

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

ЗИМОГЛЯД АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК [519.6+539.234+621.314]:004.91

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО
ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ
ВИПАРОВУВАЧЕМ З НЕСТАЦІОНАРНИМ
НАВАНТАЖЕННЯМ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Гуда Антон Ігорович,
професор кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України, м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Критська Тетяна Володимирівна,
завідувач кафедри комп'ютерних систем Запорізької державної інженерної академії, м. Запоріжжя

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Ларіонов Григорій Іванович,
старший науковий співробітник Інституту геотехнічної механіки ім. С. П. Полякова НАН України м. Дніпро

Захист відбудеться «15» квітня 2020 р. о 12.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 у Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна 4, НМетАУ, конференц-зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, НМетАУ.

Автореферат розіслано « 11 » березня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01
к.т.н., доцент

Т. В. Селівьорстова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасна промисловість використовує широкий спектр складних фізико-хімічних процесів, серед яких чільне місце посідають процеси нанесення плівок в вакуумі. Серед них найбільш поширеним наразі є процес нанесення плівок і покриттів методом термічного випаровування у вакуумі. Термічним випаровуванням металу у вакуумі створюють діелектричні покриття та покриття, що проводять струм в мікроелектроніці, просвітлюючі і дзеркальні покриття в оптиці, прозорі покриття, що проводять струм в сенсорних екранах, функціональні покриття та інші.

Найбільшу складність в керуванні потужністю термічним випаровувачем вносить вкрай нелінійна поведінка електричного опору нагрівача. Це зумовлено одразу багатьма факторами: зміна опору від окислення, зміна опору внаслідок джоулевого тепла, зміна фазового стану нагрівача, хімічна взаємодія з металом, що випаровується, фазовий перехід та подальше випаровування металу, що знаходиться на самому випаровувачі.

В дослідницькій та лабораторній практиці іноді виникає необхідність у випаровуванні малих об'ємів речовини, що потребує малих нагрівачів з тонкого металу. При цьому до усіх вище перерахованих факторів додається малий характерний час реакції нагрівача на подану потужність внаслідок малої теплової інертності. Що в свою чергу ускладнює створення однорідного потоку випарування речовини, а також може призвести до виходу з ладу нагрівача.

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 нагрівачі 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. Kazimierzuk, 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 > 100 А, що характерне для живлення термічного випаровувача, ними не проводилося.

Таким чином це вказує, на те що розроблення математичної моделі Buck перетворювача з урахуванням особливостей навантаження, а також методів цифрового керування потужністю на основі цієї моделі для малих нагрівачів, є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. 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;

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є створення математичної моделі імпульсного перетворювача для підвищення якості керування потужністю термічного випаровувача у вакуумі. Для досягнення мети, поставленої в роботі, необхідно розв'язати такі основні задачі:

- 1) Провести аналіз існуючих математичних моделей перетворювачів та створених на їх основі методів керування потужністю нагрівача у вакуумі для термічного випаровувача;
- 2) Побудувати нову математичну модель Buck перетворювача з урахуванням особливостей навантаження у вигляді термічного випаровувача;
- 3) Розробити на основі результатів моделі систему керування потужністю нагрівача у вакуумі;

- 4) Експериментально дослідити та проаналізувати розроблену модель на практиці;
- 5) Розробити на основі результатів моделі систему керування потужністю нагрівача у вакуумі;
- 6) Дослідити та проаналізувати на практиці методи керування, що були використані в розробленій системі керування;
- 7) Впровадити результати дослідження в практику, у створення програмно апаратного комплексу управління термічним випаровувачем у вакуумі.

Об'єкт дослідження – імпульсні перетворювачі для керування потужністю термічним випаровувачем у вакуумі.

Предмет дослідження – математичні моделі імпульсних перетворювачів для керування термічним випаровувачем з нестационарним навантаженням.

Методи дослідження – у роботі використано математичне та імітаційне моделювання, чисельні методи розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь, математичне моделювання схемотехнічних рішень, математичний аналіз та обробка експериментальних даних, а також методи вимірювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

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;
- 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;
- 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;
- 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;
- 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 бінарзації.

Практична цінність. 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 STM32F407WBT. 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 «EKOPLAST STANCL» (акт впровадження від 22 липня 2019 року) та в ТОВ «EKOPLAST Engineering» (акт впровадження від 24 червня 2019 року).

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист отримані особисто автором. У працях, які опубліковані в співавторстві, здобувачу належать наступні результати. В [11] проаналізовано проблему керування потужністю нагрівача, а також надано описання запропонованої математичної моделі. В [10] представлений розрахунок імпульсного регулятора топології buck та описані його особливості. В [12] представлено результати практичного експерименту керування потужністю нагрівача та описання системи керування. В працях [5], [6], [7] наводяться результати дослідів щодо залежності між тиском при нанесенні металевих покриттів до коефіцієнту тертя цих поверхонь та залежність фрактальної розмірності до коефіцієнту тертя. В [8] вплив швидкості нанесення на структуру плівки.

Апробація матеріалів дисертації. Включені в дисертацію результати дослідження доповідались і обговорювалися на конференції: «Автоматизація та комп'ютерні інтегровані технології у виробництві та світі» (м. Черкаси, 2016); XVIII Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2017 (м. Херсон, 2017); міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ – 2017 (м. Дніпро, 2017); XVIII Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2018 (м. Херсон, 2018); міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ – 2019 (м. Дніпро, 2019).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 18 наукових працях, 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 «Imghed»(свідоцтво №79845 від 20.06.2018).

Структура та обсяг 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі зроблено аналітичний огляд літератури за темою дисертаційної роботи, розглянуто основні сучасні методи нанесення покриттів у вакуумі, а саме: термічне випаровування, електронно-променево 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. Математичні моделювання імпульсних перетворювачів, у тому числі й Buck, розглядали такі вчені, як Steve Roberts, Marian K. Kazimierczuk, Robert W. Erickson, проте в їх моделях не враховувалась робота перетворювача на малий електричний опір навантаження, який до того ж є нестационарним, а також те, що напруга на виході перетворювача при низькому опорі може бути близькою до падіння на нижньому діоді Шоттки. Зважаючи на це для побудови системи керування потужністю потрібна адекватна модель імпульсного перетворювача топології Buck з урахуванням особливостей навантаження.

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 тонкопліткових покриттів методом термічного випаровування, а також експериментальній перевірці на адекватність розроблених моделей.

Перетворювач топології Buck є одним з найбільш придатних для використання в задачах отримання контрольованого джерела живлення з меншою напругою та більшим струмом ніж

джерело живлення. 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.

Одна з можливих спрощених схемних реалізацій наведена на (рис.1), де V_{cc} – вхідна напруга живлення, V_2 – вихідна напруга, R_h – опір навантаження на виході перетворювача, L – котушка індуктивності, яка грає ключову роль у перетворювачі, C_2 – вихідна фільтруюча ємність. Конденсатор C_1 часто не є відокремленим елементом схеми, може бути представлений внутрішньою ємністю діода або в складі демпферного ланцюга снаббера, V_1 – напругу на лівому виводі індуктивності.

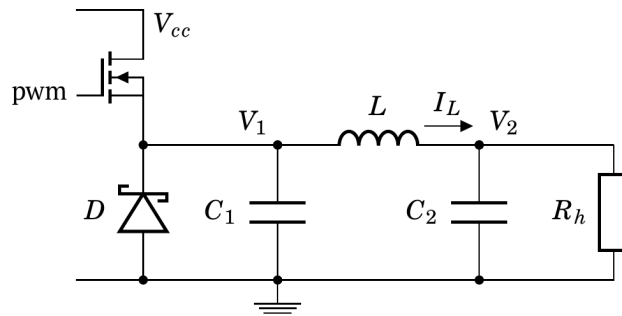


Рисунок 1 – Перетворювач топології Buck з діодом Шотткі у нижній частині напівмосту

Потрібні два «перемикача», які проводять перемикання струму для індуктивного елемента L . Верхня частина може бути представлена MOSFET (як показано на рисунку), транзисторами BJT або IGBT, що керується джерелом сигналу ШІМ (Широтна Імпульсна Модуляція). Нижня частина може бути представлена, як іншим транзистором, з власним керуючим сигналом, так і за допомогою пасивного перемикаючого елемента, як діод Шоткі. Частота ШІМ f_{pwm} визначає повний період контролю T_0 , тоді як час T_1 , коли верхній перемикач відкритий, визначає робочий цикл γ (1):

$$T_0 = \frac{1}{f_{pwm}}, \quad \gamma = \frac{T_1}{T_0}, \quad \gamma \in [0,1). \quad (1)$$

При створенні моделі для першого наближення ми припускаємо, що більша частина елементів є ідеальною, тобто, $V_{cc} = \text{const}$, $L = \text{const}$, MOSFET в закритому стані характеризується нескінченним опором, у відкритому стані еквівалентний невеликому звичайному резистору, а перемикання відбувається миттєво. У таких припущеннях динаміка моделі визначається наступною системою рівнянь (2):

$$\begin{cases} C_1 \dot{V}_1(t) = \frac{\text{pwm}(t)(V_{cc} - V_1(t))}{R_{ch}} + I_d(V_1) - I_L(t), \\ L \dot{I}_L(t) = V_2(t) - V_1(t), \\ C_2 \dot{V}_2(t) = I_L(t) - \frac{V_2(t)}{R_h(t)}, \\ I_d(V) = I_s \left(\exp\left(\frac{V_1(t)}{N_d V_t}\right) - 1 \right). \end{cases} \quad (2)$$

