

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук
Синявського Андрія Тадейовича на дисертаційну роботу
Мочурад Лесі Ігорівни на тему: «Математичне моделювання систем
електронної оптики з урахуванням симетрії граничних поверхонь»,
представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних
наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та
обчислювальні методи.

Актуальність теми дисертації

Бурхливий розвиток нанотехнологій та пов'язаних з цим напрямом галузей науки і техніки висуває нові вимоги до систем електронної оптики. Такі системи використовують для формування та керування пучками заряджених частинок. Від якості сформованого пучка залежить роздільна здатність електронних мікроскопів, енергетичні характеристики прискорювачів частинок, прецизійність систем електронної вакуумної літографії, шумові характеристики клістронів та ключові параметри інших приладів, в складі яких є системи електронної оптики. Проектування таких систем і керування їхніми параметрами базується на складних математичних розрахунках та моделюванні процесів взаємодії зарядів з електростатичним полем, що створене парою катод-анод та системою «лінз» у вигляді електродів. Основною математичною моделлю для таких процесів є рівняння Лапласа разом з граничними умовами щодо електричних потенціалів, які задають на поверхнях електродів. Точне розв'язання такого рівняння являє собою неабияку проблему, враховуючи складну тривимірну геометрію систем електронної оптики, наявність сингулярностей в ядрах відповідних інтегральних рівнянь та утворення великої концентрації заряду на границях електродів. З іншої сторони, для коректування різних аберацій у пучку заряджених частинок використовують електроди, які мають складну геометрію та симетрично і радіально-періодично розташовані відносно деякої осі.

Ідея, яку в своїй дисертації розвинула Л.І. Мочурад, полягає у тому, щоб спростити задачу математичного моделювання електростатичного поля врахувавши наявну симетрію та радіальні періодичності розташування

електродів в системах електронної оптики. Очевидно, що таке спрощення задачі спрямоване на покращення точності обчислювальних методів, усунення джерел нестійкості цих методів та пришвидшення обчислень.

З огляду на це, дисертація здобувача Л.І. Мочурад піднімає актуальні та злободенні питання, що стосуються розвитку математичних моделей електростатики та створення нових математичних методів для розрахунку електростатичних полів у системах електронної оптики за допомогою сучасних багатоядерних процесорів або іншими обчислювальними засобами з багатопроцесорною архітектурою.

Як свідчення актуальності теми дисертації можна вказати й те, що обраний напрям досліджень відповідає науково-дослідним темам, дослідження згідно з якими проводять в рамках держбюджетних замовлень на кафедрі обчислювальної математики та програмування Національного університету «Львівська політехніка» та кафедрі обчислювальної математики Львівського національного університеті імені Івана Франка.

Структура та зміст дисертації

Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 161 сторінку. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 102 найменувань, та додатків, в яких перелічено опубліковані праці автора за темою дисертації, та акти впровадження результатів дисертації.

У вступі приведено аргументи, що свідчать про актуальність теми дисертаційної роботи, виокремлено клас задач, які потребують розв'язання, сформульовано мету, визначено об'єкт та предмет дослідження, вибрано методи дослідження та охарактеризовано наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено загальну характеристику роботи, описано структуру дисертації. Вступ містить відомості про апробацію результатів досліджень, їх впровадження, особистий внесок автора, а також приведено публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячено огляду технічних і математичних аспектів сформульованої задачі та аналізу відомих підходів до її вирішення. Зокрема, записано базову математичну модель системи електронної оптики. Описано підхід до розв'язання інтегрального рівняння, що базується на теорії груп і

врахує геометричну симетрію електродів. Крім загального тривимірного формулювання задачі електростатики розглянуто частковий випадок, припускаючи, що модель об'єкту є безмежною вздовж однієї з координат. Таке формулювання задачі автор називає плоским.

У другому розділі розроблено метод редукції порядку моделі для обчислення розподілу електростатичного поля систем електронної оптики. Варто зазначити, що автор дисертації не використовує термін «редукція порядку моделі», але за своїм принципом розроблений метод дозволяє понизити цей порядок. Такий метод полягає у приведенні системи інтегральних рівнянь до скінченної кількості незалежних інтегральних рівнянь. Запропоновано апостеріорний метод оцінювання похибки, який враховує нерегулярність густини розподілу зарядів в околі кутової точки поверхні.

Для підтвердження дієвості запропонованого методу розглянуто задачу розрахунку електростатичного поля квадрупольної лінзи та задачу розрахунку поля паралельного конденсатора. На прикладах їх розв'язування продемонстровано всі переваги розробленого обчислювального алгоритму, який забезпечив стійкість обчислень та дозволив реалізувати процес знаходження розв'язку паралельно. Показано, що програмна імплементація такого алгоритму за допомогою OpenMP повноцінно і ефективно використовує обчислювальні ресурси сучасних комп'ютерів з багатоядерними процесорами.

