

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 магістр

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

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Автоматизована система керування процесом подачі бетону для
будівельного 3D принтеру»

Здобувача групи СУ.м-22

Нестеренка Б. Ю.

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

Богдан Нестеренко

Керівник: завідувач кафедри КСУ, к.т.н.

Петро Леонт'єв

Консультант:

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ Леонт'єв П. В.

_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти
Нестеренку Богдану Юрійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Автоматизована система керування процесом подачі бетону для будівельного 3D принтеру. Затверджена наказом ректора СумДУ. №1097-VI від “09” жовтня 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація, список літературних джерел з матеріалами опису і автоматизації технологічного процесу тощо.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз предметної області, технологічна характеристика бетононасоса, вимоги до автоматизованої системи керування насосним агрегатом, алгоритм роботи автоматичної системи управління бетононасосу, розрахунок параметрів бетононасосу шнекового типу, залежність характеристик бетононасоса при регулюванні обертів, моделювання системи в середовищі Matlab, налаштування регуляторів, аналіз отриманих даних.

5. Перелік графічних матеріалів: 21 рисунок, 2 таблиці.

6. Календарний план проектування.

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Складання технічного завдання. Підбір та аналіз літератури і першоджерел.	14.09.2023 – 14.10.2023
2	Аналіз предметної області. Область застосування.	14.10.2023 – 15.11.2023
3	Аналіз алгоритму роботи автоматичної системи управління подачі бетону.	15.11.2023 – 01.11.2023
4	Опис автоматизованої системи управління подачі бетону для будівельного 3D принтеру.	01.11.2023 – 17.11.2023
6	Моделювання системи та аналіз отриманих даних	01.12.2023 – 12.12.2023
7	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації	12.12.2023 – 24.12.2023

7. Дата видачі завдання “14” вересня 2023р.

Керівник проекту:

Завідувач кафедри КСУ, к.т.н.

Леонтьєв П. В.

До виконання прийняв:

студент групи СУ.м – 22

Нестеренко Б. Ю.

АНОТАЦІЯ

Представлено проект Нестеренка Богдана Юрійовича на тему: «Автоматизована система керування процесом подачі бетону для будівельного 3D принтеру».

Кваліфікаційна робота магістра зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (дипломний проект). Сумський Державний Університет, Суми, 2023 р.

Даний дипломний проект освітнього рівня магістр спрямований на розробку автоматизованої системи керування процесом подачі бетону для будівельного 3D принтеру. Описані головні проблеми, що виникають при подачі бетону до екструдера і запропоновані методи їх попередження. Розглянуто процес прокачки бетонної суміші для будівельного 3D принтеру. Здійснено опис головних компонентів системи керування. Проведений аналіз параметрів, що впливають на продуктивність та стабільність подачі бетону. Розроблено математичну модель системи, проведено моделювання системи в середовищі Matlab (simulink), застосовано та налаштовано ПД регулятор для оптимізації керування насосним агрегатом для подачі бетону.

Дипломний проект містить 38 сторінок пояснювальної записки, 21 рисунок, 2 таблиці.

Ключові слова: автоматизація, система управління, насосний агрегат, шнековий насос, бетононасос.

ANNOTATION

The project of Bohdan Yuriyovych Nesterenko on the topic: "Automated control system of the concrete feeding process for a construction 3D printer" was presented.

Master's thesis on specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies (diploma project). Sumy State University, Sumy, 2023

This master's thesis project is aimed at the development of an automated control system for the concrete feeding process for a construction 3D printer. The main problems that arise when feeding concrete to the extruder are described and methods of their prevention are proposed. The process of pumping concrete mixture for a construction 3D printer is considered. The description of the main components of the control system is carried out. An analysis of the parameters affecting the performance and stability of concrete supply was carried out. A mathematical model of the system was developed, the system was simulated in the Matlab (Simulink) environment, a PID controller was applied and configured to optimize the control of the pumping unit for concrete supply.

The diploma project contains 38 pages of explanatory note, 21 figures, 2 tables. Keywords: automation, control system, pump unit, screw pump, concrete pump.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬНИХ 3D ПРІНТЕРІВ	10
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	15
3. ОПИС СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	17
3.1 Загальний опис проекту.....	17
3.2 Огляд основних типів бетононасосів.....	18
3.3 Вибір типу та розрахунок параметрів бетононасосу.....	21
3.3 Огляд та розрахунок потужності приводу насосу	23
4. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧІ БЕТОНУ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОГО 3D ПРИНТЕРУ	26
4.1 Синтез математичної моделі для асинхронного двигуна	27
4.2 Синтез математичної моделі для бетононасосу (шнекова пара) та трубопроводу:.....	31
4.3 Моделювання системи та дослідження динамічних характеристик	33
ВИСНОВОК	39
ЛІТЕРАТУРА	40

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСК - автоматизована система керування;
САУ – система автоматичного управління;
ОК – Об’єкт керування;
АД – асинхронний двигун;
ЧП – частотний перетворювач;
Д – давач;
ВМ – виконавчий механізм;
СА – схема автоматизації;
КК – контур керування;
3DCP - 3D Concrete Printing
ШН - шнековий насос

ВСТУП

В сучасному світі технології стрімко розвиваються, та будівництво не є винятком. Однією з найбільш інноваційних технологій в галузі будівництва є використання 3D-принтерів. Цей захоплюючий напрям відкриває нові перспективи у сфері конструювання та ефективності будівельних процесів.

3D-друкування в будівництві - це не лише інноваційна техніка, але й відмінний засіб для вирішення численних викликів у галузі. Замість традиційних методів будівництва, які можуть бути витратними та часоємкими, 3D-принтери дозволяють створювати об'єкти швидше та ефективніше. Ця технологія відкриває можливості для реалізації сміливих дизайнерських ідей та оптимізації енергоефективності будівель.

Технологія 3D-друку була винайдена ще в 80-х роках минулого століття, застосування її в будівництві з'явилося значно пізніше. Перші проекти будівництва з використанням 3D-друку з'явилися лише у 2014 році.

