostní rentgeny lze označovat všechny typy rentgenů, které byly popsány v předchozí kapitole. Jsou to rentgeny na zavazadla, osoby, dopravní prostředky a rentgeny mobilní. Při výrobě těchto bezpečnostních rentgenů výrobci často experimentují a zkoušejí jejich různé úpravy a modifikace. Výsledkem jsou pak nové, částečně automatické nestandardní rentgenové přístroje a stroje. Revolučním trendem poslední doby je bezkonkurenční mobilní rentgenový dodávkový systém. Tento rentgen byl vyvinut společností *AS&E* a nese označení *ZBV* (*Z* Backscatter Van Drive-By Screening System). *ZBV* slouží k jakékoliv detekční kontrole v jakémkoliv místě. Nejčastěji se však užívá pro kontrolu dopravních prostředků. Celý rentgenový systém je zabudován do komerčně využívané dodávky. Rentgenový zářič včetně rentgenového detektoru se umísťuje do nákladního prostoru a operátorské prostředí je stanoveno v kabině řidiče a na místě spolujezdce. Celý rentgen pracuje na technologii zpětného rozptylu a navíc obsahuje speciální detektory pro odhalení radioaktivních materiálů. Tyto detektory snímají neutrony, které se štěpí při jaderných reakcích u radioaktivních látek. Kabina dodávky je vybavena dvěma vestavěnými monitory, na nichž operátor vyhodnocuje rentgenové snímky. *ZBV* může pracovat ve stacionárním a pohyblivém režimu. Ve stacionární režimu je *ZBV* zaparkován na jednom místě a zkoumané objekty (vozidla) projíždějí kolem v úrovni detekčního pole rentgenového záření. Operátor může být přítomen v kabině vozidla, která je dokonale odstíněna nebo může celý systém ovládat z jiného místa. V pohyblivém režimu je naopak v pohybu *ZBV* a skenuje všechny předměty v dosahu

rentgenového paprsku. Protože rentgenový systém využívá metody zpětného rozptylu, dávkový ekvivalent rentgenového záření je zanedbatelný. ZBV může sloužit jako dokonalý prostředek k prohlížení zaparkovaných vozidel na ulicích nebo na střeženém pozemku.[20]



Obr. 48. Způsob kontroly ZBV

5.3 Moderní přenosné rentgeny

Mezi další trendy bezpečnostních rentgenů patří zmenšování jejich velikosti a objemu. Policie, pyrotechnici nebo pracovníci soukromých bezpečnostních služeb vyžadují malé, rychlé, flexibilní rentgenové systémy, které by dokázaly pracovat ihned po připojení k energii a zpracovávaly rentgenové snímky v reálném čase. Pyrotechnici zase vyžadují pro průzkum potenciálně nebezpečných výbušnin aby rentgenový přístroj mohl být ovládán v případě nebezpečí z větších vzdáleností. Všechny tyto požadavky splňují moderní terénní přenosné rentgeny. Terénní přenosné bezpečnostní rentgeny jsou tvořeny třemi základní prvky – rentgenovým zářičem, snímacím boxem a přenosným počítačem (notebookem).

5.3.1 Rentgenový zářič

Rentgenový zářič pracuje v impulsním režimu. Vzhledem k tomu, že skenování zkoumaného objektu probíhá ve volném prostranství, délka jednoho impulsu rentgenového záření nepřesáhne 60ns. I přesto je však nutno při aktivaci zářiče dodržovat bezpečnostní zónu. Zářič je schopen poskytnout 25 impulsů za sekundu. Jako zdroje elektrického napětí používá 14V akumulátor, který transformuje napětí v jednotlivých impulsech na hodnoty v rozmezích 120 až 270kV. Dávkový ekvivalent při jednom rentgenovém impulsu nepřesáhne hodnotu 30 μ Sv.



Obr. 49. Rentgenový zdroj

5.3.2 Snímací box

Snímací box je tvořen speciálními detektory rentgenového záření, mikroprocesorovou jednotkou a systémem pro bezdrátovou komunikaci. Detektor je tvořen převodní fólií a CCD kamerou. Emitované rentgenové záření dopadá na převodní fólii, která ho převádí na světelné spektrum. Toto světlo je poté pomocí soustavy zrcadla a objektivu převedeno do CCD kamery. Kamera ukládá rentgenové snímky po částech do digitální paměti, odkud jsou zpracovávány mikroprocesorovou jednotkou a posílány pomocí bezdrátového systému na počítač. Převodní fólie je tvořena z fosforových částic, přičemž kvalita rozlišení rentgenového snímku závisí na jejich velikosti a počtu stejně jako na počtu pixelů CCD kamery. Snímací box používá kameru 1/2" CCD s efektivním rozlišením 752 X 582 a je napájen 6V akumulátorem.

