

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Ложкін Руслан Сергійович

УДК 621.314  
(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕКЦІЇ  
СИЛЬНОСТРУМНОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО  
ПРИСКОРЮВАЧА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК ШЛЯХОМ  
УДОСКОНАЛЕННЯ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

05.09.13 – техніка сильних електричних і магнітних полів  
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

*Ідентичність за змістом  
і нашими примірниками  
дисертації засвідчую.*

Р.С. Ложкін Р.С. Ложкін

Науковий керівник  
Гурин Анатолій Григорович,  
докт. техн. наук, проф.

*Учен. секретар  
спеціалізованої  
ученої ради Д 64.050.08*

*Юрєва О.Ю.*

*27.11.17*

Харків – 2017



## АННОТАЦІЯ

*Ложкін Р. С.* Покращення енергетичних характеристик секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача заряджених часток шляхом удосконалення її елементів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 «Техніка сильних електричних і магнітних полів» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

В наш час розвиток прискорювальної техніки для генерування потужнострумних релятивістських електронних і іонних пучків відкриває широкі наукові перспективи. Це створення й нагрівання плазми до термоядерної температури, нові колективні методи прискорення іонів, роботи по інерціальному термоядерного синтезу на важких іонах, і багато іншого.

Поряд з науково-технічними напрямками, спрямованими на прискорення заряджених часток до високих енергій, інтенсивно розвивається прискорювальна високовольтна сильнострумна техніка, спрямована на генерування пучків відносно низької енергії (до 10 MeV), але високої інтенсивності, причому потужні пучки мають майже безмежні можливості практичного застосування в промисловості. Перспективними напрямками застосування пучків є: очищення води промислових, сільськогосподарських і комунальних стоків (пучково-озонна технологія), стерилізація медичних виробів, очищення відхідних газів від окислів сірки й азоту, створення нових матеріалів з покращеними технічними характеристиками, дезінсекція зерна, передпосівне опромінення насіння, консервація їжі, продовження строку зберігання сільгоспродуктів і багато іншого.

По тому, як роботи з інтенсивними електронними пучками переходять із області досліджень в область промислового застосування, виникає

необхідність створення прискорювачів з високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) і великою середньою потужністю пучка (від десятків кіловатів до 1 МВт і більше).

Найбільш потужними генераторами інтенсивних електронних і іонних пучків є широко поширені лінійні індукційні прискорювачі (ЛІП). Перевагою їх у порівнянні з іншими типами прискорювачів є модульність виконання, що дає можливість отримання практично необмеженої потужності пучка при скільки завгодно великій його енергії.

Актуальність теми обумовлена необхідністю удосконалення елементів секції ЛІП електронів і ЛІП зарядово-компенсованих іонних пучків для забезпечення прискорювальної напруги на рівні не менше 2 МВ при збільшенні середньої потужності пучка від 100 кВт до мегаватного рівня, підвищених частоти посилок прискорювальних імпульсів та темпу прискорення. Призначення розроблювального ЛІП:

1) у промисловості (на основі ЛІП електронів): для промислового устаткування, пов'язаного з обробленням великих обсягів речовини;

2) в енергетиці (на основі ЛІП зарядово-компенсованих іонних пучків) – як драйвер реактора інерціального термоядерного синтезу на важких іонах.

У зв'язку із цим актуальними завданнями є науково-технічне обґрунтування напрямків удосконалення елементів секцій ЛІП, призначених для різних застосувань, з метою покращення їх енергетичних характеристик і забезпечення заданих параметрів прискорювача.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення секцій сильнострумного ЛІП електронів і ЛІП зарядово-компенсованих іонних пучків для покращення їх енергетичних характеристик (темпу прискорення, частоти посилок прискорювальних імпульсів, середньої потужності пучка).

Відповідно до мети дослідження поставлені завдання:

1. Провести аналіз впливу елементів секції ЛІП з індукційною системою, секціонованою по осьовій довжині, на її енергетичні характеристики, з метою розроблення заходів щодо забезпечення

максимального темпу прискорення при найменших енергетичних втратах в індукційній системі у таких секціях.

2. Провести науково-технічне обґрунтування конструкції елементів секції ЛПП зарядово-компенсованих іонних пучків, що дозволяє забезпечити необхідні параметри прискорювача – прискорювальну напругу секції не менше 2 МВ, темп прискорення не менше 2 МВ/м, частоту посилок прискорювальних імпульсів не менше 11 Гц.

