



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ • ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Булевар краља Александра 73 • 11000 Београд • Република Србија •
Тел. 011/324-8464 • Факс: 011/324-8681

Универзитет у Београду
Већу научних области техничких наука

ЗАХТЕВ за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији

Молимо да, сходно чл.46 ст.5.тач.4 Статута Универзитета у Београду („Гласник Универзитета“ бр.131/06), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата

Мр АНЂЕЛИЈЕ (ЖИВОТА) ИЛИЋ

Мр Анђелија Илић пријавила је докторску дисертацију под називом:

„Оптимално убрзавање честица у вишенаменским изохроним циклотронима“

Универзитетско веће научних области техничких наука је 03.7.2009.године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације.

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Анђелије Илић образована је на седници 29.6.2010./ 07.9.2010. године, одлуком Факултета под бр. 812/3, у саставу:

Име и презиме члана Комисије	Звање	Установа у којој је запослен
1. Др Владимир Петровић	ванредни професор	Електротехнички факултет у Београду
2. Др Јасна Ристић Ђуровић	виши научни сарадник	Институт за нуклеарне науке „Винча“
3. Др Бранко Колунџија	редовни професор	Електротехнички факултет у Београду
4. Академик др Антоније Ђорђевић	редовни професор	Електротехнички факултет у Београду
5. Др Небојша Нешковић	научни саветник	Институт за нуклеарне науке „Винча“

Наставно-научно веће Факултета усвојило је Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана 07.9.2010.године.

Прилози:

1. Извештај Комисије са предлогом
2. Акт Наставно-научног већа факултета о усвајању извештаја

ДЕКАН
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА

Проф.др Миодраг Поповић



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ ● ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Булевар краља Александра 73 ● 11000 Београд ● Република Србија ●
Тел. 011/324-8464 ● Факс: 011/324-8681

На основу чл.128 Закона о високом образовању и чл.66 и 68 и Статута Електротехничког факултета у Београду, Наставно-научно веће на седници од 07.9.2010.године, донело је

ОДЛУКУ

Усваја се Извештај комисије у саставу: др Владимир Петровић, ванредни професор Електротехничког факултета, др Јасна Ристић Ђуровић, виши научни сарадник Института за нуклеарне науке „Винча“, др Бранко Колунџија, редовни професор Електротехничког факултета, академик др Антоније Ђорђевић, редовни професор Електротехничког факултета, др Небојша Нешковић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под насловом: **„Оптимално убрзавање честица у вишенамениским изохроним циклотронима“** коју је предала **мр АНЂЕЛИЈА ИЛИЋ**, и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука.

Комисија за усмену одбрану именована је у саставу: др Владимир Петровић, ванредни професор Електротехничког факултета, др Јасна Ристић Ђуровић, виши научни сарадник Института за нуклеарне науке „Винча“, др Бранко Колунџија, редовни професор Електротехничког факултета, академик др Антоније Ђорђевић, редовни професор Електротехничког факултета, др Небојша Нешковић, научни саветник Института за нуклеарне науке „Винча“.

ДЕКАН

Електротехничког факултета

Проф. др Миодраг Поповић

Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду

Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду, на својој 719. седници, одржаној 29. јуна 2010. године, именovalo нас је за чланове *Комисије за преглед и оцeну докторске дисертације мр инж. Анђелије Илић*, под насловом **„Оптимално убрзавање честица у вишенaменским изохроним циклотронима“**. Ментор докторске дисертације је др Владимир Петровић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Након увида у достављени материјал, извршили смо процену квалитета и научног доприноса поднете докторске дисертације, на основу које Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду подносимо следећи

Извештај

1. УВОД

1.1. Наслов и обим дисертације

Наслов докторске дисертације је **„Оптимално убрзавање честица у вишенaменским изохроним циклотронима“**. Дисертација је написана на 130 страна (једноструки проред), садржи насловну страну, садржај, списак назива слика, списак наслова табела, 63 слике, 11 табела, 7 поглавља и 3 прилога.

1.2. Хронологија одобравања и израде дисертације

Тема, под насловом **„Оптимално убрзавање честица у вишенaменским изохроним циклотронима“**, одобрена је на Наставно-научном већу Електротехничког факултета 12. маја 2009. године, а Веће области техничких наука Универзитета у Београду дало је на то сагласност 3. јула 2009. године.

