

АНОТАЦІЯ

Майкут С.О. Фізико-топологічне моделювання приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Актуальність роботи. Робота пристроїв вакуумно-плазмової і потужної електроніки базуються на використанні електромагнітного керуванням формою та напрямом електронного потоку. До них відносяться індукційні пристрої для випаровування матеріалів з подальшою іонізацією, газорозрядні та вакуумні комутатори тощо. Зазвичай магнітне поле у цих пристроях створюється за допомогою ВЧ індукторів, які потребують узгодження електричних параметрів з джерелом живлення, електромагнітних та конструкційних параметрів з іншими функціональними елементами приладів та пристроїв. Обмеження, яке накладається на робочі частоти ВЧ приладів, та протиріччя узгодження параметрів можна усунути використанням додаткового елемента – ВЧ концентратора електромагнітного поля. Використання ВЧ концентратора магнітного поля дозволяє:

- узгодити імпеданси електричного джерела і індуктора і, як наслідок, зменшити витрати потужності на генерацію керуючих магнітних полів;
- розширити діапазон керованості напруженістю електричного та магнітного полів;
- підвищити ефективність керування формою та напрямом електронного потоку.

Хоча ВЧ концентратори магнітного поля використовуються у ряді технологічних установок, наприклад, для закалювання деталей, сортуванні металів,

тощо, однак тривають пошуки нових принципів їх застосування та оптимізації конструкції.

Широке впровадження ВЧ концентраторів в якості елемента керування формою та напрямом електронного потоку в електронних приладах та пристроях стримується відсутністю розвинутих в достатній мірі методів комп'ютерного дослідження пов'язаних фізичних явищ, до яких відносяться електромагнітні, електротермічні, термо- та гідродинамічні та вакуумно-плазмові, електронно-променеві тощо. Спостерігається недостатній рівень освоєння математичного апарату та програмних алгоритмів для вивчення характеру і закономірностей протікання пов'язаних процесів в таких приладах та пристроях. Наявність таких методів могло б стати передумовою для проектування приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля, прогнозування їх можливостей, виявило б шляхи отримання необхідних характеристик, розширило б науково-фізичні уявлення і рамки технічної та виробничої застосовності конкретних видів приладів.

Для мультифізичного дослідження електронних приладів доцільно використовувати фізико-топологічні моделі, які на базі сучасних комп'ютерних технологій дозволяють найбільш повно встановити вплив конструктивних особливостей на пов'язані фізичні процеси, на експлуатаційні параметри та характеристики. Розв'язок задач може відбуватися для стаціонарного і нестаціонарного режимів.

Фізико-топологічні моделі є складовою системою автоматизованого проектування і широко використовуються для дослідження електронних приладів та пристроїв. В галузі електроніки над розробкою фізико-топологічного моделювання працювали закордонні автори Д. Хьюз, Д. Мичтом, Д. Химмельблау, Є.В. Авдєєв, І.П. Норенков, П.А. Зіновєв, Ю.Р. Носов, Б. В. Баталов та українські автори В.П. Сігорський, А.І. Петренко, Р. П. Базилевич, А.І. Кузьмичєв, І.Н. Кучерява та інші.

Розвиток методів розрахунку параметрів приладів з ВЧ концентрацією електромагнітного поля з урахуванням структурної ієрархії і особливостей протікання пов'язаних фізичних процесів на базі фізико-топологічних моделей та розробка математичних моделей для тривимірного дослідження таких пристроїв є

важливою науковою задачею. Її актуальність підтверджується також потребами практичного використання та модернізації електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів і реалізації їх раціональних режимів експлуатації.

У даній роботі пропонується поглиблене рішення перерахованих вище задач. Розробка та поліпшення методів розрахунку електромагнітного поля і пов'язаних з ним фізичних процесів в елементах електронних технологічних пристроїв та потужних комутаційних приладів шляхом тривимірного моделювання з метою подальшого удосконалення та забезпечення надійної експлуатації їх, являє собою вирішення важливої науково-прикладної задачі, а тема дисертаційної роботи, яка вирішує таку проблему, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках наступних наукових проектів:

– НДДКР Фізико-топологічне математичне моделювання джерел заряджених та нейтральних частинок. Державний реєстраційний номер: 0115U006750 Факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

(2015 - 2018 рр.)

– НДДКР "Дослідження електродинамічних ефектів у пристроях вакуумної та плазмової електроніки технологічного призначення Державний реєстраційний номер: 0119U103973 Факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (2019 – 2022 рр.)

