

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Transporta un mašīnzinību fakultāte
Biomedicīnas inženierzinātņu un nanotehnoloģiju institūts

Lada BUMBURE

Doktora studiju programmas „Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve
(RMDM8)” doktorante
Virziens „Medicīniska inženierzinātne un medicīnas fizika”

**DIGITĀLĀS MEDICĪNISKĀS
RENTGENIEKĀRTAS STAROJUMA
STABILITĀTES NOVĒRTĒŠANAS METODE**

Nozare: Mašīnzinātne
Apakšnozare: Mēraparāti un metroloģija

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. phys., profesors
J.DEHTJARS

Rīga 2014

Bumbure L. Digitālās medicīniskas
rentgeniekārtas starojuma
stabilitātes novērtēšanas metode.
Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga. RTU BINI 2014.g.- 32 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU TMF
BINI institūta 2012.gada 14.jūnija
lēmumu, protokols Nr.71



Darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā
“Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Tas satur ievadu, 4 daļas, secinājumus, 12 pielikumus, 53 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 97 lappuses. Literatūras sarakstā ir 114 nosaukumi. Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiks publiski aizstāvēts 2014.g. 10. jūnijā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas iela 6, 405. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI:

Profesors, Dr. sc. eng. Juris Krizbergs
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. habil. phys. Donāts Millers
Latvijas universitāte

Profesors, Dr. phys. Franko Milano
RTU goda doktors, Florences universitāte, Itālija

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Lada Bumbure(Paraksts)

Datums:

Satura rādītājs

Promocijas darba vispārējs raksturojums	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Aizstāvamās tēzes	7
Galvenie pētījumu rezultāti	7
Zinātniskā novitāte	7
Galvenās pielietotās metodes	8
Praktiskais pielietojums	9
Publikācijas	10
Promocijas darba saturs:	12
1.daļa "Rentgenstarojums un digitālā radiogrāfija"	12
2.daļa „Pētījuma metode”	12
3.daļa „Eksperiments”	16
4.daļa „Metodes klīniskā aprobācija”	25
Metodes algoritms izmantošanai klīnikā	29
Secinājumi	30
Literatūra	32

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Diagnostiskajā radioloģijā arvien biežāk parasta (konvencionālā) rentgenogrāfija tiek aizstāta ar digitālo. Digitālā attēla priekšrocības ir diezgan būtiskas, piemēram: palielinās diagnostikas objektivitāte, jo ir iespējams ātri organizēt plašus attālinātā veida konsilijus; attēla iegūšana ir ātra un nav vajadzīgas ķīmiskās tehnoloģijas filmu attīstīšanai, ir pieejami attēlu digitāla filtrēšana, palielināšana, elementu selekcija, un tml. Attēlus var digitāli arhivēt, ierakstīt ārējā informācijas nesējā – CD, DVD utt.; digitālo attēlu ir iespējams pārsūtīt jebkuram speciālistam (ģimenes ārstam, ķirurgam u.c.), izmantojot iekšējo vai ārējo aizsargāto tīklu u.c.. Neskatoties uz visām plašajām iespējām, ko sniedz digitālā radiogrāfija, digitālās rentgeniekārtas darbības kvalitātes pārbaude šodien ne ar ko daudz neatšķiras no parastās konvencionālās rentgeniekārtas pārbaudes. Tam izmanto „vizuālo” attēlu novērtēšanas metodi [3,4,5,8]. Šī metode ir subjektīva, jo vērtēšanas rezultāts ir atkarīgs no vērtētāja redzes asuma, vizuālās informācijas uztveres un interpretācijas spējām. Standarta kvalitātes pārbaudes procedūra parasti novērtē tādas rentgenattēla kvalitātes parametrus, kā izšķirtspēju, kontrastu, viendabīgumu (graudainību). Lai paaugstinātu rentgeniekārtas kvalitātes pārbaudes objektivitāti ir vajadzīgi finansiālie ieguldījumi, jo ir nepieciešamas mērierīces (kVp metri, dozimetri), speciālie fantomi un testobjekti, programmatūra, kā arī īpaši apmācīts medicīnas fizikā personāls. Digitālās tehnoloģijas dod iespēju veikt rentgeniekārtu operatīvo ikdienas pārbaudi. Diemžēl **šodien nav ekspress-novērtēšanas metodes, ar kuras palīdzību varētu vērtēt digitālās medicīniskās rentgeniekārtas darbības kvalitāti lai laicīgi pamanīt izmaiņas tajā.**

Klīniskajā praksē ikdienas vajadzībām ir nepieciešams veikt rentgeniekārtu starojuma parametru stabilitātes pārbaudi, t.i. novirzi no nomināliem parametriem. Ņemot vērā, ka starojuma ģenerācija notiek Puasona statistikas ietvaros, starojuma parametru novirze var būt novērtēta, pārbaudot starojuma detektora signāla statistikas atšķirību no Puasona sadalījuma, kas atbilst nomināliem aparāta parametriem.

Promocijas darbs ir veltīts digitālo medicīnisko rentgeniekārtu kvalitātes novērtēšanas jaunas ekspress-novērtēšanas metodes izstrādāšanai.

Darba mērķis un uzdevumi

Mērķis:

Izstrādāt digitālās medicīniskas rentgeniekārtas starojuma stabilitātes novērtēšanas metodi digitālajā radiogrāfijā.

Uzdevumi:

1. Pamatot un izstrādāt pētījuma metodi
2. Pārbaudīt rentgenattēla spilgtumu sadalījuma statistikas (SSS) atbilstību Puasona likumam
3. Izpētīt rentgenkūļa parametru (fokuss, enerģija u.c.) izmaiņu ietekmi uz SSS
4. Novērtēt pētījumā veikto mērījumu nenoteiktību
5. Sastādīt algoritmu digitālās medicīniskas rentgeniekārtas starojuma stabilitātes novērtēšanas metodes klīniskai izmantošanai
6. Veikt izstrādātas digitālās medicīniskas rentgeniekārtas starojuma stabilitātes novērtēšanas metodes klīnisko aprobāciju

Aizstāvamās tēzes

- 1) Eksperimenta rezultāti liecina, ka ar rentgenstarojumu apstarota digitāla detektora attēla pikseļu spilgtuma sadalījums pakļaujas Puasona likumam (ticamības līmenis 95%)
- 2) Izstrādāta jauna, balstīta uz detektora attēla pikseļu sadalījumu pēc spilgtuma, digitālās medicīniskas rentgeniekārtas starojuma stabilitātes novērtēšanas metode, kas izmanto Puasona sadalījumu.
- 3) Pierādīta iespēja Kolmogorova - Smirnova kritērija izmantošanai kā digitālo rentgenaparātu rentgenkūļa kvalitātes rādītāju rentgenstarojuma ģenerācijas diapazonā: 66kV – 96KV; 80mA – 188mA.