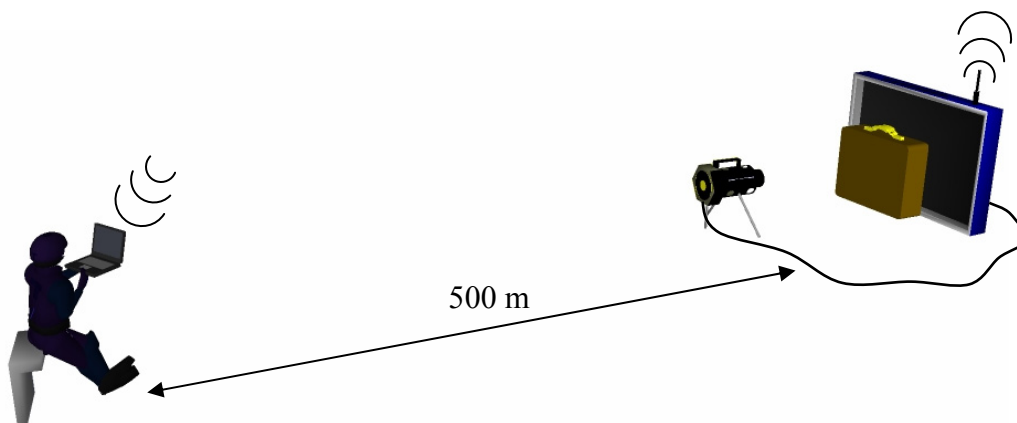


Obr. 50. Snímací box

5.3.3 Přenosný počítač

Úkolem přenosného počítače je bezdrátově komunikovat se snímacím boxem. Pořízené rentgenové snímky jsou na něj přeposílány a operátor má k dispozici standardní funkce pro úpravu rentgenového obrazu – černobílé/ barevné zobrazení, světlost a kontrast obrazu, zoom atd. Kromě toho mikroprocesorová jednotka přenáší pomocí bezdrátové komunikace

další stavové informace celého systému – hodnotu napětí na akumulátorech nebo velikost vyprodukované dávky záření.



Obr. 51. Provádění bezpečnostní detekce pyrotechnikem

Rentgenový zářič ozařuje zkoumané zavazadlo v impulsech. Rentgenové záření dopadá na snímač, odkud je zpracován rentgenový snímek a přeposílán na notebook operátora. Terénní přenosné bezpečnostní rentgeny často využívají metodu duální energie. V tomto případě jsou rozdílné energetické úrovně rentgenového záření zajišťovány zářičem. Ten dodává v každém impulsu rentgenové záření o různých energiích.

5.4 Kontrola činnosti operátorů

Snahou výrobců bezpečnostních rentgenů je stále více posunovat kvalitu bezpečnostní detekce na vyšší úroveň. Je sice pravda, že bezpečnostní rentgeny jsou dnes na úplně jiné úrovni než před 10 lety, ale je třeba připomenout, že každé sebelepší technické zařízení může být k ničemu, pokud u něj selže obsluha – v případě bezpečnostních rentgenů operátor.

Práce operátora je velice jednotvárná, unavující a náročná na udržení stále ostražitosti. Měli operátor každý den prohlédnout stovky zavazadel a předmětů, bere to jako rutinní činnost a často sklouzává do provozní slepoty. Provozní slepota představuje skryté nebezpečí u každého pracovního místa, které zainteresovaná osoba vykonává již delší dobu a toto nebezpečí přehlídí nebo nevnímá. Naopak pro osobu z vnějšího prostředí je toto nebezpečí na první pohled zřejmé. Jak ale zajistit, aby byl operátor stále ve střehu a neskouzával do provozní slepoty, která je pro bezpečnostní kontroly tak riziková? Výrobci stále více přistupují k implementaci speciálních softwarových nastaveb do počítačů

bezpečnostních rentgenů, jenž mají za úkol snižovat vlivy selhání lidského faktoru na výsledek bezpečnostní detekce.