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка удосконалених фізико-топологічних і математичних моделей для чисельного розрахунку тривимірних електромагнітних полів при дослідженні їх розповсюдження в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля і аналіз пов'язаних з ними процесів різної фізичної природи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні основні наукові та практичні задачі.

1. Аналіз особливостей фізико-топологічного моделювання та обґрунтування доцільності його розвитку і застосування для чисельного розрахунку тривимірного електромагнітного поля і пов'язаних з ним процесів різної фізичної природи в елементах пристроїв з ВЧ концентрацією магнітного поля зі складною внутрішньою ієрархічною структурою.

2. Розробка нової фізико-топологічної моделі та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в індукційному випарнику з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, тиглі, матеріалі завантаження для випаровування та іонізації при температурі випаровування, потоці електронів.

3. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами індукційного випарника з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного температурного поля в тиглі з завантаженням при температурі випаровування різних матеріалів.

4. Встановлення зв'язку між електричними потенціалами на елементах індукційного випарника з концентратором електромагнітного поля з параметрами електронного потоку, який емітує з поверхні тигля з завантаженням при температурі випаровування.

5. Розробка нових фізико-топологічних моделей та розвиток використання програмних засобів для тривимірного розрахунку пов'язаних фізичних процесів в потужних комутаторах струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля при послідовному розгляді рівнів структурної ієрархії – індукторі, ВЧ концентраторі, проміжку між електродами, емісії та потоці електронів.

6. Встановлення зв'язку між конструктивними параметрами вакуумного переривника струму з ВЧ концентратором електромагнітного поля зі структурою тривимірного електричного та магнітного полів, та ефективністю керування електронним потоком.

Об'єкт дослідження: прилади з ВЧ концентрацією магнітного поля для випаровування матеріалів та іонізації їх парового потоку, газорозрядні та вакуумні комутатори.

Предмет дослідження: тривимірні фізико-топологічні моделі, конструктивні, технологічні та електрофізичні параметри пристроїв, траєкторії руху електронів.

Методи дослідження: методи математичної фізики, фізико-топологічного моделювання і чисельного розрахунку для розробки та дослідження тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля – випарника, вимикача та переривника струму і визначення шляхів удосконалення їх конструкції.

Наукова новизна результатів, отриманих автором, полягає у наступному:

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного випарника з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження режимів випаровування металів та емісії електронів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів на енергетичну ефективність приладу.

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного переривника струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

– **Вперше** розроблена тривимірна фізико-топологічна модель вакуумного вимикача струму з площинними електродами та ВЧ концентрацією магнітного поля для дослідження траєкторій електронів в проміжку між електродами у перехресному електромагнітному полі з урахуванням вихрових індукованих струмів в електродах та крайових ефектів, яка дозволяє встановити вплив конструктивних параметрів приладу на направленість електронного потоку та встановити величину критичної індукції магнітного поля для відсікання електронів від аноду.

– **Отримали подальший розвиток** методи ієрархічного тривимірного фізико-топологічного моделювання приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля шляхом чисельних розрахунків пов'язаних мультифізичних процесів в єдиному розрахунковому просторі;

– На підставі розрахунків за допомогою тривимірних фізико-топологічних моделей вакуумних приладів з ВЧ концентрацією магнітного поля встановлено, що:

1. Використання ВЧ концентратора електромагнітного поля в якості аноду у вакуумному переривнику струму удосконаленої конструкції дозволяє здійснювати ефективне розмикання при 50 А імпульсу струму відсікання на керівному індукторі і 300 вольт на колекторах.

2. При збільшенні кількості радіальних щілин у нижньому контакті вакуумного переривника струму з 1 до 8, струм відсікання зменшується на 57 %

3. При трансформаторному типі випарника в тиглі виділяється на 3% більше потужності, ніж при автотрансформаторному. При цьому і загальна потужність, яка виділяється у випарнику на 12,3% більше ніж у випарника з трансформаторним з'єднанням індуктора і концентратора.

4. Неоднорідність температури на поверхні завантаження слабо залежить від частоти струму живлення і становить 2 К при діаметрі тигля 32 мм. Якщо прийняти умову ізотермічної поверхні випаровування, то абсолютна похибка розрахунків емісійних характеристик випарника, для всіх розглянутих варіантів конструкції, буде на рівні $0,0013 \div 0,002$.