3. Провести чисельно-аналітичне дослідження динаміки імпульсного перемагнічування феромагнетика індукторів ЛПП з метою визначення впливу геометрії феромагнітних осердь індукторів і режиму їхнього навантаження на форму імпульсу прискорювальної напруги. Виявити шляхі зменшення розкиду прискорювальної напруги на столі імпульсу.

4. Провести чисельно-аналітичне і експериментальне дослідження впливу конструктивних елементів секції ЛПП електронів на забезпечення її високовольтної вакуумної електричної ізоляції і запропонувати способи їх удосконалення.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є електромагнітні процеси, що відбуваються в секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача заряджених часток.

Предметом дослідження є формування сильних електричного і магнітного полів в електроізоляційній та індукційній системах секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача заряджених часток.

При проведенні науково-технічного обґрунтування конструкції секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача з покращеними енергетичними характеристиками використовувалися аналітичні методи для розрахунку напруженості електричного поля в її електроізоляційних елементах в сукупності з чисельним моделюванням електричного поля методом кінцевих елементів. При дослідженні динаміки імпульсного перемагнічування феромагнітних осердь індукторів ЛПП з метою визначення способів зменшення розкиду на столі імпульсу прискорювальної напруги і

визначення енергетичних втрат в індукційній системі використалася теорія імпульсного перемагнічування стрічкових феромагнітних матеріалів із прямокутною петлею гістерезису в наносекундному діапазоні в сполученні з методом дискретних резистивних схем заміщення. При обґрунтуванні можливості довготривалої безперебійної роботи секції ЛПП в частотному режимі з точки зору теплових навантажень на її елементи внаслідок енергетичних втрат в них використалися стандартні моделі з теорії теплопередачі. В ході дослідження високовольтної вакуумної електричної ізоляції існуючої секції ЛПП електронів застосовувалось чисельне моделювання електричного поля вакуумної електричної ізоляції методом кінцевих елементів та чисельно-аналітичні розрахунки на основі теорії електричних кіл; результати розрахунків було перевірено експериментальним шляхом.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Удосконалено секціоновану по осьовій довжині феромагнітну індукційну систему секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача за рахунок виконання індукторів з радіальними розмірами, що зменшуються в напрямку від вакуумного ізолятора до торця секції, завдяки чому істотно зменшені енергетичні втрати в індукційній системі і забезпечено однаковий коефіцієнт запасу електричної міцності в усіх ділянках високовольтної ізоляції секції.

2. Вперше обґрунтовано умови рівномірного розподілу високої напруги по вакуумному ізолятору крупnoseкціонованої секції ЛПП без застосування подільника напруги, завдяки розташуванню між градієнтними електродами вакуумного ізолятора секціонованої по радіусу індукційної системи, що дозволило істотно підвищити власний темп прискорення секції.

3. Виявлено вплив геометрії феромагнітного осердя на форму імпульсу струму перемагнічування індуктора в наносекундному діапазоні, що дозволило визначити способи зменшення розкиду на столі імпульсу прискорювальної напруги при роботі індуктора на неробочому ході в режимі

повної струмової компенсації, та при навантаженні пучком.

4. Експериментально виявлено небажаний електромагнітний вплив від дроселя кола розмагнічування напівсекції ЛПП на котушку фокусування, розташовану в прискорювальній камері, що призводив до появи небезпечних перенапруг і електричних пробоїв між її виведеннями; запропоновано способи усунення цих перенапруг.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено алгоритми інженерного розрахунку елементів секцій сильнострумних ЛПП електронних і зарядово-компенсованих іонних пучків, призначених для частотного режиму роботи і забезпечення великої середньої потужності прискорююмого пучка (аж до мегаватного рівня).

2. Запропоновано нові способи компонування індукційної та електроізоляційної систем секції ЛПП, що дозволяють покращити енергетичні характеристики прискорювача.

3. Визначено вплив геометрії феромагнітного осердя і режиму роботи індуктора (під навантаженням або при повній струмовій компенсації іонного пучка електронним) на форму імпульсу прискорювальної напруги та запропоновані способи зменшення розкиду на столі імпульсу при різних режимах роботи.

4. Матеріали дисертаційної роботи використані в навчальному процесі кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» НТУ «ХП» при підготовці бакалаврів та магістрів за напрямом 6.05070104 та 8.05070104 спеціальності «Техніка та електрофізика високих напруг» в навчальних дисциплінах «Конденсаторна техніка», «Фізика електростатичних процесів і технології», та при виконанні дипломного проектування, курсових і науково-дослідних студентських робіт.

**Ключові слова:** сильнострумний лінійний індукційний прискорювач заряджених часток, вакуумна електрична ізоляція, індукційна система.

### Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ложкин Р. С. Исследование электрической прочности изолятора линейного индукционного ускорителя / А. Г. Гурин, Л. Х. Китаевский, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2000. – Вип. 127, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 20–23.
2. Ложкин Р. С. Требования к параметрам линейных индукционных ускорителей, применяемых для очистки воды / А. Г. Гурин, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2003. – Вип. 9, Т. 3, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 83–86.
3. Ложкин Р. С. Повышение электрической прочности изоляции линейного индукционного ускорителя / А. А. Альшейхи, А. Г. Гурин, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2003. – Вип. 11, «Проблеми вдосконалювання електричних машин та апаратів». – С. 3–7.
4. Ложкин Р. С. Определение потерь в витых тороидальных сердечниках при импульсном перемагничивании / А. Г. Гурин, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2004. – Вип. 7, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 73–76.
5. Ложкин Р. С. Оптимизация линейного индукционного ускорителя для промышленных целей / Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2004. – Вип. 21, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 91–94.
6. Ложкин Р. С. Баланс энергии в высокоэнергетичном линейном индукционном ускорителе / А. Г. Гурин, Р. С. Ложкин // Електротехніка та електромеханіка. – Харків : НТУ «ХП», 2005. – № 1 – С. 83–85.
7. Ложкин Р. С. Контроль работоспособности изоляции линейного индукционного ускорителя, применяемого для промышленных целей / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2005. – Вип. 42, «Електроенергетика та перетворювальна

техніка». – С. 16–20.

8. Патент 64208 Лінійний індукційний прискорювач / А. Г. Гурин, О. С. Алдакімов, Р. С. Ложкін, В. Я. Гладченко, Є. О. Корнілов. – Патенты и изобретения: Изобретения, 2005.

9. Ложкин Р. С. Проблемы вакуумной электрической изоляции линейного индукционного ускорителя / В. А. Винокуров, А. Г. Гурин, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2006. – Вип. 7, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 70–74.

10. Ложкин Р. С. Расчет эквивалентных параметров схемы линейного индукционного ускорителя / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2006. – Вип. 28, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 50–55.

11. Ложкин Р. С. Коэффициент полезного действия линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2006. – Вип. 34, «Електроенергетика та перетворювальна техніка». – С. 66–73.

12. Ложкін Р. С. Розрахункова модель імпульсного модулятора лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсированих іонних пучків / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVI міжнар. наук.-практ. конференції, 4–6 червня 2008 р. Харків: у 2 ч. – Ч. 1. Секція 10: Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології в енергетиці. НТУ "ХП". – С. 461.

13. Ложкін Р. С. Конструкція електричної ізоляції секції лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсированих іонних пучків / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVII міжнар. наук.-практ. конференції, 20 – 22 травня, НТУ "ХП", Харків 2009. Секція 10: Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології в енергетиці. – С. 540.

14. Ложкін Р. С. Теплова стійкість секції лінійного індукційного

прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVIII міжнар. наук.-практ. конференції, 12 – 14 травня, НТУ "ХП", Харків 2010. Секція 10 – Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології. – С. 222.

15. Ложкин Р. С. Элементы секции сильнооточного линейного индукционного ускорителя зарядово-компенсированных ионных пучков с повышенными энергетическими характеристиками / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2010. – № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (54). – P. 61–66.

16. Ложкин Р. С. Моделирование процесса импульсного перемагничивания тороидального ферромагнитного сердечника в наносекундном диапазоне / Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2011. – Вип. 41, «Енергетика: надійність та енергоефективність». – С. 88–99.

17. Патент 60975 UA, МПК (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). Пристрій для опромінення ізоляційних матеріалів електронним пучком / А. Г. Гурин, Р. С. Ложкін, Є. О. Корнілов, О. В. Федорівська, В. О. Вінокуров, В. А. Гурін, В. В. Колосенко. – НТУ "ХП", u201011014; Заяв. 13.09.2011; Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

18. Ложкін Р. С. Застосування методів системного аналізу при проектуванні лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XX міжнар. наук.-практ. конференції, 15 – 17 травня, НТУ "ХП", Харків 2012. Секція 10 – Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології. – С. 217.

19. Патент 72041 UA, МПК (2012.01) H01L 27/00 H05H 9/00 H05H 11/00. Модуль лінійного індукційного прискорювача / А. Г. Гурин, Р. С. Ложкін, Є. О. Корнілов. – НТУ «ХП», u201114439; Заяв. 06.12.2011; Опубл.

