

ORCID: 0000-0001-8267-8365

Д. І. КОЛОМІЄЦЬ

Викладач кафедри фізики, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси,
Україна,
denyskolomiets95@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3164-1009

В. В. МАНЖАРА

Викладач кафедри АКІТ, ННІ ІНФОТЕХ,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси,
Україна,
manzhara157@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1236-6344

В. А. ЛИТВИН

Кандидат хімічних наук, доцент,
Доцент кафедри хімії та наноматеріалознавства,
Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси,
Україна,
litvin_valentina@ukr.net

DOI:10.31651/2076-5851-2025-115-126

PACS: 81.07.-b, 81.16.-c, 07.05.-t

**РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕАКТОРА ДЛЯ
ГІДРОМЕХАНІЧНОГО СИНТЕЗУ НАНОПОЯСІВ ПЕНТАОКСИДУ ВАНАДІЮ
З КОНТРОЛЕМ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ**

У ході дослідження розроблено автоматизований пристрій для синтезу наноструктур, що забезпечує регулювання та підтримку ключових параметрів перетворення вихідних оксидів у наноструктури. Пристрій здатний автоматично підтримувати задані параметри роботи залежно від характеристик початкових реагентів і цілей експерименту, а також здійснювати запис даних із заданим інтервалом для подальшого аналізу, що зменшує ймовірність помилок і підвищує точність досліджень. Основу пристрою становить мікроконтролерна платформа Arduino Uno, яка керує вузлами установки, зокрема системою нагріву та приводом мішалки. Особливу увагу приділено реалізації методу ротаційної віскозиметрії: у реальному часі вимірюються сила струму та напруга на двигуні, що дозволяє корелювати ці показники зі зміною в'язкості суспензії. Це дає змогу використовувати в'язкість як індикатор кінетики структурних перетворень під час формування нанопоясів пентаоксиду ванадію. Програмне забезпечення забезпечує точний підрахунок обертів за допомогою енкодера та плавне регулювання швидкості, що гарантує стабільність умов експерименту протягом тривалого часу. Автоматизація збору даних і їх збереження у форматі CSV оптимізує обробку результатів. Розроблена установка забезпечує високу відтворюваність синтезу та створює підґрунтя для нових методів характеристики оксидних наноматеріалів. Показано можливість використання в'язкості як інтегрального параметра для моніторингу кінетики структурних перетворень у процесі формування нанопоясів.

Ключові слова: оксиди металів, пентаоксид ванадію, синтез наноматеріалів, кінетика структурних перетворень, гідромеханічний синтез.

1. Вступ

В останні десятиліття оксиди металів є об'єктом інтенсивних досліджень, серед яких особливу увагу привертає пентаоксид ванадію (V_2O_5). Цей матеріал широко вивчається в різних галузях науки і техніки, зокрема в електрохімії, електроніці, фотоніці, окремих напрямках медицини, а також у сфері створення функціональних матеріалів і пристроїв [8]. Пентаоксид ванадію характеризується сукупністю унікальних фізико-хімічних властивостей, що зумовлює його перспективність та стійкий інтерес до розробки й удосконалення методів його синтезу. Завдяки цим властивостям V_2O_5 знаходить застосування у виробництві тонкопліткових транзисторів, а також у системах зберігання та накопичення енергії.

Автоматизація процесів дослідження за допомогою мікроконтролерів, таких як Arduino Uno, може значно спростити та пришвидшити проведення експериментів. Використання та розробка автоматизованих систем дозволяє не лише зекономити час, а також підвищити точність та повторюваність експериментальних результатів, що є критично важливим у наукових дослідженнях [1]. У сучасному синтезі наноматеріалів однією з ключових проблем є досягнення високої точності контролю параметрів процесу, оскільки навіть незначні відхилення можуть суттєво впливати на кінцеві характеристики отриманого продукту. Незважаючи на значний прогрес у синтезі наноструктур оксидів, питання оперативного контролю кінетики їх формування в процесі синтезу залишається недостатньо дослідженим. Дане дослідження присвячене розробці автоматизованого пристрою для синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію, заснованого на мікроконтролерній платформі Arduino Uno. Основною метою роботи є автоматизація процесу синтезу з метою забезпечення контролю ключових параметрів реакції, зокрема температури та швидкості обертання, які визначають умови перебігу процесу та впливають на результати експерименту. Водночас запропонований підхід не обмежується лише автоматизацією, а спрямований на створення системи, здатної забезпечити стабільність та відтворюваність результатів синтезу.

Процес автоматизованого керування параметрами синтезу дає змогу досягти високої точності експериментальних умов і мінімізувати похибки при проведенні наукових досліджень. Це є особливо важливим коли необхідне точне відтворення як умов проведення експерименту, так і отриманих результатів. Завдяки розробленому пристрою також реалізується автоматизований збір експериментальних даних, що зменшує час їх обробки та оптимізує методи подальшого аналізу.