5. Встановлено, що на відстані 40÷50 мм над тиглем випарника електрони набувають енергію достатню для іонізації атомів міді.

6. Вперше встановлено, що у випарнику з ВЧ концентрацією магнітного поля, не залежно від діаметру тигля і його положення в концентраторі, температура на поверхні випаровування може вважатися однаковою з похибкою не більше 0,5 %.

7 При автотрансформаторній конструкції випарника з концентрацією електромагнітної енергії розрахована напруга на індукторі, яка при частоті 440 кГц забезпечує робочу температуру випаровування 1545 К (для міді) становить 273 В.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів забезпечується коректним застосуванням математичного апарату, алгоритмів фізико-топологічного моделювання пов'язаних фізичних процесів та алгоритмів чисельних розрахунків, а також верифікацією результатів чисельних розрахунків по аналітичним тестовим розрахункам.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному: розроблені та удосконалені тривимірні фізико-топологічні моделі пов'язаних фізичних процесів у вакуумному випарнику, вакуумному вимикачі та перервнику струму з ВЧ концентрацією магнітного поля для вирішення задач ефективного керування електронними потоками. Розроблені фізико-топологічні моделі дозволяють проводити розрахунок пов'язаних фізичних процесів в єдиному розрахунковому середовищі: протікання струму по індуктору з урахуванням скін-ефекту, розподіл електромагнітного поля в межах приладу, індукцію струмів в елементах випарника, нагрівання тигля з завантаженням та трасування руху електронів. Розрахунок дозволяє встановити вплив конструктивних та експлуатаційних параметрів на електродинамічні, термодинамічні, емісійні та електронно-променеві характеристики приладів.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Серед 4 публікації у фахових виданнях 1 стаття написана здобувачем одноосібно [5]. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належать такі результати. В роботі [2] здобувачем проведено огляд застосування пристроїв індукційного нагріву в технології мікро- і нанодисперсних матеріалів. В роботі [3] здобувачем розроблено фізико-топологічну модель плоского діода з плоским індуктором для дослідження ефекту відсічення електронів у плоскому діоді магнітним полем зовнішнього плоского індуктора на прикладі вакуумних вимикачів з плоскими контактами. У роботі [4] здобувач виконав моделювання та дослідження ефекту магнітної відсічення катодних електронів від анода в заключний період переривання струму - на стадії деіонізації плазми і конденсації металевих пар, коли катод ще здатний випускати електрони за рахунок залишкової термоелектронної емісії і вторинної γ -емісії через бомбардування катода залишковими іонами.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 робіт, з яких 4 – це статті у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав (2 включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 1 – публікації у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних). Також мається один патент на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 175 сторінок, у тому числі: 136 сторінки основного тексту, 70 рисунків, 18 таблиць, список використаних джерел із 158 найменувань на 15 сторінках.

Ключові слова: фізико-топологічна модель, моделювання високочастотного нагріву, індукційний випарник, чисельні методи, відсічення електронів в магнітному полі, схрещені електромагнітні поля, вакуумний вимикач, перервник струму.

SUMMARY

Maikut S.O. Physico-topological simulation of devices with HF electromagnetic field concentration. – Qualifying scientific work, the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy in the field of knowledge 17 Electronics and telecommunications in specialty 171 Electronics. - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The operation of vacuum-plasma and powerful electronics devices is based on the use of electromagnetic control of the shape and direction of the electronic flow. These include induction devices for evaporation of materials with subsequent ionization, gas discharge and vacuum switches and the like. Typically, the magnetic field in these devices is created by RF inductors, which require the coordination of electrical parameters with the power supply, electromagnetic and structural parameters with other functional elements of devices and devices. The limitation imposed on the operating frequencies of RF devices and the contradiction of the coordination of parameters can be eliminated by using an additional element - RF concentrator of the electromagnetic field. The use of RF magnetic field concentrator allows:

- match the impedances of the electric source and inductor and, as a consequence, reduce the power consumption for the generation of control magnetic fields;
- expand the range of controllability of electric and magnetic fields;
- increase the efficiency of control of the form and direction of the electronic flow.

Although HF magnetic field concentrators are used in a number of technological installations, for example, for hardening of parts, sorting of metals, etc., but the search for new principles of their application and design optimization continues.