У цьому контексті важливо зазначити, що використання 3D-принтерів у будівництві не лише полегшує процес будівництва, але також зменшує вплив на навколишнє середовище, зменшуючи відходи матеріалів та споживання енергії. Такі технології відкривають нові можливості для створення стійких та інноваційних будівель, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

Будівництво 3D Concrete Printing (3DCP) вносить вражаючі зміни в будівельну галузь. На відміну від традиційного підходу до вертикального будівництва, який вимагає ручної праці для укладання свіжого бетону в опалубку, будівництво 3DCP дозволяє автоматизувати тривимірне будівництво бетонних конструкцій. Такий підхід зменшує потребу в людській праці та опалубці та прискорює процес будівництва. 3DCP набула значного розвитку в останні роки, коли в усьому світі було завершено кілька будинків та інших проектів цивільної інфраструктури з використанням цієї технології [1].

Одним з ключових елементів процесу будівництва за допомогою 3D-друку є прокачка бетону в будівельному 3D принтері з використанням насоса. Розвиток

цієї технології створює нові можливості для швидкого та ефективного будівництва, але вимагає додаткових досліджень в галузі прокачки бетону в 3D принтері. Дослідження впливу на дію насоса при процесі прокачки бетонної суміші в 3D принтері таких факторів, як склад суміші, висота положення сопла, пульсація суміші та довжина шланги, може допомогти визначити оптимальні параметри для забезпечення більш ефективного та стабільного процесу прокачки.

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ БУДІВЕЛЬНИХ 3D ПРІНТЕРІВ

Протягом останнього десятиліття автоматизація в будівництві не тільки визначила нові стандарти, але й відіграла переважну роль у зміні підходів до виробництва та управління проектами. Цей тенденційний зсув в сфері будівництва не тільки стимулював індустрію до підвищення продуктивності, але й значно зменшив трудовитрати, що дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з складністю конструкцій та геометричних форм. Це створює можливості для виготовлення унікальних архітектурних вирішень, які можуть бути важко або навіть неможливо втілити іншими методами.

У цьому контексті 3D-принтери виступають не просто як технологічні інновації, але як ключові каталізатори для трансформації будівельних процесів. Замість традиційних методів будівництва, що часто вимагають значних ресурсів і часу, використання 3D-принтерів дозволяє не лише прискорювати, але й оптимізувати будівельні проекти. Зменшення витрат на робочу силу стає реальністю завдяки автоматизованому процесу друку, який виконує завдання з великою точністю та швидкістю[2].

Досить широке розповсюдження отримали два типи будівельних 3D принтерів: порталного та радіального типів.

Портальні 3D-принтери входять у клас будівельних 3D-принтерів, які використовують технологію аддитивного виробництва для створення будівельних конструкцій. Основною особливістю порталних принтерів є їх здатність переміщувати друковану площу в просторі вздовж горизонтальних та вертикальних висей.

Радіальні 3D-принтери відзначаються здатністю обертати друковану площу, що надає їм унікальні можливості для друкування складних геометричних форм та елементів з округленими контурами. Це робить їх ідеальними для створення архітектурних деталей та елементів, які важко виготовити за допомогою інших методів будівельного друку.

Одна з перших згадок щодо будівництва будівель за допомогою будівельного 3D принтеру - є будівництво 10 невеликих будинків протягом однієї доби китайською компанією WinSun Decoration Design Engineering Co в 2014 році.



Рисунок 1.1 - 6-поверховий будинок збудований компанією Winsun

З того часу компанія WinSun досягла значного прогресу у 3D-друку житлових будинків та інших споруд. Їм вдалося надрукувати на 3D-принтері цілий 6-поверховий житловий будинок, а також вражаючий будинок, який точно не виглядає як надрукований на 3D-принтері [3].

Також на світовому ринку будівельних рішень автоматизації виділяється, розташований у Флориді виробник 3D-принтерів Apis Cor, який пропонує конкретні системи 3D-принтерів, що складаються з Френка (принтер), Гері (блок змішування та перекачування) та Мері (система доставки матеріалу). Радіальний принтер Frank тепер можна купити в усьому світі. На відміну від портального принтера, який потребує складання та може вимагати створення додаткового фартуха з плити або бетонного підніжжя, щоб витримати вагу принтера, Frank є 3D-принтером-роботом. Його можна переміщати по будівельному майданчику та друкувати до двох поверхів [4].



Рисунок 1.2 - Будівельний 3D принтер радіального типу компанії Apis Cor

Один з проектів Apis Cor - це проект для муніципалітету Дубая, що був найбільшою, на той час (2020 рік), будівлею, надрукованою на 3D-принтері. Двоповерховий простір площею 650 квадратних метрів був виготовлений на принтері Apis Cor.



Рисунок 1.3 - проект будинку для муніципалітету Дубая

Через сильну спеку в пустелі Дубаї, яка досягла 50 °С, більшість будівництва було виконано вночі. У процесі друку було багато ручного втручання, особливо для обходу перешкод та встановлення недрукованих компонентів. Компанія сподівається створити систему машинного зору, яка дозволить принтеру уникати перешкод. Загальний час друку, за даними компанії, становило близько 500 годин, вісім годин на день [5].

Apis Cor в даний час розробляє в США проекти з будівництва доступного житла у Флориді, Луїзіані та Каліфорнії. Разом із SEArch+ компанія також перемогла у конкурсі НАСА з 3D-друку Habitat Competition у 2019 році, зробивши космічне проживання ще на крок ближче.

На вітчизняному ринку також присутні компанії, що розроблюють та впроваджують використання будівельних 3D принтерів.

Компанія 3D Technology UTU розробила будівельний 3D принтер радіального типу та вже використовує його будівництві.



Рисунок 1.4 - Будівельний 3D принтер від компанії 3D Technology UTU

В літку 2023 року компанія долучилась до відновлення зруйнованого російськими агресорами житла в місті Ірпень Київської області [6]. Також компанія

продовжує вдосконалювати конструкцію принтеру та заявляє про збільшення швидкості переміщення стріли до 2000 мм/сек.

Ще одна компанія з вітчизняного ринку - це Mellivora. Компанія розробила та побудувала власну версію будівельного 3D принтеру радіального типу [7].



Рисунок 1.5 - Будівельний 3D принтер від компанії Mellivora

Компанія вже побудувала перший тестовий будинок, в процесі будівництва якого, принтер пройшов тестування навантаженням та додаткове налаштування для більш оптимальної та продуктивної роботи компонентів будівельного 3D принтеру. Наразі, відповідно до соціальної мережі компанії, команда розробників тестує друк об'єктів складної геометричної форми.

Нажаль точні технічні характеристики принтерів, переставлених в огляді, не відомі, бо більшість інформації представлено в вигляді презентацій без детального опису.

