

VILNIAUS UNIVERSITETAS
Fizikos fakultetas
Mokomoji atomo ir branduolio fizikos laboratorija

Laboratorinis darbas Nr. 15

RENTGENO SPINDULIUOTĖS DOZIMETRIJA

Parengė A. Poškus

2021-04-03

Turinys

Darbo tikslas	2
1. Užduotys	2
2. Kontroliniai klausimai	2
3. Rentgeno spinduliuotė	3
4. Jonizacijos kameros	3
5. Jonizuojančiosios spinduliuotės dozimetrijoje vartojami dydžiai ir vienetai	3
6. Tyrimo metodika	5
6.1. Tyrimo metodo teorija	5
6.2. Darbo priemonės	6
6.3. Matavimo tvarka	9

Darbo tikslas

Ištirti oro jonizavimo reiškinį, veikiant rentgeno spinduliuotei.

1. Užduotys

1. Išmatuoti jonų srovės, kuri atsiranda plokščiajame kondensatoriuje, veikiant jį rentgeno spinduliuote, stiprio priklausomybę nuo kondensatoriaus įtampos, naudojant dvi rentgeno spinduliuotės pluošto ribojimo diafragmas.
2. Naudojant $d = 5$ mm skersmens diafragmą ir didžiausią anodo įtampą, išmatuoti jonų srovės stiprio priklausomybę nuo rentgeno vamzdžio anodo srovės.
3. Naudojant $d = 5$ mm skersmens diafragmą ir didžiausią anodo srovę, išmatuoti jonų srovės stiprio priklausomybę nuo rentgeno vamzdžio anodo įtampos.
4. Naudojant $d = 5$ mm diafragmą ir fluorescuojantį ekraną, apytiksliai išmatuoti atstumą tarp diafragmos ir spinduliuotės šaltinio ir patikrinti, ar jis atitinka rentgeno vamzdžio aprašyme pateiktą vertę.
5. Pagal soties srovės vertes, kurios atitinka didžiausias rentgeno vamzdžio įtampos ir srovės vertes, nustatyti rentgeno spinduliuotės ekspozicinės dozės galią ir sugertosios dozės galią.
6. Grafiškai pavaizduoti priklausomybes, kurios gautos 1, 2 ir 3 punktuose.
7. Aptarti pastebėtus dėsniumus.

2. Kontroliniai klausimai

1. Rentgeno vamzdžio sandara ir veikimo principas.
2. Stabdomosios rentgeno spinduliuotės atsiradimo priežastys ir spektras.
3. Būdingosios rentgeno spinduliuotės atsiradimo priežastys ir spektras.
4. Dujinių detektorių tipai.
5. Krūvininkų sąveikos vyksmai silpname elektriniame lauke.
6. Pagrindiniai krūvininkų betvarkį judėjimą apibūdinantys dydžiai: vidutinis laisvasis kelias, vidutinis greitis, vidutinis susidūrimų dažnis, vidutinė energija (apibrėžtys ir sąryšiai).
7. Difuzijos koeficientas (apibrėžtis ir išraiška). Elektronų ir jonų difuzijos koeficientų palyginimas.
8. Rekombinacijos sparta. Rekombinacijos koeficiento sąvoka. Elektroninės ir joninės rekombinacijos koeficientų palyginimas. Pradinės ir tūrinės rekombinacijos apibrėžtys.
9. Krūvininkų dreifo sąvoka. Dreifo greičio bendroji išraiška. Krūvininko judrio apibrėžtis ir išraiška. Elektronų ir jonų dreifo greičių ir judrių palyginimas.
10. Jonizacijos kameros pagrindinės dalys. Nuolatinės jonizacijos srovės stiprio ir jonizacijos spartos sąryšis.
11. Krūvininkų koncentracijų priklausomybė nuo koordinatės (išvedimas).
12. Paašškinkite jonizacijos kameros voltamperinės charakteristikos bendrąjį pavidalą.
13. Apibrėžkite pagrindinius jonizuojančiosios spinduliuotės dozimetrijoje vartojamus dydžius ir jų matavimo vienetus.
14. Nusakykite matavimų geometriją ir paašškinkite skirtumą tarp vidutinės ir lokaliosios ekspozicinių dozių.

Literatūra:

1. Poškus A. Atomo fizika ir branduolio fizikos eksperimentiniai metodai. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008. 109 – 113 p., 311 – 320, 324 – 327.
2. Horodničius H. Branduolio fizika. – Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 1997, p. 154 – 158.
3. Laboratory Experiments. Phywe Systeme GmbH, 2005 (*kompaktinis diskas*).

3. Rentgeno spinduliuotė

Pradinės žinios apie rentgeno spinduliuotę ir rentgeno vamzdžius yra [1] knygos 6.1 – 6.3 poskyriuose (109 – 113 p.). Ta pati informacija pateikta ir Atomo ir branduolio fizikos laboratorijos (V bendrosios fizikos laboratorijos) laboratorinio darbo Nr. 4 aprašo 3.1 – 3.3 skirsniuose.

4. Jonizacijos kameros

Žinios apie dujinių detektorių tipus, krūvininkų sąveikos vyksmus ir jonizacijos kameros nuolatinės srovės veiką yra [1] knygos 16.1 – 16.4 skirsniuose (311 – 320 p. ir 324 – 327 p.).

5. Jonizuojančiosios spinduliuotės dozimetrijoje vartojami dydžiai ir vienetai

Kai jonizuojančioji spinduliuotė krinta į medžiagą, dalis spinduliuotės energijos yra sugerama. Medžiagos masės vienete sugertosios energijos kiekis yra vadinamas *sugertąja doze*. SI sistemoje vartojamas sugertosios dozės matavimo vienetas yra grėjus (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg.}$$

Nesisteminis sugertosios dozės matavimo vienetas yra radas (rad):

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

Sugertosios dozės galia – tai sugertoji dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra Gy/s arba rad/s.

