

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
Факультет електроніки та інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Петро ЛЕОНТЬЄВ

\_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня бакалавр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Автоматизація процесу нанесення нанотрубок на гранулянт»

Здобувача групи СУ-91

Дрозденко Олександр Сергійович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ДРОЗДЕНКО

Керівник: завідувач кафедри КСУ, к. т. н. Леонт'єв П.В.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

| Ном.поз | Формат | Позначення        | Найменування                               | Кількість аркушів | № екз. | Примітки |
|---------|--------|-------------------|--|-------------------|--------|----------|
|         |        |                   | <u>Документація загальна</u>               |                   |        |          |
|         |        |                   | <u>Застосована</u>                         |                   |        |          |
| 1       |        |                   | Завдання кафедри                           | 1                 |        |          |
|         |        |                   | <u>Новорозроблена</u>                      |                   |        |          |
| 2       |        | ТЗ                | Технічне завдання                          | 2                 |        |          |
| 3       |        |                   | Анотація                                   | 1                 |        |          |
| 4       | A4     | СУ-91 6.151.01 ПЗ | Пояснювальна записка                       | 43                |        |          |
|         |        |                   | <u>Документація конструкторська</u>        |                   |        |          |
|         |        |                   | <u>Новорозроблена</u>                      |                   |        |          |
| 5       | A1     | СУ-91 6.151.01 A2 | Система. Функціональна схема автоматизації | 1                 |        |          |
| 6       | A3     | СУ-91 6.151.01 A1 | Система. Структурна схема                  | 1                 |        |          |
| 7       | A4     | СУ-81 6.151.01 A3 | Схема принципово-електрична                | 29                |        |          |

|                  |             |                     |               |             |  |             |                |
|------------------|-------------|---------------------|---------------|-------------|--|-------------|----------------|
|                  |             |                     |               |             | <b>СУ-91.6.151.01.ДП</b>   |             |                |
| <b>Змн.</b>      | <b>Арк.</b> | <b>№ докум.</b>     | <b>Підпис</b> | <b>Дата</b> |  |             |                |
|                  |             | Олександр ДРОЗДЕНКО |               |             | <b>Літ.</b>  | <b>Арк.</b> | <b>Аркушіє</b> |
|                  |             | Петро ЛЕОНТЬЄВ      |               |             |  |             |                |
| <b>Реценз.</b>   |             | Петро ЛЕОНТЬЄВ      |               |             | <b>СумДУ, СУ-91</b>  |             |                |
| <b>Н. Контр.</b> |             |                     |               |             |  |             |                |
| <b>Затверд.</b>  |             |                     |               |             |  |             |                |
|                  |             |                     |               |             | <b>Автоматизована система нанесення нанотрубок на гранулянт.<br/>Відомість проєкту</b> |             |                |

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

Петро ЛЕОНТЬЄВ

\_\_\_\_\_ 2023 р.

### ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра здобувачу вищої освіти  
Дрозденку Олександрю Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизація процесу нанесення нанотрубок на гранулянт затверджена наказом ректора СумДУ № 0236-VI від "14" березня 2023р.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи " 01 " червня 2023 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація тощо.
4. Зміст кваліфікаційної роботи:
  - 4.1. аналіз предметної області
  - 4.2. автоматизація процесу нанесення нанотрубок
  - 4.3. вибір засобів автоматизації
  - 4.4. побудова математичної моделі
  - 4.5. реалізація та впровадження
5. Перелік графічних матеріалів: : 31 рисунок, 2 таблиці.
6. Календарний план виконання роботи

| Номер етапу | Зміст етапу виконання роботи   | Термін виконання          |
|-------------|--|---------------------------|
| 1           | Аналіз завдання кафедри. Складання технічного завдання. Підбір та аналіз літератури і першоджерел. | 24.02.2023–<br>03.03.2023 |
| 2           | Короткий опис системи керування та її складових.   | 04.03.2023–<br>25.03.2023 |
| 3           | Розробка функціональної схеми.   | 26.03.2023–<br>14.04.2023 |
| 4           | Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації. Синтез PID-регулятора.                     | 05.04.2023–<br>25.04.2023 |
| 5           | Розробка алгоритмів керування  | 26.04.2023–<br>15.05.2023 |

|   |  |                           |
|---|--|---------------------------|
| 6 | Розробка електричної принципової схеми. Перевірка створеної системи керування. | 16.05.2023–<br>28.05.2023 |
| 7 | Оформлення дипломного проекту та технічної документації.                       | 01.06.2023                |

7. Дата видачі завдання " 24 " лютого 2023 р.

Керівник проекту:

К. т. н., зав. каф КСУ

\_\_\_\_\_

(підпис)

Леонтєв Петро

Здобувач:

студент гр. СУ-91

\_\_\_\_\_

(підпис)

Дрозденко Олександр

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КСУ

\_\_\_\_\_ Леонтєв П.В.

\_\_\_\_\_ 2023 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

До дипломного проекту:

«Автоматизація процесу нанесення нанотрубок на гранулянт»

Дипломник:

Студент гр. СУ-91

Дрозденко О.С.

Керівник проекту:

к.т.н.

Леонтєв П.В.

**1. Назва і галузь застосування:** Пристрій наномодифікації гранул пластику. Модифікування пластмаси для поліпшення фізичних та хімічних властивостей матеріалу.

**2. Підстави для проектування:** Наказ ректора Сумського державного університету № 0236-VI від “14” березня 2023р.

**3. Мета і призначення проекту:** Покращення стійкості до зносу, міцності, жорсткості, термічної та хімічної стійкості пластику, що робить його більш придатним для використання в різних галузях. А також зменшення впливу пластику на довкілля, зокрема, зменшення відходів та покращення рециклінгу пластмас.

**4. Режими роботи об'єкта:** Пристрій повинен мати ручний та автоматичний режими керування. Ручний режим керування має забезпечувати можливість керування установкою за допомогою тумблерів на панелі керування. Автоматичний режим керування має забезпечувати автоматизований процес додавання наночастинок до пластмаси з можливістю регулювання параметрів за допомогою панелі керування. Перемикання режимів здійснюється кнопкою на панелі керування.

**5. Умови експлуатації пристрою наномодифікування гранулянту:** використання пристрою можливе за відповідних умов, а саме:

- Сухе приміщення з вологістю повітря не більше 80%
- Температура навколишнього середовища від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .
- Приміщення в якому встановлюється

## 6. Технічні вимоги:

|                   |   |
|-------------------|---|
| Габаритні розміри | До 1.5 метри в довжину<br>До 1.5 метри в ширину |
| Вага              | До 300 кг.                                      |

## Двигун реактора

|  |                |
|--|----------------|
| СУ має забезпечити керування на обертах: | до 12000 об/хв |
|--|----------------|

## Вимоги до продуктивності

|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| Пристрій має забезпечити: | до 80кг/год |
|---------------------------|-------------|

**7.Засоби автоматизації:** SIEMENS LOGO! 24RCE 24 VDC для опитування датчиків, керування виконавчими механізмами.

## 8. Стадії та етапи проектування:

| № етапу | Зміст етапу проектування                         | Термін виконання       |
|---------|--|------------------------|
| 1       | Розробка ТЗ                                      | 24.02.2023– 03.03.2023 |
| 2       | Розробка схеми інформаційно-матеріальних потоків | 04.03.2023–25.03.2023  |
| 3       | Розробка функціональної схеми                    | 26.03.2023–14.04.2023  |
| 4       | Вибір засобів автоматизації                      | 15.04.2023–25.04.2023  |

|   |  |                       |
|---|--|-----------------------|
| 5 | Розробка та проектування електричної плати та документів | 26.04.2023–15.05.2023 |
| 6 | Технічне оформлення проекту                              | 16.05.2023–28.05.2023 |

**10.Додатки:**

**Додаток А.** Конструкторська документація:

- СУ-91 6.151.01А2 функціональна схема автоматизованої системи нанесення нанотрубок на гранулянт.
- СУ-91 6.151.01 У3 Електрична принципова схема автоматизованої системи нанесення нанотрубок на гранулянт.



## АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Автоматизація процесу нанесення нанотрубок на гранулянт.

Автор: Дрозденко Олександр Сергійович; Сумський державний університет; 4 курс; Суми.

Керівник: Леонтєв Петро Володимирович; кандидат технічних наук; завідувач кафедри КСУ.

Робота містить вступ, п'ять розділів та висновки в основному тексті, загальним обсягом 56 сторінок, 32 рисунки, 8 джерел інформації.

В першому розділі описується процес отримання нанокомпозитів, другий розділ присвячено опису контурів керування, третій розділ присвячено опису апаратної частини, четвертий побудові математичної моделі об'єкту, в п'ятому розділі розповідається про процес реалізації системи керування: створення регулятора для даної системи та перевірки його на експериментальній установці.

За допомогою створеного регулятора був мінімізований вплив навантаження на оберти привідного двигуна реактора та оптимізований розподіл гранул в камері наплення.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

До дипломного проекту:

«Автоматизація процесу нанесення нанотрубок на гранулянт»

Дипломник:

Студент гр. СУ-91

Дрозденко О.С.

Керівник проекту:

к.т.н.

Леонт'єв П.В.

Суми – 2023

## ЗМІСТ

### СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 3  |
| РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ.....     | 4  |
| 1.1.Аналіз технічного завдання.....                          | 4  |
| 1.2.Актуальність модифікації.....                            | 4  |
| 1.3.Опис структури пристрою.....                             | 5  |
| 1.4.Опис технологічного процесу.....                         | 7  |
| РОЗДІЛ 2 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ.....                 | 10 |
| 2.1.Контур керування частотою ультразвукових змішувачів..... | 10 |
| 2.2.Контур керування готовністю розчину.....                 | 13 |
| 2.3.Контур керування розподілом гранул в реакторі.....       | 15 |
| РОЗДІЛ 3 ОПИС АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ.....                         | 20 |
| 3.1.Блок живлення.....                                       | 20 |
| 3.2.Вибір виконавчих механізмів.....                         | 21 |
| 3.3.Вибір давачів.....                                       | 26 |
| 3.4.Вибір ПЛК.....   | 28 |
| РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.....                   | 30 |
| 4.1.Математична модель BLDC двигуна.....                     | 30 |
| 4.2.Математична модель відцентрового колеса.....             | 32 |
| РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....                     | 34 |
| 5.1.Синтез системи керування.....                            | 34 |
| 5.2.Алгоритми роботи контролера.....                         | 42 |
| 5.3.Впровадження та реалізація.....                          | 43 |
| ВИСНОВКИ.....  | 45 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                              | 46 |
| ДОДАТОК А.....   | 47 |

|           |      |                      |        |      |                      |             |       |         |
|-----------|------|----------------------|--------|------|----------------------|-------------|-------|---------|
|           |      |                      |        |      | СУ-91 6.151.01. ПЗ   |             |       |         |
| Зм.       | Арк. | № докум.             | Підпис | Дата |                      |             |       |         |
| Розроб.   |      | Олександр<br>БРАДЬКО |        |      | Пояснювальна записка | Літ.        | Аркш. | Аркушів |
| Перев.    |      | Петро ЛЕОНТЬЄВ       |        |      |                      |             | 3     |         |
| Реценз.   |      |                      |        |      |                      | СумДУ СУ-91 |       |         |
| Н. Контр. |      |                      |        |      |                      |             |       |         |
| Утверд.   |      |                      |        |      |                      |             |       |         |

## СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АСУ – автоматизована система управління

ФСА – функціональна схема автоматизації

ККД – коефіцієнт корисної дії

ВНТ – вуглецеві нанотрубки

УЗ – ультразвук

|                  |             |                              |               |             |                             |                    |              |                |
|------------------|-------------|------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------|--------------------|--------------|----------------|
|                  |             |                              |               |             | СУ-91 6.151.01. ПЗ          |                    |              |                |
| <i>Зм.</i>       | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i>              | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> | <i>Пояснювальна записка</i> | <i>Літ.</i>        | <i>Арки.</i> | <i>Аркушів</i> |
| <i>Розроб.</i>   |             | <i>Олександр<br/>БРАДЬКО</i> |               |             |                             |                    |              |                |
| <i>Перев.</i>    |             | <i>Петро ЛЕОНТЬЄВ</i>        |               |             |                             |                    | 3            |                |
| <i>Реценз.</i>   |             |                              |               |             |                             | <i>СумДУ СУ-91</i> |              |                |
| <i>Н. Контр.</i> |             |                              |               |             |                             |                    |              |                |
| <i>Утверд.</i>   |             |                              |               |             |                             |                    |              |                |

## Вступ

Неможливо уявити сучасне життя без полімерних і синтетичних матеріалів, які широко застосовуються в різних галузях, таких як побут, будівництво, промисловість, автомобілебудування, суднобудування, електроніка та інші.