Кандидат је урађену дисертацију поднео на преглед и оцeну 10. јуна 2010. године, а Наставно-научно веће Електротехничког факултета је 29. јуна 2010. године именovalo комисију за преглед и оцeну докторске дисертације.

1.3. Место дисертације у одговарајућој научној области

Дисертација према најужој одредници припада научној области Акцелераторских технологија. Како се истраживања односе на софтверске алате и нумерички прорачун динамике јонских снопова у електромагнетским пољима она се могу подвести и под област Примењене електромагнетике у ширем смислу. За област Акцелераторских технологија, као и Примењене електромагнетике матичан је Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

1.4. Биографски подаци о кандидату

Анђелија Ж. Илић је рођена 18. јуна 1973. године у Београду. Дипломске студије је похађала на Електротехничком факултету у Београду, где је дипломирала 1998. године на Одсеку за Електронику, Телекомуникације и Аутоматику (смер Електроника), са просечном оценом 9,05 и оценом 10 на дипломском испиту. Магистрирала је на University of Massachusetts Dartmouth, у САД, 2004. године,

са просечном оценом 3,88 од 4,00. Магистарску тезу из области примењене електромагнетике, насловљену „Optimal Large-Domain Hexahedral Meshing for Higher Order Finite Element Modeling in Electromagnetics“, одбранила је код проф. др. Бранислава Нотароша. По дипломирању и током постдипломских студија држала је наставу и бавила се истраживањима у области примењене електромагнетике.

Од априла 2004. године ради у Лабораторији за физику (010) Института за нуклеарне науке „Винча“. Од тада се бави нумеричком симулацијом динамике јонских снопова. У звање истраживач сарадник је изабрана у новембру 2004. године и реизабрана у октобру 2007. године. Учествовала је на пројекту изградње Циклотрона ВИНСИ у Институту за нуклеарне науке „Винча“, као и на пројекту „Физика и хемија са јонским сноповима“, финансираним од стране Министарства за науку и технолошки развој Србије. Тренутно је ангажована као истраживач на пројекту „Физика и хемија са јонским сноповима“ (451–01–00049), 2008 – текући пројекат. Један од основних задатака којима се бавила у претходном периоду била је израда софтвера за динамику јонских снопова у изохроном циклотрону и његова примена на анализу динамике јонских снопова Циклотрона ВИНСИ.

Мр инж. Анђелија Илић је као први аутор публиковала један рад у врхунском међународном часопису (M_{21}), два рада презентована на међународним конференцијама и штампана у целини, један рад у водећем часопису националног значаја и два рада у часописима националног значаја, као и три рада представљена на скуповима националног значаја штампана у целини. Коаутор је још осам радова у часописима, седам радова на међународним конференцијама и три рада на националним конференцијама. Од тога, укупно три рада категорије M_{21} су уско везана са темом докторске дисертације, а четири рада исте категорије спадају у ширу област примењене електромагнетике. Сва три рада категорије M_{21} која припадају области докторске дисертације објављена су у часопису *IEEE Transactions on Nuclear Science*, чији импакт фактор износи 1,518 и рангиран је као други у групи од тридесет часописа (2 / 30).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Структура и садржај дисертације

Дисертација је написана на 130 страна са једноструким проредом, садржи насловну страну, садржај, списак назива слика, списак наслова табела, 63 слике, 11 табела, 7 поглавља и 3 прилога. Подељена је на следећа поглавља: 1. Увод, 2. Вишенаменски изохрони циклотрон, 3. Прорачун статичких равнотежних орбита, 4. Оптимизација убрзавања честица у изохроном циклотрону, 5. Анализа убрзавања јонског снопа, 6. Закључак и 7. Референце. Део материјала који је намењен бољем разумевању садржаја докторске дисертације, а представљао би малу дигресију у односу на основни ток излагања, организован је у виду три прилога на крају дисертације: А1. Релативистичко кретање снопа, А2. Фокусирање електромагнетским сочивима и А3. Опис динамике јонског снопа у фазном простору. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Увод је изложен на 5 страна и даје кратак историјски преглед развоја циклотрона, са акцентом на место ове врсте акцелератора честица у савременим истраживањима и практичним применама, указује на комплексност пројектовања вишенаменских циклотрона и значај предложене оптимизације процеса убрзавања и коначно, концизно наводи садржај појединих поглавља.

