

Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave

Ing. Marek Hudák

Autoreferát dizertačnej práce

Návrh vysokofrekvenčného systému cyklotrónu DC-72 CCSR

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor
v odbore doktorandského štúdia:

11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Bratislava 2009

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej fyziky a techniky, Fakulty elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Marek Hudák
EVPÚ a.s., Trenčianska 19, 018 51 Nová Dubnica

Školiteľ: Ing. Ján Kliman, CSc. Slovenská akadémia vied
Fyzikálny ústav SAV Dúbravská cesta 9,
845 11 Bratislava 45

Oponenti: prof. Ing. Jozef Jasenek, PhD., Katedra teoretickej
a experimentálnej elektrotechniky, Fakulta
elektrotechniky a informatiky STU, Ilkovičova 3
812 19 Bratislava 1

Ing. Jozef Dobrovodský, PhD. Centrum ionizujúceho
žiarenia SMÚ, Karloveská 63, 842 55 Bratislava 4

Ing. Vladislav Matoušek, CSc. Fyzikálny ústav SAV,
Dúbravská cesta 9, 812 19 Bratislava 45

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa o h.

na Katedre jadrovej fyziky a techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou dňa predsedom spoločnej odborovej komisie vo vednom odbore 11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika.

Predseda spoločnej odborovej komisie:
prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
Katedra jadrovej fyziky FMFI UK, Bratislava

OBSAH

1	Úvod	2
2	Súčasný stav problematiky návrhu	3
3	Ciele dizertačnej práce	4
4	Súhrn výsledkov dizertačnej práce	4
4.1	REZONANČNÁ FREKVENCIA	5
4.2	KVALITA REZONANČNÉHO OBVODU	7
4.3	VÝKONOVÉ STRATY	8
4.4	TRIMER DOLADENIA FREKVENCIE	10
4.5	PRISPÔSOBENIE VÄZBY NAPÁJACIEHO VEDENIA S REZONÁTOROM	11
5	Záver	12
6	Literatúra použitá v autoreferáte	13
7	Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce	14
	Summary	17

1 Úvod

V priebehu krátkeho obdobia urýchľovače prešli veľkým vývojom, od malých stolných zariadení až po gigantické stroje. V súčasnosti sa otázky teórie urýchľovačov, ich projektovania a stavby vyčlenili do samostatnej časti experimentálnej fyziky.

Jedným z mnohých typov urýchľovačov je aj cyklotrón, ktorý sa zaraďuje medzi cyklické rezonančné urýchľovače [1]. Vysoká kinetická energia častíc sa v ňom dosahuje vďaka mnohonásobnému synchronnému preletu zväzku nabitých častíc, tými istými urýchľovacími štrbinami s vysokofrekvenčným elektrickým poľom. Synchronizácia sa dosahuje vďaka konštantnej frekvencii obehu iónu v magnetickom poli cyklotrónu.

Cyklotróny sa projektujú v závislosti od ich plánovanej funkcie, od malých jednoúčelových, špecializovaných cyklotrónov na výrobu rádioizotopov, určených na diagnostiku a terapiu onkologických ochorení, až po veľké zariadenia určené na základný výskum v jadrovej fyzike, fyzike častíc alebo fyzike pevných látok.

Moderné cyklotróny, hlavne izochrónne [2], dávajú možnosť získať urýchlené zväzky iónov v širokom rozmedzí hmotností aj energií. S použitím ľahkých iónov sa vyrábajú rádioaktívne izotopy používané v medicíne, vykonávajú sa práce spojené s analýzou rôznych materiálov a tiež na aktiváciu súčiastok na kontrolu ich odolnosti proti opotrebovaniu. Vykonáva sa terapia a biologické vyšetrovanie, skúma sa vplyv ožiarenia rýchlymi iónmi a neutrónmi na materiál, a biologické objekty. Taktiež sa využívajú pri štúdiu mechanizmov jadrových reakcií a spektrometrii nových izotopov. Dostatočne veľké možnosti predstavuje použitie ťažkých iónov. S ťažkými iónmi je spojený významný pokrok v oblasti výskumu delenia jadier, štúdia mechanizmu vzájomného pôsobenia zložených jadier a mnohé druhé. Významné perspektívy sú spojené s praktickým použitím zväzkov ťažkých iónov v oblasti nových technológií a nových materiálov. Urýchlené ťažké ióny vytvárajú unikátnu možnosť skúmania radiačného poškodenia a štúdia radiačnej stálosti rôznych druhov materiálov. Perspektívnym smerom použitia ťažkých iónov je tiež výroba mikropórovitých filtrov, atď.