Однак, у процесі експлуатації полімерні матеріали піддаються старінню, тобто необоротній зміні своїх властивостей внаслідок хімічних і фізичних перетворень. Старіння полімерних матеріалів залежить від їх хімічного складу, структури, молекулярної маси, наявності дефектів та внутрішніх напружень. Великий вплив на старіння відіграють зовнішні фактори, такі як температура, вологість повітря, світлова та проникаюча радіація, кисень і агресивні гази та механічні навантаження. Зокрема, сонячне ультрафіолетове випромінювання є одним з найактивніших "активаторів" старіння, здатним знищувати зв'язки в полімерах. УФ-випромінювання є основним фактором, що визначає довговічність полімерних матеріалів[1].

Для поліпшення механічних властивостей полімерів до їх складу часто додають різні інертні добавки. Додавання ВНТ до полімерних матеріалів сприяє підвищенню стійкості до механічних навантажень, забезпечує стійкість до впливу ультрафіолетового випромінювання та зменшує вплив високих температур. Для нанесення ВНТ на гранулянт була створена спеціальна експериментальна установка.

Автоматизація процесу нанесення ВНТ на пластикові гранули дозволяє рівномірно розподілити ВНТ в матеріалі та більш точно контролювати їх концентрацію. Крім того автоматизація забезпечує повторюваність процесу виключаючи людський фактор. Це не тільки покращує фізико-механічні властивості кінцевого продукту, але й економить час та ресурси, сприяючи підвищенню ефективності та зниженню витрат у виробництві нанокompозитів.

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 3    |

# РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ

## 1.1. Аналіз технічного завдання

Проаналізувавши технічне завдання було виявлено, що необхідно ретельно проектувати і впроваджувати процес автоматизації, враховуючи специфічні вимоги до якості, стабільності, продуктивності та інтеграції. Важливими аспектами цього процесу є вибір правильного обладнання, розробка алгоритмів управління та забезпечення безперебійної роботи системи.

## 1.2 Актуальність модифікації

Через зростання світового виробництва пластикових виробів, збільшення кількості відходів пластику та забруднення довкілля, що загрожують здоров'ю людей та тварин, модифікація пластику стає все більш актуальною[2, 3].

Модифікування пластику дозволяє зменшити вплив пластикових відходів на довкілля та створити більш стійкий та екологічний матеріал. Це включає такі напрямки модифікації:

- 1) Покращення фізико-механічних властивостей пластику. Поліпшення міцності, термостійкості, еластичності та інших властивостей пластику, збільшення його ефективності та довговічності.
- 2) Поліпшення екологічної стійкості. Включає розробку пластику, який розкладається після використання, та вторинне використання переробленого пластику
- 3) Зменшення токсичності пластику. Зменшення токсичного впливу пластику на людей та тварин, що впливає на здоров'я та довкілля.
- 4) Розробка нових матеріалів з пластику. Розробка нових матеріалів, які можуть мати нові властивості та можуть бути використані у нових галузях.

Актуальність модифікації пластику полягає в необхідності зменшити вплив пластику на навколишнє середовище та зберегти ресурси в рамках зростання виробництва. Автоматизація процесу наноперетворення пластику є важливою

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 4    |

областю досліджень, яка дозволяє компаніям підвищити ефективність виробництва та знизити витрати в умовах зростаючої ринкової конкуренції.

Наномодифікація пластику є важливим етапом виробництва, оскільки дозволяє покращити фізико-механічні властивості матеріалу та розширити можливості його застосування.

Автоматизація процесу наномодифікації пластику використовується для підвищення швидкості та якості процесу, зниження витрат та збільшення кількості виробленої продукції. Крім того, автоматизація знижує ризик пошкодження нанотрубок, що може виникнути під час ручного нанесення.

Одним із підходів до автоматизації наноперетворення пластику є використання роботизованих систем, здатних до автоматичного нанесення нанотрубок на гранули пластику. Їх можна використовувати для виконання різних завдань, забезпечуючи більш точний і стабільний процес. Таким чином, автоматизація процесу створення нанокомпозитів є важливим напрямком виробництва, що дозволяє підвищити ефективність, знизити витрати та забезпечити високу якість виробленого продукту.

### **1.3 Опис структури пристрою**

Пристрій наномодифікації пластику методом внесення нанотрубок на гранули складається з наступних компонентів:

- 1) Камера розпилення
- 2) ВНТ
- 3) Гранули пластику
- 4) Змішувачі для підготовки розчину
- 5) Контрольна система

Камера розпилення (рис. 1.1) являє собою резервуар, який використовується для нанесення нанотрубок на гранули пластику. Камера розпилення може мати різну форму та розмір, залежно від розміру гранул пластику та масштабу виробництва. У камері розпилення використовують спеціальні диски, що забезпечують розподіл гранул в просторі.

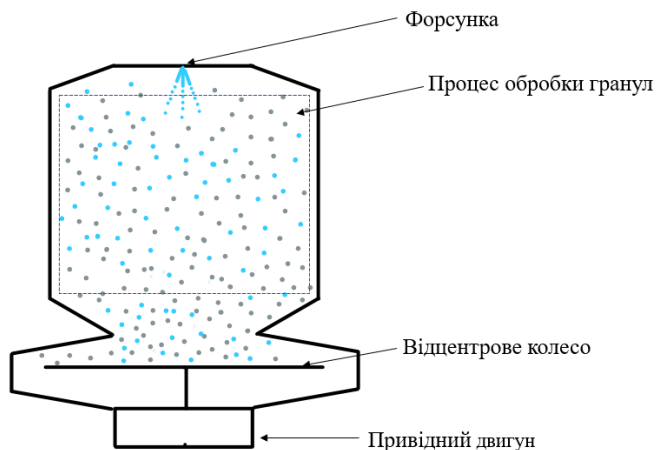


Рисунок 1.1 Камера розпилення

ВНТ – наноматеріали, які застосовуються для модифікації пластику. ВНТ вносяться в камеру розпилення та потім розпилюються на поверхню гранул пластику.

Гранули пластику – основний матеріал, який піддається модифікації. Гранули пластику можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як поліетилен, поліпропілен, полістирол тощо.

Змішувачі для підготовки розчину – механічний та ультразвуковий змішувачі використовуються для якісного змішування та рівномірного розподілу ВНТ в розчині

Контрольна система – програмне забезпечення, яке використовується для контролю процесу модифікації пластику. Контрольна система може забезпечувати контроль параметрів, таких як температура, тиск, час розпилення та інші параметри, які впливають на якість модифікації.

Процес наномодифікації пластику методом нанесення ВНТ на гранули включає наступні етапи:

Підготовка гранул. Гранули пластику очищують від бруду та інших забруднень, а також заздалегідь розігрівають, щоб полегшити процес нанесення нанотрубок.

|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|--|--|--|--|------|
|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  | Лист |
|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  | 6    |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | СУ-91 6.15101.ПЗ |  |  |  |  |      |



Підготовка ВНТ. ВНТ піддаються спеціальній підготовці, яка включає очищення та додавання спеціальних речовин, які поліпшують їх адгезію до поверхні гранул пластику.

Розпилення ВНТ на гранули пластику. ВНТ наносяться на поверхню гранул пластику за допомогою камери розпилення. У камері розпилення ВНТ змішуються з гранулами пластику та розпилюються на їх поверхню.

Сушіння. Після нанесення ВНТ на гранули пластику, вони проходять процес сушіння, щоб забезпечити належну адгезію до поверхні гранул пластику.

Контроль якості. Готові гранули пластику піддаються контролю якості, який може включати в себе оцінку фізичних та механічних властивостей, а також мікроструктури та хімічного складу.

Цей процес може бути масштабований в залежності від потреб виробництва.

#### 1.4 Опис технологічного процесу

Процес обробки складається з двох етапів, підготовка та нанесення розчину.

Структурна схема установки зображена на (рис. 1.2)

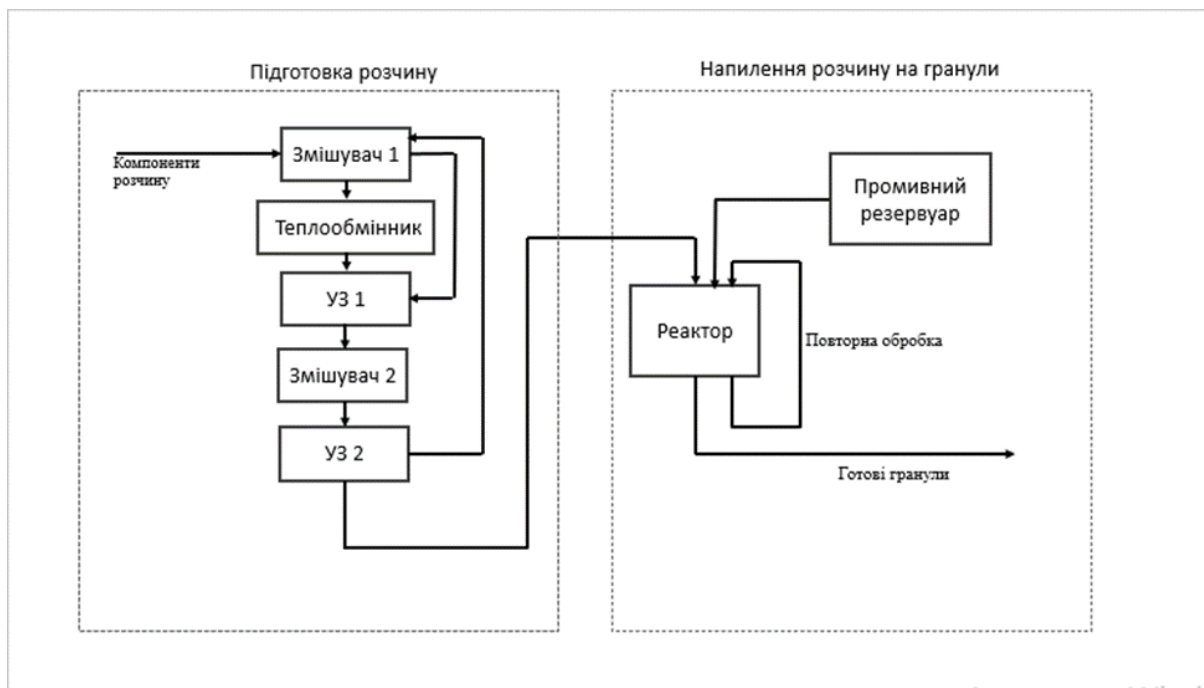


Рисунок 1.2 Структурна схема установки

Для отримання рівномірного розподілу деагломерованих наночастинок в полімерному виробі пропонується покривати напівфабрикат для виробництва -

гранули, порошок і т.д. шаром ідентичного полімеру, що містить деагломеровані ультразвуковими хвилями наночастинки.

Спочатку змішувачами готується розчин шляхом механічного перемішування полімеру в розчиннику.

Після перемішування або одночасно з ним проводять обробку отриманої суміші ультразвуком в ємності з охолоджуваними стінками. Зменшення в'язкості розчину через кавітацію, а також розігрів розчину внаслідок підвищення температури випромінювача, дозволяє зруйнувати агломерати та розподілити нанотрубки рівномірно за обсягом. Примусове охолодження стінок ємності знижує в'язкість розчину та гальмує повторну агломерацію.

