Голові разової спеціалізованої вченої ради
Національного університету «Львівська політехніка»
д. т. н., професору Соколовському Ярославу Івановичу

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, старшого наукового співробітника

Станкевич Олени Михайлівни

на дисертаційну роботу

Стахіва Володимира Михайловича

«Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем» подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 12 «Інформаційні технології» зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дослідження

У світовій практиці останнім часом швидкого розвитку набула акустофлюїдика, яка є інтеграцією акустики та мікрофлюїдики. Усуваючи обмеження традиційних інструментів акустофлюїдні системи забезпечують ефективне розділення мікрочастинок у рідині, використовуючи акустичні хвилі для маніпуляції над ними, що допомагає вирішенню важливих проблем у біології, медицині, хімії, інженерії та фізиці. Водночас все ще потребує уваги дослідників низка важливих задач, наприклад, щодо оптимізації геометрії мікроканалів, матеріалів для п'єзоелектричних перетворювачів, масштабованості технології, яка спонукає до розроблення нових методів та моделей для розширення меж її використання тощо. Сучасні засоби комп'ютерного моделювання, проєктування та налаштування розширюють можливості для швидкого удосконалення та оптимізації акустофлюїдних систем, що сприяє одночасно зростанню ефективності отриманих результатів.

Саме тому, поставлена у дисертаційній роботі Стахіва Володимира Михайловича науково-практична задача розроблення методів та моделей для моделювання розділення мікрочастинок та автоматизованого проєктування акустофлюїдних систем є актуальною.

2. Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення дисертаційної роботи, висновки та рекомендації є теоретично обґрунтованими, не суперечать методам проєктування інформаційних систем, математичного аналізу та моделювання, теорії алгоритмів, машинного навчання і штучного інтелекту.

Наукові результати також підтверджені практичною реалізацією, що відображено в актах впровадження, апробацією на наукових семінарах кафедри, міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

3. Наукова новизна отриманих результатів

удосконалено

- математичну модель акустичного поля в мікроканалі завдяки врахуванню геометрії конструкції, що дало змогу вивчити вплив конструктивних параметрів на розподіл поля;

розвинуто

- математичну модель акустофоретичного розділення суміші різнорідних мікрочастинок, яка враховує їх взаємодію та відповідні початкові й граничні умови;

уперше

- побудовано та досліджено оригінальні моделі універсальних акустофлюїдних Y- та Ψ- сепараторів на основі побудованої моделі акустофоретичного розділення, що дало змогу підбирати вхідні конструктивно- технологічні параметри мікроелектромеханічної системи;
- запропоновано методику використання алгоритму машинного навчання з підкріпленням для інтелектуалізації проєктування акустофлюїдних мікросис-

тем, що дало змогу забезпечити автоматичний підбір вхідних конструкторсько-технологічних параметрів лаб-чипа для заданої суміші мікрочастинок;

- розроблено та адаптовано оригінальну технологію виготовлення акустофоретичних мікрофлюїдних пристроїв з використанням лазера та ситодруку, що дало змогу виготовити прототип спроєктованого лаб-чипа, здатного фокусувати та розділяти зважені у рідині мікрочастинки пластика.

4. Практична цінність одержаних результатів

Отримані наукові результати утворюють базу для автоматизованого проєктування та швидкого прототипіювання акустофоретичних лаб-чипів, зокрема, для проєктування зустрічно-штирьових перетворювачів із метою забезпечення у мікроканалі стабільної стоячої хвилі залежно від матеріалу та товщини п'єзоелектричної підкладки, розмірів каналу та лаб-чипа; для оптимізування дизайну акустофлюїдного лаб-чипа залежно від фізичних характеристик мікрочастинок; для верифікації результатів комп'ютерного моделювання. Автоматизація проєктування лаб-чипів на основі алгоритмів машинного навчання забезпечує уніфікацію проєктування мікрофлюїдних пристроїв, значне скорочення обсягу ручного моделювання, поліпшення точності та автоматизацію оптимізації. Запропонована методика придатна для проєктування біомедичних, фармацевтичних, екологічних та аналітичних рідинних мікросистем.

Практичну цінність результатів дисертаційної роботи підтверджено їх впровадженням в інженерно-технологічні роботи зі створення обладнання для сепарації у ТзОВ «АПДЕЙТ ТЕХНОЛОДЖІС СИСТЕМЗ», що засвідчує відповідний акт впровадження. Результати роботи використовують під час навчання студентів відповідного освітнього напрямку у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі систем автоматизованого проектування та Відокремленому структурному підрозділі «Фаховий коледж інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», що підтверджують відповідні акти впровадження.