Jonizuojančiosios spinduliuotės biologinis poveikis priklauso ne vien nuo sugertosios dozės, bet ir nuo spinduliuotės rūšies (α , β , γ , neutronai, branduoliai, jonai ir kt.) ir dalelių energijos. Todėl, nusakant spinduliuotės biologinį poveikį, sugertoji dozė dauginama iš *kokybės koeficiento* k , kuris nusako, kiek kartų duotojo tipo spinduliuotės biologinis poveikis yra didesnis už tos pačios sugertosios dozės 200 keV energijos γ kvantų biologinį poveikį. Kadangi kokybės koeficientas nusako duotosios rūšies spinduliuotės biologinį poveikį, lyginant su kitų tipų jonizuojančiuoju spinduliuavimu, tai jis dar vadinamas *santykinio biologinio efektyvumo koeficientu*. Kokybės koeficientai, kurie atitinka skirtingas jonizuojančiosios spinduliuotės rūšis, pateikti 1 lentelėje. Šitai apskaičiuotas dydis vadinamas *lygiaverte doze* ir matuojamas *sivertais*:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} / k.$$

Taigi, vienas sivertas atitinka tokią duotosios rūšies spinduliuotės sugertąją dozę, kurios biologinis poveikis yra toks pats kaip 200 keV energijos γ kvantų 1 Gy sugertosios dozės biologinis poveikis. Nesisteminis lygiavertės dozės vienetas yra vadinamasis *biologinis rentgeno ekvivalentas* arba REM (“Roentgen equivalent man”, rem). Tikslesnis šio vieneto pavadinimas būtų “biologinis rado ekvivalentas”, nes jis atitinka tokią duotosios rūšies spinduliuotės sugertąją dozę, kurios biologinis poveikis yra toks pats kaip 200 keV energijos γ kvantų 1 rad sugertosios dozės biologinis poveikis:

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 1 \text{ rad} / k.$$

Lygiavertės dozės galia – tai lygiavertė dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra Sv/s arba rem/s.

1 lentelė. Skirtingų jonizuojančiosios spinduliuotės rūšių kokybės koeficientai

Spinduliuotės rūšis	k	Spinduliuotės rūšis	k
γ spinduliuotė	1	Šiluminiai neutronai	3
Rentgeno spinduliuotė	1	5 keV energijos neutronai	2,5
β spinduliuotė	1	20 keV energijos neutronai	5
α spinduliuotė ($\leq 10 \text{ MeV}$)	10	100 keV energijos neutronai	8
Protonai (10 MeV)	10	1 MeV energijos neutronai	10,5
Sunkieji atatrakos branduoliai	20	10 MeV energijos neutronai	6.5

Spinduliuotės poveikį medžiagai lemia medžiagos sugertas spinduliuotės energijos kiekis (t. y. vidutinė sugertoji dozė, padauginta iš medžiagos masės), spinduliuotės rūšis ir spinduliuotės dalelių energija. Tačiau tiesiogiai išmatuoti sugertąją energiją yra gana sudėtinga. Dauguma dozimetrinių prietaisų matuoja ne energiją, o elektros krūvį, kuris sukuriamas ore arba kitoje medžiagoje dėl jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio. Pagal tą krūvį paskui galima apytiksliai apskaičiuoti ir energiją, kurią sugertų koks nors žinomos sudėties kūnas (pvz., biologinis audinys), patalpintas į tiriamąją erdvės sritį. Pilnutinis vieno ženklo jonų krūvis, kuris susidarė atmosferos oro masės vienetė dėl jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio, yra vadinamas *ekspozicine doze*. Taigi, ekspozicinę dozę (D_e) galima išreikšti šitaip:

$$D_e = \frac{dQ}{dm}; \quad (1)$$

čia Q yra sukurtas krūvis, m yra oro masė, o raidė „d“ žymi šių dydžių nykstantus kiekius (diferencialus). Iš ekspozicinės dozės apibrėžties išplaukia, kad ekspozicinės dozės sisteminis matavimo vienetas yra $A \cdot s \cdot kg^{-1}$ (šis vienetas neturi specialaus pavadinimo). Nesisteminis ekspozicinės dozės matavimo vienetas yra rentgenas (R). 1 R – tai tokia ekspozicinė dozė, kuriai esant, 0,001293 g oro susidaręs vieno ženklo jonų krūvis lygus CGSE krūvio vienetui, t.y., $3,33 \cdot 10^{-10} C$ (0,001293 g – tai $1 cm^3$ oro masė normaliomis oro sąlygomis). **Ekspozicinės dozės galia** – tai ekspozicinė dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra $A \cdot kg^{-1}$ arba R/s.

Pagrindiniai dozimetrijoje vartojami vienetai ir jų sąryšiai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Jonizuojančiosios spinduliuotės matavimo vienetai

Dydžio pavadinimas	SI vienetas	Nesisteminis vienetas	Santykis
Sugertoji dozė	Grėjus, Gy	Radas, rad	1 rad = 0,01 Gy
Sugertosios dozės galia	Grėjus per sekundę, Gy/s	Radas per sekundę, rad/s	1 rad/s = 0,01 Gy/s
Lygiavertė dozė	Sivertas, Sv	REM, rem	1 rem = 0,01 Sv
Lygiavertės dozės galia	Sivertas per sekundę, Sv/s	REM/s, rem/s	1 rem/s = 0,01 Sv/s
Ekspozicinė dozė	Kulonas kilograme, C/kg	Rentgenas, R	1 R = $2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$
Ekspozicinės dozės galia	Amperas kilograme, A/kg	Rentgenas per sekundę, R/s	1 R/s = $2,58 \cdot 10^{-4} A/kg$

6. Tyrimo metodika

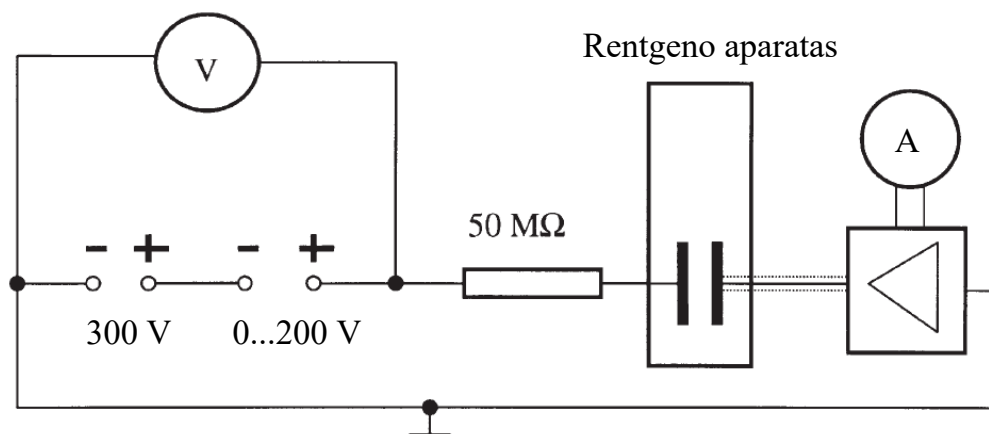
6.1. Tyrimo metodo teorija

Šiame darbe naudojamas plokščiasis kondensatorius, kuris patalpintas į rentgeno spinduliuotės pluoštą. Norint išmatuoti vidutinę ekspozicinės dozės galią, reikia išmatuoti krūvį per laiko vienetą ir oro masę, kurioje tas krūvis buvo sukurtas, o paskui krūvį per laiko vienetą padalinti iš masės (žr. ekspozicinės dozės apibrėžtį (1)). Jeigu visi spinduliuotės sukurtieji krūvininkai pasiekia kondensatoriaus elektrodus ir jeigu neatsiranda naujų krūvininkų (t. y. nevyksta antrinis jonizavimas dėl elektronų greitėjimo elektriniame lauke), tada spinduliuotės sukurtas krūvis per laiko vienetą yra lygus kondensatoriaus srovės stipriui I . Vadinasi, vidutinė ekspozicinės dozės galia yra lygi

$$\langle P_e \rangle = \frac{I}{m}; \quad (2)$$

čia m oro masė erdvės srityje, iš kurios surenkami krūvininkai, o skliaustai „(...)“ žymi erdvinį vidurkį.