Одна із об'єднуючих риск кожного типу будівельних 3D принтерів є подача будівельної суміші до екструдера. І керування подачею у спосіб, що забезпечую достатню та рівномірну подачу суміші є одним з важливих компонентів будівництва за допомогою будівельного 3D принтеру.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Незважаючи на те, що аналіз існуючих рішень не відобразив переваг чи недоліків існуючих систем подачі бетону, та враховуючи те, що головним компонентом системи подачі бетону є насосний агрегат для прокачки бетону, то можна визначити кілька загальних недоліків систем керування, які потрібно визначити для розробки автоматизованої системи прокачки бетону в будівельному 3D принтері:

- Час реакції системи.
- Перерегулювання.
- Інерційність.
- Точність.

Час реакції системи відповідає мінімальному часу, необхідному для досягнення стабільного стану, і часто цей показник вимірюється на основі зміни значення одного із параметрів пристрою. Важливо, щоб система рухалася з максимальною швидкістю. Час реакції вимірюється від початку дії до досягнення певного значення.

Перерегулювання системи є небажаним, тому що воно погіршує якість роботи всієї системи та її компонентів. У більшості насосних агрегатів використовуються електродвигуни у якості приводу насосного механізму. Оскільки до системи подачі бетону входить трубопровід, що заповнений доволі важкою сумішшю, інерція може бути великою, що створює додаткові вимоги до потужності електродвигуна. Також перерегулювання може знизити тривалість роботи механізмів та відобразитись на плавності виходу бетону із екструдера.

Інерційність системи – це ключовий показник, що відображає її кінетичні та потенційні властивості. Як було сказано вище, бетоновід, що заповнений бетонною сумішшю додає додаткову інерційність системі. Тому потрібно враховувати цей чинник при розробці системи керування.

На точність встановлення потрібних параметрів, насамперед, впливає частота дискретизації датчиків, що використовуються в системі та якість боротьби зі збуреннями та помилками в системі.

Метою роботи є аналіз параметрів, що впливають на прокачку бетону в будівельному 3D принтері, побудови математичною моделі керування приводу бетононасосу та використання результатів дослідження для побудови системи керування приводу бетононасосу в будівельному 3D принтері.

Для досягнення поставленої мети повинні бути вирішені наступні завдання:

1. Опис об'єкту керування (ОК).
2. Розробити математичну модель керування обертами двигуна для підтримки визначеної продуктивності бетононасосу.
3. Дослідити можливості налаштувань регуляторів системи.
4. Оцінити ефективність регулятора при дії збурень параметрів процесу.

3. ОПИС СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Загальний опис проекту

Принтер з радіальною конструкцією включає в себе чотири основні складові: гідравлічна система для підняття поворотної платформи, сама поворотна платформа, стріла та бетононасос. Екструдер розташований на кінці стріли принтера і призначений для нанесення будівельного розчину.

Головна мета проекту полягає у забезпеченні рівномірної подачі та достатньої продуктивності прокачки будівельної суміші до екструдера. Відповідно до завдання, бетононасос повинен забезпечити таку продуктивність, щоб на виході з екструдера ми могли отримувати будівельну суміш товщиною 25 мм та забезпечити швидкість нанесення шару в 1000 мм/сек.

Загалом систему подачі бетону можна зобразити як таку, що складається з наступних компонентів:

1. Привід насосу - електричний двигун.
2. Насос, що створює тиск та прокачує будівельну суміш.
3. Бетоновод - трубопровід, що зв'язує насос з екструдером
4. Давачі, що контролюють параметри прокачки: розмір будівельної суміші на виході із екструдера, витрату суміші, давачі температури, вологості, тощо.

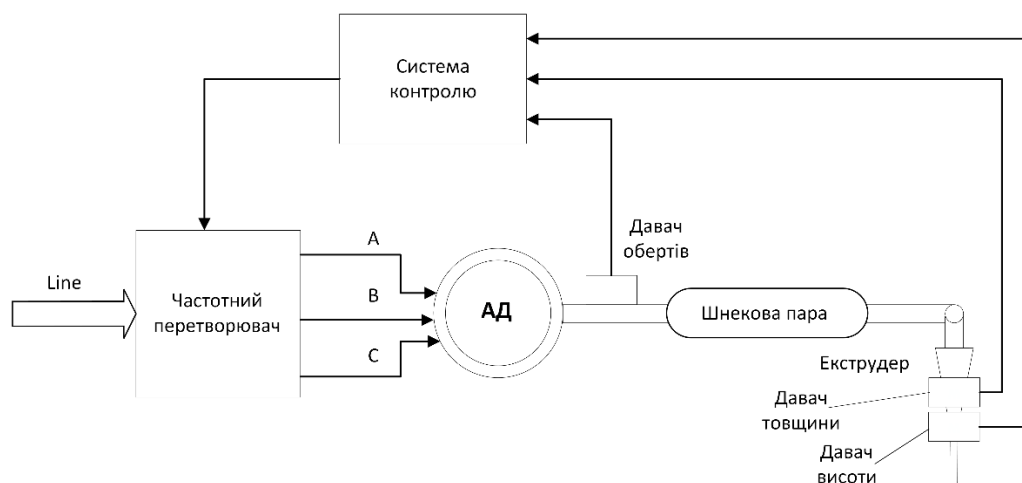


Рисунок 3.1 – Структурна схема подачі бетону

3.2 Огляд основних типів бетононасосів

Якщо розглядати насос, що перекачує бетон без привод, то основна функція бетононасосу полягає у створенні потоку розчину, який може бути контрольованим і направленим у потрібні місця для будівництва. Він забезпечує постачання будівельного матеріалу в точну точку, де екструдер будівельного принтера наносить його шар за шаром, утворюючи бажану форму будівлі.

Розглянемо два типи насосів, що використовуються для прокачки будівельних сумішей: поршневого та шнекового типу, що різняться засобами створення тиску.

Поршневий - створює тиск за допомогою руху двох поршнів, що рухаються в протилежних напрямках - один всмоктує суміш, а інший виштовхує до бетоноводу.