Tyto softwarové produkty spadají do kategorie tréninkových programů pro odhalení skryté hrozby a označují se zkratkou TIP (Threat Image Projection). „Úkolem tréninkového programu je zajistit výuku a kvalifikaci obsluhy bezpečnostního rentgenu. Jedná se o propracovaný systém pro začínající operátory. Tréninkový program učí nejen rozeznávat skupiny materiálů, ale i jednotlivé předměty a především tento tréninkový režim nutí operátory reagovat na nebezpečné předměty, které systém náhodně podsouvá do obrázků zavazadel. Rentgen reaguje jednoduchým systémovým hlášením a poskytuje tak zároveň zpětnou vazbu o výsledcích operátora.“^[2]

Tréninkové programy jsou používány pro školení budoucích operátorů bezpečnostních rentgenů, kdy se vůbec zjišťuje, zda-li je školící osoba pro výkon povolání operátora vhodná, nebo jsou implementovány přímo v terénu pro zajišťování maximální pozornosti operátora. V oblasti letecké bezpečnosti je využívání programů TIP dokonce zavedeno v bezpečnostním předpisu.

5.4.1 Stručný popis funkce programu TIP

Tréninkové softwarové programy jsou stále více využívány bezpečnostními manažery pro stanovení úrovně jednotlivých bezpečnostních operátorů. Na základě výsledků simulujících operací mohou být totiž mezi sebou jednotliví operátoři porovnáváni a také různě platově ohodnoceni. To může působit jako silný motivační faktor s efektivním dopadem na snižování bezpečnostních rizik.

Zjednodušený průběh simulující operace programu TIP:

- 1. fáze – systém má v databázi uloženou širokou škálu různých virtuálních druhů obrázků nebezpečných předmětů. Tyto obrázky jsou z databáze vybírány v náhodných intervalech podle počtu skenovaných objektů (zavazadel).

^[2] PCS [online]. [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <http://www.pcs.cz/rapiscan/produkty-a-sluzby/technologie.ep/>

- 2. fáze – systém pořídí rentgenový snímek zavazadla a uloží ho do databáze. Do rentgenového snímku je přidán obrázek nebezpečného předmětu a systém provádí operace na základě rozhodnutí operátora. Operátorovi je vytýčen určitý časový interval, za který by měl nebezpečný předmět identifikovat.
- 3.fáze – po nalezení a identifikaci nebezpečného předmětu operátorem jej systém upozorní, že šlo o virtuální předmět a veškeré údaje spojené s jeho detekcí uloží do databáze. Tyto údaje obsahují údaje o operátorovi (jméno), čas stanovený na odhalení, čas za který operátor nebezpečný předmět odhalil, údaj zda-li nebezpečný předmět operátor vůbec odhalil, rentgenový snímek reálného zavazadla, virtuální předmět, který byl do obrázku zavazadla vložen

5.5 Prognóza vývoje bezpečnostních rentgenů

Budoucnost bezpečnostních rentgenů patří minituarizaci a nanotechnologiím. V současné době jsou vyvíjeny nové technologie rentgenových zářičů a snímačů využívající pouze metody zpětného rozptylu. Do budoucna se uvažuje o jejich implementaci do robotizovaných strojů, které by byly plně automatizované, nebo jen částečně ovládané člověkem.

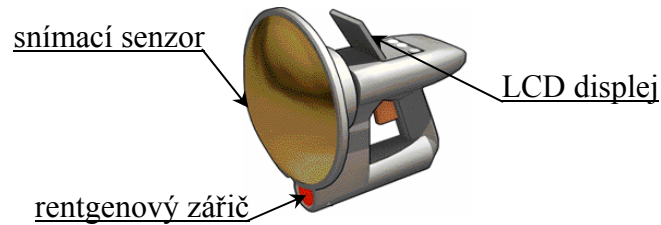
Budoucí požadavky na bezpečnostní rentgeny:

- velikost (co nejmenší)
- flexibilita (okamžitá připravenost použití)
- mobilita (snadná přenosnost)
- vysoká kvalita rentgenového snímku
- minimální čas detekce
- částečná robotizace (dálkové ovládání)
- úplná robotizace

5.5.1 LEXID (Lobster Eye X ray Imagine Device)

Jedná se o prototyp ručního rentgenového přístroje. Skládá se z impulsního rentgenového zářiče, speciální snímací čočky a LCD displeje. Tato čočka je určena pro snímání zpětného rozptylu rentgenového záření a svým tvarem připomíná oko mořského humra. Celý ruční

