

## **РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЧОЇ ПРОГРАМИ НАМОТКИ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ОБОЛОНОК ІЗ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Юхим Мигович*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9773-0751>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

*Іван Карпович*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3633-8532>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

*Світлана Клименко*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2005-9993>

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

### **Вступ**

Розробка програмного забезпечення для верстату з намотки вісесиметричних оболонок з полімерних композитних матеріалів є актуальною темою в контексті сучасного виробництва високотехнологічних матеріалів. Зростаючий попит на легкі та міцні композитні матеріали в різних галузях промисловості, таких як авіація, автомобілебудування, суднобудування та будівництво, підкреслює важливість удосконалення технологій їх виготовлення. Однією з ключових технологій є намотка вісесиметричних оболонок, що дозволяє створювати високоякісні вироби зі складною геометрією.

Однак, незважаючи на значний прогрес у технології намотки, існує ряд викликів, пов'язаних із точністю та ефективністю процесу, що може бути вирішено за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. В цьому контексті, розробка програмного забезпечення для управління верстатом з намотки є критично важливою для забезпечення високої якості кінцевих виробів, зниження відходів матеріалу та оптимізації виробничих процесів. Сучасні програмні рішення для намотування композитних матеріалів повинні враховувати широкий спектр параметрів, щоб забезпечити однорідність і цілісність композитної оболонки. Перш за все, необхідно враховувати натяг нитки, який безпосередньо впливає на рівномірність укладки матеріалу та запобігає утворенню напружень і дефектів в готовій оболонці. Важливо, щоб програмне забезпечення могло динамічно контролювати та регулювати натяг джгута в реальному часі, реагуючи на зміни в умовах процесу.

Швидкість обертання шпинделя верстата також є важливим параметром, оскільки вона визначає швидкість подачі матеріалу та впливає на якість і точність укладки шарів композиту. Програмне забезпечення повинно забезпечувати точний контроль над швидкістю обертання, враховуючи при цьому інерційні характеристики системи та механічні властивості матеріалу.

Точність укладки матеріалу є ще одним важливим аспектом, що впливає на структурну цілісність і механічні властивості готового виробу. Програмне забезпечення має забезпечувати високу точність позиціонування укладального елемента, мінімізуючи відхилення від заданих траєкторій. Це включає інтеграцію сенсорних систем для моніторингу положення та корекцію траєкторій в режимі реального часу.

Метою цього дослідження є створення ефективного програмного забезпечення отримання програмного коду для намотки вісесиметричних оболонок, яке в майбутньому дозволить покращити процес виробництва композитних матеріалів. На початковому етапі використовується комплексний підхід, що включає моделювання процесу намотки, та їх попереднє тестування. Особливу увагу потрібно приділити розробці інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу користувача, який дозволить операторам легко налаштувати і контролювати параметри намотки в режимі реального часу.

Очікується, що результати цього дослідження сприятимуть підвищенню ефективності виробництва композитних оболонок, зменшенню виробничих витрат і покращенню якості кінцевих виробів. Теоретичні напрацювання та практичні результати можуть бути використані для подальшого розвитку технологій намотки композитних матеріалів та їх впровадження в різних галузях промисловості. Таким чином, це дослідження має значну теоретичну і практичну цінність, оскільки воно пропонує інноваційні рішення для актуальних проблем сучасного виробництва композитних матеріалів.

## **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ**

На початковому етапі розробки програмного забезпечення важливо здійснити детальний аналіз вимог. Насамперед потрібно визначитися з типом намотувального верстату та допоміжних систем, що складає виробничий комплекс. Це надає інформацію щодо розміру та ваги намотувальних виробів, а також визначає швидкісні та динамічні характеристики, технологічні параметри виготовлення деталей. Потрібно враховувати кількість одночасно керуємих осей, їх кінематичні характеристики та точність.

До прикладу візьмемо лабораторні верстати компанії X-Winder

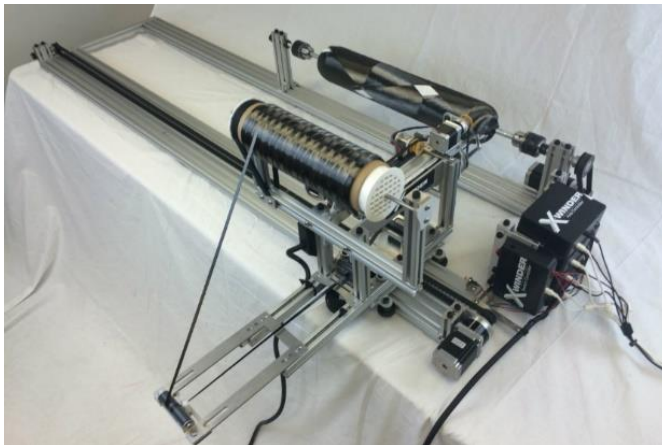
(див. Рис. 1-2), на основі яких виведемо початкові обмеження та вимоги до програмного забезпечення:



**Рисунок 1 – Верстат 2-осьовий, модель 2X-23**

Характеристики 2X-23:

Довжина: до 20 футів (3 м), ширина оправки: до 8 дюймів (200 мм). Максимальна частота обертання оправки: 90 обертів. Максимальна швидкість каретки: 8 дюймів/с (200 мм/с). Натяг нитки: регульований фрикційний механізм ремня. Електроніка: блок контролера перемикачів та блок контролера 2 осей з USB-кабелями.