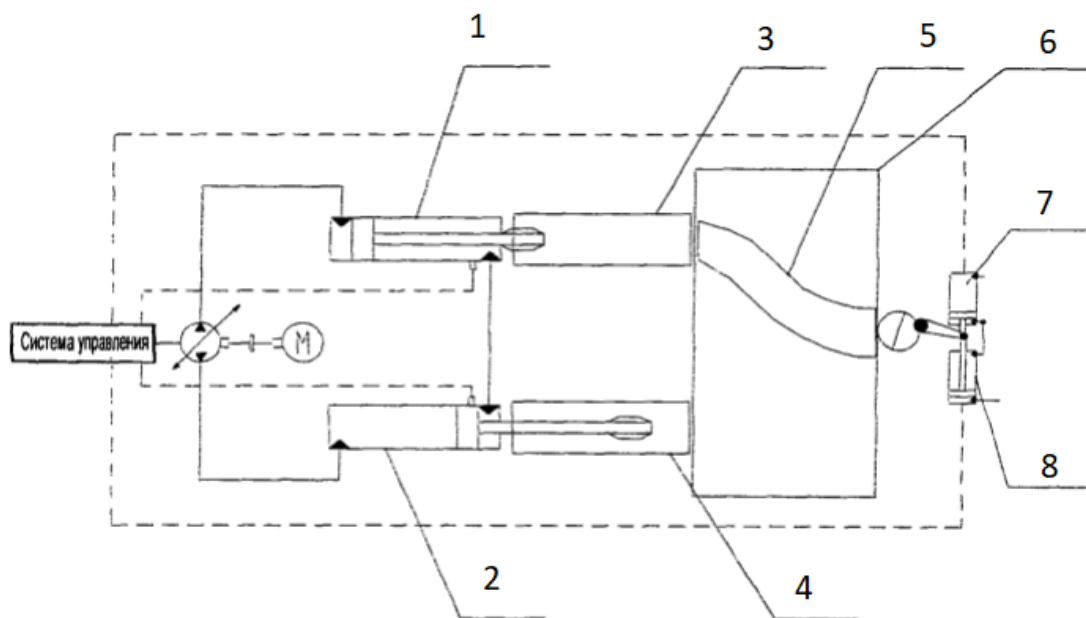


Рисунок 3.2 - Функціональна схема поршневого бетононасосу

де:

- 1,2 - головні гідроциліндри,
- 3,4 - бетоноподаючий циліндри,
- 5 - S-подібний розподільний трубчатий клапан,
- 6 - бункер з бетонною сумішшю
- 7,8 - допоміжні кочуючі гідроциліндри

Бетоноподаючі циліндри використовуються для накачування бетонної суміші з бункера в бетоновід і приводяться в рух почерговим переміщенням поршнів головних гідроциліндрів. S-подібний розподільний клапан 5 розташований в бункері 6 і з'єднується з бетоноводом, а також по черзі з'єднується з одним з бетоноподаючих циліндрів для розподілу бетонної суміші, тоді як інший бетоноподаючий циліндр в цей час всмоктує бетонну суміш з бункера. Зокрема, коливальний рух S-подібного розподільного клапана здійснюється одним або кількома приводами (такими як кочуючі гідроциліндри) [8].

Переваги поршневого насосу:

- Забезпечує високий тиск. Поршневі насоси є найефективнішим варіантом для подачі суміші на велику висоту або відстань.
- Висока продуктивність. Приблизно 75% випущених бетононасосів використовують поршневу технологію.

Недоліки поршневої системи:

- Складна конструкція. Вимагає механізмів для координації руху S-подібного клапану та поршня, а також розподільників, що керують гідравлікою. Також потрібна система змащення місць контакту поршнів із поверхнею циліндра.
- Використання гідравлічного насоса для створення необхідного тиску у гідравлічних циліндрах, які приводять поршні. Тобто такі бетононасоси менш енергоефективні, бо потребують додаткових затрат енергії.
- Швидке зношування місць контакту шиберів з вхідними та вихідними патрубками, а також самого шибера.
- Нерівномірна подача суміші, особливо помітна при пульсаціях, навіть у насосів із двома циліндрами.

Нерівномірна подача суміші є критичним, на мій погляд, недоліком для використання такого типу бетононасосу в будівельному 3D принтері. Адже один із критеріїв подачі будівельної суміші - є рівномірність подачі бетону до екструдера.

Розглядаючи шнековий насос, можна відмітити, що цей тип насоса відноситься до категорії обертових об'ємних насосів і використовується для переміщення середовища із верхнього бака по шлангу до розпилювальної трубки.

Шнековий насос має два основних компоненти: з одного боку ротор, що обертається гвинт, а з іншого боку статор, циліндр, у якому розташований ротор.

Статор має внутрішню геометрію, подібну до ротора, обидва гвинтові. Коли ротор обертається в статорі, утворюються певні порожні простори (камери транспортування) з ущільненням по окружності, що створює негативний тиск. Це, у свою чергу, забезпечує самовсмоктування суміші, що перекачуються. Через постійний рух ротора (на відміну від зміни напрямку зворотно-поступальних поршнів і, таким чином, відповідних мертвих точок), транспортування матеріалу має низьку пульсацію.

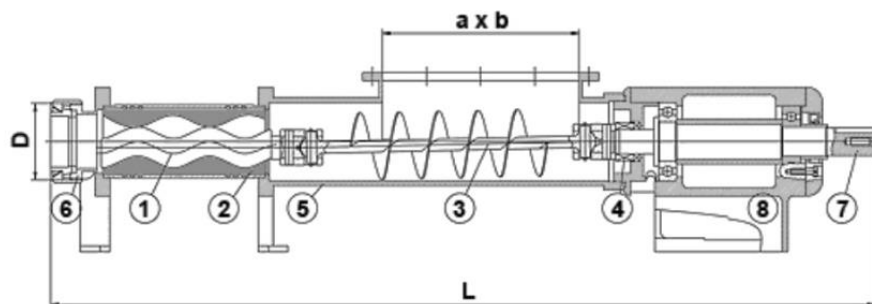


Рисунок 3.3 - Схема шнекового насосу

де:

- 1 - ротор,
- 2 - статор,
- 3 - подаючий шнек,
- 4,5 - корпус насосу
- 6 - вихідний фланець
- 7 - вал приводу

Переваги шнекового насосу:

- Достатньо висока продуктивність, але все ж менша, ніж у систем з поршневим насосом.
- Проста конструкція та компактні розміри.
- Плавна подача матеріалу.
- Знос шнека та корпусу менший, ніж у гнучких ділянках бетонопроводу роторної системи.
- Можливість працювати із сумішами, що включають заповнювачі різного розміру.
- Легко реалізований реверс (рух суміші у зворотному напрямку), це дозволяє в більшості випадків просто усувати пробки, що утворюються в бетонопроводі.

До недоліків шнекового насосу можна віднести те, що насос такого типу має менший, у порівнянні з поршневими насосами, тиск, що впливає на відстань та висоту транспортування будівельної суміші.