Galvenie pētījumu rezultāti

- 1) Izstrādāta jauna **digitālo medicīnas rentgeniekārtu starojuma stabilitātes novērtēšanas metode**, kas balstās uz detektējamā attēla spilgtuma statistiskā sadalījuma atbilstību Puasona statistikai (ko nosaka rentgenfotonu ģenerācijas statistiskā fizika). Metode ir paredzēta digitālo rentgenaparātu kvalitātes ikdienas monitoringam.
- 2) Parādīts, ka Kolmogorova - Smirnova kritērijs, kas raksturo augstāk minēto statistikas atbilstību ir izmantojams digitālo rentgenaparātu darbības stabilitātes novērtēšanai kompleksā veidā.
- 3) Konstatēts, ka minētais Kolmogorova - Smirnova kritērijs ir saistīts ar:
 - ✓ rentgenspuldzes spriegumu (66 ÷ 96kV diapazonā)
 - ✓ rentgenspuldzes strāvu (80 ÷ 200 mA diapazonā)
 - ✓ rentgenspuldzes fokusu (0.6mm; 1,2mm)

- ✓ ekspozīcijas dozu (DAP (Dose Area Product) diapazonā $0.2 \div 6.5 \mu\text{Gym}^2$ ar nenoteiktību ($1.5 \div 1.8\%$)

Zinātniskā novitāte

- 1) Izstrādāta jauna **digitālo medicīnas rentgeniekārtu starojuma stabilitātes novērtēšanas metode**, kas balstās uz detektējamā attēla spilgtuma statistiskā sadalījuma atbilstību Puasona statistikai (ko nosaka rentgenfotonu ģenerācijas statistiskā fizika). Metode ir paredzēta digitālo rentgenaparātu kvalitātes ikdienas monitoringam.
- 2) Atrasta Kolmogorova - Smirnova kritērija robežu noteikšanas metodika atkarībā no DAP lieluma

Galvenās pielietotās metodes

- 1) Rentgenkūļa kvalitātes novērtēšanas tipveida metode
- 2) Ekspozīcijas dozimetrija
- 3) Rentgenattēla digitalizācija, izmantojot fosforplašu un digitālo detektoru metodes
- 4) Statistisko sadalījumu adekvātuma pārbaudes Kolmogorova - Smirnova metode.

Praktiskais pielietojums

Izstrādāta metode ir izmantojama medicīnas iestāžu digitālās radiogrāfijas rentgenaparātu starojuma parametru ikdienas stabilitātes novērtēšanai.

Metodes izmantošana palīdzēs:

- ✓ ietaupīt resursus digitālo rentgenaparātu kvalitātes nodrošināšanai (jo lai veiktu objektīvu digitālo rentgenaparātu darbības kvalitātes pārbaudi, izmantojot tradicionālo pieeju, ir nepieciešamas vairākas mērierīces un īpaši apmācīts medicīnas fizikā personāls).
- ✓ paaugstināt medicīniskās rentgendiagnostikas pakalpojumu kvalitāti (jo izmantojot izstrādāto metodi medicīnas personālam ir iespēja savlaicīgi pamanīt neatbilstību rentgeniekārtas darbībā, kas var izraisīt neprecīzu diagnosticēšanu un pacientu dozas nevajadzīgu palielinājumu).

Publikācijas

Springerlink un Scopus datu bazē:

1. "X-Ray Radiation Statistics Towards Quality Assurance In Digital Radiography"; authors: L. Bumbure, J. Dekhtyar, A. Katashev, T. Kirsanova, V. Zemite; IFMBE Proceeding 2013, **Springer**, 4 pages
2. "Focal spot size impact to digital x-ray image brightness statistics"; authors: L. Bumbure, Y. Dekhtyar, T. Kirsanova, J. Moshara, L. Shuvalova; Technologija, Kaunas, Lithuania, 2010; pages: 69 – 72 (**SCOPUS** datu bāzē)
3. „Statistics of digital x-ray image brightness histograms”; authors: L. Bumbure, J. Dekhtyar, T. Kirsanova; publisher: IFMBE Proceeding 2009, **Springer**, 4 p.
4. "Quality of the computed radiography image acquired with decreased dose"; authors: L. Bumbure, J. Dekhtyar, R. Falkans, U. Jaspers; publisher: IFMBE Proceeding 2008, **Springer**, Vol. 20, 4 pages.

Publicēti starptautiskajos recenzējamās izdevumos:

5. "Brightness histogram vs. visual evaluation in digital radiography – the final stage"; authors: L. Bumbure, Y. Dekhtyar, T. Kirsanova, S. Bumbure; publisher: TECHNOLOGIJA, Kaunas, Lithuania, 2011; pages: 115 – 118
6. „Digital QA method’s calibration in digital radiography”; authors: L. Bumbure, Y. Dekhtyar, T. Kirsanova, A. Katashev, E. Pacukevich, L. Shuvalova; publisher: TECHNOLOGIJA, Kaunas, Lithuania, 2010; pages: 30 – 33

7. "A novel approach for evaluating the quality of a digital x-ray image" authors: L. Bumbure, Y. Dekhtyar, T. Kirsanova; publisher: TECHNOLOGIJA, Kaunas, Proceeding of International Conference 2009, pages: 164 – 167
8. "Practical application of statistical approach on digital x-ray imaging quality verification"; authors: L.Bumbure, Y. Dekhtyar, Tatyana Kirsanova, Zhanna Yakovleva; publisher: Proceedings of International Conference 2009, publisher: TECHNOLOGIJA, Kaunas, pages: 11 – 14
9. "EVALUATION OF QUALITY OF DIGITAL X-RAY IMAGE"; authors: L.Bumbure, Y. Dekhtyar, A. Glazs, A. Katashev, K. Krechetova, A.Mortuzane; publisher: TECHNOLOGIJA, Kaunas, Proceeding of International Conference 2008, pages: 205 – 208.

Konferenču tēzes:

10. „Clinical Approbation of a Novel Digital Quality Assurance Method in Digital Radiography”; authors: L. Bumbure, Y. Dekhtyar, T. Kirsanova, L. Shuvalova; publisher: Polish Journal of Medical Physics and Engineering, Warsaw, Poland, 2011; 17 (Suppl.1), s13.
11. "X-ray beam quality test inversed from a digital x-ray image"; authors: L. Bumbure, J. Dehtjars, T. Kirsanova and K. Stalidzane; publisher: Malmo University Hospital, 2009, Book of abstracts, page 88.
12. "Medicīnas rentgenattēla kvalitātes pārbaudes digitalizēšanas metode"; autori: L. Bumbure, Y. Dekhtyar; PLZK tēžu krājums, RTU, Rīga 2011, 37.lpp.
13. "Homogeneity of the BaF(Br0.90,I0.10):Eu plate for radiography detector"; authors: L. Bumbure, J. Dehtjars, T. Kirsanova; publisher: Institute of Solid State Physics University of Latvia, 2009, Book of abstracts, page 142.

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba **pirmā daļa**

„RENTGENSTAROJUMS UN DIGITĀLĀ RADIOGRĀFIJA”

ir veltīta literatūras apskatam par rentgenstarojumu un digitālās radiogrāfijas kvalitātes nodrošināšanu.