Taigi, šiame darbe matuojamas jonizacijos srovės stipris I . Matavimo įrangos elektrinė schema pateikta 1 pav. Kadangi šiame darbe naudojamas įtampos šaltinis su dviem nepriklausomais išėjimais, kurių vieno įtampa gali būti reguliuojama nuo 0 iki 300 V, o kito įtampa yra pastovi ir apytiksliai lygi 300 V, tai, norint užduoti įtampą nuo 300 V iki 500 V, reikia abu išėjimus sujungti nuosekliai (tai parodyta šioje scheme). Norint užduoti kondensatoriaus įtampą nuo 0 iki 300 V, pastovios įtampos išėjimas neturi būti naudojamas.



1 pav. Jonizacijos srovės matavimo įrangos elektrinė schema

Norint nustatyti oro srities, iš kurios surenkami krūvininkai, masę m , reikia žinoti jos geometrinę formą ir matmenis. Rentgeno spinduliuotės pluoštas yra kūgio formos. To kūgio viršūnė yra ties rentgeno vamzdžio anodu (iš kurio sklinda rentgeno spinduliuotė), o kūgio kampą užduoda apskrita diafragma, kurios skersmuo lygus d (žr. 2 pav.). Kaip parodyta 2 pav., oro sritis, iš kurios surenkami krūvininkai, – tai erdvė tarp kondensatoriaus elektrodų ir minėtojo kūgio sankirta. Pažymėjus šios srities (nupjautojo kūgio) pagrindų spindulius r_1 ir r_2 , o tų pagrindų horizontaliąsias koordinates x_1 ir x_2 , jos tūris turi būti skaičiuojamas šitaip:

$$V = \frac{\pi(x_2 - x_1)}{3} (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2). \quad (3)$$

Spinduliai r_1 ir r_2 yra lygūs

$$r_1 = \frac{x_1 d}{2x_0}, \quad r_2 = \frac{x_2 d}{2x_0}; \quad (4)$$

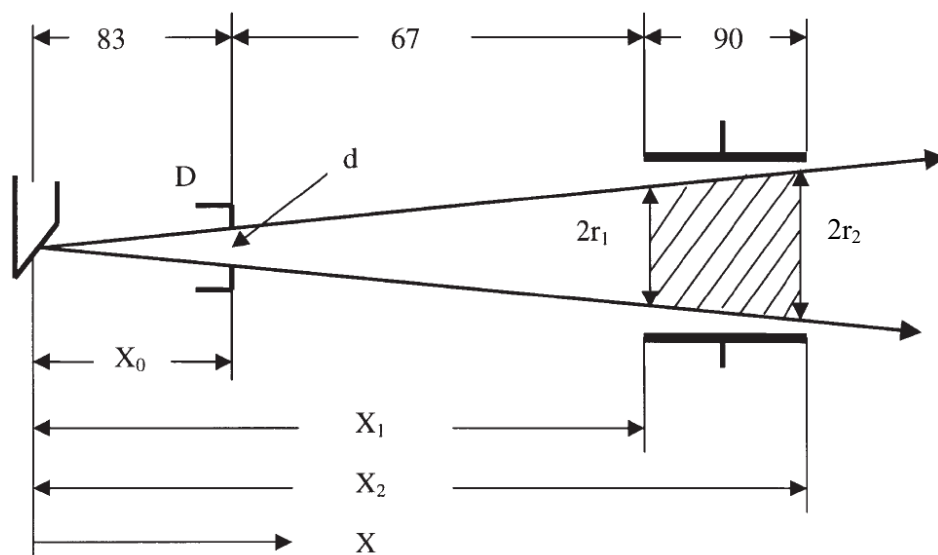
čia x_0 yra atstumas tarp spinduliuotės šaltinio (rentgeno vamzdžio anodo) ir diafragmos (žr. 2 pav.).

Oro masė srityje, kurio tūris V , yra lygi

$$m = V \rho; \quad (5)$$

čia ρ yra oro tankis. 20° temperatūros normalaus slėgio ($1,013 \cdot 10^5$ Pa) sauso oro tankis yra $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Diafragmos skersmuo d neturi būti pernelyg didelis, kad spinduliuotės pluoštas nekludytų kondensatoriaus elektrodų (žr. 2 pav.). Priešingu atveju spinduliuotė išlaisvintų elektronus ne tik iš oro molekulių, bet ir iš kondensatoriaus elektrodų, o tai iškraipytų elektros srovę (t. y. matuojamoji srovė atspindėtų ne vien spinduliuotės sąveiką su oro molekulėmis, bet ir spinduliuotės sąveiką su kondensatoriaus elektrodų medžiaga).



2 pav. Matavimo geometrija ir atstumai, kurie reikalingi apskaičiuojant oro tūrį, iš kurio surenkami krūvininkai (visi atstumai išreikšti milimetrais)

Reikia turėti omenyje, kad ekspozicinė ir sugertoji dozė (ir jos galia) yra lokalūs dydžiai, t. y. jie apibrėžiami konkrečiam erdvės taškui (būtent todėl (1) formulėje naudojamas nykstamųjų dydžių santykis). Jeigu spinduliuotės intensyvumas arba medžiagos savybės kinta erdvėje, tada vidutinė ekspozicinės dozės galia (apskaičiuota pagal (2) formulę) gali skirtis nuo lokalsios ekspozicinės dozės galios skirtinguose erdvės taškuose. Kadangi šiame darbe spinduliuotės šaltinis yra praktiškai taškinis, tai spinduliuotės intensyvumas yra apytiksliai atvirkščiai proporcingas atstumui iki šaltinio kvadratui. Todėl ties kondensatoriaus kairiuoju kraštu, t. y. taške x_1 (žr. 2 pav.), spinduliuotės intensyvumas ir lokalią ekspozicinės dozės galia yra didesni, negu ties kondensatoriaus dešiniuoju kraštu, t. y. taške x_2 . Be to, pasireiškia ir rentgeno spinduliuotės sugertis ore (vario būdingosios rentgeno spinduliuotės K-L linijos, kurios bangos ilgis 154 pm, sugerties koeficientas normalaus slėgio ore yra maždaug $0,01 \text{ cm}^{-1}$). Dėl šios sugerties lokaliųjų ekspozicinės dozės galių taškuose x_1 ir x_2 santykis dar labiau padidėja. Galima įrodyti, kad, esant tokioms atstumų x_0 , x_1 ir x_2 vėrtėms kaip parodyta 2 pav., vidutinė ekspozicinės dozės galia yra apytiksliai lygi lokalsios ekspozicinės dozės galiai pusiaukelėje tarp taškų x_1 ir x_2 [2].