3.3 Вибір типу та розрахунок параметрів бетононасосу

Як було зазначено у попередньому підрозділі (3.2) насос шнекового типу має певний недолік: меншу ніж у поршневих насосів продуктивність. Проте цей недолік не є критичним у випадку використання такого типу насосу у будівельному 3D принтері. Для підтвердження цього виконаємо розрахунок потрібної продуктивності насосу.

Виходячи з того, що на виході з екструдера ми повинні отримати шар бетону в діаметрі 25 мм та знаючи, що максимальна швидкість друку є 1000 мм на секунду, можемо визначити, що максимальний об'єм бетону, що витрачається за одну секунду дорівнює об'єму циліндра з діаметром 25 мм та висотою в 1 м.

$$V_M = \pi \cdot R^2 \cdot H, \quad (3.1)$$

Підставивши вхідні дані до формули (3.1) отримаємо значення $0,0005 \text{ м}^3/\text{с}$ - тобто за секунду витрати бетону дорівнюють приблизно 0,5 літри бетону. За годину продуктивність бетону повинна бути не менша ніж $1,44 \text{ м}^3/\text{год}$

Враховуючи, що отримана кількість суміші для прокачки досить не велика, можна зробити висновок, що недолік, менша ніж поршневі насоси продуктивність, шнекового типу насосу не є критичним та враховуючи інші переваги, прийmemo цей тип насосу як такий, що буде використовуватись у системі керування прокачкою бетону в будівельному 3D принтері.

Виконаємо розрахунок параметрів насосу шнекового типу для подачі бетону для будівельного типу 3D принтеру.

Вище ми визначили, що мінімальна продуктивність насосу повинна бути ніж $1,44 \text{ м}^3/\text{год}$. Проте слід зазначити, що цей розрахунок проводився без врахування висоти подачі бетону та відстані між насосом та екструдером. Тому буде доцільно збільшити бажану продуктивність насосу до $5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Прийmemo наступні параметри для подачі бетону:

$Q = 5 \text{ м}^3/\text{год}$ – продуктивність або об’ємна витрата насосу

$H = 30 \text{ м}$ – потрібний напір насосу.

$L = 60 \text{ м}$ – довжина бетоноводу від насосу до екструдера.

$d_{mp} = 0,05 \text{ м}$ – діаметр бетоноводу.

$D_{ш} = 0,1 \text{ м}$ - зовнішній діаметр шнекової пари

$t_{ш} = 0,8 \text{ м}$, $d_{mp} = 0,04 \text{ м}$ – шаг гвинта

Розміри шнекової пари можна розрахувати за наступними формулами:

$$L_{ш} = \frac{\pi \cdot D_{ш} \cdot n_{ш}}{60 \cdot v_{см}}, \quad (3.2)$$

де:

$D_{ш}$ - зовнішній діаметр шнекової пари,

$n_{ш}$ – оберти насосу

$v_{см}$ – швидкість руху суміші в насосі

Визначимо $n_{ш}$ за формулою:

$$n_{ш} = \frac{Q}{S \cdot \eta \cdot \sqrt{H}}, \quad (3.3)$$

де Q – продуктивність насосу,

S – поперечний переріз шнеку

η – ККД насосу

H – напір насосу

Підставивши усі відомі значення отримаємо

$$n_{ш} = \frac{5}{0,002 \cdot 0,7 \cdot \sqrt{30}} = 652 \text{ обр/хв} \quad (3.4)$$

Для визначення швидкості суміші в насосі скористаємося формулою:

$$v_{см} = \frac{Q}{3600 * S} = \frac{5}{0,002} = 0,7 \text{ м/с}$$

Отримавши всі невідомі частини формули (3.2) визначим значення довжини шнеку:

$$L_{ш} = \frac{3,14 \cdot 0,1 \cdot 652}{60 \cdot 0,7} = 1,87 \text{ м}$$

Визначимо тиск, який буде створювати насос:

$$p = \rho \cdot g \cdot H, \quad (3.5)$$

Де

ρ – щільність бетону, прийmemo середнє значення 2300 кг/м³

g – прискорення вільного падіння

H – напір насосу

Виконавши розрахунок отримаємо значення, що дорівнює 0,7 МПа.

3.3 Огляд та розрахунок потужності приводу насосу

Головною метою приводу бетононасосу є забезпечення обертання ротору шнекової пари для прокачки бетонної суміші. При цьому важливо підтримувати задані оберти для забезпечення безперервної та плавної подачі бетону до

екструдера будівельного 3D принтеру. Привод повинен бути достатньо витривалим для довгою роботи на заданих режимах та досить енергоефективним. Також є важливим забезпечення достньої потужності для подачі бетону до принтера при переміщені екструдера по вертикалі в процесі нанесення шарів бетону.

У якості приводу насосу є доцільним вибрати асинхронний електричний двигун (АД) з коротко замкнутим ротором, оберти якого будуть керуватись спеціальним приладом - перетворювачем частоти. Тобто оберти двигуна будуть змінюватись при зміні частоти змінного струму, що живить двигун.

Цей тип електродвигуна досить простий у використанні та має більш просту конструкцію та менше компонентів ніж інші типи двигунів, тож більш простий у обслуговуванні та використанні, хоча це тип двигуна має також і свої недоліки.

Один з головних недолік цього типу двигуна є високі пускові токи, проте цей недолік може частково компенсуватись використанням перетворювача частоти з можливістю плавного пуску двигуна.

Розрахуємо необхідну потужність електродвигуна для прокачки бетону з продуктивністю 5 м³/год

Вхідні дані:

- Об'ємна витрата $Q = 5 \text{ м}^3/\text{год} = 0,0013 \text{ м}^3/\text{с}$
- Щільність бетону $\rho = 2300 \text{ кг/м}^3$
- ККД насосу $\eta_n = 0,6$

Розрахунок:

Масова витрата бетону у насосі:

$$G = Q * \rho = 0,0005 * 2300 = 2,99 \text{ кг/с}$$

Тоді гідравлічна потужність насосу для підйому суміші на висоту один метр буде дорівнювати:

$$P_g = G * H * g / \eta_n = 48,84 \text{ Вт}$$

Так як, висота на яку буде подаватись суміш дорівнює 30 метрам, то гідравлічна потужність насосу буде дорівнювати 1,5 кВт

Потужність на валу електродвигуна (при $\eta_{\text{мех}}=0.9$):

$$P_v = P_g / \eta_{\text{мех}} = 1,5 / 0,9 = 1,67 \text{ кВт}$$

Потужність електродвигуна (з врахуванням 10% втрат):

$$P_{э} = 1,84 \text{ кВт}$$

Проте, зважаючи на те, що при розрахунку враховувались приблизні значення показників щільності бетону та ККД шнекової пари, є сенс збільшити, необхідну потужність електродвигуна. Також потрібно врахувати, що щільність бетону може коливатись від складу суміші та від зовнішніх чинників, таких як температура чи вологість повітря. Врахувавши вище сказане приймемо необхідну потужність як 4 кВт. До того ж можна врахувати, що керування обертами двигуна за допомогою перетворювача частоти повинно зменшити енергоспоживання двигуна у випадках, коли двигун буде працювати не на максимальних режимах.