2 Súčasný stav problematiky návrhu

U väčšiny funkčných cyklotrónov ako aj vyvíjaných cyklotrónov je vysokofrekvenčný systém tvorený duantom s radiálne napojeným objemovým rezonátorom. Dané riešenie umožňuje vytvorenie optimálneho rezonančného obvodu z hľadiska konštrukčného riešenia i výkonových pomerov. Nevýhodou je zväčšenie konštrukčných rozmerov celého cyklotrónu a s ním vyzvaných nárokov na stavbu budovy cyklotrónu.

Konštrukcia rezonančného obvodu vysokofrekvenčného urýchľovacieho systému cyklotrónu DC – 72 sa skladá z dvoch duantov [3]. Každý z nich má dva štvrt'vlnové objemové rezonátory, umiestnené vertikálne vzhľadom na centrálnu rovinu cyklotrónu nahor a nadol. Prechod z duantu k objemovému rezonátoru ako aj časť samotného objemového rezonátora sú umiestnené v tele samotného magnetu, v dvoch protil'ahlých vertikálnych otvoroch. Samotný prechod sa skladá z tenkej a kónickej časti.

Pri návrhu rezonančného obvodu sa v súčasnosti čoraz častejšie využívajú trojrozmerné výpočtové programy.

Použitie trojrozmerných výpočtových programov vo fáze návrhu rezonančného obvodu však predstavuje časovo náročnú úlohu pri návrhu trojrozmerných výpočtových modelov pre rozličné konštrukčné varianty rezonančného systému (3D CAD projektovanie) ako aj pri samotnom výpočte. Nemenej zložitým je tiež analýza získaných výstupov pri hľadaní optimálneho konštrukčného riešenia rezonančného systému cyklotrónu.

3 Ciele dizertačnej práce

Ciele dizertačnej práce:

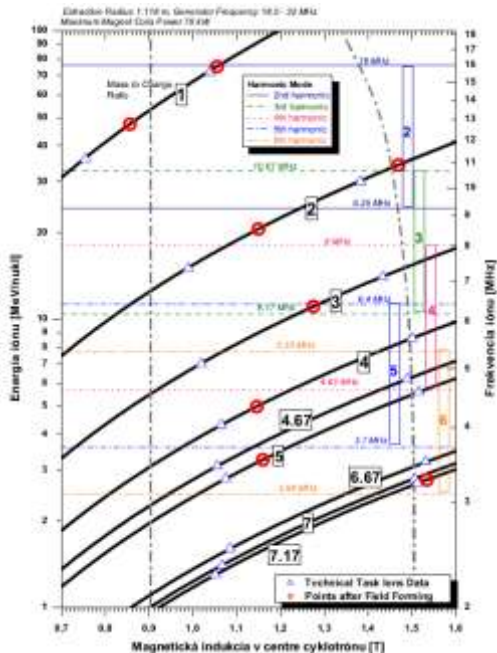
- Využitie programových prostriedkov pri návrhu jednotlivých častí rezonančného systému cyklotrónu s možnosťou syntézy jednotlivých častí do komplexnej schémy celého systému.
- Návrh a realizácia konštrukcie rezonančného systému cyklotrónu DC – 72.
- Návrh a realizácia chladenia rezonančného systému cyklotrónu.
- Porovnanie navrhovaných a reálnych parametrov rezonančného systému v pracovnom režime cyklotrónu DC – 72.

4 Súhrn výsledkov dizertačnej práce

Hlavnou časťou projektu Cyklotrónového centra Slovenskej republiky v Bratislave je izochrónny cyklotrón, ktorý umožní získať vyvedené zväzky iónov od H^- do Xe^{+18} , pri ich urýchlení do energie $72 \div 2 \text{ MeV/nukleón}$.

Pracovný diagram cyklotrónu, zobrazený na Obr. 4.1, udáva rozsah preladenia rezonančného obvodu, pri urýchlení rôzneho druhu iónov iónov od 18,25 MHz do 32 MHz. Pri výpočtoch sme vychádzali z predpokladu, že na duantoch urýchľujúceho systému bude napätie 60kV.