де $\text{pwm}(t)$ – ШІМ сигнал (0 або 1), R_{ch} – опір каналу MOSFET транзистора у відкритому стані, $I_d(V_1)$ – струм через діод Шотткі, R_h – навантаження (нагрівач для випаровування металу у вакуумі) без рахунку опору дротів, I_s , N_d , V_t – параметри діода Шотткі. Незважаючи на

простоту, чисельні рішення цієї системи в реальних умовах мають певні труднощі. По перше, в цьому контексті існує дуже різний часовий масштаб. Типове значення R_h – являє собою 10мОм, $C_1 \approx 10^{-10} \text{F} \dots 10^{-8} \text{F}$. Отже, необхідний часовий крок у числовому розрахунку може бути порядком меншим, ніж 10^{-12}s . З іншого боку, значення C_2 часто набагато більше, і необхідний повний час моделювання може досягти $10^{-2} \dots 10^2 \text{s}$. Це призводить до дійсно величезної кількості кроків моделювання, а також до великої кількості виділеної пам'яті, якщо нам потрібна повна історія процесу. Проте для визначення можливих методів зменшення кількості розрахунків проведено ряд чисельних моделювань деяких типових випадків.

Значення компонентів схеми вибирали стосовно до реального розробленого під час дослідів обладнання, що використовувалося в процесі вакуумного термічного випаровування. Тому $V_{cc} = 12 \text{V}$, $f_{\text{pwm}} = 100 \text{kHz}$, $C_1 = 10 \text{nF}$, $C_2 = 6600 \mu\text{F}$, $L = 10^{-5} \text{H}$, $I_s = 2.42 \cdot 10^{-5} \text{A}$, $N_d = 1.78$, $\gamma \in [0.02; 0.7]$, $R_h \in [0.1; 10] \Omega$. Використовуючи ці параметри, можна скласти декілька безрозмірних значень. Найбільш цінні з них базуються на співвідношенні часових виразів з періодом ШІМ. Отже, ми визначаємо (3):

$$\beta_{LRh} = \frac{L}{R_h T_0}, \beta_{C1Rch} = \frac{C_1 R_{ch}}{T_0}, \beta_{C2Rh} = \frac{C_2 R_h}{T_0}, \beta_{C1L} = \frac{\sqrt{C_1 L}}{T_0}, \beta_{C2L} = \frac{\sqrt{C_2 L}}{T_0}. \quad (3)$$

В зазначених вище умовах ми отримуємо:

$$\beta_{LRh} \in [0.1 \dots 10], \beta_{C1Rch} = 10^{-5}, \beta_{C2Rh} \in [66 \dots 6.6 \cdot 10^3], \beta_{C1L} \approx 3.16 \cdot 10^{-2}, \beta_{C2L} \approx 26.$$

Надзвичайно низьке значення β_{C1Rch} підкреслює той факт, що процеси зарядки і розрядки C_1 можуть бути знехтувані при моделюванні. У цьому випадку необхідно надати правильне визначення $V_1(t)$. Значення β_{C1L} , β_{C2L} , не мають видимого представлення в цій схемі, так як коливання не є передбачуваним режимом роботи. Використовуючи даний діапазон R_h , ми отримуємо значення β_{LRh} і β_{C2Rh} і більше, і менше 1. Це означає, що ми маємо різні режими роботи. Дійсно, належне значення R_h , яке може дати нам розумну потужність, набагато суворіше: $R_h \in [0.1; 0.5] \Omega$. Отже, у випадку $R_h = 0.5 \Omega$ ми отримуємо $\beta_{LRh} = 2$ (це означає, що індуктивний процес на гілці $L-R_h$ має один і той же порядок з T_0 , але все ж трохи повільніше). І $\beta_{C2Rh} = 3.3 \cdot 10^2$, що ми дійсно можемо ігнорувати зміни $V_2(t)$ протягом одного циклу ШІМ.

На (рис.2) представлені результати моделювання з заданим набором параметрів $\gamma = 0.1$, $R_h = 0.5 \Omega$, $V_2(0) = V_{20} = 0 \text{V}$, $I_L(0) = I_{L0} = 0$.

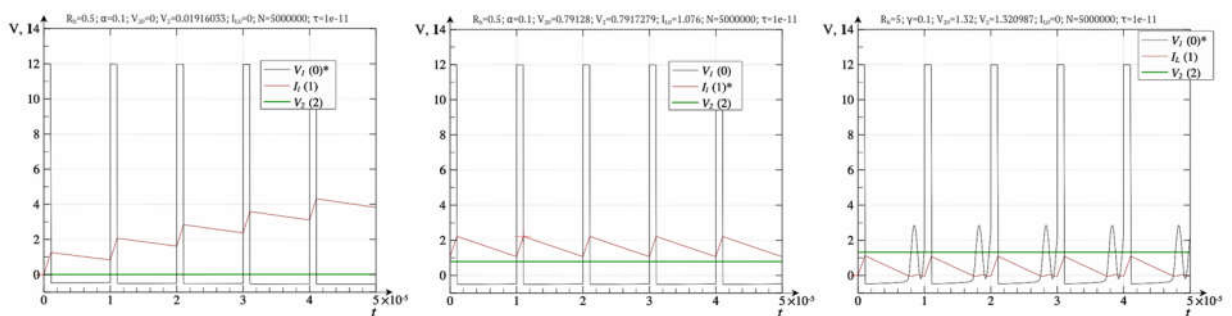


Рисунок 2 – Результати моделювання системи (2) при $\gamma = 0.1$, $R_h = 0.5 \Omega$, $V_{20} = 0 \text{V}$, $I_L(0) = I_{L0} = 0$

Щоб отримати цей результат, потрібно було 5000000 кроків моделювання, $1 \cdot 10^{-11} \text{s}$ (τ) кожен. Якщо крок часу був збільшений до 10^{-10}s , процес моделювання став нестійким, і виявлено нескінченний результат. Проте результати моделювання прості, без складної поведінки. Єдине значення, яке показує швидкі зміни, $V_1(t)$ - гострий квадратичний графік з'являється добре відомою кривою зарядки тільки на часовій шкалі, близькій до 10^{-9}s . Стан $I_L(t)$ далекий від

стабільного стану, оскільки збільшується після кожного періоду ШІМ. Значення V_2 також збільшується, але через велику величину $\beta_{C_2 R_h}$ ця зміна може схити протягом одного періоду ШІМ (T_0). Отже, в цьому стані кожен період ШІМ можна розділити на дві частини. На кожній частині обидва $I_L(t)$ і $V_2(t)$ залежності близькі до лінійних. Залежність $V_1(t)$ у видимій шкалі часу має 2 значення: поблизу V_{cc} , якщо $\text{pwm}(t) = 1$ і $V_{dn} \approx -0.48V$ (напруга відкриття діода Шоттки) в іншому випадку. Ці факти можуть суттєво зменшити складність моделі, а, відповідно, і кількість необхідних обчислювальних ресурсів.

На (рис.3) зліва представлені результати моделювання з подібним набором параметрів $\gamma = 0.1$, $R_h = 0.5\Omega$, $V_{20} = 0.79V$, $I_{L0} = 1.07A$. Основною відмінністю від попередньої цифри є те, що початкова умова була обрана для забезпечення квазістаціонарної поведінки. Але головний результат такий самий: кожен період ШІМ можна розділити на дві прості частини.

На (рис.3) справа можна побачити інший результат. Вибір початкових умов був близьким до стаціонарних ($\gamma = 0.1$, $R_h = 5\Omega$, $V_2(t) = V_{20} = 1.32V$), але модель демонструє більш складну поведінку. Перш за все, принаймні 3 частини в кожному періоді ШІМ. Перший і другий показують подібну поведінку з попередніми випадками, але магнітний потік в індукторі недостатньо потужний для підтримки безперервного струму.