Друго поглавље, **Вишенаменски изохрони циклотрон**, које је такође уводног карактера, сажето излаже основне принципе функционисања изохроног (AVF, од „azimuthally-varying field“) циклотрона. Објашњене су разлике између слабог и јаког фокусирања, као и сличности и разлике у лонгитудиналном кретању код изохроног и класичног циклотрона. Описан је у акцелераторској

физици веома важан појам емитанси који се користи за опис параметара јонских снопова. Наглашене су специфичности пројектовања магнетских поља и RF система вишенаменског изохроног циклотрона. Као пример вишенаменског изохроног циклотрона, описан је Циклотрон ВИНСИ, инсталиран у Институту за нуклеарне науке „Винча“, према чијим параметрима су урађени сви примери прорачуна и оптимизације.

Представљање нових метода које су предмет ове тезе почиње трећим поглављем, под насловом **Прорачун статичких равнотежних орбита**. Најпре је укратко описан софтверски пакет VINDY-A, који је мр инж. Анђелија Илић развила за потребе израде ове тезе, а са намером да буде употребљен за прорачуне динамике јонских снопова у акцелерационом региону Циклотрона ВИНСИ. Затим аутор предлаже оригиналну методу налажења статичких равнотежних орбита (SEO), која се базира на директној нумеричкој интеграцији једначина кретања у циклотрону, за разлику од, у литератури и у пракси, нешто чешће коришћене нумеричке интеграције каноничних једначина кретања у фазном простору. Оптимизациони критеријум за избор оптималне SEO пореди параметре од интереса различитих статичких орбита у неколико контролних тачака дуж пута интеграције. Дато је поређење са најчешће коришћеном методом одређивања статичких равнотежних орбита и утврђено је одлично слагање резултата. Нова метода је резултовала већом тачношћу израчунавања почетних параметара разматраних статичких равнотежних орбита, него уобичајено коришћена метода. Предложена метода је током израде дисертације коришћена за процену квалитета мапа измерених магнетских поља, табелирање различитих параметара SEO који се користе као улазни подаци за оптимизацију убрзавања и као потпроцедура у програму који се бави оптимизацијом убрзавања.

Четврто поглавље је насловљено **Оптимизација убрзавања честица у изохроном циклотрону** и представља централни део тезе у коме је објашњена метода одређивања оптималних убрзавајућих орбита, односно скупова почетних услова који резултују оптималном акцелерацијом. Метода налажења оптималних убрзавајућих орбита се састоји из три процедуре: подешавања учестаности RF система, центрирања убрзавајуће орбите и оптимизације фазе RF система. Оптимизација фазе се мора примењивати на добро центрираним орбитама, тако да се увек претходно спроводи центрирање орбите описаном методом. Предложена метода центрирања убрзавајуће орбите се ослања на познату „hard edge gap“ апроксимацију. Насупрот уобичајеном коришћењу апроксимативних формула, прираштаји енергије на убрзавајућим процепима су добијени нумеричком интеграцијом. Осим тога, показано је да је довољна само једна итерација процедуре центрирања, уколико се оно врши на великим радијусима (ближе области екстракције) и када се као почетни покушај узимају фазне координате које одговарају статичкој равнотежној орбити исте енергије. Коришћењем те чињенице добија се на ефикасности прорачуна.

Описане су две методе за подешавање фазе RF система. Обе користе ефикасност акцелерације мерену усредњеним прираштајем енергије по једном убрзавајућем процепу као оптимизациони критеријум. Прва метода је погодна за оптимизацију једне убрзавајуће орбите, док је друга нарочито корисна уколико се тражи више од једне оптималне убрзавајуће орбите. Друга предложена метода се ослања на чињеницу да оптимална RF фаза одступа од номиналне RF фазе у складу са флукуацијама примењеног магнетског поља у односу на израчунато изохроно поље. Једном израчуната крива оптималне RF фазе је применљива на све добро центриране убрзавајуће орбите. Такође су детаљно испитани квалитативни и квантитативни утицај непотпуног изохронизма примењеног магнетског поља, офсета RF фазе и децентрираности убрзавајуће орбите на RF фазу дуж убрзавајуће орбите, као и на ефикасност акцелерације.