5. Повнота викладу результатів дисертаційної роботи у наукових публікаціях

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 14 наукових праць, із них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття – у закордонному фаховому періодичному виданні, 7 публікацій – у матеріалах міжнародних та українських наукових конференцій, 3 з яких проіндексовано у міжнародній наукометричній базі даних Scopus, 1 стаття в інших виданнях.

Опубліковані праці повною мірою висвітлюють матеріали дисертації.

6. Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, які містять 114 рисунків і 12 таблиць, висновків, списку літератури, який має 128 найменувань, додатків. Обсяг основного тексту дисертації займає 175 сторінок, а повний обсяг роботи – 192 сторінки.

У *вступі* подано актуальність теми дослідження, визначено мету та сформульовано необхідні для її досягнення задачі, розкрито наукову новизну роботи та практичну цінність отриманих результатів.

У *першому* розділі викладено теоретичні основи акустофоретичного розділення частинок. Проведено огляд літературних джерел щодо механізмів та методів такого розділення, поширених конфігурації зустрічно-штирьових перетворювачів (ЗШП) та підходи до застосування машинного навчання у задачах акустофлюїдики.

Дослідженню впливу ЗШП на параметри акустичного поля в мікроканалі присвячено *другий розділ*. Проаналізовано конструкції ЗШП та приклади їх використання в акустофлюїдних мікросистемах. Розглянуто основні геометричні параметри ЗШП та їх вплив на довжину згенерованої акустичної хвилі, схеми розміщення двонаправлених електродів. Розроблено та удосконалено математичну модель акустичного поля в мікроканалі лаб-чипа. Удосконалено конструкцію ЗШП для забезпечення формування стабільної стоячої акустичної хвилі у мікроканалі та досліджено вплив властивостей

п'єзоелектричної підкладки на акустофоретичну силу та розподіл тиску в прямокутному мікроканалі.

У *третьому* розділі описано математичну модель акустофоретичного розділення мікрочастинок та їхній рух у межах мікроканалу. Побудовано та досліджено оригінальні моделі універсальних акустофлюїдних Y- та Ψ-сепараторів для розділення будь-яких груп мікрочастинок. Запропоновано технологію виготовлення мультиканального лаб-чипа та створено його фізичний прототип.

Автоматизований підхід, який поєднує чисельне моделювання в COMSOL Multiphysics із методами машинного навчання запропоновано у *четвертому* розділі. Розроблено рекомендаційну систему на основі машинного навчання з підкріпленням, яка дає змогу автоматизувати процес підбору вхідних параметрів для ефективного розділення заданої суміші мікрочасток.

7. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи:

1. У роботі спроєктовано модель лаб-чипа для сортування часточок двох типів, які відрізняються розмірами та густиною. На практиці у суміші можуть бути присутні часточки багатьох речовин і різноманітних розмірів. Чи здатний запропонований лаб-чип розділити таку складну суміш?

2. Відомо, що ефективність роботи акустофлюїдних пристроїв залежить насамперед від їхньої пропускної здатності, оптимізація якої допомагає збалансувати швидкість потоку та продуктивність сортування. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є оптимізація структури пристрою. Дисертант провів такі дослідження, однак у роботі відсутня оцінка пропускної здатності спроєктованого лаб-чипа.

3. Для реалізації рекомендаційної системи у роботі вибрали метод машинного навчання з підкріпленням, однак немає обґрунтування такого вибору.

4. На рис. 4.4 подано узагальнене зображення процесу навчання, де центральну частину складає нейронна мережа, однак у роботі відсутній опис її структури та гіперпараметрів.

5. На рис. 4.5, б зображено підрахунок кількісті дрібних або великих часточок у вихідних каналах, але не описано методику його реалізації в рекомендаційній системі.

Наведені зауваження загалом не впливають на отримані результати та зроблені висновки.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертація Стахіва Володимира Михайловича на тему «Методи та моделі для автоматизованого проектування акустофлюїдних мікроелектромеханічних систем» є завершеною науковою працею. За структурою, мовою, стилем викладення дисертаційна робота відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами) «Про затвердження порядку присудження ступені доктора філософії та скасування рішення про присудження ступня доктора філософії», а її автор, Стахів Володимир Михайлович, заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Рецензент:
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
професор кафедри систем
автоматизованого проектування
Національного університету
«Львівська політехніка» Олена СТАНКЕВИЧ

Підпис д.т.н., с.н.с. Станкевич О. М. **«ЗАСВІДЧУЮ»**

проректор з наукової роботи Іван ДЕМИДОВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ • НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА" • ЗКПО 02071010