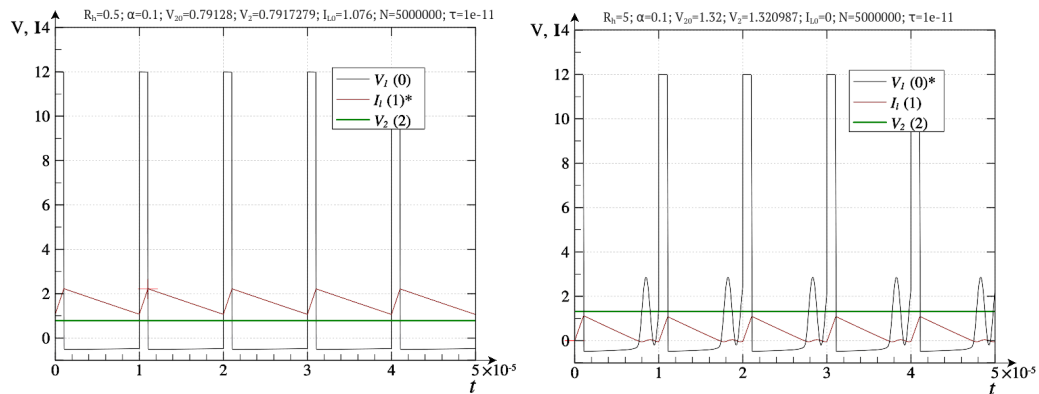


Рисунок 3 – Результати моделювання системи (2) при $\gamma = 0.1$, $R_h = 0.5\Omega$, $V_{20} = 0.79V$, $I_{L0} = 1.07A$ зліва та при $\gamma = 0.1$, $R_h = 5\Omega$, $V_{20} = 1.32V$ з права

Цей режим відомий як "переривчастий режим провідності" (DCM). Більш того, у цій частині періоду ми можемо спостерігати $V_1(t)$ і $I_L(t)$ коливання, але в реальних схемах можна придушити снабером та іншими схемо технічними засобами. Цей поділ на 3 частини не спостерігається, якщо в нижній частині напівмосту використовується активний елемент. Але при цьому ми можемо отримати альтернативний струм в індукторі, який не є бажаним для більшості цілей. Як уже згадувалося раніше, якщо $\beta_{C_1 R_{ch}} \ll 1$ і інші безрозмірні значення ні, то рівняння може бути спрощено.

У цьому випадку необхідно дати $V_1(t)$, щоб визначити ці значення, можна скористатися тим, що в використаних умовах існує 3 характерних значення: поблизу V_{cc} , якщо $\text{pwm}(t) > 0$, V_{dn} або нуля в іншому випадку. Отримуємо систему рівнянь (4).

Для цієї моделі необхідні додаткові схематичні обмеження: $I_L(t) \geq 0$.

Результати моделювання в умовах, що дорівнюють першому моделюванню (рис.2), показані на (рис.4,5).

$$\begin{cases} L\dot{I}_L(t) = V_2(t) - V_1(t), \\ C_2\dot{V}_2(t) = I_L - \frac{V_2(t)}{R_h(t)}, \\ V_1(t) = \begin{cases} V_{CC} - R_{ch}I_L(t), & \text{pwm}(t) > 0, \\ V_{dn}, & \text{pwm}(t) = 0, I_L(t) > 0, \\ 0, & \text{pwm}(t) = 0, I_L(t) = 0. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

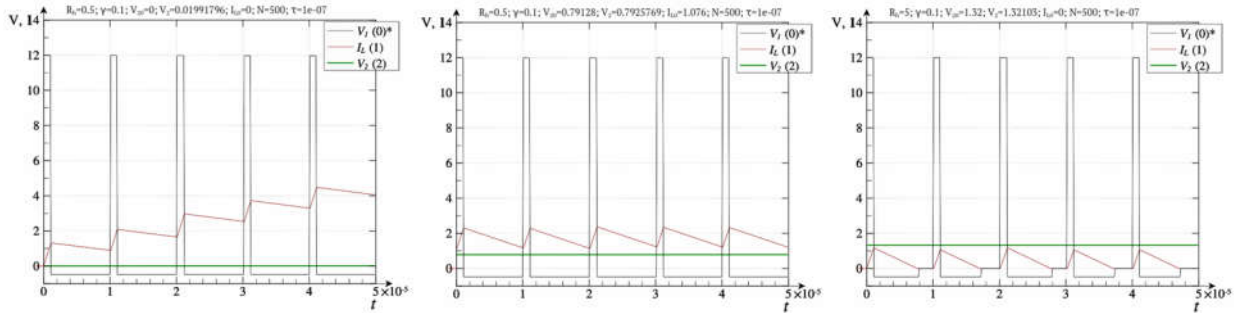


Рисунок 4– Результати моделювання спрощеної моделі (4) при: $\gamma = 0.1$, $R_h = 0.5\Omega$, $V_{20} = 0V$, $I_L(0) = I_{L0} = 0$

Результати моделювання досить близькі, а інші симуляції показують подібні результати. Найважливішою відмінністю є значення τ : перша модель вимагає мінімальних значень приблизно 10^{-11} , тоді як спрощена модель вимагає 10^{-7} , тому обчислення в 1000 разів швидше, і необхідно менше пам'яті для зберігання результатів.

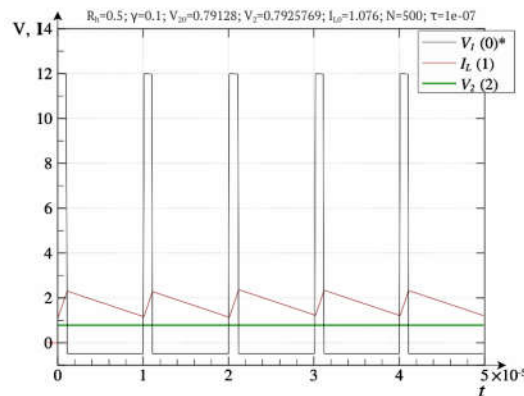


Рисунок 5– Виск перетворювач спрощена модель (4) квазістаціонарний стан

Використовуючи запропоновану модель, отримали залежності $V_2(R_h, \gamma)$ у випадку фіксованого цього та інших подібних значень. На (рис.6) зліва підсумкові результати моделювання представлені як $V_2(R_h)$ залежність для фіксованих γ .

Ділянка занурюється в три частини: центральна частина відповідає безперервному режиму, де вихідна напруга практично не залежить від навантаження, ліва частина демонструє падіння напруги при високому навантаженні, а права частина відповідає переривчастому режиму. На (рис.6) справа результати моделювання представлені як залежність $V_2(R_h, \gamma)$. У результаті проведених досліджень зроблено висновок, що для досягнення близьких до лінійних $V_2(\gamma)$ залежностей необхідно використовувати безперервний режим.

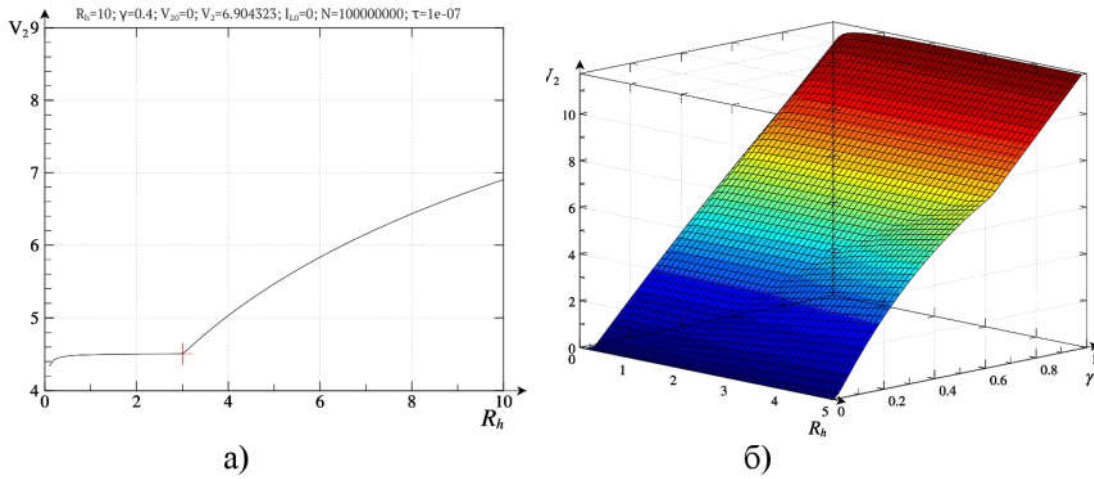


Рисунок 6 – Залежність: а- $V_2(R_h)$ при $\gamma = 0.4$; б- $V_2(R_h, \gamma)$

Якщо діапазон R_h не більший, ніж у близьких до стійких умовах, це може бути виконано шляхом правильного вирівнювання значень L , f_{pwm} . Переривчастого не можна уникнути, якщо γ швидко змінюється, але цей стан є перехідним. У безперервному режимі подається ефективний вихідний опір $R_s = R_{ch}\gamma$, тому за низької γ джерело живлення може управляти навантаженням з низьким опором без істотного падіння напруги. Попередні моделювання показують, що в типових умовах існує три різні часові шкали для процесів у перетворювачі заряду. Перший – зарядка C_1 і розрядка, що характеризується часовими шкалами $10^{-11} \dots 10^{-9}$ s. Наступний масштаб $10^{-6} \dots 10^{-4}$ s, який відповідає f_{pwm} і швидким змінам струму в індукторі. Третя шкала $10^{-3} \dots 10^2$ s відповідає процесам зарядки та розрядки C_2 . У такому масштабі зміни зумовлені змінами опору навантаження, параметрами ШІМ або початковими умовами. Якщо ці значення фіксуються на постійному рівні, ми припускаємо, що перетворювач знаходиться в квазістаціонарному стані, оскільки зміни відбуваються в першому і другому масштабах часу. Для простоти будемо позначати цю ситуацію як «стаціонарний стан», вважаючи за обмеження. У цьому стаціонарному режимі:

$$V_2 \approx 0, I_L(t) = I_L(t + n \cdot T_0). \quad (5)$$

Припустимо, що $V_{cc} \gg |V_{dn}|$, $V_{dn} \approx -0.48V$. Що стосується нульового наближення, ми припускаємо, що $I_L R_{ch} \ll V_{cc}$.