Padalinus $\langle P_e \rangle$ vėrtę iš elementariojo krūvio e , gaunamas vidutinis jonizacijos įvykių (jonų porų) skaičius per laiko vienetą masės vienetu. Padauginus šį skaičių iš vidutinio spinduliuotės dalelės energijos sumažėjimo vienai jonų porai (W), gaunama vidutinė sugertosios dozės galia $\langle P_s \rangle$:

$$\langle P_s \rangle = \langle P_e \rangle \frac{W}{e}; \quad (6)$$

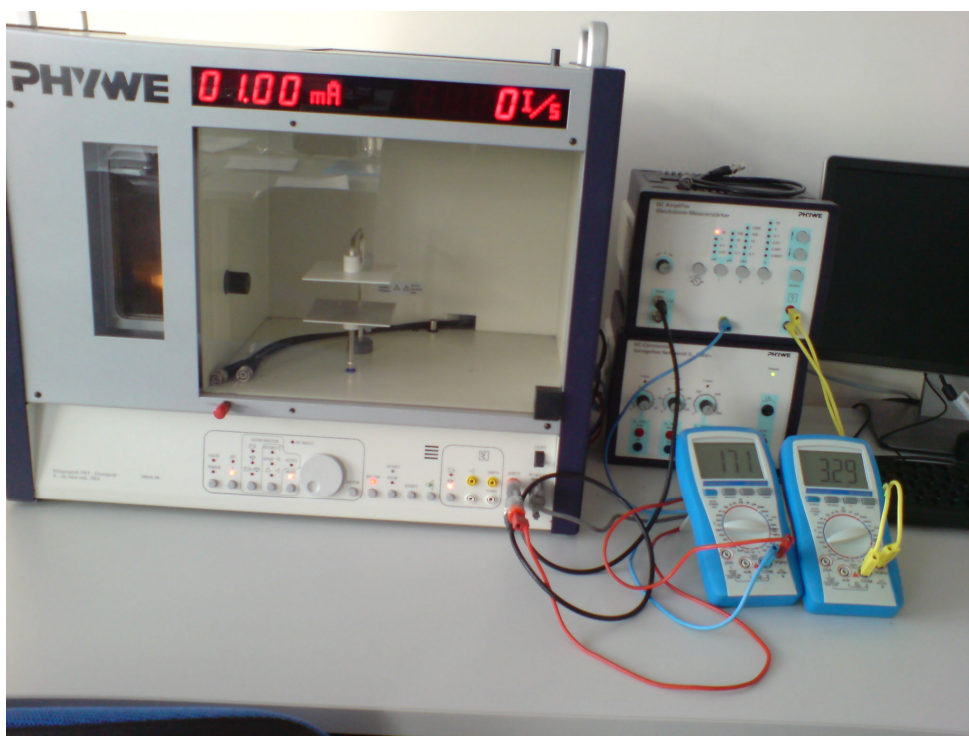
W vėrtė, kai orą veikia rentgeno spinduliuotė, yra apytiksliai lygi 33 eV (plg. su vėrtėmis, kurios pateiktos [1] knygos 312 p.).

6.2. Darbo priemonės

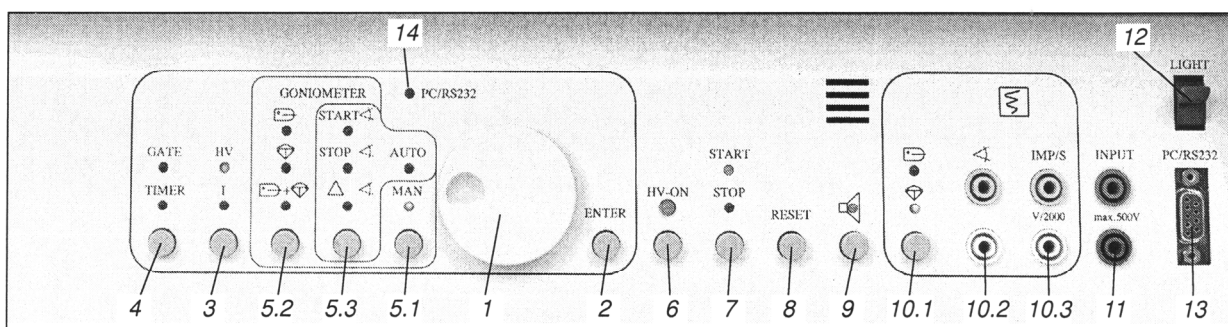
Šiame darbe naudojamas Vokietijos kompanijos „Phywe Systeme“ mokomosios įrangos komplektas. Darbo įrangą sudaro:

- 1) rentgeno aparatas su vario, molibdeno arba geležies anodu (anodo įtampa gali būti reguliuojama nuo 0 iki 35 kV; anodo srovė gali būti reguliuojama nuo 0 iki 1 mA);
- 2) plokščiasis kondensatorius;
- 3) reguliuojamas nuolatinės įtampos šaltinis;
- 4) nuolatinės įtampos (operacinis) stiprintuvas, kuris šiame darbe naudojamas silpnai srovei matuoti;
- 5) du skaitmeniniai multimetrai;
- 6) 50 M Ω varžos rezistorius.

3 pav. parodytas matavimo įrangos bendras vaizdas. 4 pav. parodyta rentgeno aparato priekinės sienelės apatinė dalis, kurioje išdėstyti valdymo elementai. 5 ir 6 pav. parodytas nuolatinės įtampos stiprintuvo ir įtampos šaltinio vaizdas iš priekio. **Pastaba:** Du BNC kabeliai, kurie yra rentgeno aparato kameros viduje (žr. 3 pav.), yra naudojami kitiems matavimams, kurie nesusiję su šiuo laboratoriniu darbu. Darbo metu tų kabelių nereikia liesti. Kompiuteris, kuris stovi šalia rentgeno aparato, taip pat nėra būtinas šiam darbui. Tačiau tą kompiuterį galima panaudoti ir šiame darbe: matavimo duomenis galima įvesti į failą, o baigus matuoti tą failą atspausdinti.