Ir izskatīti rentgenattēla kvalitātes parametri, esošas kvalitātes nodrošināšanas metodes un paņēmieni digitālajā radiogrāfijā. Secināts, ka pašlaik neeksistē vienkāršas kvalitātes pārbaudes metodes, ko var izmantot ikdienas rentgenaparātu pārbaudei, neiesaistot īpaši apmācīto personālu. Izskatot rentgenstarojuma ģenerēšanas procesu un digitālo detektoru (fosforplates, plakanpaneļa un pikseļu matricas) darbības fizikālos principus tika secināts, ka ir iespējams izstrādāt rentgenaparātu kvalitātes pārbaudes metodi, kas izmanto rentgenstarojuma īpašības un rentgenattēla iegūšanas digitālo tehnoloģiju.

Pirmās daļas rezultātā tika izstrādāts promocijas darba **mērķis un uzdevumi** (skat. lūdzu augšā).

Promocijas darba **otrā daļa**

„PĒTĪJUMA METODE”

ir veltīta pētījuma metodes pamatojumam un izstrādāšanai.

Saskaņā ar rentgenstarojuma fiziku rentgenstarojuma fotonu ģenerācija laikā pakļaujas Puasona sadalījumam [6,8,9,10].

Digitālajā radiogrāfijā detektors uztver krītošo fotonu plūsmu un pārvērš to elektriskajā lādiņā, pie kam ģenerētā elektriskā lādiņa daudzums ir tieši proporcionāls ienākošo rentgenfotonu skaitam [1,2,6,7,9]. Savukārt, detektorā uztvertais lādiņš tālāk tiek transformēts digitālā rentgenattēla spilgtumā, kas, attiecīgi, ir proporcionāls elektriskā lādiņa lielumam [9,11,12,13,14].

Tā kā rentgenstarojuma fotonu ģenerācija laikā ir pakļauta Puasona sadalījumam, bet fotoni sadalās pēc detektora virsmas pikseļiem, tad arī elektriskais lādiņš digitālajā detektorā elementos, ka arī rentgenattēla pikseļu spilgtums sadalās pēc Puasona likuma, ja, protams, rentgenkūli neietekmē destabilizējošie faktori (rentgenspuldzes fokusa izplūde, elektroģeneratora nestabils spriegums un strāva).

Tāpēc, vērtējot rentgenattēla spilgtuma sadalījuma pa pikseļiem atbilstību Puasona statistikai, ir iespējams spriest par to, vai rentgenstarojumu, kuru detektē detektors, ietekmē destabilizējošie faktori. Tādā veidā ir iespējams sekot rentģenaparāta parametru izmaiņām.

Rentģenattēls sastāv no pikseļiem un katram no tiem ir savs spilgtuma līmenis. Cilvēka redze to uztver kā pelēkās krāsas gradācijas no pilnīgi melnās krāsas līdz pilnīgi baltai. Par cik visi pikseļi tiek apstaroti vienlaicīgi vienā laika intervālā, spilgtuma līmeni katrā pikselī nosaka intensitāte J_0 (1.att.), kas iegāja detektora pikselī. Pikseļa signāls „PS” ir proporcionāls J_0 :

$$PS = k_1 k_2 k_3 J_0, \quad (1)$$

kur:

k_1 – rentģenstarojuma pārveidošanas koeficients detektora aktīvā 1.slānī (1.att.)

k_2 – pārveidošana TFT („thin film transistor”) matricā 2.slānī

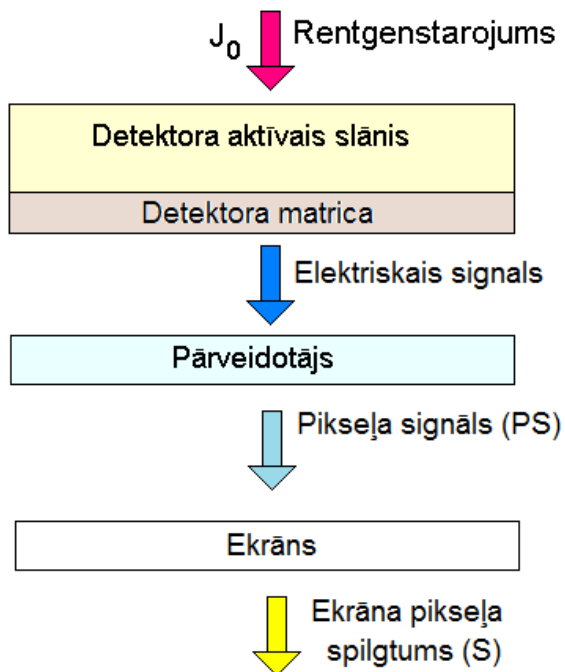
k_3 – elektriskā signāla spilgtumā pārveidošanas efektivitāte.

Pēc literatūras datiem $k_1 = 1000$; $k_2 = 0,1 \div 1$; $k_3 \approx 1$.

Ekrāna pikseļa „ i ” spilgtums S_i veidojas tāpēc, ka detektora pikselis ir ierosināts ar J_{0i} . Spilgtums ir saistīts ar J_0

$$\lg S_i = a \lg J_{0i}, \text{ kur} \quad (2)$$

a – koeficients



1.att. Signāla reģistrācijas shēma

Eksperimentos spilgtumu diapazons tika sadalīts 256 intervālos. Diapazons sākas ar skaitli „1”, kas atbilst absolūti melnai attēla krāsai, bet skaitlis „256” atbilst absolūti baltai krāsai.

Ņemot vērā, ka uz ekrāna veidojas negatīvs attēls, melnai krāsai atbilst maksimālais J_{0i} (J_{0imax}), bet baltai krāsai – minimalais, t.i. fona signāls (J_{0ifons}). Tāpēc:

$$a = \frac{\lg (256 - 1)}{\lg (J_{0imax} - J_{0ifons})} \quad (3)$$

Ja $J_{0ifons} \ll J_{0imax}$, tad

$$a = \lg 256 / \lg J_{0imax} \text{ un} \quad (4)$$

$$\lg S_i = \frac{\lg 256}{\lg J_{0imax}} \cdot J_{0i} \quad (5)$$

Par cik J_{0imax} ir ierobežots ar spuldzes jaudu un detektora iespējām, kas specifiskam rentgeniekārtu veidam ir konstantas, tad

$$\lg S_i = \text{const} \lg J_{0i}, \quad (6)$$

tā kā atsevišķā pikseļa spilgtuma līmenis ir proporcionāls pikseli uzkrātajam elektriskajam signālam, tad

$$S_i \sim J_{0i}, \quad (7)$$

Tāpēc, mērot S_i ir iespējams novērtēt J_{0i} . Līdz ar to S_i sadalījums pēc pikseļiem atspoguļo J_{0i} sadalījumu.

Šī sadalījuma verifikācijai tika izmantota Puasona statistika:

$$P(S) = \frac{\mu(S)^S \cdot e^{-\mu(S)}}{S!} \quad (8)$$

Tagad izmantojot eksperimentā iegūtos S_i datus ir iespējams aprēķināt teorētisko Puasona sadalījumu, kuru var salīdzināt ar eksperimentā iegūto histogrammu.

