

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію

Зимогляда Андрія Юрійовича

«Математичне моделювання імпульсного перетворювача для керування термічним випаровувачем з нестационарним навантаженням»,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність обраної теми досліджень.

Сучасна промисловість широко використовує нанесення плівок в вакуумі для зміни властивостей поверхні деталей машин і механізмів для зменшення тертя між ними, для зміни властивостей оптичних приладів шляхом використання просвітлюючих та дзеркальних покриттів в оптиці та є основним засобом створення напівпровідникових приладів та мікросхем.

Сучасні прилади забезпечують широкий спектр застосувань шляхом термічних засобів нанесення покриттів. Найбільшу складність в керуванні потужністю термічним випаровувачем вносить нелінійний характер зміни електричного опору нагрівача. Це зумовлено одразу багатьма чинниками: зміною опору від окислення, джоулевого тепла, фазового стану нагрівача, хімічною взаємодією з металом, що випаровується, фазовий переходом металу що випаровується тощо. В умовах великих величин струмів, необхідних для забезпечення нанесення речовин, особливих проблем з керування ними не виникає. Інша справа, коли ми маємо обмежену потужність джерела живлення або ж виникає необхідність у випаровуванні малих об'ємів речовини, що потребує малих нагрівачів з тонкого металу які мають малий характерний час реакції нагрівача на подану потужність внаслідок малої теплової інертності. Відсутність адекватного керування температурою нагрівача ускладнюють створення однорідного потоку випарування речовини, а також може призвести до виходу його з ладу.

До актуальних задач розвитку методів керування термічним випаровувачем відноситься реалізація різних режимів його роботи у різних робочих діапазонах температур. Вирішення цих задач пов'язане з використанням в схемних рішеннях систем керування сучасних контролерів.

Для успішного їх застосування необхідно привести у відповідність алгоритми обробки вихідної інформації та забезпечити числову обробку у реальному режимі часу суттєво нелінійних процесів адекватним керуванням, що можливо тільки із використанням методів сучасного математичного моделювання та чисельних методів.

В той же час розвиток методів керування термічним випаровувачем вакуумі, а також моделей імпульсних перетворювачів, що розраховані на навантаження у виді нагрівача, відбувається не достатньо швидко. Дисертація Зимогляда А.Ю. спрямована саме на вдосконалення методів керування термічним випаровувачем, на основі розроблених математичних

моделей імпульсних перетворювачів. Таким чином, **науково-практична задача**, яка поставлена у дисертаційній роботі, є **актуальною**.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг загального тексту дисертації складає 168 сторінок, з них основного тексту 120 сторінок. Робота ілюстрована 76 рисунками. Список використаних джерел складається зі 100 найменувань.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з планом науково-дослідних робіт Національної металургійної академії України у межах наступних договорів на замовлення Міністерства освіти і науки України:

1) «Математичне забезпечення діагностики розладнань складних систем», номер державної реєстрації 0116U008354;

2) «Методи моделювання, ідентифікації та адаптації систем складної та хаотичної динаміки», номер державної реєстрації 0116U008350.

Зміст дисертаційної роботи, стиль та мова викладення, якість ілюстрацій відповідають вимогам МОН України до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В анотації наведено узагальнений короткий виклад основного змісту дисертації, основні результати дослідження із зазначенням наукової новизни та практичного значення. Наводиться список публікацій здобувача з основними науковими результатами за темою представленої роботи.

До основних зауважень по анотації можна віднести:

1. Відсутній список основних позначень та скорочень, що істотно заважає розумінню основного тексту;
2. Стор.11 ЗМІСТ назва розділу 3 замість слова **приспосовування** слід було б вжити слово **доробка** (доробок);
У наявності надлишок русизмів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, проблематику поставлених задач та методів їх розв'язування, сформульовано об'єкт дослідження, предмет дослідження, мету та завдання досліджень, показано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, відмічено наукову новизну та практичну цінність отриманих у дисертаційній роботі результатів.

До основних зауважень по розділу ВСТУП можна віднести:

1. Стор.13 Останній абзац: пропущено слово **напруг**;
2. Стор.16 Практична цінність. Замість слова **приспосовування** слід було б вжити слово **доробок**;
У наявності надлишок русизмів.