Схематичні зображення для одного циклу ШІМ представлені на (рис.7), безперервний (а) і переривчастий (б) режим відповідно.

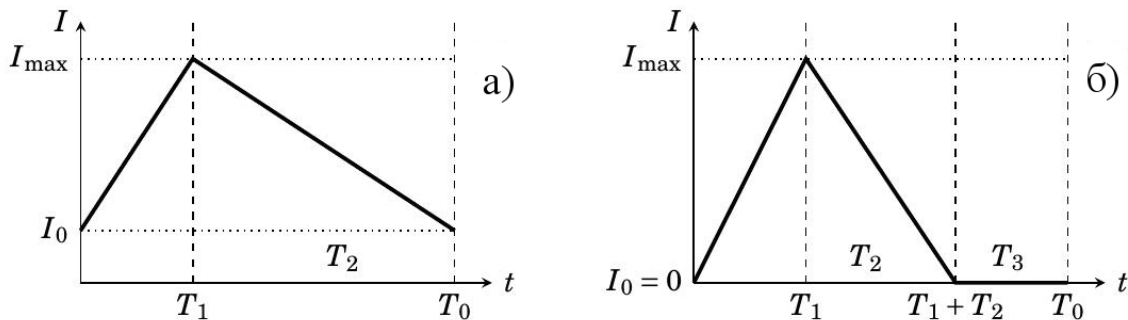


Рисунок 7 – Спрощені залежності $I_L(t)$ для безперервних (а) і розривних (б) режимів. У безперервному режимі $T_0 = T_1 + T_2$, $I_0 \geq 0$.

$$I_{\max} = I_0 + \frac{T_1}{L}(V_{cc} - V_2) = I_0 + \frac{T_2}{L}(V_2 - V_{dn}). \quad (6)$$

$$V_2 = V_{cc} \frac{T_1}{T_0} + V_{dn} \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) = V_{cc}\gamma + V_{dn}(1 - \gamma). \quad (7)$$

Рівняння часто спрощується до $V_2 \approx V_{cc}\gamma$, але для низьких значень це призведе до істотних помилок. З іншого боку, рівняння дає неправильні (< 0) результати за низьких значень γ , шина в цьому випадку стан ССМ не виконується.

Як ми можемо бачити, значення I_0 , R_h в цьому розрахунку не з'являються, тому точка балансу в даному випадку не залежить від навантаження. Але існують обмеження: $I_0 \geq 0$. Тому можна визначити I_0 , використовуючи залишковий баланс:

$$q_{\text{in}} = T_0 I_0 + \frac{T_0 T_1}{2L}(V_{cc} - V_2) \approx T_0 I_0 + \frac{T_0^2 \gamma V_{cc}}{2L}(1 - \gamma), \quad (8)$$

$$q_{\text{out}} = T_0 \frac{V_2}{R_h} \approx \frac{T_0 V_{cc} \gamma}{R_h}. \quad (9)$$

$$I_0 = \frac{V_{cc} \gamma}{R_h} - \frac{T_0 \gamma V_{cc}}{2L}(1 - \gamma) = V_{cc} \gamma \left(\frac{1}{R_h} - \frac{T_0(1 - \gamma)}{2L} \right) = \frac{V_{cc} \gamma}{R_h} \left(1 - \frac{T_0 R_h (1 - \gamma)}{2L} \right). \quad (10)$$

Зважаючи на це умовою безперервного режиму стає:

$$\frac{T_0 R_h (1 - \gamma)}{2L} \leq 1, \quad \text{or} \quad \gamma \geq 1 - \frac{2L}{T_0 R_h} = \gamma_{\text{crit}}. \quad (11)$$

У розривному режимі виконується умова $I_L(0) = I_L(T_0) = 0$, тому неможливо визначити V_2 з цього рівняння.

Вирішивши одночасно:

$$\begin{cases} T_1 V_{cc} - T_1 V_2 - T_2 V_2 = 0, \\ T_1^2 V_{cc} - T_1^2 V_2 + T_2^2 V_2 = 2T_0 L V_2 / R_h, \end{cases} \quad (12)$$

отримаємо:

$$T_2 = -\frac{\sqrt{R_h^2 T_1^2 + 8LR_h T_0} + R_h T_1}{2R_h}, \quad V_2 = -\frac{T_1 \sqrt{R_h^2 T_1^2 + 8LR_h T_0 V_{cc}} + R_h T_1^2 V_{cc}}{4LT_0}, \quad (13)$$

$$T_2 = -\frac{T_1}{2} + \frac{1}{2R_h} \sqrt{R_h^2 T_1^2 + 8LR_h T_0} = -\frac{T_0 \gamma}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{T_0^2 \gamma^2 + \frac{8LT_0}{R_h}} = \frac{T_0}{2} (\sqrt{\gamma^2 + 8\beta_{LRh}} - \gamma). \quad (14)$$

Ці розрахунки добре узгоджуються з отриманими результатами, тому можуть бути використані у випадках, коли швидка динаміка R_h і γ не спостерігається. Для перевірки результатів моделювання проведено серію натурних експериментів з реальним обладнанням (рис.8).

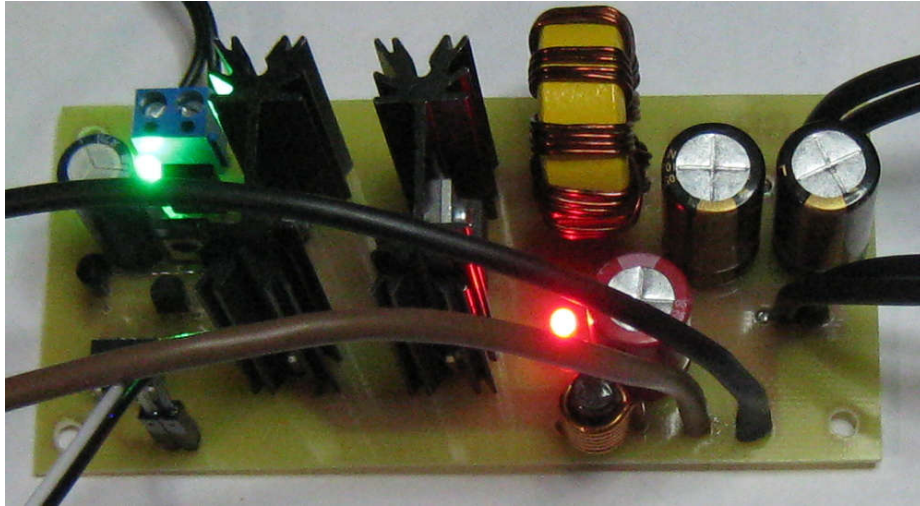


Рисунок 8 – Фотографія розробленого імпульсного перетворювача топології Buck

На деяких фіксованих величинах γ були отримані залежності $V_2(R_h)$. Потім використовувався квазістаціонарний підхід з урахуванням додаткового падіння напруги. Результати показані на (рис.9). Різницею між реальним експериментом і квазістаціонарною моделлю можна знехтувати в більшості діапазонів, крім надзвичайно великого навантаження. Проте, це джерело живлення дає нам практично кращі результати, ніж теорія. Враховуючи всі перераховані розрахунки, моделювання та вимірювання, можна зробити наступні висновки: система рівнянь (2) може описувати багато особливостей поведінки перетворювача топології buck, але чисельне моделювання вимагає великої кількості обчислювальних ресурсів у цьому випадку; у багатьох практичних випадках можна використовувати систему рівнянь (4), яка вимагає в 10^4 раз менше ресурсів, але все ж дає нам адекватні результати; квазістаціонарний підхід дає нам правильні аналітичні результати, які можуть бути використані в симуляції, де R_h і γ змінюються повільно; порівняння з даними, отриманими в реальному експерименті, підтверджує правильність запропонованих моделей і методів.