Widespread introduction of RF concentrators as a control element of the shape and direction of electronic flow in electronic devices and devices is constrained by the lack of sufficiently developed methods of computer research of related physical phenomena, which include electromagnetic, electrothermal, thermo- and hydrodynamic and vacuum-

plasma , electron beam, etc. There is an insufficient level of mastering the mathematical apparatus and software algorithms to study the nature and patterns of related processes in such devices and devices. The presence of such methods could be a prerequisite for the design of devices with RF electromagnetic field concentration, forecasting their capabilities, would identify ways to obtain the necessary characteristics, would expand scientific and physical ideas and technical and industrial applicability of specific types of devices.

For multiphysical research of electronic devices it is expedient to use physical and topological models which on the basis of modern computer technologies allow to establish most completely influence of design features on the connected physical processes, on operational parameters and characteristics. Problems can be solved for stationary and non-stationary modes.

Physico-topological models are part of computer-aided design systems and are widely used for the study of electronic devices and devices. In the field of electronics, foreign authors D. Hughes, D. Mitch, D. Himmelblau, E.V. Avdeev, IP Norenkov, PA Zinoviev, Yu.R. Nosov, BV Batalov and Ukrainian authors VP Sigorsky, AI Petrenko, RP Bazilevich, AI Kuzmichev, IN Curly and others.

The development of methods for calculating the parameters of devices with RF electromagnetic field concentration taking into account the structural hierarchy and features of related physical processes based on physico-topological models and the development of mathematical models for three-dimensional study of such devices is an important scientific task. Its relevance is also confirmed by the needs of practical use and modernization of electronic technological devices and powerful switching devices and the implementation of their rational modes of operation.

This paper proposes an in-depth solution of the above problems. Development and improvement of methods for calculating the electromagnetic field and related physical processes in the elements of electronic technological devices and powerful switching devices by three-dimensional modeling to further improve and ensure reliable operation, is a solution of an important scientific problem, and the topic of the dissertation , which solves this problem, is relevant.

Relationship with academic programs, plans, themes. The work was performed at the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" in the framework of the following research projects:

- R&D Physical and topological mathematical modeling of sources of charged and neutral particles. State registration number: 0115U006750 of the Faculty of Electronics of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky" (2015 - 2018)

- R&D "Study of electrodynamic effects in devices of vacuum and plasma electronics of technological purpose State registration number: 0119U103973 of the Faculty of Electronics of the National Technical University of Ukraine" Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky "(2019 - 2022)

The purpose and objectives of the study. The purpose of the dissertation is to develop advanced physico-topological and mathematical models for numerical calculation of three-dimensional electromagnetic fields in the study of their propagation in elements of devices with HF magnetic field concentration and analysis of related processes of different physical nature.

To achieve this goal it is necessary to solve the following main scientific and practical problems.

1. Analysis of peculiarities of physical and topological modeling and substantiation of expediency of its development and application for numerical calculation of three-dimensional electromagnetic field and related processes of different physical nature in elements of devices with RF concentration of magnetic field with complex internal hierarchical structure.

2. Development of a new physical and topological model and development of software for three-dimensional calculation of related physical processes in an induction evaporator with a HF electromagnetic field concentrator with sequential consideration of levels of structural hierarchy - inductor, HF hub, crucibles, loading material for evaporation and ionization evaporation temperature, electron flow.

3. Establishing a relationship between the design parameters of the induction evaporator with a HF electromagnetic field concentrator with the structure of a three-

dimensional temperature field in a crucible with loading at the evaporation temperature of different materials.

4. Establishing a connection between electric potentials on the elements of the induction evaporator with an electromagnetic field concentrator with the parameters of the electron flow emitted from the surface of the crucible with loading at the evaporation temperature.

5. Development of new physical and topological models and development of software for three-dimensional calculation of related physical processes in powerful current switches with HF electromagnetic field concentrator with sequential consideration of levels of structural hierarchy - inductor, HF hub, gap between electrodes, emission and electron flux .

6. Establishing a connection between the design parameters of a vacuum circuit breaker with a HF electromagnetic field concentrator with the structure of three-dimensional electric and magnetic fields, and the efficiency of electronic flow control.

Object of research: devices with HF magnetic field concentration for evaporation of materials and ionization of their steam flow, gas-discharge and vacuum switches.

Subject of research: three-dimensional physical and topological models, structural, technological and electrophysical parameters of devices, trajectories of electrons.

Research methods: methods of mathematical physics, physical and topological modeling and numerical calculation for development and research of three-dimensional physical and topological models of vacuum devices with RF concentration of magnetic field - evaporator, switch and circuit breaker and determination of ways to improve their design.