Коли розчин вже готовий настає другий етап. Підготовлений розчин потрапляє до пневматичного розпилювача, який встановлений у верхній частині реактора-змішувача. Гранули, які слід обробити, за допомогою відцентрового змішувача переводяться в псевдокиплячий стан (у виважений стан). Наявність колеса відцентрового типу в дні змішувача при частоті обертання 10000 об/ хв дозволяє турбулентно перерозподілити гранули в просторі.

Завантаження реактора має забезпечувати перерозподіл зважених гранул за об'ємом, в той же час кількість гранул має бути максимально можливою для зниження втрат розчину при розпиленні.

У процесі роботи реактора проводиться епізодичне пневматичне розпилення підготовленого розчину на гранули які рухаються в реакторі. Наявність аерозолі, що містить завись розчину полімеру з деагломерованими нанотрубками в низькокиплячому розчиннику, а також хаотичний рух зважених гранул у потоках повітря під час роботи відцентрового змішувача створює умови для рівномірного осадження розчину на гранули.

Реактор має вхідний (завантажувальний) кільцевий отвір, що охоплює розпилювальну голівку – така форма отвору для подачі гранул дозволяє виробляти розпилення та контроль за станом розпилювача, схильного до засмічення через певний проміжок часу через налипання дрібного пилу від завантаженого матеріалу

|     |      |          |        |      |                         |             |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|-------------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 8           |

або розчину. Для очищення через певний проміжок часу на розпилююче сопло подається розчинник або повітря під тиском.

Для розвантаження реактора передбачений другий отвір, закритий заслінкою, на рівні відцентрового колеса змішувача і відкривається через рівний проміжок часу для випуску оброблених гранул під дією відцентрових сил і утвореного тангенціального потоку повітря. Заслінка має сітчасту конструкцію для вільного пропуску крізь себе повітря надлишкового тиску при пневматичному розпиленні.

Після обробки гранули мають наступну будову: мономатеріал покритий зверху оболонкою з аналогічного або сумісного полімеру. В оболонці знаходяться деагломеровані нанотрубки. Концентрація нанотрубок у поверхневому шарі відповідає концентрації нанотрубок у розчині.

Така будова гранули дозволяє, в залежності від технологічних параметрів її переробки, отримувати або рівномірний розподіл наноматеріалу в обсязі одержуваного виробу або отримати сегрегатну сітку, що за інших рівних умов дає суттєвий приріст властивостей отриманого матеріалу та дозволяє проводити ультранизьке модифікування наноматеріалами.

У випадку необхідності в рівномірному розподілі нанотрубок (або інших нанооб'єктів) у матеріалі виробу під час переробки використовують ще один цикл грануляції (покриті гранули плавлять, перемішують розплав та знову гранулюють) або перемішують розплав безпосередньо шнеком в екструдері під час прес-лиття.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 9           |

## РОЗДІЛ 2 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ

АСУ процесом нанесення нанотрубок на гранулянт передбачає декілька контурів керування, які забезпечують ефективну і точну роботу системи. Основні контури керування в цьому процесі:

### 2.1. Контур керування частотою ультразвукових змішувачів

Обробка розчину УЗ в процесі наномодифікації полімеру є важливим етапом виробництва, який сприяє ефективному змішуванню та диспергуванню наноматеріалів у полімерній матриці. Цей процес використовує УЗ хвилі для створення акустичних коливань у розчині, що сприяє розбиттю згорток, розподілу та розподілу наночастинок або нанотрубок у полімерній матриці.

Основні переваги обробки ультразвуком включають:

Дисперсія. УЗ хвилі створюють сильні механічні сили, які розривають згустки та змішують наноматеріали в розчині. Таким чином досягається більш рівномірний розподіл наночастинок або нанотрубок у полімерній матриці.

Збільшена поверхня контакту УЗ обробка створює мікромеханічні струми та турбулентність у розчині, тим самим збільшуючи поверхню контакту між наноматеріалами та полімерами. Це покращує процес міжфазної взаємодії та забезпечує кращу адгезію між компонентами системи.

Підвищена розчинність. Обробка УЗ може збільшити розчинність наноматеріалів у полімерах, тим самим покращуючи їх розподіл у розчині та сприяючи рівномірному змішуванню з полімерною матрицею.

Прискорення процесу реакції. УЗ хвилі можуть активізувати процес реакції та допомогти збільшити швидкість хімічних реакцій або фізичних перетворень. Це завершує процес наномодифікації полімерів і покращує якість одержуваної продукції[4].

Щоб максимізувати продуктивність УЗ змішувача, його налаштовують на резонанс. Резонанс - це явище, коли частота зовнішнього збудження збігається з власною частотою системи.

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 10   |

У випадку УЗ змішувачів резонансна частота відповідає механічному резонансу пристрою, де відбувається максимальне посилення ультразвукової енергії.

Налаштування на резонанс дозволяє краще передавати і змішувати УЗ енергію в середовищі. Коли система налаштована на резонанс, УЗ енергія передається від змішувача до середовища з більшою ефективністю, допомагаючи поліпшити результати таких процесів, як змішування, диспергування та емульгування, що виконуються за допомогою УЗ [5].

Для підтримки резонансу потрібно щоб частота УЗ була резонансною. У нашому випадку резонансна частота залежить від концентрації нанотрубок в розчині.

Для розрахунку резонансної частоти УЗ в залежності від концентрації нанотрубок необхідно мати дані про характеристики ВНТ та розчину, що їх містить. Без цих конкретних даних неможливо точно налаштувати резонансну частоту.

Для систем, в яких використовуються ВНТ, резонансна частота може бути визначена залежно від концентрації ВНТ, їх характеристик та параметрів системи. Використаємо один із загальних способів розрахунку резонансної частоти об'ємних хвиль у пружному середовищі:

$$f = (v / \lambda) = (1 / 2L) * \sqrt{(E^* / \rho)}, \quad (2.1)$$

де:  $f$  - резонансна частота,  $v$  - швидкість поширення звуку в середовищі,  $\lambda$  - довжина хвилі,  $L$  - довжина трубки або простору,  $E^*$  - ефективний модуль Юнга залежно від концентрації,  $\rho$  - щільність матеріалу ВНТ.

У нашому випадку ефективний модуль Юнга лежить в межах 1,28 – 1,8ТПа.

Проведемо орієнтовний розрахунок резонансної частоти. Спочатку розрахуємо резонансну частоту для нижньої межі ефективного модуля Юнга ( $E^* = 1,28$  ТПа).

Застосуємо значення:

Швидкість поширення звуку в середовищі:  $v = 1500$  м/с

Довжина трубки:  $L = 0,2$  м

Щільність матеріалу нанотрубок:  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>

Ефективний модуль Юнга:  $E^* = 1,28 * 10^{12}$  Па

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 11          |

За довжину трубки мається на увазі глибина резервуару з ультразвуковим випромінювачем.

Підставимо ці значення у формулу:

$$f = (1 / 2 * 0,2) * \sqrt{(1,28 * 10^{12} / 2200)} \approx 0,5 * \sqrt{(5,81 * 10^8)} \approx 0,5 * 24100 \approx 12050 \text{ Гц.} \quad (2.2)$$

Отже, орієнтовна резонансна частота при використанні нижньої межі ефективного модуля Юнга становить приблизно 12050 Гц.

Тепер розрахуємо резонансну частоту для верхньої межі ефективного модуля Юнга ( $E^* = 1,8 \text{ ТПа}$ ).

$$F = (v / \lambda) = (1 / 2L) * \sqrt{(E^* / \rho)}, \quad (2.3)$$

де:  $v = 1500 \text{ м/с}$  - швидкість поширення звуку в середовищі,

$L = 0.2 \text{ м}$  - довжина трубки,

$E^* = 1.8 * 10^{12} \text{ Па}$  - ефективний модуль Юнга,

$\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$  - щільність матеріалу нанотрубок.

Підставляємо значення в формулу:

$$f = (1 / 2 * 0.2) * \sqrt{(1.8 * 10^{12} / 2200)} = 0.5 * \sqrt{(8.1818 * 10^8)} \approx 0.5 * 28601 \approx 14300.5$$

Гц. (2.4)

Виходячи з наявних даних методом розрахунків ми дізналися що при зміні концентрації ВНТ, а відповідно і ефективного модуля Юнга резонансна частота для наших умов лежить в межах від 12,05 - 14,3кГц.

Варто зазначити що це лише орієнтовні теоретичні значення. Для більш точного визначення резонансної частоти та налаштування випромінювачів необхідно провести експеримент.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 12          |

## 2.2. Контур керування готовністю розчину

Моніторинг готовності розчинів ВНТ за їх електропровідністю є важливим процесом у виробництві та дослідженні наноматеріалів. Електропровідність розчинів нанотрубок є індикатором розподілу та якості ВНТ у розчині. Контроль приготування розчину нанотрубок базується на спостереженні за зміною електропровідності розчину в процесі приготування[1]. Структурна схема контуру керування зображена на (рис. 2.1)

Рисунок 2.1 Структурна схема контуру керування готовністю розчину



В процесі диспергування ВНТ в рідкій матриці електропровідність починає зростати після ретельного перемішування компонентів розчину. Це пов'язано з утворенням провідних шляхів вздовж нанотрубок і збільшенням провідного шару в розчині. Процес збільшення електропровідності розчину може бути не лінійним. Спочатку спостерігається плавне зростання електропровідності, що свідчить про ефективне диспергування нанотрубок і утворення між ними сприятливих електричних зв'язків[1].

Після того, як електропровідність розчину досягає максимального значення, спостерігається незначне зниження та стабілізація значення. Це свідчить про те, що нанотрубки рівномірно дисперговані і утворюють достатньо провідну структуру.

Готовність розчину ВНТ контролюється за допомогою датчика, який вимірює електропровідність розчину в режимі реального часу. В нашому досліді ми використовуємо давач провідності Vernier.

Датчик вимірює здатність розчину проводити електричний струм між двома електродами. У розчині, струм протікає завдяки руху іонів. Таким чином, збільшення концентрації іонів у розчині призведе до більших значень провідності.

Датчик провідності насправді вимірює електропровідність, що визначається як величина опору. Коли опір вимірюється в Омс, електропровідність вимірюють в одиницях системи СІ, сіменсах (раніше відомі як мо). Оскільки сіменси – дуже велика одиниця, водні зразки загалом вимірюються в мікросіменсах або мкСм.

Хоч датчик провідності і вимірює електропровідність, нас часто цікавить провідність розчину. Провідність,  $C$ , визначають за допомогою формули:

$$C = G \cdot k_c, \quad (2.5)$$

де  $G$  означає електропровідність,  $k_c$  – константу елемента.

Константа елемента визначається для датчика за наступною формулою:

$$k_c = d / A, \quad (2.6)$$

де  $d$  – відстань між двома електродами,  $A$  – площа поверхні електроду.

Наприклад, елемент на рис. 2.2 має константу:

$$k_c = d / A = 1,0 \text{ см} / 1,0 \text{ см}^2 = 1.0 \text{ см}^{-1} \quad (2.7)$$

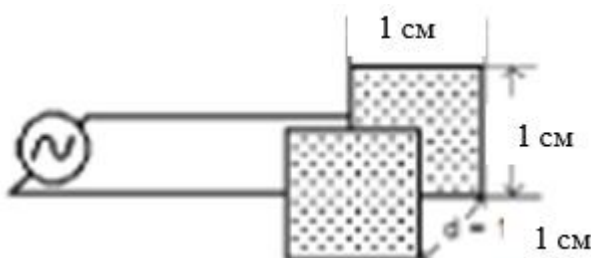


Рисунок 2.2 Будова датчика

Значення провідності визначається шляхом множення електропровідності та константи елемента. Оскільки датчик провідності Vernier також має константу елемента  $1,0 \text{ см}^{-1}$ , його провідність та електропровідність мають однакове числове значення. Для розчину зі значенням електропровідність в  $1000 \text{ мкСм}$ , провідність  $C$  може становити:

$$C = G \cdot k_c = (1000 \text{ мкСм}) \times (1.0 \text{ см}^{-1}) = 1000 \text{ мкСм/см} \quad (2.8)$$

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 14   |



Різниця потенціалів застосовується до двох електродів датчика у датчику провідності. Вихідний струм є пропорційним до провідності розчину. Такий струм перетворюється в напругу[6].