У першому розділі зроблено аналітичний огляд літератури за темою дисертаційної роботи, розглянуто основні сучасні методи нанесення

покриттів у вакуумі, а саме: термічне випаровування, електронно-променеве осадження, лазерне випаровування, магнетронне випаровування. Особливу увагу було приділено методу термічного випаровування у вакуумі, розглянуто методи регулювання потужністю, види випаровувачів, а також особливості поведінки термічного випаровувача та його живлення. Було запропоновано в якості регулюючого потужність елемента використовувати імпульсний перетворювач топології Buck. Математичне моделювання таких перетворювачів розглядалися багатьма вченими проте в їхніх моделях не враховувалась робота перетворювача на малий електричний опір навантаження, який до того ж є нестационарним, а також те, що напруга на виході перетворювача за низького опору може бути близькою до падіння напруги на діоді Шотткі. Таким чином, робиться висновок, що для розробки системи керування потужністю необхідно розробити адекватну модель імпульсного перетворювача топології Buck з урахуванням особливостей навантаження.

До основних зауважень по розділу можна віднести:

1. Стор.28. останній абзац замість **матеріалів складного складу** вжити **матеріалів складної структури**.
2. Стор.33. п.п 1.3 замість слова **випарник** вжити **випаровувач**;
3. Стор.41. другий абзац незрозуміле перше речення, а також **кордони-межі володіють-мають**;
4. Наявність граматичних помилок, наприклад, на стор. 36,37,38,40,41,42,44;

Другий розділ присвячено математичному моделюванню імпульсного перетворювача топології Buck, можливості поступового спрощення моделі для подальшого використання в системі керування потужністю на мікроконтролері, апаратній реалізації, розробці устаткування для створення тонкоплівкових покриттів методом термічного випаровування, а також експериментальній перевірці на адекватність розроблених моделей. Сучасні компоненти дозволяють досягти значного коефіцієнта перетворення енергії, мінімальної маси та розміру у порівнянні з класичним підходом на основі низькочастотного трансформатора чи тиристорних схем. Проте цей перетворювач має менш очевидні характеристики, особливо в ситуаціях, коли необхідний великий діапазон вихідної напруги, точність вихідної напруги або швидка реакція на вихідне навантаження.

До основних зауважень по розділу можна віднести:

1. Автор стверджує, що за умов зменшення кроку по часу процес моделювання системи (2.2) стає нестійким. Проте інформації, що підтверджує цей факт не наведено.
2. До основної причини, яка дозволила виконати спрощення системи відноситься звуження області її визначення, що дозволило автору знехтувати рядом параметрів та спростити її (система (2.4)). Автор не відмітив цей момент.

3. Слід зауважити, що усунення перешкод при отриманні розв'язку відбувається під час проведення процесу моделювання і не пов'язане зі швидкістю роботи перетворювача. Однак, спрощення системи при моделюванні призводить до зменшення кількості параметрів керування і цим самим забезпечує розширення ряду контролерів та спрощує їх програмування.
4. Стор.57 після рис.2.8 пропущено слово **режиму**;
5. Стор.60 Розв'язок системи (2.22) призводить до появи декількох коренів. Автор не наводить умов вибору основного.
6. Стор.66, Висновок другий абзац. **Вперше було запропоновано та обґрунтовано поступове спрощення моделі.** Спрощена система отримана шляхом прийняття припущень. Припущення були прийняті для обмеженого діапазону зміни параметрів системи. Необхідно обґрунтовувати припущення, яке призведе потім до спрощення системи.

Третій розділ присвячено розробці та тестуванню методів керування потужністю нагрівача для Виск перетворювача. Побудовані та досліджені системи керування потужністю нагрівача у вакуумі. Використовуючи квазістаціонарний підхід було побудовано систему керування. Перший варіант системи керування полягав у наступному. За повільної зміни заданого значення потужності може використовуватися лише інтегратор. Але за різкої зміни потужності, швидкості виходу на потрібне значення інтегратора не вистачає. Для подолання такої ситуації автором запропоновано скористатись функцією «передбачення», яка виставляє значення ШІМ у потрібну точку, а потім інтегратор повільно доводить значення до необхідного значення потужності. Складність такого варіанту системи керування полягає у проведенні калібрування з кроком у 5% між мінімальним та максимальним заданим значенням та прив'язці до отриманих точок напруги, струму, потужності та опору нагрівача. Під час калібрування знаходиться нелінійна та лінійна область залежності напруги від ШІМ, завдяки масиву отриманих значень. При розрахунку функції «передбачення» визначається належність поточного значення параметру до лінійної або нелінійної ділянки і відповідно використовується лінійна апроксимація, або ж квадратична апроксимація. Дана система керування забезпечує підтримку заданої потужності в заданому діапазоні. Проте калібрування потрібно проводити при кожному запуску з новим нагрівачем.

Для усунення цієї незручності було вперше розроблено адаптивний метод керування нагрівачем, який дозволяє задавати заданий профіль напруги, струму та потужності (а непрямо і температури) за умов низької теплової інерції, малого та суттєво нестационарного опору нагрівача.