Histogrammu salīdzināšanai ar teorētisko sadalījumu tika izmantots Kolmogorova-Smitnova kritērijs, kas ir vislabākais, ja ir zināma teorētiskā sadalījuma funkcija [50,98].

Lai aprēķinātu Kolmogorova – Smirnova kritēriju tika aprēķināta starpību starp teorētisko S_t un eksperimentālo S_e . Tad tika izvēlēta maksimālā absolūtā starpību (B_{max}) un aprēķināts parametrs D_{max} :

$$D_{max} = B_{max}/N, \quad (9)$$

kur: N – pikseļu skaits

Tālāk tika aprēķināts kritērijs λ , kas atspoguļo eksperimentālas histogrammas atbilstību teorētiskajam sadalījumam. Kritēriju λ atrod pēc formulas :

$$\lambda = D_{max}\sqrt{N} \quad (10)$$

Jo mazāks ir kritērijs λ , jo labāk saskan eksperimentālā sadalījuma funkcija ar teorētisko sadalījuma funkciju.

Promocijas darba **trešā daļā**

„EKSPERIMENTS”

ir veltīta eksperimenta aprakstam.

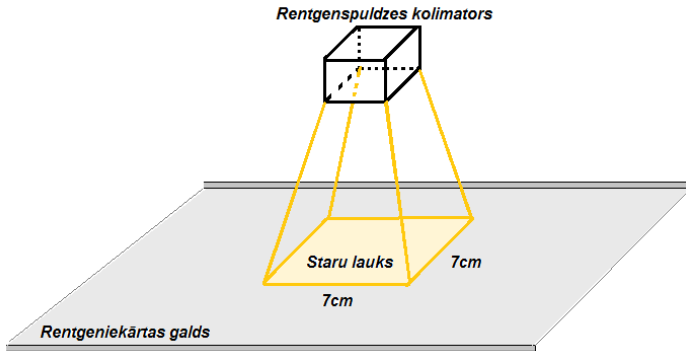
Eksperimentālo mērījumu iegūšanai tika izvēlēta digitālā rentgeniekārta „Digital Diagnost”. Iekārtas rentgenspuldzei ir anods ar volframa/rēnija sakausējuma pārklājumu un 2 izmēru fokusi: 0.6mm un 1.2mm. Rentgeniekārta aprīkota ar digitālo detektoru „Pixium 4600”.

Eksperimentālie rentgenattēli tika iegūti mainot dažādus rentgeniekārtas uzstādījumus: fokusa izmēru (lielais 1,2 mm, mazais 0,6mm); spriegumu: 66kV; 81kV; 96kV; strāvu : 80mA; 100mA; 125mA; 160mA; 188mA.

Mainot vienu no augstāk minētiem parametriem pārējie parametri tika saglabāti nemainīgi.

Ekspozīcijas tika veiktas sērijās pa 30 priekš mainīgiem parametriem.

Visi eksperimentālie mērījumi tika veikti vienas dienas laikā. Rentģenlauka kolimācija bija 7 x 7 cm (2.att.) Pēc katras ekspozīcijas no DAP metra (Dose Area Product meter) tika norakstītas vērtības $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$, kas atspoguļo dozu.

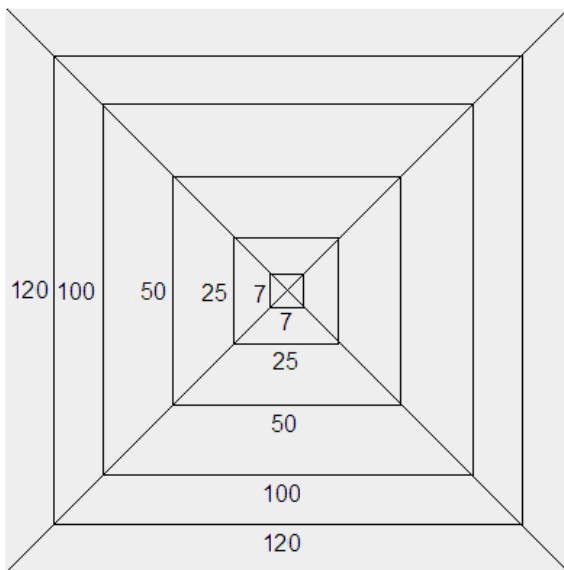


2 att. Staru lauka kolimācija

Iegūtie attēli tika ierakstīti diskā DICOM formātā, izmantojot iekārtas darba staciju. Vēlāk DICOM formāta attēli tika transformēti 8 bitu TIFF formātā attēlos. No katra attēla centra, izmantojot caurspīdīgu šablonu, ko uzliek uz desktopa (monitora) (3.att.), tika izgriezti dažāda lieluma laukumi: 49 pikseļi (7x7); 625 pikseļi (25x25); 2500 pikseļu (50x50), 10000 pikseļu (100x100) un 14400 pikseļu (120x120).

Katrs laukums tika saglabāts TIFF formātā, kas neietekmēja spilgtuma sadalījumu. Tad katra laukuma spilgtums tika pārvērsts ciparu veida (digitalizēts 1-256 spilgtumu gradācijas (8 bitu) diapazonā).

Pētījuma laikā kopumā tika apstrādāti 160 000 000 dati.



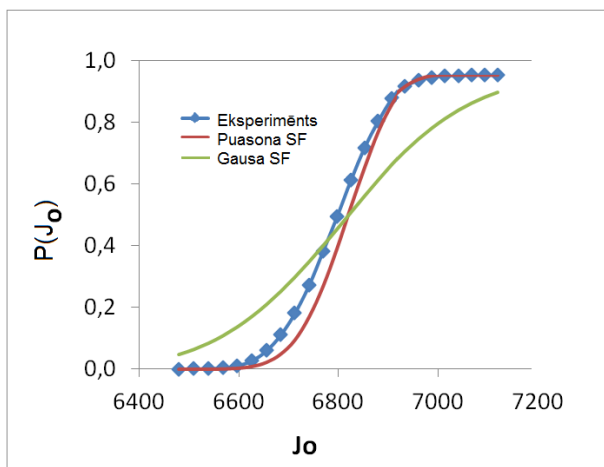
3.att. Caurspīdīgs monitora šablons attēla laukumu izvēlei

Aprēķinātais λ tika salīdzināts ar tabulāra λ_t vērtību pie ticamības varbūtības 0.95. Ja aprēķinātais $\lambda < \lambda_t$, tad hipotēze par statistiskā sadalījuma atbilstību Puasona/Gausa likumam apstiprinājās.