Алгоритм роботи контуру керування приготуванням розчину включає наступні етапи. Контролер аналізує значення електропровідності в реальному часі та відстежує їх зміну. У міру змішування компонентів розчину значення провідності зростає і досягає максимального значення.

Контролер аналізує динаміку провідності і визначає, що розчин готовий, коли значення провідності перестає змінюватися і стабілізується на певному рівні. Коли контролер виявляє, що значення провідності стабілізувалося, він надсилає сигнал на вимкнення змішувача.

Вмикається двигун для підготовки системи осадження ВНТ, контролер дає сигнал на відкриття клапана, заздалегідь підготовлений розчин потрапляє в реактор і починається процес осадження.

### **2.3. Контур керування розподілом гранул в реакторі**

Проблема нерівномірного розподілу пластикових гранул під час наномодифікації полімерів має негативний вплив на якість і властивості кінцевого продукту. Наномодифікація полімерів передбачає додавання наночастинок або наноматеріалів до полімерної матриці для покращення їх механічних, електричних та хімічних властивостей[7].

Однією з основних причин нерівномірного розподілу пластикових гранул є технічні обмеження самого процесу наномодифікації. При додаванні наночастинок до полімерної матриці можуть виникнути проблеми з їх розподілом, локалізацією та дисперсією в матеріалі. Це може бути пов'язано з фізико-хімічними властивостями наночастинок, їх взаємодією з полімером або недостатньою ефективністю змішування компонентів.

Неоднорідна дисперсія пластикових гранул може мати такі наслідки:

Неоднорідна дисперсія наночастинок в полімерній матриці може призвести до зниження однорідності властивостей матеріалу. Результатом чого є утворення ділянок

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 15          |

з високою і низькою концентрацією наночастинок, що призводить до зміни механічних, електричних або оптичних властивостей в різних частинах матеріалу.

Крім того нерівномірний розподіл наночастинок може знизити міцність і стабільність матеріалу. Осадження наночастинок в певних ділянках матриці може спричинити появу слабких місць або дефектів, в результаті чого знижується міцність і зносостійкість матеріалу.

Щоб подолати проблему нерівномірного розподілу пластикових гранул під час наномодифікації полімеру оптимізуємо процес нанесення наноматеріалу. Основною метою є забезпечення кращого розподілу гранул пластику в камері, шляхом стабілізації обертів BLDC-двигуна.

Опис експериментальної установки. Експериментальна установка являє собою реактор-змішувач (рис. 2.3). У верхній частині реактора встановлений пневматичний розпилювач для нанесення підготовленого розчину на гранули, які перебувають у стані невагомості. За створення стану невагомості відповідає BLDC мотор з встановленим на нього відцентровим колесом. Для контролю за станом розподілу гранул встановлений датчик.

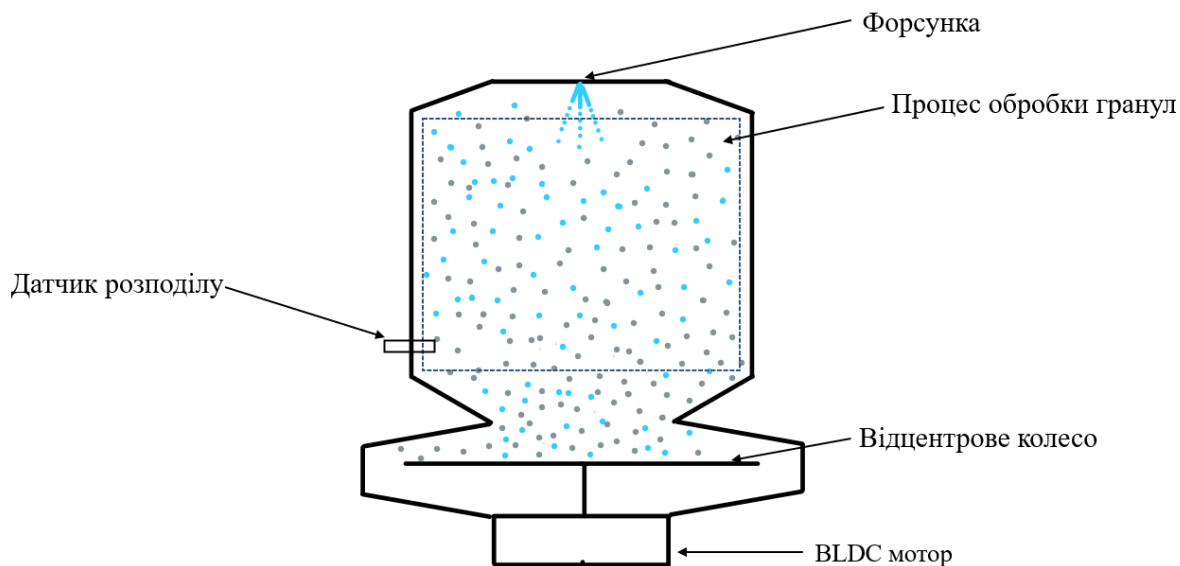


Рисунок 2.3 Будова експериментального стану

Контур керування BLDC мотором для досягнення ефекту невагомості гранул пластику налаштований з використанням замкнутої системи керування з ПІД-регулятором. Система керування (рис. 2.4) включає такі елементи:



Рисунок 2.4 Структурна схема контуру керування розподілом гранул

Датчик стану гранул. Визначає стан розподілу гранул методом відбитого та розсіяного світла. Принцип роботи датчика зображено на рис. 2.5

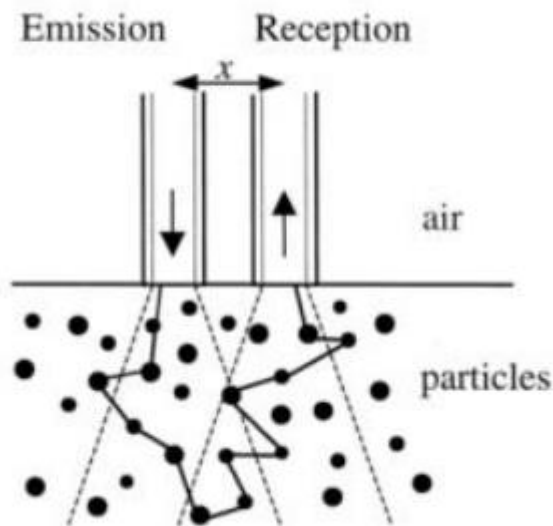


Рис. 2.5 Принцип роботи волоконно-оптичного датчика

Датчик швидкості обертання мотора. Вимірює швидкість обертання відцентрового колеса, що забезпечує ефект невагомості гранул.

ПД-регулятор. Це алгоритм керування, який автоматично налаштовує оберти мотора в залежності від різниці між поточними обертами та заданим значенням. ПД-регулятор складається з трьох ланок: пропорційної (P), інтегральної (I) та диференціальної (D). Кожна з них вносить зміни у визначенні вихідного сигналу керування.

Керуючий пристрій. Пристрій, який приймає вихідний сигнал керування від ПД-регулятора та виконує керування BLDC мотором.

Розглянемо алгоритм роботи контуру керування. Датчик обертів визначає швидкість ротора та передає отримані дані до ПД-регулятора. ПД-регулятор порівнює поточе значення з бажаними обертами та визначає рівень відхилення. На основі цього відхилення ПД-регулятор генерує керуючий сигнал, який подається до приводу контуру керування.

Привід контуру керування виконує команди, отримані від ПД-регулятора, керує процесом регулювання обертів мотора реактора, забезпечуючи необхідну стабільність і точність контролю.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 18          |

## РОЗДІЛ 3 ОПИС АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

Вибір апаратної складової базується на технічному завданні, враховуючі необхідний діапазон вимірювання та точність значень.

### 3.1 Блок живлення та перетворювачі

При виборі апаратної частини треба розпочинати з пристроїв живлення, які зможуть задовільнити потреби системи. Вибір блоків живлення є надзвичайно важливим етапом при проектуванні систем автоматизації. Блоки живлення забезпечують електроенергією всі електронні пристрої в системі, включаючи контролери, датчики, виконавчі пристрої та інші компоненти.

#### Блок живлення

Блок живлення LRS-350-24 - це високоефективним джерелом живлення, призначеним для систем автоматизації, здатним працювати в мережах змінного струму 110-230 В змінного струму. Блок живлення має вихідну потужність 350 Вт і вихідну напругу 24 В постійного струму.

LRS-350-24 компактний і простий в установці, що робить його придатним для використання в різних системах автоматизації, таких як промислові контролери, системи автоматичного управління і роботи. Джерело живлення має вбудований захист від перевантаження, перенапруги і короткого замикання, що гарантує безпечну роботу і захист підключеного обладнання.

Тривалий термін служби та надійність джерела живлення роблять його ідеальним для систем автоматизації, які потребують стабільного та ефективного електроживлення. Блок живлення зображений на (рис. 3.1)

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 19   |



Рисунок 3.1 Блок живлення LRS-350-24

### 3.2 Виконавчі пристрої

#### BLDC двигун

BLDC (безщітковий двигун постійного струму) з номінальною швидкістю 9500 об/хв і потужністю 4000 Вт (рис. 3.2) - це потужний електродвигун, який широко використовується в різних галузях промисловості, в тому числі в автомобілебудуванні, робототехніці та інших галузях.



Рисунок 3.2 BLDC двигун

|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|--|--|--|--|------|
|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  | Лист |
|     |      |          |        |      |                  |  |  |  |  | 20   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | СУ-91 6.15101.ПЗ |  |  |  |  |      |

Цей двигун працює в діапазоні напруги 12-36 В, що робить його універсальним та придатним для використання з різними джерелами живлення великої потужності. Завдяки високій швидкості (9500 об/хв) і високій вихідній потужності (4000 Вт) цей двигун забезпечує високий крутний момент. Тому він підходить для широкого спектру приводів і механізмів, де потрібен крутний момент на високих обертах.

Безщіткова технологія забезпечує високу ефективність, надійність та довговічність, що робить їх придатними для використання в суворих умовах

З огляду на ці характеристики, є потужним і надійним рішенням для широкого спектру проектів, що вимагають високої швидкості і потужності.

### Драйвер Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 BLDC

Драйвер Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 BLDC - один з найпопулярніших електронних регуляторів швидкості для безщіткових двигунів (BLDC). Цей привід можна використовувати в системах автоматизації, основним завданням яких є управління швидкістю і напрямком обертання BLDC-двигунів.

Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 має широкий діапазон вхідної напруги і може працювати від 22,2 до 51,8 вольт.

Максимальна сила постійного струму 110 ампер робить його ідеальним для потужних двигунів BLDC.

Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 оснащений низкою функцій безпеки для забезпечення безпечної роботи. До них відносяться захист від перевантаження і захист від перегріву. Ці функції допомагають запобігти пошкодженню приводу і двигуна та підтримують безпеку компонентів системи.

Крім того, Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 має можливість програмування параметрів, що дозволяє налаштувати його під конкретні потреби системи автоматизації. Це включає в себе налаштування режиму розгону, гальмування та активацію нейтрального режиму для забезпечення оптимальної продуктивності та ефективності системи.

|     |      |          |        |      |                         |             |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|-------------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 21          |

Завдяки своїм технічним характеристикам і функціональності, привід Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 BLDC є оптимальним рішенням для системи автоматизації з використанням безщіткових двигунів. Драйвер зображений на (рис. 3.3)



Рисунок 3.3 Hobbywing Flyfun 110A ESC V5 BLDC

#### Асинхронний двигун

AIP 80 B2 асинхронний двигун призначений для роботи в електроприводах різних механізмів. Технічні характеристики AIP 80 B2: Максимальна потужність – не більше 2,2 кВт. Частота обертання – не більше 3000 об/хв. Вибраний двигун зображений на (рис. 3.4)



Рисунок 3.4 Асинхронний двигун AIP 80 B2

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 22   |



Електромагнітний пускач ETI 004646510 CES 9.10 (4 kW) 24V AC

Електромагнітний пускач - це пристрій, що використовує електромагнітні контактори для керування пуском і зупинкою електродвигунів. Вибраний пускач (рис. 3.4) має номінальний струм 9А, котушка управління живиться від 24В.