Оптимална убрзавајућа орбита није јединствена за дато магнетско поље. Параметри који у потпуности дефинишу оптималну убрзавајућу орбиту су обрт, дефинисан преко радијуса односно енергије тест јона, и азимутална позиција, за које се врши центрирање орбите и подешавање RF фазе. Описана је метода налажења потпуног скупа оптималних убрзавајућих орбита за дато магнетско поље и одговарајући режим рада циклотрона; на основу тога се добијају одговарајући скупови координата тест јона у фазном простору на почетку акцелерационог региона.

Овакво истраживање не би било потпуно без одговора на питање колико описано оптимално убрзавање доприноси квалитету снопа као целине, што је тема петог поглавља насловљеног **Анализа убрзавања јонског снопа**. Показано је да је кретање јона у аксијалном правцу у потпуности

распрегнуто у односу на кретање јона у медијалној равни, док су радијалне и лонгитудиналне фазне координате међусобно спрегнуте. Радијална и лонгитудинална аксептанса су ограничене немогућношћу да се јон који је превише удаљен од референтног јона довољно фокусира и синхронизује са RF напоном, како би се успешно убрзао до коначне енергије. Насупрот томе, аксијална одступања и угао импулса су ограничени малим вертикалним растојањем између полова магнета и димензијом вертикалног процепа на RF електродама. Утврђено је да је ефикасност акцелерације у случају радијалне и лонгитудиналне фазне равни одлична за око 10% координата у центру сваке од аксептанси, док се сви јони који припадају аксијалној аксептанси одликују одличном ефикасношћу акцелерације. Области у центру фазних равни које се одликују одличном ефикасношћу акцелерације ($\overline{\Delta T}_{\text{gap}} \geq 22.2 \text{ keV}$) су релативно широке за све три фазне равни.

За подешавање почетних услова за убрзавање у циклотрону највише је од интереса радијална аксептанса акцелерационог региона, јер у односу на њу треба прилагодити радијалну емитансу долазећег снопа. Зато је испитано понашање радијалне аксептансе са променом других фазних координата, односно спрегнуте аксептансе акцелерационог региона за радијалну фазну раван. Сви закључци петог поглавља тезе су потврђени и резултатима симулације где су улазни параметри задати помоћу генератора случајних бројева. Поново је анализиран утицај фазног одступања и децентрираности јона снопа на ефикасност акцелерације, овог пута на основу ширег опсега података него у четвртном поглављу.

Коначно, у овом поглављу описана је методологија и резултати симулације једног репрезентативног тест примера јонског снопа H^- са реалистичним почетним емитансама, процењеним на основу постојећих тест симулација убрзавања у централном региону Циклотрона ВИНСИ. Извршена су два прорачуна: са узимањем у обзир ефеката просторног наелектрисања снопа и без узимања у обзир просторног наелектрисања, и направљено поређење резултата. Коначни резултат овог примера даје процену емитанси у близини екстракционог радијуса, пре наилазка на екстракциону стрипинг фолију.

Поглавље **Закључак** сажето рекапитулира теоријску основу и истраживачки рад изложен у претходним поглављима, наводи истраживачке резултате и доприносе, и сугерише даље правце истраживања.

Поглавље **Референце** даје преглед литературе коришћене током израде дисертације. Списак литературе садржи 95 библиографских записа.

Први прилог, **Релативистичко кретање снопа**, рекапитулира основне изразе и величине специјалне теорије релативитета који се користе у проучавању циклотрона и објашњава на који начин се у овој тези односно софтверу који она користи израчунава утицај просторног наелектрисања снопа. Други прилог, **Фокусирање електромагнетским сочивима**, уводи појам електромагнетског сочива и обрађује оне примере који имају везе са фокусирањем у изохроном циклотрону. Такође се уводи појам матрице преноса која се користи у појединим референцираним радовима, а у тези се само помиње у пар наврата. Трећи прилог, **Опис динамике јонског снопа у фазном простору**, нешто детаљније представља овај веома често коришћен начин анализе динамике честица.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост, оригиналност и значај

Подручје истраживања дисертације, у ширем смислу пројектовање вишенамениских изохронних циклотрона, представља актуелну област савремених акцелераторских технологија, што потврђује високо рангирање часописа у којима су објављени радови аутора дисертације, као и низ наведених референци које се баве практичним применама ове врсте акцелератора. Због својих позитивних одлика изохрони циклотрони су веома погодан избор за убрзавање јона у опсегу од ниских до умерено високих енергија, а користе се како за научна истраживања, тако и за комерцијалне примене. То су компактне машине, карактеристике снопа који се добија на излазу су веома добре, а постоји

могућност генерисања снопова променљивих енергија и веома разноликих врста јона. Изохрони циклотрони код којих је могуће убрзавање веома разноликих врста јона до различитих енергија и у различитим режимима рада називају се вишенаменски циклотрони.