Na základe modelových výpočtov a optimalizácie pomocou programov POISSON SUPERFISH [4] a MicroCap [5] boli vytvorené technické zadania a podľa nich vyrobené jednotlivé časti rezonančného systému cyklotrónu DC – 72. Na cyklotróne postavenom v areáli Spojeného ústavu jadrového výskumu v SÚJV Dubna boli vykonané merania parametrov rezonančného systému v jeho pracovnom režime, t.j. v prítomnosti magnetického poľa, vo vákuu. Experimentálne dáta boli porovnané s vypočítanými.

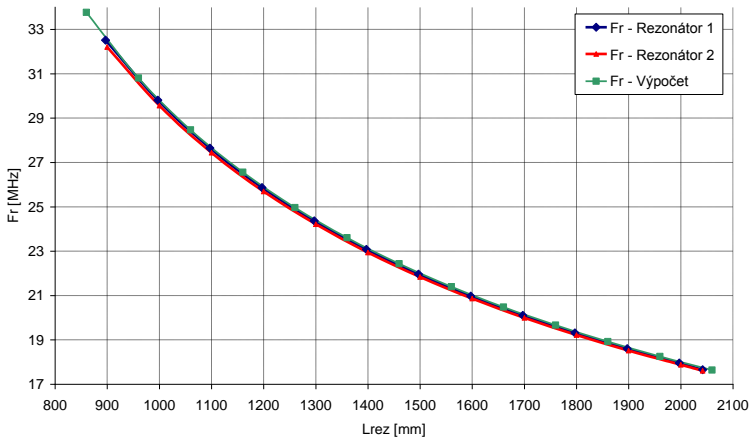


Obr. 4.1 Pracovný diagram cyklotrónu DC – 72.

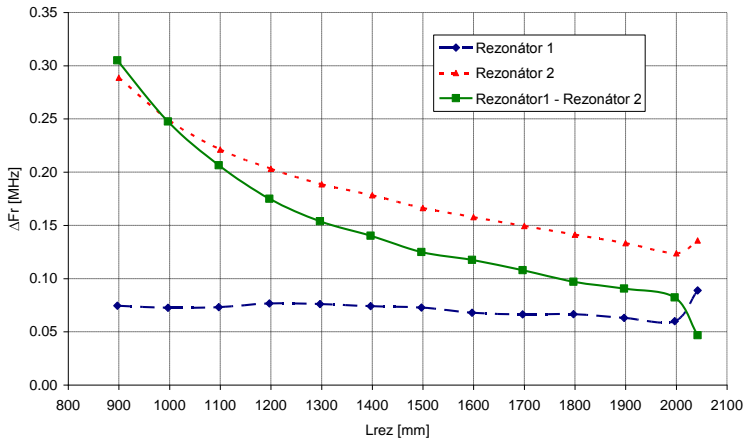
4.1 Rezonančná frekvencia

Na Obr. 4.2 je znázornená nameraná závislosť zmeny rezonančnej frekvencie od polohy skratovacej dosky pre oba rezonátory a taktiež vypočítaná závislosť rezonančnej frekvencie od polohy skratovacej dosky.

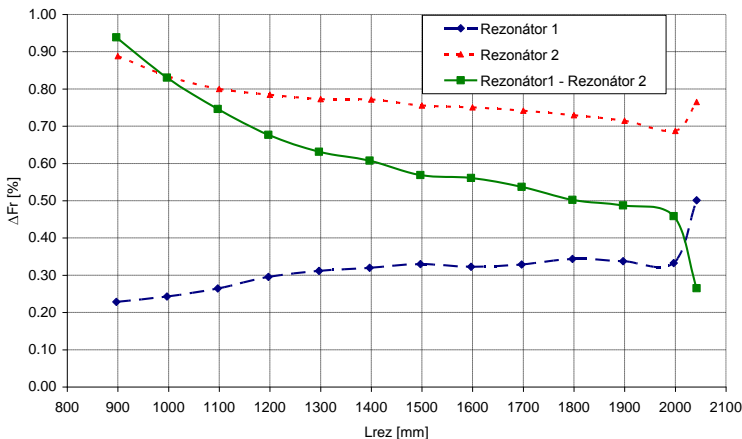
Rozdiel medzi nameranou hodnotou rezonančnej frekvencie na rezonátore č.1 a na rezonátore č. 2 a vypočítanou hodnotou rezonančnej frekvencie neprevyšuje 1% v celom frekvenčnom rozsahu preladenia (Obr. 4.3, Obr. 4.4). Taktiež rozdiel rezonančných frekvencií medzi rezonátorom č.1 a rezonátorom č. 2 neprevyšuje 1% v celom frekvenčnom rozsahu preladenia (Obr. 4.3, Obr. 4.4).