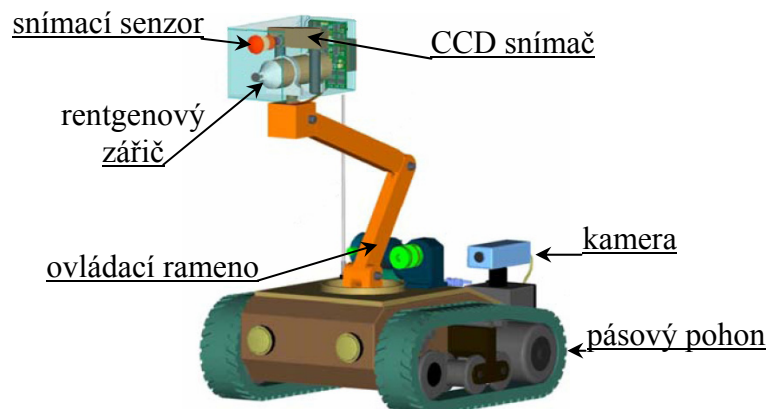
rentgen je napájen akumulátorem. Rentgenový zářič pracuje v oblasti nízkého rentgenového záření, čímž je dávkový ekvivalent zanedbatelný. LEXID představuje dosud nejmenší bezpečnostní rentgen.



Obr.52. LEXID a pracovník kontrolující sklad

5.6 REX (Roadside Explosiv X ray Detection)

Ukázka rentgenového robota pro silniční kontrolu na odhalování výbušnin ve vozidlech. Robot veškeré zjištěné informace (rentgenový snímek, obraz z kamery) posílá na monitor bezpečnostního operátora.



Obr. 53. Rentgenový robot

6 VYUŽÍVÁNÍ BEZPEČNOSTNÍCH RENTGENŮ V ČESKÉ REPUBLICCE

Bezpečnostní rentgeny jsou v České republice méně využívány než ve světě. Je to způsobeno zejména vysokými pořizovacími a provozními náklady každého rentgenového přístroje. Z tohoto důvodu jsou také bezpečnostní rentgeny z větší části využívány u bezpečnostních složek státního sektoru.

6.1 Bezpečnostní rentgeny ve státním sektoru

Bezpečnostní rentgeny jsou stále více chápány jako zásadní podpůrné prostředky v bezpečnostních kontrolách pro odhalování trestné kriminální činnosti na domácí i mezinárodní sféře. Hlavními složkami, které se podílejí na provádění těchto bezpečnostních kontrol jsou letecká bezpečnostní služba, Policie České republiky, Pohraniční policie České republiky, Národní protidrogová centrála, Vojenská policie, vězeňská nebo justiční stráž. Jednu z největších priorit bezpečnostních kontrol v republice, stejně jako na světě, představuje mezinárodní letecká doprava. Pro tu je dnes největší hrozbou mezinárodní terorismus.. Pokud na palubu letadla vstoupí ozbrojený útočník (odhodlaný terorista) a neváhá zbraně použít, vzniká nebezpečná situace v rychlém sledu událostí s nepředpokladatelným vývojem. Ocitne-li se letadlo na letové dráze, prostředky k odrazení možného útoku jsou již minimální. I když je na palubě přítomný ozbrojený bezpečnostní doprovod, stále je letadlo plné civilistů a při sebemenší chybě může dojít ke katastrofě. Proto je velice důležité podnikat dostatečná bezpečnostní protiopatření v nejranější fázi potencionálního útoku. Před vstupem všech osob a zavazadel na palubu letadla jsou tyto podrobeny vstupní bezpečnostní kontrole. Jako účinných prostředků se využívá rentgenů na příruční zavazadla a rentgenů na zapsaná zavazadla.

Ozbrojené státní složky využívají bezpečnostní rentgeny v boji proti nelegálnímu překupnictví drog a zbraní, nelegální imigraci a další trestné činnosti vyplývající z působení organizovaného zločinu na území České republiky i mimo něj. Národní protidrogová centrála společně s Celní správou a Pohraniční policií nasazují bezpečnostní rentgeny na hraničních přechodech, na překladištích, silničních přechodech pro autobusovou a kamionovou přepravu a na celém území České republiky. Jejich hlavním cílem je zajistit pašovaný kontraband. K tomu využívají mobilní rentgeny s rámem na dopravní prostředky a mobilní transportní rentgeny. Těchto rentgenů využívá i Vojenská

policie pro kontrolu materiálu při návratu vojenských kontingentů ze zahraničních misí.[26]

Samostatnou oblast tvoří Justiční a vězeňská stráž, které bezpečnostní rentgeny využívají ke vstupním bezpečnostním kontrolám do chráněných objektů. V případě Justiční stáže jde o vstup do budov soudů, státních zastupitelstev, Ministerstva spravedlnosti a v případě vězeňské stráže o vstup do věznic. Jako standardní prostředky používají bezpečnostní rentgeny pro příruční zavazadla.