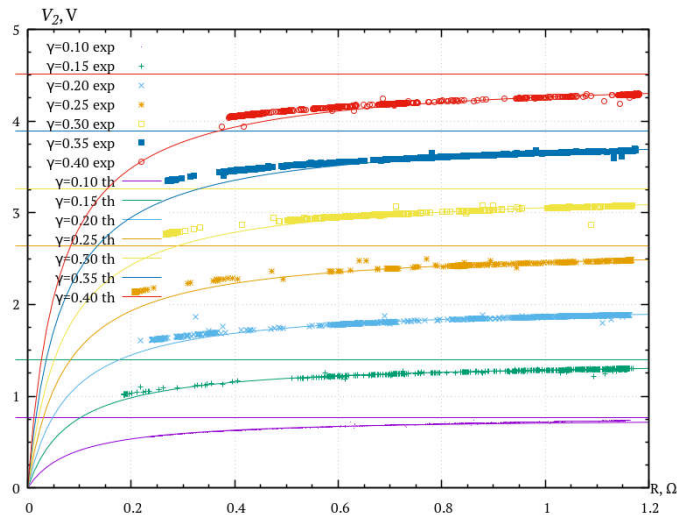


Рисунок 9 – Порівняння реальних та модельних залежностей $V_2(R_h, \gamma)$

Враховуючи всі результати моделювання та вимірювання, можна зробити наступні висновки: рівняння (2) описує багато особливостей поведінки перетворювача топології buck, але чисельне моделювання вимагає великої кількості обчислювальних ресурсів у цьому випадку; у багатьох практичних випадках можна використовувати систему рівнянь (4), яка вимагає в 10^4 раз менше ресурсів, але все ж дає нам адекватні результати; квазістаціонарний підхід дає правильні аналітичні результати, які можуть бути використані в симуляції, де R_h і γ змінюються повільно; порівняння з даними, отриманими в реальному експерименті, підтверджує адекватність запропонованих моделей і методів.

Третій розділ присвячено методу керування потужністю нагрівача за допомогою Виск перетворювача. Досліджено побудовану під час дослідів систему керування потужністю нагрівача у вакуумі, що включає в себе перетворювач топології buck, вимірювальний комплекс на основі INA226 та керуючу плату на базі STM32F407VBT.

Використовуючи квазістаціонарний підхід, при якому (15) вихідна напруга практично не залежить від навантаження, при переривчастому режимі (16) з'являється падіння напруги, а також знаючи точку перетину цих режимів було побудовано систему керування.

$$V_2 = V_{cc} \frac{T_1}{T_0} + V_{dn} \left(1 - \frac{T_1}{T_0} \right) = V_{cc}\gamma + V_{dn}(1-\gamma). \quad (15)$$

$$V_2 = \frac{V_{cc}\gamma}{4L} (\sqrt{R_h^2 T_0^2 \gamma^2 + 8LR_h T_0} - R_h T_0 \gamma) \quad (16)$$

При повільній зміні заданого значення потужності може використовуватися лише інтегратор, проте коли зміна різка, швидкості виходу на потрібне значення інтегратора може не вистачити. Тому використовується функція «передбачення», яка виставляє значення ШІМ у потрібну точку, а потім інтегратор доводить значення повільно.

Система керування перед початком стабілізації напруги, струму або потужності проводить калібрування. Якщо фізичні та геометричні властивості нагрівача не відрізняються, можна використовувати попереднє калібрування. Під час калібрування система видає ШІМ з кроком у 5% між мінімальним та максимальним заданим значенням та прив'язує до отриманих точок напругу, струм, потужність, а також опір нагрівача.

Під час калібрування знаходиться нелінійна та лінійна область залежності напруги від ШІМ, завдяки масиву отриманих значень.

При розрахунку функція «передбачення» отримує необхідну вихідну напругу, потім перевіряє її з мінімальною напругою, яка знаходиться на лінійній області. І в разі, якщо необхідна вихідна напруга більше, ніж мінімальна напруга в лінійній області, то використовується лінійна апроксимація, в іншому випадку – квадратична апроксимація. Після виконання апроксимації отримуємо значення ШІМ у відсотках.

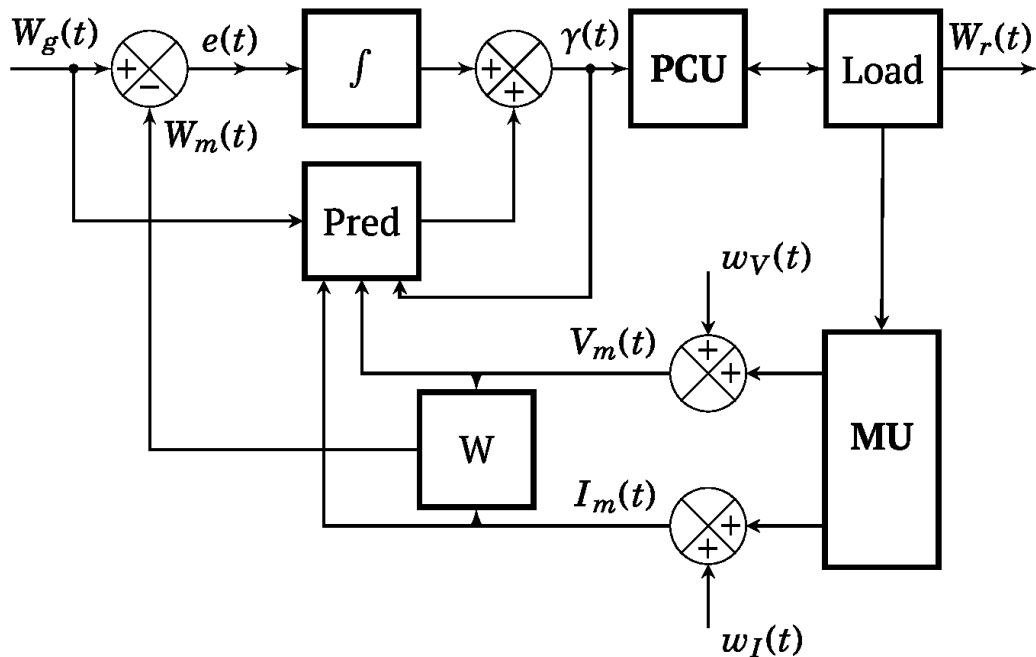


Рисунок 10 – Схема розробленої системи керування потужністю нагрівача на основі функції «передбачення»: $W_g(t)$ - задана потужність, $W_r(t)$ - реальна потужність, $W_m(t)$ - виміряна потужність, $V_m(t)$ - виміряна напруга, $I_m(t)$ - виміряний струм, $w_v(t)$ - похибка

вимірювання напруги, $\omega_I(t)$ - похибка вимірювання струму, $e(t)$ - похибка встановлення потужності, $\gamma(t)$ - коефіцієнт заповнення ШІМ.

В програмі значення від функції «передбачення» додається до значення інтегратора і для установки бажаного значення вихідної напруги виглядає так (17):

$$PWM = \gamma(t) = \gamma_{pr} + \int_{ts_0}^t (U_{act} - U_{pre}) \cdot K dt \quad (17)$$

Для установки бажаного значення вихідного струму (18):

$$PWM = \gamma(t) = \gamma_{pr} + \int_{ts_0}^t (I_{act} - I_{pre}) \cdot R_{last} \cdot K dt \quad (18)$$

Установки бажаного значення вихідної потужності (19):

$$PWM = \gamma(t) = \gamma_{pr} + \int_{ts_0}^t \frac{(P_{act} - P_{pre})}{I_{min} \cdot 0.2} \cdot K dt \quad (19)$$

На (рис.11) можна побачити, як система з функцією «передбачення» відпрацьовує одиничний стрибок. Також, що важливо, завдяки контролю за опором нагрівача практично зникла можливість його перегорання від зміни фазового стану металу, який знаходиться на нагрівачі. Метал що розплавляється, різко зменшує опір, тому якщо керування йде без зворотнього зв'язку, у більшості випадків він перегорить.

Було зроблено графік, на якому видно цей фазовий перехід, система управління повільно підвищує потужність. Максимальне відхилення було отримано у той час, коли матеріал, що було призначено для випаровування, перейшов до рідкої фази та опір нагрівача суттєво змінився за час, значно менший за час циклу вимірювання та управління.

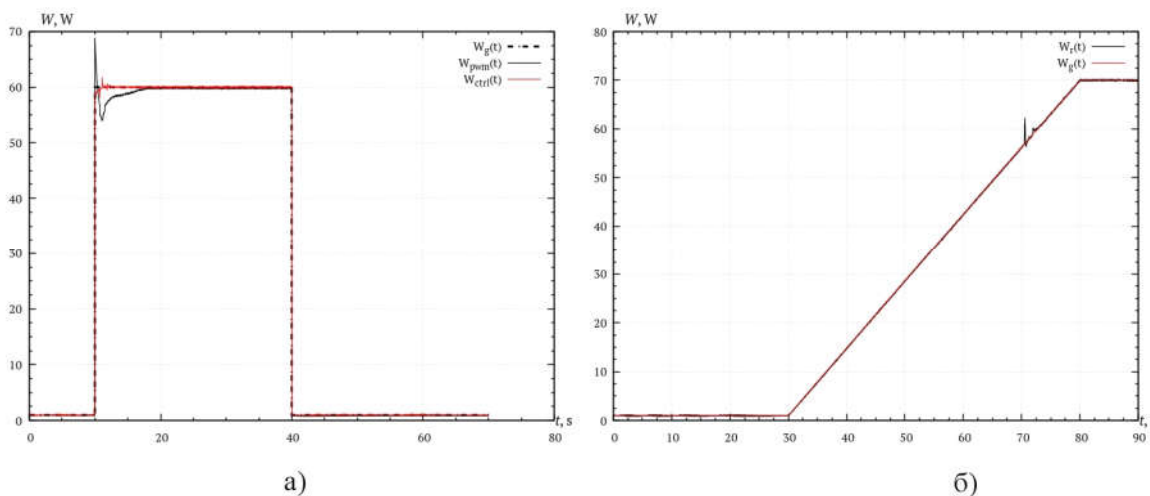


Рисунок 11 – Порівняння реакції функцією одиничного стрибка при встановленні потужності: а - за допомогою ШІМ; б - розробленої системи керування з функцією «передбачення» (задана потужність $W_g(t)$, а отримана $W_r(t)$)

Це відхилення було скомпенсоване вже на наступному кроці, а теплова інерція системи дозволяє не помічати такі короточасні та невеликі відхилення (рис.11 б).