Obr. 4.2 Závislosť zmeny rezonančnej frekvencie od polohy skratovacej dosky rezonátora č.1, rezonátora č. 2 a vypočítané hodnoty rezonančnej frekvencie



Obr. 4.3 Závislosť rozdielu nameranej rezonančnej frekvencie od vypočítaných hodnôt pre rôzne polohy skratovacej dosky rezonátora č.1, rezonátora č. 2 a rozdiel medzi jednotlivými rezonátormi



Obr. 4.4 Percentuálne vyjadrenie rozdielu nameranej rezonančnej frekvencie od vypočítaných hodnôt pre rôzne polohy skratovacej dosky rezonátora č.1, rezonátora č. 2 a rozdiel medzi jednotlivými rezonátormi

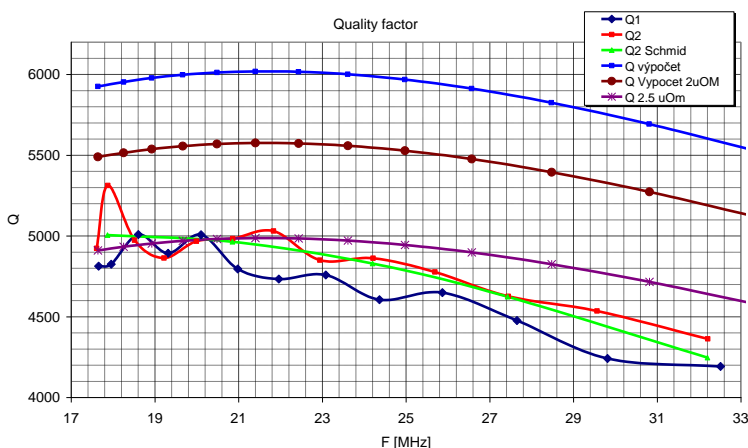
Rozdiely rezonančnej frekvencie medzi rezonátorom č. 1 a rezonátorom č.2 ako aj rozdiel oproti vypočítanej hodnote (absolútne hodnoty Obr. 4.3 a percentuálne vyjadrenie Obr. 4.4) poukazujú na správnosť použitej metódy výpočtu rezonančnej frekvencie zložitých nesymetrických objemových rezonátorov. Namerané závislosti korelujú s vypočítanými hodnotami. Rezonátory zabezpečujú frekvenčne preladenie a vyhovujú zadaným kritériám kladeným na rezonančný systém cyklotrónu DC – 72.

4.2 Kvalita rezonančného obvodu

Kvalita rezonančného obvodu je priamo závislá od merného odporu materiálu ako i od prechodového odporu v mieste spoja jednotlivých častí rezonátora. Boli vykonané merania kvality rezonančného obvodu pre oba rezonátory pri minimálnej väzbe meracích vstupov, a vyhodnotená kvalita rezonančného obvodu rezonátora č. 2 z merania impedančného prispôsobenia. Z Obr. 4.5 vyplýva, že rozdiel medzi výpočtom a meraním dosahuje rozdiel až 25% pre merný odpor medzi 1,8 $\mu\Omega$.m. Vplyv prechodového odporu

elektrických spojov jednotlivých čásí rezonátora a najmä prechodový odpor valivých kontaktov zabezpečujúcich chod skratovacej dosky a jej elektrický kontakt s vonkajším a vnútorným vodičom rezonátora je možné pri výpočte nahradiť zvýšením merného odporu medi.

Pri reálnej práci cyklotrónu dochádza k lokálnemu prehriatiu nedokonalých elektrických kontaktov a tým k ich plastickej deformácii, čím sa znižuje prechodový odpor v mieste elektrického kontaktu a zvyšuje sa hodnota kvality rezonančného obvodu. Rezonančný obvod cyklotrónu s nameranými hodnotami kvality zabezpečuje dodanie potrebnej energie urýchľovaným.