**Рисунок 2 – Верстат 4-осьовий, модель 4X-23**

### Характеристики 4X-23:

Довжина: до 20 футів (3 м). Ширина оправки: до 10 дюймів (250 мм). Максимальна швидкість обертання оправки: 90 обертів. Максимальна швидкість переміщення: 8 дюймів/с (200 мм/с). Натяг нитки: регульований фрикційний механізм ременя. Електроніка: блок контролера перемикачів та блок контролера 4 осей з USB-кабелями.

Інформація про ці станки надає кілька обмежень для програмного забезпечення. Типи верстатів (з фіксованою головою, дво- та тривісні, багатівісні) мають свої особливості управління та руху, що вимагає від програмного забезпечення здатності працювати з різними типами верстатів. Габаритні обмеження станків впливають на оптимізацію траєкторій руху, щоб виготовлені деталі відповідали встановленим габаритам. Висока швидкість руху та потреба в точності вимагають ефективного керування швидкістю та надійного контролю над рухом верстатів. Програмне забезпечення також повинно враховувати електричні та механічні параметри станків, а також заходи безпеки при роботі з обладнанням. Також важливо, щоб програмне забезпечення було сумісним з електронікою верстатів, для правильного функціонування всього комплексу обладнання.

Наступним кроком є розрахунок траєкторії вкладання джгута та подальше моделювання процесу намотки. Це включає створення математичних і комп'ютерних моделей, які дозволять симулювати процес намотки і оцінити вплив різних параметрів на якість і ефективність виробництва. Моделювання також допоможе у визначенні вимог до програмного забезпечення та його функціональних можливостей.

Типи програм намотування (назви умовні, відповідно до призначення шарів, див. Рис. 3):

1. Геодезичні силові: забезпечують осьову міцність намотуваних виробів, намотування здійснюється по основному контуру виробу.

2. Геодезичні армуючі: забезпечують міцність з'єднання вузлів з основним корпусом, намотування виконується за допомогою фальшдниць. Армуючі шари підвищують міцність лише циліндричної частини корпусу.

3. Кільцеві: забезпечують окружну міцність циліндричної частини виробу.

4. Перехідні: служать для безперервного переходу від геодезичної намотки до кільцевої і навпаки.

5. Програми сухого намотування: використовуються для посилення корпусу в потрібних місцях і при формуванні вузлів з'єднання.

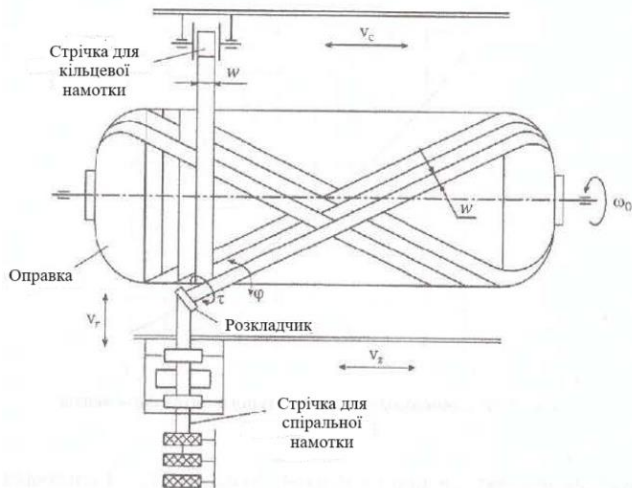


Рисунок 3 – Схема кільцевої та спіральної намотки

Геодезична лінія з кутом намотки  $\alpha$  на поверхні тіла обертання з рівними полюсними отворами однозначно визначається параметром  $\rho_0$  – радіусом полюсного отвору (називається сталою Клеро, див. Рис. 4). При цьому кут намотки  $\alpha$  на поверхні обертання визначається (1):

