МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

Дипломна магістерська робота

на тему Автоматизована система керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАк-20
спеціальності
151 -Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
за освітньою програмою
Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
Роман БАСЮК
Керівник зав. каф. Наталія ШИБИЦЬКА
Рецензент к.т.н. Світлана ДЕМІШОНКОВА

Київ - 2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій

Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій

Спеціальність 151 - автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Освітня програма – комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКТ

_____ Наталія ШИБИЦЬКА

"___" _____ 2021 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Басюку Роману Васильовичу

1. Тема роботи «Автоматизована система керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття», науковий керівник роботи Шибицька Наталія Миколаївна, к.е.н., доц, затверджені наказом вищого навчального закладу від ___ вересня 2021 року, № ____-уч.
2. Строк подання студентом роботи - ___ грудня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: відсутність градієнту концентрації і температури по лінійних координатах в об'ємі електроліту; повний період осадження в межах від 10 до 100 с при використанні реверсу струму, тривалість включення прямого струму від 80 до 95%.
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ. Розділ 1. Аналіз гальванічних процесів, обладнання для їх проведення, систем управління гальванічними процесами. Розділ 2. Математичне моделювання технологічного процесу нанесення гальванічного покриття. Розділ 3. Оптимізація технологічного процесу нанесення гальванічного покриття. Розділ 4. Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття. Загальні висновки.

5. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 1	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 2	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 3	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 4	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Висновки	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		

6. Дата видачі завдання 04.10. 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2021р	
2	Розділ 1 Аналіз гальванічних процесів, обладнання для їх проведення, систем управління гальванічними процесами	16.10.2021р	
3	Розділ 2 Математичне моделювання технологічного процесу нанесення гальванічного покриття	28.10.2021р	
4	Розділ 3 Оптимізація технологічного процесу нанесення гальванічного покриття	08.11.2021р	
5	Розділ 4 Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття	17.11.2021р	
6	Висновки	23.11.2021р	
7	Оформлення магістерської роботи (чистовий варіант)	29.11.2021р	
8	Здача магістерської роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	01.12.2021р	
9	Перевірка магістерської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	03.12.2021р	
10	Подання роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	08.12.2021р	

Студент _____ **Роман БАСЮК**
(підпис)

Науковий керівник роботи _____ **Наталія ШИБИЦЬКА**
(підпис)

Директор НМЦПФ _____ **Олена ГРИГОРЕВСЬКА**
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Басюк Р. В. Автоматизована система керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021 рік.

Дипломна магістерська робота присвячена підвищенню якості гальванічного покриття шляхом розробки автоматизованої системи керування технологічним процесом з використанням перспективного обладнання - ванн, що живляться реверсивним струмом. Для розробки автоматизованої системи керування, яка реалізує алгоритм оптимізації, проведено удосконалення математичної моделі гальванічного технологічного процесу та визначені оптимальні значення керуючих впливів.

За результатами досліджень розроблена принципова схема і пристрій реверсування струму, що дозволяє розширити часовий діапазон існуючих випрямних агрегатів в режимі реверсування струму в гальванічних ваннах. Запропоновано методику знаходження граничної частоти процесу нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму та створений вимірювально-обчислювальний комплекс для практичної реалізації методики знаходження граничної частоти процесу нанесення гальванічного покриття. На основі вимірювально-обчислювального комплексу розроблена автоматизована система управління процесом нанесення нікелевих гальванічних покриттів з використанням реверсивного струму .

Ключові слова: Автоматизована система керування, вимірювально-обчислювальний комплекс, гальванічне покриття, керуючий вплив, реверсивний струм.

АННОТАЦИЯ

Басюк Р. В. Автоматизированная система управления технологическим процессом нанесения гальванического покрытия

Дипломная магистерская работа по специальности 151 – автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии. – Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев, 2021 год.

Дипломная магистерская работа посвящена повышению качества гальванического покрытия путем разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом с использованием перспективного оборудования – ванн, питаемых реверсивным током. Для разработки автоматизированной системы управления, реализующей алгоритм оптимизации, проведено усовершенствование математической модели гальванического технологического процесса и определены оптимальные значения управляющих воздействий.

По результатам исследований разработана принципиальная схема и устройство реверсирования тока, позволяющее расширить временной диапазон существующих выпрямительных агрегатов в режиме реверсирования тока в гальванических ваннах. Предложена методика нахождения граничной частоты процесса нанесения гальванического покрытия с использованием реверсивного тока и создан измерительно-вычислительный комплекс для практической реализации методики нахождения граничной частоты процесса нанесения гальванического покрытия. На основе измерительно-вычислительного комплекса разработана автоматизированная система управления процессом нанесения никелевых гальванических покрытий с использованием реверсивного тока.

Ключевые слова: Автоматизированная система управления, измерительно-вычислительный комплекс, гальваническое покрытие, управляющее воздействие, реверсивный ток.

ANNOTATION

Basyuk R.V. Automated control system of technological process of electroplating

Master's thesis in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2021.

The master's thesis is devoted to improving the quality of galvanic coating by developing an automated process control system using advanced equipment - baths powered by reverse current. To develop an automated control system that implements the optimization algorithm, the mathematical model of the galvanic technological process was improved and the optimal values of control effects were determined.

According to the research results, a schematic diagram and current reversing device have been developed, which allows to expand the time range of the existing rectifier units in the current reversal mode in galvanic baths. The method of finding the cutoff frequency of the galvanic coating process using reverse current is proposed and a measuring and computing complex is created for the practical implementation of the technique of finding the cutoff frequency of the galvanic coating process. On the basis of the measuring and computing complex the automated control system of process of drawing of nickel galvanic coverings with use of reversible current is developed.

Keywords: Automated control system, measuring and computing complex, galvanic coating, control effect, reversible current.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЗ - програмне забезпечення

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина.

АЦП – аналого-цифровий пристрій

ДП – допоміжне обладнання

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

КЕМ – контакт електромагнітний

КП – керуюча програма

КС – керуюча система

ЗМІСТ

ВСТУП 11

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ПРОВЕДЕННЯ, СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ГАЛЬВАНІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ 16

1.1 Аналіз електрохімічних процесів при нанесенні гальванічних покриттів 16

1.2 Показники якості гальванічних покриттів 19

1.3 Огляд методів поліпшення рівномірності гальванічних покриттів 20

1.4. Технологічне обладнання для нанесення електрохімічних покриттів і системи управління гальванічними процесами 23

1.5. Обґрунтування вибору реверсивного режиму для підвищення рівномірності гальванічних покриттів 29

Висновки до розділу 1 36

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ 37

2.1 Математичне моделювання процесу нанесення гальванічного покриття з реверсом струму 37

2.2. Проведення експериментальних досліджень і перевірка адекватності математичної моделі 41

Висновки до розділу 2 54

РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ 55

3.1 Математична постановка задачі оптимізації гальванічних процесів з реверсом струму 55

3.2 Теоретичне визначення граничної частоти гальванічного процесу із застосуванням реверсивного струму 60

Висновки до розділу 3 69

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ 70
4.1 Розробка вимірювально-обчислювального комплексу для визначення граничної частоти технологічного процесу нанесення гальванічного покриття 70
4.2. Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття 80
Висновки до розділу 4 83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 85

ВСТУП

Актуальність теми магістерської дипломної роботи. Метали є одними з найнеобхідніших матеріалів в промисловості, будівництві, сільському господарстві та інших видах господарської діяльності людини, а самим затребуваним матеріалом залишається сталь. Річний обсяг випуску сталі є одним з основних показників економічної ситуації в державі. Так, наприклад, за обсягом виробництва з гігантським відривом лідирує Китай, де в 2020 році було вироблено 978 млн. т сталі або 47% всього світового випуску. Далі йдуть Японія, США, Росія, Індія.

Більше 85% всіх металевих конструкцій, а також виготовлених зі сталі виробів, вузлів і агрегатів експлуатується поза приміщеннями. Внаслідок цього ці вироби схильні до атмосферної корозії [1-3], тобто руйнування (окислення) заліза в результаті хімічного або електрохімічного впливу зовнішнього середовища, так як сталь являє собою твердий розчин вуглецю в залізі. В результаті відбувається спад металу внаслідок загальної або суцільної корозії. Так, наприклад, для конструкційних сталей швидкість атмосферної корозії становить в середньому 200 мкм/рік, в результаті чого з промислового обороту щорічно виводиться 20-25 мільйонів тон металу [2]. Крім того, з цієї ж причини відбувається передчасний знос металоконструкцій, вартість виготовлення і монтажу яких значно перевищує вартість металу, використаного на їх виготовлення, складання і монтаж. Розгерметизації резервуарів, трубопроводів або реакторів внаслідок «виразкової» корозії призводять до екологічних аварій і катастроф, а також втрат технологічних рідин. Схильні до корозії і інші метали. Навіть у промислово розвинених країнах збитки від корозії становлять 5-10% від національного доходу. Проведення робіт із захисту від корозійного впливу дозволяє знизити несприятливі наслідки корозійного пошкодження. До таких належать і електролітичні процеси нанесення покриттів з металів, які схильні до корозії незначно порівняно з матеріалом, що захищається. Розділ

прикладної електрохімії, якій вивчає фізичні та електрохімічні процеси, що відбуваються при осадженні катіонів металів на будь-якому електроді (зазвичай катоді), а також набір технологічних заходів, режимних параметрів і обладнання, що застосовується при електрохімічному осадженні будь-яких металів на заданій підкладці називається гальванотехнікою.

Гальванічні металопокриття використовуються для додання виробам, які покриваються захисно-декоративних властивостей, відновлення форми зношених деталей, підвищення опору механічному зносу, здобуття антифрикційних властивостей, відбивної здатності, підвищення поверхневої твердості, зниження перехідного електроопору та інших.

Внаслідок перерахованих вище причин процес нанесення захисних і декоративних покриттів гальванічним способом є технологічною операцією для більшості машинобудівних виробництв. Так в Україні загальна кількість гальванічних виробництв становить понад 1200 з річним обсягом виробництва кожного від 10000 до 100000 $м^2$ і яке споживає значну кількість нікелю, цинку та міді.

В умовах складної економічної ситуації, в якій опинилася промисловість України, більшість підприємств не в змозі купувати нове обладнання. У зв'язку з цим істотно зросло значення підвищення продуктивності вже наявного гальванічного обладнання, а для підвищення конкурентоспроможності вироблених виробів, потрібно приділяти значну увагу їх якості. До основних якісних показників гальванічних покриттів відносяться: рівномірність розподілу товщини покриття по поверхні деталі, мікротвердість покриття, зносостійкість, міцність зчеплення покриття з металом основи та інші. Таким чином, потрібно застосовувати захисне покриття, що має високі показники за кількома критеріями якості, при цьому процес нанесення гальванічного покриття повинен бути продуктивним, і, як правило, з використанням вже наявного технологічного обладнання.

Однак резерви обладнання, що застосовується в даний час для нанесення гальванічних покриттів, практично вичерпані як по збільшенню

продуктивності, так і по поліпшенню якісних показників оброблюваних виробів. Тому позитивна динаміка в цій області можлива тільки з оптимізацією і автоматизацією існуючих процесів, модернізацією і вдосконаленням технології, а також використанням перспективного обладнання - ванн з багатьма анодами, джерел реверсивного, імпульсного і асиметричного змінного струму. У свою чергу, таке обладнання неможливо ефективно експлуатувати без розробки методів, алгоритмів і систем управління через надзвичайну складність зв'язку керуючих впливів з продуктивністю обладнання і якісними показниками гальванопокриття [5].

Крім того, номенклатура виробів вимагає перебудови (як правило, частої) технологічних режимів і пошуку оптимальних управлінь гальванічними процесами з урахуванням задоволення продукції багатьом критеріям, що неможливо евристичними методами внаслідок високої складності і трудомісткості такого пошуку [6-7].

Пошук оптимальних режимів шляхом проведення експериментів пов'язаний зі значними матеріальними витратами, що неприйнятно в умовах ринкової економіки.

При цьому, незважаючи на значну наукову і практичну роботу, що присвячена питанням автоматизації гальванічних процесів, існує значна кількість невирішених наукових та практичних завдань.

В теперішній час не вивчені питання оптимізації та управління гальванічними процесами, здійснюваними з використанням перспективного обладнання - ванн, що живляться реверсивним струмом [8].

Таким чином, оптимізація і управління процесом нанесення гальванічних покриттів, що підвищують продуктивність обладнання і поліпшують якісні показники гальванопокриття, є актуальним науковим і практичним завданням.

Мета магістерської дипломної роботи – розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом для підвищення якості гальванічного покриття.

Завдання магістерської дипломної роботи – удосконалення математичної моделі гальванічного технологічного процесу; знаходження оптимальних значень керуючих впливів; розробка автоматизованої системи керування, яка реалізує алгоритм оптимізації.

Об'єктом дослідження є математична модель технологічного процесу нанесення гальванічного покриття та структура автоматизованої система керування цим технологічним процесом.

Предметом дослідження є моделі, методи і алгоритми автоматизованого керування, що забезпечують отримання гальванічного покриття при заданому критерії нерівномірності його товщини.

***Наукова новизна роботи*:**

- вирішено завдання оптимізації процесу нанесення гальванічного нікелевого покриття відповідно до критерію нерівномірності, що відрізняється використанням реверсивного струму;

- процес нанесення гальванічних покриттів формалізований з точки зору синтезу автоматизованої системи управління процесом, що має частотні властивості;

- отримано аналітичні математичні моделі для визначення попередньої частоти зміни параметрів електрохімічної системи в процесі нанесення покриття, що враховують зміну смуги пропускання гальванічної системи від геометричного фактору технологічного об'єкта управління.

Практична цінність роботи:

- запропонована принципова схема і розроблено пристрій реверсування струму (мостовий інвертор), що дозволяє розширити часовий діапазон існуючих випрямних агрегатів в режимі реверсування струму;

- запропоновано методику знаходження граничної частоти процесу нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму;

- на базі розробленого мостового інвертора створений вимірювально-обчислювальний комплекс для практичної реалізації методики

знаходження граничної частоти процесу нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму;

- розроблена автоматизована система управління процесом нанесення нікелевих гальванічних покриттів з використанням реверсивного струму.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ ПРОВЕДЕННЯ, СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ГАЛЬВАНІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Гальванотехніка - це область прикладної електрохімії, що досліджує процеси електролітичного осадження металів на поверхню металевих і неметалевих виробів. Вона включає в себе гальваностегію - отримання на поверхні виробів міцно зчеплених з нею тонких металевих покриттів, і гальванопластику – отримання товстих, точних копій з різних предметів, які легко відокремлюються, так званих матриць. Гальваностегія застосовується ширше, ніж гальванопластика; її мета - надати готовим виробам або напівфабрикатам певних властивостей: підвищену корозійну стійкість (оцинковкою, кадмуванням, луженням, свинцюванням), зносостійкість поверхонь тертя (хромуванням, залізненням). Гальваностегія застосовується для захисно-декоративної обробки поверхні (досягається нікелюванням, хромуванням, покриттям дорогоцінними металами). Будемо розглядати тільки процеси гальваностегії, тому термін «гальванічний процес» буде мати на увазі стаціонарний гальваностегічний метод [1-4].

1.1 Аналіз електрохімічних процесів при нанесенні гальванічних покриттів

Гальванотехніка заснована на явищі електрокристалізації – осадженні на катоді позитивно заряджених іонів металів з водних розчинів їх сполучень при пропущенні через розчин постійного електричного струму, тобто при підключенні до полюсів джерела струму двох металевих пластинок, занурених в розчин лугу або кислоти, в гальванічному осередку спостерігається поява електричного струму. Цей процес отримав назву електролізу, а розчин – електроліту [8]. Переносником електричних зарядів в електролітах є позитивні і негативні іони, що виникають в результаті

дисоціації. Вони відносяться до провідників другого роду. Електроди виготовляються з матеріалів, які є провідниками електричного струму першого роду, тобто з речовин, які мають електронну провідність. Проходження струму через поверхню розділу електрод-електроліт як через кордон між двома тілами, що мають різні типи провідності, супроводжується протіканням електрохімічної реакції, пов'язаної на катоді з процесом відновлення, а на аноді - з процесом окислення речовин [6].

Таким чином, якщо використовувати в якості катода деталь, а в якості катіона - іон металу, то в процесі протікання електрохімічної реакції на поверхні деталі буде осідати шар відновлюваного металу. Отримане покриття надає деталі низку цінних властивостей. До таких властивостей відносяться: корозійна стійкість, твердість, зносостійкість, зовнішній вигляд та інші. У ряді випадків це дозволяє замінити дорогі матеріали значно дешевшими з гальванічними покриттями. В якості металів покриття використовують цинк, хром, мідь, нікель, благородні і рідкісні метали, кадмій, олово та інші, а також різні сплави.

У порівнянні з здавна застосовувалися методами нанесення покриттів (наприклад, зануренням в розплавлений метал) гальваностегіческій метод має ряд переваг, особливо в тих випадках, коли можна обмежитися незначною товщиною покриття. Хімічний спосіб, що дозволяє наносити покриття з металів або сплавів без застосування електричного струму, здійснюється за допомогою речовин, здатних відновлювати метали з розчинів солей. Покриття, одержувані хімічним способом, відрізняються рівномірністю шару, пористістю, але програють гальванічному способу як по продуктивності, так і за складністю технологічного процесу. Так, наприклад, робоча температура гальванічної ванни при хімічному нікелюванні повинна бути 85÷95 °С [8].

Кількісно гальванічні процеси регулюються за законами Фарадея з урахуванням побічних процесів, які зводяться, найчастіше, до виділення на поверхні виробів, які покриваються, водню; якісно – типом і складом

електроліту, режимом електролізу, тобто щільністю струму, а також температурою і інтенсивністю перемішування. [3]

З самого початку розвиток гальванотехніки було нерозривно пов'язаний з застосуванням постійного струму. Однак, низька щільність струму при такому способі ведення технологічного процесу веде до низької продуктивності технологічного процесу внаслідок так званого лімітного фактору катодного і анодного процесів. У першому випадку з підвищенням щільності струму різко падає вихід металу по струму, а так само погіршуються захисні властивості покриття. У другому випадку підвищення щільності струму викликає перехід розчинних анодів в пасивний стан і різке збіднення електроліту металовмісними компонентами. Отже, спроби здійснювати електроосадження металів при підвищених густинах струму ведуть до негативного результату, а саме, до утворення на катоді неякісного покриття. Однак, починаючи з 50-х років минулого століття, в гальванічних процесах почали застосовувати реверсивний (в деяких науково-технічних джерелах - джерелах реверсивний) струм. Застосування такого процесу було обумовлено успішними дослідженнями, спрямованими на вирішення проблеми інтенсифікації процесів електролітичного осадження металів і при цьому поліпшення якісних показників гальванічних покриттів [3].

Це пояснюється наступним. Виходячи з уявлень кристалофізики про явище кристалізації як процесі утворення центрів кристалізації (зародків або елементарних кристалів) і зростання вже створених кристалічних зародків, при електролітичному осадженні металу кристали, які утворилися, мають ту чи іншу ступінь дисперсності в залежності від співвідношення швидкостей утворення нових центрів кристалізації і їх зростання. Це означає, що при більш інтенсивному процесі утворення зародків (центрів кристалізації) покриття має дрібнокристалічну структуру і, навпаки, якщо переважає швидкість росту зародків, що утворилися, то утворюються великі кристали і покриття в цілому буде мати крупнокристалічну, а, отже, нерівномірну поверхню [1].

Такі фактори, як підвищення температури ванни, підвищення в електроліті концентрації солі металу, якій осаджується, перемішування електроліту, викликають зниження катодної поляризації, що призводить до утворення кристалів меншого ступеня дисперсності.

Однак найбільш простим засобом, якій запобігає зростанню кристалів є періодичне переривання технологічного процесу осадження металу з відновленням його через деякий час [7].

Ще більший позитивний вплив надає на структуру катодного осаду реверсування струму. Це викликано тим, що при реверсуванні струму за час анодної поляризації відбувається або розчинення активних ділянок кристалів металу, якій осаджується, або поверхня покриття зазнає змін, пов'язаних з її пасивуванням, в результаті чого створюються умови для виникнення нових центрів кристалізації в катодний період реверсування струму [8].

1.2 Показники якості гальванічних покриттів

Залежно від вимог, що пред'являються до експлуатаційних характеристик деталей, розрізняють три типи покриття:

- захисні, що застосовуються для захисту від корозії деталей в різних середовищах;

- захисно-декоративні, що застосовуються для декоративного оздоблення деталей з одночасним захистом від корозії;

- спеціальні, що застосовуються для додання поверхні деталей спеціальних властивостей (зносостійкості, твердості, електроізоляційних, магнітних властивостей і т. і.), відновлення зношених деталей і т. д. [2].

Вимоги до гальванічного покриття регламентуються наступними параметрами: спосіб отримання покриття, матеріал покриття, мінімальна товщина покриття, тип електроліту, функціональні або декоративні властивості покриття, додаткова обробка. При цьому мінімальна товщина покриття коливається від 10 мкм (для благородних металів) до 300 мкм (для

хрому).