У третьому розділі розглянуто математичну модель та задачу електростатики в плоскому формулюванні. На відміну від тривимірної задачі, розв'язок плоскої задачі має свої особливості, які належним чином проаналізовано та враховано при побудові методу розв'язання. При цьому основний ефект досягнуто за рахунок врахування симетрії поверхонь та радіальної періодичності електродів. Окремо висвітлено питання еквівалентності цієї задачі певному інтегральному рівнянню та задачі вибору адитивної сталої, яка гарантує єдиність розв'язання. За аналогією до тривимірного випадку розглянуто дві плоскі задачі для моделювання систем електронної оптики з квадрупольною лінзою та плоским конденсатором.

У четвертому розділі розглянуто електростатичну задачу, в якій лише частину досліджуваного об'єкту доцільно розглядати як структуру, що містить симетрію. В такому випадку показано, що вихідну задачу можна розділити на

дві, а спільний їх розв'язок - знайти за допомогою ітераційного методу Шварца, який реалізує принцип декомпозиції області. Для частини об'єкту, який володіє симетрією застосовано запропонований метод редукції порядку моделі. Як приклад, розглянуто плоску задачу електростатики для моделі системи електронної оптики, яка є прототипом електронної пушки.

Проведене дослідження ілюструє можливість узагальнення запропонованого методу редукції порядку моделі на випадки, де геометрична форма об'єкту включає як симетричні складові так і асиметричні.

Наукова новизна дисертаційної роботи

Метою дисертаційної роботи є розроблення ефективних методів для числового моделювання систем електронної оптики. Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у наступному:

- розроблено новий стійкий обчислювальний метод знаходження розподілу електростатичного поля в системах електронної оптики, який базується на розв'язанні граничних інтегральних рівнянь у поєднанні з апаратом теорії груп, що, на відміну від існуючих методів, дозволив реалізувати процес обчислення паралельно для меншої кількості незалежних рівнянь, забезпечивши вищу точність та швидкодію обчислень;
- набув подальшого розвитку метод декомпозиції області, який дозволяє моделювати електростатичні процеси для систем електронної оптики, в яких частина поверхонь, де задовольняються граничні умови, є симетричними, що, в свою чергу, дає можливість побудувати збіжну ітераційну процедуру, а обчислення реалізувати паралельно;
- удосконалено методологію чисельного аналізу задачі знаходження розподілу електростатичного поля для об'єктів з симетричними і радіально-періодичними границями, яка враховує апостеріорну оцінку похибки, регуляризацію задачі розв'язання інтегральних рівнянь з сингулярними ядрами та дозволяє коректно здійснити дискретизацію задачі за наявності особливостей шуканої функції густини розподілу в кутових точках граничних поверхонь.

Проведені дослідження дали змогу розв'язати наукові задачі, спрямовані на розроблення математичних моделей та методів моделювання

електростатичних процесів перерозподілу заряду в системах електронної оптики з геометричною симетрією електродів.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій

Ступінь обґрунтованості та достовірність результатів визначається коректним застосуванням сучасних математичних методів та співставленням отриманих результатів з результатами досліджень інших науковців. В дисертації для розв'язання поставлених задач використано належний математичний апарат та математичні моделі, які є адекватними реальним фізичним процесам руху зарядів під дією електростатичного поля.

Як основний інструмент обґрунтування наукових положень та висновків в дисертації використано методи функціонального аналізу, числового аналізу та числова верифікація. Достовірність підтверджено результатами коректно поставлених числових експериментів на прикладах різних систем електронної оптики. Обґрунтовано умови аплікабельності моделей. В першу чергу це стосується плоскої задачі електростатики.

Про високу ступінь обґрунтованості можна також судити з того, наскільки систематично та математично строго автор підходить до доведення теорем, зокрема про існування розв'язку задачі електростатики (теореми 3.1.1 та 3.1.2), а також теорем про властивості функціональних перетворень, що належать до абелевої групи симетрії.

Достовірність наукових результатів, що отримані в дисертації не викликає сумніву.

Наукове і практичне значення результатів

Результати отримані в дисертації дозволили розширити можливості інструментів математичного моделювання потенціальних полів в електростатичних системах завдяки програмній імплементації запропонованих методів розв'язання інтегральних рівнянь, яка передбачає використання багатоядерних та багатопроекторних обчислювальних систем.

Показано, що запропоновані обчислювальні методи потребують менше оперативної пам'яті комп'ютера у 256 рази (64, 16, 4 раз) при моделюванні

систем електронної оптики з граничними поверхнями електродів, які володіють абелевими групами симетрій шістнадцятого порядку (восьмого, четвертого, другого порядків, відповідно). Крім того досягнуто істотного збільшення швидкодії обчислень. При цьому забезпечено стійкість процедур знаходження параметрів електростатичних полів систем електронної оптики з наявною симетрією граничних поверхонь.

На основі продуманого та теоретично обґрунтованого підходу вдалося істотно розширити границі пошуку оптимальної конструкції системи електронної оптики та вибору її параметрів для забезпечення необхідних функціональних характеристик.