The scientific novelty of the results obtained by the author is as follows:

– **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of a vacuum evaporator with HF magnetic field concentration was developed to study the modes of metal evaporation and electron emission, which allows to establish the influence of design parameters on the energy efficiency of the device.

– **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of a vacuum circuit breaker with HF magnetic field concentration was developed to study the trajectories of electrons in the gap between electrodes in a cross electromagnetic field

taking into account eddy currents induced in electrodes and boundary effects. and the magnitude of the critical induction of the magnetic field to cut off the electrons from the anode.

– **For the first time** a three-dimensional physico-topological model of vacuum circuit breaker with planar electrodes and HF magnetic field concentration was developed to study the trajectories of electrons in the gap between electrodes in a cross electromagnetic field taking into account eddy induced currents in electrodes the direction of the electron flux and set the value of the critical induction of the magnetic field to cut off the electrons from the anode.

– Methods of hierarchical three-dimensional physical and topological modeling of devices with HF magnetic field concentration by numerical calculations of related multiphysical processes in a single computational **space were further developed;**

– Based on calculations using three-dimensional physical and topological models of vacuum devices with RF magnetic field concentration, it is established that:

1. The use of RF concentrator of the electromagnetic field as an anode in a vacuum circuit breaker of advanced design allows effective opening at 50 A pulse of the cut-off current on the control inductor and 300 volts on the collectors.

2. With increasing number of radial slits in the lower contact of the vacuum circuit breaker from 1 to 8, the cut-off current decreases by 57%

3. With the transformer type of evaporator in the crucible 3% more power is released than with the autotransformer. At the same time, the total power released in the evaporator is 12.3% more than in the evaporator with a transformer connection of the inductor and concentrator.

4. Heterogeneity of temperature on the loading surface weakly depends on the frequency of the supply current and is 2 K with a crucible diameter of 32 mm. If we accept the condition of the isothermal evaporation surface, then the absolute error of the calculations of the emission characteristics of the evaporator, for all considered design options, will be at the level of $0.0013 \div 0.002$.

5. It is established that at a distance of $40 \div 50$ mm above the crucible of the evaporator electrons acquire energy sufficient for ionization of copper atoms.

6. For the first time it was found that in an evaporator with RF concentration of magnetic field, regardless of the diameter of the crucible and its position in the concentrator, the temperature on the evaporation surface can be considered the same with an error of not more than 0.5%.

7 With the autotransformer design of the evaporator with the concentration of electromagnetic energy, the calculated voltage on the inductor, which at a frequency of 440 kHz provides an operating evaporation temperature of 1545 K (for copper) is 273 V.

The validity and reliability of scientific results is ensured by the correct application of the mathematical apparatus, algorithms of physical and topological modeling of related physical processes and algorithms of numerical calculations, as well as verification of the results of numerical calculations by analytical test calculations.

The practical significance of the obtained results is as follows: developed and improved three-dimensional physico-topological models of related physical processes in a vacuum evaporator, vacuum circuit breaker and current circuit breaker with RF magnetic field concentration to solve problems of effective electronic flow control. The developed physical and topological models allow to calculate the related physical processes in a single computing environment: current flow through the inductor taking into account the skin effect, distribution of electromagnetic field within the device, induction of currents in the evaporator elements, heating the crucible with loading and tracing electron motion. The calculation allows to establish the influence of design and operational parameters on the electrodynamic, thermodynamic, emission and electron-beam characteristics of the devices.

Personal contribution of the applicant. All the results of the dissertation were obtained by the author personally. Among 4 publications in professional publications, 1 article was written by the applicant alone [5]. In co-authored publications, the applicant has the following results. In [2], the applicant reviewed the use of induction heating devices in the technology of micro- and nanodisperse materials. In [3], the applicant developed a physico-topological model of a flat diode with a flat inductor to study the effect of electron cut-off in a flat diode by a magnetic field of an external flat inductor on the example of vacuum switches with flat contacts. In [4], the applicant performed modeling and study of the effect of magnetic cut-off of cathode electrons from the anode

in the final period of current interruption - at the stage of plasma deionization and metal vapor condensation, when the cathode is still able to emit electrons due to residual thermoelectron emission and secondary γ -emission cathode residual ions.