Пројектовање вишенаменског циклотрона је знатно сложеније од пројектовања једнонаменске машине, али се исплати имајући у виду високу цену ових машина и чињеницу да типични једнонаменски циклотрони обично нису временски довољно искоришћени. Процедуре које се користе у пројектовању типичних подсистема такве машине постају све сложеније и дуготрајније са повећањем броја различитих врста јона одабраних за убрзавање. Од правилне примене процедура пројектовања веома зависи квалитет убрзавања, а у неким случајевима чак и исправно функционисање машине. Један аспект коме се до сада није посвећивала довољна пажња (јер обично не угрожава остваривост жељених режима рада) је оптимизација процеса убрзавања. Међутим, снап проводи највише времена у акцелерационом региону и ефикасност убрзавања највише доприноси целокупној ефикасности машине. Код вишенаменских изохроних циклотрона је потребно упоредно прилагодити почетне услове који одговарају јонским сноповима убрзаним у различитим режимима рада, што је некада тешко постићи. Често су неопходне додатне модификације у централном или екстракционом региону, да би се на крају постигао слабији квалитет убрзавања у односу на најбољи остварив.

У овој дисертацији је показано како се, након подешавања изохроности магнетског поља и других улазних параметара неопходних за оптимизацију процеса убрзавања, могу фино подесити остали параметри система и параметри кретања честица за различите убрзане снопове. Тако подешени параметри се онда могу користити као полазни подаци за даље подешавање, на пример, централног региона циклотрона. Развијен је низ оригиналних или модификованих метода и алгоритама за решавање постављеног проблема.

Значај истраживања обављеног у овој дисертацији је вишеструк. Најпре, разрађен је детаљан општи алгоритам оптимизације параметара RF система и почетних параметара референтне трајекторије снопа, који резултују оптималном акцелерацијом. Такав алгоритам је од великог практичног значаја за пројектовање вишенаменских изохроних циклотрона. Затим, разноврсне примењене методе, од којих је већина модификована и побољшана од стране кандидата у односу на сличне методе које се могу наћи у литератури, представљају допринос нумеричкој симулацији динамике јонских снопова.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У својој дисертацији, кандидат је детаљно претражио отворену литературу и коректно навео референце на радове који су у вези са темом дисертације. Наведено је 95 библиографских записа, од чега 7 књига, 43 рада у часописима, 26 радова у конференцијским зборницима, 5 издања CERN-ове школе акцелератора доступних преко Интернета, 9 извештаја о изградњи Акцелераторске инсталације ТЕСЛА, две докторске дисертације, једна магистарска теза и два упутства за коришћење комерцијалних софтверских алата. Педесет седам референци је објављено после 2000. године, од чега 26 у књигама и часописима, што потврђује актуелност коришћене литературе.

3.3. Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање

Методологија истраживања ове дисертације ослања се на нумеричку анализу у временском домену и то симулацијом динамике јонских снопова у електромагнетском пољу. Оптимизацији режима убрзавања се прилази поступно, почев од дефисања критеријума које треба задовољити и анализе ефеката изазваних избором неоптимизираних почетних услова. Постојеће методе су проучене, референциране и укратко поменуте. Кандидат је уочио могућности за побољшање постојећих метода, као и недостатак систематизованог приступа у доступној литератури, а за решавање одређених потпроблема разматране проблематике. Из тих разлога, аутор се ослања на сопствене оригиналне и/или модификоване методе. Основни задатак ове докторске дисертације и

јесте дефинисање метода и процедура које воде оптимизацији процеса убрзавања у вишенаменским изохроним циклотронима.