Таким чином, гальванічне покриття має кількісну характеристику - мінімальну товщину покриття, а так само ряд якісних характеристик, в першу чергу це рівномірність гальванічного покриття і мікротвердість.

Гальванічні покриття повинні мати дрібнокристалічну структуру і рівномірну товщину на різних ділянках виробів, які покриваються, – виступах, поглибленнях, граничних переходах. Ця вимога має в гальваностегії особливо важливе значення при покритті виробів складної конфігурації. У цьому випадку використовують електроліти на основі комплексних речовин або електроліти на основі простих солей з добавками поверхнево-активних речовин [6]. Без добавок поверхнево-активних речовин, які, як правило, є екологічно небезпечними (наприклад, фенол), на поверхні виробів, які покриваються, виділяються ізольовані великі кристали, що є виробничим браком [7]. З огляду на те, що в переважній більшості випадків деталі, на які наноситься гальванічне покриття, мають складну об'ємну конфігурацію, це створює основні труднощі в отриманні рівномірних гальванічних покриттів.

1.3 Огляд методів поліпшення рівномірності гальванічних покриттів

Неоднорідність електричного поля в гальванічній ванні призводить до того, що в різних точках поверхні товщина осадженого покриття буде різною. Це призводить до нерівномірності покриття, що, в свою чергу, веде до додаткового витраті електроенергії та металу покриття, а при товщині покриття, на деяких ділянках менше заданої, виріб буде забраковано.

Для оцінки рівномірності гальванічного покриття використовується критерій нерівномірності, що визначається за наступною формулою [3]:

$$R = S_к^{-1} \int_{S_к} \left(\left(\delta(x,y,z) - \delta_{min} \right) / \delta_{min} \right) dS_к , \qquad (1.1)$$

де δ_{min} – мінімальна товщина покриття;

$\delta_{min} > \delta_{зад}$, $\delta_{зад}$ – задана товщина покриття;

$\delta(x, y, z)$ - товщина покриття в точці з координатами (x, y, z),

при цьому $\delta(x, y, z) > 0$,

$S_к$ - площа поверхні катода.

Для підвищення рівномірності гальванічних покриттів застосовуються наступні методи:

1) електрохімічні (зміна щільності струму, застосування нетрадиційних джерел струму);

2) геометричні (використання фігурного анода, біполярного електрода, струмопровідного перфорованого екрану, багатоанодних систем).

Прикладами нетрадиційних джерел струму є реверсивний струм, асиметричний змінний струм і імпульсний струм. Для багатоанодних систем використовуються: різні потенціали на анодних секціях; почергове включення (виключення) анодних секцій; зміна розташування анодних секцій.

Геометричні способи є складними в технологічному плані і пов'язані з вибором конфігурації і переміщенням анодних секцій.

Застосування імпульсних режимів підвищує якість покриття, однак, як показує результати роботи [3], для таких процесів, як міднення, хромування, нікелювання, цинкування, сріблення, золочення та інших, застосування реверсивних струмів дає ще кращі результати.

Реверсування струму полягає в періодичній зміні полярності електродів, коли деталь, яка покривається, на деякій час стає анодом. Графік зміни реверсивного струму показаний на рис. 1.1, де Ік – сила струму прямого напрямку (струм катодної поляризації), Іа – сила струму зворотного напрямку (струм анодної поляризації), $t_к$ - час осадження металу (катодний період), t_a - час анодної поляризації (анодний період).

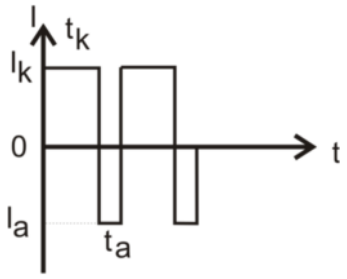


Рис. 1.1. Графік зміни реверсивного струму

Як зазначалося раніше, реверсивний струм має сильний вплив на структуру гальванічних покриттів і їх фізичні властивості. Реверсування струму вже при порівняно малій частоті зміни полярності електрода помітно підвищує ступінь дисперсності осаду [14]. Дисперсність осаду, отриманого реверсивним струмом, в значній мірі залежить від відносної тривалості катодного і анодного періодів поляризації електрода, тобто від відношення $t_к/t_a$ при постійному значенні суми $t_к+t_a$. Кожному періоду часу, що визначається цією сумою, відповідає своє значення t_a для утворення покриття з найбільш досконалою структурою. Це значення є таким, при якому забезпечується досить висока анодна поляризація електрода. В цьому випадку катодний процес осадження металу протікає в умовах, що сприяють утворенню нових центрів кристалізації. Особливо це відноситься до процесів осадження металів з розчинів простих солей. Покриття, отримані при періодичній зміні напрямку струму, електрокристалізуються в багатьох випадках світлими і навіть блискучими. У роботі [16] при виборі оптимального режиму електроосадження металу на реверсивному струмі керуються кривими "потенціал електрода - час" при заданій щільності струму, а в роботі [18] виходячи з часу досягнення потенціалу електрода стаціонарного значення вказується, що $t_к$ повинно бути більше t_a в 5÷10 разів.

При осадженні металів реверсивним струмом вплив дефектів на поверхні оброблюваного виробу (подряпини, пори, бульбашки і т.д.) усувається періодичною анодною поляризацією шарів покриття [18].

Випадання з електроліту на катодну поверхню зважених частинок

викликає появу пір в покритті і утворення нерівностей на поверхні осаду. При осадженні металу з використанням реверсивного струму такі частинки видаляються з поверхні покриття в період анодної поляризації, особливо, якщо в анодний період відбувається розчинення покриття. Якщо пори в покритті виникають внаслідок структурної недосконалості осаду, якій кристалізується (утворення дендритів, губки, порошку і т.д.), то при періодичній зміні напрямку струму вони усуваються за рахунок утворення покриття, більш досконалого за структурою [19].

При осадженні металів реверсивним струмом поверхня електрода в анодні періоди пасивується, тому електрокристалізація шарів в катодні періоди протікає на заздалегідь пасивованої поверхні електрода [20]. За даними [24], це призводить також до помітного підвищення захисних властивостей електролітичних покриттів.

Результати низки досліджень [25] свідчать про те, що зміна напрямку струму при осадженні металів не робить негативного впливу на міцність зчеплення покриття з основою. Навпаки, при нікелюванні міцність зчеплення покриття з залізом зростає [26].

1.4. Технологічне обладнання для нанесення електрохімічних покриттів і системи управління гальванічними процесами

Технологічне обладнання для нанесення електрохімічних покриттів відрізняється великим різноманіттям, що викликано дуже широким діапазоном технічних вимог, які не можуть бути забезпечені апаратурою якогось одного типу [27].

Крім того, це технологічне обладнання можна розділити на типове (випускається серійно), і спеціальне, що випускається під індивідуальне замовлення і застосовується при особливих умовах виробництва.

Типове обладнання в більшості випадків являє собою автооператорні

механізовані і автоматизовані гальванічні лінії.

Гальванічна лінія представляє з себе набір ванн, в яких здійснюється один з наступних процесів: підготовчий (знежирення, травлення, активування, полірування, промивка); власне нанесення покриття; заключний (нейтралізація, пасивування, освітлення, хромування, промивка).

Переміщення оброблюваних деталей від однієї ванни до іншої здійснюється автооператором (маніпулятором) або транспортним роботом.

Розрізняють одно - і багатопроцесні гальванічні лінії. Однопроцесна лінія характеризується набором ванн, необхідних для проведення одного процесу - наприклад, цинкування. Багатопроцесорна лінія включає в себе електрохімічні ванни для проведення декількох процесів (наприклад, цинкування, кадмування, міднення) і набір підготовчих і заключних ванн, загальних для всіх процесів. Однопроцесна лінія, як правило, експлуатується з використання однієї «жорсткої» програми управління автооператорами - циклограми. При цьому час перебування деталей в кожній ванні, в тому числі і електрохімічної, є фіксованим [27].

У всьому технологічному ланцюжку основною є гальванічна ванна для нанесення покриття, робота якої і визначає результати функціонування всієї лінії. Це твердження засноване на наступних фактах:

- тривалість процесу нанесення покриття (0.5 - 4 години) на порядок більше тривалості підготовчо-заключних операцій, при цьому продуктивність гальванічної ванни визначає продуктивність всієї лінії;

- режими функціонування гальванічної ванни мають вирішальний вплив на якість покриття, що наноситься;

- гальванічна ванна характеризується складністю процесів, які протікають в ній (електрохімічні, хімічні, масо - і теплообмінні, гідродинамічні і механічні);

- складність і різноманітність апаратурного оформлення гальванічних ванн;

- гальванічна ванна є основним споживачем електроенергії і тим самим

визначає економічність роботи лінії в цілому [29].

У гальванічній ванні розміщують один або кілька анодів [39], що прикріплюються до ізольованих від корпусу ванни анодних штанг, які, в свою чергу, з'єднані з позитивним полюсом джерела постійного струму (випрямного агрегату). Негативний полюс випрямного агрегату підключений до опори штанг з деталями.

Живлення ванн для нанесення електрохімічних покриттів здійснюється від випрямних агрегатів (ВА). З сучасних ВА найбільш широке застосування отримали агрегати виробництва «Flex Kraft» (Kraftelektronik AB, Швеція) і «Пульсар» (Росія). ВА "Flex Kraft" має модульну структуру. На виході одного модуля ВА "Flex Kraft" при вхідній напрузі 380 В змінного струму номінальна напруга становить 0 – 12 В, номінальний постійний струм – до 300 А. Для управління ВА "Flex Kraft" можна використовувати власний блок управління на базі 16-бітного мікроконтролера, також можливе управління по інтерфейсам RS - 232 і RS-485. ВА дозволяє програмувати імпульсні і реверсивні режими нанесення покриття з періодом від 1 с.

ВА «Пульсар Про» призначений для живлення гальванічних ванн постійним струмом силою від 1 до 50 А з вихідною напругою від 0,2 до 24 В. Крок зміни струму становить 1 А, а напруги – 0,1 В. При цьому можливе використання імпульсного і реверсивного режиму з кроком по тривалості якій дорівнює 1 с. Управління ВА «Пульсар Про» проводиться за допомогою програмування з використанням пульта управління, або з використанням виносного пульта управління по інтерфейсу RS - 485 по екранованій крученій парі з довжиною лінії до 1000 м.

Використання тільки технологічних прийомів поліпшення рівномірності осаджуваних гальванічних покриттів не завжди дає задовільні результати. Тому постійно проводиться розробка і впровадження систем автоматизованого управління гальванічними процесами. Як правило, робота даних систем заснована на регулюванні в режимі реального часу таких технологічних параметрів процесу як напруги на електродах, концентрації

компонентів електроліту, щільності струму, режимів подачі струму, температури електроліту і т. д. Також в теперішній час розробляються системи оптимального управління, засновані на попередньому розрахунку оптимальних значень технологічних параметрів гальванічного процесу.

У ряді робіт по оптимальному управлінню гальванічним процесом оптимізація критерію нерівномірності здійснюється шляхом розбиття анода на декілька плоских секцій, на які подається певна напруга і здійснюється управління гальванічним процесом. В основному, в даних роботах використовується нерухомий багатосекційний анод. У роботі [40] поліпшення рівномірності гальванічних покриттів досягається за рахунок локального регулювання товщини покриття на окремих ділянках катода. Анод складається з окремих секцій, що регулюють товщину покриття на протилежних ділянках катода. Вимірювання товщини осадженого покриття на ділянці катода відбувається в режимі реального часу за допомогою поляризованого лазерного променю, що висвітлює точку вимірювання. Після досягнення заданої товщини покриття на ділянці катода відбувається відключення протилежної анодної секції. У роботі [41] запропоновано спосіб досягнення рівномірності, заснований на програмному управлінні включенням і виключенням секцій анода. Порядок включення і виключення секцій розраховується за допомогою математичної моделі.

У роботі [42] запропоновано спосіб досягнення оптимальної рівномірності покриття за рахунок регулювання рівня електроліту в залежності від виміряної висоти катода. Під час регулювання рівня електроліту також відбувається включення або виключення анодних секцій. За рахунок зазначених дій відбувається зміна геометрії електролізера і підвищується рівномірність осаджених покриттів.

Основним недоліком запропонованих технічних рішень є припущення про вплив певної секції анода тільки на протилежну ділянку катода. Товщина покриття в кожній точці катода безпосередньо залежить від розподілу електричного струму на профілі катода [43], яке, в свою чергу, залежить від

безлічі різних факторів, в тому числі від розподілу всіх електродів в гальванічній ванні і напруги на них. Всі ці фактори діють взаємопов'язано, тому кожна з секцій в тій чи іншій мірі впливає на осаджене покриття у всіх точках катода, що підтверджується експериментальними дослідженнями [44]. У роботі [6] недоліком є судження про товщину покриття на ділянці катода по товщині тільки в одній його точці, не враховуючи, що біля краю катода товщина покриття буде помітно змінюватись внаслідок крайового ефекту.

У ряді робіт, заснованих на використанні багатосекційного анода, пропонується проектування конфігурації багатосекційного анода щодо деталі, яка покривається. У роботі [45] перед зануренням деталі у ванну для електролітичної обробки здійснюється визначення профілю деталі за допомогою ультразвукових датчиків і лінійок безконтактних сенсорів. Отримана інформація про відстані від анодних секцій до протилежних ділянок деталі надходить в блок визначення оптимальної конфігурації анода. Пошук оптимальної конфігурації анодних секцій здійснюється відповідно до критерію рівномірності розподілу щільності струму на катоді і, відповідно, товщині покриття, при цьому щільність струму розраховується по лінійної залежності від напруги у ванні обернено пропорційній міжелектродній відстані. У роботі [46] дане технічне рішення удосконалено і визначення профілю деталі, яка покривається, здійснюється на етапі, якій здійснюється перед проведенням електролітичної обробки, що підвищує продуктивність гальванічної лінії.

Ідея пошуку оптимальної конфігурації анодних секцій безпосередньо в процесі нанесення покриття запропонована в роботі [47], де критерієм пошуку є рівномірність щільності струму поблизу поверхні катода. Визначення значень щільності струму здійснюється в результаті безпосереднього сканування катода когерентним лазерним променем і аналізу отриманої інтерференційної картини. Таким чином, розглядається система управління, функціонуюча в режимі реального часу.

Загальним недоліком методів управління гальванічними процесами з

використанням багатосекційного анода є технічна складність реалізації багатоанодних систем.

Серед праць, присвячених оптимальному управлінню параметрами процесу електроосадження металів з метою досягнення їх найвищої якості, слід виділити роботу [44], у якій розроблені математичні моделі, за допомогою яких можна описати більшість гальванічних процесів, а також запропонована інтегрована система автоматизованого проектування та управління гальванічними процесами. Методика пошуку значень напруги на електродах для стаціонарних процесів, оптимальних з точки зору рівномірності одержуваного покриття, викладена в роботах [42]. Інші рішення передбачають проектування оптимальної конфігурації електролізера, що включає в себе геометричне розташування плоских анодів в гальванічній ванні [47]. Нестаціонарність процесу електроосадження металів, пов'язана зі зміною в часі товщини покриття, розглядається в роботах [46], присвячених реверсу струму -періодичної зміни полярності джерела живлення.

Математичні моделі, використовувані в даних роботах, включають як рівняння, що описують розподіл електромагнітного поля в електролізері, так і залежності, що характеризують розподіл електромагнітного поля на межах з електродами і ізолятором, а, отже, такі математичні моделі можна використовувати для об'єктів довільної форми. Слід також зазначити, що пошук оптимального геометричного розташування анодних секцій в гальванічній ванні пов'язаний з технічною складністю реалізації такої системи.

Виходячи з аналізу вищенаведених робіт з управління гальванічними процесами, можна зробити наступні висновки:

- значна частина робіт з управління гальванічними процесами заснована на регулюванні технологічних параметрів процесу за схемою із зворотнім зв'язком, при цьому використання таких систем далеко не завжди дає оптимальну якість покриття;

- багато робіт засновані на оптимальному проектуванні конфігурації багатосекційного анода, при цьому практична реалізація таких конструкцій пов'язана з високою технічною складністю;

- у роботах, присвячених використанню реверсу струму для поліпшення рівності покриттів, обмеження на керуючі впливи не визначались для використовуваних електрохімічних систем, а були взяті виходячи з експериментальних досліджень інших авторів;

- в теперішній час відсутнє обладнання та методика визначення обмежень на керуючі впливи для гальванічних процесів з реверсом струму.

У зв'язку з цим, питання оптимізації та управління гальванічним процесами з реверсом струму в даний час не отримали необхідної теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки і потребують проведення подальших досліджень.

1.5. Обґрунтування вибору реверсивного режиму для підвищення рівномірності гальванічних покриттів

Найбільш успішно електроосадження з використанням реверсивних струмів застосовується для таких металів як мідь, нікель, цинк, залізо, а також благородних металів груп золота, платини, срібла та їх сплавів. Тому проблеми управління гальванічним процесом із застосуванням реверсивного струму будуть розглянуті на прикладі процесу нікелювання, як типового гальванічного процесу із застосуванням реверсивного струму [40].

Нікелем покривають вироби зі сталі і кольорових металів (мідь та її сплави) для захисту від корозії, декоративного оздоблення поверхні, підвищення опору механічному зносу і для спеціальних цілей [19]. Таке покриття широко застосовують для зовнішніх частин транспортних засобів, різних апаратів, приладів, хірургічних інструментів, предметів домашнього

вжитку і т. д. Нікелеві покриття мають високу антикорозійну стійкість в атмосфері, в розчинах лугів і в деяких органічних кислотах, що, в значній мірі обумовлено сильно вираженою здатністю нікелю до пасивування в цих середовищах.

Нікель є більш благородним металом, ніж залізо, тому захист від корозії нікелевим покриттям можливий тільки при відсутності в ньому пір. Отримати таке покриття при малій товщині шару достатньо важко внаслідок кристалічної неоднорідності поверхні основного металу і наявності в ній різних дефектів механічної обробки:, пори, подряпини, які не завжди вдається закрити навіть при нікелюванні з добавками. Тому в таких випадках покриття наносять в два-три шари, або спочатку виріб покривають товстим шаром міді, а на нього наносять шар нікелю меншої товщини.

Для нікелювання застосовують сірчанокислі, хлористі, сульфамідові електроліти. На практиці найбільшого поширення набули сірчанокислі електроліти. Процес електроосадження нікелю на катоді при кімнатній температурі супроводжується високою катодної поляризацією. Однак, незважаючи на це, розсіювальна здатність нікелевих електролітів є незначною. Це пояснюється тим, що при тих густинах струму, при яких зазвичай проводять нікелювання (більше 50 А/м^2), катодні потенціали мало змінюються при підвищенні щільності струму. Крім того, при підвищенні щільності струму до деякої допустимої межі вихід металу по струму зростає, що також несприятливо впливає на розсіювальну здатність електроліту.

Опади нікелю, отримані при високій температурі, відрізняються за структурою від тих, які утворюються в тому ж електроліті при кімнатній температурі, вони стають грубозернистими.

Дрібнозернисті тверді блискучі опади нікелю на катоді можна отримувати з розчинів простих солей нікелю без поверхнево-активних і будь-яких інших речовин. Такий характер опадів при нікелюванні можна пояснити утворенням колоїдних розчинів основних солей нікелю в катодному просторі [45] або утворенням плівки на катоді [46].

Катодний вихід нікелю по струму у значній мірі залежить від концентрації водневих іонів в розчині. Чим нижче pH розчину, тим менше вихід металу по струму, особливо при низькій температурі. При нікелюванні в холодному (18 – 25 °С) розчині значення pH підтримують в діапазоні від 4,5 до 5,5, вихід по струму при цьому становить 90 - 96% в робочому інтервалі щільності струму. Зі збільшенням температури до 60 – 80 °С катодна поляризація помітно знижується, що дозволяє електроліз при низьких значеннях pH (1 – 2) і високих густинах струму з досить великим виходом по струму (80 – 90%). В цьому випадку опади є менш пористими, більш пластичними і корозійностійкими, ніж отримані з багатокомпонентного електроліту з підвищеним значенням pH при кімнатній температурі.

Перевищення допустимої межі pH, яка залежить від температури і щільності струму, може викликати утворення гідроокису поблизу катода, що погіршує якість осаду. Тому кислотність нікелевих електролітів встановлюється в залежності від обраного режиму електролізу і підтримується при цьому режимі по можливості постійною. Для цієї мети в сірчанокислий нікелевий електроліт, що працює при температурі 40 – 50 °С, додають слабодисоційовані кислоти або розчини солей, що надають йому буферні властивості. Найбільш широко використовується в якості буферної добавки до сірчанокислих нікелевих електролітів борна кислота.

Для усунення пасивування нікелевих анодів до електроліту додають хлористі солі нікелю, натрію або калію, в присутності яких анодна поляризація значно знижується і швидкість анодного розчинення нікелю зростає. Активуюча дія хлористих солей на розчинення нікелевих анодів пояснюється специфічною адсорбцією хлор-іонів, в результаті чого з поверхні нікелю видаляються кисень, гідроксильні іони та інші пасивні чужорідні частинки.