Розроблений пристрій розширює можливості вдосконалення методів синтезу, що є важливим для фундаментальних досліджень у галузі матеріалознавства та для прикладних технологічних застосувань. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, спрямованих на автоматизацію процесів синтезу та вивчення властивостей оксидних наноструктур, а також для розв'язання актуальних технічних завдань у галузях, що інтенсивно розвиваються.

2. Розробка та конструювання автоматизованого пристрою для синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію на основі мікроконтролера Arduino Uno.

Для постановки та реалізації експериментальних досліджень, спрямованих на синтез і дослідженню нанопоясів пентаоксиду ванадію, а також інших оксидів металів, було розроблено прилад, що забезпечує автоматизоване регулювання та реєстрацію ключових параметрів процесу. Застосування розробленого пристрою дозволяє здійснювати контроль умов синтезу та отримувати експериментальні дані, необхідні для

подальшого аналізу й оптимізації параметрів процесу. Це дозволяє перейти від якісного опису процесу синтезу до кількісного аналізу його кінетики на основі експериментальних даних. Зокрема, інтенсивність перемішування визначає характер гідродинамічного режиму, що безпосередньо впливає на ефективну в'язкість і умови формування наноструктур.

Експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення процесів формування наноструктур, показали, що в ході синтезу відбувається зміна ряду параметрів, які можуть бути використані як індикатори росту та утворення наноструктур [8-9]. Це створює передумови для більш глибокого аналізу механізмів формування наноматеріалів і для вдосконалення умов синтезу з метою отримання структур із заданими властивостями.

Для досягнення високої якості синтезу та ефективної оптимізації умов експерименту необхідно контролювати ряд важливих параметрів, зокрема інтенсивність перемішування та температуру середовища. Ці фактори істотно впливають на динаміку реакцій та кінетику структурних перетворень. Оскільки контроль обертів мотора є ключовим етапом процесу, було розроблено спеціалізований пристрій на базі мікроконтролера Arduino Uno. Цей пристрій автоматично регулює оберти мотору та проводить вимірювання сили струму й напруги, що, в подальшому, за принципом ротаційної віскозиметрії, конвертуються у значення в'язкості досліджуваного середовища.

Ротаційна віскозиметрія є методом визначення в'язкості рідин у умовах змінного механічного навантаження. В основі методу лежить вимірювання моменту сили, необхідного для обертання циліндричного елемента, зануреного в досліджуване середовище. Зміни в'язкості суспензії під час синтезу відображають структурні перетворення матеріалу, що дозволяє оцінювати динаміку формування нанопоясів та вплив технологічних параметрів на перебіг процесу. Даний метод визначення в'язкостей досліджуваних суспензій дозволяє корелювати характеристики рідини з умовами синтезу, що забезпечує можливість оптимізації параметрів експерименту. Передбачається, що ефективна в'язкість суспензії визначається концентрацією, розмірами та формою частинок, що формуються в процесі синтезу. Зміни в'язкості можуть розглядатися як інтегральний параметр, чутливий до кінетики зародження і росту наноструктур, зокрема до формування видовжених нанопоясів пентаоксиду ванадію. Слід зазначити, що визначення в'язкості за електричними параметрами двигуна потребує попереднього калібрування на еталонних рідинах. У даній роботі використовується відносний підхід, який дозволяє аналізувати зміни в'язкості в процесі синтезу без прямого визначення її абсолютних значень.

Для реалізації експериментальної установки використано електронні компоненти, що забезпечують керування і реєстрацію ключових параметрів процесу (рис. 1). Контроль стану установки здійснюється за допомогою OLED-дисплея, на якому відображаються швидкість обертання, сила струму та напруга [2]. Вимірювання електричних параметрів двигуна виконано за допомогою модуля INA219 та вбудованого аналого-цифрового перетворювача, з передачею даних через інтерфейс I2C протокол [7]. Функціонально система поділяється на підсистему вимірювання (струм, напруга, оберти) та підсистему керування (регулювання швидкості обертання та температури), що забезпечує стабільність умов синтезу.