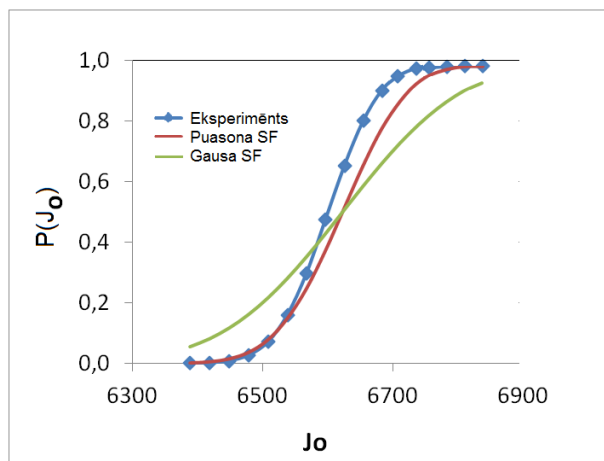
Teorētiskās līknes Puasona un Gausa sadalījumos tika iegūtas izmantojot eksperimentālo datu vērtības (vidējo aritmētisko un standartnovirzi).

Eksperimentālo datu apstrāde parādīja, ka rezultāts ir atkarīgs no apstrādātā laukuma izmēra, rentgenspuldzes fokusa, sprieguma un strāvas.

Vislabākā atbilstība Puasona sadalījumam tika nodrošināta, kad attēla laukums bija vienāds ar 100 x 100 pikseļiem (4. un 5.att.).



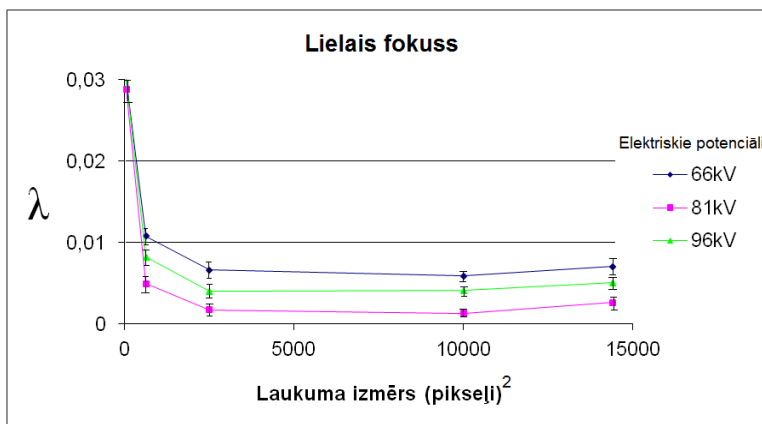
4. att. Sadalījuma funkcija pie 81kV, mazais fokuss



5.att. Sadalījuma funkcija pie 81kV, lielais fokuss

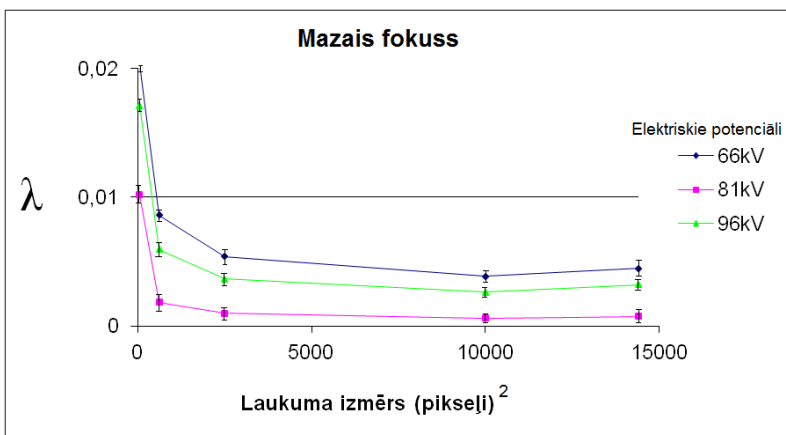
Tika konstatēts, ka palielinot vai samazinot spriegumu no 81kV uz 96kV un 66kV attiecīgi, atbilstība Puasona sadalījumam pasliktinās (6. un 7.att).

Šis apgalvojums ir patiess izmantojot kā mazo fokusu, tā arī lielo fokusu. Tas visticamāk ir saistīts ar rentgenstarojuma spektra izmaiņām mainot spriegumu. Pie 66kV spektra vēl neparādās raksturīgā starojuma pīķis, kas parādās pie 81kV, savukārt pie 96kV ievērojami palielinās bremsēšanas starojuma intensitāte, kā arī parādās otrais raksturīgā starojuma pīķis [8].

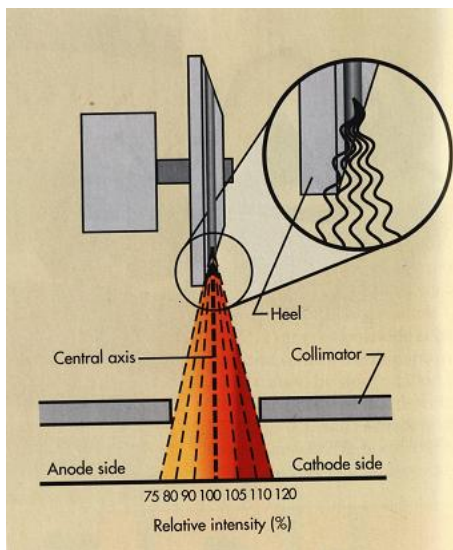


6. att. Kritērijs λ atkarībā no laukuma izmēra

Attēlos, iegūtos, izmantojot mazo fokusu pie dažādiem augstspriegumiem (kV: 66, 81 un 96) apstrādājot dažāda lieluma laukumus tika atrasts, ka pie laukuma lieluma 7x7 kritērijs λ ir vislielākais (kas, acīmredzot, ir saistīts ar nepietiekamo statistisko datu kopu), tad kritērijs λ samazinās un pie laukuma 100x100 ir vismazākais, savukārt pie laukuma izmēra 120x120 kritērijs λ atkal palielinās, jo visticamāk jau sākas „papēža” efekta ietekme (8.att.).

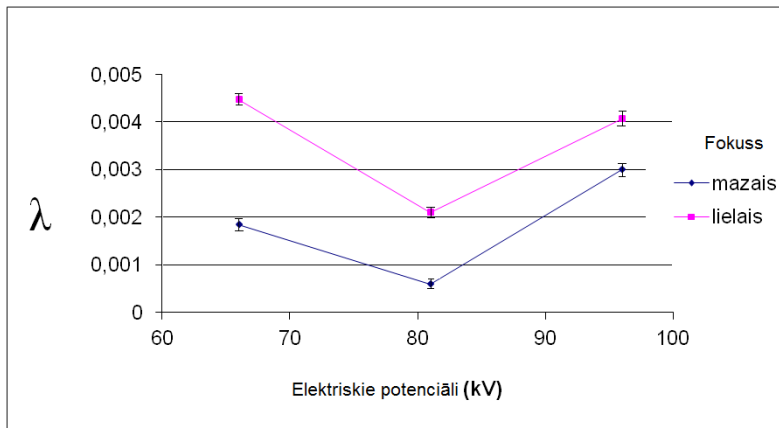


7. att. Kritērijs λ atkarībā no laukuma izmēra pie dažādiem kV, izmantojot mazo fokusu