10.08.2012, Бюл. № 15.

20. Ложкін Р. С. Забезпечення теплової стійкості елементів секції потужнострумowego лінійного індукційного прискорювача заряджених часток / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXII міжнар. наук.-практ. конференції, 21 – 23 травня, НТУ "ХПІ", Харків 2014. Секція 10 – Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології. – С. 231.

21. Ложкін Р. С. Елементи секції потужнострумowego лінійного індукційного прискорювача з підвищеними енергетичними характеристиками / Р. С. Ложкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XXIV міжнар. наук.-практ. конференції, 18 – 20 травня, НТУ "ХПІ", Харків 2016. Секція 10 – Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології. – С. 168.

22. Ложкин Р. С. Перспективы применения сильноточных импульсно-периодических индукционных ускорителей электронов в производстве кабельно-проводниковой продукции / А. Г. Гурин, Е. А. Корнилов, Р. С. Ложкин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 3 (1175), «Енергетика: надійність та енергоефективність». – С. 47–59.

23. Ложкин Р. С. Компактный энергопровод с малым волновым сопротивлением для передачи сильноточных высоковольтных наносекундных импульсов с высокой частотой посылок / Р. С. Ложкин // «Цифрові технології», Одеса: Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, 2016. – Вип. 19. – С. 140–148.

## ABSTRACT

*Lozhkin R. S.* High-current linear induction charged particles accelerator section energy performance improving by improving its elements. Qualification scientific work on the manuscript.

Technic sciences candidate scientific degree dissertation receiving on specialty 05.09.13 "Equipment strong electric and magnetic fields" – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2017.

In our time, the development of accelerator technology, designed to generate high-current relativistic electron and ion beams, opens up broad scientific perspectives. This is the creation and heating of plasma to thermonuclear temperature, new collective methods of ion acceleration, works on heavy ion fusion, and much more.

Along with scientific and technical directions, aimed at accelerating charged particles to high energies, an accelerating high-voltage high-current technique is intensively developing, aimed at generating beams of relatively low energy (up to 10 MeV), but of high intensity, and powerful beams have almost unlimited possibilities of practical application in industry. The beams application promising areas are: water treatment industrial, agricultural and municipal effluents (beam-ozone technology), medical products sterilization, exhaust gases purification from sulfur and nitrogen oxides, development new materials with improved performance, grain disinfestation, pre-sowing seeds irradiation, food preservation, agricultural products extending the shelf life and more.

As soon as work with intense electron beams move from an research area in the industrial applications area, there is a need for accelerators with high efficiency and large average beam power (from tens of kilowatts up to 1 MW and more).

As the most intense electron and ion beams powerful generators nowadays the most widespread linear induction accelerators (LIA). Their advantage in comparison with other accelerators types is modularity design gives the beam obtaining almost unlimited power possibility at any big its energy.

The relevance of the topic is due to the need to improve the elements of the LIA section of electrons and LIA of charge-compensated ion beams to provide an accelerating voltage of at least 2 MV with an increase in the average beam power from 100 kW to a megawatt level, increased frequency of accelerating pulse transmissions and acceleration rate. The LIA development purpose are:

1) in industry (based on the electrons LIA): for industrial equipment associated with the processing of matter large volumes;

2) in the energy sector (based on LIA charge-compensated ion beams) as the reactor driver inertial thermonuclear fusion on heavy ions.

In this regard, topical tasks are the scientific and technical justification of the directions for improving the elements of the LIA sections intended for various applications in order to improve their energy characteristics and the specified parameters of the accelerator.

The aim of the thesis is to improve the sections of electrons high-current LIA and LIA of charge-compensated ion beams in order to improve their energy characteristics (acceleration rate, frequency of accelerating impulses, average beam power).

According the study tasks purpose to:

1. To analyze the influence of the elements of the LIA section with the induction system, sectioned along the axial length, on its energy characteristics, in order to develop measures to ensure the maximum rate of acceleration with the lowest energy losses in the induction system.

2. Conduct a scientific and technical justification for the design of the elements of the LIA section of charge-compensated ion beams, which allows to provide the necessary parameters of the accelerator - the accelerating voltage of the section is not less than 2 MV, the acceleration rate is not less than 2 MV/m, the frequency of the accelerating impulses is not less than 11 Hz.

3. Conduct a numerically-analytical study of the dynamics of the pulsed magnetization reversal of the ferromagnet of the LIA inductors in order to determine the effect of the geometry of the ferromagnetic inductor cores and the

mode of their loading on the accelerating voltage pulse shape. Identify ways to reduce the spread of the accelerating voltage on the pulse table.