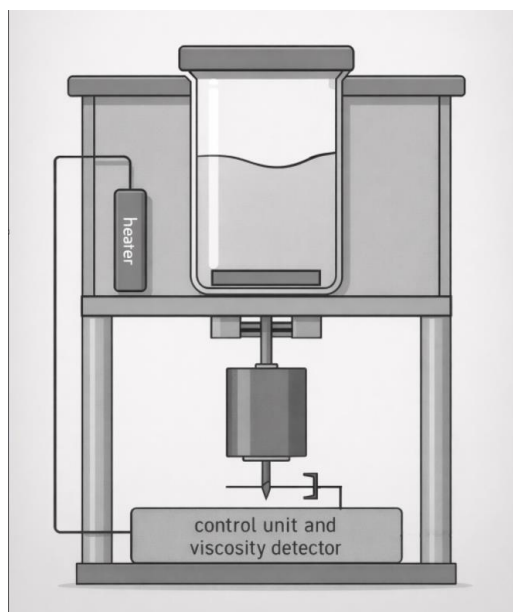


Рис. 1. Схематичне зображення автоматизованого пристрою для синтезу нанопоясів пентаоксиду ванадію на основі мікроконтролера Arduino Uno
Fig. 1. Schematic illustration of an automated device for synthesising vanadium pentoxide nanoribbons based on an Arduino Uno microcontroller

Використання протоколу I2C забезпечує ефективне підключення модулів для вимірювання сили струму, напруги та потужності і має переваги порівняно з іншими інтерфейсами. Протокол функціонує через дві лінії: SDA (Serial Data Line) для передачі даних та SCL (Serial Clock Line) для тактування сигналу [3-5]. Можливість підключення кількох пристроїв до одних ліній була використана при інтеграції OLED-дисплея, що дозволило спростити виготовлення та моделювання друкованої плати, зменшити кількість використаних ліній і полегшити їх розведення. Напруга вимірюється за допомогою вбудованого аналогово-цифрового перетворювача Arduino Uno. Максимальна вимірювана напруга становить 12 В, а 10-бітний перетворювач забезпечує дискретизацію від 0 до 1023 одиниць, що відповідає ціні поділки 0,012 В. Цей рівень точності задовольняє вимоги, необхідні для проведення експерименту. Для збереження експериментальних даних на етапі проектування інтегровано SD-адаптер. З його допомогою фіксуються показники сили струму, напруги та обертів двигуна на цифровий носій. Після завершення експерименту дані зберігаються у форматі “CSV”, що забезпечує зручність імпорту та подальшої обробки в програмному забезпеченні для аналізу.

Особлива увага була приділена вимірюванню обертів мотора та автоматичному регулюванню. Автоматичне регулювання дозволяє підтримувати задані наперед оберти. Це безпосередньо впливає на ефективність та доцільність експерименту. Для вимірювання обертів використовується вбудований в електромотор енкодер. Енкодер дозволяє точно вимірювати кутове положення та оберти мотора [6-7]. Енкодер генерує імпульси, які передаються на мікроконтролер, що обробляє ці сигнали та здійснює перетворення їх у значення обертів. Для цього в програмному забезпеченні передбачено алгоритм, який рахує кількість імпульсів, переводить отримані дані в оберти та обраховує кількість обертів за одиницю часу. Повний алгоритм програми представлено на (рис.2). На ньому видно, що алгоритм переведення імпульсів енкодера в оберти за хвилину знаходиться на початку основного циклу програми. Алгоритм обрахунку обертів складається з двох функцій. Функція *EncA* для рахування імпульси а функція *getDriveSpeed* для рахування обертів.

Функція *EncA* підраховує імпульси. Кількість імпульсів записуються у глобальну змінну *imp*, яка на момент старту програми має значення 0. Функція інкрементує змінну *imp* кожного виклику. Ця дія винесена в окрему для того, щоб реалізувати підрахунок імпульсів паралельно до роботи основної програми через механізм переривання. Кожного разу, коли на *pin 2* плати Arduino Uno приходиться сигнал, викликається функція *EncA*, яка виконується паралельно до виконання основної програми. Далі вже в основній програмі викликається функція *getDriverSpeed*, яка перевіряє чи змінна *imp* досягла значення кількості імпульсів одного оберту. У моторі, який був взятий для розробки приладу це 99 імпульсів. При досягненні цього значення лічильник обертів *rnd_counter* збільшується на один за допомогою інкременту, а лічильнику імпульсів присвоюється значення 0. Кожні п'ять секунд значення лічильника обертів інтерполюються, та вираховуються оберти за хвилину. Для цього змінна *rnd_counter* домножається на 12, щоб отримати оберти за одну хвилину. Для уникнення різкої зміни обертів, береться середнє арифметичне попереднього значення обертів та виміряного. Таким чином реалізовано спрощений пропорційний алгоритм регулювання, який забезпечує стабільність обертів без використання складніших регуляторів. Це може вносити похибку у вимірюваннях в реальному часі, але забезпечує плавність регулювання та стабільність обертів впродовж усього експерименту, який може тривати кілька тижнів, тому цією похибкою було знехтувано. Маючи оберти за хвилину алгоритм корегує швидкість обертів мотора в реальному часі, що є важливим для досягнення стабільності та точності процесу синтезу.