Основними якісними показниками гальванічних покриттів є: рівномірність розподілу товщини покриття по поверхні деталі,

мікротвердість покриття, зносостійкість, міцність зчеплення покриття з металом основи та ін.

Мікротвердість нікелевих покриттів залежить від складу електроліту і може коливатися від 200-300 кг/мм^2 до 700-800 кг/мм^2 за рахунок введення добавки фосфору до складу покриття. При осадженні нікель-фосфорного покриття хімічним шляхом його мікротвердість також є високою. Після термообробки нікелевих покриттів, що містять фосфор, мікротвердість їх зростає до 900-1000 кг/мм^2 і вище, наближаючись до твердості блискучого хромового покриття[20].

Нікель, як і сталь, має магнітні властивості. Нікелеві покриття внаслідок їх насичення воднем в процесі осадження мають знижену пластичність, але після відпалу при 900 °С пластичні властивості значно поліпшуються.

Використання реверсивного струму для поліпшення якості одержуваних нікелевих гальванічних покриттів з електроліту Уоттса досліджувалося в роботах[43-45].

У роботі [41] досліджувався вплив реверсивного імпульсного струму на структуру і морфологію поверхні осадів нікелю в електроліті Уоттса без органічних добавок. Електроліт містив 300 г/л $NiSO_4$, 35 г/л $NiCl_2 \approx 6H_2O$, 40 г/л H_3BO_3 (pH 4,4, температура 50 °С). Нікель осаджували на обертовому дисковому електроді при швидкості обертання 1200 об/хв. щільність струму була постійною і складала 11,4 А/дм^2. Частоту імпульсів змінювали в широкому діапазоні від 10^{-2} до 10^3 Гц, а шпаруватість варіювали від 70 до 100%. В результаті дослідження встановлено, що для осадження твердих гладких покриттів слід вибирати такі значення періоду включення прямого і зворотного струму, при яких частота імпульсів складає від 10^{-2} до 10^{-1} Гц, а шпаруватість – від 80 до 95%, тобто загальна тривалість включення прямого і зворотного струму буде від 10 до 100 секунд, при цьому тривалість прямого струму буде складати від 80 до 95% від загальної.

У роботі [44] вивчався вплив реверсивного струму на зовнішній вигляд

отриманих нікелевих гальванічних покриттів. У дослідженні застосовувався електроліт Уоттса. Показано, що застосування режиму осадження з використанням реверсивного струму з тривалістю прямого струму не більше 2 секунд, тривалістю зворотного – від 4 до 50% від тривалості прямого, дозволяє отримувати гладкі, світлі, блискучі нікелеві гальванічні покриття.

У роботі [45] узагальнено результати проведених раніше досліджень. Зроблено висновок про те, що використання реверсивного струму при нанесенні нікелевих гальванічних покриттів з сірчанокислих електролітів сприяє отриманню покриттів з малими внутрішніми напруженнями, гладких, світлих і менш пористих, ніж при використанні тільки прямого струму.

Згідно з проведеними дослідженнями, застосування реверсивного струму дозволяє отримувати гладкі, світлі (іноді блискучі) покриття з меншими внутрішніми напругами.

Однак в даних роботах не досліджувався такий важливий якісний показник якості покриття, як рівномірність. Використання реверсивного струму дозволяє підвищити рівномірність гальванічного покриття за рахунок періодичної деполяризації катода в анодний період, а також за рахунок періодичної анодної обробки осаджених шарів металу. Швидкість осадження металу за час катодного періоду на ділянках деталі, розташованих ближче до анода, буде більше і на них товщина покриття буде більшою. Однак, за анодний період більше розчинення покриття буде також на найближчих до анода ділянках, так як всі виступи розчиняються в першу чергу, а також у зв'язку з тим, що крива анодної поляризації зазвичай більш крута, ніж крива катодної поляризації [26]. Таким чином, періодичне включення реверсивного струму вирівнює нерівномірне осадження покриття за час включення струму прямого напрямку.

Отже, використовуючи реверсивний струм для поліпшення рівномірності покриття, можна отримати поліпшення інших якісних характеристик. Тому для підвищення рівномірності нікелевих гальванічних покриттів обраний метод з використанням реверсивного струму.

З наведених вище робіт можна зробити висновок про те, що немає єдиної думки, якими повинні бути тривалості включення прямого і реверсивного струму при осадженні нікелевих гальванічних покриттів. Крім того, традиційний підхід до визначення обмежень на тривалості включення прямого і реверсивного струму полягає в проведенні серії експериментів з нанесення покриття з певним кроком зміни тривалості. Тривалості, при яких покриття стає пухким, або покриття не наноситься, приймаються як граничні. Такий підхід вимагає значних часових і матеріальних витрат. Також можна зробити висновок про те, що для нанесення нікелевих гальванічних покриттів з використанням реверсивного струму необхідно обладнання, здатне видавати імпульси прямого і реверсивного струмів тривалістю від одиниць мілісекунд. Крім того, таке обладнання повинно бути швидкодіючим для того, щоб час перемикання з прямого на реверсивний струм не чинило впливу на сам гальванічний процес.

Широко використовувані випрямні агрегати не відповідають пред'явленим вимогам. Наприклад, один з найбільш поширених в промисловості випрямний агрегат "Flex Kraft" дозволяє встановити тривалість прямого і зворотного імпульсу від 1 с і більше. Випрямний агрегат «Пульсар Про» здатний видавати імпульси прямого і реверсивного струму тривалістю також від 1 секунди. Випрямні агрегати серії «ТЕР», «ТВР» дозволяють встановити час включення струму прямої полярності від 2 с, а струму зворотної полярності - від 0,2 с. Випрямлячі серії «В-ТПЕ», «В-ТПВ» на базі мікропроцесорних контролерів здатні видавати імпульси струму прямої і зворотної полярності тривалістю від 0,1 секунди. Випрямний агрегат "QUASAR 500" фірми CRSPower дозволяє встановити тривалість прямого і зворотного струму від 1 до 200 мілісекунд, тобто відсутній діапазон від 200 міллісекунд до 1 секунди.

Отже, в даний час обладнання з необхідними характеристиками серійно не випускається, а індивідуальне замовлення для підприємств з невеликими обсягами виробництва або для дослідницьких цілей бюджетних

установ є надмірно витратним. Необхідно розробити автоматизовану систему управління гальванічним процесом, що дозволяє задавати значення прямого і реверсивного струмів тривалістю від 1 мілісекунди.

Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано електрохімічні процеси осадження металевих покриттів. Зроблено висновок, що нанесення покриттів електрохімічним методом дає кращу якість, ніж використання хімічних, дифузійних та інших методів.

2. Розглянуто існуючі методи підвищення рівномірності гальванічних покриттів. На підставі даного аналізу обраний метод підвищення рівномірності гальванічних покриттів з використанням реверсивного струму.

3. Проаналізовано основні роботи, присвячені дослідженню процесу нанесення нікелевих покриттів з використанням реверсивного струму. Виявлено, що для даного режиму не досліджена залежність рівномірності нанесеного покриття від параметрів реверсивного струму. Доцільним є створення математичної моделі залежності нерівномірності гальванічного покриття від параметрів реверсивного струму.

4. Проаналізовано характеристики широко використовуваних в промисловості випрямних агрегатів. Зроблено висновок, що для процесу нікелювання з використанням реверсу струму необхідне створення автоматизованої системи управління.

5. Пошук обмежень на керуючі впливи з використанням серії експериментальних досліджень вимагає суттєвих матеріальних і часових витрат. У зв'язку з цим, зроблено висновок про те, що потрібно розробити методику знаходження обмежень на керуючі впливи без проведення великої кількості експериментальних досліджень.

6. Поставлено завдання розробки автоматизованої системи управління гальванічним процесом з реверсом струму. Дана задача включає в себе завдання розробки методики визначення обмежень для керуючих впливів і пошуку оптимальних значень вектору керуючих впливів для деталі заданої форми з точки зору рівномірності товщини гальванічного покриття.

РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ

2.1 Математичне моделювання процесу нанесення гальванічного покриття з реверсом струму

Для знаходження залежності критерію нерівномірності (1.1) від параметрів реверсивного струму застосуємо аналітичну модель стаціонарного гальванічного процесу, що протікає при реверсивному струмі в одноанодній ванні, яку будемо розглядати як об'єкт з розподіленими параметрами.

Для побудови рівнянь математичної моделі для зазначеного процесу приймемо такі основні припущення [26].

1. В об'ємі електроліту відсутній градієнт концентрації і температури по лінійних координатах. Електропровідність конкретного електроліту χ не залежить від координат (x,y,z). Допущення засноване на тому факті, що в промислових гальванічних ваннах гідродинамічний режим близький до повного перемішування через барботаж електроліту стисненим повітрям і воднем, якій виділяється на катоді [25].

2. У діапазонах допустимих змін концентрації компонентів і температур електроліту електропровідність χ, щільність ρ і магнітна проникність μ_n конкретного електроліту не залежить від концентрації і температури. Підставою для даного допущення є обумовлені технологічними причинами малі величини діапазонів допустимих змін концентрації і температури електроліту [6].

3. Для стаціонарного електричного поля вплив магнітної складовой на рух іонів в електроліті не враховується [7].

4. Традиційне допущення про нульовий потенціал катода і

позитивний (щодо катода) потенціал анода [1].

Відповідно до формули (1.1), для обчислення значення критерію нерівномірності необхідно знайти розподіл товщини нанесеного покриття по поверхні деталі. Для цього скористаємося законом Фарадея. Приріст товщини покриття в точці катода з координатами (x, y, z) за час $\tau_п$ j-го включення прямого струму розраховується за формулою [6]:

$$\delta_j^+(x,y,z) = \frac{E}{\rho}\eta_к i_к(x,y,z)\tau_п, \tag{2.1}$$

де E – електрохімічний еквівалент речовини; $\eta_к$ - катодний вихід по струму; ρ – об'ємна щільність металу покриття; $i_к(x, y, z)$ – катодна щільність струму в точці катода з координатами (x, y,z).

Аналогічно, визначимо формулу для розрахунку зменшення товщини покриття в точці на катоді з координатами (x, y, z) За час $\tau_{об}$ включення реверсивного струму [7]:

$$\delta_j^-(x,y,z) = -\frac{E}{\rho}\eta_a i_a(x,y,z)\tau_{об}, \tag{2.2}$$

де η_a - анодний вихід по струму; $i_a(x, y, z)$ – анодна щільність струму в точці катода з координатами (x, y, z).

Для знаходження розподілу по поверхні деталі катодної і анодної щільності струму $i_к(x, y, z)$, $i_a(x, y, z)$ використовується закон Ома в диференціальній формі [8]:

$$i_к(x,y,z) = -\chi \operatorname{grad}\varphi_п(x,y,z)\big|_{S_к}, \tag{2.3}$$

$$i_a(x,y,z) = -\chi \operatorname{grad}\varphi_{об}(x,y,z)\big|_{S_k}, \tag{2.4}$$

де χ – питома провідність електроліту; $\varphi_п(x, y, z)$ – потенціал електричного поля в точці деталі з координатами (x, y, z) у період включення прямого струму; $\varphi_{об}(x, y, z)$ - потенціал електричного поля в точці деталі з координатами (x, y, z) в період включення реверсивного струму.

Для знаходження $\varphi_п(x, y, z)$ скористуємось наступними виразами [8]:

$$\frac{\partial^2 \varphi_п}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_п}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_п}{\partial z^2} = 0. \quad (2.5)$$

Аналогічно можна знайти $\varphi_{об}(x,y,z)$:

$$\frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{об}}{\partial z^2} = 0. \quad (2.6)$$

У гальванічній ванні під час періоду включення прямого струму область розповсюдження електричного поля, що наводиться в електроліті при проходженні струму, має наступні межі і крайові умови на них [6]:

- повітря, футеровані струмонепровідні стінки і дно гальванічної ванни струм не проводять, тому що є ізоляторами, на цих межах нормальна похідна потенціалу буде дорівнює нулю:

$$\frac{\partial \varphi_п}{\partial n}\Big|_{S_и} = 0, \quad (2.7)$$

де $S_и$ - площа поверхні ізолятора; n - нормаль до поверхні ізолятора.

- межа електроліт-анод:

$$\varphi_п + F_1(i_a)\Big|_{S_a} = U_п, \quad (2.8)$$

де $F_1(i_a)$ – функція анодної поляризації; S_a – площа поверхні анода; $U_п$ - напруга між анодом і катодом під час включення прямого струму.

- межа електроліт-катод:

$$\varphi_п - F_2(i_к)\Big|_{S_к} = 0, \quad (2.9)$$

де $F_2(i_к)$ – функція катодної поляризації; $S_к$ – площа поверхні катода

Запишемо аналогічні крайові умови для періоду включення реверсивного струму [52]:

- футеровані струмонепровідні стінки ванни і межі електроліт-повітря:

$$\frac{\partial \varphi_{об}}{\partial n}\Big|_{S_и} = 0; \quad (2.10)$$

- межа електроліт - анод:

$$\varphi_{об} + F_1(i_a)\big|_{S_к} = U_{об}\,, \tag{2.11}$$

де $U_{об}$ – напруга між анодом і катодом під час включення реверсивного струму;

- межа електроліт - катод:

$$\varphi_{об} - F_2(i_к)\big|_{S_а} = 0\,. \tag{2.12}$$

Функції F_1 та F_2 у загальному випадку є нелінійними і визначаються обробкою експериментальних даних. Для багатьох електролітів вже побудовані графіки функцій F_1 та F_2 і вони наведені в науково-технічній літературі [7].

Зміна товщини покриття за час повного j-го періоду реверсивного струму дорівнює:

$$\delta_j(x,y,z) = \delta_j^+(x,y,z) + \delta_j^-(x,y,z)\,. \tag{2.13}$$

Таким чином, математична модель процесу електрохімічного нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму систему рівнянь (2.1) – (2.13), що описують осадження покриття за час включення прямого струму і його розчинення за час включення реверсивного струму. Для розв'язання використовуються чисельні методи розв'язання рівнянь еліптичного типу. Універсальним методом наближеного рішення диференціальних рівнянь є метод скінченних різниць (метод сіток) [5,9]. Сутність методу кінцевих різниць полягає в наступному. Проводиться заміна безперервного аргументу на дискретний. При цьому область визначення дискретного аргументу буде безліччю точок, званим сіткою. Аналогічно, функції безперервного аргументу замінюються на функції дискретного аргументу з областю визначення в вузлах сітки. Для заміни похідних в диференціальних рівняннях використовуються різницеві відносини, що записуються відповідно до визначення похідної. Для чисельного розв'язку рівняння Лапласа з крайовими умовами застосуємо метод розщеплення [13]. На мови програмування Delphi 2007 була розроблена програма розв'язання

системи рівнянь математичної моделі. Головним блоком програми є процедура розв'язання диференціального рівняння Лапласа.

Для перевірки адекватності математичної моделі і правильності методики її рішення необхідно провести експериментальні дослідження і порівняти їх результати з розрахованими за допомогою математичної моделі при тих же параметрах системи.

2.2. Проведення експериментальних досліджень і перевірка адекватності математичної моделі

При проведенні експериментальних досліджень вивчався вплив часу повного періоду осадження покриття і його катодної складової на рівномірність розподілу нікелевих гальванічних покриттів.

Виходячи з результатів роботи [19], для отримання твердих нікелевих гальванічних покриттів з електроліту Уоттса з використанням реверсу струму необхідно, щоб повний період осадження знаходився в межах від 10 до 100 с, при цьому тривалість включення прямого струму повинна становити від 80 до 95%. Дані межі зміни варійованих параметрів узгоджуються з можливостями широко використовуваних випрямних агрегатів і були використані для першої частини експериментальних досліджень.

Найпростішим способом планування експериментів є використання сіткового методу. Його сутність полягає в тому, що для кожного параметра відрізки допустимих значень розбиваються з певним кроком, який залежить від кількості розбиття відрізка. Недоліком даного методу є те, що одержувана сітка буде оптимальною тільки при одному параметрі. При збільшенні числа параметрів для отримання адекватної оцінки їх впливу на досліджуваний критерій може знадобитися проведення великої кількості експериментів [17, 23]. Використання довільного вибору пробних вузлів у багатовимірних областях часто призводить до негативних результатів через відсутність у людини багатовимірної геометричної інтуїції.

Для вирішення задачі планування експериментальних досліджень використовується методика, описана в [33]. Ця методика використовується для отримання плану експериментального дослідження у вигляді поля з рівномірною щільністю розподілу точок за всіма параметрами. Подібний розподіл вузлів всередині багатовимірної області дозволяє максимально підвищити цінність кожного вузла і інформаційну насиченість планованої серії експериментів в цілому.

Рівномірно розподіленої в довільному n-мірному паралелепіпеді П зі сторонами, паралельними координатним граням, вважається послідовність $S_N(П) = P_1,\ldots,P_i,\ldots P_N$ $(1 \leq i \leq N)$, для якої виконується наступна умова:

$$\lim_{N\to\infty} \frac{S_N(П)}{N} = V_П \qquad (2.14)$$

де $V_П$ - об’єм паралелепіпеда П. Найкращими характеристиками рівномірності серед рівномірно розподілених послідовностей мають ЛПτ-послідовності [36]. Послідовність точок $P_1,\ldots,P_i,\ldots P_N$ n-мірного куба називається ЛПτ-послідовністю, якщо будь-яка її двійкова ділянка, що містить не менше $2\tau + 1$ точок, являє собою Пτ-сітку. Пτ-сіткою називається сітка, що складається з $N=2^\nu$ точок n-мірного куба, якщо будь-якому двійковому паралелепіпеду $П_k$ з об'ємом

$$V_{Пk} = \frac{2^\tau}{N} \qquad (2.15)$$

належать 2^τ точок сітки ($\nu>\tau$) [37]. Добрий розподіл в об'ємі n-мірної області мають послідовності, складені не менше ніж з 14-15 точок [33] .

Метод складання рівномірно розподілених послідовностей, описаний в [84], був застосований для складання плану експериментальних досліджень. Кожна окремо взята точка послідовності - це набір із значень двох параметрів - тривалості повного періоду імпульсу T, вимірюваного в секундах, і його катодної складової пк, зазначеної у відсотках. Значення параметрів для кожного експерименту вказані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

План експериментальних досліджень

№ досліду	T, с	$\eta_к$, %	$\tau_п$, с	$\tau_{об}$, с
1	10	90	9	1
2	16	94	15	1
3	21	89	19	2
4	27	85	23	4
5	33	91	30	3
6	38	83	32	6
7	44	86	37	7
8	49	88	43	6
9	55	88	48	7
10	61	87	52	9
11	66	82	54	12
12	72	92	66	6
13	78	84	65	13
14	89	93	83	6

В експериментах використовувався електроліт Уоттса, який має наступний склад: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 280...300 г/л, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 50...70 г/л, H_3BO_3 – 30...40 г/л. Використання саме цього електроліту зумовлено тим, що це найбільш поширений в промисловості електроліт для нікелювання.

В якості анода використовувався нікелевий електрод з перетином у вигляді квадрата площею 0,1 дм^2. Катоди представляли собою сталеві пластини у формі квадрата площею 0,1 дм^2. Деталі повністю занурювалися в поліпропіленову ванну, заповнену приготовленим електролітом. Розміри ванни складали 15 х 10 х 7 см, а відстань між анодом і катодом становила 4,5 см. Деталі знежирювали миючим засобом у холодній воді, а потім промивалися в холодній воді в непроточній ванні.

Далі відбувалося травлення на протязі 10 хвилин в 30% розчині соляної кислоти. Потім слідувала промивка деталі в холодній воді і гаряча промивка протягом двох хвилин в дистильованої воді безпосередньо перед нанесенням покриття.

Живлення гальванічної ванни здійснювалося від високоточного програмованого випрямного агрегату Flex Kraft FLX-01. Катодна і анодна щільності струму були рівні 5 А/дм^2. Температура електроліту підтримувалася рівною 52 °С. електроліт перемішувався стисненим повітрям за допомогою барботера. Час нанесення покриття становив 50 хвилин.

Вимірювання товщини нанесених нікелевих гальванічних покриттів проводилося за допомогою товщиноміра «Константа К5». Поверхня деталі була розбита рівномірною сіткою з кроком в 2 мм, у вузлах отриманої сітки проводилися по три виміри. Товщину покриття в вузлах отримували як середнє арифметичне трьох вимірювань. Отримані значення товщини покриття заносилися в програму Microsoft Excel.