4. Conduct a numerical-analytical and experimental study of the effect of structural elements of the electrons LIA section on providing its high-voltage vacuum electrical insulation and suggest ways to improve them.

The object of research in the thesis work is electromagnetic processes occurring in the section of a high-current linear induction accelerator of charged particles.

The subject of the study is the formation the strong electric and magnetic fields in the electrical insulating and inductive systems of a charged particles high-current linear induction accelerator section.

During the scientific and technical substantiation of the design of the high-current linear induction accelerator section a with improved energy characteristics, analytical methods were used to calculate the electric field strength in its electrical insulating elements in combination with numerical simulation of the electric field by the finite element method. In the study of the LIA inductors ferromagnetic cores pulsed magnetization reversal dynamics in order to determine methods for reducing the scatter on the accelerating voltage pulse table and determining the energy losses in the induction system, the theory of pulsed magnetization reversal of ribbon ferromagnetic materials with a rectangular hysteresis loop in nanosecond range, discrete resistive substitution schemes. In justifying the possibility of the LIA section long-term uninterrupted operation in the frequency regime from the point of view of thermal loads on its elements due to energy losses, standard models of the heat transfer theory were used in them. During the study of high-voltage vacuum electrical insulation of the existing the electrons LIA section, numerical modeling of the electric field of vacuum electrical insulation by the finite element method and numerically-analytical calculations on the basis of the electric circuit theory were applied; the results of the calculations were verified experimentally.

Scientific results novelty:

1. The ferromagnetic induction system of a high-current linear induction accelerator section is optimized by performing inductors with radial dimensions decreasing in the direction from the vacuum insulator to the end of the section, due to which the energy losses in the induction system are substantially reduced and the same margin of electric strength in all sections of the high-voltage insulation section.

2. For the first time, the conditions for uniform distribution of high voltage along the vacuum insulator of the LIA large section without the use a voltage divider are justified, due to the arrangement of a radial induction system between the gradient electrodes of the vacuum insulator, which significantly increases the self-acceleration rate of the section.

3. The influence of the ferromagnetic core geometry on the shape of the magnetization reversal current pulse in the nanosecond range was revealed, which made it possible to determine methods for reducing the scatter on the accelerating voltage pulse table when the inductor is idling at full current compensation and under beam loading.

4. An undesirable electromagnetic effect from the throttle of the demagnetizing circuit of the LIA half-section on the focusing coil located in the accelerating chamber has been experimentally revealed, which leads to the appearance of dangerous overvoltage and electrical breakdowns between its terminals; methods for eliminating these overvoltages are proposed.

The results practical significance are:

1. Algorithms of engineering calculation of elements of high-current electronic and charge-compensated ion beams LIA sections designed for the frequency operation mode and providing a large average power of the accelerated beam (up to a megawatt level) have been developed.

2. New ways of arranging the induction and electrical insulating systems of the LIA section, which improve the energy characteristics of the accelerator, are proposed.

3. The influence of the geometry of the ferromagnetic core and the inductor

operation mode (under load or at full current compensation of the ion beam by the electron beam) on the pulse shape of the accelerating voltage is determined, and methods for reducing the spread on the pulse table under various operating conditions are proposed.

4. The materials of the thesis work were used in the educational process of the Department of Electrical Insulation and Cable Technology of NTU "KhPI" in the preparation of bachelors and masters in the direction 6.05070104 and 8.05070104 of the specialty "Engineering and electrophysics of high Voltages" in the educational disciplines "Condenser technology", "Physics of electrostatic processes and technology", and at performance of degree designing, course and research student's works.

**Keywords:** charged particles high-current linear induction accelerator, vacuum electrical insulation, induction system.

#### **List of published works on the topic of the dissertation**

1. Gurin A. G., Kitaevskiy L. H., Lozhkin R. S., 2000. Issledovanie elektricheskoy prochnosti izolyatora lineynogo induktsionnogo uskoritelya. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 127, "Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika", Kharkiv: NTU «KhPI», 2000, pp. 20 – 23. (in Russian)
2. Gurin A. G., Lozhkin R. S., 2003. Trebovaniya k parametram lineynyih induktsionnyih uskoriteley, primenyaemyih dlya ochistki vodyi. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 9, t. 3, "Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika", Kharkiv: NTU «KhPI», 2003, pp. 83 – 86. (in Russian)
3. Alsheyhi A. A., Gurin A. G., Lozhkin R. S., 2003. Povyishenie elektricheskoy prochnosti izolyatsii lineynogo induktsionnogo uskoritelya. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 11, "Problemyi sovershenstvovaniya elektricheskikh mashin i apparatov", Kharkiv: NTU «KhPI», 2003, pp. 3 – 7. (in Russian)
4. Gurin A. G., Lozhkin R. S., 2004. Opredelenie poter' v vityih toroidalnyih serdechnikah pri impulsnom peremagnichivanii. *Visnyk NTU «KhPI»*,