Отримані експериментальні дані записуються у файл з інтервалом 20 хв. Час представлено в мілісекундах; значення 20000 мс, наведено на блок-схемі, використано виключно з метою наочності. Реалізація процедури запису в програмному коді здійснюється за допомогою спеціального лічильника *timeCounter*. Запис даних у файл виконується у разі, коли значення цього лічильника ділиться націло на 4, що зумовлено способом визначення інтервалу часу Δt .

Для обчислення Δt використовується вбудована функція *millis()*, яка повертає кількість мілісекунд від моменту запуску програми. З метою зменшення кількості звернень до цієї функції в алгоритм введено додатковий лічильник *timeCounter*, який забезпечує контроль часових інтервалів між послідовними операціями запису даних.

На (рис. 3) представлено загальний алгоритм основної частини програми. Він ілюструє роботу програми по підрахунку обертів.

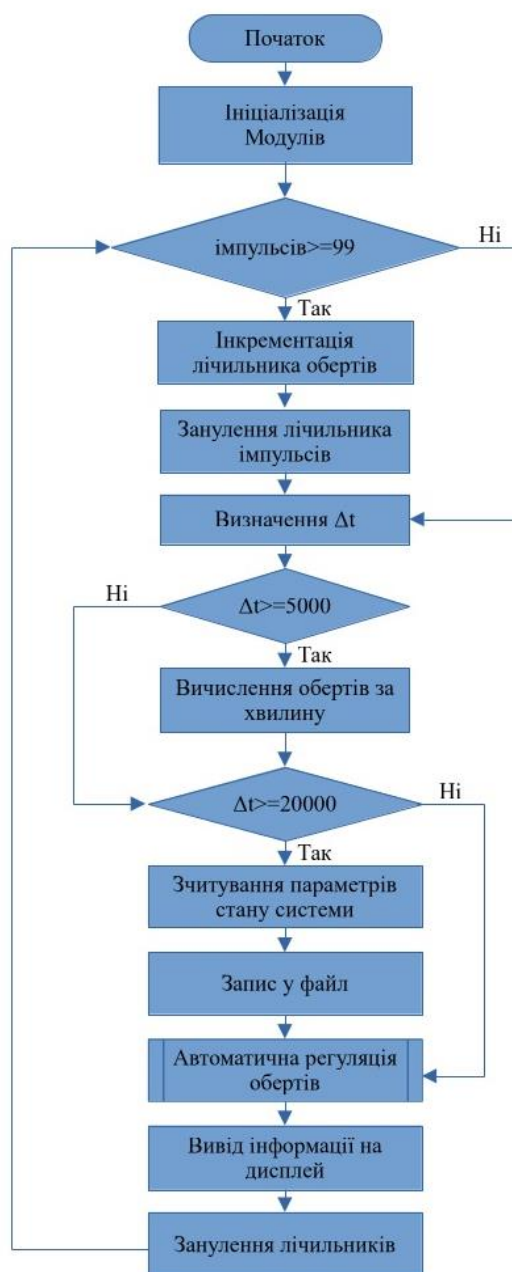


Рис. 2. Блок-схема алгоритму роботи основної частини програми
 Fig 2. Block diagram of the algorithm for the main part of the program

Таким чином, в результаті компоновання вищевказаних елементів та розробки програмного забезпечення, була створена установка, здатна здійснювати автоматичне перемішування водних суспензій, контролюючи всі ключові параметри, що впливають на їх дослідження та забезпечувати відтворюваність та коректність вимірювань.

На (рис. 3) представлена реалізація принципової електричної схеми виготовленого пристрою. Система побудована на базі мікроконтролера Arduino Uno, який здійснює керування та контроль усіма ключовими елементами установки. Однією з основних функцій є регулювання обертів мотора згідно з пропорційним законом. Принцип регулювання полягає в зміні напруги, поданої на мотор, кожні 5 секунд, з урахуванням поточних обертів мотора.