Для згладжування результатів експериментів, значення товщини покриття у вузлах сітки оброблялися методом ковзного середнього по трьох точках. Далі за формулою (1.1) обчислювався критерій нерівномірності R. знайдені значення критерію нерівномірності наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Результати експериментів

№ досліду	$\tau_п$, с	$\tau_{об}$, с	R
1	9	1	0,272
2	15	1	0,208
3	19	2	0,257
4	23	4	0,248
5	30	3	0,236
6	32	6	0,269
7	37	7	0,265

Таблиця 2.2

Продовження

8	43	6	0,282
9	48	7	0,291
10	52	9	0,251
11	54	12	0,224
12	66	6	0,227
13	65	13	0,225
14	83	6	0,203

Як приклад на рис. 2.1 наведений розподіл нікелевого гальванічного покриття по поверхні сталевої деталі у формі квадрата 30 х 30 мм, отриманого в експерименті №14, в якому досягнута найменша нерівномірність покриття, яка дорівнює 0,203. Мінімальна товщина покриття дорівнює 25 мкм.

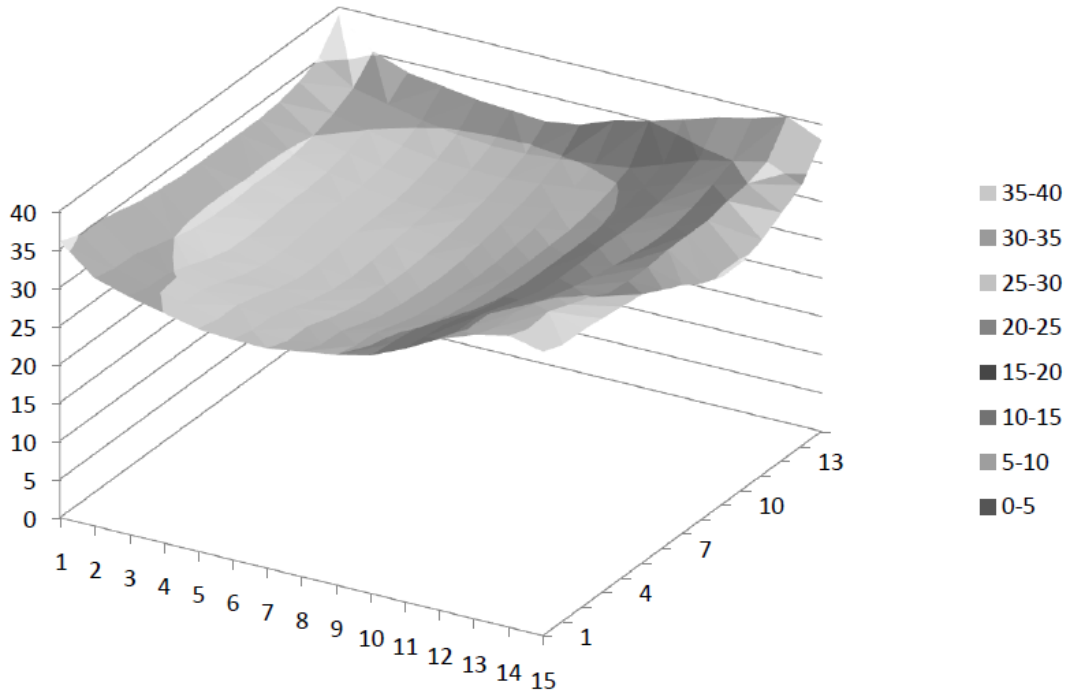


Рис. 2.1. Розподіл нікелевого покриття на експериментальному зразку № 14

Отримані покриття мали світлий колір, а поверхня була матовою. Для оцінки поліпшення рівномірності покриття був проведений експеримент з нанесення нікелевого гальванічного покриття з електроліту Уоттса з використанням тільки постійного струму щільністю 5 А /дм^2. Час нанесення покриття складав 50 хвилин. Розподіл покриття на експериментальному зразку наведений на рис. 2.2. Критерій нерівномірності, розрахований за формулою (1.1), склав R=0,248. Мінімальна товщина покриття дорівнює 26 мкм. Поліпшення нерівномірності склало 18%.

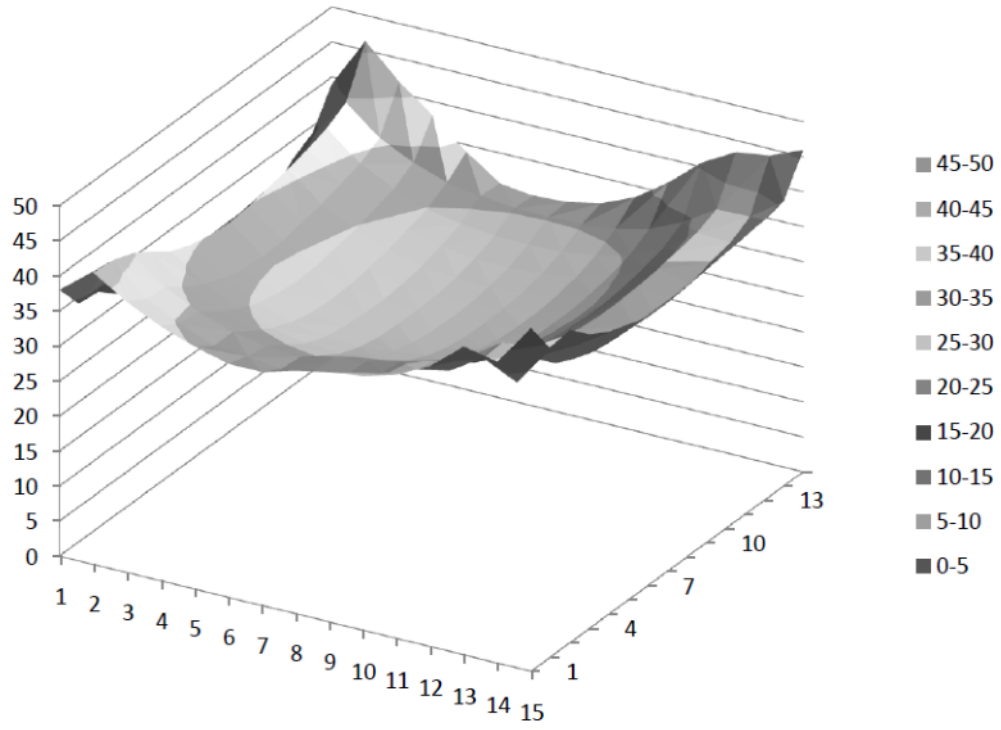


Рис. 2.6. Розподіл нікелевого покриття при осадженні постійним струмом

Згідно з дослідженнями [13, 94], для отримання світлих твердих напівблискучих і блискучих нікелевих гальванічних покриттів з використанням реверсивного струму тривалість прямого імпульсу повинна бути не більше 2 с, при цьому тривалість зворотного імпульсу – від 4 до 50% від тривалості прямого. Однак, в даних дослідженнях не була досліджена рівномірність отриманих покриттів при таких малих значеннях тривалості прямого і зворотного імпульсу внаслідок обмежених можливостей серійного

обладнання.

Як було зазначено в главі 1, широко використовувані в промисловості і наукових дослідженнях випрямні агрегати не відповідають сучасним вимогам.

Замовлення підприємству виробництва випрямного агрегату, здатного видавати імпульси прямого і зворотного струму від одиниць мілісекунд, при щільності струму не менше 5 А/дм^2, є надмірно витратним для підприємств з невеликими обсягами виробництва або для дослідницьких цілей. Отже, необхідно створити пристрій, який дозволить поліпшити характеристики існуючих випрямних агрегатів.

Для поліпшення характеристик випрямних агрегатів розроблено пристрій - мостовий інвертор [54, 61]. Схема мостового інвертора представлена на рис. 2.3.

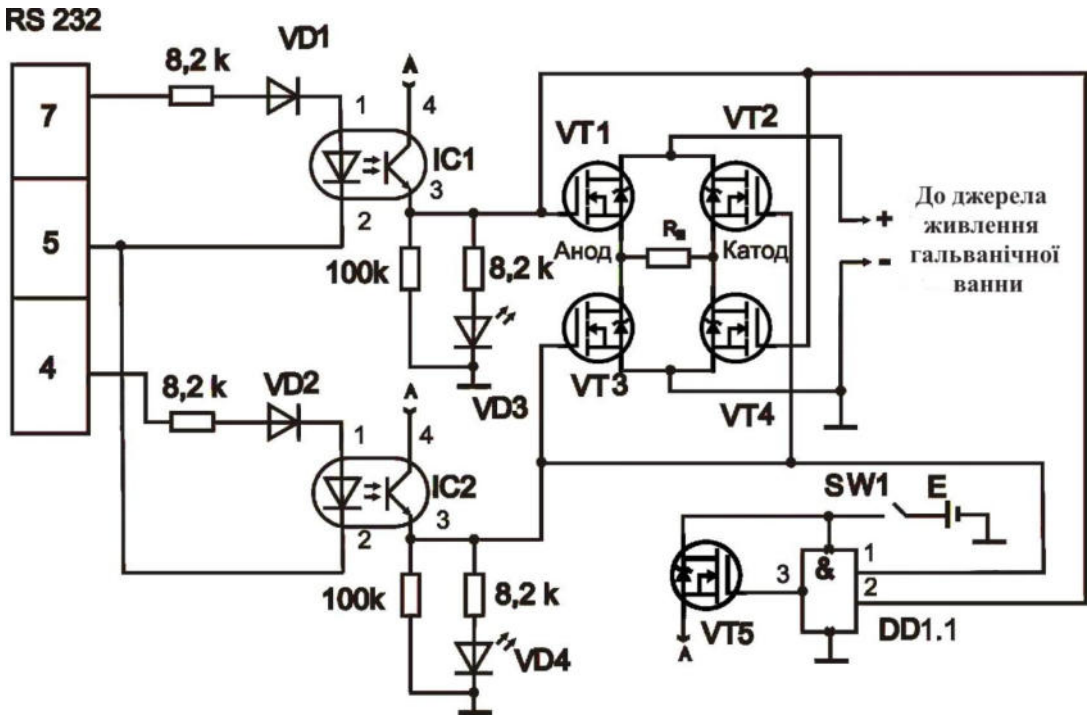


Рис. 2.3. Принципова електрична схема мостового інвертора

Пристрій працює наступним чином. Анод і катод гальванічної ванни, позначені на схемі $R_н$, підключаються до діагоналі моста, що складається з MOSFET-транзисторів VT1-VT4. Випрямний агрегат (джерело живлення навантаження $R_н$) підключається до другої діагоналі моста з дотриманням полярності, зазначеної на рис. 2.3. Транзистори VT1-VT4 управляються комп'ютером (один з COM-портів) через оптоелектронні ключі управління IC1 і IC2, що забезпечує гальванічну розв'язку між комп'ютером і випрямним агрегатом.

Нехай режим роботи $R_н$, при якому потенціал напруги на аноді вище, ніж на катоді, буде прямим, тоді режим роботи, при якому потенціал напруги на катоді буде вище, ніж на аноді, буде реверсивним.

Для реалізації прямого режиму пристрій управління через ключ управління IC1 відкриває MOSFET-транзистори VT1 і VT4 і через ключ управління IC2 закриває MOSFET-транзистори VT2 і VT3. В цьому випадку позитивний потенціал випрямного агрегату подається на анод через відкритий транзистор VT1, а негативний - на катод через відкритий транзистор VT4. Таким чином, потенціал на аноді буде вище, ніж на катоді, отже, пристрій $R_н$ буде працювати в прямому режимі.

Для реалізації реверсивного режиму пристрій управління через ключ управління IC1 закриває MOSFET-транзистори VT1 і VT4 і через ключ управління IC2 відкриває MOSFET-транзистори VT2 і VT3. В цьому випадку позитивний потенціал випрямного агрегату подається на катод через відкритий транзистор VT2, а негативний – на анод через відкритий транзистор VT3. Таким чином, потенціал на катоді буде вище, ніж на аноді, отже, пристрій $R_н$ буде працювати в реверсивному режимі.

З опису алгоритму роботи мостового інвертора видно, що ключі IC1 і IC2 повинні працювати в опозитному режимі. Для його надійної реалізації живлення IC1 і IC2 здійснюється від джерела живлення E через елементи VT5 і DD1.1. Для відключення пристрою призначений вимикач SW1, при цьому на ключі управління IC1 і IC2 напруга живлення не надходить. В

цьому випадку, внаслідок високого опору закритих транзисторів VT1-VT4, через $R_н$ буде проходити струм витоку порядку мікроампер. Світлодіоди VD3 і VD4 призначені для візуального контролю роботи пристрою.

Великий асортимент потужних MOSFET-транзисторів і їх низька вартість дозволяють створювати варіанти апаратної частини системи в залежності від необхідних струмових режимів. Наприклад, MOSFET-транзистор IRF1324S-7PPbF (International Rectifier, США) забезпечує постійний струм стоку 303 А при температурі корпусу 100 °С і максимальну потужність розсіювання 300 Вт. У виготовленому пристрої в якості транзисторів VT1-VT5 застосовувалися широко поширені транзистори IRF3710 (струм стоку 57 А), IC1-IC2 - PC817, DD1.1 - CD 4011bp.

Так як MOSFET-транзистор є приладом, керованим напругою, то амплітуда напруги на аноді і катоді і тривалість заданого режиму залежить від амплітуди напруги і тривалості імпульсу, що формується пристроєм управління і переданого через ключі управління IC1 і IC2 на затвори MOSFET - транзисторів VT1 - VT4. Це легко реалізує застосування цифрових пристроїв управління, таких як ПЕОМ, що дозволяє більш точно формувати тривалості режиму, а застосування мікроконтролерів (наприклад, Arduino) дозволяє при необхідності здійснювати складні алгоритми управління амплітудою і полярністю напруги на $R_н$ (в тому числі несиметричні). Пристрій підключається до персонального комп'ютера по інтерфейсу RS-232, або підключається по інтерфейсу USB через конвертер USB-COM. Для управління системою створена програма (середовище розробки Delphi 2007).

У програмі задаються порт управління пристроєм, тривалості прямого і зворотного імпульсу, а також загальний час нанесення покриття. Також програма має кнопки запуску і зупинки процесу нанесення покриття.

Для проведення експериментальних досліджень при малій тривалості імпульсу струму використовувався той же електроліт, що і в першій частині дослідів. Щільність струму і умови нанесення покриття так само були ідентичними. Знайдені значення критерію нерівномірності наведені в табл.

2.3.

Таблиця 2.3

Результати експериментів при малій тривалості імпульсу

№ досліду	$\tau_п$, с	$\tau_{об}$, с	R
1	2	0,2	0,218
2	0,4	0,04	0,204
3	0,04	0,004	0,201

В результаті використання малих тривалостей прямого і зворотного струму були отримані світлі напівблискучі покриття. На рис. 2.4 показано розподіл покриття на зразку з найменшою нерівномірністю покриття. Мінімальна товщина покриття склала 27 мкм.

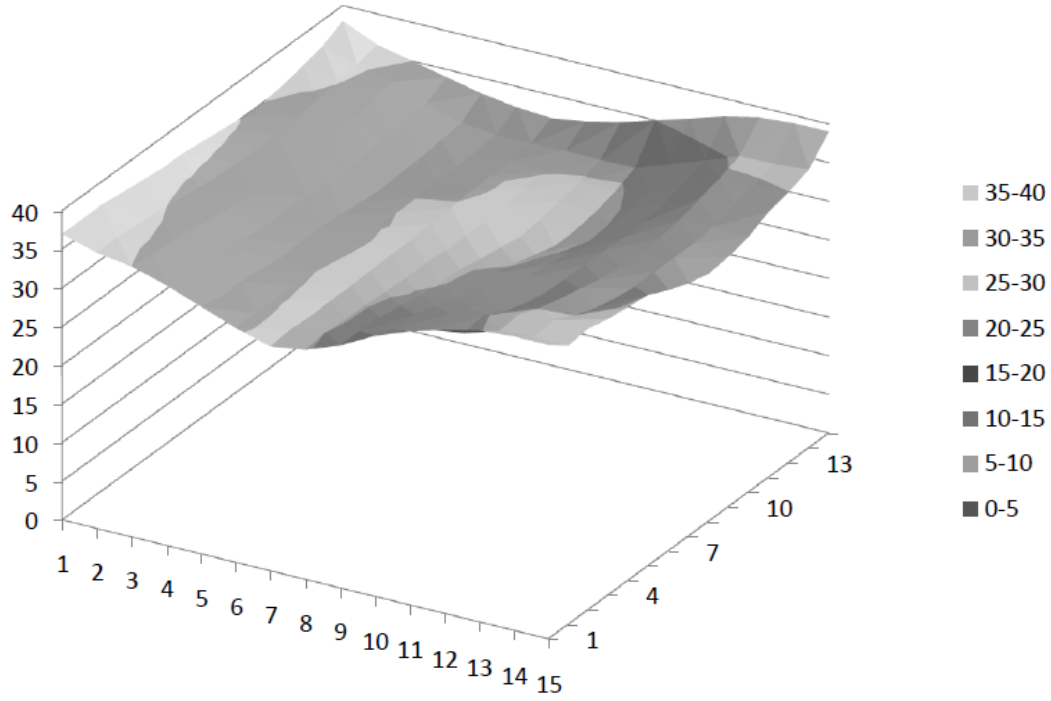


Рис. 2.4. Розподіл покриття при малоїх тривалості імпульсів

Адекватність математичної моделі перевірена шляхом порівняння розподілу нікелевих гальванічних покриттів по поверхні пластин розміром 30 х 30 мм, отриманих в результаті експериментальних досліджень та обчислених за допомогою математичної моделі при тих же параметрах системи. Для проведення обчислювального експерименту були задані наступні значення параметрів процесу: напруга прямого струму $U_к$ = 1,1 В; напруга реверсивного струму U_a = 1,0 В; час нанесення покриття $T_{заг}$ = 50 хвилин; питома провідність електроліту χ = 0,2 1/(Ом·см). Катодний і анодний виходи по струму взяті рівними $\eta_к = \eta_a = 0,95$ [89].

При розрахунках були використані графіки катодної та анодної поляризації, наведені в [25]. На рис. 2.5 наведений графік катодної поляризації.

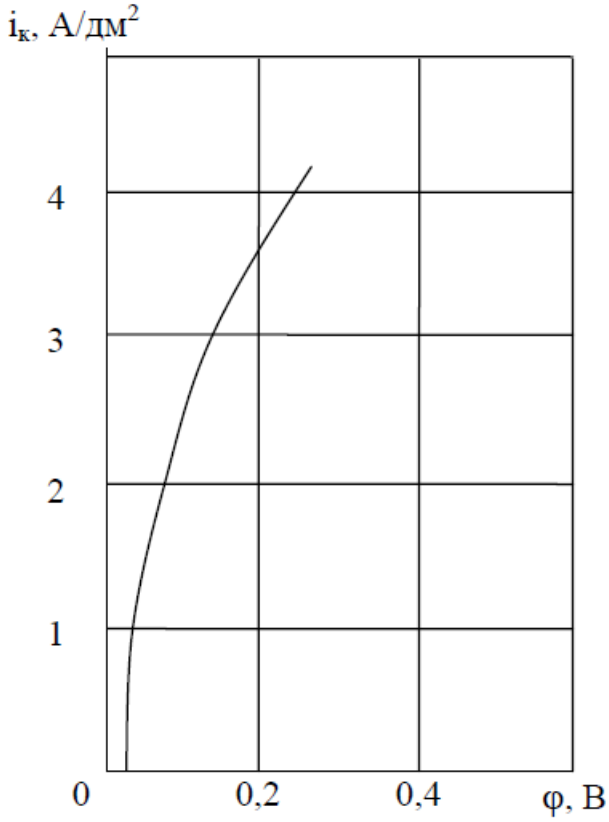


Рис. 2.5. Графік катодної поляризації нікелю в електроліті Уоттса

У розрахунках використовували нелінійну функцію катодної поляризації, отриману апроксимацією табличних даних з [26] в системі комп'ютерної алгебри Mathcad 15:

$$F_2(i_к) = 8{,}32 \cdot 10^{-3} e^{0{,}847 i_к} + 0{,}042. \quad (2.16)$$

Похибка апроксимації обчислювалася за формулою:

$$\Delta_2 = \frac{1}{n_2} \sqrt{\sum_{j=1}^{n_2} \left(\frac{F^т_{2,j} - F^р_{2,j}}{F^т_{2,j}} \right)^2} \cdot 100\%, \quad (2.17)$$

де n_2 - кількість точок табличних даних,

$F^{т}_{2,j}$ - j-е табличне значення функції катодної поляризації;

$F^{р}_{2,j}$ - j-е розраховане значення функції катодної поляризації.

При цьому похибка апроксимації склала ±0,6%.

Графік функції анодної поляризації наведений на рис. 2.6.