Vyp. 7, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2004, pp. 73 – 76. (in Russian)

5. Lozhkin R. S., 2004. Optimizatsiya lineynogo induktsionnogo uskoritelya dlya promyshlennykh tseley. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 21, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2004, pp. 91 – 94. (in Russian)

6. Gurin A. G., Lozhkin R. S., 2005. Balans energii v vyisokoenergetichnom lineynom induktsionnom uskoritele. *Elektrotekhnika ta elektromekhanika*, № 1, NTU «KhPI», Harkov 2005, pp. 83 – 85. (in Russian)

7. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S., 2005. Kontrol' rabotosposobnosti izolyatsii lineynogo induktsionnogo uskoritelya, primenyaemogo dlya promyshlennykh tseley. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 42, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2005, pp. 16 – 20. (in Russian)

8. Gurin A.G., AldakImov O.S., Lozhkin R.S., Gladchenko V.Ya., Kornilov E.O., 2004. *Liniyniy Induktsiyniy priskoryuvach*. Patent 64208. Patentyi i izobreteniya: 2004. (in Ukrainian)

9. Vinokurov V. A., Gurin A. G., Lozhkin R. S, 2006. Problemyi vakuumnoy elektricheskoy izolyatsii lineynogo induktsionnogo uskoritelya. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 7, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2006, pp. 70 – 74. (in Russian)

10. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S., 2006. Raschet ekvivalentnykh parametrov shemy lineynogo induktsionnogo uskoritelya. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 28, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2006, pp. 50 – 55. (in Russian)

11. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S., 2006. Koeffitsient poleznogo deystviya lineynogo induktsionnogo uskoritelya zaryadovo-kompensovanih ionnykh puchkov. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 34, *"Elektroenergety`ka ta peretvoryuval`na tekhnika"*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2006, pp. 66 – 73. (in Russian)

12. Lozhkin R. S., 2008. Rozrahunkova model impulsnogo modulyatora liniynogo Induktsiynogo pryskoryuvacha zaryadovo-kompensovanih ionnyh puchkiv. *Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ya: materialy XVI mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 4 – 6 chervnya 2008, Kharkiv: u 2 ch. – Ch. 1. Sektsiya 10: Suchasni Informatsiyni ta energozberigayuchi tehnologiyi v energetytsi. NTU «KhPI», p. 461. (in Ukrainian)
13. Lozhkin R. S., 2009. Konstruktsiya elektrychnoyi izolyatsiyi sektsiyi liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha zaryadovo-kompensovanyh ionnyh puchkiv. *Informatsiyni tehnologiyi: nauka, tekhnika, tekhnologiya, osvita, zdorov'ya: materialy XVII mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 20 – 22 travnya, NTU «KhPI», Kharkiv 2009. Sektsiya 10: Suchasni informatsiyni ta energozberigayuchi tehnologiyi v energetytsi. p. 540. (in Ukrainian)
14. Lozhkin R. S., 2010. Teplova stiykist' sektsiyi liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha zaryadovo-kompensovanyh ionnyh puchkiv. *Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: materialy XVIII mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 12 – 14 travnya, NTU "KHPI", Kharkiv 2010. Sektsiya 10 – Suchasni informatsiyni ta enerhozberihayuchi tekhnolohiyi. p. 222. (in Ukrainian)
15. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S., 2010. Elementyi sektsii silnotochnogo lineynogo induktsionnogo uskoritelya zaryadovo-kompensirovannyh ionnyh puchkov s povyishennyimi energeticheskimi karakteristikami. *PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY*. 2010. № 3. *Series: Nuclear Physics Investigations* (54), pp. 61 – 66. (in Russian)
16. Lozhkin R. S. Modelirovanie protsessa impulsnogo peremagnichivaniya toroidalnogo ferromagnitnogo serdechnika v nanosekundnom diapazone. *Visnyk NTU «KhPI»*, Vyp. 41, «Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'», Kharkiv: NTU «KhPI», 2011, pp. 88 – 99. (in Russian)
17. Gurin A. G., Lozhkin R. S., Kornilov E. O., Fedorivska O. V. Vinokurov V. O., Gurin V. A., Kolosenko V. V., 2011. *Prystriy dlya oprominennya izolyatsiynyh materialiv elektronnyh puchkom*. Patent 60975 UA,