Obr. 4.5 Závislosť nameranej hodnoty kvality rezonančného obvodu pre oba rezonátory a vypočítanej hodnoty kvality rezonančného obvodu pre rôzne hodnoty merného odporu medi od rezonančnej frekvencie

4.3 Výkonové straty

Výkonové straty v rezonančnom systéme cyklotrónu (Obr. 4.6) boli vyhodnotené nepriamou metódou, pretože nie je možné priame meranie napätia na duante bez ovplyvnenia rezonančného obvodu. Na rezonátore č. 2 boli namerané rezonančné frekvencie pri dvoch krajných polohách skratovacej dosky a rôznych polohách trimra doladenia frekvencie. Zo zmeny rezonančnej

frekvencie a vypočítanej doplnkovej kapacity trimra bola vypočítaná ekvivalentná kapacita rezonančného obvodu a stratový odpor. Zo stratového odporu boli vyjadrené výkonové straty pre napätie na duantoch 60 kV.

Vzhľadom na nepriamu metódu určenia výkonových strát, kde hodnota doplnkovej kapacity bola vyjadrená len výpočtom, je dané meranie len informatívne. Na určenie reálnych výkonových strát je potrebné vykonať merania pri napájaní rezonátora z generátora energiou blízkou k pracovnej. Urýchľujúce napätie je vtedy možné určiť detektorom nízkoenergetického brzdného žiarenia, vyvolaného urýchľovanými elektrónmi na elektródach duantu.

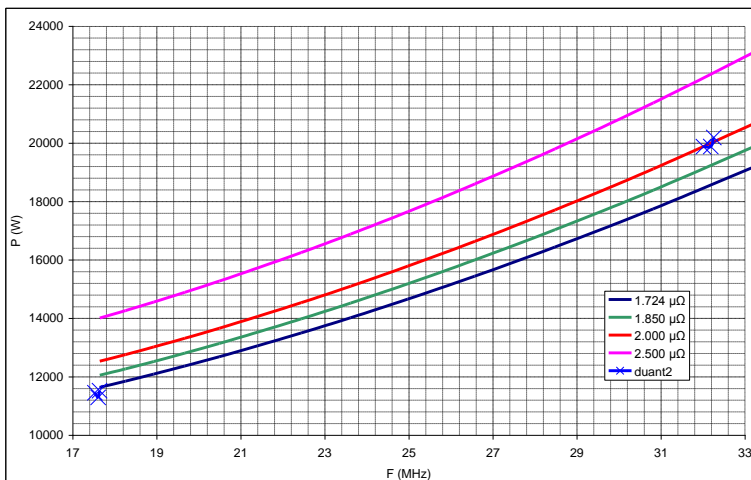
Vysokofrekvenčný generátor je projektovaný na menovitý výkon 25 kW v celom frekvenčnom pásme a má dostatočný výkon na to, aby výkonové straty v prechodových miestach a klzných kontaktoch bolo možné kompenzovať. Pri nameraných hodnotách výkonových strát je na urýchľovacej medzere duant – antiduant potrebné napätie 60 kV zabezpečujúce urýchlenie zväzku.

Rezonančný systém cyklotrónu, ako jedna z hlavných častí cyklotrónu, vytvára potrebné urýchľujúce napätie na urýchľovacích medzerách duant – antiduant. Vysokofrekvenčné prúdy pretekajúce rezonančným obvodom vedú k nahrievaniu jednotlivých častí rezonančného systému. Zvýšenie teploty môže viesť k:

1. mechanickému poškodeniu alebo roztaveniu jednotlivých častí rezonančného systému
2. zvýšeniu uvoľňovania plynov z povrchu kovových aj izolačných materiálov, čo zvyšuje pravdepodobnosť vzniku elektrického prierazu
3. zvýšeniu špecifického odporu vodivých materiálov, a následne k zvýšeniu celkových výkonových strát
4. deformácii formy alebo vzájomnej polohy jednotlivých častí rezonančného systému, čo môže viesť k vzniku elektrických prierazov, zmene rezonančnej frekvencie rezonátora, zhoršeniu podmienok dynamiky zväzku, najmä v centrálnej oblasti cyklotrónu;

pričom najdôležitejším bodom je bod č. 4.

Na základe výpočtov výkonových strát a s uvažovaním faktorov zvyšujúcich výkonové straty bolo vytvorené technické zadanie na realizáciu chladiaceho systému cyklotrónu DC – 72.



Obr. 4.6 Závislosť nameranej a vypočítanej hodnoty výkonových strát pre rôzne hodnoty merného odporu medi od rezonančnej frekvencie.