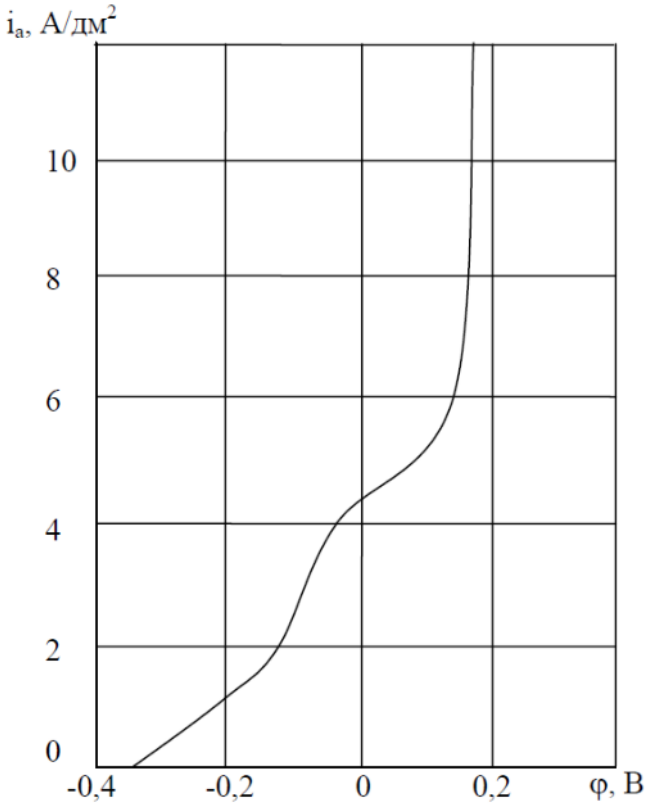


Рис. 2.6. Графік анодної поляризації нікелю в електроліті Уоттса

Аналітично функція анодної поляризації була знайдена апроксимацією табличних даних з [12] за допомогою Mathcad 15 в наступному вигляді:

$$F_1(i_a) = 1{,}736 \cdot e^{i_a - 16} + 0{,}055 \ln(i_a + 1) - \frac{0{,}37}{i_a + 1}\ . \qquad (2.18)$$

Похибка апроксимації обчислювалася за формулою:

$$\Delta_1 = \frac{1}{n_1}\sqrt{\sum_{j=1}^{n_1}\left(\frac{F_{1,j}^{т} - F_{1,j}^{p}}{F_{1,j}^{т}}\right)^2} \cdot 100\%, \qquad (2.19)$$

де n_1 - кількість точок табличних даних;

$F^{т}_{2,j}$ - j-е табличне значення функції анодної поляризації;

$F^{р}_{2,j}$ - j-е розраховане значення функції анодної поляризації.

Похибка апроксимації склала ± 1,2%.

Значення тривалості включення прямого і реверсивного струму вибиралися з таблиць (2.2) та (2.3). Величина кроку сітки при дослідженні розподілу покриття на катоді була прийнята рівною 2 мм.

При порівнянні результатів розрахунків і експериментальних досліджень середня відносна похибка розраховувалася за формулою:

$$\Delta = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{15}\sum_{j=1}^{15}\left(\frac{\delta_e(i,j) - \delta_p(i,j)}{\delta_e(i,j)}\right)^2} \cdot 100\%, \qquad (2.20)$$

де i, j – координати точки дослідження на пластині-катоді; n – загальна кількість точок; $\delta_e(i, j)$, $\delta_p(i, j)$ – експериментальне і розрахункове значення товщини покриття в точці катода з координатами i, j.

Порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків за формулою (2.20) показало, що величина середньої відносної похибки не перевищує ±8,3%. Оскільки похибка приладу неруйнівного контролю «Константа К5», з використанням якого проводилося вимірювання товщини покриття, становить ±1 мкм, математичну модель можна вважати адекватною.

Висновки до розділу 2

1. Удосконалена математична модель процесу нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму. Для розв'язання системи рівнянь, що описує математичну модель, застосований метод верхньої релаксації з прогонкою по рядку.

2. Проведено експериментальні дослідження при тривалості включення прямого і реверсивного струму більше 1 секунди. В результаті отримані матові світлі нікелеві гальванічні покриття. Рівномірність отриманого покриття на 18% більше, ніж при використанні тільки прямого струму.

3. Для проведення експериментальних досліджень при тривалості прямого і реверсивного струму менше 1 секунди було застосовано пристрій (мостовий інвертор), що дозволяє використовувати існуючі випрямні агрегати в режимі реверсування струму з тривалістю включення прямого і зворотного струму від 1 мс.

4. Проведено перевірку адекватності математичної моделі. На підставі зіставлення похибки приладу неруйнівного контролю і середньої відносної похибки математичної моделі зроблено висновок про те, що удосконалена модель є адекватною реальному технологічному процесу нанесення гальванічного покриття.

РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ

Аналіз теоретичних основ гальваностегії та опублікованих робіт [6, 25], а також результати проведених експериментальних досліджень дозволяють зробити висновок про те, що характер залежності рівномірності розподілу гальванічного покриття від тривалості прямого $\tau_п$ і зворотного $\tau_{об}$ періодів реверсивного струму є екстремальним. Отже, це дозволяє провести пошук оптимальних значень $\tau_п$ и $\tau_{об}$ при яких критерій нерівномірності гальванічного покриття буде мінімальний.

Для здійснення такого пошуку необхідна аналітична постановка задачі, заснована на фізико-хімічних закономірностях гальванічного процесу, яка встановлює зв'язок складових критерію нерівномірності покриття і керуючих впливів.

3.1 Математична постановка задачі оптимізації гальванічних процесів з реверсом струму

Розглянемо математичну постановку задачі оптимізації гальванічних процесів з реверсом струму для виявлення зв'язку між керуючими впливами $\tau_п$ та $\tau_{об}$ і критерієм нерівномірності покриття.

Запишемо математичну постановку задачі оптимізації гальванічних процесів з реверсом струму.

Розрахунок розподілу товщини покриття $\delta(x, y,z)$ по поверхні катода з площею $S_к$ в цьому випадку буде проводитися відповідно до закону Фарадея за наступними рівняннями:

$$\delta(x,y,z)=\sum_{j=1}^{N}\left(\delta_j^{+}(x,y,z)+\delta_j^{-}(x,y,z)\right),$$

$$\delta_j^{+}(x,y,z)=\frac{E}{\rho}\eta_к i_к(x,y,z)\tau_п, \qquad (3.1)$$

$$\delta_j^{-}(x,y,z)=-\frac{E}{\rho}\eta_a i_a(x,y,z)\tau_{об},$$

де δ_j^{+} - приріст товщини покриття в точці деталі з координатами (x, y, z) протягом j - го «прямого» включення струму за прямий період $\tau_п$;

δ_j^{-} - зменшення товщини покриття за рахунок електрохімічного розчинення в точці деталі з координатами(x, y, z) протягом j-го «реверсивного» включення струму за зворотний період $\tau_{об}$; E - електрохімічний еквівалент; $\eta_к$ - катодний вихід по струму; η_a -анодний вихід по струму, $i_к(x,y,z)$ – катодна щільність струму в точці покриття деталі з координатами (x, y, z); $i_a(x,y,z)$ – анодна щільність струму в точці в точці покриття деталі з координатами (x,y, z).

Розрахунок щільності струму $i_к$, i_a на поверхні деталі-катода $S_к$ проводиться за законом Ома в диференціальній формі:

$$i_к(x,y,z)=-\chi \operatorname{grad}\varphi_п(x,y,z)\big|_{S_к}, \qquad (3.2)$$

$$i_a(x,y,z)=-\chi \operatorname{grad}\varphi_{об}(x,y,z)\big|_{S_к},$$

де χ - питома провідність електроліту.

Розподіл потенціалу в гальванічній ванні розраховується за рівнянням Лапласа, однаковому для періодів включення прямого і реверсивного струму:

$$\frac{\partial^2\varphi_п}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi_п}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi_п}{\partial z^2}=0, \qquad (3.3)$$

$$\frac{\partial^2\varphi_{об}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi_{об}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi_{об}}{\partial z^2}=0. \qquad (3.4)$$

Рівняння (3.3) має такі граничні умови:

$$\frac{\partial \varphi_{п}}{\partial n}\Big|_{S_и} = 0,$$
$$\varphi_{п} + F_1(i_a)\Big|_{S_a} = U_{п},$$
$$\varphi_{п} - F_2(i_к)\Big|_{S_к} = 0.$$

Рівняння (3.4) має аналогічні граничні умови:

$$\frac{\partial \varphi_{об}}{\partial n}\Big|_{S_и} = 0,$$
$$\varphi_{об} + F_1(i_a)\Big|_{S_к} = U_{об},$$
$$\varphi_{об} - F_2(i_к)\Big|_{S_a} = 0.$$

В якості цільової функції використовується критерій рівномірності R, якій обчислюється за такою формулою:

$$R = \frac{1}{S_к}\int_{S_к}\frac{\delta(x,y,z) - \delta_{min}}{\delta_{min}}dS_к,$$
$$\delta_{min} = \min_{S_к}(\delta(x,y,z)),$$

де δ_{min} – мінімально допустима за технічними умовами для конкретного технологічного процесу товщина покриття, яке наноситься.

Завдання оптимізації гальванічного процесу з реверсом струму полягає в тому, що необхідно знайти вектор керуючих впливів $\overline{U} = \{\tau_п, \tau_{об}, N\}$, якій забезпечує мінімум критерію нерівномірності R при виконанні рівнянь зв'язку у вигляді математичної моделі и виконанні обмеження $\delta_{min} \geq \delta_{зад}$. Для виконання останньої умови необхідно знайти загальний час нанесення покриття $T_{заг}$, яке розраховується за формулою:

$$T_{заг} = N(\tau_п + \tau_{об}) \qquad (3.5)$$

Кінцева товщина покриття в кожній точці деталі залежить від загальної кількості N періодів включення прямого і реверсивного струму. Таким чином, для вирішення поставленого завдання необхідно визначити значення N.

Перепишемо вираз (3.1) в наступному вигляді:

$$\delta(x,y,z)=\left(\delta_j^+(x,y,z)+\delta_j^-(x,y,z)\right)\cdot N\,.$$

Тоді значення N^*, при якому буде виконано умову $\delta_{min}=\delta_{зад}$, може бути визначено наступним чином:

$$N^*=\left\lceil\frac{\delta_{зад}}{\min\limits_{(x,y,z)}\left(\delta^+(x,y,z)+\delta^-(x,y,z)\right)}\right\rceil.$$

Підставивши знайдене значення N^* у формулу (3.5), буде знайдено загальний час нанесення покриття, при якому виконується умова $\delta_{min}=\delta_{зад}$.

Крім того, для вирішення поставленого завдання, як видно з виразу (3.5), потрібно з'ясувати чи існують обмеження для величини $\tau_п$ та $\tau_{об.}$ На основі того, що розглянутий в даній роботі процес нанесення гальванічного покриття використовує такі загальноприйняті визначення як «час прямого періоду» і «час зворотного періоду» можна стверджувати, що такий процес є частотним і, отже, як всякий технічний процес має спектр частот. У свою чергу, це передбачає, що повинна бути гранична частота, яка веде до обмеження величин $\tau_п$ та $\tau_{об}$, оскільки вони за визначенням обернено пропорційні частоті.

У розділі 2 було показано, що доцільно встановлювати різні обмеження на тривалості прямого і реверсивного струму для отримання твердих опадів в режимі з реверсуванням струму. Проаналізовані роботи ґрунтуються тільки на експериментальних дослідженнях конкретного гальванічного процесу з певною концентрацією компонентів електроліту. Аналіз робіт, присвячених вивченню гальванічних процесів з реверсом струму, показав, що, аналітичні математичні моделі для визначення граничної частоти для фізичної реалізації електрохімічної системи процесу нанесення покриття відсутні.

Для вирішення цього завдання зроблені наступне:

- верхня межа тривалості прямого і зворотного періодів задається на підставі того, що за весь час нанесення покриття повинен бути здійснений принаймні один повний період процесу: $\tau_п + \tau_{об} \le T_{заг}$.

- для визначення нижньої межі тривалості прямого і реверсивного

струму була розроблена методика визначення граничної частоти гальванічного процесу в режимі з реверсом струму.

На рис. 3.1 наведений технологічний процес нанесення гальванічного покриття з реверсом струму як об'єкта управління. Гальванічна ванна є технологічним об'єктом управління (ТОУ). Температура електроліту в гальванічній ванні підтримується постійною за допомогою регулятора температури. Концентрація компонентів електроліту, згідно з прийнятим допущенням при описі математичної моделі, не змінюється під час нанесення покриття. Єдиним збурюючим впливом даної системи є вплив $F_{н.ф.}$ від надходження на обробку партії деталей нової форми. Форма деталі може бути задана різними способами з використанням методів аналітичної геометрії; алгебраїчних, канонічних, рецепторних або каркасних моделей. Наприклад, при використанні каркасної моделі форма задається у вигляді сукупності координат вузлів об'ємної сітки на поверхні деталі $\{x_1,y_1,z_1; x_2,y_2,z_2;\dots x_m,y_m,z_m\}$, де m – число вузлів. Для деталі нової форми необхідно знайти нові значення вектору керуючих впливів $\overline{U}$, який містить наступні компоненти: тривалість включення прямого струму, тривалість включення реверсивного струму, кількість загальних періодів включення прямого і реверсивного струму. Товщина покриття в точках (x, y, z) катода є вихідною величиною.

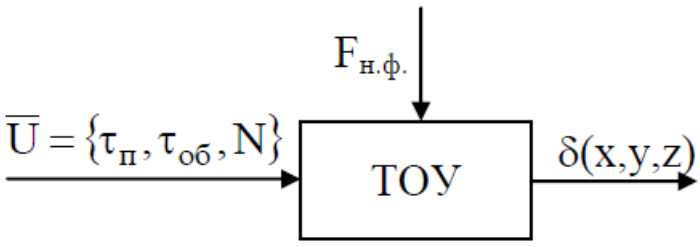


Рис. 3.1. Аналіз технологічного процесу нанесення гальванічного покриття з реверсом струму як об'єкта управління

3.2 Теоретичне визначення граничної частоти гальванічного процесу із застосуванням реверсивного струму

Для визначення нижньої межі тривалості прямого і реверсивного струму розглянемо еквівалентну схему електрохімічної системи [27], показану на рис. 3.2.

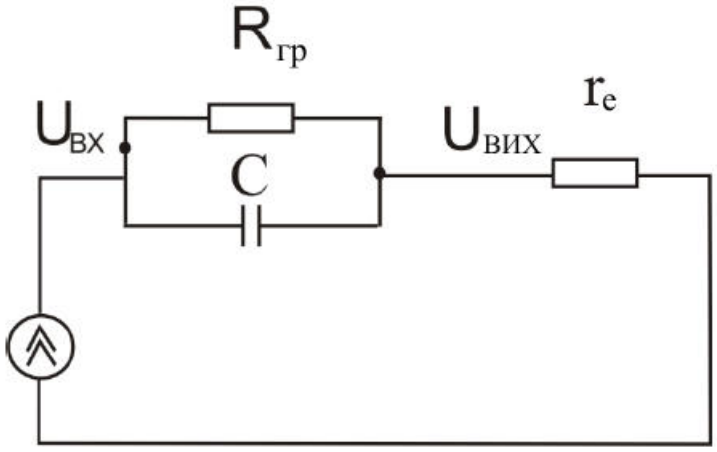


Рис. 3.2. Еквівалентна схема електрохімічної системи

На рис. 3.2 позначено: $R_{гр}$ – активний опір міжфазової межі електрод-електроліт (Фарадеевий опір); r_e – активний опір електроліту; С – ємність міжфазної межі електрод-електроліт; $U_{вх}$ – вхідна напруга (напруга джерела живлення гальванічної ванни); $U_{вих}$ – вихідна напруга (падіння напруги на електроліті). Ємність С за визначенням має комплексний опір Z_C. Для знаходження граничної частоти гальванічного процесу необхідно знайти смугу пропускання еквівалентної схеми електрохімічної системи.

Смугою пропускання ланцюга називають інтервал частот, в межах якого квадрат модуля передавальної функції (тобто коефіцієнт передачі енергії) змінюється не більше ніж в 2 рази. Для знаходження смуги пропускання ланцюга використаємо наступне співвідношення:

$$K(\omega) = U_{вих} / U_{вх}, \tag{3.6}$$

де $K(\omega)$ – передавальна функція, ω – циклічна частота процесу.

Застосуємо до схеми на рис. 3.2 метод комплексних опорів. В цьому випадку вихідна напруга розраховується за формулою:

$$U_{вих} = i_{ст} r_e, \tag{3.7}$$

де $i_{ст}$ – стабілізований струм живлення гальванічної ванни.

З урахуванням того, що:

$$\frac{1}{R_{гр}} + \frac{1}{Z_C} = \frac{Z_C + R_{гр}}{R_{гр} \cdot Z_C}$$

отримуємо:

$$i_{ст} = \frac{U_{вх}}{\frac{R_{гр} \cdot Z_C}{Z_C + R_{гр}} + r_e},$$

де Z_c - комплексний опір ємності С.

Отже, вхідну напругу можна обчислити за формулою:

$$i_{ст} = \frac{U_{вх}}{\frac{R_{гр} \cdot Z_C}{Z_C + R_{гр}} + r_e}, \tag{3.8}$$

Підставивши (3.8), (3.7) в (3.6) отримуємо:

$$K(\omega) = \frac{r_e\left(1 + R_{гр} i\omega C\right)}{r_e\left(1 + R_{гр} i\omega C\right) + R_{гр}}. \tag{3.9}$$

Комплексний опір Z_C розраховується за формулою:

$$Z_C = \frac{1}{i\omega C}, \tag{3.10}$$

де i – уявна одиниця.

Підставимо вираз (3.10) в (3.9):

$$K(\omega) = \frac{r_e\left(1 + R_{гр} i\omega C\right)}{r_e\left(1 + R_{гр} i\omega C\right) + R_{гр}}. \tag{3.11}$$

Виділивши у виразі (3.11) дійсну і уявну частини, отримаємо:

$$K(\omega) = \frac{r_e\left(R_{гр} + r_e + R_{гр}^2 r_e (\omega C)^2\right)}{\left(R_{гр} + r_e\right)^2 + \left(R_{гр} r_e \omega C\right)^2} + i\frac{R_{гр}^2 r_e \omega C}{\left(R_{гр} + r_e\right)^2 + \left(R_{гр} r_e \omega C\right)^2}. \tag{3.12}$$

З виразу (3.12) можна знайти модуль передавальної функції, рівний:

$$|K(\omega)| = \sqrt{\left(\frac{r_e\left(R_{гр} + r_e + R_{гр}^2 r_e(\omega C)^2\right)}{\left(R_{гр} + r_e\right)^2 + \left(R_{гр} r_e \omega C\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{R_{гр}^2 r_e \omega C}{\left(R_{гр} + r_e\right)^2 + \left(R_{гр} r_e \omega C\right)^2}\right)^2}. \qquad (3.13)$$

Таким чином, отримано аналітичний вираз залежності модуля передавальної функції еквівалентної схеми електрохімічної системи від параметрів цієї системи. Знаючи значення параметрів, що входять в праву частину виразу (3.13) можна знайти значення модуля передавальної функції. А прирівнявши значення модуля передавальної функції до 0,5, можна обчислити граничну циклічну частоту $\omega_{пр}$ досліджуваного гальванічного процесу. З урахуванням того, що $\omega_{пр}=2\pi f_{пр}$, можна знайти граничну частоту процесу $f_{пр}$ та відповідні їй граничні для досліджуваного процесу тривалості $\tau_п$, $\tau_{об}$.

З виразу (3.13) випливає, що необхідно знайти значення величин $R_{гр}$, r_e, C. Складність полягає в тому, що ці величини неможливо визначити прямими вимірами, однако, в будь-якому випадку міжфазова межа може бути зведена до еквіваленту паралельного RC-ланцюга. При цьому в момент відключення струму живлення гальванічної ванни напруга на електроліті, що є активним опором, зникає практично миттєво, в той час, як напруга на RC-ланцюзі в цей момент часу залишиться практично постійним і тільки потім почне знижуватися внаслідок розряду ємності C [24]. Для вирішення цього завдання, відповідно до даних, наведених в роботі [25], при подачі ступеневого впливу (функції Хевісайда) в режимі стабілізованого струму з використанням мостового інвертора, знімається характеристика залежності реакції електрохімічної системи в часі від впливу заднього фронту ступеневого впливу (функції Хевісайда), яка показана на рис. 3.3. Рішення про те, що буде досліджена реакція електрохімічної системи при впливі саме заднього фронту функції Хевісайда було прийнято з наступних міркувань:

1. Як джерело живлення гальванічної ванни використовується електронний стабілізатор струму, тому при використанні переднього фронту ступеневого впливу неминучі перешкоди через вихід стабілізатора на

робочий режим.

2. Згідно з даними роботи [26], поведінка комплексних електрохімічних опорів є еквівалентним і при включенні і при виключенні струму.