Применом сопствених метода је спроведена анализа статичких равнотежних орбита и флукуација орбиталних учестаности, извршено је центрирање убрзавајућих орбита и подешавање параметара радиофреквентног (RF) система, израчунате су оптималне криве RF фазе и коначно, добијени су потпуни скупови почетних вредности параметара које резултују оптималном акцелерацијом. Анализа убрзавања јонског снопа је извршена на уобичајени начин, али су резултати разматрани превасходно са становишта расподеле распрегнутих и спрегнутих аксептанси акцелерационог региона по ефикасности убрзавања. Осим стандардне анализе аксептанси у свакој од фазних равни понаособ и из снопа задатог шестодимензионим улазним параметрима, проучавано је и спрезање радијалне фазне равни са осталим фазним координатама посматрањем група од по три параметра. На тај начин се, са истим бројем тест тачака у фазном простору, може много детаљније анализирати спрезање фазних координата него када се посматра свих шест димензија истовремено.

Додатно, у дисертацији се детаљно испитују квалитативни и квантитативни утицаји непотпуног изохронизма примењеног магнетског поља, офсета RF фазе и децентрираности убрзавајуће орбите на RF фазу дуж убрзавајуће орбите, као и на ефикасност акцелерације. Режији убрзавања у Циклотрону ВИНСИ применом различитих хармонијских модова илустровани су симулацијом кретања појединачних тест јона. Симулација убрзавања јонског снопа Н⁺ са реалистичним почетним емитансама се користи за процену емитанси у близини екстракционог радијуса и ради поређења резултата са и без узимања у обзир ефеката просторног наелектрисања снопа.

3.4. Оцена применљивости и верификације остварених резултата

Општи алгоритам оптимизације процеса убрзавања, предложен у овој дисертацији, може се лако имплементирати у оквиру произвољног софтверског алата за анализу и пројектовање циклотрона коришћењем динамике јонских снопова. Све коришћене методе су описане довољно детаљно да се истраживачки резултати могу једноставно репродуковати, односно верификовати. Предложене методе су развијене имајући на уму комплексност пројектовања вишенаменских циклотрона, али су истовремено и генералног карактера, применљиве на било који изохрони циклотрон. У приказаној форми методе су погодне за анализу циклотрона са правим, радијалним секторима, а за примену на циклотрон са спиралним секторима их је неопходно модификовати узимањем у обзир функције радијалне координате која описује спиралу сектора и функције која описује облик убрзавајућих електрода.

3.5. Оцена способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је у свом раду показао изузетну самосталност, систематичност, аналитичност у размишљању, педантност и агилност у раду. Испољио је потпуну зрелост за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Главни научни резултати и доприноси докторске дисертације мр Анђелије Илић су теоријски и односе се на предлагање нових и модификацију постојећих метода за оптимизацију процеса убрзавања у изохроном циклотрону, посебно важну за пројектовање вишенаменских циклотрона. Формиран је општи алгоритам оптимизације параметара RF система и почетних параметара референтне трајекторије снопа, који резултују оптималном акцелерацијом. Предложене су методе: метода високе тачности за налажење статичких равнотежних орбита, метода центрирања убрзавајуће орбите центрирањем само једног обрта, две методе за подешавање фазе RF система и метода

налажења потпуних скупова почетних вредности параметара које резултују оптималном акцелерацијом. Извршена је детаљна анализа квалитативног и квантитативног утицаја непотпуног изохронизма примењеног магнетског поља, офсета RF фазе и децентрираности убрзавајуће орбите на RF фазу дуж убрзавајуће орбите, као и на ефикасност акцелерације. Доказано је да подешавање референтне трајекторије снопа на описани начин резултује одличном ефикасношћу убрзавања великог дела јонског снопа. Испитана је расподела аксептанси акцелерационог региона по ефикасности акцелерације. Анализирано је спрезање радијалне фазне равни са осталим фазним координатама. Додатни допринос тезе представљају резултати прорачуна, који дају слику динамике јонских снопова у акцелерационом региону конкретне машине, Циклотрона ВИНСИ. Анализа је извршена на основу реалистичних, измерених, мапа остварених магнетских поља.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Методи рада кандидата обухватају теоријски (аналитички приступ) и нумеричку симулацију. Део улазних података је добијен из експерименталних резултата и/или у процесу пројектовања конкретне машине. Сав материјал је успешно повезан у логичну и избалансирану целину.