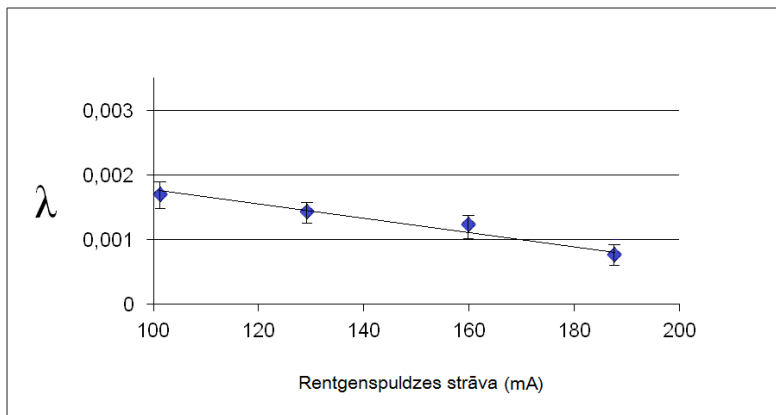
8. att. „Papēža” efekta rezultātā nevienmērīgs rentgenstarojuma relatīvās intensitātes sadalījums

Samazinot rentgenspuldzes fokusu, t.i. tuvojoties punktveida avotam, atbilstība Puasona sadalījumam uzlabojas (9.att.).



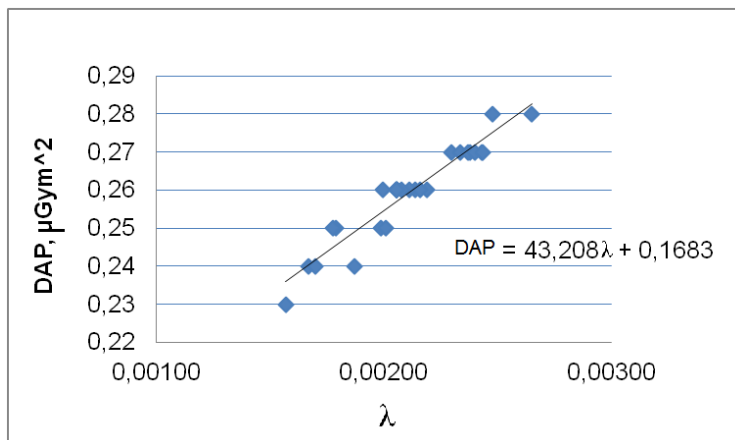
9. att. Kritērijs λ atkarībā no fokusa mainot spriegumu (kV)

Palielinot rentgenspuldzes strāvu tika novērots, ka kritērijs λ samazinājās (10.att.), kas var būt saistīts ar statistisko datu masīva palielināšanu.



10. att. Kritērijs λ atkarībā no strāvas (mA)

Lai pietuvinātu metodi klīniskajām vajadzībām (kur galvenais rādītājs, uz ko balstās medpersonāls, ir DAP mērījumi) tika noteikta korelācija starp kritēriju λ un DAP metra mērījumu vērtībām. 30 min laika periodā tika iegūti un apstrādāti 30 rentgenattēli. Katram attēlam tika aprēķināts kritērija λ lielums un noteikta korelācija (11. un 12.att.).



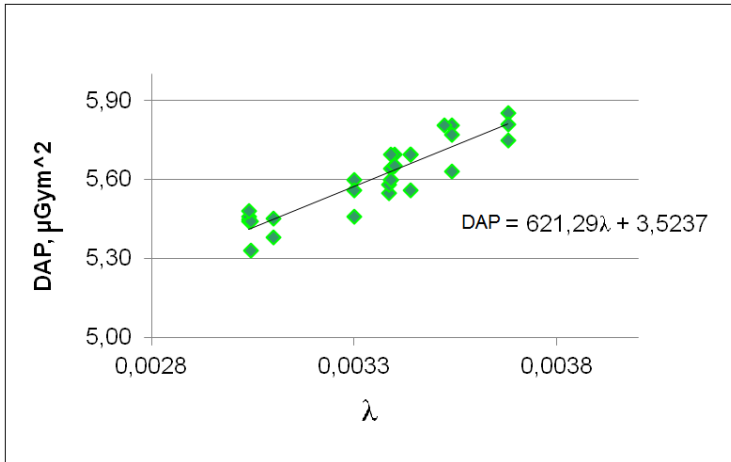
11. att. DAP metra rādījumu un kritērija λ vērtību korelācija 0.2 - 0.3 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā

Korelācijas koeficients pie ticamības varbūtības 0,95 bija 0,94 (DAP 0.2 - 0.3 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā) un 0,91 (DAP 5 - 6 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā) attiecīgi, kas skaitās nozīmīgs (korelācijas koeficienta kritiskā vērtība ir 0.31) [15].

Līdzīgi tika noteikta korelācija starp kritēriju λ un DAP metra mērījumu vērtībām visām rentgena iekārtām, kuras tika izmantotas metodes klīniskajā aprobācijā.

Tad tika aprēķināta 0.2 - 0.3 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā iegūto DAP mērījumu nenoteiktība (δ_1), izmantojot $DAP = f(\lambda)$ regrēsiju:

$$DAP = 43,208\lambda + 0,1683 \quad (11)$$



12.att. DAP metra rādījumu un kritērija λ vērtību korelācija 5 – 6 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā

Līdzīgi tika aprēķināta 5-6 $\mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$ diapazonā iegūto DAP mērījumu nenoteiktība ($\bar{\delta}_2$), izmantojot $DAP = f(\lambda)$ regrēsiju:

$$DAP = 621,29\lambda + 3,5237 \quad (12)$$

Izmērītās DAP_m vērtības tika salīdzinātas ar aprēķinātajām DAP_a izmantojot starpības moduli:

$$\Delta_i = |DAP_m - DAP_a| \quad (13)$$

un novērtējot novirzes katram i mērījumam:

$$\delta_i = \Delta_i / DAP_{mi} \cdot 100\% , \quad (14)$$

Rezultātā tika noteikts, ka $\bar{\delta}_1 = (1.15 \pm 0.8) \%$, savukārt $\bar{\delta}_2 = (1.81 \pm 1.1) \%$

Aprēķinātas δ vērtības nepārsniedz pieļautas LRMK noteikumos dozas mērījumu svārstību 20% robežas [17].

Lai pārliecinātos par to, ka metodi var izmantot jebkurā medicīnas iestādē, kur ir digitālizēta radiogrāfija, bija nepieciešama rezultātu verificēšana uz citām rentgeniekārtām.

Verificēšana tika realizēta pārbaudot kritērija λ un DAP mērījumu vērtību korelāciju 7 rentgeniekārtām dažādās medicīnas iestādēs. Visās medicīnas iestādēs metode darbojas, korelācija $DAP = f(\lambda)$ bija novērojama izmantojot visas rentgeniekārtas. Mērījumu nenoteiktība δ nepārsniedza 6%.