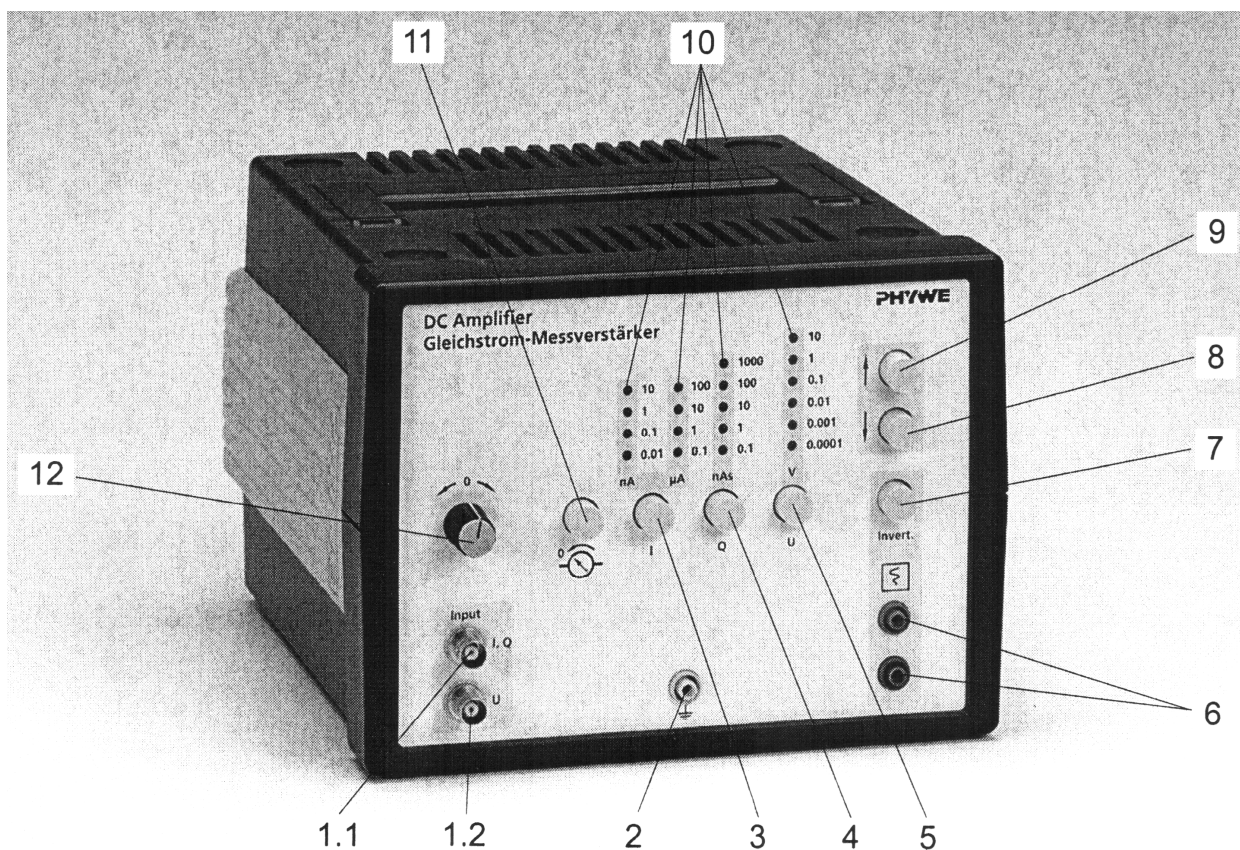
3 pav. Matavimo įrangos bendras vaizdas



4 pav. Rentgeno aparato rankinio valdymo elementai

Toliau yra paaiškinti rentgeno aparato valdymo elementai, kurie reikalingi šiam darbui (numeriai atitinka 4 pav.):

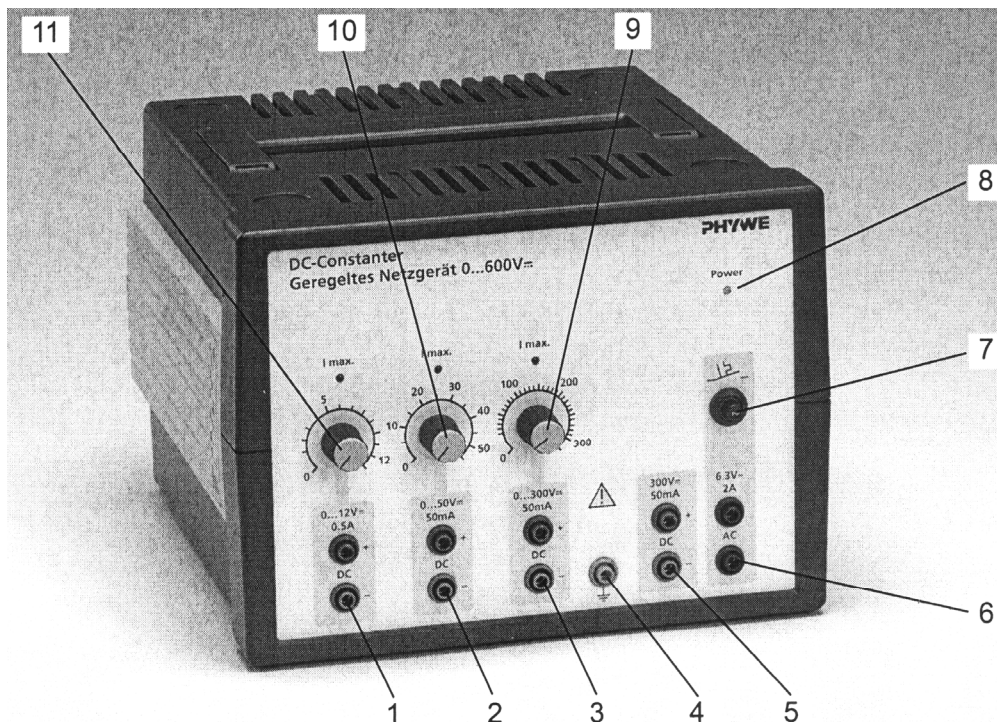
1. Anodo įtampos arba anodo srovės rankinio reguliavimo ratukas (reguliuojamas dydis pakinta tik nuspaudus mygtuką „Enter“).
2. Mygtukas „Enter“. Jis užfiksuoja vertę, kuri užduota ratuku (1).
3. Mygtukas „HV-I“. Nuspaudus šį mygtuką, galima užduoti, kuris iš rentgeno vamzdžio veikia nusakančių dydžių (anodo įtampa ar anodo srovė) turi keistis, sukant reguliavimo ratuką (1). Pasirinktąjį dydį parodo vienas iš dviejų šviesos diodų, kurie yra virš mygtuko „Enter“ (šviesos diodas „HV“ atitinka anodo įtampą, o „I“ atitinka anodo srovę). Pasirinktojo dydžio vertė būna parodyta rentgeno aparato priekinės sienelės viršutinėje dalyje (žr. 3 pav.).
6. Mygtukas „HV-ON“. Nuspaudus šį mygtuką, prie rentgeno vamzdžio anodo prijungiama anksčiau užduota aukštoji įtampa, įjungiamas katodo kaitinimas ir rentgeno vamzdžiu pradeda tekėti anksčiau užduota srovė. Tada pradeda šviesti šviesos diodas, kuris yra virš mygtuko „HV-ON“. Dar kartą nuspaudus mygtuką „HV-ON“, anodo įtampa ir katodo kaitinimas išjungiami, o minėtasis šviesos diodas užgesa.
11. Išvada kondensatoriaus įtampos prijungimui. Apatinis (mėlynas) išvadas skirtas įžeminimui ir operaciniam stiprintuvui prijungti. Viršutinis (raudonas) išvadas skirtas teigiamai nuolatinei įtampai (iki 500 V) prijungti. Darbo saugos tikslais ši įtampa turi būti jungiama per 50 MΩ rezistorių (žr. 1 pav.).