Рисунок 3.4 Електромагнітний пускач ETI

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 23   |

## Електромагнітний клапан 4V210-08 DC 24V 3W

Двоходовий розподільник 4V210-08 DC 24V 3W - це пристрій автоматизації, який використовується для управління потоками повітря або рідини в автоматизованих системах управління.

Цей розподільник має два положення і може перемикатися між двома станами або напрямками потоку. Це важливо для регулювання руху рідини і повітря в системі та забезпечення необхідних переходів і блокувань. Керування розподільником здійснюється постійним струмом з напругою 24В. Обраний клапан зображений на (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 Розподільник 4V210-08 DC 24V 3W

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 24   |

### 3.3 Вибір давачів

Оптичний давач рівня

QMBONW E3F-DS30P1 PNP NO (рис. 3.6) - це промисловий датчик, призначений для виявлення об'єктів у просторі. Він має конструкцію, яка захищає його від зовнішніх впливів і підвищує довговічність.

Датчик використовує технологію ближнього зондування для виявлення об'єктів безпосередньо перед ним.

Датчик має міцну конструкцію і широкий діапазон робочих температур, що надає їм популярності в промисловому середовищі завдяки своїй надійності та довговічності.



Рисунок 3.6 – Давач рівня E3F-DS30P1 PNP NO Оптичний

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 25   |

### Поплавковий давач рівня

Поплавковий герконовий давач рівня (рис. 3.7) – це пристрій який використовується для вимірювання рівня рідини у змішувачах. Двопоплавкова конструкція дає змогу контролювати відразу мінімальний та максимальний рівень розчину, а корпус з нержавіючої сталі робить давач стійким до дії агресивних середовищ.



Рисунок 3.7 Поплавковий датчик рівня рідини

### Дачач швидкості

На рисунку 3.8 зображений обраний давач швидкості



Рисунок 3.8 Оптичний енкодер

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 26   |

Таблиця 2.1 - Основні параметри давача швидкості

|                                 |                         |
|---------------------------------|-------------------------|
| Кількість імпульсів на оберт    | 50-1024 імпульсів/оберт |
| Робоча напруга                  | DC5-24V                 |
| Максимальна механічна швидкість | 12000 об/хв             |

Це пристрій, що використовує світлові сигнали для визначення швидкості руху або положення валу. Він складається з двох основних компонентів: оптичного датчика та диска з відмітками. Оптичний датчик вимірює зміну світлового сигналу та перетворює його в електричний сигнал. Контролер зчитує та обробляє сигнал для визначення швидкості обертання або положення валу

### 3.4 Вибір мікроконтролера

Контролер Siemens LOGO! є простим та ефективним вибором для автоматизації систем управління з кількох причин.

По-перше, його висока функціональність при низькій вартості робить його придатним для широкого спектру застосування. Siemens LOGO! має багато можливостей програмування та керування, включаючи логічні операції, таймери, лічильники та протоколи зв'язку.

По-друге, контролер LOGO! пропонує простий та зрозумілий інтерфейс програмування. Він надає інтуїтивно зрозуміле графічне середовище програмування, яке дозволяє легко створювати програми з блок-схемами та логічними елементами. Крім того, контролер підтримує підключення до широкого спектру пристроїв вводу/виводу та може бути легко інтегрований в існуючі системи управління.

Загалом, висока функціональність, доступна ціна та простота програмування роблять Siemens LOGO! є оптимальним вибором для автоматичного керування системою. Вибраний контролер зображений на (рис. 3.9)

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 27   |



Рисунок 3.9 Логічний модуль LOGO! 8.3 Pure 24RCE0 AC

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 28   |

## РОЗДІЛ 4 ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

### 4.1 Математична модель BLDC двигуна

Для подальшого дослідження необхідно створити математичну модель системи для перегляду важливих особливостей в середовищі Matlab.

Для початку опишемо математичну модель BLDC двигуна. Як правило, математична модель безщіткового двигуна постійного струму принципово не відрізняється від звичайного двигуна постійного струму. Основним доповненням є задіяні фази, які впливають на загальну модель BLDC двигуна. Фази особливо впливають на резистивну та індуктивну структуру BLDC. Наприклад, просте розташування із симетричним 3-фазним і внутрішнім з'єднанням «зірка» може дати коротку ілюстрацію концепції (рис. 4.1).

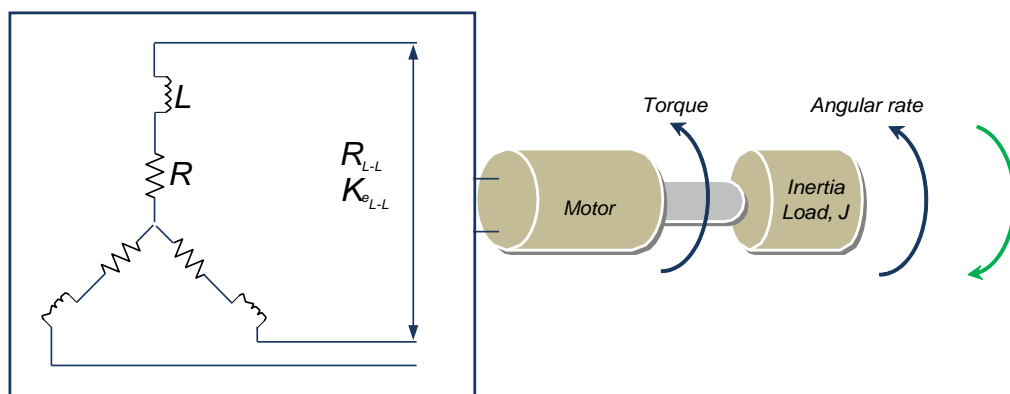


Рис. 4.1 Принципова схема безщіткового двигуна постійного струму

Механічна стала часу:

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{K_e K_t} \quad (4.1)$$

Постійна часу:

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\Sigma R} \quad (4.2)$$

Отже, оскільки існує симетричне розташування та три фази, механічна (відома) та електрична константи стають:

Механічна константа

$$\tau_m = \frac{J \cdot 3R}{K_e K_t} \quad (4.3)$$

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 29   |

Електрична константа

$$\tau_e = \frac{L}{3.R} \quad (4.4)$$

Тоді для трьох фаз:

$$\tau_m = \frac{3.R.J}{(K_e(L-L)/\sqrt{3})K_t} \quad (4.5)$$

Формула набуває виду

$$\tau_m = \frac{3.R.J}{K_e K_t} \quad (4.6)$$

Де  $K_e$  – фазове значення постійної ЕРС

$$K_e = K_{e(L-L)}/\sqrt{3} \quad (4.7)$$

Крім того існує залежність між  $K_e$  та  $K_t$ , використовуючи рівняння електричної потужності (ліва частина) та механічної потужності (права частина)[8]. Тобто:

$$\sqrt{3} * E * I = \frac{2\pi}{60} * N * T \quad (4.8)$$

$$\frac{E}{N} = \frac{T}{I} * \frac{2\pi}{60*\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

$$K_e = K_t * \frac{2\pi}{60*\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

$$K_e = K_t * 0.0605 \quad (4.11)$$

Де:

$$K_e = \left[ \frac{v-secs}{rad} \right] \text{ електричний момент}$$

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 30   |



$$K_t = \left[ \frac{N-m}{A} \right] \text{ Константа крутного моменту}$$

Таким чином отримуємо рівняння BLDC мотора

$$G(S) = \frac{\frac{1}{K_e}}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (4.12)$$

Параметри блдс двигуна заявлені виробником наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Параметри двигуна

| Параметри системи  | Символ         | Значення | Одиниця           |
|--------------------|----------------|----------|-------------------|
| Інерція ротора     | J              | 0,00061  | Кг*м <sup>2</sup> |
| Коефіцієнт напруги | K <sub>e</sub> | 0,0637   | В/(рад/с)         |
| Коефіцієнт моменту | K <sub>t</sub> | 0,2663   | Нм/А              |
| Опір фази          | R <sub>a</sub> | 0,6187   | Ω                 |
| Індуктивність фази | L <sub>a</sub> | 2,62     | мГн               |
| Коефіцієнт тертя   | K <sub>f</sub> | 0,00291  | Н/(рад/с)         |
| Стала часу         | τ              | 0,0781   | с                 |

Передатна функція розрахована на основі параметрів з таблиці

$$G(s) = \frac{2057342}{s^3 + 189.5s^2 + 13412s + 142834} \quad (4.13)$$

Створимо передаточну функцію в середовищі Matlab, яка матиме вигляд який представлений на (Рис. 4.2).

Рис. 4.2 Передатна функція BLDC двигуна

Transfer Fcn

#### 4.2 Математична модель відцентрового колеса

Передаточну функцію відцентрового колеса можна визначити як функцію, що описує залежність моменту інерції колеса від кутової швидкості. Для розрахунку передатної функції необхідно знати розподіл мас відносно центру колеса. У нашому

випадку маса рівномірно розподілена відносно центру колеса, а маса кожного елемента колеса пропорційна його відстані від центру колеса.

Для визначення передавальної функції центрифуги може бути використаний момент інерції циліндра. Для обчислення передатної функції відцентрового колеса з масою 750 г та діаметром 140 мм, ми використовуємо формулу для моменту інерції циліндра.

Спочатку, перетворимо масу колеса з грамів до кілограмів:

$$m = 750 \text{ г} = 0.75 \text{ кг} \quad (4.14)$$

Також, визначимо радіус колеса:

$$r = \text{діаметр} / 2 = 140 \text{ мм} / 2 = 70 \text{ мм} = 0.07 \text{ м} \quad (4.15)$$

Тепер, використаємо формулу для моменту інерції циліндра:

$$I = (1/2) * m * r^2 \quad (4.16)$$

$$I = (1/2) * 0.75 \text{ кг} * (0.07 \text{ м})^2 \quad (4.17)$$

$$I = 0.5 * 0.75 \text{ кг} * 0.0049 \text{ м}^2 \quad (4.18)$$

$$I = 0.0018375 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.19)$$

Таким чином, передатна функція відцентрового колеса з масою 750 г та діаметром 140 мм є:

$$I = 0.0018375 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4.20)$$

Тоді передаточна функція матиме вигляд зображений на (4.3):

$$\frac{1}{0.0018375s}$$

**Transfer Fcn1**

Рисунок 4.3 – Передана функція відцентрового колеса

## РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

### 5.1 Синтез системи керування

Для синтезу системи керування розподілом гранул в реакторі шляхом стабілізації обертів двигуна реактора розглянемо класичну схему з використанням ПД-регулятора та зворотного зв'язку. Моделювання проводилося в середовищі Matlab. Схема представлена на рисунку(рис. 5.1)

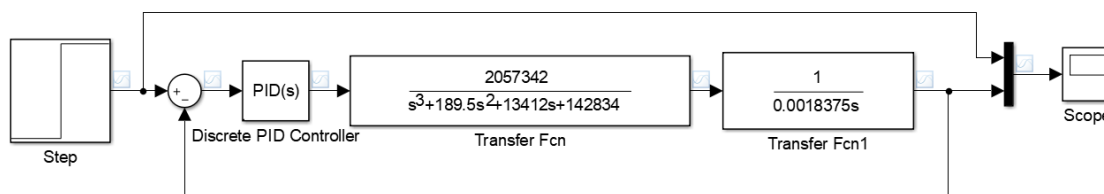


Рис. 5.1 – Загальна схема контуру.