Визначившись з потужністю АД та потрібними оборотами насосу (3.5) обираємо двигун по довіднику[11] – 4A132S8Y3

Паспортні дані двигуна представлені у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 Паспортні дані двигуна 4A132S8Y3

P_n , кВт	s_n , %	s_k , %	ККД, %	n_0 , обр/хв	U , В	$\cos\varphi$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	$\frac{M_n}{M_{ном}}$	$\frac{M_{min}}{M_{ном}}$	J , кг/м ²
4	6,1	36	83	750	220/380	0,7	2,6	1,9	1,7	0,042

4. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОДАЧІ БЕТОНУ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНОГО 3D ПРИНТЕРУ

Один з методів регулювання продуктивністю насосу є регулювання за допомогою зміни частоти обертання електроприводу, що забезпечує необхідну величину напору в системі без будь-якого зниження ККД. Регулювання кількості обертів – це спосіб, який забезпечує мінімально необхідну витрату при оптимальному ККД приводу.

Для регулювання обертів АД доцільно використати перетворювач частоти, який змінює частоту та напругу живлення АД.

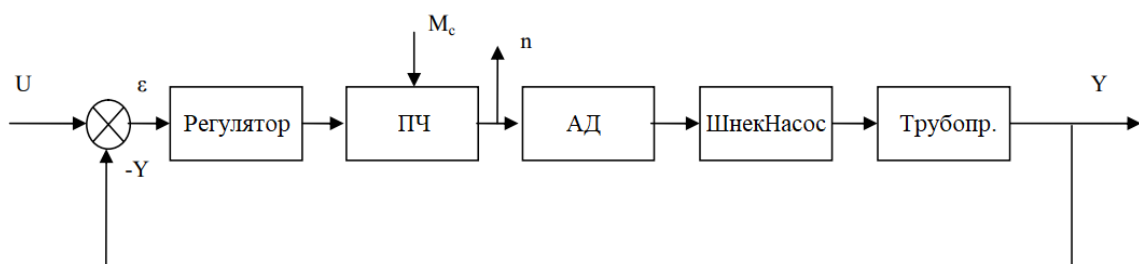


Рисунок 4.1 Структурна схема АСК подачі бетону

Залежність частоти обертів АД від частоти напруги живлення показана на формулі 4.1:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s), \quad (4.1)$$

Де, p – число пар полюсів

s – коефіцієнт ковзання АД

Відповідно до структурної схеми (Рис. 4.1) регулятор отримує вхідний сигнал, обчислює помилки, обраховую потрібну частоту обертання АД та видає керуючий сигнал на ЧП, який в свою чергу встановлює необхідну частоту напруги живлення АД. І так як, вал АД жорстко зв'язаний з ротором шнекового насосу (ШН), то оберти АД будуть дорівнювати обертам ШН

Для побудови математичної моделі СК подачі бетону в будівельному 3D принтері нам потрібно отримати передатні функції для перетворювача частоти, асинхронного двигуну, шнекової пари та бетоноводу. Також потрібно розрахувати коефіцієнти на сталі часу для визначених ланок системи.

4.1 Синтез математичної моделі для асинхронного двигуна

Запишемо математичний опис АД в нерухомій системі d-q [9] в наступному вигляді:

$$\begin{cases} U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{qs} \\ U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + \omega \cdot \varphi_{ds} \\ U'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\Psi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{qr} \\ U'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\Psi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \varphi'_{dr} \\ T_e = 1,5p(\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \end{cases} \quad (4.2)$$

де

$\Psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$ - проекція потокощеплення статора на вісь q;

$\Psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$ - проекція потокощеплення статора на вісь d;

$\Psi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$ - проекція приведенного потокощеплення ротора на вісь q;

$\Psi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$ - проекція приведенного потокощеплення ротора на вісь d;

$L_s = L_m + L_{1s}$ - індуктивність статора;

$L'_r = L_m + L'_{1r}$ - приведена індуктивність ротора;

Визначимо номінальну кутова швидкість ротора на основі виразу ковзання:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}, \quad (4.3)$$

де ω_H - номінальна кутова частота обертання ротора.

$$\omega_H = \omega_0(1 - S_H), \text{ рад/с} \quad (4.4)$$

На основі T-подібної схеми заміщення (рис. 4.2) виконується математичний опис асинхронного двигуна і розробка його динамічної моделі.

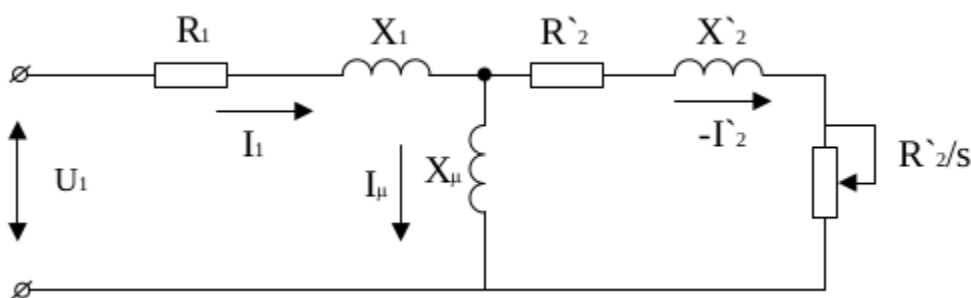


Рисунок 4.2 Схема заміщення асинхронного двигуна

Де:

R_μ, X_μ – активний і індуктивний опори контуру намагнічування;

R_1, X_1 – активний і індуктивний опори обмоток статора;

R'_2, X'_2 – активний і індуктивний опори обмоток ротора, приведені до обмоток статора;

R'_2/s – змінне активне навантаження.