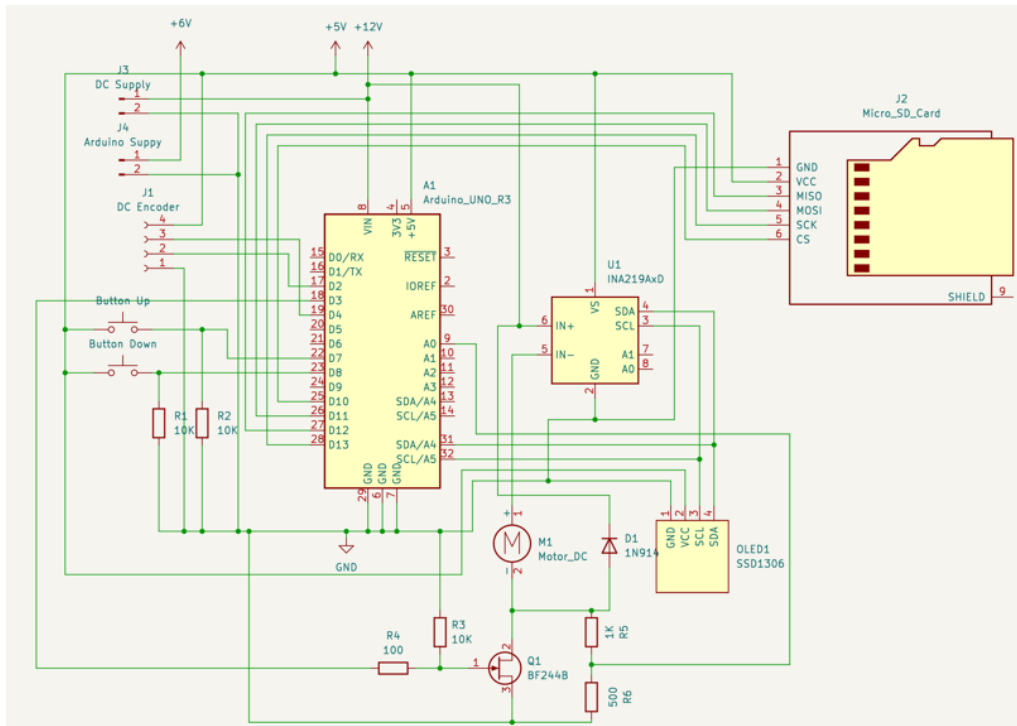


Рис. 3. Принципова електрична схема автоматичної магнітної мішалки з можливістю автоматично контролювати та підтримувати необхідні параметри для синтезу поясків пентоксиду ванадію V2O5 та запису даних на цифровий носій інформації на базі Arduino Uno.

Fig. 3. Schematic diagram of an automatic magnetic stirrer with the ability to automatically control and maintain the necessary parameters for the synthesis of V2O5 vanadium pentoxide belts and record data on a digital storage device based on Arduino Uno.

Ці дані використовуються в функції *automate()*, де обчислюється середнє арифметичне між поточними та попередніми показниками обертів, що забезпечує плавне та стабільне регулювання швидкості обертання мотора. Крім того, кожні 20 секунд система проводить вимірювання сили струму та напруги, а отримані значення виводяться на OLED дисплей, що дає можливість оператору відслідковувати ключові параметри.

Для управління мотором використовується вбудований цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП), для керування якого використовується функція *analogWrite*, яка приймає номер піна та значення в межах від 0 до 255 як параметри. Значення від 0 до 255 пропорційно відповідає напрузі від 0 до 5 вольт. Швидкість обертання двигуна визначається прикладеною напругою та механічним навантаженням, тоді як сила струму відображає рівень навантаження та опір середовища. Мотор, який був взятий для створення пристрою може приймати максимум 12 вольт. Arduino Uno не може забезпечити споживання мотору, тому мотор живиться окремо від живлення плати Arduino Uno. Для опосередкованого керування напругою, що подається на електродвигун, було використано польовий транзистор та додаткові елементи електричної схеми, призначені для забезпечення стабільної роботи приладу. Транзистор увімкнено в коло живлення двигуна з номінальною напругою 12 В шляхом послідовного підключення його стоку та витоку. Керувальний сигнал на затвор транзистора подається з плати Arduino Uno через обмежувальний резистор, при цьому додатково використано підтягуючий резистор до землі. Така схема керування забезпечує можливість регулювання напруги, що подається на двигун, з кроком 0,047 В, чого достатньо для

підтримання сталих обертів. Стабільність швидкості обертання є визначальним чинником для формування відтворюваних умов синтезу.

Задання початкової швидкості обертання здійснюється двома способами. Пріоритетним є зчитування значення з файлу: у файлі, до якого надалі записуються експериментальні дані, перший рядок містить значення початкових обертів. За наявності файлу та коректного зчитування даних встановлюється саме це значення, що забезпечує можливість відновлення роботи програми після короткочасних або тривалих перебоїв електроживлення. Альтернативний спосіб передбачає задання обертів за допомогою органів керування приладу. Для цього використовуються дві тактові кнопки, призначені для збільшення та зменшення швидкості обертання. Після зміни заданого значення воно відображається на OLED-дисплеї, тоді як фактична зміна обертів відбувається з певною затримкою. Програмне забезпечення здійснює перевірку відповідності фактичної швидкості обертання заданому значенню та в автоматичному режимі підбирає необхідну напругу, що подається на електродвигун.

Індикація включає у себе показник скважності ШІМ, яка в цьому конкретному випадку є відносною потужністю мотору. Під умовною потужністю відображаються бажані та реальні оберти. В другому стовпчику відображаються напруга та силу струму. Початкова інформація та системні повідомлення виводяться при старті на дисплеї.