Promocijas darba **ceturtnā daļā**

„METODES APROBĀCIJA,,

ir aprakstīta metodes aprobācija klīnikās.

Katrā medicīnas iestādē, kur izmanto rentgendiagnostiku ir kvalitātes nodrošināšanas programma ar mērķi noteikt visus pasākumus, kuri ir vērsti uz diagnostiskās radioloģijas kvalitātes kontroli un uzlabošanu.

Viena daļa no šādiem pasākumiem ir saistīta ar pārbaudēm, kuras veic rentgeniekārtām lai pārbaudītu starojuma stabilitāti.

Šajās pārbaudēs tiek izmantotas procedūras, metodes un papildus aprīkojums (testa objekti, fantomi, mērierīces). Vairums no procedūrām ir saistīts ar rentgenattēla kvalitātes parametru novērtēšanu.

Izmantojot promocijas darba ietvaros izstrādāto jauno metodi un atrasto sakarību starp DAP un kritērija λ vērtībām, tika veikta metodes aprobācija.

Kvalitātes parametru analīze tika veikta 8 mēnešu laikā dažādās medicīnas iestādēs Latvijā, izmantojot 7 digitālās radiogrāfijas rentgeniekārtas, izmantojot kritērija λ vērtību izmaiņas atkarībā no laika. Kopā tika apstrādāti vairāk nekā 1000 rentgenattēlu.

Veicot pārbaudes tika konstatēts, ka kritērija λ vērtības laika gaitā pieaug, kas liecina par rentgeniekārtu starojuma stabilitātes pasliktināšanos.

Lai atrastu kritērija λ kritisko vērtību tika izmantota rezultātu verificēšanas laikā atrasta sakarība starp DAP un kritērija λ vērtībām. Pirmaj (no septiņām) rentgeniekartai tā ir:

$$DAP = 395,44\lambda + 3,1567 \quad (15)$$

Izmantojot šo sakarību var atrast kritērija λ vērtību. Formula izskatīsies šādi:

$$\lambda = (DAP - 3,1567)/395,44 \quad (16)$$

Tagad zinot sākotnējo vidējo DAP metra vērtību (vidējā vērtība tika aprēķināta 1. rentgeniekartai kā vidējais aritmētiskais no 10 mērījumiem veiktiem dažū minūšu laikā), kas ir $5.82 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$, var aprēķināt pieļauto DAP vērtības novirzi, jeb ΔDAP . Saskaņā ar LR MK Nr.97 noteikumu 8.pielikumu pieļauta novirze no vidējās dozas var būt $\pm 20\%$. Tātad 1. rentgeniekartai:

$$\Delta\text{DAP} = 5.82 \cdot 20\% = 1.164 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2, \text{ tagad}$$

$$\text{DAP}_{\min} = 5.82 - 1.164 = 4.656 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2, \text{ bet}$$

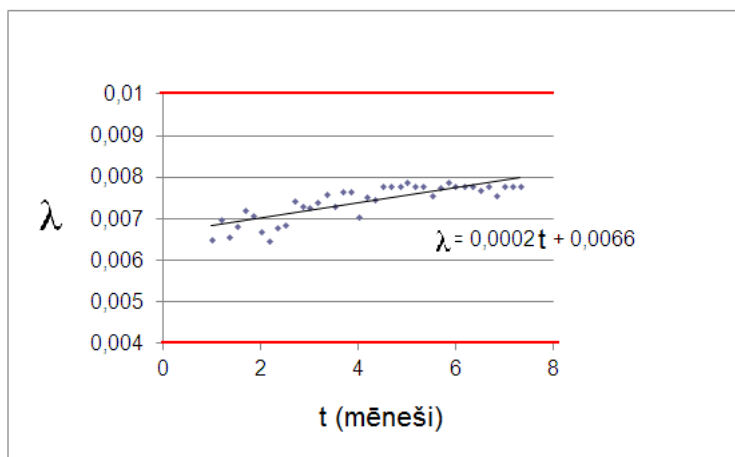
$$\text{DAP}_{\max} = 5.82 + 1.164 = 6.984 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2$$

Tagad izmantojot formulu 16 var atrast attiecīgi kritēriju λ_{\min} un λ_{\max} vērtības:

$$\lambda_{\min} = (4.656 - 3,1567)/395,44 = 0.004, \text{ bet}$$

$$\lambda_{\max} = (6.984 - 3,1567)/395,44 = 0.01$$

Tagad izmantojot atrastas λ_{\min} un λ_{\max} vērtības var atzīmēt kritiskas robežas kritērijam λ 1. rentgeniekartai (13.att.).



13.att. Kritērija λ robežas 1. rentgeniekārtai

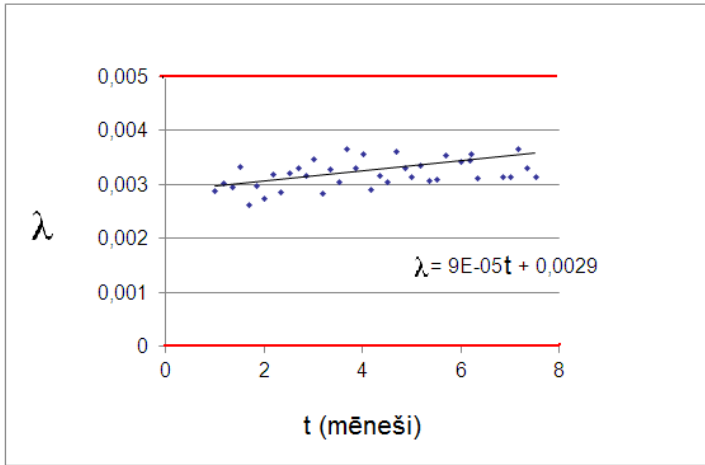
No dotā grafika var secināt, ka kritērijs λ ar laiku pieaug.

Tagad izmantojot kritērija λ un laika sakarību var aprēķināt laiku (T), kad kritērijs λ pārsniegs atļauto maksimālo robežu:

$$T = (\lambda - 0.0066)/0.0002 = \mathbf{17} \text{ mēneši} \quad (17)$$

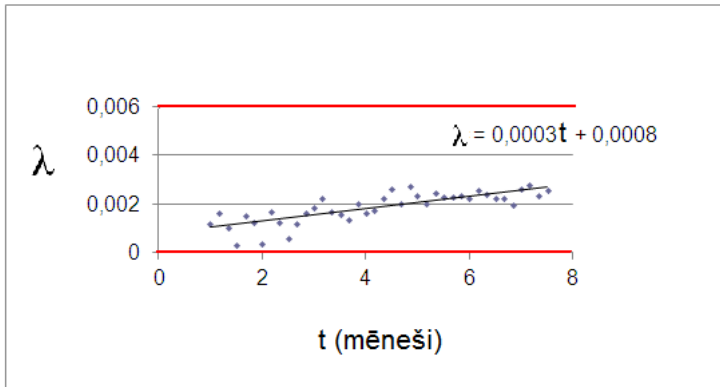
Kā redzams, šai iekārtai būs nepieciešama tehniskā apkope pēc 17 mēnešiem.