4.4 Trimer doladenia frekvencie

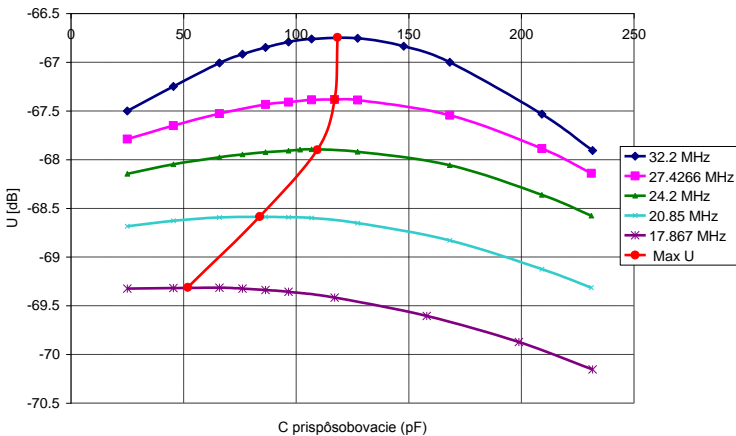
Trimer doladenie frekvencie s rozsahom $\pm 16,3$ mm zabezpečuje preladenie rezonančnej frekvencie o 111784 Hz pre rezonančnú frekvenciu 17601488 Hz, čo predstavuje 0,635 % rezonančnej frekvencie F_{r1} a 247854 Hz pre rezonančnú frekvenciu 32182053 Hz, čo predstavuje 0,770 % rezonančnej frekvencie F_{r2} .

Vypočítaná percentuálna hodnota preladenia rezonančnej frekvencie s polohou trimra ± 15 mm od centrálnej pozície (45 mm od duantu) je 0,562 %.

Trimer doladenia zabezpečuje kompenzáciu zmeny rezonančnej frekvencie pri práci cyklotrónu, vyvolanú tepelnou deformáciou geometrických rozmerov rezonátora (najmä kapacitná časť duant – antiduant) a tým aj stabilný, bezporuchový režim cyklotrónu.

4.5 Prispôsobenie väzby napájacieho vedenia s rezonátorom

Pri hodnote väzobnej kapacity 4 pF bola vypočítaná hodnota prispôsobovacieho kondenzátora v rozsahu od 40 pF do 140 pF. Hodnota prispôsobovacej kapacity bola určená pre maximálne hodnoty napätia na duante pri nemennej hodnote ideálneho napájacieho zdroja. Z meraní vykonaných na vstupe rezonátora (Obr. 4.7) vyplýva, že maximálne napätie na duante v celom rozsahu pracovných frekvencií predstavuje kapacitu prispôsobovacieho kondenzátora v rozsahu od 50 pF do 130 pF.



Obr. 4.7 Závislosť rezonančného napätia od hodnoty prispôsobovacej kapacity pre rôzne rezonančné frekvencie.

Z meraní prispôsobovacej jednotky vyplýva, že prispôsobenie generátora s rezonančným systémom cyklotrónu DC – 72 je pomocou prispôsobovacieho kondenzátora zabezpečené v celom rozsahu pracovných frekvencií.

Z porovnania vypočítaných hodnôt prispôsobovacieho systému ako aj frekvenčných a výkonových pomerov celého rezonátora vyplýva, že metóda výpočtu elektrického modelovania objemového rezonátora a jeho väzby s napájacím generátorom, ako aj iných

vysokofrekvenčných častí cyklotrónu, vytvára nové možnosti návrhu rezonančných systémov urýchľovačov.

5 Záver

Nároky na návrh vysokofrekvenčnej časti urýchľovacieho systému sú veľmi vysoké. Originálnosť riešenia náročnosť návrhu je určená širokým rozsahom urýchľovaných iónov s možnosťou preladenia cyklotrónu v širokom rozsahu energií. Na celkové konštrukčné rozmery rezonančného systému má podstatný vplyv tiež konštrukcia magnetu cyklotrónu ako aj spôsob napájania duantov.

Pri návrhu optimálnych konštrukčných parametrov jednotlivých častí rezonančného systému cyklotrónu DC – 72 boli použité vzájomne prepojené metódy modelovania elektrických parametrov zložitých konštrukčných častí spojených do jedného celku pomocou simulačných programov POISSON SUPERFISH a MicroCap.

Na základe vykonaných výpočtov boli vytvorené technické zadania a podľa nich vyrobené jednotlivé časti rezonančného systému.