Далі проведемо налаштування ПД-регулятора. Для вирішення проблеми перегулювання системи використаємо метод Циглера-Ніколсона. Для початку підберемо значення коефіцієнта Р, при якому система досягає межі стійкості і коливання не згасають. Використовуючи метод експериментального підбору, де заздалегідь вилучено вплив інтегральної та похідної складових отримали значення коефіцієнта Р (рис. 5.2)

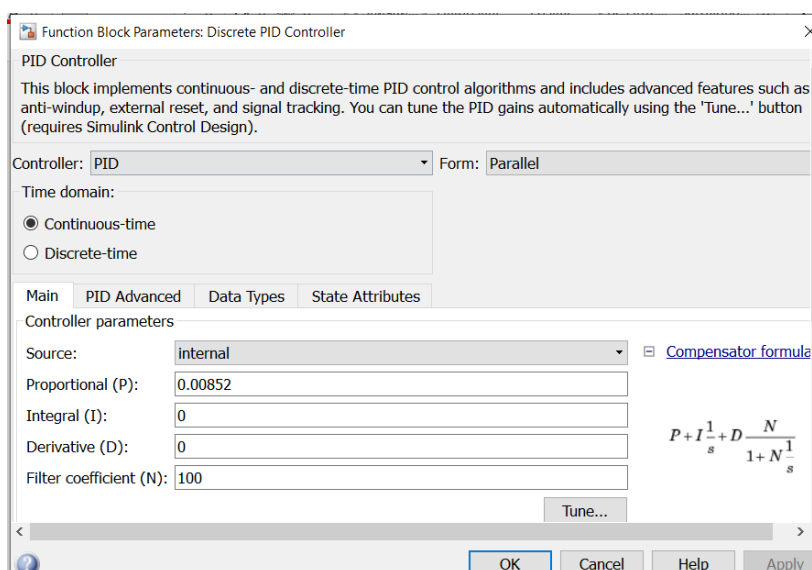


Рис. 5.2 Значення параметрів регулятора

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 33   |

Реакція системи зображена на(рис. 5.3)

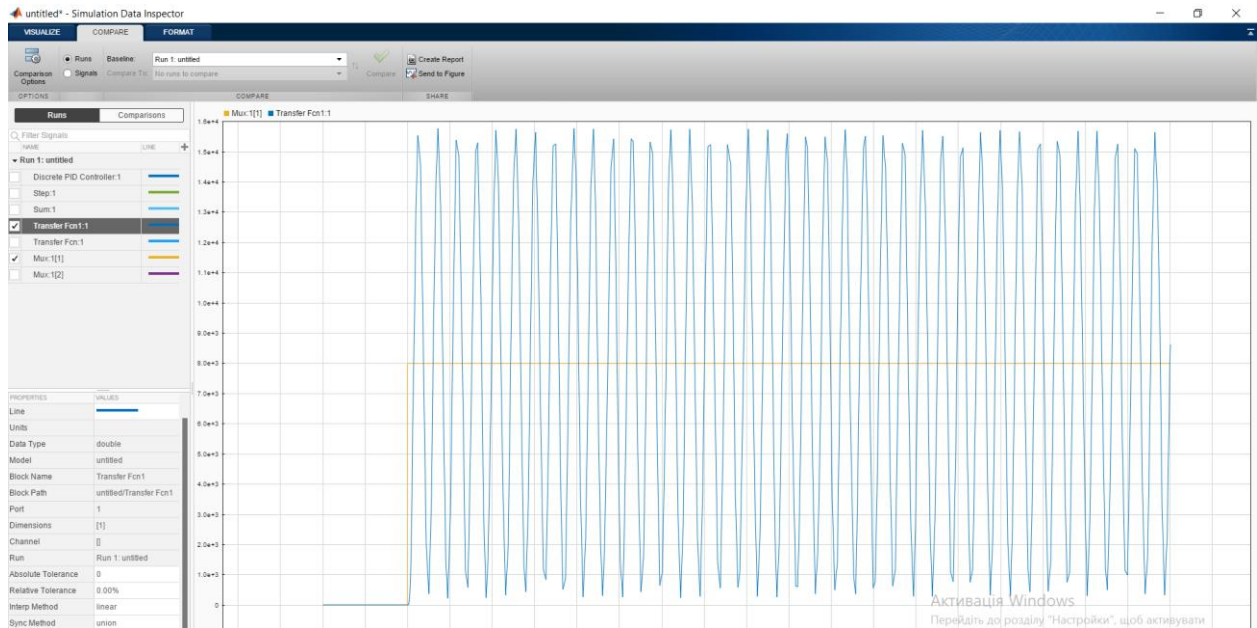


Рисунок 5.3 – Реакція системи

Підбравши П-коефіцієнт ( $K_{kp}$ ) та визначивши період коливань ( $T_p$ ) який становить 0.23, розрахуємо значення для інших складових регулятора відносно наступних рівнянь:

П-регулятор:  $K_p = 0,55K_{kp}$ .

ПІ-регулятор:  $K_p = 0,45K_{kp}$ ,  $T_i = 1,2 * K_p / T_p$  .

ПІД-регулятор:  $K_p = 0,6K_{kp}$ ,  $K_d = 2 * K_p / T_p$ ,  $K_d = K_p * T_p / 8$ .

Виберемо параметри для ПІД-регулятора, тоді :

$$K_p = 0.6K_{kp} = 0.6 * 0.00852 = 0,005112 \tag{5.1}$$

Для інтегральної складової:

$$K_i = 2K_p/T_p = 0,01022/0,23 = 0,0444521739 \tag{5.2}$$

Для диференційного коефіцієнту:

$$\begin{aligned} Kd &= Kp * Tr/8 = 0,0011776/8 \\ &= 0,0001472 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Підставимо обчислені параметри в налаштування блоку ПІД-регулятора (Рис 5.4).

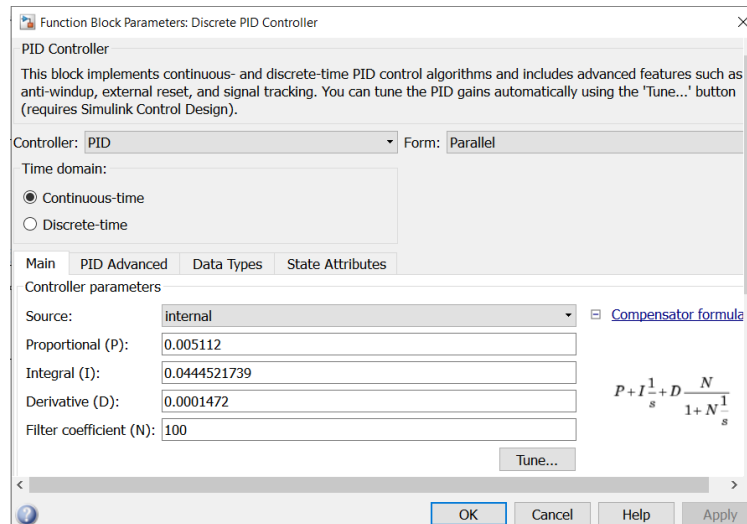


Рисунок 5.4 – Параметри коефіцієнтів ПІД-регулятора.

Отримаємо наступну реакцію системи (Рис. 5.5)

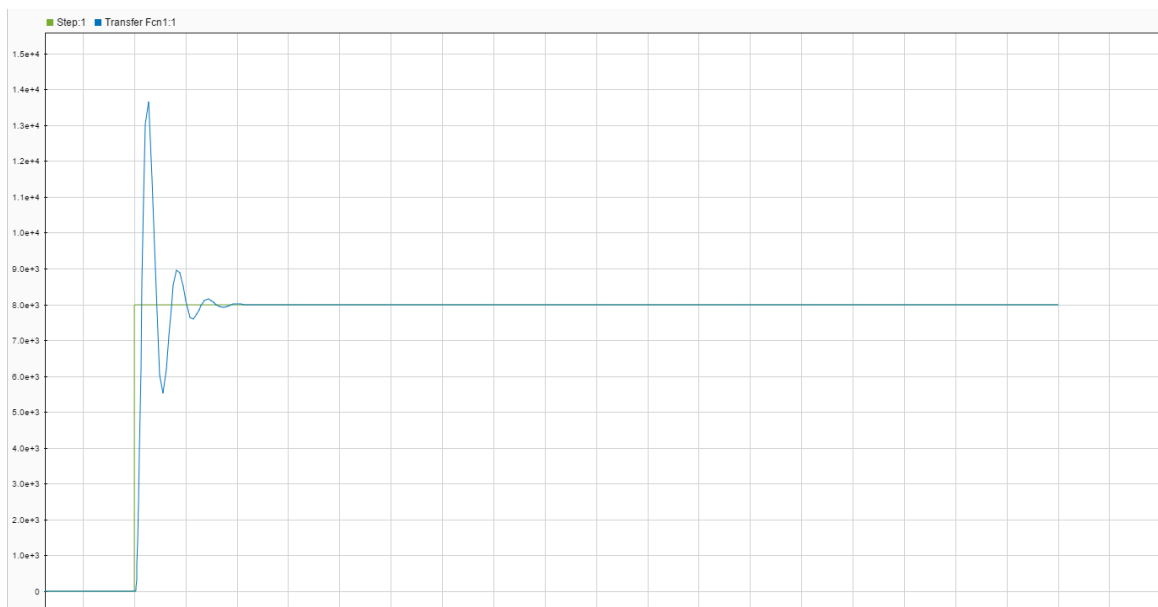


Рисунок 5.5 – Реакція системи з ПІД-регулятором.

На (Рис. 5.5) бачимо, що система з розрахованими параметрами (Рис. 4.4) ПІД-регулятора має недолік у вигляді перерегулювання, що становить приблизно 70% від заданого значення. Проведемо регулювання ПІД-регулятора для отримання кращого результату.

Експериментально визначимо нові значення параметрів ПІД-регулятора (Рис. 4.6).

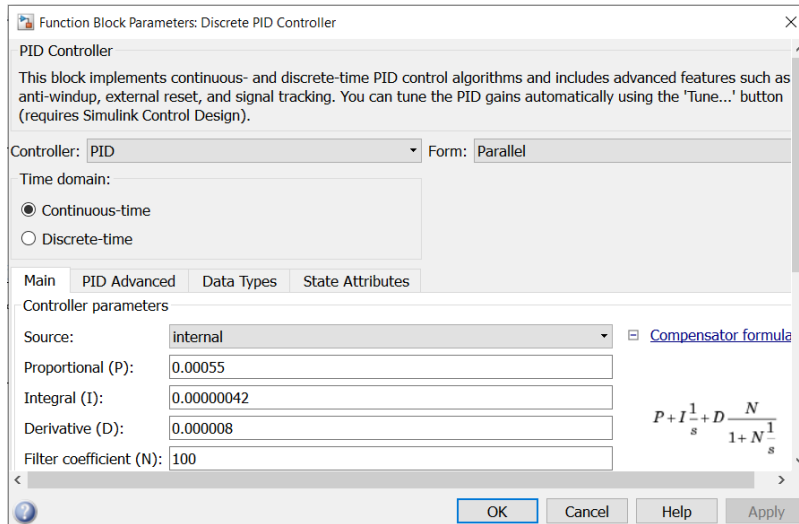


Рисунок 5.6 – Параметри ПІД-регулятора

Графік перехідного процесу з новими коефіцієнтами зображений на (Рис. 5.7), з малюнку видно що вдалося майже повністю прибрати процес перерегулювання системи за рахунок налаштування коефіцієнтів.