З метою забезпечення зручності монтажу та компактності конструкції була спроектована та виготовлена друкована плата [10] методом хімічного витравлювання міді. Зазначений метод реалізується у два основні етапи. На першому етапі здійснюється термічне перенесення топології спроектованої друкованої плати на текстоліт. На (рис. 5) наведено шаблон друкованої плати.

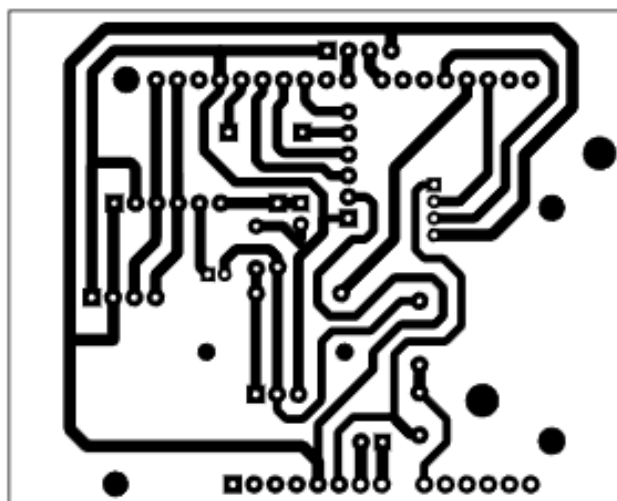


Рис. 5. Шаблон друкованої плати
Fig. 5. Print circuit board layout

Шаблон друкованої плати роздруковується на глянцевому папері з використанням лазерного принтера. Це є принципово важливим технологічним аспектом, оскільки лазерний друк здійснюється за допомогою тонера, а не фарби. Тонер це порошкоподібний матеріал, який під дією температури спікається та утворює суцільний шар на поверхні паперу. На відміну від фарб, тонер не проникає у структуру паперу, а залишається на його поверхні, що забезпечує можливість перенесення тонера на інші поверхні, а товщина шару тонера після перенесення достатня для захисту мідного покриття від взаємодії з травильним розчином. Перенесення тонерного зображення на мідну поверхню текстоліту здійснюється шляхом термічної обробки. Для цього може

бути використаний термопрес, який забезпечує необхідну температуру та рівномірний нагрів поверхні. Після завершення термічного перенесення паперову основу видаляють. Для полегшення цього процесу зняття паперу виконують під проточною водою, що дозволяє уникнути пошкодження сформованого тонерного шару.

Результатом першого етапу є перенесення тонерного зображення на мідний шар текстоліту. На наступному етапі підготовлену плату занурюють у травильний розчин на основі H_2O_2 , $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ та NaCl . У ході хімічної реакції відбувається розчинення відкритих ділянок міді, тоді як мідь, захищена тонерним шаром, не вступає у взаємодію з розчином. Після завершення процесу витравлювання, плату очищають від залишків тонера та просвердлюють отвори для монтажу електронних компонентів. Застосування роз'ємних з'єднань для підключення окремих модулів (INA219, OLED-дисплея, електродвигуна тощо) спрощує процес складання плати в корпусі та забезпечує можливість оперативної заміни елементів у разі необхідності. З урахуванням тривалості експерименту реєстрація вимірювальних даних на SD-карту здійснюється з інтервалом 20 хвилин (час запису в файл можна змінювати). До файлу у форматі CSV записуються значення сили струму, напруги та потужності, які надалі використовуються для комплексного аналізу та інтерпретації експериментальних результатів у поєднанні з іншими отриманими даними.

Другим ключовим параметром синтезу нанопоясків є температура. Для підтримки температури на одному рівні до приладу інтегровано готовий прилад. Цей прилад в своїй будові має реле для підключення нагрівного елементу та термодатчик для контролю температури. Нагрівний елемент не нагріває безпосередньо суспензію. Він нагріває воду, в яку занурюється скляна ємність з досліджуваною суспензією. Таким чином, нагрівання суспензії відбувається опосередковано. Прилад може бути запрограмований тримати задану температуру. При зниженні температури нижче заданої він подає живлення на нагрівний елемент, який підігріває воду, яка вже передає температуру суспензії. При досягненні бажаної температури пристрій вимикає живлення нагрівного елементу. Таким чином експеримент протікає за сталої температури, що підвищує якість синтезу нанопоясків та запезпечує повторюваність результатів.