Cyklotrón DC – 72 bol postavený v priestoroch Spojeného ústavu jadrového výskumu, kde boli vykonané merania základných parametrov rezonančného systému v pracovnom režime, t.j. vo vákuu a v pracovnom magnetickom poli.

V práci sú porovnané namerané hodnoty parametrov rezonančného systému s vypočítanými hodnotami. Prvým parametrom je rezonančná frekvencia. Obidva rezonátory zabezpečujú preladenie v plnom rozsahu pracovných frekvencií. Keďže rozdiel nameraných rezonančných frekvencií medzi rezonátorom č.1 a rezonátorom č.2, ako aj medzi nameranými hodnotami a výpočtom, nepresahuje 1%, je daná metóda náhradného cylindricky symetrického modelu vhodná na výpočet rezonančnej frekvencie nesymetrických rezonátorov, čo znamená že použitý model návrhu je správny. Meranie kvality rezonančného obvodu a s ním spojené výkonové straty poukazujú na zložitosť vytvorenia modelu zahrňujúceho vplyv všetkých faktorov. Najmä prechodové

odpory na spojoch jednotlivých častí a na klzných kontaktoch skratovacej dosky vplývajú na zníženie kvality rezonančného obvodu. Trimer doladenia frekvencie zabezpečuje nastavenie frekvencie v požadovanom rozsahu, zabezpečujúcim odozvu na zmeny vlastností rezonančného obvodu v plnom rozsahu jeho návrhu. Merania impedančného prispôsobenia napájacieho vedenia s rezonátorom taktiež poukazujú sa správnosť použitej metódy výpočtu.

Metódy uvedené v tejto práci boli základom pre návrh rezonančného systému cyklotrónu DC – 72, ktorý je unikátny tým, že zabezpečuje urýchlenie v širokej oblasti urýchľovaných iónov a energií. Merania na rezonančnom systéme potvrdzujú správnosť použitých nových výpočtových metód a postupov pri návrhu a optimalizácii jednotlivých častí vysokofrekvenčných obvodov používaných v urýchľovacej technike. Pomocou týchto metód je možné vytvoriť komplexný vysokofrekvenčný model celého urýchľovača, počnúc modelom výkonového generátora, cez rezonančný systém a končiac systémom monitorovania a riadenia.

Okrem návrhu rezonančného systému cyklotrónu DC – 72 bol uvedený spôsob použitý pri návrhu rezonančného systému cyklotrónu DC – 60 a DC – 350 systému impedančného prispôsobenia cyklotrónov DC – 60, DC – 350 a IC – 100 a návrhu bančero (zhlukovača zväzku) cyklotrónov DC – 72, DC – 60, a U400M. Uvedené cyklotróny, okrem DC 72 a DC – 350 sú v prevádzke.

6 Literatúra použitá v autoreferáte

- [1] J. J. Livingood, Principles of cyclic particle accelerators, Moskva 1963
- [2] S. Humphries Jr., Principles of Charged Particle Acceleration; Department of Electrical and Computer Engineering, University of New Mexico, 1999
- [3] O. N. Borisov i drugie, Ciklotronnaya laboratoriya (CyLab) pri Slovackom metrologicheskom inctitute, Dubna 1997

- [4] James H. Billen and Lloyd M. Young, POISSON SUPERFISH LA-UR-96-1834, The Regents of the University of California. Copyright, 1985-2001
- [5] Micro-Cap 7.0 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide, www.spectrum-soft.com Copyright 1982-2001

7 Zoznam publikácií autora súvisiacich s problematikou dizertačnej práce

1. Gulbekian, G.G., Hudák, M.: High-Frequency System of the Cyclotron DC-72 : XIX Russian Particle Accelerator Conference, Dubna, Russia, 4.-8.10.2005. In: XIX Russian particle accelerator conference : Dubna, Russia, 4.-8.10.2005. - Dubna : Joint Institute for Nuclear Research, 2005, p.168-170.
2. G.G. Gulbekian, V.V. Bashevoy, S.L. Bogomolov, O. Borisov, J. Franko, M. Hudak, I. Ivanenko, M. Khabarov, P. Kovac, S. Kralik, V.N. Melnikov, M. Pavlovic, S.V. Pashchenko, M. Sazonov, D. Solivajs, S. Stancek, DC 2,5 cyclotron, "HEAVY ION PHYSICS", Sci. Rep. 2003-2004, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 2006, p.257-260
3. P. Kovac, G.G. Gulbekian, V.V. Bashevoy, S.L. Bogomolov, O. Borisov, J. Franko, M. Hudak, I. Ivanenko, M. Khabarov, S. Kralik, V.N. Melnikov, M. Pavlovic, S.V. Pashchenko, M. Sazonov, D. Solivajs, S. Stancek, Matterial analysing setup based on the small DC 2,5 cyclotron, "HEAVY ION PHYSICS", Sci. Rep. 2003-2004, Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 2006, p.261-264
4. M.Hudak, G.G.Gulbekian, et al.: Design and experimental study of the HF system of DC-72 isochronous cyclotron, Instruments and Experimental Techniques. Submit. 2009