Описана вище система керування може утримувати задану потужність, струм, або напругу з потрібною точністю, проте для цього їй потрібно калібрування при кожному запуску з новим нагрівачем. Звісно, якщо фізичні (метал, з якого зроблено випаровувач) та геометричні властивості нагрівача не відрізняються, можна використовувати попереднє калібрування. На практиці два однакових випаровувача зробити практично неможливо, при закріпленні в устаткування для термічного випаровування контакт буде різним, метал, що кладеться на випаровувач, по – різному впливає на загальний опір, що приведе до суттєвої систематичної помилки (рис.12).

Через вище описані причини розглядалася можливість адаптивного управління нагрівачем, за якої коефіцієнти моделі уточнювались би під час управління нагрівачем. При адаптивному

управлінні використовується та ж модель, проте коефіцієнти беруться не за калібрування, а отримуються безпосередньо у процесі роботи. Для цього утримуються точки цифровим фільтром, відомим як фільтр з безкінцевою імпульсною характеристикою (20, 21).

$$\gamma = \alpha \cdot \gamma_{new} + (1 - \alpha) \cdot \gamma_{last} \quad (20)$$

$$U = \alpha \cdot U_{new} + (1 - \lambda) \cdot U_{last} \quad (21)$$

Завдяки цьому фільтру не враховуються точки, що мають значення на порядок більше / менше від інших.

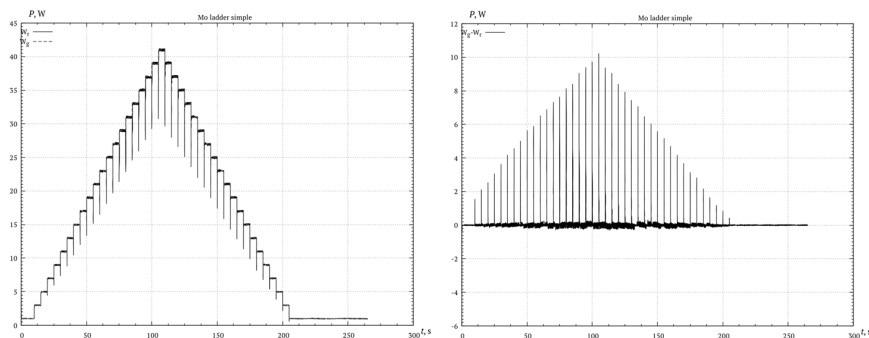


Рисунок 12 – Різниця між заданою потужністю та отриманою на нагрівачі з Мо, при попередньому калібруванні на Ті

Функція залежності $U(pwm)$ розбивається на рівні відрізки по 2%, після проходження фільтра в кожному відрізку отримуються свої значення напруги і ШІМ. За трьома чи більше точками отриманими після фільтра, виконується лінійна регресія, знаходяться значення коефіцієнтів моделі (рис.13).

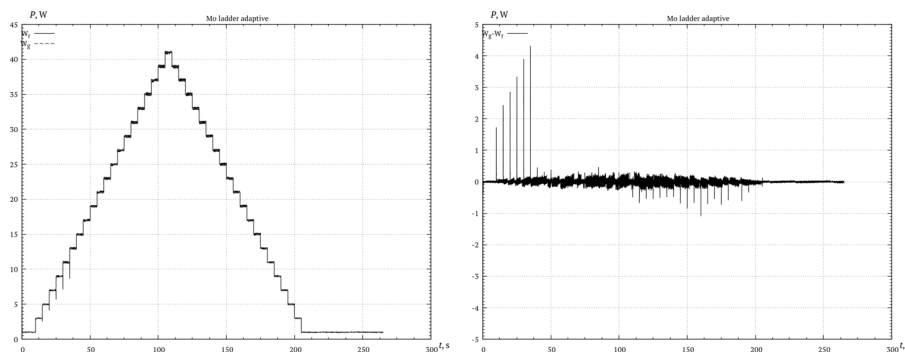


Рисунок 13– Різниця між заданою потужністю та отриманою на нагрівачі з Мо при використанні адаптивного управління

Як наслідок, завдяки адаптивному управлінню можна використовувати нагрівачі з різного металу, різних геометричних розмірів та не боятися похибок встановлення потужності. На рис.13 можна побачити, що при роботі без калібрування похибки тільки на початку керування, до тих пір поки не набереться достатньо точок для регресії.

Таблиця 1

	RMS all	max all	RMS t>50s	max t>50s
adaptive	0.147	4.33	0.098	1.097
no adaptive	0.48	14.24	0.53	10.24

В таблиці 1 представлено середньоквадратичне відхилення встановленої потужності на нагрівачі при використанні адаптивного управління і без нього, а також є порівняння відхилення за перші 50 секунд роботи і загалом.

Завдяки цьому було удосконалено 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; уперше

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 ході дослідження було запропоновано використання системи управління на основі топології Buck для живлення термічного випаровувача у вакуумі, а також розроблено та фізично реалізовано обладнання для проведення експериментів.

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, який містить два методи бінаризації: локальний, заснований на бібліотеці adaptive threshold, та глобальний. Глобальний метод може знаходити рівень бінаризації автоматично, для знаходження глобального порогу бінаризації програма Imghead проходить усі пікселі в картинці та приводить їх до формату Grayscale 8 (8 біт на колір, 256 відтінків сірого). Потім вираховується кількість пікселів з повторюваним відтінком сірого і зберігається в масив. На основі даних з цього масиву вираховується відношення пікселів певного відтінку сірого до усієї кількості пікселів у картинці, свого роду інтенсивність. За цим відношенням будується гістограма. Вираховується інтегральна площа гістограми, і на ній знаходяться області з площею 5%, 50%, 95%. Знаходяться точки на осі ординат, які відповідають за відсотки площі. Потім стосовно цих точок виконується розроблений алгоритм, який полягає в наступному. Вираховується різниця між точкою 95% і 50% , а також між точкою 50% і 5% та порівнюється з числом 5. Якщо різниця однієї чи 2 пар точок більше 5, то знаходиться медіана на гістограмі, точка перетину медіани та осі ординат буде точкою бінаризації, сама ж гістограма при цьому близька до симетричної. Якщо різниця однієї чи 2 пар точок менше 5, то гістограма асиметрична, проводиться додаткове перевіряння, більше 4 чи ні різниця точок 95% і 5%. І якщо більше, то береться середньо арифметичне між точками 95% і 5% , це середньо арифметичне і буде точкою бінаризації (рис.14).

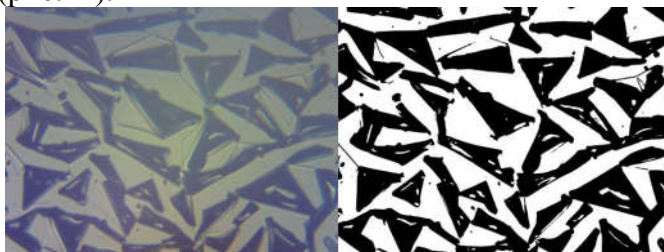


Рисунок 14 – Мікрофотографія структури плівки Fe після бінаризації розробленим алгоритмом

Якщо фотографії з мікроскопу робляться з кутового освітлення, локальна бінаризація дозволяє уникнути похибок, пов'язаних з нерівномірністю освітлення робочого поля. На рис.15 бінаризації піддається мікрофотографія структури тонкої плівки Zn, при кутовому освітленні можна побачити його вплив, який вніс похибку в процес бінаризації, при цьому справа при локальній бінаризації похибки практично немає. Метод adaptive threshold зазвичай використовується для відео камер для розпізнавання тексту, проте він може використовуватися для локальної бінаризації.

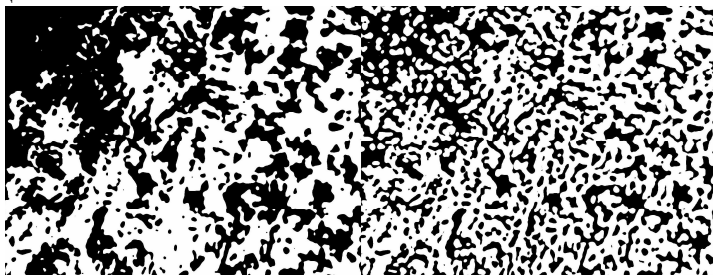


Рисунок 15 – Порівняння монохромного зображення плівки Zn утвореного після бінаризації запропонованим алгоритмом зліва та алгоритмом adaptive threshold з права

Було досліджено вплив тиску залишкових газів у вакуумній камері на структуру отриманих плівок. Для дослідження впливу тиску залишкових газів у камері на структуру плівки, проводився експеримент, при якому створювались плівки Zn за одноковими технічними умовами, але зі зміною тиску від 0.1 до 10 Па. Після виконання серії напилення Zn на скляні підкладки, було виявлено відмінність у кольорі поверхні плівки, який змінювався від матового до дзеркального (рис.16).