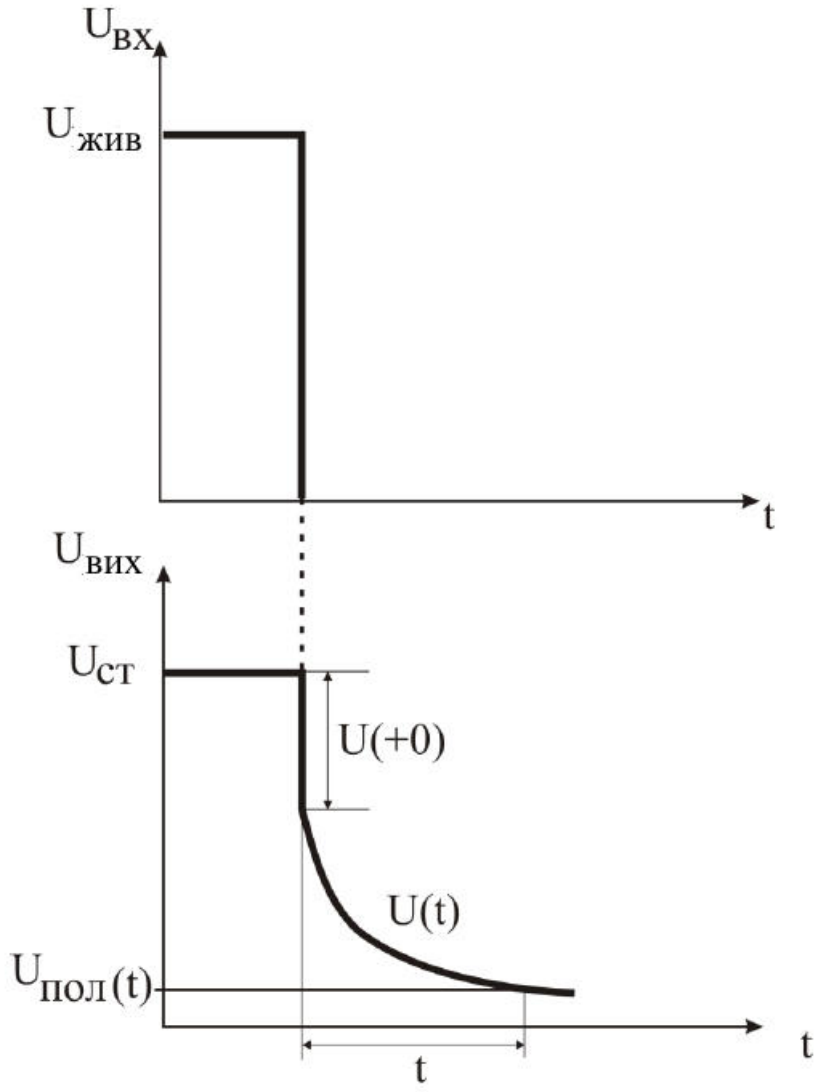


Рис. 3.3. Теоретичний графік реакції гальванічної системи на ступеневий вплив

Після виключення струму, ємність С розряджається на опір $R_{гр}$ від напруги ($U_{ст}$-U(+0)) до напруги поляризації $U_{пол}(t)$ за час t, де $U_{ст}$ - напруга на виході в момент його відключення, а U(+0)- падіння напруги на активному опорі електроліту.

Розрядний струм в цьому випадку дорівнює [26]:

$$i_C = C\frac{dU_{пол}(t)}{dt} = -\frac{U_{пол}(t)}{R_{гр}}. \quad (3.14)$$

Перетворимо рівняння (3.14) до наступного виду:

$$-\frac{dU_{пол}}{U_{пол}} = \frac{dt}{R_{гр}C}. \quad (3.15)$$

Оскільки в виразі (3.11) добуток $R_{гр}C$ є постійним, то отримуємо:

$$t = R_{гр}C\ln\frac{U_{ст}}{U_{пол}(t)} = R_{гр}C\ln\frac{U(+0)}{U_{пол}(t)}. \quad (3.16)$$

З формули (3.16) можна знайти значення $R_{гр}C$:

$$R_{гр}C = \frac{t}{\ln\frac{U(+0)}{U_{пол}(t)}}. \quad (3.17)$$

Згідно [27], активний опір електроліту дорівнює:

$$r_e = \frac{U(+0)}{i_{ст}}. \quad (3.18)$$

Активний опір міжфазової межі електрод-електроліт дорівнює:

$$R_{гр} = \frac{U_{ст}}{i_{ст}} - r_e. \quad (3.19)$$

Підставивши (3.19) в (3.17) знайдемо ємність міжфазової межі електрод-електроліт:

$$C = \frac{t}{R_{гр}\ln\frac{U(+0)}{U_{пол}(t)}}. \quad (3.20)$$

Таким чином, знайдені значення параметрів у виразі (3.12), отже, може бути знайдена гранична частота процесу $f_{пр}$.

Тоді обмеження на значення тривалості прямого і реверсивного струму складають:

$$\frac{1}{f_{пр}} \le \tau_п + \tau_{обр} \le T_{общ}. \quad (3.21)$$

Таким чином, необхідно знайти такі значення $\tau_п$, $\tau_{обр}$, при яких R => min, при обмеженнях (3.21).

Для досліджуваної електрохімічної системи, параметри якої вказані в розділі 2, були знайдені наступні граничні тривалості прямого і реверсивного струму: $\tau_п = 4 \cdot 10^{-3}$ с, $\tau_{обр} = 9 \cdot 10^{-4}$ с.

Розглянемо можливі методи вирішення задачі оптимізації і виберемо з них найкращий.

Методи нульового порядку використовують тільки значення функції і не вимагають обчислення її похідних [5,9]. При використанні методів нульового порядку від цільової функції не потрібно диференційованості і, більш того, вона може бути не задана в аналітичному вигляді.

Метод рівномірного пошуку є найпростішим з методів оптимізації нульового порядку і полягає в наступному. Відрізок [a; b] області визначення функції f (x) розбивається на кінцеве число n рівних частин точками ділення $x_i = a + i(b - a)/n$, $i=0,\ldots,n$. Обчисливши значення f(x) в точках x_i, шляхом порівняння знайдемо точку x_m, $0 \le m \le n$, для якої

$$f(x_m) = \min_{0 \le i \le n} f(x_i).$$

Похибка визначення точки мінімуму функції f (x) методом рівномірного пошуку не перевершує величини

$$\varepsilon_n = \frac{b - a}{n}. \qquad (3.22)$$

Нехай реалізація методу рівномірного пошуку вимагала N обчислень функції f (x). Це означає, що відрізок [a; b] був розбитий на n = N – 1 частин та досягнута точність визначення точки мінімуму склала $\varepsilon_n = \varepsilon_{N-1}$. Тому точність рішення ε(N), яку забезпечує метод рівномірного пошуку в результаті N обчислень f (x), буде складати:

$$\varepsilon(N) = \frac{b - a}{N - 1}. \qquad (3.22)$$

Методами оптимізації нульового порядку також є методи виключення відрізків (метод дихотомії, метод золотого перетину і т.і.). Дані методи

застосовуються для унімодальних функцій. Функція $f(x)$ має назву унімодальної на відрізку [a;b], якщо вона безперервна на [a;b] та існують числа α та β, $a \le \alpha \le \beta \le b$, такі, що:

1) якщо $a < \alpha$, то на відрізку $[a;\alpha]$ функція $f(x)$ монотонно зменшується;

2) якщо $\beta < b$, то на відрізку $[\beta;b]$ функція $f(x)$ монотонно зростає;

3) при $x \in [\alpha;\beta]$ $f(x) = \min f(x)$.

Для вирішення нашої задачі дані методи не підходять в силу того, що для функції R не виконується наведена вище умова унімодальності.

Методи Хука-Дживса, Нелдера-Міда є методами безумовної оптімізації і не підходять для вирішення нашої задачі. Крім того, метод Нелдера-Міда знаходить локальний мінімум, а вибір нового початкового симплексу збільшить часові витрати. Метод градієнтного спуску та інші методи оптимізації першого порядку також не можуть бути застосовні у зв'язку з неможливістю диференціювання цільової функції R.

Стохастичні методи оптимізації (метод Монте-Карло, еволюційні алгоритми та ін.) вимагають для свого виконання великої кількості ітерацій. Крім того, в силу ймовірнісної природи даних методів оптимізації можливий випадок, коли метод буде знаходити тільки локальний екстремум. Тому при використанні даних методів необхідно здійснювати кілька проходів оптимізації і стежити за тим, до якого значення сходяться результати. Враховуючи вищесказане і беручи до уваги той факт, що для обчислення цільової функції R застосовуються чисельні методи, що вимагають значних обчислювальних ресурсів, застосування стохастичних методів істотно сповільнить процес пошуку оптимальних значень.

Метод рівномірного пошуку дозволяє подолати такі проблеми цільової функції, як наявність локальних екстремумів. Але з точки зору обсягу обчислень - це самий витратний метод.

Таким чином, будемо вирішувати задачу оптимізації методом

рівномірного пошуку. Для цього розіб'ємо часовий інтервал, що задає обмеження на тривалість включення прямого і реверсивного струму на два:

$$1) \quad \tau_{п} + \tau_{об} \in \left[\frac{1}{f_{пр}}; 1\right];$$

$$2) \quad \tau_{п} + \tau_{об} \in \left[1; T_{общ}\right].$$

Перший відрізок розіб'ємо на K_1 рівних частин. Значення K_1 вибирається виходячи з точності знаходження оптимального рішення (3.22). У точках ділення відрізка обчислюються значення критерію нерівномірності і шляхом порівняння знаходяться значення τ_n^m, $\tau_{об}^m$, для яких:

$$R\left(\tau_{п}^{m}, \tau_{об}^{m}\right) = \min_{1 \le i \le K_1} R\left(\tau_{п}^{i}, \tau_{об}^{i}\right). \tag{3.23}$$

Другий відрізок також розділимо рівномірно на K_2 частин, причому $K_1=K_2$.

Аналогічно, знайдемо значення τ_n^k, $\tau_{об}^k$, для яких:

$$R\left(\tau_{п}^{k}, \tau_{об}^{k}\right) = \min_{1 \le i \le K_2} R\left(\tau_{п}^{i}, \tau_{об}^{i}\right). \tag{3.24}$$

Оптимальне значення нерівномірності буде знайдено шляхом порівняння значень виразів (3.23) та (3.24):

$$R_{min} = R\left(\tau_{п}^{*}, \tau_{об}^{*}\right) = \min_{i \in \{m,k\}} R\left(\tau_{п}^{i}, \tau_{об}^{i}\right).$$

Мовою програмування Delphi 2007 була написана програма, що реалізує вказаний алгоритм оптимізації гальванічного процесу. Вхідними даними для програми є гранична частота процесу, що розраховується за викладеною методикою, кількість точок розбиття відрізка обмеження, яке залежить від точності розрахунку а також мінімальна задана товщина покриття. Відбувається розрахунок часу, необхідного для нанесення покриття заданої товщини і визначається верхня межа тривалості одного періоду. За математичної моделі розраховується рівномірність одержуваного в результаті покриття. По завершенні перебору програма видає оптимальні

значення тривалості включення прямого і зворотного струму, загальний час нанесення покриття, оптимальне значення критерію рівномірності. На рис. 3.4 представлений інтерфейс програми розрахунку оптимальних параметрів технологічного процесу нанесення гальванічного покриття.

Був здійснений пошук оптимальних значень тривалості включення прямого і зворотного струму для процесу нанесення нікелевого гальванічного покриття на сталеву пластину з електроліту Уоттса в режимі з реверсуванням струму. Розміри пластини-катода і нікелевого анода складали 30 х 30 мм. Для проведення розрахунків були задані: напруга прямого струму $U_к$ = 1,1 В; напруга реверсивного струму U_a = 1,0 В; питома провідність електроліту $\chi = 0{,}2$ 1/(Ом · см).

Катодний і анодний виходи по струму взяті рівними $\eta_k = \eta_a =$ 0,95. Для розрахунку анодної і катодної поляризації застосовувалися функції, отримані в розділі 2. В результаті розрахунку були отримані наступні оптимальні значення тривалості включення прямого і реверсивного струму: $\tau_п$ = 10 мс, $\tau_{об}$ = 2 мс. Критерій рівномірності склав: R = 0,171.

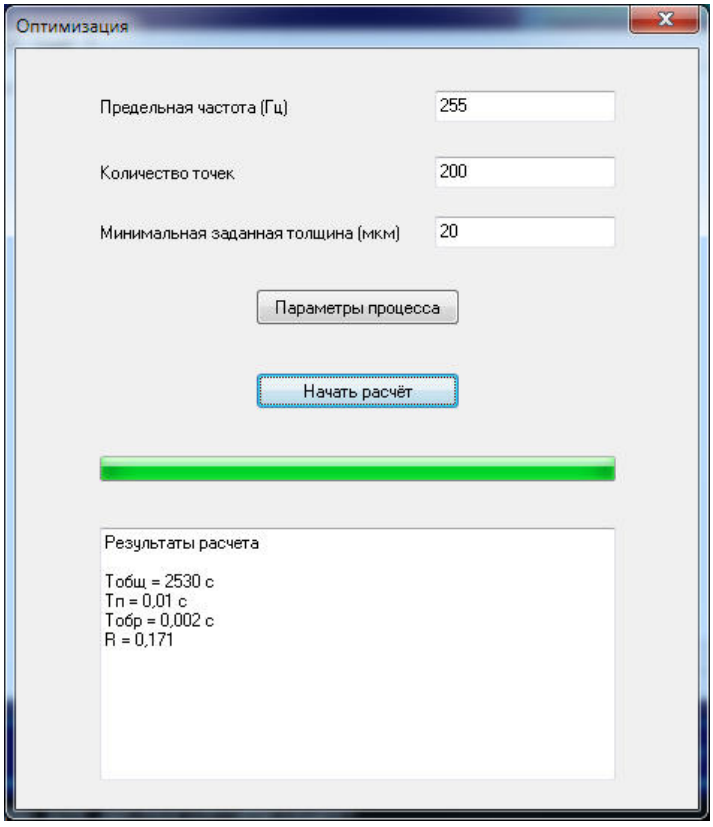


Рис. 3.4. Інтерфейс програми розрахунку оптимальних управлінь

Висновки до розділу 3

1. Поставлено завдання оптимізації гальванічного процесу з реверсом струму відповідно до критерію нерівномірності нанесеного покриття. Показано, що обмеження на значення керуючих впливів в різних дослідженнях задаються по-різному. У зв'язку з цим необхідно розробити методику знаходження граничної частоти досліджуваного процесу.

2. Для знаходження граничної частоти процесу досліджувана електрохімічна система замінена на еквівалентну схему. Використовуючи залежність між значенням модуля передавальної функції і пропускною здатністю системи, знайдена аналітична залежність граничної частоти процесу від параметрів електрохімічної системи.

3. В результаті проведення аналізу можливих методів розв'язання задачі оптимізації, було обрано прямий метод рівномірного пошуку, перевагами якого є відсутність вимоги диференційованості цільової функції та пошук глобального екстремуму цільової функції.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НАНЕСЕННЯ ГАЛЬВАНІЧНОГО ПОКРИТТЯ

4.1 Розробка вимірювально-обчислювального комплексу для визначення граничної частоти технологічного процесу нанесення гальванічного покриття

Як визначено у розділі 3, для визначення граничної частоти гальванічного процесу з реверсом струму необхідно визначити ряд значень параметрів електрохімічної системи. Ці значення визначаються за допомогою аналізу реакції електрохімічної системи на одиничний вплив у формі функції Хевісайда. Проблема полягає в тому, що для практичної реалізації цього методу необхідно високошвидкісне вимірювальне обладнання з функцією запису даних, синхронізованих за часом, так як час падіння напруги на електроліті U (+0) є дуже малим. Крім того, необхідно застосування пристрою для комутації струму з щільністю не менше 5 А/дм^2 із крутизною фронту відключення порівнянного з крутизною падіння напруги U(+0).

Для отримання експериментальних даних був використаний розроблений керований мостовий інвертор в якості комутатора струму. В цьому випадку керуюча напруга з комп'ютера подається тільки на одне плече мостового інвертора, комутуючі при цьому прямий імпульс струму. На рис. 4.1 наведена схема інформаційно-вимірювального комплексу (ІВК), що виконує вимірювання і розрахунок значень параметрів для обчислення граничної частоти гальванічного процесу з реверсом струму.

В якості вимірювального компонента застосовувався розроблений двоканальний віртуальний вольтметр з функцією синхронізованого запису даних на базі 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача ADS7818 з частотою перетворення 500 кГц і розроблене для нього додаток на мові

Visual C++ для підвищення швидкодії програмної частини вимірювальної системи. Принципова схема двоканального вольтметра наведена на рис. 4.2.

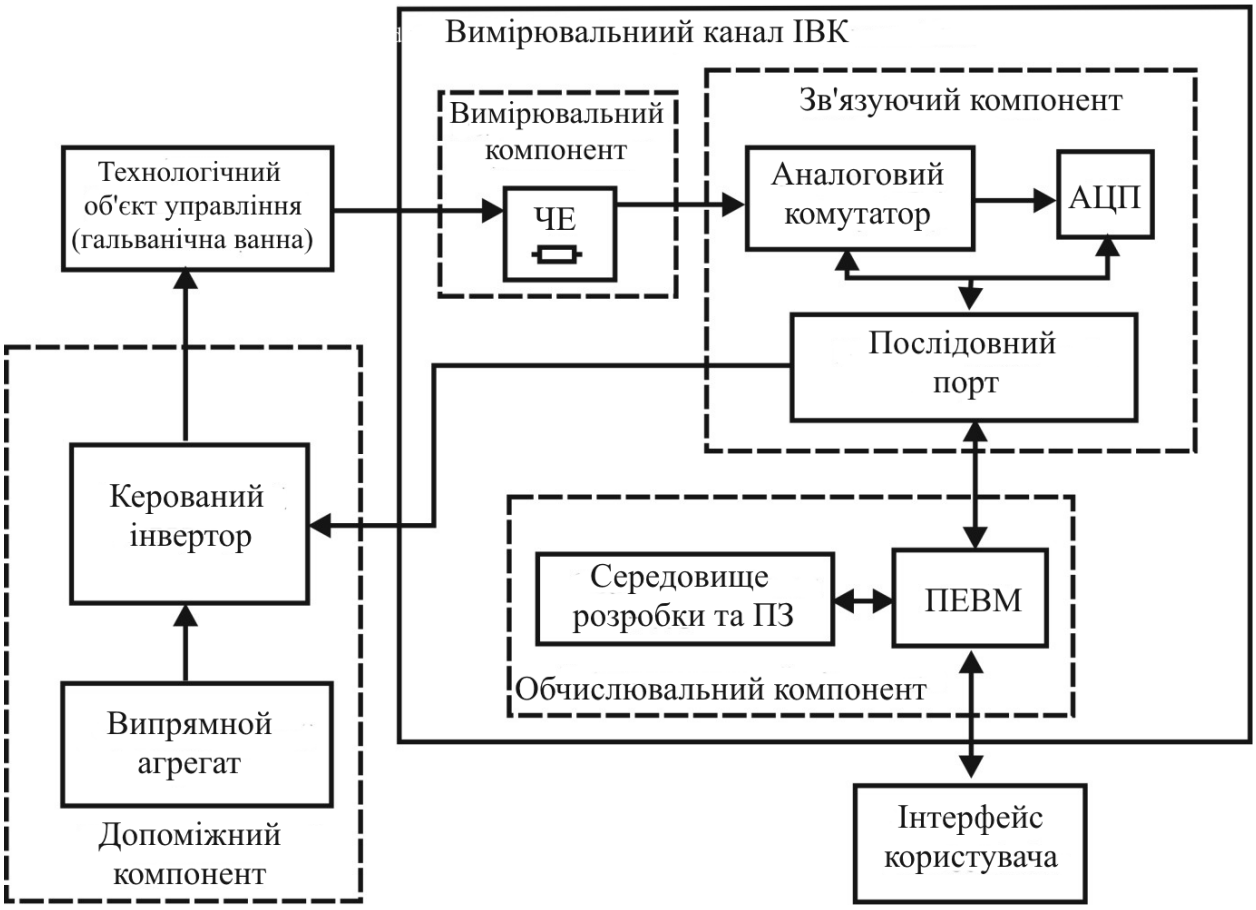
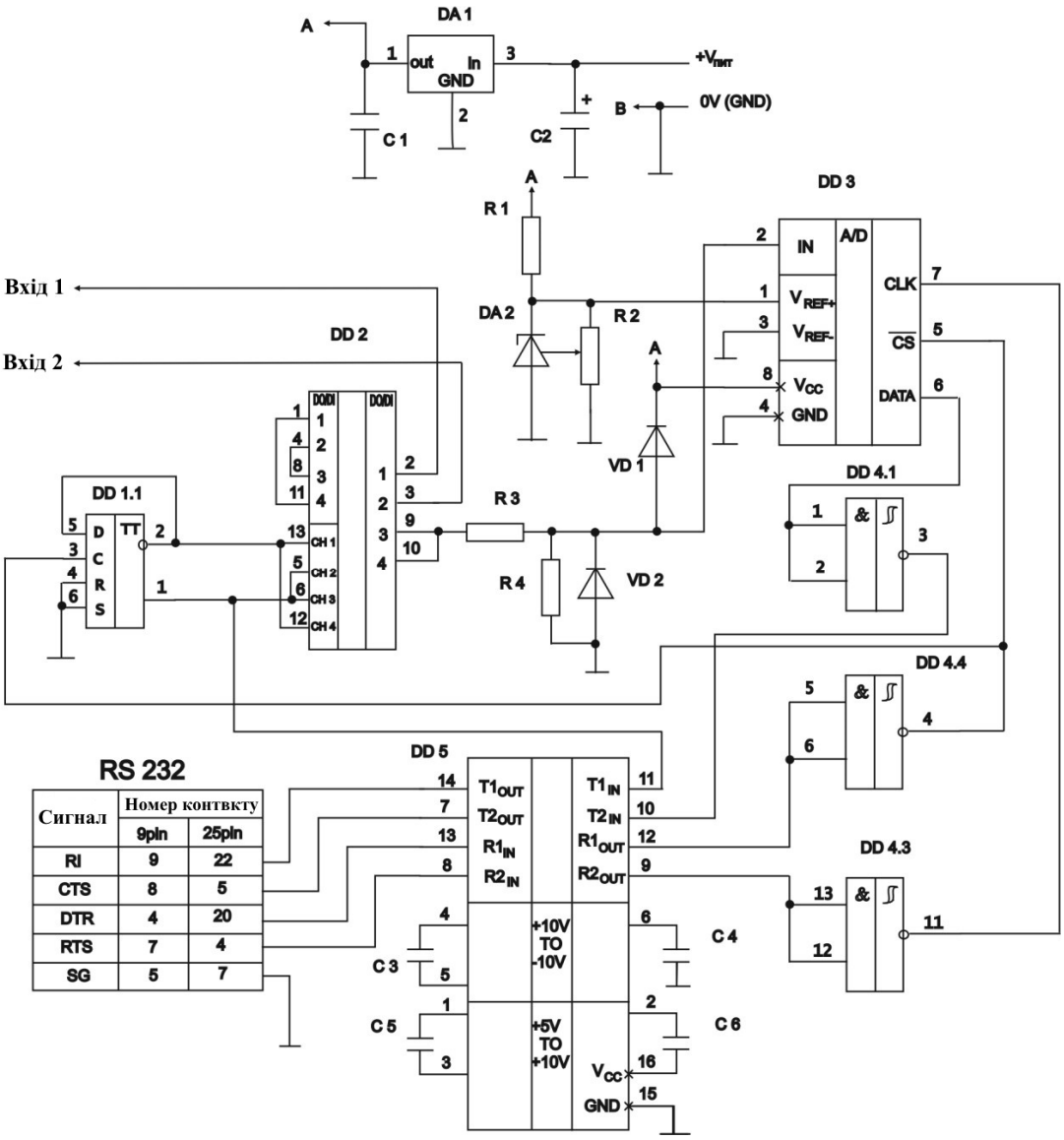


Рис. 4.1. Структурна схема інформаційно-вимірювального комплексу: ЧЕ - чутливий елемент; ІВК - інформаційно-вимірювальний комплекс; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПЗ - програмне забезпечення; ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина.