3. Висновки

Результатом проведеного дослідження є розробка автоматизованої установки для синтезу нанопоясків пентаоксиду ванадію (V_2O_5) на базі Arduino Uno, призначеної для контролю та автоматизації процесу. Запропонована система забезпечує можливість безперервного моніторингу параметрів процесу синтезу та створює основу для подальшого кількісного дослідження кінетики формування наноструктур. Установка забезпечує контроль ключових параметрів, таких як температура та оберти мотора, а також вимірювання сили струму, напруги та в'язкості суспензії в автоматичному режимі. Такий підхід дозволяє підвищити точність і відтворюваність експериментальних даних, що є важливим для подальших наукових досліджень та аналізу даних. Функція автоматичного запису даних на SD-карту забезпечує збереження інформації про силу струму, напругу та оберти мотора у форматі CSV, що спрощує подальшу обробку та аналіз за допомогою стандартних програмних засобів. Регулярний запис кожні 20 хвилин дозволяє виконувати детальний контроль за ходом експерименту без необхідності ручного втручання. Установка здатна працювати автономно, зберігаючи працездатність під час короткочасного знеструмлення. Максимальна споживана потужність пристрою для перемішування складає 50 Вт, що дозволяє використовувати зарядну станцію як джерело безперебійного живлення під час проведення експериментів. Завдяки своїм перевагам, розроблений пристрій не лише підвищує ефективність синтезу нанопоясків, але й істотно спрощує весь процес проведення експерименту, знижуючи ймовірність

помилки та забезпечуючи точний контроль параметрів. Використання цифрових технологій та автоматизації робить цей пристрій чудовим інструментом для наукових досліджень у галузі синтезу та досліджень наноматеріалів.

Запропонований підхід створює передумови для встановлення кількісного зв'язку між параметрами перемішування, зміною в'язкості середовища та морфологією сформованих нанопоясів пентаоксиду ванадію. У даній роботі основний акцент зроблено на розробці експериментальної установки; детальні результати дослідження кінетики синтезу та морфології наноструктур будуть наведені у наступних роботах. Крім того, потенціал застосування цієї установки виходить за межі наукових лабораторій: вона може стати ключовим елементом промислових процесів для виробництва високоякісних наноструктур. Це відкриває нові можливості для розвитку технологій у багатьох галузях, включаючи електроніку, фотоніку тощо. Таким чином, результати нашого дослідження підкреслюють важливість інтеграції автоматизації в процеси синтезу наноматеріалів, що сприятиме не лише підвищенню продуктивності, але й забезпечить стабільність та надійність отриманих результатів в умовах різноманітних експериментальних досліджень.

Подяки

Автори вдячні Віталію Андрійовичу Дідуку за допомогу в постановці задачі та змістовні дискусії. Статтю підготовлено за результатами прикладного дослідження «Гідромеханічний синтез наноструктурного пентаоксиду ванадію та дослідження його властивостей» (номер державної реєстрації 0125U001491) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

Список використаної літератури

1. Antão, P. P. Development of an automated Arduino-based UV-C photocatalytic system for pollutant degradation studies. /Antão, P. P., Melquíades, S. O., Batista, J. V., & Castro, T. J. // Measurement Science and Technology. – 2025. – V. 36.
2. Barrett Steven F. Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Third Edition / Steven F. Barrett. // Springer Nature. – 2022. – P. 491. Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79864-1>
3. Dogan I. PIC microcontroller projects in C. Basic to advanced / Dogan I. // Elsevier – 2014. – P. 639. – ISBN-13: 978-0-08-099924-1
4. Goyal D. Design and Development of Arduino-Based Four-Channel Data Acquisition System with Digital Temperature Control for Chemiresistive Sensors. / Goyal D., Patra, S., Sapre, A., Kaur, M., & Ramgir, N. S. // Sensing and Imaging. – 2024. – V. 25(1). – P. 30.
5. Hnatiuk M. High-throughput and versatile design for multi-layer coating deposition using lab automation through Arduino-controlled devices. / Hnatiuk M., Kimball D., Kolanthai E., Neal C. J., Kumar U., Sakthivel T. S., Seal S. // Review of Scientific Instruments. – 2021. – P.92(8).
6. Koe W. S. An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane / W. S. Koe, J. W. Lee, W. C. Chong, Y. L. Pang, L. C. Sim // Environmental Science and Pollution Research. – 2020 – V. 27. – P. 2522-2565.
7. Perissé Moreira, M. Automation of a low-cost device for flow synthesis of iron oxide nanoparticles. / Perissé Moreira M., Grasseschi D. // Journal of Nanoparticle Research. –2022. – V. 24(5), – P. 93.

8. Wang Z. L. Nanobelts, Nanowires, and Nanodiskettes of Semiconducting Oxides – From Materials to Nanodevices / Z. L. Wang // *Advanced Materials*. – 2003. – V. 15. – P. 432-436. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/adma.200390100>
9. Xianhong R. Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V₂O₅ nanobelts for high-energy battery applications / R. Xianhong, T. Yuxin, O. Malyi, A. Gusak, Zhang Y. // *Journal of Nano Energy*. – 2016. – V. 22. – P. 583-593. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.001>
10. Ванін В. В. Інженерна графіка / Ванін В. В., Перевертун В. В., Надкернична Т. М., Власюк Г. Г. // К.: Видавничка група BNV. – 2009. – с 400.