$$\alpha(z) = \text{asin}\left(\frac{\rho_0}{\rho(z)}\right) \quad (1)$$

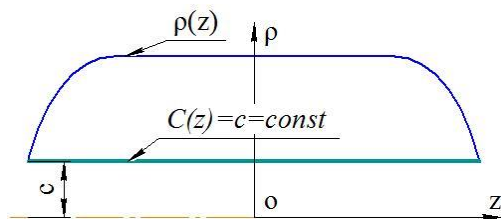


Рисунок 4 – Стала Клеро

При нерівнополюсній оправці (рис. 5) не існує цілісної геодезичної лінії в межах геометрії оправки (геодезичні лінії зі сталою Клеро ліворуч і праворуч існують, але не з'єднуються). У таких випадках намотка здійснюється з відхиленням від геодезичних траєкторій. Допустима величина такого відхилення  $\text{tg}(\theta) \leq \mu$  входить як параметр до диференціального рівняння (2) для розрахунку функції Клеро (рис. 6):

$$C'(z) = \mu \left( \frac{C^2}{\rho^2} - \rho \rho'' \left( 1 - \frac{C^2}{\rho^2} \right) / (1 + \rho'^2) \right) \quad (2)$$

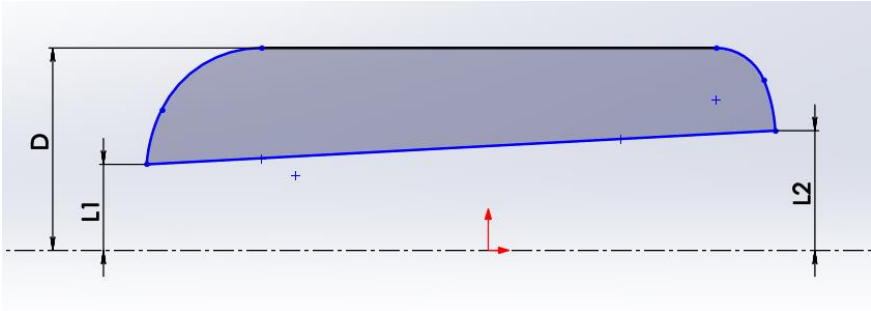


Рисунок 5 – Нерівнополюсна оправка

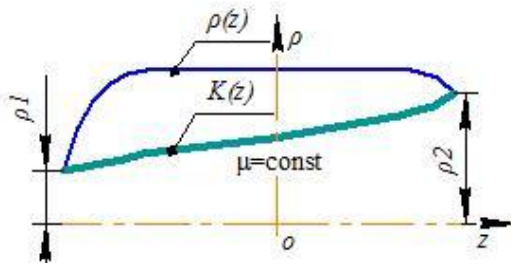


Рисунок 6 – Функція Клеро

Після цього слід перейти до розробки алгоритмів управління верстатом. Ці алгоритми повинні забезпечувати точний контроль над параметрами намотки, такими як натяг нитки, швидкість обертання та кут намотки. Важливо розробити алгоритми, які будуть адаптивними і зможуть автоматично коригувати параметри у разі виявлення відхилень від заданих значень. Це забезпечить високу якість і однорідність композитних оболонок.

Програмне забезпечення повинно включати основні функції управління верстатом і мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача. Важливо, щоб оператори могли легко налаштовувати і контролювати параметри намотки в режимі реального часу (див. Рис. 7). На цьому етапі також необхідно передбачити можливості для інтеграції програмного забезпечення з іншими системами автоматизації виробництва.

Тестування є заключним етапом початкової фази розробки. Тестування повинно проводитись як в лабораторних умовах, так і на

реальних виробничих установках. Це дозволить виявити та виправити можливі помилки, оцінити ефективність і надійність програмного забезпечення, а також перевірити його відповідність вимогам. За результатами тестування можуть бути внесені необхідні зміни і вдосконалення в програмне забезпечення.

## **ВИСНОВКИ**

В результаті дослідження вимог та обмежень для створення необхідного програмного забезпечення було розроблено технічне завдання та визначено етапи виконання робіт при розробці програмного забезпечення.

Завершення початкового етапу створить міцну основу для подальшого розвитку програмного забезпечення, його впровадження та вдосконалення у процесі експлуатації. Це дозволить забезпечити високу якість виробництва вісесиметричних оболонок з полімерних композитних матеріалів та задовольнити зростаючий попит на ці високотехнологічні вироби.

## **ПОСИЛАННЯ**

1. Wu, X., Tang, Y., & Li, W. (2023). Advanced Design and Analysis of Composite Cylinders for High-Performance Applications. *Journal of Composite Materials*, 57(3), 345-362. <https://doi.org/10.1177/00219983221112743>
2. Schmidt, H., & Ma, L. (2021). Winding Technology and Its Applications in Composite Manufacturing. *Materials*, 14(15), 4123. <https://doi.org/10.3390/ma14154123>
3. Brown, D., & Wilson, J. (2022). Simulation and Optimization of Filament Winding Processes Using CAD/CAM Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(4), 1829-1845. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09221-3>
4. Chen, L., & Zhang, Y. (2020). Integrated Software Solutions for Automated Winding Machines. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(5), 3010-3019. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2954967>