Еквівалентний активний опір R_e статорного кола:

$$R_e = 1,825 \left(R_1 - R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_p^2} \right), \quad (4.5)$$

де

$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}}$ – еквівалентна індуктивність намагнічуючого контуру;

$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}}$ – індуктивність статорного кола;

$L'_2 = \frac{X'_2}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}}$ – індуктивність роторного кола;

Еквівалентна індуктивність статорного кола

$$R_e = 1,825 \left(L_c - \frac{L_m^2}{L_p} \right), \quad (4.6)$$

Таблиця 4.1 Параметри схеми заміщення для двигуна 4A132S8Y3

Активний опір обмотки статора R_c , Ом	0,068
Активний опір обмотки статора R_p , Ом	0,058
Індуктивний опір намагнічуючого кола X_m , Ом	1,6
Індуктивний опір статора X_c , Ом	0,10
Індуктивний опір ротора X_p , Ом	0,17

Скориставшись даними з таблиць табл. 3.1 та табл. 4.1 отримаємо електромагнітну сталу часу АД:

еквівалентна індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_m}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}} = \frac{1,6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0051$$

індуктивність статорного кола:

$$L_1 = \frac{X_c}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}} = \frac{0,10}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00032$$

індуктивність роторного кола:

$$L_2 = \frac{X_p}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{НОМ}}} = \frac{0,17}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,00054$$

еквівалентна індуктивність статорного кола:

$$L_c = L_m + L_1 = 0,0051 + 0,00032 = 0,00542$$

еквівалентна індуктивність роторного кола:

$$L_p = L_m + L_2 = 0,0051 + 0,00054 = 0,00564$$

Еквівалентний активний опір:

$$R_e = 1,825 \left(R_c + R_p \cdot \frac{L_m^2}{L_p^2} \right) = 1,825 \left(0,068 + 0,058 \cdot \frac{0,0051^2}{0,00564^2} \right) = 0,21 \text{ (Ом)}$$

Еквівалентна індуктивність статорного кола:

$$L_e = 1,825 \left(L_c - \frac{L_m^2}{L_p} \right) = 1,825 \left(0,00542 - \frac{0,0051^2}{0,00564} \right) = 0,0015 \text{ (Гн)}$$

Еквівалентна стала часу T_e роторного кола:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,0015}{0,21} = 0,007 \text{ с} \quad (4.7)$$

В якості моделі асинхронного двигуна використовується лінеаризована модель, структурна схема якої, зображена на рис. 4.3

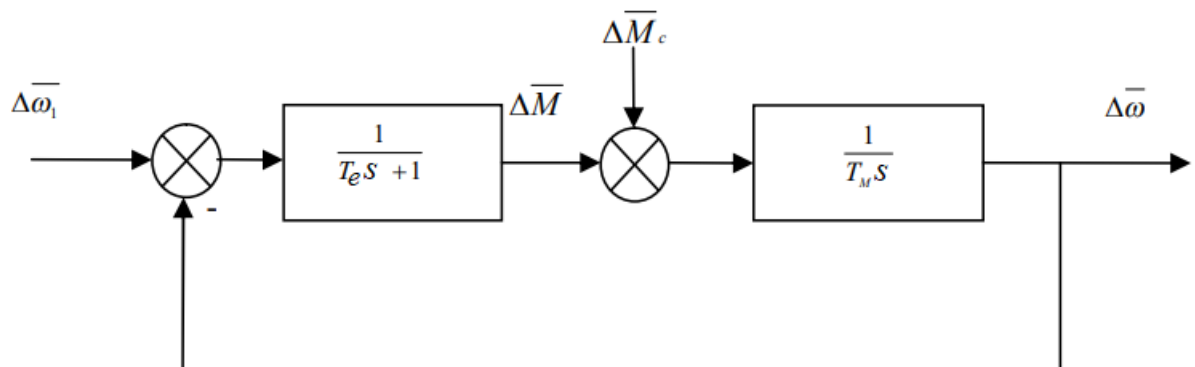


Рисунок 4.3 Лінеаризована модель АД

де:

T_m – електромеханічна стала часу;

T_e – електромагнітна стала часу

Запишемо передатну функцію для АД

$$W_{ад}(s) = \frac{k_{ад}}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (4.8)$$

Значення для T_e було розраховано в (4.7)

Отримаємо значення для T_M :

$$T_M = J \frac{\omega_H}{M_{\Pi}} = 0,042 \frac{73,7}{103,3} = 0,03 \text{ с} \quad (4.9)$$

де

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} (1 - s_H) = \frac{3,14 \cdot 750}{30} (1 - 0,061) = 73,7 \text{ рад/с}$$

та

$$M_H = 9570 \frac{P_H}{n_0 (1 - s_H)} = 9570 \frac{4}{750 (1 - 0,061)} = 54,37 \text{ (Нм)}$$

$$M_{\Pi} = k_{\Pi} M_H = 1,9 * 54,37 = 103,3$$

Розрахуємо $k_{ад}$

$$k_{ад} = \frac{\omega_0}{f_0} = \frac{78,5}{50} = 1,57$$

В результаті передатна функція для АД приймає вид:

$$W_{ад}(s) = \frac{1,57}{0,00021s^2 + 0,03s + 1}$$

Передатну функція для ЧП можна описати переданою функцією аперіодичної ланки першого порядку:

$$W_{пч}(s) = \frac{K_{пч}}{T_{пч} s + 1}, \quad (4.10)$$

$$k_{пч} = \frac{\omega_0}{U_{з,мах}} = \frac{78,5}{10} = 7,85 \quad (4.11)$$

де $U_{з,мах}$ – максимальна напруга задання

сталу часу приймемо, як $T_{пч} = 0,005 \text{ с}$

Передатна функція для ПЧ з розрахованими коефіцієнтами:

$$W_{пч}(s) = \frac{7,85}{0,005s + 1}$$

4.2 Синтез математичної моделі для бетононасосу (шнекова пара) та трубопроводу:

Зміна частоти обертання робочого колеса насоса веде до зміни всіх його робочих параметрів. При цьому змінюється положення характеристик насоса. Перерахунок характеристик на іншу частоту здійснюється за допомогою, так званих формул приведення [10]:

$$\begin{cases} \frac{Q_{\text{НОМ}}}{Q^*} = \frac{n_{\text{НОМ}}}{n^*} \\ \frac{H_{\text{НОМ}}}{H^*} = \left(\frac{n_{\text{НОМ}}}{n^*}\right)^2 \\ \frac{N_{\text{НОМ}}}{N^*} = \left(\frac{n_{\text{НОМ}}}{n^*}\right)^3 \\ \frac{M_{\text{НОМ}}}{M^*} = \left(\frac{n_{\text{НОМ}}}{n^*}\right)^2 \end{cases} \quad (4.12)$$

де $n_{\text{НОМ}}, n^*$ – номінальна і змінна частота обертання, хв^{-1} ;

$Q_{\text{НОМ}}$ і Q^* , $H_{\text{НОМ}}$ і H^* , $N_{\text{НОМ}}$ і N^* , $M_{\text{НОМ}}$ і M^* – подачі, напори насоса; потужності, споживані насосом, та моменти опору насосу при $n_{\text{НОМ}}, n^*$ відповідно.