References:

1. Antão, P. P. Development of an automated Arduino-based UV-C photocatalytic system for pollutant degradation studies. / Antão, P. P., Melquíades, S. O., Batista, J. V., & Castro, T. J. // *Measurement Science and Technology*. – 2025. – V. 36.
2. Barrett Steven F. *Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Third Edition* / Steven F. Barrett. // Springer Nature. – 2022. – P. 491. Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79864-1>
3. Dogan I. *PIC microcontroller projects in C. Basic to advanced* / Dogan I. // Elsevier – 2014. – P. 639. – ISBN-13: 978-0-08-099924-1
4. Goyal D. Design and Development of Arduino-Based Four-Channel Data Acquisition System with Digital Temperature Control for Chemiresistive Sensors. / Goyal D., Patra, S., Sapre, A., Kaur, M., & Ramgir, N. S. // *Sensing and Imaging*. – 2024. – V. 25(1). – P. 30.
5. Hnatiuk M. High-throughput and versatile design for multi-layer coating deposition using lab automation through Arduino-controlled devices. / Hnatiuk M., Kimball D., Kolanthai E., Neal C. J., Kumar U., Sakthivel T. S., Seal S. // *Review of Scientific Instruments*. – 2021. – P.92(8).
6. Koe W. S. An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane / W. S. Koe, J. W. Lee, W. C. Chong, Y. L. Pang, L. C. Sim // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020 – V. 27. – P. 2522-2565.
7. Perissé Moreira, M. Automation of a low-cost device for flow synthesis of iron oxide nanoparticles. / Perissé Moreira M., Grasseschi D. // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2022. – V. 24(5), – P. 93.
8. Wang Z. L. Nanobelts, Nanowires, and Nanodiskettes of Semiconducting Oxides – From Materials to Nanodevices / Z. L. Wang // *Advanced Materials*. – 2003. – V. 15. – P. 432-436. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/adma.200390100>
9. Xianhong R. Ambient dissolution-recrystallization towards large-scale preparation of V₂O₅ nanobelts for high-energy battery applications / R. Xianhong, T. Yuxin, O. Malyi, A. Gusak, Zhang Y. // *Journal of Nano Energy*. – 2016. – V. 22. – P. 583-593. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.001>
10. Vanin V. V. *Engineering graphics* / Vanin V. V., Perevertun V. V., Nadkernychna T. M., Vlasuk H. H. // Kyiv.: BNV Publishing Group. – 2009. – с 400.

D. I. KOLOMIETS

Lecturer of the Department of Physics, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
denyskolomiets95@gmail.com

V. V. MANZHARA

Lecturer of the Department of ACIT, The Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine,
manzhara157@gmail.com

V. A. LITVIN

Candidate of chemical sciences, associate professor,
Department of Chemistry and Nanomaterials Science
Bohdan Khmelnytskyi Cherkasy National University, Cherkasy, Ukraine,
litvin_valentina@ukr.net

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED REACTOR FOR THE HYDROMECHANICAL SYNTHESIS OF VANADIUM PENTOXIDE NANOBELTS WITH PROCESS PARAMETER CONTROL

DOI:10.31651/2076-5851-2025-115-126

PACS: 81.07.-b, 81.16.-c, 07.05.-t

In this study, an automated device for the synthesis of nanostructures was developed, enabling precise regulation and maintenance of key parameters for the transformation of precursor oxides into nanostructured materials. The system is capable of automatically sustaining predetermined operating conditions depending on the properties of the starting reagents and the specific objectives of the experiment, while simultaneously recording data at defined intervals for subsequent analysis. This approach significantly reduces experimental errors and enhances the accuracy and reproducibility of the results. The core of the device is based on the Arduino Uno microcontroller platform, which controls critical components of the setup, including the heating system and the stirrer drive. Particular attention was given to the implementation of rotational viscometry, wherein real-time measurements of current and voltage on the motor enable direct correlation of these parameters with changes in the suspension's viscosity. This allows the viscosity to serve as an indicator of the kinetics of structural transformations during the formation of vanadium pentoxide nanobelts. The device software incorporates algorithms for precise rotation counting using an encoder and smooth speed control, ensuring stable experimental conditions over extended periods, which can last several weeks. Automated data acquisition and storage in CSV format further optimize the subsequent processing and analysis of experimental results. The developed system not only ensures high reproducibility of the synthesis process but also provides a platform for advancing characterization methods of oxide nanomaterials and exploring new approaches in nanostructure fabrication.

Keywords: metal oxides, viscometry, vanadium pentoxide, synthesis of nanomaterials, kinetics of structural transformations, hydromechanical synthesis.

Одержано редакцією 07.09.2025
Прийнято до друку 16.10.2025