5 pav. Nuolatinės įtampos stiprintuvo vaizdas iš priekio

Toliau yra paaiškinti nuolatinės įtampos stiprintuvo valdymo elementai, kurie reikalingi šiam darbui (numeriai atitinka 5 pav.):

- 1.1. Matuojamo signalo prijungimo išvadas elektros srovės arba krūvio matavimo veikoje.
2. Įžeminimo išvadas.
3. Elektros srovės matavimo veikos pasirinkimo mygtukas. Šio darbo metu jis turi būti nuspauštas.
6. Išėjimo išvada (prie jų turi būti jungiamas įtampos matuoklis, pvz., multimetras, kuris galėtų matuoti 0 – 10 V dydžio įtampą). Didžiausia išėjimo įtampa yra maždaug 10,5 V. Kai pasiekama ši vertė, tada išjungia vidinis įtampos ribotuvas ir įtampa tarp tų išvadų nustoja būti proporcinga tikrajai matuojamos įtampos vertei. Todėl svarbu pasirinkti tokias matavimo ribas, kad įtampa tarp šių išvadų niekada neviršytų 10 V.
7. Mygtukas „Invert“. Nuspaudus šį mygtuką, pasikeičia išėjimo įtampos ženklas. Šio darbo metu šis mygtukas neturi būti nuspauštas.
8. Mygtukas „↓“. Nuspaudus šį mygtuką, sumažėja matuojamo dydžio (pvz., elektros srovės) didžiausia leidžiama vertė, t. y., matuojamo dydžio vertė, kuriai esant, įtampa tarp išėjimo išvadų (6) yra 10 V.
9. Mygtukas „↑“. Nuspaudus šį mygtuką, padidėja matuojamo dydžio (pvz., elektros srovės) didžiausia leidžiama vertė, t. y., matuojamo dydžio vertė, kuriai esant, įtampa tarp išėjimo išvadų (6) yra 10 V.
10. Šviesos diodai, kurie rodo pasirinktą veiką (srovės, krūvio arba įtampos matavimą) ir matuojamo dydžio (srovės, krūvio arba įtampos) didžiausią leidžiamą vertę, t. y., vertę, kuriai esant, įtampa tarp išėjimo išvadų (6) yra lygi 10 V. Pvz., jeigu šviečia diodas „10 nA“, tai reiškia, kad, kai įtampa tarp išėjimo išvadų (6) yra lygi 10 V, matuojama elektros srovė yra lygi 10 nA. Vadinasi, šiuo atveju 1 V atitinka 1 nA. Jeigu šviečia diodas „1 nA“, tai reiškia, kad, kai įtampa tarp išėjimo išvadų (6) yra lygi 10 V, matuojama elektros srovė yra lygi 1 nA. Vadinasi, šiuo atveju 1 V atitinka 0,1 nA.
12. Nulio nustatymo rankenėlė.



6 pav. Reguliuojamo nuolatinės įtampos šaltinio vaizdas iš priekio

Toliau yra paaiškinti reguliuojamo nuolatinės įtampos šaltinio valdymo elementai, kurie reikalingi šiam darbui (numeriai atitinka 6 pav.):

3. Nuolatinės reguliuojamos įtampos (0 – 300 V) išvadai (teigiamasis poliūs raudonas, o neigiamasis mėlynas).
4. Įžeminimo išvadas.
5. Nuolatinės nereguliuojamos įtampos (maždaug 330 V) išvadai (teigiamasis poliūs raudonas, o neigiamasis mėlynas).
9. Įtampos reguliavimo (0 – 300 V) rankenėlė.

6.3. Matavimo tvarka

1. Pagal 1 pav. schemą ir pagal prietaisų aprašymus, kurie buvo pateikti 6.2 poskyryje, prijungiami laidai. Nuolatinės įtampos stiprintuvo ir reguliuojamos įtampos šaltinio įžeminimo išvadai turi būti sujungti tarpusavyje. Be to, nereguliuojamos 330 V įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 5) neigiamasis (mėlynasis) poliūs taip pat turi būti visą laiką prijungtas prie įžeminimo išvado, o reguliuojamos įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 3) teigiamasis (raudonasis) poliūs turi būti visą laiką prijungtas prie rentgeno aparato raudonojo išvado „INPUT“ (4 pav. – Nr. 11, viršutinis išvadas) per 50 M Ω rezistorių. Kol reikalinga mažesnė už 300 V kondensatoriaus įtampa, nereguliuojamos įtampos išėjimas nėra naudojamas, t. y. reguliuojamos įtampos išėjimo neigiamasis (mėlynasis) išvadas turi būti sujungtas su įžeminimo išvadu. Kai reikia didesnės įtampos, reguliuojamos įtampos išėjimo neigiamasis išvadas turi būti sujungtas su nereguliuojamos įtampos išėjimo teigiamu (raudonu) išvadu. Operacinio stiprintuvo išvadas „I, Q“ (5 pav. – Nr. 1.1) turi būti BNC kabeliu sujungtas su rentgeno aparato mėlynu išvadu (4 pav. – Nr. 11, apatinis išvadas).

2. Įjungiamas rentgeno aparatas (jungiklis yra ant užpakalinės sienelės). Užsirašoma anodo medžiaga (ji užrašyta ant rentgeno aparato kairiosios sienelės). Nors šio laboratorinio matavimo duomenų analizei anodo medžiagos žinojimas nėra būtinas, tačiau ta informacija gali būti naudinga, lyginant duomenis, gautus su skirtingais anodais (nuo anodo medžiagos priklauso jonizacijos srovės stipris).