У ході проведених досліджень було запропоновано використання системи управління на основі топології Виск для живлення термічного випаровувача у вакуумі, а також розроблено та фізично реалізоване обладнання для проведення експериментів.

До основних зауважень по розділу можна віднести:

1. Стор.69 другий абзац замість **сходинки на графіку** вжити **коливання графіку**.
2. Стор.71 перший абзац замість **створено пристосування** вжити **створено доробки**.
3. Наявність граматичних помилок, наприклад, на стор. 79,87,91,92,96.

Четвертий розділ присвячено чисельним методам визначення фрактальної розмірності мікрофотографій з мікроскопу, який дозволяє зменшити вплив похибок, пов'язаних з нерівномірністю освітлення робочого поля і автоматично визначати рівень бінаризації, а також приводяться результати серії експериментів зі створення тонкоплівкових покриттів у вакуумі, що стали можливим за допомогою розробленої системи керування потужністю випаровувача. Під час дослідів було створено пакет «Imghead», який дозволяє знаходити фрактальну розмірність алгоритмом Box counting.

Якщо фотографії з мікроскопу робляться з кутового освітлення, локальна бінаризація дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з нерівномірністю освітлення робочого поля.

По отриманими даними, було встановлено зв'язок між фрактальною розмірністю і коефіцієнтом тертя отриманих плівок. Зазначено, що тиск при нанесенні металевих плівок може впливати на функціональні властивості плівки, такі як коефіцієнт тертя. Отже, можна створити покриття з заданим коефіцієнтом тертя шляхом контролю тиску при нанесенні. Також було досліджено вплив швидкості випаровування металу на структуру поверхні.

До основних зауважень по розділу можна віднести:

1. Вибір критерію якості нанесення плівок коефіцієнту тертя не є вдалим. Коефіцієнт тертя поверхні плівок відображає цілу гаму властивостей, які не мають відношення до якості термічного запилення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.

У дисертації приділено достатньо уваги обґрунтуванню наукових положень, висновків і рекомендацій.

У роботі було проаналізовано літературні джерела та встановлено, що існуючі методи керування потужністю, що використовуються у виробництві, а саме: трансформаторні регулятори, тиристорні регулятори, регулятори на топологіях Half-bridge та Full-bridge, розраховані на великий об'єм речовини, що випаровується, та використання потужних нагрівачів з високою тепловою інертністю.

На керування малими нагрівачами вони не розраховані, тому зважаючи на це в роботі показана можливість використання в якості регулятора потужності, імпульсного перетворювача топології Buck.

Математичним моделюванням DC/DC перетворювачів приділяли увагу такі вчені, як: S. Roberts, M. Kazimierczuk, W. R. Erickson, M.B. Ferrera, E. Duran, S. Perez, J.M. Andujar. Проте моделювання роботи перетворювача на нелінійне навантаження малого опору з високим вихідним струмом, що характерне для живлення термічного випаровувача, ними не проводилося.

В роботі вперше запропоновано та обґрунтовано поступове спрощення моделі перетворювача топології Buck, що дозволяє значно зменшувати об'єм обчислювальних ресурсів при моделюванні та визначити умови, за якими це спрощення допустиме.

Вперше розроблено метод адаптації параметрів системи управління нагрівачем при термічному випаровуванні у вакуумі, який дозволяє значно знизити похибку регулювання при різких змінах параметрів завдання та системи у цілому.

А також вперше встановлено залежність між тиском при нанесенні металевих покриттів до коефіцієнту тертя цих поверхонь, а також залежність фрактальної розмірності від коефіцієнту тертя, що дозволяє, з одного боку, задавати параметри покриття при його створенні, з іншого — оцінювати деякі механічні властивості покриттів за їх мікрозображенням.

Отримало подальший розвиток математична модель імпульсного перетворювача, яка на відміну від тих, що існують, враховує більше нелінійних ефектів, що дозволяє коректно описувати динаміку перетворювача при роботі на навантаження з низьким та нестабільним опором. Отримало подальший розвиток метод управління нагрівачем при термічному випаровуванні у вакуумі на підставі розробленої моделі перетворювача топології Buck, який дозволяє задавати заданий профіль напруги, струму та потужності (а непрямо і температури) за умов низької теплової інерції, малого та суттєво нестационарного опору нагрівача;

Отримало подальший розвиток чисельний метод визначення фрактальної розмірності зображень поверхонь з мікроскопу, який дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з нерівномірністю освітлення робочого поля, а також автоматично визначати рівень бінарізації.

Практичне значення результатів роботи.