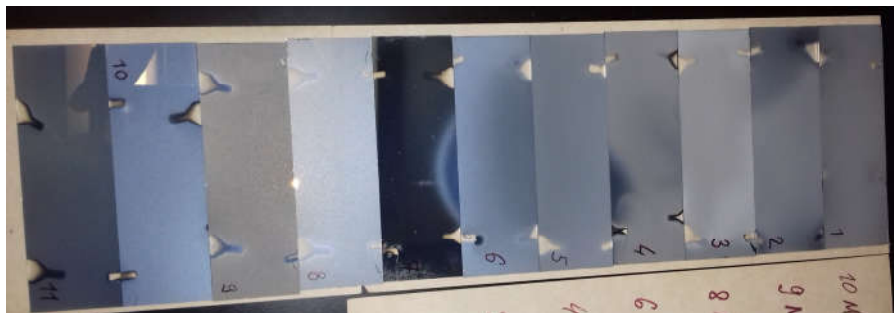


Рисунок 16 – Фотографія тонкоплівкових покриттів Zn, які були створенні термічним напиленням у вакуумі при різному тиску

Це зумовлено тим, що якщо зробити процес напилення при недостатньому вакуумі, отримане металеве покриття буде, як правило, неоднорідним, пористим, за рахунок газових включень, так само можливе утворення оксидів, нітридів і гідроксидів, що і було, зазначено у ході дослідження. Для дослідження структури плівки більш детально, був застосований металографічний імерсійний мікроскоп МІМ - 8 М з бічним підсвічуванням, зроблені мікрофотографії структур 11 зразків. Кожну плівку піддавали виміру на тертя 5 разів, а потім брали середнє арифметичне. Потім за отриманим зв'язком тиску і коефіцієнта тертя був побудований графік (рис.17).

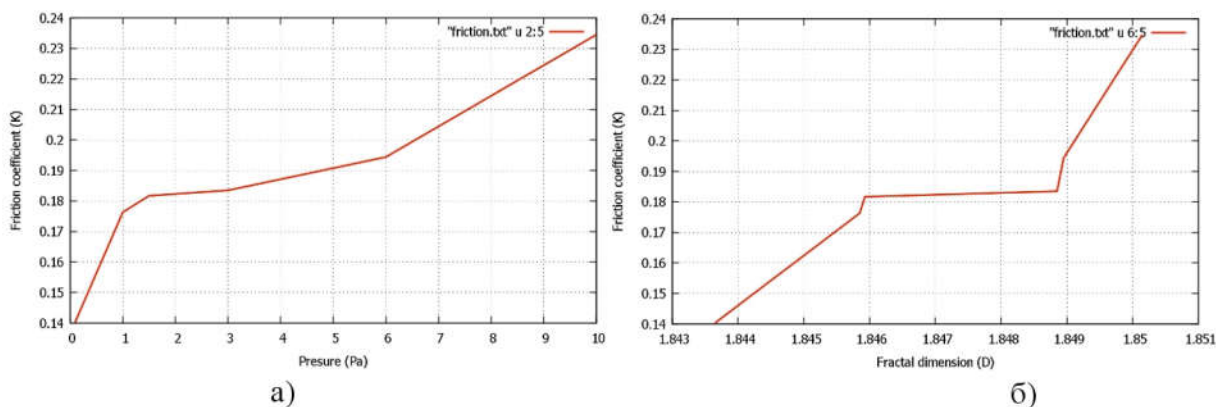


Рисунок 17– На графіку а - залежність коефіцієнту тертя до тиску при нанесенні; б- залежність фрактальної розмірності до коефіцієнта тертя

Оскільки при різній структурі плівок був різний коефіцієнт тертя, було прийнято рішення дослідити структуру цих плівок за допомогою методів обробки зображень. Одним з методів обробки зображень є метод знаходження фрактальної розмірності. Фрактальний аналіз мікрофотографій проводився у розробленому середовищі Imghead за отриманими фрактальними розмірностями кожної плівки був побудований графік. Графік відображає залежність коефіцієнта тертя до фрактальної розмірності (рис.17). По отриманим даним, 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. Швидкість випаровування – це одна з основних характеристик процесу термічного випаровування у вакуумі, яку можна оцінити, використовуючи формулу Герца – Кнудсена (22) :

$$V_{\text{evap.}} = 5.84 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} \cdot P. \quad (22)$$

Нагрівач з Ті мав опір 0.12 Ома, завдяки розробленій системі керування потужність нагрівача змінювалась від 50-140 Ватт, що відповідає зміні швидкості нанесення від $2.98 \cdot 10^{-6}$ до $5.15 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$. У нагрівач було встановлено гранулу Fe, після напилення 10 зразків, з однаковими технічними умовами за різної потужності, було виявлено, що при мінімальній швидкості випаровування заліза на скляній підкладці проявляється матова, неоднорідна структура (рис.18).



Рисунок 18 – Плівка заліза, нанесена на скляну підкладку при мінімальній швидкості випаровування

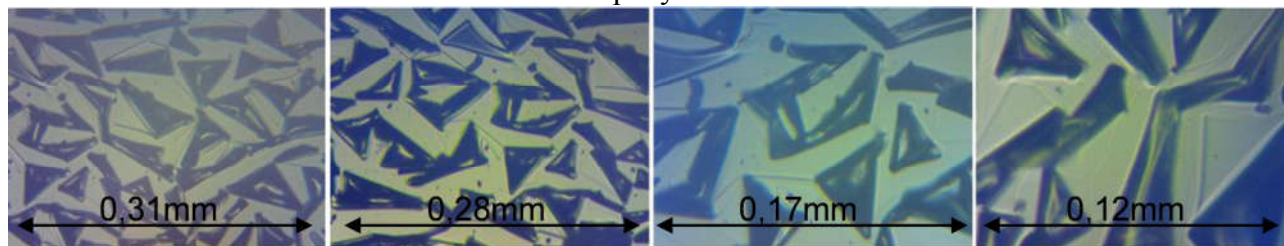


Рисунок 19 – Структура плівки в одній точці, з різним збільшенням зліва на право (5040 Pix / mm; 5690 Pix / mm; 9500 Pix / mm; 12860 Pix / mm)

Структура плівки заліза, що отримана при швидкості нанесення $2.98 \cdot 10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$ та тиску в камері 0.013 Па мала найскладнішу структуру. За допомогою металографічного імерсійного мікроскопу МІМ – 8М та спеціальної камери були зроблені мікрофотографії структури з різними масштабами (рис.19). В результаті обробки зображень були отримані наступні значення фрактальної розмірності: 1.86 при 5040 Pix / mm; 1.8659 при 5690 Pix / mm; 1.87886 при 9500 Pix / mm і 1.92682 при 12860 Pix / mm. Отримані значення розмірностей дуже близькі, і лише на максимальному збільшенні спостерігається істотне відхилення. Швидше за все, це викликано меншою глибиною різкості при застосуванні об'єктива мікроскопа з великим збільшенням. Оскільки структура поверхні плівки складалася переважно з трикутників, природно, виникло питання про розподіл значень їх кутів. Кути трикутних елементів на отриманих структурах були виміряні, і за виміряним значенням була побудована гістограма. Аналіз даної гістограми дозволяє зробити висновок, що, незважаючи на обмеженість кількості вихідних даних, існують значення кутів, які найбільш часто представлені в даній структурі, а саме **36**, 45, 50, 55, **72**, 90, **108**. Слід зазначити, що кути рівні 36, 72, 108 градусів характеризують золотий перетин, квазікристалічну структуру мозаїки Пенроуза.

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційної роботи вирішена актуальна задача 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).

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. Проведено аналіз існуючих математичних моделей перетворювачів та створених на їх основі методів керування потужністю термічного випаровувача у вакуумі.

2. Отримала подальший розвиток математична модель перетворювача топології Buck, 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.

3. 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 допустимо.

4. Удосконалено 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.

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

6. Дістав 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 бінаризації.

7. 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.

8. У ході роботи було: побудовано пристосування для термічного випаровування в вакуумі для вакуумного поста ВУП – 4; керований імпульсний регулятор топології Buck для керування потужністю термічного випаровувача в 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, що запропоновані в дисертаційній роботі була розроблена система керування, яка включає в себе керований імпульсний регулятор топології buck, вимірюючий комплекс на основі INA226 та керуючу плату на основі STM32F407VBT. Розроблена система управління дозволяє підтримувати не лише стабільну потужність, а й вихідний струм або напругу.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАННЯ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті за темою дисертації:

1) Зимогляд А. Ю. Особливості використання НХ711 для отримання даних з тензодатчика / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2016. – №3 (104). – С. 136 – 140.