6.2 Bezpečnostní rentgeny v soukromém sektoru

V České republice soukromé bezpečnostní služby využívají bezpečnostní rentgeny v takřka minimální míře než je tomu v jiných zahraničních státech. Je to hlavně z důvodu, že veškerá činnost vyžadující kontrolu pomocí bezpečnostních rentgenů spadá pod státní dohled, kdežto v zahraničních státech tuto činnost přebírá soukromý sektor.

6.2.1 Návrh využití bezpečnostních rentgenů v PKB

Bezpečnostní rentgeny lze v soukromých bezpečnostních službách uplatnit k provádění vstupních bezpečnostních kontrol. Ty by si mohl v případě zájmu zákazník za úplatu najímat u soukromých bezpečnostních agentur. Otázkou ovšem zůstává, kdo by byl vlastníkem rentgenového zařízení, protože bezpečnostní rentgeny jsou velice drahou záležitostí a jejich cena pohybuje v rozmezí stovek tisíc až několika stovek miliónů korun za kus. Jsou tu tedy dvě možnosti. První možností je, že zákazník (potencionální zaměstnavatel), který bude u vstupní kontroly bezpečnostní rentgen vyžadovat, bude zároveň i jeho majitelem. Zákazník tedy bezpečnostní rentgen zakoupí a pracovníky soukromé bezpečnostní agentury bude za úplatu najímat jako operátory. Druhou možností je, že vlastníkem bezpečnostního rentgenu bude soukromá bezpečnostní agentura, která ho bude prezentovat formou nabídky detekční vstupní kontroly jako své standardní bezpečnostní služby. Obě možnosti mají své výhody i nevýhody. V prvním případě plynou výhody pro bezpečnostní agenturu, protože získá zakázku aniž by musela pořizovat drahý bezpečnostní rentgen. Značnou nevýhodu má ovšem zákazník, který se bude potýkat s problémem sehnat bezpečnostního pracovníka na pozici operátora. Domácí soukromé bezpečnostní agentury totiž mají jen pramalé zkušenosti s využíváním bezpečnostních rentgenů. Částečně tento problém eliminují prodejci, kteří při prodeji bezpečnostního

rentgenu poskytují zdarma školicí kurz. Ve druhém případě plynou nevýhody naopak pro soukromou bezpečnostní agenturu. Většina zákazníků totiž nebude kontrolu pomocí bezpečnostních rentgenů vyžadovat. Bezpečnostní agentura proto bude muset zvýšit poplatky za svoje služby, které ale nebude chtít zákazník platit a raději se poohlédne po konkurenci. Z těchto dvou příkladů vyplývá, proč se bezpečnostní rentgeny tak málo využívají v průmyslu komerční bezpečnosti. Pro soukromé bezpečnostní agentury se totiž bezpečnostní rentgeny jeví jako neefektivní způsob poskytování služeb na kterém by spíše prodělaly.

Jako efektivnější způsob využívání rentgenů v soukromých bezpečnostních službách se jeví mobilní transportní rentgeny. Výhodou těchto rentgenů je jejich rychlá mobilita pomocí nichž by soukromé agentury mohly provádět detekční kontroly pro více zákazníků třeba i v rámci celého kraje, nebo celé republiky. Protože transportní rentgeny disponují velkými rozměry inspekčního tunelu pro kontroly i větších objektů, dalo by se uvažovat o součinnosti soukromých bezpečnostních služeb s ozbrojenými státními složkami. Ty totiž stále disponují nedostatkem technických prostředků pro potírání kriminality a zločinu. Soukromé agentury by tedy mohli například na základě součinnostních dohod vykonávat služby detekční kontroly pro orgány Policie České republiky.

ZÁVĚR

V této práci byla provedena charakteristika a analýza bezpečnostních rentgenů, které dnes představují v oblasti bezpečnostních kontrol určitý standart. Jsou velice důležitým bezpečnostním prvkem, bez kterého by se neobešel např. provoz mezinárodních letišť. Jejich hlavní úlohou je odhalování skrytých nebezpečných předmětů při rychlých a cílených prohlídkách různých objektů.