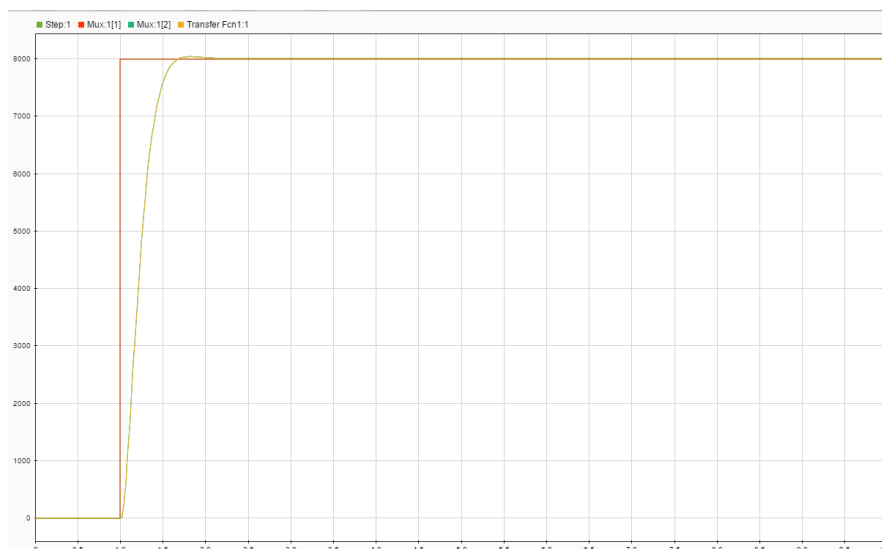


Рисунок 5.7 – Графік реакції системи з ПІД-регулятором.

Знайдемо різницю між коефіцієнтам розрахованими математично та знайденими за рахунок експериментального підбору.

П-коефіцієнт складає:

$$N_{piz} = 100 - \frac{(Kp2*100)}{Kp1} = 100 - \frac{(0.00055*100)}{0.005112} = 89,2 \% \quad (5.4)$$

Прямопропорційна складова була зменшена на 89,2% від розрахованої величини.

І-коефіцієнт складає:

$$N_{piz} = 100 - \frac{(Ki2*100)}{Ki1} = 100 - \frac{(0,00000042*100)}{0,04445} = 100 - 67,5 = 99,9 \% \quad (5.5)$$

Інтегральна складова була зменшена на 99,9%.

Д-коефіцієнт складає:

$$N_{piz} = 100 - \frac{(Kd2*100)}{Kd1} = 100 - \frac{(22*100)}{22,68} = 100 - 97 = 94,5 \% \quad (5.6)$$

Диференційна складова була зменшена на 94,5%[9].

Після налаштування параметрів регулятора необхідно описати вплив зовнішнього збурення на систему. Включимо в схему новий елемент який буде описувати вплив гранул пластику завантажених в реактор. Так як установка створена на базі СумДУ є експериментальною зазвичай в процесі обробки використовуються порції гранул масою 500-2500г. Для налаштування створимо ланку з передатною функцією яка описує вплив на систему гранул масою 1кг. (Рис 5.8).

|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 37   |



Рис. 5.8 Передатна функція збурення

Загальна схема представлена на (рис. 8.9)

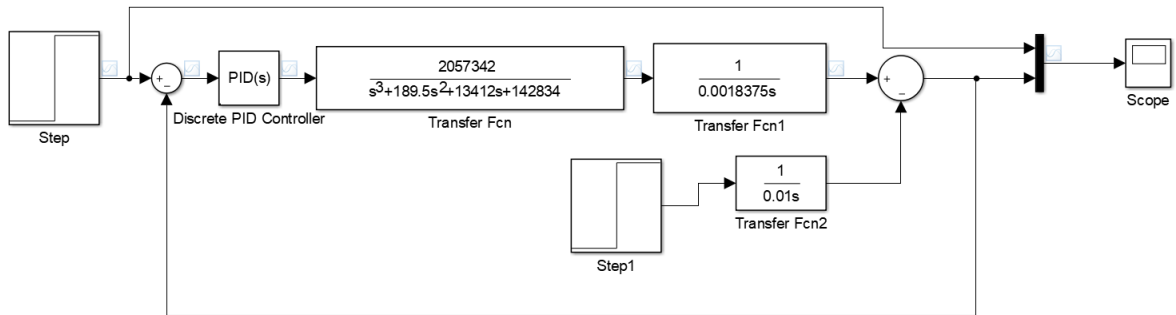


Рис. 5.9 Загальна схема системи стабілізації

Розглянемо реакцію системи з впливом зовнішнього збурення у вигляді гранул пластику (рис. 5.10)

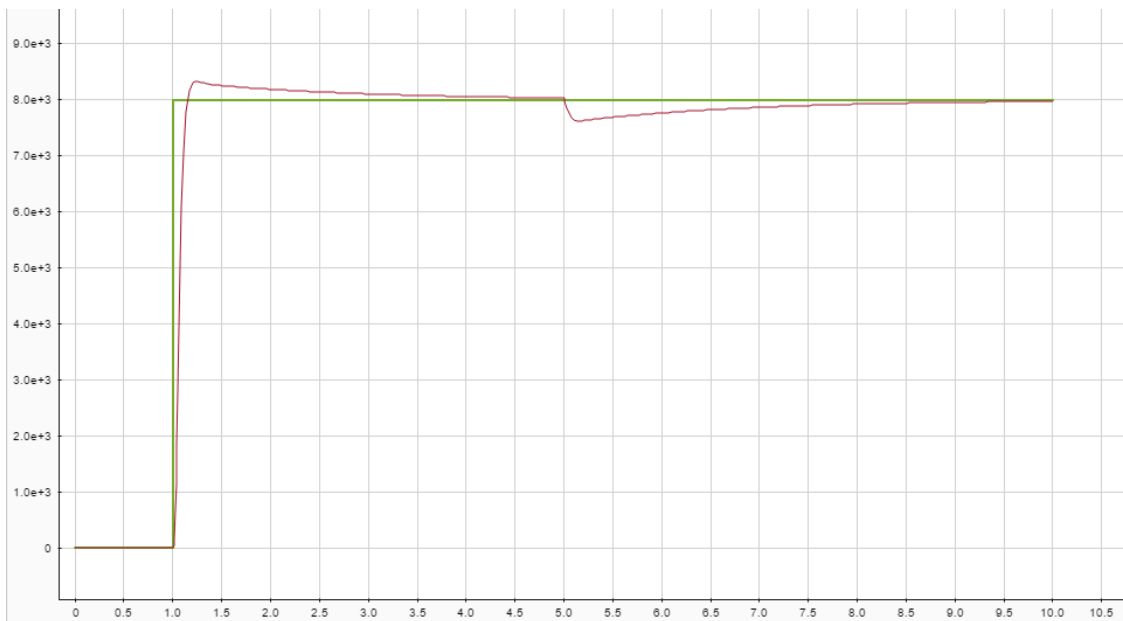


Рис. 5.10 Реакція системи



На рис. бачимо що ППД- регулятор відпрацьовує збурення але час врегулювання не задовільний. Це зумовлено недостатньою потужністю привідного двигуна.

Для того щоб зменшити час врегулювання необхідно або повільно засипати гранули або використовувати двигун реактора з іншою характеристикою.

Повільно завантажувати гранули в камеру реактора неможливо з конструктивних причин. Завантаження гранул в реактор відбувається через горловину з механічною засувкою яка приводиться в дію пневмоциліндром, засувка має два положення закрито або відкрито.

У зв'язку з неможливістю реалізувати плавне завантаження камери реактора пропонується використання більш потужного двигуна для досягнення швидкого підвищення потужності на валу без просідання обертів під час прикладання навантаження. Двигун повинен мати більшу вихідну потужність, щоб забезпечити необхідну силу для прискорення обертання вала.

Потужність на валу двигуна залежить від моменту сили, що створюється мотором, і кутової швидкості обертання вала. Підчас прикладання навантаження на вал потрібно подолати опір та масу цього навантаження. Якщо двигун не має достатньої потужності, то при навантаженні оберти вала можуть просідати, що призводить до зниження продуктивності системи.

Використання потужнішого двигуна забезпечить більшу вихідну потужність, що дозволяє подолати опір та масу навантаження без просідання обертів. Це дозволяє швидше збільшити потужність на валу двигуна та забезпечити ефективнішу роботу системи.

Проаналізуємо реакцію системи з потужнішим двигуном. Використаємо подібний двигун потужністю 4кВт. На (рис. 5.11) зображена реакція системи з двигуном 4кВт.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 39          |

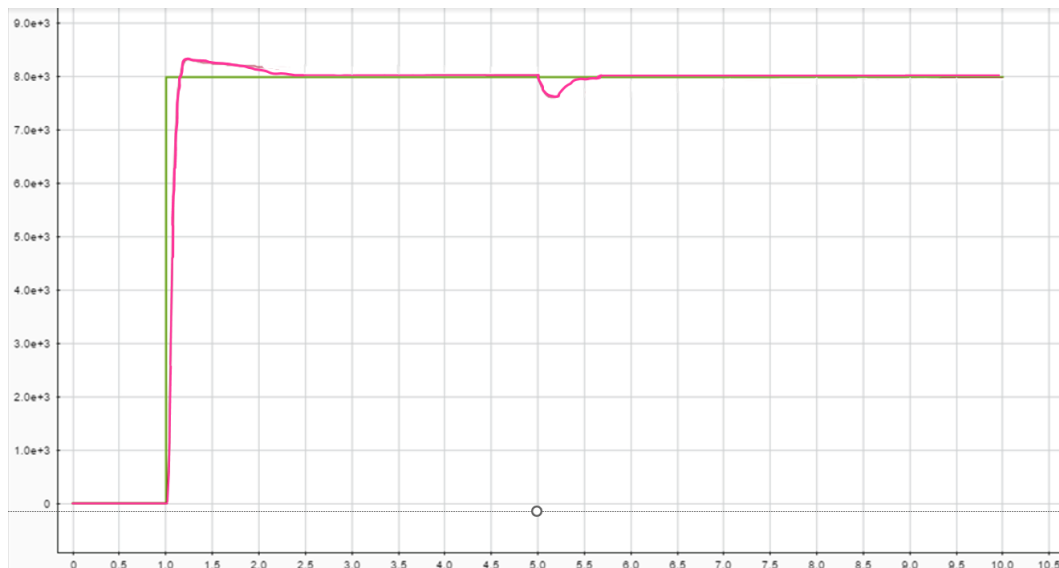


Рис. 5.11 Реакція системи з іншим двигуном

З рис. 5.11 можна побачити, що використання потужнішого двигуна дає очікувані результати. З цим двигуном вдалося зменшити час перехідного процесу врегулювання. Щоб взагалі уникнути просідання обертів можна використати двигун потужністю 6кВт. Але його застосування не є доцільним, оскільки навантаження буде не оптимальним у відношенні до його потужності.

Недоліком використання потужних електродвигунів при невеликих навантаженнях є те, що вони менш ефективні. Підчас експлуатації електродвигуна при низьких навантаженнях, його ККД мінімальний. Це пов'язано з тим, що електродвигуни спроектовані та оптимізовані для роботи при певному навантаженні, зазвичай близькому до повного. Коефіцієнт корисної дії електродвигуна визначається співвідношенням між вхідною потужністю (електричною енергією), яку споживає двигун, і вихідною потужністю (механічною роботою), яку він виробляє.

Якщо навантаження невелике, двигун фактично працює з непотрібною надлишковою потужністю. Це не тільки призводить до зайвого споживання електричної енергії, але також збільшує тепловтрати і знос компонентів двигуна. При малих навантаженнях вихідна потужність мізерно мала, а вхідна потужність майже така ж, як і при повному навантаженні. Це призводить до низького ККД, неефективного використання електроенергії та марної витрати ресурсів. Тому не рекомендується використовувати потужні електродвигуни при невеликих

навантаженнях через їх низький ККД. У таких випадках більш ефективним рішенням є використання менш потужних двигунів, що працюють з навантаженням, близьким до оптимального, що дозволяє економити енергію.

Підсумувавши можна зробити такі висновки. Використання електродвигуна потужністю 2кВт недостатньо для реалізації системи. Оскільки при завантаженні гранул різко зростає навантаження на валу двигуна та просідають оберти. Через малу потужність двигун виходить да задані оберти за 3-3,5с. Такий результат не є задовільним, тому переходимо далі. Двигун 6кВт використовувати недоцільно через його низький ККД при невеликих навантаженнях, а також в два рази більшу вартість в порівнянні з двигуном 4кВт. Використання двигуна 4кВт в поєднанні з ПД-регулятором зі зворотнім зв'язком за обертами є оптимальним рішенням для цього завдання.