Резултати до којих је кандидат дошао имају теоријску и практичну вредност. Теоријска вредност дисертације лежи у установљивању метода и алгоритама којима се оптимизира убрзавање и, како оптимална убрзавајућа орбита није јединствена, добија комплетан скуп убрзавајућих орбита и одговарајућих почетних положаја у фазном простору који гарантују оптималну акцелерацију. Практична вредност је у примени предложених процедура и алгоритама у практичном пројектовању изохроних циклотрона, као и у анализи динамике јонских снопова Циклотрона ВИНСИ.

Ограничења истраживања дисертације се огледају у претпоставци да се ради о циклотрону са правим, радијалним секторима. За примену на циклотрон са спиралним секторима неопходно је модификовати методе и алгоритме узимањем у обзир функције радијалне координате која описује спиралу сектора и функције која описује облик убрзавајућих електрода.

4.3. Очекивана примена резултата у пракси

Подручје примене истраживачких резултата су акцелераторске технологије, посебно анализа и пројектовање изохроних циклотрона. Резултати дисертације су непосредно применљиви, јер се лако могу имплементирати у оквиру произвољног софтверског алата за анализу и пројектовање изохроних циклотрона коришћењем динамике јонских снопова. Резултати су проверени на примеру Циклотрона ВИНСИ, инсталираног у Институту за нуклеарне науке „Винча“.

Могућа даља истраживања обухватају модификацију метода и алгоритама за примену на циклотрон са спиралним секторима, развој софтверских алата којима би се у већој мери аутоматизовао процес пројектовања централног региона вишенаменог циклотрона (као што је то овде урађено за акцелерациони регион), као и динамику јонских снопова у електромагнетским пољима разних других уређаја и средина, проучавање електромагнетских сочива и друго.

4.4. Верификација научних доприноса

Део истраживачких резултата из четвртог поглавља докторске дисертације садржан је у раду:

- [1] A. Ž. Ilić, J. L. Ristić-Djurović, S. Ćirković, A. Dobrosavljević, and N. Nešković, “Optimal Acceleration in Isochronous Straight Sector Cyclotrons,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 3, pp. 1498–1506, Jun. 2009. (ISSN: 0018-9499, импакт фактор: 1,518, категорија: M₂₁, ранг: 2/30)

Друга два рада у врхунском међународном часопису, из области докторске дисертације, су:

- [2] S. Ćirković, J. L. Ristić-Djurović, A. Ž. Ilić, V. Vujović, and N. Nešković, “Comparative analysis of methods for isochronous magnetic field calculation,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 55, no. 6, part 2, pp. 3531–3538, Dec. 2008. (ISSN: 0018-9499, импакт фактор: 1,518, категорија: M₂₁, ранг: 2/30)

- [3] S. Ćirković, J. L. Ristić-Djurović, A. S. Vorozhtsov, A. Ž. Ilić, and N. Nešković, "Method for Fine Magnet Shaping in Cyclotrons," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no. 5, pp. 2821–2827, Oct. 2009. (ISSN: 0018-9499, импакт фактор: 1,518, категорија: M₂₁, ранг: 2/30)

У ова два рада је за нумеричку симулацију статичких равнотежних орбита у произвољном магнетском пољу коришћена високопрецизна метода предложена у трећем поглављу дисертације. Прорачун изохронизованих магнетских поља, односно изохронизација магнета, су извршени на квалитативно нов начин, директним повезивањем динамике кретања честице са магнетским пољем у коме се честица креће.

Остали радови који припадају области истраживања докторске дисертације су следећи:

- [4] Andjelija Ž. Ilić, Jasna L. Ristić-Djurović, and Saša T. Ćirković, "Preliminary Results of Ion Trajectory Tracking in the Acceleration Region of the VINCY Cyclotron", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, Vol. XXI, No. 1, June 2006, pp. 29-33.
- [5] S. T. Ćirković, Jasna L. Ristić-Djurović, A. Ilić, N. Nešković, A. S. Vorozhtsov and S. B. Vorozhtsov, "Focusing Limit of a Cyclotron: Axial Betatron Instability against Beam Dynamics Approach", *Nuclear Technology & Radiation Protection*, Vol. XXI, No. 2, December 2006, pp. 1-7.
- [6] Andjelija Ž. Ilić, Jasna L. Ristić-Djurović, and Saša T. Ćirković, "Preliminary Results of the Ion Trajectory Tracking in the Acceleration Region of the VINCY Cyclotron", *Journal of Automatic Control, University of Belgrade*, Vol. 16, No. 1, 2006, pp. 5-8. (У овај број часописа издат крајем 2006. године аутоматски су укључени сви радови награђени на 50. Конференцији ЕТРАН-а, видети [7].)
- [7] Andjelija Ž. Ilić, Jasna L. Ristić-Djurović, Saša T. Ćirković, "Preliminary results of the ion trajectory tracking in the acceleration region of the VINCY Cyclotron", *Награђени рад младог истраживача, L Конференција ЕТРАН-а*, Београд, 6-8. јуна 2006. Зборник радова, Свеска IV, стр. 25-28.
- [8] Andjelija Ž. Ilić, Jasna L. Ristić-Djurović, Saša T. Ćirković, "Initial Conditions Corresponding to Optimal Ion Acceleration in the VinCy Cyclotron", *LI Конференција ЕТРАН-а*, Херцег Нови – Игало, 4-8. јуна 2007, Зборник радова на CD-у, NT1.5.
- [9] Анђелија Ж. Илић, Јасна Л. Ристић-Ђуровић, Саша Т. Ћирковић, Небојша Б. Неšković, "Подешавање параметара РФ система Циклотрона Винси", *LII Конференција ЕТРАН-а*, Палић, 8-12. јуна 2008, Зборник радова, NT1.4.
- [10] Саша Т. Ћирковић, Јасна Л. Ристић-Ђуровић, Анђелија Ж. Илић, "Израчунавање изохроног магнетског поља помоћу динамике снопа", *LII Конференција ЕТРАН-а*, Палић, 8-12. јуна 2008, Зборник радова, NT1.5.
- [11] S. B. Vorozhtsov, A. S. Vorozhtsov, A. Dobrosavljević, P. Beličev, S. Ćirković, A. Ilić, Đ. Košutić, N. Nešković, M. Rajčević, J. Ristić-Djurović, V. Vujović, Lj. Vukosavljević, "Final Shaping of the Magnetic Structure of the VINCY Cyclotron", *Proceedings of the 17th International Conference on Cyclotrons and their Applications*, October 18-22, 2004, Tokyo, Japan (RIKEN, Saitama, 2005), pp.390-392.

Опис оригиналне методе налажења статичких равнотежних орбита предложене у трећем поглављу и истраживачки резултати представљени у петом поглављу се по први пут појављују у овој докторској дисертацији и израда часописних публикација је у току.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

5.1. Кратак осврт на дисертацију у целини

Предмет истраживања докторске дисертације је оптимизација процеса убрзавања у изохроном циклотрону, са становишта ефикасности акцелерације и центрираности убрзавајуће орбите. Основни задатак дисертације је установљивање метода и алгоритама којима се оптимизира убрзавање и, како оптимална убрзавајућа орбита није јединствена, добија комплетан скуп убрзавајућих орбита и одговарајућих почетних положаја у фазном простору којима се гарантује оптимална акцелерација.

Након пажљивог читања детаљне анализе докторске дисертације мр Анђелије Илић, насловљене **„Оптимално убрзавање честица у вишенаменским изохроним циклотронима“**, Комисија је констатовала да она садржи све потребне формално-типографске целине и да је написана у складу са стандардима Електротехничког факултета и Универзитета у Београду. Изложени материјал је добро организован кроз поглавља и одељке. Циљеви тезе су јасно наведени и исказани, а предложене методе и истраживачки резултати изложени поступно, систематски и разумљиво. Наглашен је допринос аутора области истраживања.

5.2. Предлог Комисије Наставно-научном већу

Комисија констатује да дисертација испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторске дисертације на Електротехничком факултету у Београду.

Комисија сматра да докторска дисертација мр Анђелије Илић, под насловом **„Оптимално убрзавање честица у вишенаменским изохроним циклотронима“**, садржи оригиналне научне доприносе. У складу са тим, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да ову дисертацију прихвати и одобри њену усмену јавну одбрану.

У Београду, 10. јула 2010. године

Чланови Комисије:

др *Владимир Петровић*, ванредни професор (ментор)
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др *Јасна Ристић-Ђуровић*, виши научни сарадник
Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд

др *Бранко Колунџија*, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

академик др *Антоније Ђорђевић*, редовни професор
Електротехнички факултет Универзитета у Београду

др *Небојша Нешковић*, научни саветник
Институт за нуклеарне науке „Винча“, Београд