MPK (2011.01) G21K 5/00 G01K 1/08 (2006.01) G21K 1/093 (2006.01). NTU «KhPI», u201011014; Zayav. 13.09.2011; Opubl. 25.06.2011, Byul. № 12. (in Ukrainian)

18. Lozhkin R. S., 2012. Zastosuvannya metodiv systemnogo analizu pry proektuvanni liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha zaryadovo-kompensovanyh ionnyh puchkiv. *Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: materialy XX mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 15 – 17 travnya, NTU "KHPI", Kharkiv 2012. *Sektsiya 10 – Suchasni informatsiyni ta enerhozberihayuchi tekhnolohiyi*. p. 217. (in Ukrainian)

19. Gurin A. G., Lozhkin R. S., Kornilov E. O., 2012. *Modul liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha*. Patent 72041 UA, MPK (2012.01) H01L 27/00 H05H 9/00 H05H 11/00. NTU «KhPI», u201114439; Zayav. 06.12.2011; Opubl. 10.08.2012, Byul. № 15. (in Ukrainian)

20. Lozhkin R. S., 2014. Zabezpechennya teplovoyi stiykosti elementiv sektsiyi potuzhnostrumovogo liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha zaryadzhenykh chastok. *Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: materialy XXII mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 21 – 23 travnya, NTU "KHPI", Kharkiv 2014. *Sektsiya 10 – Suchasni informatsiyni ta enerhozberihayuchi tekhnolohiyi*. p. 231. (in Ukrainian)

21. Lozhkin R. S., 2016. Elementy sektsiyi potuzhnostrumovogo liniynogo induktsiynogo pryskoryuvacha z pidvyschenymy energetychnymy harakterystykamy. *Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: materialy XXIV mizhnar. nauk.-prakt. konferentsiyi*, 18 – 20 travnya, NTU "KHPI", Kharkiv 2016. *Sektsiya 10 – Suchasni informatsiyni ta enerhozberihayuchi tekhnolohiyi*. p. 168. (in Ukrainian)

22. Gurin A. G., Kornilov E. A., Lozhkin R. S., 2016. Perspektiviyi primeneniya silnotochnykh impulsno-periodicheskikh induktsionnykh uskoriteley elektronov v proizvodstve kabelno-provodnikovoy produktsii. *Visnyk NTU «KhPI»*, № 3 (1175), *Seriya: «Enerhetyka: nadiynist' ta enerhoefektyvnist'»*, Kharkiv: NTU «KhPI», 2016, pp. 47 – 59. (in Russian)

23. Lozhkin R. S., 2016. Kompaktnyy energoprovod s malyim volnovym soprotivleniem dlya peredachi silnotochnykh vyisokovoltnykh nanosekundnykh impulsov s vyisokoy chastotoy posylok. *«Tsyfrovi tekhnolohiyi»*, Odesa: Odes'ka natsional'na akademiya zv'yazku im. O.S. Popova, 2016. – Vyp. 19, pp. 140 – 148. (in Russian)

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ. ....	6
ВСТУП. ....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ СЕКЦІЙ	
СИЛЬНОСТРУМНОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО	
ПРИСКОРЮВАЧА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК І ПОСТАНОВКА	
ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....	
	21
1.1. Принцип дії лінійного індукційного прискорювача. ....	21
1.2. Аналіз існуючих конструкцій секцій лінійного індукційного прискорювача. ....	23
1.3. Аналіз схем сильнострумних високовольтних імпульсних модуляторів, що застосовуються для живлення індукційної системи лінійних індукційних прискорювачів. ....	29
1.4. Вимоги до параметрів лінійних індукційних прискорювачів електронів, що застосовуються для промислових цілей. ....	33
1.5. Вимоги до параметрів лінійних індукційних прискорювачів зарядово-компенсованих іонних пучків, що застосовуються для інерціального термоядерного синтезу. ....	41
1.6. Висновки по першому розділу. ....	47
РОЗДІЛ 2. НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ	
ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ ТА ІНДУКЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	
СЕКЦІЇ СИЛЬНОСТРУМНОГО ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО	
ПРИСКОРЮВАЧА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК З ПОКРАЩЕНИМИ	
ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ. ....	
	51
2.1. Постановка завдання. ....	51
2.2. Науково-технічне обґрунтування конструкції елементів крупно-секціонованої секції лінійного індукційного прискорювача з індукційною системою, секціонованою по осьовій довжині. ....	54
2.2.1. Обґрунтування вибору внутрішнього радіусу індукторів індукційної системи доприскорювальної напівсекції. ...	54