## 5.2 Алгоритми роботи контролера

Після ввімкнення установки контролер пропонує два режими роботи ручний та автоматичний. В ручному режимі все керування процесом здійснюється за допомогою тумблерів на панелі керування. Коли вибраний автоматичний режим, контролер спочатку опитує датчики рівня в механічних змішувачах. Якщо рівень розчину знаходиться між мінімальним та максимальним, контролер дає сигнал на ввімкнення змішувачів. Коли умова не виконується, контролер видає помилку (запалює сигнальну лампу MIN) на панелі керування.

Далі відбувається процес змішування. В процесі змішування електропровідність розчину починає зростати. При досягненні певного значення провідності (залежить від типу та концентрації нанотрубок у розчині) контролер відкриває клапан, розчин переливається до ємності для ультразвукової обробки. Після того як весь розчин потрапив до іншого змішувача перший вимикається.

Тепер розчин готовий для обробки ультразвуком, контролер дає сигнал на ввімкнення генератора та випромінювача ультразвуку. В процесі ультразвукової обробки провідність розчину поступово збільшується та досягає максимального значення після чого трішки зменшується та стабілізується. Контролер аналізує

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 41   |

провідність в режимі реального часу, він фіксує що значення провідності стабілізувалися і дає сигнал на вимкнення ультразвуку. Розчин готовий до нанесення, вмикається двигун реактора та відбувається підготовка до обробки гранул пластику. Гранулянт що підлягає обробці знаходиться у відповідній ємності. Контролер дає сигнал на відкриття клапана який видвигає засувку для подачі гранул. Після того як гранули завантажені в камеру для обробки, засувка закривається, відкривається клапан для подачі готового розчину в реактор.

Підчас обробки гранул контролер в режимі реального часу відслідковує розподіл гранул у камері. В залежності від отриманих даних контролер дає керуючий вплив на драйвер двигуна для зменшення або збільшення обертів. Через 10хв після початку процесу обробки контролер дає сигнал на відкриття задвижки для розвантаження реактора. Через 1хв засувка зачиняється, контролер дає сигнал про завершення процесу нанесення нанотрубок на гранулянт.

### 5.3 Впровадження та реалізація

На початку впровадження була проведена підготовка для визначення технічних вимог та потреб системи.

Далі була розроблена система автоматизації, яка включала такі компоненти, як механізм нанесення нанотрубок, контрольні датчики та програмне забезпечення для управління та моніторингу процесу. На (рис. 5.12) зображена реалізована панель керування.

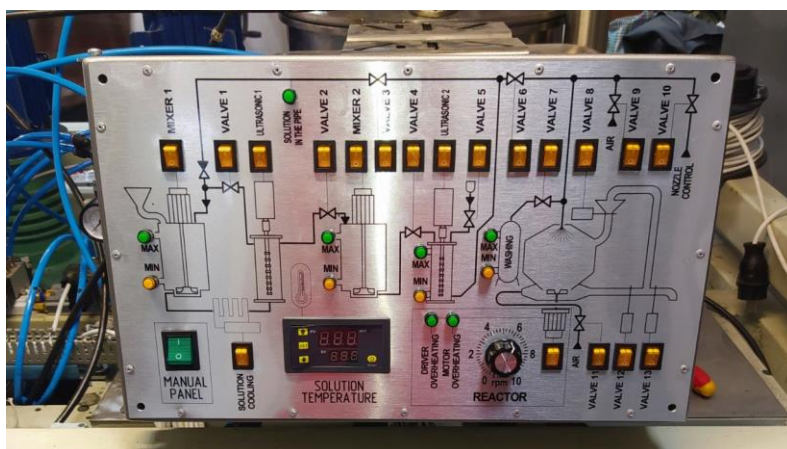


Рисунок 5.12 Панель керування

Після того, як система була розроблена, вона була протестована для забезпечення функціональності та ефективності. Під час випробувань було перевірено точність процесу осадження нанотрубок, швидкість роботи системи та якість отриманих пластикових гранул. На (рис. 5.13 ) представлені зразки гранул, отриманих в процесі тестування створеної системи.



Рисунок 5.13 Зразки гранул

З (рис. 5.13) бачимо, що перший зразок має явно виражений нерівномірний розподіл нанотрубок на поверхні гранул. Це пов'язано з великою частотою обертів двигуна, внаслідок чого гранули вдаряються об стінки реактора та мають нерівномірний розподіл в ємності.

У процесі налаштування системи досягнений рівномірний розподіл нанотрубок в матеріалі, що чітко видно на другому зразку (рис. 5.13).

Результатом впровадження даної автоматизованої системи є підвищення продуктивності установки та якості гранул, зменшення витрат матеріалу та зниження людського фактору під час процесу нанесення нанотрубок на гранули пластику.

## ВИСНОВОК

Здійснено аналіз та оцінку різних методів нанесення ВНТ на гранули пластику. Встановлено, що існуючі процеси є недосконалими, та мають недоліки, такі як низька продуктивність, висока витрата матеріалів та значний вплив людського фактору.

Розроблено автоматизовану систему нанесення ВНТ на гранули пластику, яка базується на оптимізації процесу нанесення наноматеріалу завдяки керуванню розподілом гранул в реакторі під час обробки. Ця система в порівнянні з традиційними методами має підвищену продуктивність та зменшений вплив людського фактору.

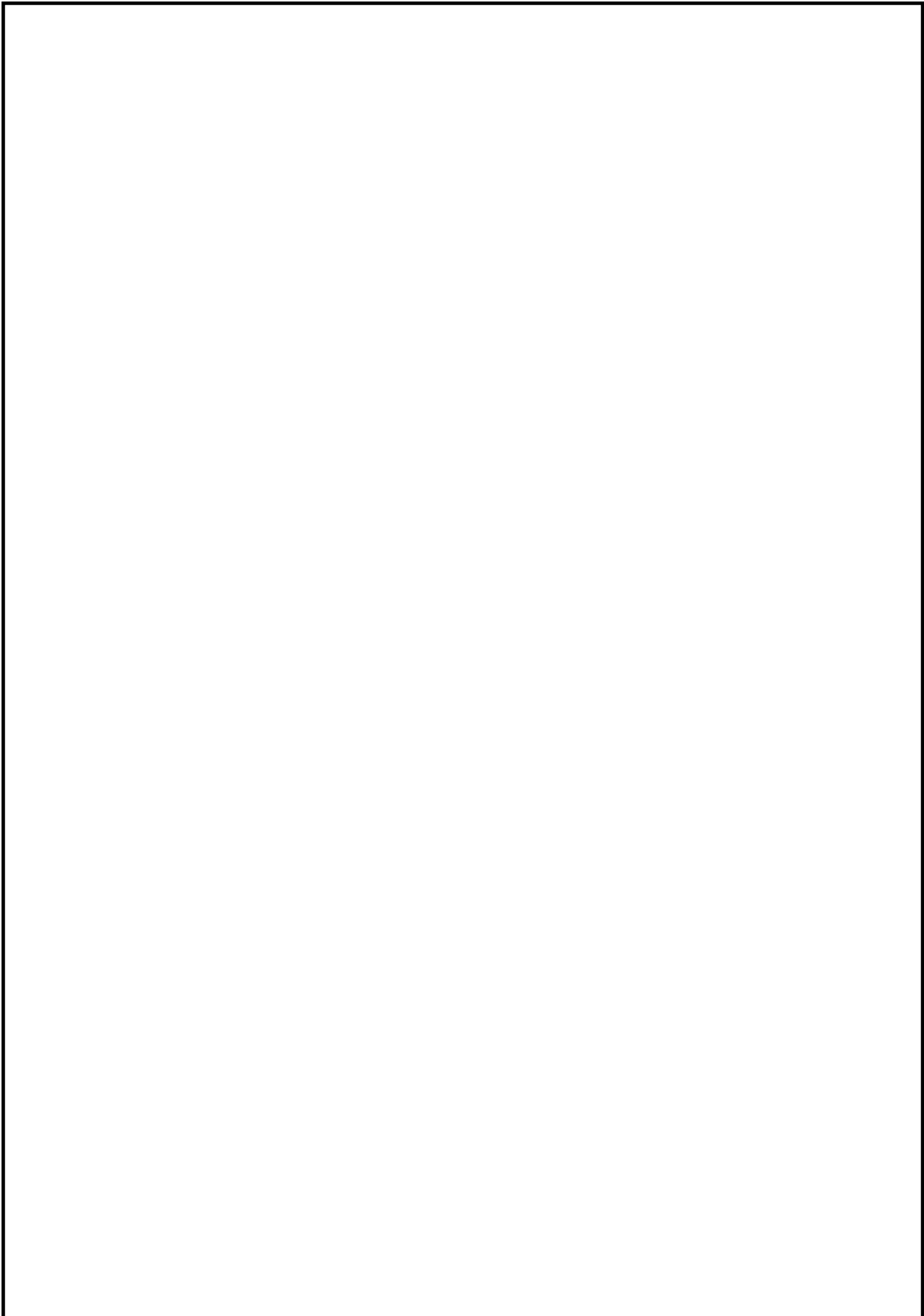
Проведено експериментальне випробування розробленої АСУ. Отримані результати підтверджують ефективність та стабільність розробленої системи, а також показують відповідність характеристик готових матеріалів вимогам стандартів якості.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 44          |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Е. О. Спорягін, Теоретичні основи та технологія виробництва полімерних композиційних матеріалів : навч. посіб. / Е. О. Спорягін, К. Є. Варлан. – Д. : Вид-во ДНУ, 2012. – с. 74-75.
2. Shen, L., Worrell, E. Chapter 13 – Plastic Recycling, Handbook of Recycling, II. Recycling application & technology. Elsevier. 2014. P. 179–190. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00013-1>
3. Yousef S., Eimontas J., Kęstutis Zakarauskas, Nerijus Striūgas, Microcrystalline paraffin wax, biogas, carbon particles and aluminum recovery from metallised food packaging plastics using pyrolysis, mechanical and chemical, Journal of Cleaner Production, 2021. #290. 125878, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125878>
4. J. H. Bang and K. S. Suslick, "Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials," Advanced Materials, vol. 22, no. 10, pp. 1039-1059, 2010.
5. А.Ф. Луговський **Особливості побудови систем керування ультразвуковими резонансними приводами / А.Ф. Луговський, В.П. Фесіч, А.В. Мовчанюк / Вібрації в техніці та технологіях/ Вінницький національний аграрний університет. 2009**
6. Датчик провідності Vernier [Електронний ресурс] – 2020. –. Режим доступу до ресурсу: [https://b-pro.com.ua/assets/files/con-bta\\_ukr.pdf](https://b-pro.com.ua/assets/files/con-bta_ukr.pdf)
7. Anurama Hiremath, Amar A Murthy ORCID Icon, Sridhar Thipperudrappa & Bharath K N | Ian Philip Jones (Reviewing-editor) **Nanoparticles Filled Polymer Nanocomposites: A Technological Review – 2021 – С. 9**
8. Pid control of brushless dc motor and robot trajectory planning and simulation in Matlab/Simulink / Oludayo Oguntoyinbo // IOP. – 2009 – С. 20-21
9. Лелюх, О.М. Автоматизована система стабілізації кулеметної турелі; робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / наук. кер. П. В. Леонт'єв. Суми : Сумський державний університет, 2022. 63с.

|     |      |          |        |      |                         |      |
|-----|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|     |      |          |        |      | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 45   |



|     |      |          |        |      |                  |      |
|-----|------|----------|--------|------|------------------|------|
|     |      |          |        |      | СУ-91 6.15101.ПЗ | Лист |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                  | 46   |



**ДОДАТОК А**  
(Обов'язковий)

**Конструкторська документація:**

СУ-91 6.151.01.А2 Функціональна схема автоматизованої системи нанесення нанотрубок на гранулянт.

СУ-91 6.151.01.Е3 Електрична принципова схема автоматизованої системи нанесення нанотрубок на гранулянт.

|            |             |                 |               |             |                         |             |
|------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|
|            |             |                 |               |             | <b>СУ-91 6.15101.ПЗ</b> | <i>Лист</i> |
| <i>Зм.</i> | <i>Арк.</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                         | 47          |