V současné době je na trhu k dispozici mnoho typů a variant bezpečnostních rentgenů, přičemž se jejich výrobci snaží posunovat hranici bezpečnostní detekce stále na vyšší úroveň. Trendem ve výrobě je především implementace více technologických principů činností, které rozvíjí úroveň bezpečnostní detekce při zachování maximální propustnosti a snadné ovladatelnosti bezpečnostního rentgenu. I přes to však výrobci stále více upřednostňují technologii zpětného rozptylu, která dokáže odhalit především nekovové materiály při minimálním dávkovém ekvivalentu. Hlavní vývoj bezpečnostních rentgenů spočívá v jejich integraci, kdy jsou rentgeny zařazovány do komplexního bezpečnostního systému, v němž plní funkci bezpečnostního prostředku pro vstupní kontroly. Při nasazování bezpečnostních rentgenů v praxi, jako samostatných prostředků, jsou naopak trendem mobilní bezpečnostní rentgeny. Uživatelé využívají jejich výhody, která spočívá ve snadné ovladatelnosti a mobilní přenosnosti. Výrobci jsou si vědomi, že mobilní rentgeny dnes představují efektivní prostředky pro bezpečnostní kontroly, a proto dodávají na trh jejich různě modifikované úpravy, jako je například mobilní rentgenový dodávkový systém *ZBV*. Další vývoj bezpečnostních rentgenů směřuje do oblasti vojenské techniky. Zde jsou navrhovány rentgenové roboty pro odhalování výbušnin, nástražných výbušných systému, případně radioaktivního materiálu v normálních i extrémních vnějších podmínkách. Hlavní cílem je zajistit plnou automatizaci robota a jeho dálkové ovládání pro zajištění maximální bezpečnosti operátora.

I když na světovém trhu je dostupné mnoho moderní techniky a prostředků v oblasti bezpečnostních rentgenů, které jsou využívány především v Severní Americe, na hranicích zemí Středního Východu a postupně se rozvíjejí i do celé Evropy, v České republice se z ní využívá pouze malé procento. Je to ovlivněno především cenou bezpečnostních rentgenů, která je na naše poměry stále ještě vysoká, dokonce i pro prosperující soukromé bezpečnostní agentury, pro něž se investice do bezpečnostních rentgenů zatím nevyplácí.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

In this bachelor thesis there was carried out the characteristic and the analysis of the security x-ray machines, which today mean a certain standard in the area of security controls. They are a very important security element, for example for the operation of the international airports. Their main role is a detection of the hidden dangerous objects at the quick and targeted inspections of various objects.

Currently there are many kinds and variants of security x-ray machines on the market. Their makers try to shift the border of security detection to the higher level. The implementation of more technology principles of the activities is a trend in the production of x-ray machines. These activities develop the level of security detection and they keep a maximum permeability and an easy manageability of the security x-ray machines. In spite of it the makers prefer the technology of backscatter, which can reveal especially nonmetallic materials with a minimal batch equivalent. The main development of security x-ray machines consists in their integration. Here they are placed to a complex security system, where they fulfill the function of the security means for entrance controls. When using the security x-ray machines as independent means in practice, there is, on the contrary, a trend of using mobile security x-ray machines. The users use their advantages, which consist in the easy manageability and in the mobile portability. The producers are aware, that today the x-ray machines mean the effective means for security controls. That is why, they deliver their differently modified conversions, for example the mobile x-ray van system *ZBV*. Another development of x-ray machines aims in the area of military technology. Here the x-ray robots are proposed for the detection of explosive substance, of explosive planted systems, of or of-radioactive material in the normal and extreme outer conditions. The main aim is to ensure the complete automatization of a robot and his remote control for the securing of a maximum safety of the operator.