2.2.2. Обґрунтування вибору внутрішнього радіусу індукторів індукційної системи інжекторної напівсекції. . . . .	59
2.2.3. Обґрунтування вибору осьової довжини індукторів і індукційної системи. . . . .	61
2.2.4. Оцінка гранично досяжного темпу прискорення індукційної системи, секціонованої по осьовій довжині. . . . .	62
2.2.5. Оцінка витрат феромагнетика при виготовленні крупно-секціонованих напівсекцій лінійного індукційного прискорювача з індукційною системою, секціонованою по осьовій довжині. . . . .	65
2.2.6. Обґрунтування конструкції елементів високовольтної вакуумної електричної ізоляції секції лінійного індукційного прискорювача. . . . .	67
2.2.7. Оцінка максимального темпу прискорення секції лінійного індукційного прискорювача з індукційною системою, секціонованою по осьовій довжині. . . . .	75
2.3. Науково-технічне обґрунтування конструкції елементів крупно-секціонованої секції лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків з покращеними енергетичними характеристиками. . . . .	76
2.3.1. Обґрунтування геометричних розмірів ділянок вакуумного тракту лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків. . . . .	76
2.3.2. Визначення загального максимально досяжного темпу прискорення лінійного індукційного прискорювача зарядово-компенсованих іонних пучків, обумовленого електричною міцністю прискорювальних вакуумних проміжків секції, що прискорює іони, і компенсатора. . . . .	79
2.3.3. Визначення залежності власного темпу прискорення секції, що прискорює іони, від загального темпу прискорення лінійного індукційного прискорювача	

зарядово-компенсованих іонних пучків. . . . .	81
2.3.4. Обґрунтування конструкції елементів секції лінійного індукційного прискорювача, що прискорює іони. . . . .	82
2.4. Аналіз можливості забезпечення довготривалої безперебійної роботи в частотному режимі секції сильнострумного лінійного індукційного прискорювача з точки зору теплових навантажень на її елементи. . . . .	90
2.4.1. Аналіз можливості забезпечення частотного режиму роботи індукційної системи секції з точки зору теплових навантажень, що виникають внаслідок енергетичних втрат при її перемагнічуванні. . . . .	91
2.4.2. Аналіз теплових навантажень на електричну ізоляцію первинного витка індуктора при роботі секції в частотному режимі. . . . .	108
2.4.3. Обґрунтування можливості частотного режиму роботи енергопроводів, що живлять індукційну систему. . . . .	114
2.4.4. Обґрунтування можливості частотного режиму роботи вакуумного ізолятора. . . . .	122
2.5. Висновки по другому розділу . . . . .	125
<b>РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ТОРОЇДНИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ОСЕРДЬ ІНДУКТОРІВ ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК В НАНОСЕКУНДНОМУ ДІАПАЗОНІ. . . . .</b>	
3.1. Вступ до розділу. . . . .	128
3.2. Опис методу дослідження . . . . .	129
3.3. Початкові умови для чисельного розрахунку. . . . .	132
3.4. Результати дослідження схеми, у якій первинний виток індуктора підключений до джерела постійної ЕРС, струм у вторинному витку відсутній. . . . .	133
3.5. Результати дослідження схеми, у якій первинний виток індуктора підключений до довгої лінії, струм у вторинному	

витку відсутній. . . . .	139
3.6. Результати дослідження схеми, у якій первинний виток індуктора підключений до довгої лінії, вторинний виток навантажений активним опором. . . . .	143
3.7. Висновки по третьому розділу. . . . .	147
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕКЦІЇ ЛІНІЙНОГО ІНДУКЦІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ НА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇЇ ВИСОКОВОЛЬТНОЇ ВАКУУМНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ. . . . .	
4.1. Вступ до розділу. . . . .	150
4.2. Опис експериментальної установки. . . . .	150
4.2.1. Схема виміру струму навантаження. . . . .	157
4.2.2. Схема виміру вихідної напруги напівсекції. . . . .	164
4.3. Результати дослідження високовольтної вакуумної електричної ізоляції. . . . .	167
4.4. Висновки по четвертому розділу. . . . .	176
ВИСНОВКИ. . . . .	178
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ. . . . .	180
ДОДАТОК А. Результати чисельно-аналітичного розрахунку електричного поля в сегментах високовольтного вакуумного ізолятора. . .	
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи. . . .	197
ДОДАТОК В. Публікації здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації. . . . .	201