Publications. Based on the dissertation, 14 works were published, 4 of which are articles in journals and collections of scientific papers included in the list of professional publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine in the dissertation or in periodicals of foreign countries (2 included in the international scientometric database SCOPUS), and 1 - publications in conference proceedings (including international ones). There is also one utility model patent.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an annotation, introduction, four sections, conclusions, a list of used sources and appendices. The work contains 175 pages, including: 136 pages of the main text, 70 figures, 18 tables, the list of the used sources from 158 names on 15 pages.

Key words: RF: physical and topological model, simulation of high-frequency heating, induction evaporator, numerical methods, electron cut-off in a magnetic field, crossed electromagnetic fields, vacuum switch, current circuit breaker.

Список публікацій автора

Статті:

1. Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., Майкут С.А., Дрозд И.М. «Индукционно-термический метод получения микро- и наночастиц». Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии, 15:1 (2017): 141-162.
2. Майкут С.А., Дрозд И.М., Кузьмичёв А.И., Цибульский Л.Ю., «Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора». Електроніка та зв'язок, 22:4 (2017): 11-17.
3. I. Drozd, A. Kuzmichev, S. Maikut, L. Tsybulsky. «Investigation of electron cut-off in a cylindrical electrode system in pulsed magnetic field of an inductor». PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. Series: Plasma Physics, 118:6 (2018): 281-284
4. Майкут С.А. «Кинетика электронов в цилиндрической системе с импульсным магнитным полем». East European Scientific Journal, 50:10 (2019): 27-33

Тези доповідей:

1. С.О. Майкут, Л.Ю. Цибульский. Моделирование индукционного выпарника с концентратором электромагнитного поля / // Труды 5-й конф. «Електроніка та інформаційні технології» (Чинадієво Закарпатської обл.). – 2013. – С. 145-148.
2. 9-я конференция, “Вакуумная техника, материалы и технология” (Россия, Москва, КВЦ «СОКОЛЬНИКИ», 2014, 15 – 17 апрель). Моделирование процессов в индукционном испарителе с концентратором электромагнитного поля / С.А. Майкут, Д.В. Ткаченко, Л.Ю. Цибульский // Труды конф. С. 105-108.
3. S. Maikut, Y. Bashkatov, L. Tsybulskiy, A. Kuzmichev. «Simulation of induction evaporator with magnetic field concentrator». IEEE International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, microwave, and terahertz applications, NEMO-2014 Papers (Flash): paper 185, 4 pages

4. XII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» (Kyiv, Ukraine, October 19-22, 2016). CALCULATION OF VAPOR FLOW DENSITY OVER INDUCTION EVAPORATOR // Maikut S.,L. Tsibulskiy A., Loktionov
5. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульський. «Моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». XI науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки" Київ, НТУУ «КПІ», – 2017. 6 – 7 квітня
6. С. Майкут, Л. Цибульський. «Проблеми моделювання процесу відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора». ДНІ НАУКИ ФСП. ЛЮДИНА У ВИМІРАХ СУЧАСНИХ СУСПІЛЬНИХ (Київ, НТУУ «КПІ». 2017. -20 - 21 травня)
7. С. Майкут, І. Дрозд, А. Кузьмичев, Л. Цибульський. «МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ ТОКА С МАГНИТНЫМ ГАШЕНИЕМ ВАКУУМНОЙ ДУГИ». XXV International Workshop on Charged Particle Accelerators - Ukraine, Kharkov - September 18-22, 2017.
8. S. Maikut,L. Tsibulskiy, I. Drozd, A. Kuzmichev. «ANALYSIS OF ELECTRON TRAJECTORIES IN THE TWO-ELECTRODE SYSTEM OF A VACUUM CURRENT BREAKER WITH MAGNETIC CONTROL». XIII International Scientific Conference «Electronics and Applied Physics» - Call for Papers - Kyiv, Ukraine_24-27.10.17
9. Дрозд І.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., Майкут С.О.,к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.. «Моделирование вакуумного коммутатора тока с анодом в виде индуктора Матеріали». XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки», КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, 4 квітня 2019 р.
- 10.Дрозд І.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.І., Майкут С.О.,к.т.н., доц. Цибульський. «Моделювання процесу відсічення електронів у вакуумних переривниках струму із застосуванням концентраторів магнітного поля». Українська конференція з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу – 2019. Київ, 11-12 грудня 2019 р.

Патенти:

1. Патент України на корисну модель UA 141529 U, H01H 33/66. Вакуумний вимикач / А.І. Кузьмічев, Л.Ю. Цибульський, С.О. Майкут. – № u201910589; заявл. 25.10.2019; опубл. 10.04.2020. – Бюл. № 7/2019