Although on the world market there is available a lot of modern technology and means in the area of x-ray machines, which are used mostly in the South America, on the borders of Middle Eastern countries and gradually also in whole Europe, there is used just a little percentage of it in the Czech republic. This is influenced mostly by the price of security x-ray machines, which is for the Czech Republic still very high. Even for the flourishing private security agencies is the investment in the security x-ray machines disadvantageous.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JOHAN, Z., ROTTER, R., SLÁNSKÝ, E. *Analýza látek rentgenovými paprsky*. Praha, SNTL, 1970, 257s., ISBN 04-619-70
- [2] PROCHÁZKOVÁ, D, ŠESTÁK, R. *Bezpečnost a udržitelný rozvoj*. Bezpečnostní teorie a praxe č.1/2006, 15 -27s.
- [3] TUREČEK, J. *Technické prostředky bezpečnostních služeb II – detektory pro bezpečnostní prohlídku osob, zavazadel a zásilek*. Praha, PA ČR, 1998, 97s., ISBN 80-85981-81-5
- [5] VELTMAN, M. *Fakta a záhady ve fyzice elementárních částic*. Academia Středisko společných činností AV ČR, 2007, 285 s. ISBN 978-80-200-1500-6
- [5] KVASNICA, J. *Fyzikální pole*. Praha, SNTL, 1964, 166s. ISBN 04-005-64
- [6] KONIG, H., EARLACHER, P. *Neviditelná hrozba? Elektromagnetická pole kolem nás*. Ostrava, Nakladatelství HEL, 120s. ISBN 80-86167-15-1
- [7] VAŇKOVÁ, M. *Hluk, vibrace a ionizující záření*. Brno, PC-DIR spol s.r.o., 1995, 140s. ISBN 80-214-0695-x
- [8] KUNZ, E. a kol. *Příručka lékaře o ochraně před zářením*. Ministerstvo zdravotnictví ČR, 1990. ISBN 80-85047-00-4
- [9] TUREČEK, J. *Dosavadní průběh výzkumu „Rentgenová detekce výbušnin“*. Bezpečnostní teorie a praxe č.1/2006, 91 – 100s.
- [10] JOHANEDISOVÁ, J. *Příspěvek k analýze vlivu lidského faktoru na úspěšnost hromadných bezpečnostních kontrol prováděných rentgenovými zařízeními*. Bezpečnostní teorie a praxe č.2/2007, 109-119 s.
- [11] *Bezpečnost a prevence* [online].[cit. 2008-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.mvcr.cz/bezpecnost/ozlocin.html>>
- [12] MARTINEK, Jiří. *Digitalizace rentgenového obrazu : Použití v medicíně a defektoskopii* [online].[cit. 2008-04-16]. Dokument ve formátu PDF. Dostupný z WWW:
<http://www.foma.cz/Upload/foma/prilohy/Digitalizace%20rentgenov%C3%A9ho%20obrazu%204.pdf>

- [13] ARBTEROVÁ, Andrea. *Rentgenky a spektrum rentgenového záření* [online]. [cit. 2007-11-15]. Dokument ve formátu PPT. Dostupný z WWW: www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS/rentgenky.ppt
- [14] POHANKA, Pavel. *Generace rentgenového záření* [online]. [cit. 2007-11-14]. Dokument ve formátu PPT. Dostupný z WWW: www.dbme.feec.vutbr.cz/ubmi/courses/MKZS/rtgpp.ppt
- [15] *Astronuklfyzika, Vojtěch Ullmann* [online]. [cit. 2008-03-23]. Dostupný z WWW: <http://astronuklfyzika.cz/>
- [16] *PCS spol. s.r.o. Divize Rapiscan* [online]. [cit. 2008-03-15]. Dostupný z WWW: <http://www.pcs.cz/rapiscan/produkty-a-sluzby/technologie.ep/>
- [17] *ELMES Praha s.r.o.* [online]. [cit. 2008-03-14]. Dostupný z WWW: <http://www.elmes.cz/nabidka.html>
- [18] *Státní ústav radiální ochrany* [online]. [cit. 2007-11-27]. Dostupný z WWW: http://www.suro.cz/cz/index_html
- [19] *Rapiscan Systems* [online]. [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.rapiscan.com/>
- [20] *AS&E* [online]. [cit. 2008-02-12]. Dostupný z WWW: <http://www.as-e.com/>
- [21] *AN AIRPORT CARGO INSPECTION SYSTEM BASED* [online]. [cit. 2008-04-25]. Dostupný z WWW: http://www.itn.pt/ICRS-RPS/oralpdf/Thursday13/Session10_1/Ipe02.pdf
- [22] *Smiths Detection* [online]. [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.smithsdetection.com/eng/>
- [23] *Eudem – Technology* [online]. [cit. 2008-04-15]. Dostupný z WWW: http://www.eudem.vub.ac.be/technologies/technology.asp?tech_id=39
- [24] *Alibaba* [online]. [cit. 2008-04-18]. Dostupný z WWW: http://www.alibaba.com/catalog/10870377/Nago_Stationary_Anode_X_Ray_Tube.html
- [25] *Security Pro USA* [online]. [cit. 2008-04-28]. Dostupný z WWW: <http://www.securityprousa.com/poxrayma.html>