2) Зимогляд А. Ю. Использование датчика Холла при измерениях расстояний в манипуляционных системах / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, Д. О. Левченко. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2017. – №4 (111). – С. 22– 29.

3) Зимогляд А. Ю. Hardware system for the research of phenomena encountered in the corona discharge / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, Д. О. Левченко. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2016. – №6 (107). – С. 179–184.

- 4) Зимогляд А. Ю. Аналіз спектрів коронного розряду / А. Ю. Зимогляд, Д. О. Левченко. // Вісник ХНТУ. – 2017. – №3 (62). – С. 90–93.
- 5) Зимогляд А. Ю. Зависимость коэффициента трения металлических пленок от давления полученных термическим напылением в вакууме / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, В. В. Ковтун. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2017. – №5 (112). – С. 166–169.
- 6) Зимогляд А. Ю. Исследование физических процессов нанесения цинка из паро - газовой фазы в вакууме / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, В. В. Ковтун. // Сучасні проблеми металургії. – 2018. – №21(1). – С. 3–6.
- 7) Исследование зависимости коэффициента трения металлических пленок от фрактальной размерности / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, В. В. Ковтун, А. А. Журба. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2018. – №2 (115). – С. 9–13.
- 8) Моделирование фрактальных структур функциональных покрытий с учетом скорости напыления / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, В. В. Ковтун, О. І. Михальов. // Вісник ХНТУ. – 2018. – №3(66). – С. 115–120.
- 9) Возможности применения термопар без защитной оболочки для измерения температуры испаряемого вещества в вакууме / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, В. В. Ковтун, А. Г. Станчиц. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2018. – №5 (118). – С. 23–31.
- 10) Зимогляд А. Ю. Development of a system for thermal evaporation / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2019. – №6 (119). – С. 3–11.
- 11) Зимогляд А. Ю. Buck converter simulation and measurement / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда. // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2019. – №2 (121). – С. 21–32.
- 12) Зимогляд А. Ю. Моделювання перетворювача топології Buck для системи управління нагрівачем у вакуумі / А. Ю. Зимогляд, А. І. Гуда, О. І. Михальов. // АСУ та системи автоматики. – 2019. – №5 (176). – С. 169–178.

Тези доповіді за темою дисертації:

- 1) Зимогляд А.Ю. Дослідження тензOMETричного датчика / А.Ю. Зимогляд // Інтернет-конференція „Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”(16-20 березня 2016, м. Черкаси): тези доповіді.- Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, 2016.-С.41-42.
- 2) Зимогляд А.Ю. Моделювання поведінки коронного розряду і подальше його дослідження/ А. Ю. Зимогляд, Д.О. Левченко // XVIII Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2017 (18-22 вересня 2017, м.Херсон): тези доповіді.-МКММ, 2017.-С.16-17.
- 3) Зимогляд А.Ю. Исследование зависимости коэффициента трения металлических пленок от давления при нанесении / А.Ю. Зимогляд А.Ю., А.І. Гуда // ITMM – 2017 (28-30 березня 2017, м.Дніпро): тези доповіді.- ITMM, 2017.-С.31.
- 4) Зимогляд А.Ю. Моделирование фрактальных структур функциональных покрытий с учетом скорости напыления/ А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда, В.В. Ковтун, О.І. Михальов // XVIII Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2018 (17-21 вересня 2018, м.Херсон): тези доповіді.- МКММ, 2018.-С.24.
- 5) Зимогляд А.Ю. Спрощена модель перетворювача топології Buck / А.Ю. Зимогляд, А.І. Гуда // ITMM – 2019 (26-28 березня 2019, м.Дніпро): тези доповіді.- ITMM, 2019.-С.86.
- 6) Zimoglyad A. Yu. Dependence of metal films friction coefficient on pressure during thermal spraying in vacuum / A. Yu. Zimoglyad, A. I. Guda, V. V. Kovtun // 13th International Symposium of Croatian Metallurgical Society Materials and Metallurgy, Croatia, Šibenik,(June 24th – 29th 2018, Croatia Zagreb): abstracts.- Croatia Zagreb Croatian Metallurgical Society, 2018.-P.302.

Авторське свідоцтво на твір:

1) Авторське свідоцтво на комп'ютерну програму «Imghed»(свідоцтво №79845 від 20.06.2018).

АНОТАЦІЯ

Зимогляд А.Ю. Математичне моделювання імпульсного перетворювача для керування термічним випаровувачем з нестационарним навантаженням. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національна металургійна академія України. Дніпро, 2020.

Дисертація присвячена розробці математичних моделей імпульсних перетворювачів. На основі результатів моделі було побудовано систему цифрового керування потужністю нагрівача у вакуумі, що може утримувати заданий профіль потужності, струму, напруги.

Запропоновано чисельний метод знаходження фрактальної розмірності для дослідження структур тонкоплівкових покриттів створених термічним випаровуванням.

Під час роботи було створено: устаткування для термічного випаровування у вакуумі (для поста ВУП-4); апаратно-програмний комплекс керування з цифровим управлінням, що може утримувати задану потужність, струм, напругу; зроблено більше 50 зразків тонкоплівкових покриттів при різних умовах.

Ключові слова: математичні моделі імпульсних перетворювачів, топологія Buck, термічне напылення у вакуумі, тонкоплівкові покриття, цифрове управління, фрактал.

АННОТАЦИЯ

Зимогляд А.Ю. Математическое моделирование импульсного преобразователя для управления термическим испарителем с нестационарной нагрузкой. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - Математическое моделирование и вычислительные методы. - Национальная металлургическая академия Украины. Днепр, 2020.

Диссертация посвящена разработке математических моделей импульсных преобразователей. На основе результатов модели было построено систему цифрового управления мощностью нагревателя в вакууме, что может удерживать заданный профиль мощности, тока, напряжения.

Предложено численный метод нахождения фрактальной размерности для исследования структур тонкопленочных покрытий созданных термическим испарением.

Во время работы было создано оборудование для термического испарения в вакууме (для поста ВУП-4); апаратно-программный комплекс управления с цифровым управлением, может содержать заданную мощность, ток, напряжение; сделано более 50 образцов тонкопленочных покрытий при различных условиях.

Ключевые слова: математические модели импульсных преобразователей, топология Buck, термическое напыление в вакууме, тонкопленочные покрытия, цифровое управление, фрактал.

ABSTRACT

Zimoglyad A. Yu. Mathematical modeling of a pulse converter for control a non-stationary load thermal evaporator. – Manuscript.

Thesis for obtaining the candidate degree (Ph.D) in engineering sciences in the specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods (Technical science).

- The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2020.

This paper is devoted to the task of buck converter simulation and control in the application area of thermal evaporation. Unstable conditions and non-linear phenomena during vacuum evaporation requires special approaches in simplification and control system design.

The main results of the dissertation are as follows:

1. The mathematical model of the Buck topology converter, which, in contrast to the existing ones, takes into account more nonlinear effects, which allows to correctly describe the dynamics of converter when working on loads with low and unstable resistance, has been further developed.

2. The gradual simplification of the Buck topology converter model was first proposed and substantiated, which makes it possible to significantly reduce the amount of computational resources in the simulation and to determine the conditions under which this simplification is acceptable.

3. Improved method of control of the heater by thermal evaporation in vacuum on the basis of the developed model of the Buck topology converter, which allows to set a given profile of voltage, current and power (and indirectly and temperature) under conditions of low thermal inertia, small and substantially non-stationary resistance.

4. The method of adaptation of the parameters of the control system of the heater for thermal evaporation in vacuum was developed for the first time, which allows to reduce considerably the error of regulation at sharp changes of the parameters of the task and the system as a whole.

5. Further developed a numerical method for determining the fractal dimension of images of surfaces from a microscope, which avoids the errors associated with the uneven illumination of the working field, as well as automatically determine the level of binarization.

6. For the first time the dependence between the pressure at metal coatings to the coefficient of friction of these surfaces is established, as well as the dependence of the fractal dimension on the coefficient of friction, which allows, on the one hand, to set the parameters of the coating when creating it, on the other - to evaluate some mechanical properties of coatings for them microimage.

7. In the course of the work: a device for thermal evaporation in vacuum was constructed for vacuum post GDP - 4; a controlled Buck topology pulse controller for controlling the power of a thermal evaporator in a vacuum, as well as calculating all its components; created a hardware and software system responsible for collecting data from the vacuum post and measuring complex based on INA226; Based on the control methods proposed in the dissertation, a control system was developed that includes a controlled pulse controller of the buck topology, an INA226-based measuring complex, and a STM32F407WBT based control board. The developed control system allows to support not only stable power, but also output current or voltage.

Keywords: mathematical models of pulse converters, Buck topology, thermal sputtering in vacuum, thin film coatings, digital control, fractal.

Підписано до друку 06.02.2020. Формат паперу 64×90 1/16
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0. Наклад 100 пр. Зам. № 33.

Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс»
Свідоцтво ДК № 3197 від 28.05.2008 р.
52005, Україна, Дніпропетровська обл., смт Слобожанське,
вул. Василя Сухомлинського, 68, кв. 65