Пристрій працює наступним чином. Відповідна вимірювана величина підключена до входів аналогового комутатора (виводи 2 та 3 мікросхеми DD2 - К561КТ3). Програмно перевіряється стан тригера DD1.1 (мікросхема К561ТМ2) і при необхідності проводиться його установка в стан логічної "1" на виводі 1, що відповідає виміру на "вході 2". Далі напруга, яка вимірюється надходить через відповідний канал мікросхеми DD2 і подільник напруги на резисторах R3 та R4 на вхід АЦП DD3 (в даному випадку використовується 12-розрядний АЦП з послідовним інтерфейсом ADS7818P Burr-Brown Texas Instruments).



Сигнал	Номер контвкту	
	9pin	25pin
RI	9	22
CTS	8	5
DTR	4	20
RTS	7	4
SG	5	7

Рис. 4.2. Принципова схема двоканального вольтметра

Мікросхема DA2 (LM136 - 2.5 V фірми «National Semiconductor») є джерелом опорної напруги АЦП. Потім, відповідно до протоколу зв'язку АЦП, проводиться вимірювання, перетворення і передача даних в ПЕОМ. Для перетворення значень напруги стандарту TTL, в якому працює АЦП, до значень протоколу RS232 (і навпаки) в даній схемі використовуються ІМС DD4 і DD5. DD4 (мікросхема КР1561ТЛ1) являє собою набір тригерів Шмітта з інверсією, а DD5 є універсальним асинхронним приймачем для сполучення з асинхронними каналами послідовних даних з вбудованим подвоювачем і інвертором напруги (мікросхема ST232 фірми «STMicroelectronics»). Потім, по спаду позитивного імпульсу на виводі 3

DD1.1 на виводі 1 мікросхеми DD1.1 встановлюється значення логічного "0", а на виводі 2 мікросхеми DD1.1 - логічної "1", що відповідає режиму вимірювання напруги на "вході 1" і знову виконується процес вимірювання. Потім в ПЕОМ проводиться обчислення значень вимірюваної напруги. Стабілізація напруги живлення пристрою + 5 В здійснюється мікросхемою DA1(мікросхема LM78L05 фірми «National Semiconductor»). Живлення пристрою здійснюється від джерела постійної напруги 6,7 - 30 В (стабілізованого або не стабілізованого) і струмом навантаження не менше 15 мА.

Блок-схема роботи двоканального віртуального вольтметра подана на рис 4.3. Схема працює наступним чином. Перед початком вимірювання перевіряється номер підключеного каналу і при необхідності проводиться перемикання на необхідний канал. Далі проводиться запис часу вимірювання і проводиться вимірювання, обчислення і запис значення напруги по підключеному каналу. Потім перемикається аналоговий комутатор, і проводяться аналогічні дії по вимірюванню напруги по другому каналу. Особливість алгоритму полягає в тому, що для взаємодії аналого-цифрового перетворювача вольтметра і персонального комп'ютера застосовуються регістри стану модему послідовного порту ПЕОМ, що дозволило підвищити швидкість вимірювання.

З метою підвищення швидкодії системи запис значень часу вимірювання і напруги проводиться в оперативну пам'ять комп'ютера. Стандартний таймер ОС Windows має Крок $1 \cdot 10^{-3}$ [с], що недостатньо для проведення вимірювань. У зв'язку з цим, для вимірювання часу використовується таймер високої роздільної здатності на основі функції QueryPerfomanceCounter(). Частота даного таймера не змінюється під час роботи системи і залежить від частоти центрального процесора [45]. Для використовуваного в даній роботі ПК частота таймера склала 1948730 [Гц]. Таким чином, крок вимірювання часу був обумовлений частотою дискретизації АЦП і склав $2 \cdot 10^{-6}$ [с].

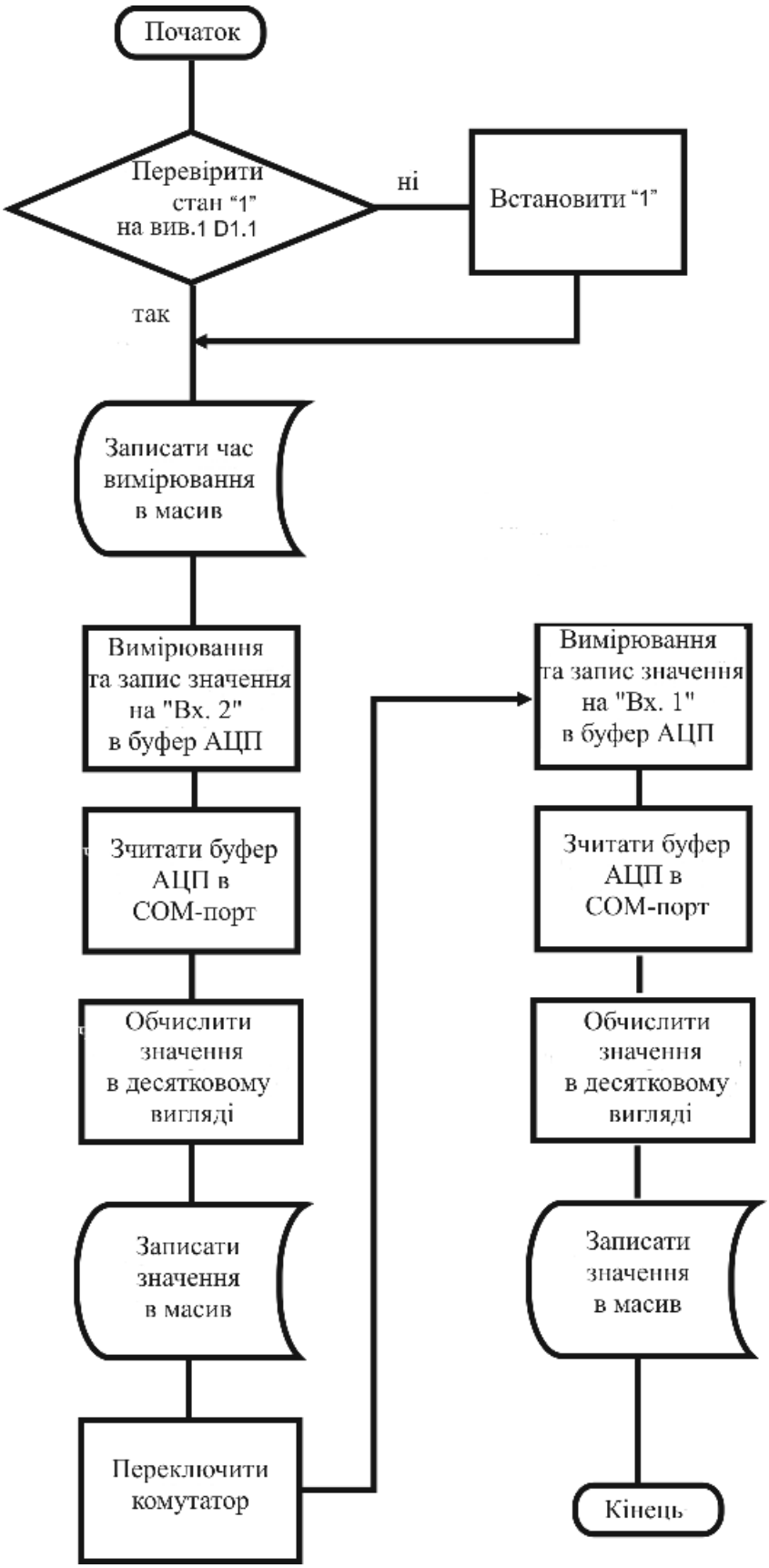


Рис. 4.3. Блок-схема роботи двоканального вольтметра

Блок-схема роботи ІВК наведена на рис. 4.4.

Як видно з рис. 4.4, для роботи ІВК необхідна наявність у ПК двох COM-портів: перший використовується для управління мостовим інвертором, другий - для двоканального вольтметра. Кількість вимірювань до відключення мостового інвертора задається таким чином, щоб стабілізатор струму перед відключенням встиг вийти на режим стабілізації. Кількість вимірювань залежить від типу використовуваного стабілізатора і частоти вимірювань. У даній роботі число вимірювань до виходу стабілізатора на режим дорівнює 7. За допомогою допоміжної програми було визначено час виконання команд QueryPerfomanceCounter(), а також одного вимірювання.

Знаючи це значення часу, а також частоту таймера високої роздільної здатності було знайдено кількість вимірювань після відключення мостового інвертора, а саме 500. Далі відбувається включення мостового інвертора і починається цикл вимірювань вхідної і вихідної напруги згідно рис. 3.1. Після виконання вимірювань напруги при включеному джерелі стабілізованого живлення гальванічної ванни відбувається відключення мостового інвертора. Після цього здійснюється цикл вимірювань вихідної напруги, відповідного періоду t на рис. 3.2. Після завершення вимірювань відбувається запис виміряних значень часу і вхідної (вихідної) напруги в файл.

Дані експерименту – час і синхронізовані за часом значення $U_{жив}$ і $U_{ст}$ - зберігаються у вигляді табличного файлу даних, який потім обробляється в програмі в середовищі пакета MATCAD. В результаті, для використовувалася в даній роботі електрохімічної системи був отриманий графік, поданий на рис. 4.5 і його фрагмент в більшому масштабі на рис. 4.6. Для отримання значень $R_{гр}$, $r_э$, C і знаходження граничної частоти $f_{пр}$ розроблена наступна методика:

1. З експериментальних даних необхідно знайти падіння напруги на $R_{доп}$ як різницю напруги $U_{жив}$- $U_{ст}$ (на графіках рис. 4.5, 4.6 це, відповідно, V_1 та V_2).

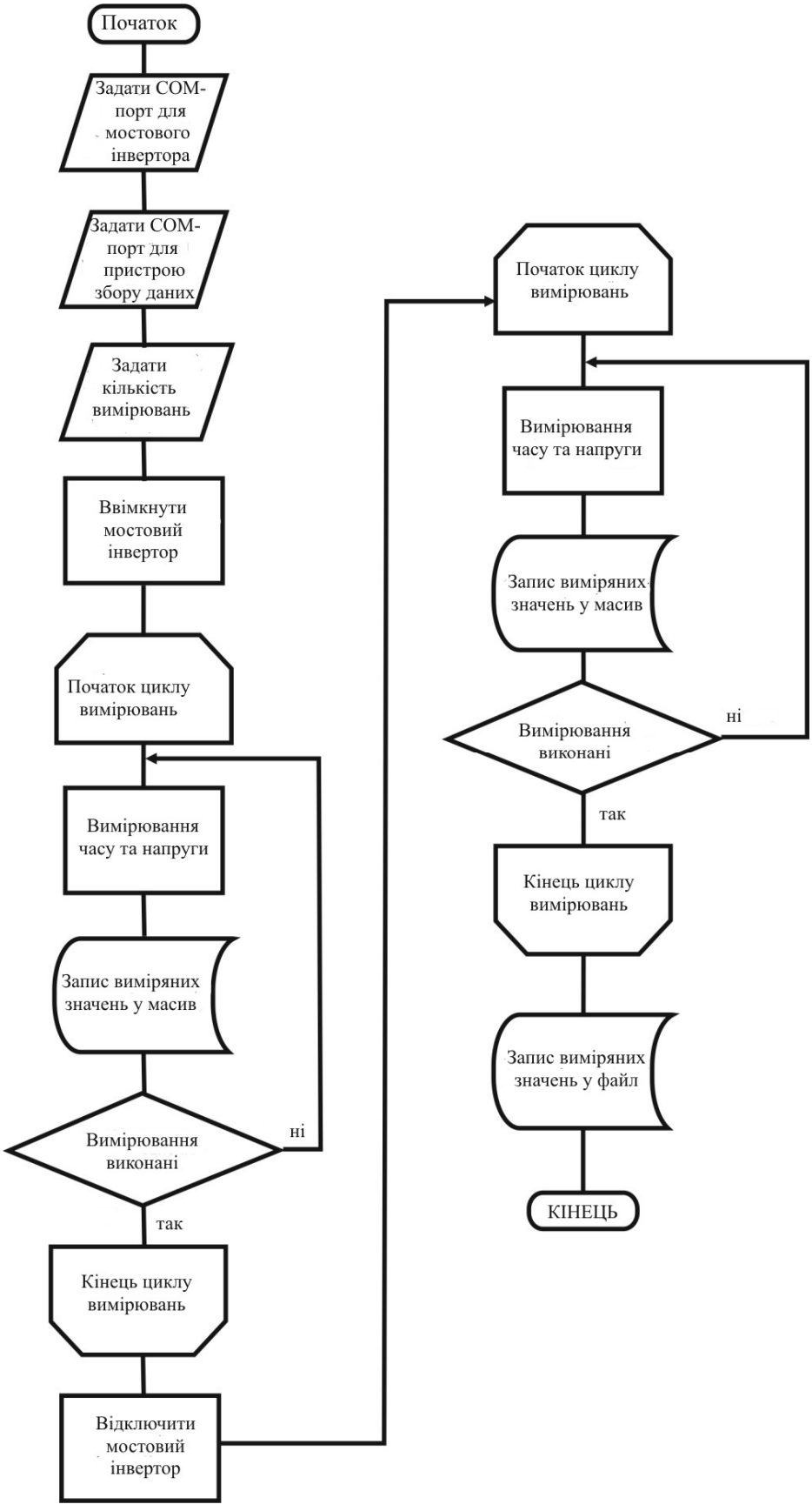


Рис. 4.4. Блок-схема роботи інформаційно-вимірювального комплексу

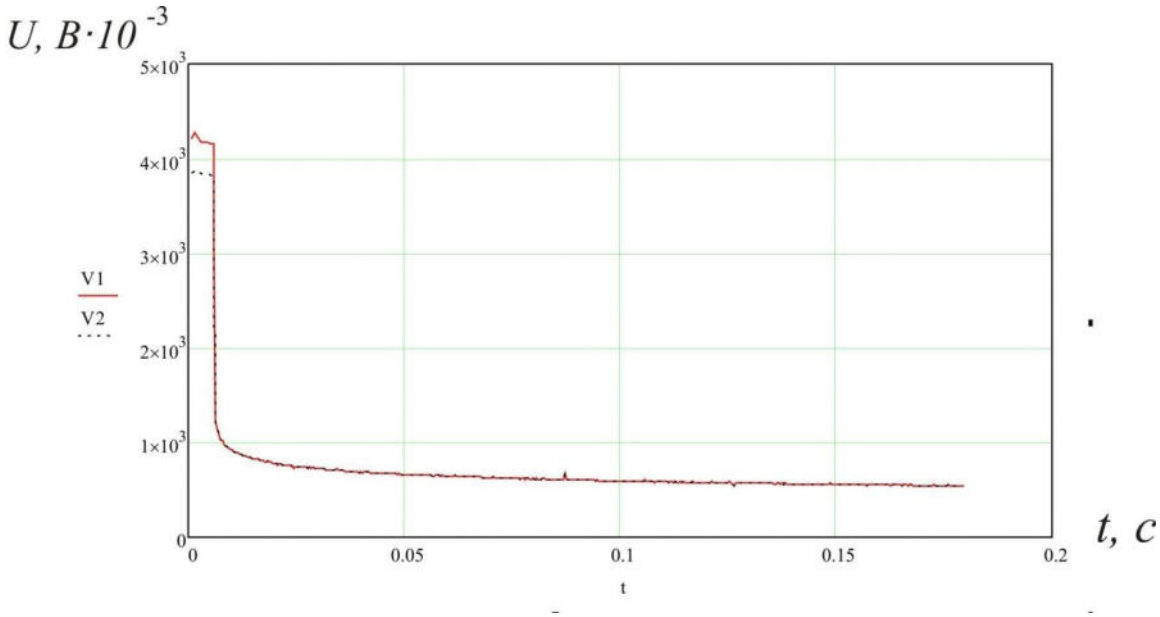


Рис. 4.5. Графік залежності напруги від часу

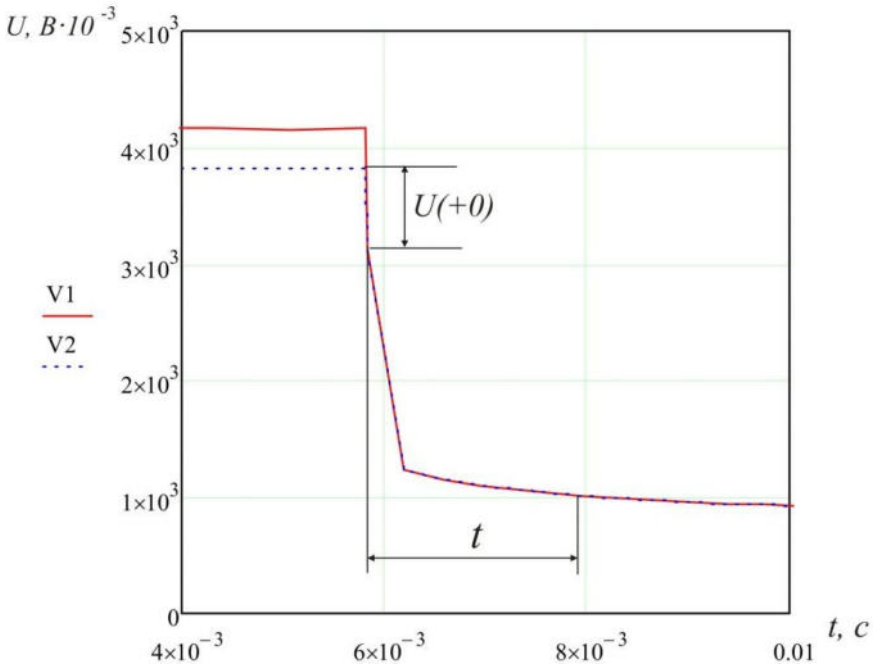


Рис. 4.6. Графік залежності напруги від часу в збільшеному масштабі

2. Знайти $i_{ст}=(U_{жив} - U_{ст})/R_{доп}$.

3. Знайти $r_e = U(+0)/i_{ст}$.

4. Знайти $R_{гр}=U_{ст}/i_{ст} - r_e$.

5. Знайти $C= t/(R_{гр}\cdot \ln(U(+0)/U_{пол}(t)))$.