- [26] *BULLETIN 2/2003 Národní protidrogová centrála* [online]. [cit. 2008-04-28]. Dokument ve formátu PDF. Dostupný z WWW: <<http://www.mvcr.cz/policie/npdc/bulletin/2003/0302.pdf>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EZS	Elektrická zabezpečovací signalizace
PIR	Pasivní infračervený detektor (Passiv Infra Red)
CCD	Charge-Coupled Device
CRT	Cathode Ray Tube
LCD	Liquid Crystal Display
OS 2	Operační systém
MS - DOS	Operační systém
FDA	Food and Drug Administration
CT	Počítačová tomografie (Computer Tomography)
TNA	Teplotní neutronová analýza (Thermal Neutron Analysis)
FNA	Rychlá neutronová analýza (Fast Neutron Analysis)
PFNA	Pulsní rychlá neutronová analýzy (Pulsed Fast Neutron Analysis)
AC	Střídavé napětí (Alternating Current)
EDS	Explosiv Detection System
EDDS	Explosiv Detection Device System
ZBV	Z Backscatter Van Drive-By Screening System
TIP	Threat Image Projection
PKB	Průmysl komerční bezpečnosti

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma kontroly pomocí bezpečnostních rentgenů	14
Obr. 2. Elektromagnetické spektrum	16
Obr. 3. Princip vzniku rentgenového záření	18
Obr. 4. Vznik brzdného záření	18
Obr. 5. Graf energetického spektra rentgenového záření	19
Obr. 6. Vznik charakteristického záření	21
Obr. 7. Rentgenka	24
Obr. 8. Průřez rentgenky s rotační anodou	25
Obr. 9. Průřez rentgenky Straton	26
Obr. 10. Schéma zdroje elektrického napětí	27
Obr. 11. Comptonův rozptyl	31
Obr. 12. Fotoefekt	31
Obr. 13. Elektronový pár	32
Obr. 14. Jaderný fotoefekt	32
Obr. 15. Graf závislosti energie rentgenového záření na protonovém čísle látky	33
Obr. 16. Blokové schéma bezpečnostního rentgenu	34
Obr. 17. Rentgenový zářič	35
Obr. 18. Řez detektorem s přímou přeměnou	35
Obr. 19. Řez detektorem s nepřímou přeměnou	36
Obr. 20. CCD snímač	36
Obr. 21. Výsledný rentgenový obraz (vlevo monochromatické provedení, vpravo technologie energetického rozlišení)	38
Obr. 22. Schéma základního rozdělení bezpečnostních rentgenů	39
Obr. 23. Příklady dávkových ekvivalentů	41
Obr. 24. Orientace rentgenového paprsku (vlevo horizontální zleva/ zprava, vpravo vertikální seshora/zespod)	44
Obr. 25. Rentgen bez pásového dopravníku	45
Obr. 26. Pásový rentgen	45
Obr. 27. Metoda duální energie	46
Obr. 28. Schéma principu metody duální energie	47
Obr. 29. Metoda s vícedruhovým rozlišením	48

Obr. 30. Princip metody zpětného rozptylu.....	49
Obr. 31. Srovnání metody duální energie a zpětného rozptylu	49
Obr. 32. Blokové schéma principu metody počítačové tomografie	50
Obr. 33. Graf CT hustot	51
Obr. 34. Nákres spirální metody CT.....	52
Obr. 35. Schéma lineárního urychlovače částic.....	53
Obr. 36. Radiační záchyt neutronu	54
Obr. 37. Výsledný obraz neutronové analýzy	55
Obr. 38. Schéma rovnic	56
Obr. 39 Pásový rentgen pro kontrolu drobných zavazadel.....	60
Obr. 40. Pásový rentgen pro kontrolu příručních zavazadel	61
Obr. 41. Rentgen pro kontrolu rozměrných zavazadel	61
Obr. 42. Rentgen pro kontrolu zapsaných zavazadel	62
Obr. 43. Rentgen pro kontrolu osob	63
Obr. 44. Rentgenový obraz naskenované osoby.....	64
Obr. 45. Mobilní rentgenová zařízení s rámem	65
Obr. 46. Půdorys budovy pro kontrolu kamionové dopravy	66
Obr. 47. Mobilní transportní rentgen.....	68
Obr. 48. Způsob kontroly ZBV.....	71
Obr. 49. Rentgenový zdroj.....	72
Obr. 50. Snímací box	72
Obr. 51. Provádění bezpečnostní detekce pyrotechnikem.....	73
Obr. 52. LEXID a pracovník kontrolující sklad	76
Obr. 53. Rentgenový robot	76

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Základní jednotky dozimetrie	40
--	----