Результати роботи можуть знайти практичне впровадження на підприємствах, які займаються розробкою клістронів, магнетронів, а також скануючих електронно-вакуумних систем літографії та електронних мікроскопів, зокрема у ВАТ «SELMІ», м. Суми.

Про практичне значення отриманих результатів свідчать акти впровадження. Один з них підтверджує, що результати дисертації використано в навчальному процесі на кафедрі Систем штучного інтелекту в Національному університеті “Львівська політехніка”.

Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи

За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 6 одноосібних; 6 статей у наукових фахових виданнях з технічних наук, з них 4 праці у журналах, що входять до наукометричних баз даних (Index Copernicus, Scopus, Web of Science, Science Index); 3 статті у фахових виданнях з фізико-математичних наук; 9 праць у збірниках тез доповідей міжнародних та міжвузівських конференцій.

Основні результати дисертації пройшли належну апробацію на наукових семінарах та міжнародних наукових конференціях.

Зауваження до дисертаційної роботи

Розглянута дисертація та автореферат не позбавлені певних недоліків, що дає підстави сформулювати наступні зауваження:

- 1) В першому та другому розділах не наведено виразу для розв'язку сформульованої в дисертації задачі, яка полягає у обчисленні напруженості електричного поля (електричного потенціалу довкола електродів), а подано лише основне рівняння для визначення густини заряду на поверхні.
- 2) У висновках до розділу 2 вказано, що «досліджено умови трактування просторової задачі як плоскої». Проте в другому розділі таких умов не наведено. В той же час питанню аплікабельності плоского наближення задачі електростатики присвячено увагу в інших розділах дисертації.
- 3) В першому розділі не вказано, за яких умов задача (1.1.1)-(1.1.3) має єдиний розв'язок. Таку умову встановлено лише в розділі 3, коли досліджується частковий випадок: плоский (двовимірний) варіант електростатичної задачі.
- 4) Обґрунтування процедури (теорема 2.1.1), яка «діагоналізує» систему інтегральних за допомогою матриці дискретного перетворення Фур'є у випадку належності такої системи до абелевої групи симетрії скінченного порядку потребує додаткового пояснення.
- 5) Некоректно вибрані позначення деяких змінних утруднюють аналіз матеріалу дисертації, зокрема:
 - в різних частинах роботи використано різні позначення одного і того ж параметру, шуканої функції густини зарядів (μ - в першому розділі, σ та ρ - в другому, τ - в третьому та τ та μ - в четвертому). Причина використання різних позначень є не зрозумілою;
 - в четвертому розділі використовується позначення змінних V_1 та V_2 , які є складовим шуканого потенціалу в $V = V_1 + V_2$ в області без колової границі. Такі ж змінні V_0 , V_1 , V_m використано в цьому ж розділі для позначення наближень шуканої функції в ітераційній процедурі Шварца.
- 6) Пояснення до останньої формули на сторінці 50 дисертації, що визначає підінтегральну функцію, не дає жодної корисної інформації, а відтак є лишнім.

Незважаючи на висловлені зауваження, в цілому дисертація справляє дуже позитивне враження завдяки новизні, ґрунтовності теоретичних досліджень та практичному значенню її результатів.

Загальна оцінка роботи і висновок

Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням, яке містить нові науково-обґрунтовані результати в області моделювання електростатичних явищ, що мають велике прикладне значення при проектуванні сучасних систем електронної оптики. Сукупність наукових положень, що сформульовано та обґрунтовано в дисертаційній роботі відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Основні наукові положення та висновки дисертаційної роботи є ідентичними наведеним у авторефераті.

За структурою, змістом та оформленням дисертаційна робота Л.І. Мочурад «Математичне моделювання систем електронної оптики з урахуванням симетрії граничних поверхонь» відповідає вимогам МОН України, що пред'являють до дисертаційних робіт, а саме п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника». Науковий рівень отриманих в дисертації результатів, їх практична цінність та належна обґрунтованість свідчить про те, що її автор – Мочурад Леся Ігорівна заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

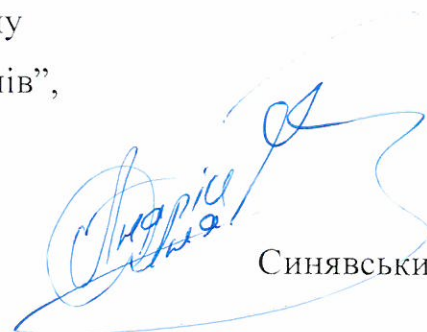
старший науковий співробітник відділу

«Фізичних основ діагностики матеріалів»,

Фізико-механічного інституту

ім. Г.В. Карпенка НАН України,

д.т.н.



Синявський А.Т.

Підпис Синявського А.Т. засвідчую.

Вчений секретар Фізико-механічного інституту

ім. Г.В. Карпенка НАН України,

к.т.н., с.н.с.



Корній В.В.