Iné publikácie súvisiace s témou dizertačnej práce:

M. Hudak, TOT-DC-05-02 Technical report of the results of the calculation of the electric field in the accelerating dees gap at a radius of 70 mm, Dubna 2002

M. Hudak, TOT-DC-05-03 Technical report on the results of the calculation of the electric field at the accelerating dees gap. Dubna 2002

M. Hudak, TOT-DC-05-04 Technical report on Radio Measurements on the buncher model DC-72, Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-01 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 1. The geometric proposition of the accelerating system), Dubna 2001

M. Hudak, TZD-DC-05-02 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 2. Design of trimmer frequency settings), Dubna 2001

M. Hudak, TZD-DC-05-03 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 3. The design of the plate connection), Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-04 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 4. The design of pickup electrodes), Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-05 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 5. Adjusting connection system), Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-06 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72 (Part 6. Cooling), Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-07 Performance specification for the tuning resonator device with feeder, Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-08 Performance specification for the supply device for the buncher, Dubna 2002

M. Hudak, TZD-DC-05-09 Performance specification of the design of the dees, Dubna 2003

M. Hudak, TZD-DC-05-10 Performance specification for the accelerating system of the cyclotron DC-72, Dubna 2003

M. Hudak, PZP-DC-05-09 Contact the connection rod with dees, Dubna 2003

M. Hudak, TZD-DCK-05-02 Accelerating system of cyclotron DC - 60, Technical specification for the design , Dubna 2003

M. Hudak, TOT-DCK-05-03 Technical Report, Power dissipation in the central section of the capacitive HF current, Dubna 2004

M. Hudak, TZD-DCK-05-13 Performance specification for the excitation loop connected to the feeder of the cyclotron DC-60, Dubna 2004

M. Hudak, TZD-DCK-05-10 Accelerating system, Technical project on designing of a cooling system of resonance system, Dubna 2004

M. Hudak, TZD-DCK-05-12 Performance specification for measuring pickup electrodes of HF system, Dubna 2004

M. Hudak, TOT-DC350-12-03 Technical report of the description of the central section of the cyclotron DC350, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-04 Performance specification. Power supply of sinusoidal buncher of channel injection of cyclotron DC-350, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-05 Technical report on the definition of the construction of the resonance system of cyclotron DC350, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-14 Impact of changing of geometry of the resonator of DC350 on the resonant frequency of the accelerating system, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-27 Technical report Definition of power losses in the resonance system of cyclotron DC350, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-33 Technical report Definition of design excitation loop of the resonance system of cyclotron DC350, Dubna 2006

M. Hudak, TOT-DC350-12-34 Influence of the geometry of the resonator on the position shorting plate, Dubna 2006

Summary

Two half-wave RF systems with vertical resonators tanks located in a yoke of a magnet will be used for acceleration of charged particles in range from H⁻ to Xe⁺¹⁸ with energy $72 \div 2$ MeV/u. The range of frequency from 18.25 MHz up to 32 MHz is provided by changing of the length of resonators. The calculated quality-factor of RF system is equal from 5000 to 6000. At a voltage rating of 60 kV on two dees it is necessary to use the HF generator with an output power about 25kW.

The basic parameters of a HF system of a cyclotron DC - 72 are shown in the given article. The results are obtained on the basis of numerical calculations conducted with the software package POISSON SUPERFISH and MicroCap and they were checked by the series of measurements using the cyclotron built in Joint Institute for Nuclear Research.

Measurements of the resonance system confirm the correctness of the new calculation methods and procedures for designing and optimizing various parts of HF circuits used in accelerators technology. By using of these methods it is possible to create a complete model of the entire accelerator HF system. The HF system consists of power generator, transmission lines, resonant system and monitoring and controlling system.