3. Rentgeno aparatas atidaromas. Tuo tikslu reikia nuspausti ir pasukti į dešinę (pagal laikrodžio rodyklę) raudoną mygtuką, kuris yra ties rentgeno aparato durelių kairiuoju apatiniu kampu. Po to dureles reikia pastumti į kairę.

4. Ant rentgeno vamzdžio bloko išėjimo angos užmaunama 2 mm skersmens diafragma (diafragmų saugojimo skyrelis yra rentgeno aparato viršuje). Iš viso yra trys diafragmos: 1 mm, 2 mm ir 5 mm. Šiam laboratoriniam darbui reikalingos tik 2 mm ir 5 mm diafragmos.

5. Rentgeno aparato durelės uždaromos. Uždarius dureles, reikia pasukti į kairę ir ištraukti minėtąjį raudoną mygtuką. Kad vėliau būtų įmanoma įjungti aukštą įtampą, reikia dar kartą iki galo paspausti tą raudoną mygtuką (nesukant).

6. Įjungiami abu multimetrai. Multimetas, kuris prijungtas prie nuolatinės įtampos stiprintuvo, turi būti nuolatinės įtampos matavimo veikoje (matavimo riba 20 V), o multimetas, kuris prijungtas prie reguliuojamo įtampos šaltinio, turi būti aukštos nuolatinės įtampos matavimo veikoje (matavimo riba 1000 V).

7. Kondensatoriaus įtampos reguliavimo rankenėlė (6 pav. – Nr. 9) pasukama į kairiąją kraštinę padėtį. Įjungiami nuolatinės įtampos stiprintuvas ir reguliuojamas įtampos šaltinis.

8. Nuspaudžiamas stiprintuvo mygtukas „I“ (t. y. užduodama srovės matavimo veika) ir to stiprintuvo mygtukais „↓“ ir „↑“ užduodama matavimo riba „1 nA“ (šiuo atveju stiprintuvo išėjimo įtampos, kurią rodo multimetas, vertė, išreiškta voltais, yra 10 kartų didesnė už matuojamą srovę, išreikštą nanoamperais).

9. Įsitikinama, kad rentgeno aparato aukštos įtampos ir katodo kaitinimo įjungimo indikatorius „HV-ON“ nešviečia (4 pav. – Nr. 6). Jeigu jis šviečia, reikia nuspausti po juo esantį mygtuką, kad tas šviesos diodas užgestų.

10. Nuspaudus rentgeno aparato mygtuką „HV-I“ (4 pav. – Nr. 3), pasiekama, kad šviestų šviesos diodas „HV“. Sukant ratuką (4 pav. – Nr. 1), nustatoma didžiausia rentgeno vamzdžio anodo įtampa 35 kV (ji atvaizduota rentgeno aparato priekinės sienelės viršuje, kaip parodyta 3 pav.). Nuspaudžiamas rentgeno aparato mygtukas „ENTER“ (4 pav. – Nr. 2).

11. Nuspaudus rentgeno aparato mygtuką „HV-I“ (4 pav. – Nr. 3), pasiekama, kad šviestų šviesos diodas „I“. Sukant ratuką (4 pav. – Nr. 1), nustatoma didžiausia rentgeno vamzdžio anodo srovė 1 mA (ji atvaizduota rentgeno aparato priekinės sienelės viršuje). Nuspaudžiamas rentgeno aparato mygtukas „ENTER“ (4 pav. – Nr. 2).

12. Nežymiai pasukus kondensatoriaus įtampos reguliavimo rankenėlę (6 pav. – Nr. 9), nustatoma reikalinga kondensatoriaus įtampos vertė (ją rodo prie įtampos šaltinio prijungtas multimetas). Pradinė tos įtampos vertė turėtų būti maždaug 20 V.

13. Sukant stiprintuvo nulio nustatymo rankenėlę (5 pav. – Nr. 12), pasiekama, kad multimetras, kuris prijungtas prie to stiprintuvo, parodymai būtų apytiksliai lygūs nuliui. Jeigu nepavyksta nustatyti nulio, tada reikia įsidėmėti vidutinius multimetras parodymus (paskui juos reikės atimti iš išmatuotos vertės). **Pastaba:** Stiprintuvo išėjimo įtampa reaguoja į įvairius mažus elektros krūvius aplinkoje. Todėl yra neišvengiami multimetras parodymų svyravimai ir nulio slinkis. Siekiant sumažinti šiuos nepageidaujamus efektus, matavimų metu reikia vengti judėjimo stiprintuvo aplinkoje.

14. Nuspaudžiamas rentgeno aparato aukštos įtampos ir katodo kaitinimo įjungimo mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi pradėti šviesti virš jo esantis šviesos diodas.

15. Palaukus, kol nustos augti stiprintuvo išėjimo įtampa (ją rodo prie stiprintuvo prijungtas multimetas), užsirašoma atitinkama kondensatoriaus srovės vertė. **Pastaba:** Jeigu stiprintuvo išėjimo įtampa viršija 10 V, tada, kaip minėta 6.2 poskyryje, būtinai reikia padidinti matavimo ribą, t. y. vietoj šviesos diodo „1 nA“ turi šviesti „10 nA“ (šiuo atveju stiprintuvo išėjimo įtampos, kurią rodo multimetas, vertė, išreiškta voltais, yra lygi matuojamai srovei, išreikštai nanoamperais). Jeigu stiprintuvo išėjimo įtampa yra mažesnė už 1 V, tada, siekiant padidinti matavimų tikslumą, galima sumažinti matavimo ribą (tačiau tai nėra būtina).

16. Išjungiami rentgeno aparato anodo įtampa ir katodo kaitinimas. Tuo tikslu nuspaudžiamas mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi užgesti virš to mygtuko esantis šviesos diodas. Kelias sekundes palaukiama, kol stiprintuvo išėjimo įtampa (t. y. kondensatoriaus srovė) sumažės iki nulio.

17. 12 – 16 žingsniai kartojami, keičiant kondensatoriaus įtampą nuo 20 V iki 300 V maždaug kas 20 V (intervalai tarp įtampos verčių nebūtinai turi būti vienodi).

18. Norint naudoti didesnes už 300 V kondensatoriaus įtampas, reikia prie reguliuojamos įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 3) nuosekliai prijungti nereguliuojamos įtampos išėjimą (6 pav. – Nr. 5), kurio įtampa yra pastovi ir apytiksliai lygi 330 V. Tuo tikslu reikia išjungti įtampos šaltinį, pasukti įtampos reguliavimo rankenėlę (6 pav. – Nr. 9) į kairiąją kraštinę padėtį, prijungti reguliuojamos įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 3) neigiamąjį (mėlyną) išvadą prie nereguliuojamos įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 5) teigiamojo (raudono) išvado ir vėl įjungti įtampos šaltinį. **Dėmesio!** Įtampos šaltinio laidus galima perjunginėti tik išjungus tą įtampos šaltinį.