Līdzīgi aprēķini tika veikti visām pētamajām rentgeniekartām (piemēru skat att.: 14-15.)



14.att. Kritērija λ robežas 2. rentgeniekārtai

$$T = (\lambda - 0.0029)/0.00009 = \mathbf{40} \text{ mēneši}$$



15.att. Kritērija λ robežas 3. Rentgeniekārtai

$$T = (\lambda - 0.0008)/0.0003 = \mathbf{17,3} \text{ mēneši}$$

Balstoties uz klīniskās aprobācijas rezultātiem tika piedāvāts metodes algoritms izmantošanai klīnikā.

ALGORITMS METODES IZMANTOŠANAI KLĪNIKĀ

- 1) izvēlēties rentgeniekārtas manuālo režīmu;
- 2) uzstādīt uz iekārtas sekojošus rentgenspuldzes režīmus: 81kV; 188mA;
- 3) izvēlēties rentgenstarojuma lauka kolimāciju 7x7cm; SID = 100cm;
- 4) veikt ekspozīciju;
- 5) pierakstīt DAP metra rādījumus;
- 6) nolasīt rentgenattēlu DICOM formātā, ierakstīt to CD;
- 7) pārverst attēlus TIFF formātā;
- 8) atkārtojot soļus 1-6 vēl 9 reizes, izmantojot vienu un to pašu detektoru;
- 9) katra iegūtā rentgenattēla centrā, izmantojot šablonu, izgriezt 100x100 pikseļiem lielu laukumu;
- 10) digitalizēt iegūtos datus;
- 11) aprēķināt katram laukumam kritēriju λ ;
- 12) atrast vidējo kritēriju λ ;
- 13) atrast vidējo DAP metra rādījumu;
- 14) ierakstīt atrastas vidējās vērtības protokolā;
- 15) veikt visu augstākminēto proceduru vismāz 1 reizi mēnesī katrai rentgeniekārtai;
- 16) izmantojot iegūtos rezultātus noteikt kritērija λ minimālo un maksimālo robežu rentgeniekārtai;
- 17) sekot kritērija λ izmaiņām laikā;
- 18) novērtēt rentgeniekārtas nākamās tehniskas apkopes (regulēšanas) termiņu.

Sadarbībā ar RTU Datorzinātņu fakultāti, tiek veikta programmatūras izstrāde datu apstrādei tieši DICOM formātā.

SECINĀJUMI

- 1) Pirmo reizi izstrādāta „digitālās medicīniskās rentgeniekārtas starojuma stabilitātes novērtēšanas metode”, kura balstās uz rentgenfotonu ģenerācijas fundamentālo Puasona statistiku.
Metode ir paredzēta digitālo rentgenaparātu ikdienas kvalitātes monitoringam un tehnisko apkopju (regulēšanas) periodiskuma noteikšanai.
- 2) Kolmogorova - Smirnova kritērijs ir izmantojams kā rādītājs digitālo rentgenaparātu darbības stabilitātes novērtēšanai kompleksā veidā.
Kolmogorova - Smirnova kritērijs palielinās ja:
 - ✓ izplūst rentgenspuldzes fokuss
 - ✓ pieaug vai samazinās nominālais spriegums
 - ✓ samazinās nominālā strāva
- 3) Izstrādātā metode tika aprobēta klīniskajos apstākļos 6 klīnikās, uz 7 rentgeniekartām 8 mēnešu laikā. Metode ir efektīva. Ir pozitīvas atsauksmes no klīnikām.
- 4) Metodes izmantošana palīdzēs:
 - ✓ ietaupīt resursus digitālo rentgenaparātu kvalitātes nodrošināšanai (jo, lai veiktu objektīvu digitālo rentgenaparātu darbības kvalitātes pārbaudi, izmantojot tradicionālo metodi, ir nepieciešamas vairākas dārgas mērierīces un īpaši apmācīts personāls. Bez tam visas šīs ierīces vajag regulāri kalibrēt, kas ļoti sadārdzina kvalitātes pārbažu veikšanas procesu);

- ✓ paaugstināt medicīniskā rentgendiagnostikas pakalpojumu kvalitāti (jo izmantojot izstrādāto metodi medicīnas personālam ir iespēja savlaicīgi pamanīt neatbilstību rentgeniekārtas darbībā un nodrošināt nepieciešamo tehnisko apkopi, novēršot neprecīzu diagnosticēšanu un pacientu dozas nevajadzīgu palielinājumu);
- ✓ medicīnas iestādē ikdienas vērot digitālās radiogrāfijas rentgenaparātu starojuma izmaiņas.

LITERATŪRA

1. Aach T., Schiebel U., Spekowijs G., Digital image acquisition and processing in medical x-ray imaging, *Journal of Electronic Imaging* 8(1), 7-22 (January 1999)
2. Aber W., Thin Film Transistors & Flexible Displays, MS&E 542 - Term Paper, May 2006
3. Bath M., Ma nsson L.G., Visual grading characteristics (VGC) analysis, *BJR*, 80 (2007), 169–176
4. Bendat J S and Piersol A G 1986 *Random Data Analysis and Measurement Techniques* (New York: Wiley) p 338
5. Burgess A.E., Comparison of receiver operating characteristic and forced choice observer performance methods, *Med. Phys.* 22, 643–655,1995.
6. Bushberg J. T., Seibert J. A., Leidholdt E. M., *The Essential Physics of Medical Imaging*, Second Edition, Lippincott Williams & Wilkins, PA, 2002, 885 p.
7. Chotas H.G., Dobbins J.T. 3rd, Ravin CE. Principles of digital radiography with large-area, detectors. *Radiology* 1999;210:595–599.
8. Dehtjars J., Emziņš D., Jurkevics A. u.c. "Radiācijas drošība radiologu asistentiem", Rīga, RTU, 2006, 336 lpp.
9. Dendy P.P. and Heaton B, *Physics for Diagnostic Radiology*, Bookcraft, UK, 1999, 446 p.
10. Edwin L. D., "Physics of Medical Imaging", Chapter 8, *Biomedical Engineering The University of Iowa*, 2004
11. Inamura K., "X-ray Flat-Panel Detector," *Kogaku*, 29, 5, pp. 295-303 (2000)
12. Lanca L., Silva A., Digital radiography detectors e A technical overview: Part 1, *Radiography* (2009) 15, 58e62
13. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А., *Теория вероятностей и ее инженерные приложения*, М.: 2000, С. 135
14. Лагутин М.Б. *Наглядная математическая статистика*, Бином, М., 2003, 472с
15. *Методика статистической обработки эмпирических данных*, Исд.к. станд., мер и измерительных приборов СССР, Москва, 1966, 100 с.
16. Уэбб С., *Физика визуализации изображений в медицине: в 2–х томах. Т. 2: М., Мир, 1991. – 408 с.*
17. МК Nr.97 „Noteikumi par aizsardzību med. apstarošanā" <http://www.likumi.lv/doc.php?id=59676&from> (06.2012)