На основі розробленої в дисертаційній роботі математичної моделі імпульсного перетворювача та методів цифрового керування термічним випаровувачем у вакуумі було отримано такі практичні результати:

- побудовано пристосування для термічного випаровування у вакуумі для вакуумного поста ВУП – 4;

- побудовано керований імпульсний регулятор топології Buck для керування потужністю термічного випаровувача у вакуумі, а також розраховані усі його компоненти;

- створено апаратно – програмну систему, яка відповідає за збір даних з вакуумного поста та вимірюючий комплекс на основі INA226;

- на основі методів керування, запропонованих в дисертаційній роботі, була розроблена система керування, яка містить керований імпульсний

регулятор топології buck, вимірюючий комплекс на основі INA226 та керуючу плату на основі STM32F407VBT. Розроблена система управління дозволяє підтримувати не тільки стабільну потужність, а й вихідний струм або напругу.

Результати роботи були впроваджені: в ТОВ «АНДЕЛ» (акт впровадження від 10 липня 2019 року); в ТОВ «ЕКОPLAST STANCL» (акт впровадження від 22 липня 2019 року) та в ТОВ «ЕКОPLAST Engineering» (акт впровадження від 24 червня 2019 року).

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому.

Зміст дисертації у повній мірі розкриває сутність та об'єм дослідження, розкриває роботу автора з досягнення мети й вирішення завдань дослідження. Робота у цілому має завершений вигляд.

Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації. Автореферат не містить надмірних подробиць та не містить інформації, якої немає в дисертації. Автореферат оформлено відповідно до вимог і рекомендацій МОН України.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Положення дисертації у повній мірі викладені в 8 статтях у наукових фахових виданнях України з технічних наук, 6 тезах у збірниках доповідей на наукових конференціях, 4 працях, що додатково відображають результати дисертації. Обсяг та кількість публікацій відповідають вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Зауваження до дисертації.

1. Відсутній список основних позначень та скорочень, що істотно заважає розумінню основного тексту;
2. За припущень ідеальності елементів Buck перетворювача може бути описаний системою (2.2). Автор стверджує, що за умов зменшення кроку по часу процес моделювання стає нестійким. Проте інформації, що підтверджує цей факт не наведено.
3. Основною причиною можливості спрощення системи (2.2) є звуження області визначення системи. Це дозволило автору знехтувати рядом параметрів та спростити її (система (2.4)).
4. Автор не підкреслює ціль спрощення системи (2.2). Проте основною перевагою спрощеної системи є те, що її моделювання призводить до зменшення кількості параметрів керування і цим самим забезпечує розширення ряду контролерів, що можуть використовуватись при реалізації схеми керування та спрощує їх програмування.
5. Стор.60 Розв'язок системи (2.22) призводить до появи декількох коренів. Автор не наводить умов їх вибору.

6. Стр.66, Висновок, другий абзац. Спрощена система отримана шляхом прийняття припущень. Необхідно обґрунтувати припущення, яке призведе потім до спрощення системи.
7. Вибір коефіцієнта тертя у якості критерію якості нанесення плівок не є вдалим. Оскільки коефіцієнт тертя поверхні плівок відображає цілу гаму властивостей, які не мають відношення до якості термічного запилення.
8. Занадто багато уваги приділено опису схемо технічної реалізації апаратного комплексу та устаткуванню для термічного випаровування. Однак, вказані зауваження не мають принципового характеру, та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Загальний висновок.

У дисертації Зимогляда Андрія Юрійовича вирішено актуальне наукове завдання, що полягає у вирішенні актуальної задачі побудови математичних моделей імпульсного перетворювача для керування термічним випаровувачем у вакуумі з врахуванням нелінійних ефектів, що дозволяє коректно описувати динаміку перетворювача при роботі на навантаження з низьким та нестабільним опором.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, серед яких 12 статей у наукових фахових виданнях з технічних наук, які рекомендовано Міністерством освіти і науки України, 5 - в збірниках тез доповідей наукових конференцій, 1 теза в іншомовному збірнику тез доповідей. Отримано авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «Imghead» (свідоцтво №79845 від 20.06.2018).

Дисертація є завершеною науковою роботою, виконана на належному науковому рівні та відповідає вимогам Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, включно з подальшими змінами до цих вимог, а автор дисертації заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інституту геотехнічної механіки ім. С. П. Полякова НАН України
м. Дніпро

Відгук надійшов
у Раду: 01.06.2020
Вчений секретар: [підпис]

[підпис]

Г.І. Ларіонов

Учений секретар інституту
Док. техн.. наук, проф.



[підпис]

В.Г. Шевченко