19. 12 – 16 žingsniai kartojami, keičiant kondensatoriaus įtampą nuo 330 V iki 500 V maždaug kas 20 V (intervalai tarp įtampos verčių nebūtinai turi būti vienodi).

20. Reguluojamas įtampos šaltinis išjungiamas. Kondensatoriaus įtampos reguliavimo rankenėlė (6 pav. – Nr. 9) pasukama į kairiąją kraštinę padėtį.

21. Vietoj 2 mm skersmens diafragmos ant rentgeno vamzdžio užmaunama 5 mm skersmens diafragma (žr. 3 – 5 žingsnius). Įtampos šaltinio reguliuojamos įtampos išėjimo (6 pav. – Nr. 3) neigiamasis (mėlynas) išvadas vėl sujungiamas su įžeminimo išvadu. Vėl įjungiamas įtampos šaltinis.

22. Pakartojami 12 – 20 žingsniai.

Likusioje šio darbo dalyje bus matuojama kondensatoriaus srovės priklausomybė nuo rentgeno vamzdžio anodo srovės (esant didžiausiai anodo įtampai 35 kV) ir nuo anodo įtampos (esant didžiausiai anodo srovei 1 mA), naudojant 5 mm dydžio diafragmą. Anodo srovė turėtų būti keičiama nuo 0 iki 1 mA maždaug kas 0,05 mA, o anodo įtampa turėtų būti keičiama nuo 6 kV iki 35 kV maždaug kas 2 kV. Šių matavimų metu kondensatoriaus įtampa turės būti pastovi ir apytiksliai lygi 500 V (t. y. daugiau nereikės sukinėti kondensatoriaus įtampos reguliavimo rankenėlės).

23. Sukant ratuką, kuris yra ant rentgeno aparato (4 pav. – Nr. 1), nustatoma reikalinga rentgeno vamzdžio anodo srovė (anodo įtampa turi būti didžiausia, t. y. 35 kV). Pradinė anodo srovės vertė turi būti lygi nuliui. Nuspaudžiamas rentgeno aparato mygtukas „ENTER“ (4 pav. – Nr. 2).

24. Sukant stiprintuvo nulio nustatymo rankenėlę (5 pav. – Nr. 12), pasiekama, kad multimetro, kuris prijungtas prie to stiprintuvo, parodymai būtų apytiksliai lygūs nuliui. Jeigu nepavyksta nustatyti nulio, tada reikia įsidėmėti vidutinius multimetro parodymus (paskui juos reikės atimti iš išmatuotos vertės).

25. Nuspaudžiamas rentgeno aparato aukštos įtampos ir katodo kaitinimo įjungimo mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi pradėti šviesti virš jo esantis šviesos diodas.

26. Palaukus, kol nustos augti stiprintuvo išėjimo įtampa (ją rodo prie stiprintuvo prijungtas multimetras), užsirašoma atitinkama kondensatoriaus srovės vertė.

27. Išjungiami rentgeno aparato anodo įtampa ir katodo kaitinimas. Tuo tikslu nuspaudžiamas mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi užgesti virš to mygtuko esantis šviesos diodas. Kelias sekundes palaukiama, kol stiprintuvo išėjimo įtampa (t. y. kondensatoriaus srovė) sumažės iki nulio.

28. 23 – 27 žingsniai kartojami, keičiant anodo srovę nuo 0 iki 1 mA maždaug kas 0,05 mA (intervalai tarp anodo srovės verčių nebūtinai turi būti vienodi).

29. Sukant ratuką, kuris yra ant rentgeno aparato (4 pav. – Nr. 1), nustatoma reikalinga rentgeno vamzdžio anodo įtampa (anodo srovė turi būti didžiausia, t. y. 1 mA). Pradinė anodo įtampos vertė turi būti lygi maždaug 6 kV. Nuspaudžiamas rentgeno aparato mygtukas „ENTER“ (4 pav. – Nr. 2).

30. Sukant stiprintuvo nulio nustatymo rankenėlę (5 pav. – Nr. 12), pasiekama, kad multimetro, kuris prijungtas prie to stiprintuvo, parodymai būtų apytiksliai lygūs nuliui. Jeigu nepavyksta nustatyti nulio, tada reikia įsidėmėti vidutinius multimetro parodymus (paskui juos reikės atimti iš išmatuotos vertės).

31. Nuspaudžiamas rentgeno aparato aukštos įtampos ir katodo kaitinimo įjungimo mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi pradėti šviesti virš jo esantis šviesos diodas.

32. Palaukus, kol nustos augti stiprintuvo išėjimo įtampa (ją rodo prie stiprintuvo prijungtas multimetras), užsirašoma atitinkama kondensatoriaus srovės vertė.

33. Išjungiami rentgeno aparato anodo įtampa ir katodo kaitinimas. Tuo tikslu nuspaudžiamas mygtukas „HV-ON“ (4 pav. – Nr. 6). Tada turi užgesti virš to mygtuko esantis šviesos diodas. Kelias sekundes palaukiama, kol stiprintuvo išėjimo įtampa (t. y. kondensatoriaus srovė) sumažės iki nulio.

34. 29 – 33 žingsniai kartojami, keičiant anodo įtampą nuo 6 kV iki 35 kV maždaug kas 2 kV (intervalai tarp anodo įtampos verčių nebūtinai turi būti vienodi).

35. Apytiksliai išmatuojamas rentgeno spindulio pėdsako (apskritos dėmės) ant fluorescuojančio ekrano, kuris pritvirtintas ant rentgeno aparato dešinėsios sienelės (žr. 3 pav.), skersmuo. Kad ta dėmė taptų matoma, reikia sumažinti aplinkos apšvietimo įtaką, naudojant juodo audinio gabalą (žiūrėti reikia iš išorės, o ne iš rentgeno aparato sienelės vidinės pusės). Kadangi tos dėmės kraštai nėra ryškūs, tai jos spindulį įmanoma išmatuoti tik labai apytiksliai (maždaug 5 mm tikslumu). **Pastaba:** Atstumas tarp diafragmos ir fluorescuojančio ekrano yra 35 cm. Taikant elementarius trigonometrinius sąryšius, pagal rentgeno pluošto pėdsako skersmenį ir atstumą tarp diafragmos ir ekrano galima apskaičiuoti atstumą x_0 tarp rentgeno vamzdžio anodo ir diafragmos (žr. 2 pav. ir (4) formules).

36. Rentgeno aparatas, įtampos stiprintuvai ir kondensatoriaus įtampos šaltinis išjungiami.