6. Підставити значення $R_{гр}$, r_e, C в вираз (3.12) та з урахуванням того, що $\omega = 2\pi\cdot f$ побудувати графік залежності модуля передавальної функції від частоти.

Для досліджуваної в даній роботі електрохімічної системи значення параметрів склали: $R_{гр}$=9,178 Ом, r_e=2,012 Ом, $C=204\cdot 10^{-6}$ Ф.

Графік залежності модуля передавальної функції від частоти реверсивного струму показаний на рис. 4.7.

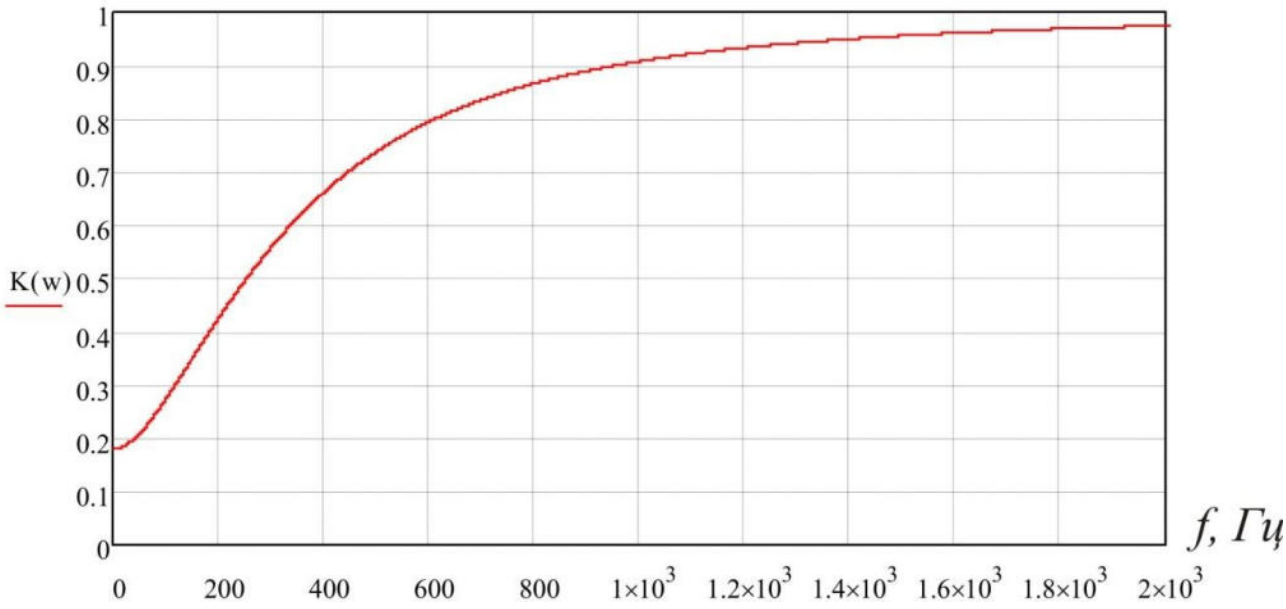


Рис. 4.7. Графік залежності модуля передавальної функції гальванічної системи від частоти реверсивного струму

7. За значенням модуля передавальної функції рівного 0,5 на графіку знаходимо початкове наближення граничної частоти процесу. Для знаходження е точного значення в розробленій програмі застосовується функція root () пакета Mathcad. Для досліджуваної електрохімічної системи

значення граничної частоти процесу склало $f_{пр}$=255 Гц.

Використання розробленого ІВК дозволяє істотно збільшити швидкість знаходження граничної частоти процесу, а також розширити область допустимих значень для керуючих впливів.

З аналізу робіт [46, 47] випливає, що мінімальні тривалості прямого і реверсивного струму при нанесенні нікелевих гальванічних покриттів з електроліту Уоттса складають 0,01 і 0,002 с відповідно. Тоді гранична частота дорівнює 83 Гц. Таким чином, область допустимих значень для керуючих впливів за допомогою ІВК була розширена в 3 рази.

Для визначення граничної частоти без використання ІВК необхідно провести серію експериментальних досліджень з нанесення гальванічного покриття на деталь до тих пір, поки одержуване покриття не стане пухким або перестане осідати. У разі досліджуваної в даній роботі електрохімічної системи було б необхідно провести послідовність експериментів при 10, 100, 200, 300 Гц, а потім 250 Гц. При значенні частоти 300 Гц покриття вийшло б пухким, а, використовуючи метод половинного поділу і розділивши відрізок від 200 до 300 Гц на два вийшло б значення 250 Гц, яке стало б граничним для даної електрохімічної системи.

Таким чином, знадобилося б проведення 5 експериментів з нанесення гальванічного покриття на деталь. Час нанесення покриття становить 50 хвилин без урахування підготовчих операцій. Тоді час пошуку граничної частоти складе 250 хвилин. При використанні ІВК швидкість знаходження граничної частоти процесу обмежена швидкістю дій оператора.

При знаходженні граничної частоти процесу нікелювання з реверсом струму для електрохімічної системи, параметри якої були описані в розділі 2, з використанням розробленого ІВК було витрачено час, якій дорівнював 5 хвилинам з урахування витрат часу на дії оператора. Таким чином, час пошуку обмежень для керуючих впливів зменшився в 50 разів.

4.2. Розробка автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття

Отримані в магістерській дипломній роботі результати обробки експериментальних досліджень і припущення про наявність граничної частоти гальванічного процесу при використанні реверсивного струму повністю узгоджуються з висновками в роботах [25, 262] про те, що геометричні фактори гальванічної системи (конфігурація анода, катода, геометричні розміри гальванічної ванни тощо) істотно впливають на характеристики одержуваного гальванічного покриття. Такий висновок можна зробити на підставі того, що зазначені фактори за своєю природою є складовими елементами, що створюють ємність міжфазової межі електрод-електроліт, яка, як було показано в розділі 3, впливає на граничну частоту досліджуваного технологічного процесу, і, отже, на нерівномірність нанесеного гальванічного покриття.

Як було показано в розділі 1, номенклатура деталей-катодів, на які наноситься гальванічне покриття, є достатньо широкою, тому кожен раз при зміні деталі-катода гранична частота гальванічного процесу з використанням реверсивного струму для одного і того ж технологічного обладнання буде змінюватися, тому має змінюватися і час прямого і зворотного періодів, а для їх знаходження необхідно знову визначати обмеження для керуючих впливів.

Подібні операції, що проводяться в «ручному режимі», можуть негативно вплинути на продуктивність праці операторів технологічного процесу нанесення гальванічного покриття, тому для найбільш ефективної реалізації запропонованих процесів необхідно застосування автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття, що дозволяє проводити як діагностичні дослідження, так і технологічні операції.

Розроблені при виконанні магістерської дипломної роботи функціональні вузли, такі як мостовий інвертор, двоканальний віртуальний

вольтметр, а також програмне забезпечення дозволяють створити автоматизовану систему керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття з реверсом струму. Структурна схема такої системи представлена на рис. 4.8.

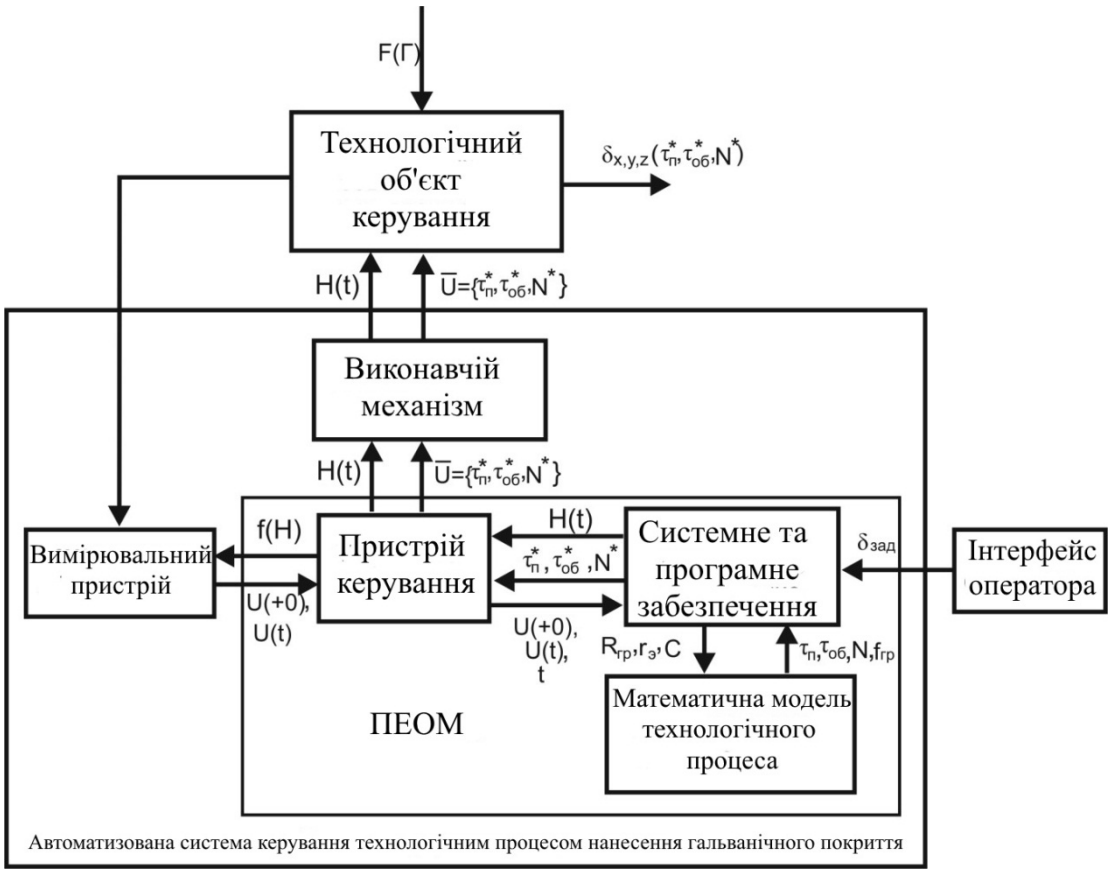


Рис. 4.8. Структурна схема автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття

Система працює наступним чином. У гальванічну ванну (технологічний об'єкт управління), наповнену електролітом, поміщають анод і деталь-катод. Анод підключають до позитивного виходу мостового інвертора, а катод – до негативного. Вимірювальний пристрій (двоканальний вольтметр) підключається згідно зі схемою, наведеною на рис 4.2. Як видно зі схеми системи, для її роботи необхідна наявність двох COM-портів. Через перший COM-порт вимірювальний пристрій з'єднується з ПЕОМ, за

допомогою другого здійснюється управління виконавчим механізмом (мостовим інвертором). Першим етапом роботи системи є визначення граничної частоти гальванічного процесу згідно викладеної раніше методикою. Для отримання необхідних для розрахунку значень параметрів електрохімічної системи використовується розроблена діагностична програма. Отримані дані, записані у файл, вказуються оператором системи в розробленій програмі в пакеті Mathcad. Результатом роботи системи на першому кроці є значення граничної частоти гальванічного процесу $f_{пр}$. На другому етапі проводиться пошук оптимальних значень керуючих впливів для отримання найбільш рівномірного гальванічного покриття за умови $\delta_{min} \geq \delta_{зад}$. Пошук оптимальної тривалості включення прямого і реверсивного струму $\tau^*_{п}$, $\tau^*_{об}$ відбувається за алгоритмом, описаним в розділі 3. З умови отримання мінімальної товщини покриття не менше заданої буде знайдено також загальну кількість періодів включення прямого і реверсивного струму N*. Третій етап роботи системи полягає в тому, що знайдені значення $\tau^*_{п}$, $\tau^*_{об}$, N * оператор автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття заносить в керуючу програму і запускає безпосередньо технологічний процес нанесення гальванічного покриття. Після закінчення даного етапу програма завершить роботу мостового інвертора, а процес нанесення гальванічного покриття буде завершено. Використання розробленої автоматизованої системи управління гальванічним процесом з реверсом струму для нанесення нікелевих покриттів дало збільшення рівномірності на 18,9% в порівнянні із застосуванням тільки прямого струму.

Висновки до розділу 4

1. Для нанесення гальванічних покриттів в режимі з реверсуванням струму і тривалістю імпульсу від 1 мс розроблена автоматизована система керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття, яка дозволяє використовувати наявні випрямні агрегати з недостатніми часовими характеристиками.

2. Розроблений інформаційно-вимірювальний комплекс, що дозволяє на підставі аналізу реакції електрохімічної системи на одиничний вплив стабілізованого струму у формі функції Хевісайда визначити граничну частоту гальванічного процесу з реверсом струму і задати обмеження на керуючі впливи.

3. Використання запропонованої автоматизованої системи керування технологічним процесом нанесення гальванічного покриття з реверсом струму дозволило відмовитися від експериментального методу знаходження обмежень на керуючі впливи, що збільшило швидкість їх знаходження в 50 разів і розширило область допустимих значень в 3 рази. Збільшення рівномірності нікелевих покриттів склало 18,9% у порівнянні з використанням прямого напрямку струму.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Поставлено і вирішено завдання підвищення якості гальванічного покриття відповідно до критерію нерівномірності, що дозволило зменшити нерівність одержуваних покриттів на 18,9%.

2. Процес нанесення гальванічних покриттів формалізований з точки зору оптимізації та управління об'єктом автоматизованого керування, що має частотні властивості. Це дало можливість отримання аналітичних математичних моделей для знаходження граничної частоти імпульсів прямого і реверсивного струму.

3. Удосконалено математичну модель і розроблено методи для визначення граничної частоти гальванічного процесу з реверсом струму, що дозволяє відмовитися від експериментальних методів її знаходження.

4. Розроблено алгоритм функціонування інформаційно-вимірювального комплексу для визначення граничної частоти технологічного процесу нанесення гальванічного покриття з використанням реверсивного струму, що дозволило знизити час, якій витрачається на пошук обмежень для керуючих впливів в 47,3 рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ажогин, Ф.Ф. Гальванотехника. Справочник / Ф.Ф. Ажогин, М.А. Беленький, И.Е. Галль и др. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.

2. Акулич, И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: Учебное пособие / И.Л. Акулич. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 352 с.

3. Александров, В.М. Оборудование цехов электрохимических покрытий: Справочник / В.М. Александров, Б.В. Антонов, Б.И. Гендлер и др. – Л: Машино- строение, 1987. – 309 с.

4. Алексеев, А.Н. Повышение эффективности технологических операций и функционирования оборудования гальванохимической обработки в условиях автоматизированного гальванического производства / А.Н. Алексеев. – М. – Пенза: Новые промышленные технологии, 1997. – 189 с.

5. Ашманов, С.А. Теория оптимизации в задачах и упражнениях: Учебное пособие / С.А. Ашманов, А.В. Тимохов. – СПб.: Издательство Лань, 2012. – 448 с.

6. Байрачний Б.І., Якименко Г.Я., Устаткування електрохімічних виробництв. Гальванотехніка: навч. Посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2008. - 235 с.

7. Орехова, В.В. Теоретические основы гальваностегических процессов / В.В. Орехова, Б.И. Байрачный. – Киев: Выща школа, 1988. – 208 с.

8. Бахчисарьянц Н.Г. Практикум по прикладной электрохимии: учебное пособие для вузов / Н.Г. Бахчисарянц, Ю.В. Борисоглебский, Г.К. Буркат. – Л.: Химия, 1990. – 304 с.

9. Волков, Е.А. Численные методы: Учебное пособие / Е.А. Волков. – СПб.: Издательство Лань, 2008. – 256 с.

10. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник

для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.

11. Городыский, А.В. Вольтамперометрия. Кинетика стационарного электролиза / А.В. Городыский. – Киев: «Наукова думка», 1988. – 176 с.

12. Давыдов, В.Г. Visual C++. Разработка Windows-приложений с помощью MFC и API-функций / В.Г. Давыдов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 576 с.

13. Демидович, Б.П. Основы вычислительной математики: Учебное пособие / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 672 с.

14. Дьяков, И.А. Управление выпрямительными агрегатами электрохимических ванн / И.А. Дьяков // Тез. докл. конференции «Ресурсосберегающие технологии в гальванотехнике». – Севастополь, 1992. – С. 34.

15. Есипов, Б.А. Методы исследования операций: Учебное пособие / Б.А. Есипов. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 256 с.

16. Зубченко, В.Л. Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник / В.Л. Зубченко, В.И. Захаров, В.М. Рогов и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.

17. Каханер, Д. Численные методы и математическое обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш. – М.: Мир, 1998. – 575 с.

18. Колесников, В.А. Экология и ресурсосбережение в электрохимических производствах. Механические и физико-химические методы очистки промывных и сточных вод: учебное пособие / В.А. Колесников, В.И. Ильин. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 220 с.

19. Коллиа, С. Электроосаждение блестящих никелевых покрытий с использованием реверсивного импульсного тока / С. Коллиа, Ф. Котзиа, Н. Спиреллис // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – № 5–6. – С. 23–26.

20. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М.: Химия, 1979. – 352 с.

21. Кузнецов, А.В. Высшая математика. Математическое программирование / А.В. Кузнецов, В.А. Сакович, Н.И. Холод. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 352 с.

22. Лейнекер, Р. Энциклопедия Visual C++ / Р. Лейнекер. – СПб.: Издательство «Питер», 1999. – 1152 с.

23. Лесин, В.В. Основы методов оптимизации: Учебное пособие / В.В. Лесин, Ю.П. Лисовец. – СПб.: Издательство Лань, 2011. – 352 с.

24. Литовка, Ю.В. Метод расчета потенциалов анодов в многоанодной гальванической ванне / Ю.В. Литовка, И.А. Дьяков // Теор. основы хим. технол. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 218 – 221 с.

25. Литовка, Ю.В. Моделирование и оптимизация процесса нанесения гальванических покрытий в условиях реверсирования тока / Ю.В. Литовка, А.В. Романенко, А.В. Афанасьев // Теор. основы хим. технол. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 301 – 304.

26. Литовка, Ю.В. Оптимизация гальванической ванны с подвижными анодами / Ю.В. Литовка, В.А. Тарураев // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Автоматика. Управление. – 1997. – Т. 1, вып. 2. – С. 41 – 48.

27. Малахов, А.И. Коррозия и основы гальваностегии / А.И. Малахов, К.М. Тютина. – М.: Химия, 1977. – 216 с.

28. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – СПб.: Издательство Лань, 2009. – 608 с.

– Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

29. Олафсен, Ю. Visual C++ 6 и MFC. Энциклопедия пользователя / Ю. Олафсен, К. Скрайбнер, К.Д. Уайт. – К.: Диасофт, 2000. – 716 с.

30. Рябенький, В.С. Введение в вычислительную математику / В.С. Рябенький. – М.: Физматлит, 1994. – 336 с.

31. Саймон, Р. Microsoft Windows API. Справочник системного программиста. Второе издание, дополненное: Пер. с англ. / Ричард Саймон. –

К.: ООО «ТИД ДС», 2004. – 1216 с.

32. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 591 с.

33. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1989. – 626 с.

34. Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. – 432 с.

35. Соболь, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболь, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.

36. Срочко, В.А. Численные методы. Курс лекций: Учебное пособие / В.А. Срочко. – СПб.: Издательство Лань, 2010. – 208 с.

37. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

38. Шлугер, М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах / Под ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

39. Шлугер, М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1981. – 216 с.

40. Ямпольский, А.М. Краткий справочник гальванотехника / А.М. Ямпольский, В.А. Ильин. – М.: Машиностроение, 1981. – 210 с.

41. Choo, R.T.C. Mass transfer and electrocrystallisation analyses of nanocrystal-line nickel production by pulse plating / R.T.C. Choo, J.M. Toguri, A.M. El-Sherik, U. Erb // Journal of applied electrochemistry, 1995. – № 25. – p. 384–403.

42. El-Sherik, A.M. Microstructural evolution in pulse plated nickel electrodeposits / A.M. El-Sherik, U. Erb, J. Page // Surface and coatings technology, 1996. – № 88. – p. 70–78.

43. Kollia, C. Nickel plating by pulse electrolysis: textural and microstructural modifications due to adsorption/desorption phenomena / C. Kollia,

N. Spyrellis, J. Am- blard // Journal of applied electrochemistry, 1990. – № 20. – p. 1025–1032.

44. Lindblom, M. Pulse reverse plating for uniform nickel height in zone plates /M. Lindblom, H.M. Hertz, A. Holmberg // American Vacuum Society, 2006. – pp. 2848.

45. Tang, P.T. Improved corrosion resistance of pulse plated nickel through crystallisation control / P.T. Tang, T. Watanabe, J.E.T. Andersen, G. Bech-Nielsen // Journal of applied electrochemistry, 1995. – № 25. – p. 347–352.

46. Tang, P.T. Pulse reversal plating of nickel and nickel alloys for microgalvanics / P.T. Tang // Electrochimica Acta, 2001. – № 47. – p. 61–66.