Для перерахування параметрів насосу на нові частоти обертання валу використаємо формули (3.8), для конкретного випадку вони набувають вигляду

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \quad (4.13)$$

Нехай $Q_1 = Q_*$, $H_1 = H_*$, $\omega_1 = \omega_*$; $Q_2 = Q_{\text{Н}}$, $H_2 = H_{\text{Н}}$, $\omega_2 = \omega_{\text{Н}}$

де

$Q_{\text{Н}}, H_{\text{Н}}, \omega_{\text{Н}}$ – номінальні значення параметрів насосного агрегату;

Q_*, H_*, ω_* – поточні значення параметрів насосного агрегату.

Тоді рівняння (3.9) прийме вигляд:

$$\frac{Q_*}{Q_{\text{Н}}} = \frac{\omega_*}{\omega_{\text{Н}}} \dots \frac{H_*}{H_{\text{Н}}} = \frac{\omega_*^2}{\omega_{\text{Н}}^2} \quad (4.14)$$

Виразимо поточні значення напору і подачі насоса через швидкість на валу двигуна:

$$Q_* = \frac{Q_H}{\omega_H} \omega_* = a_1 \omega_*; H_* = \frac{H_H}{\omega_H^2} \omega_*^2 = a_2 \omega_*^2, \quad (4.15)$$

де a_1, a_2 – постійні значення.

Насос– інерційна ланки, що можуть бути представлені аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{НС}}(s) = \frac{k_{\text{нас}}}{T_{\text{НС}}s + 1} \quad (4.16)$$

де $K_{\text{нас}}$ – коефіцієнт передачі насоса за напором, $T_{\text{нас}}$ – стала часу насоса.

$$T_{\text{НС}} = 0,1 \text{ с}$$

$$k_{\text{НС}} = \frac{Q}{\omega_0} = \frac{5}{78,5} = 0,06 \quad (4.17)$$

Трубопровід ще більш інерційна ланка, тому передатна функція має вигляд аперіодичної ланки першого порядку з затримкою

$$W_{\text{НС}}(s) = \frac{k_{\text{ТР}}}{T_{\text{ТР}}s + 1} e^{-ts}$$

Виконавши опис усіх основних ланок системи ми можемо записати загальну передатну функцію ОК:

$$W_{\text{ОК}}(s) = W_{\text{ад}}(s) \cdot W_{\text{НС}}(s) \cdot W_{\text{ТР}}(s) \quad (4.18)$$

Підставивши передатні функції кожної ланки, отримаємо:

$$W_{\text{ОК}}(s) = \frac{k_{\text{ад}} k_{\text{НС}} k_{\text{ТР}}}{(T_e T_M s^2 + T_M s + 1)(T_{\text{НС}} s + 1)(T_{\text{ТР}} s + 1)} e^{-ts}$$

За створення керуючого сигналу відповідає ПІ регулятор, передатна функція якого виглядає наступним чином:

$$W_{\text{ПІ}}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{ПІ}} s} \right)$$

Таким чином досліджувана система являє собою двоконтурну систему керування. З урахуванням виразів для передавальних функцій елементів системи структурна схема САУ подачі бетону має вигляд, показаний на Рис. 4.4:

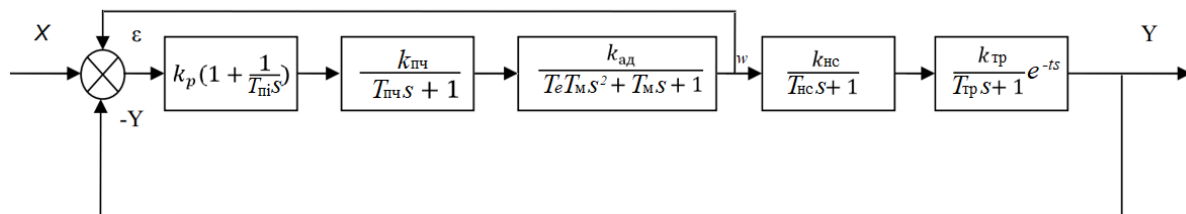


Рисунок 4.4 – Структурна схема САУ подачі бетону до будівельного 3D принтеру

4.3 Моделювання системи та дослідження динамічних характеристик

На основі отриманих передатних функцій збираємо схему в середовищі Matlab (Simulink)

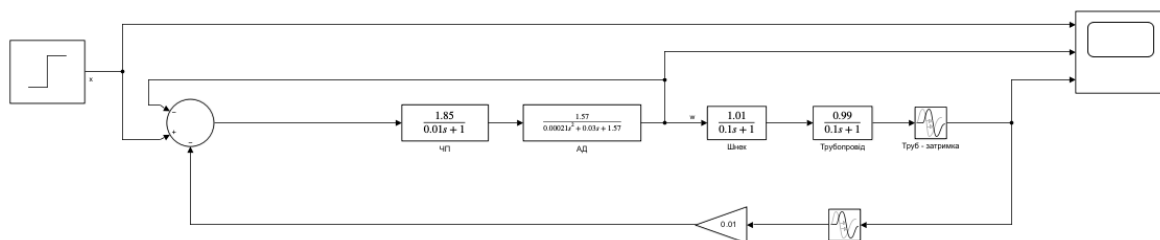


Рисунок 4.5 – Схема САК в Matlab(Simulink)

Для дослідження поведінки системи та для налаштування регулятора проведемо декілька моделювань системи.

Для початку виконаємо моделювання без регулятора. Як ми бачимо на Рис. 4.6 в системі присутня затримка в створенні тиску на виході суміші із екструдера, але це пояснюється інерційністю бетоноводу. Також видно, що напір насосного агрегату не достатній і не відповідає заданому.

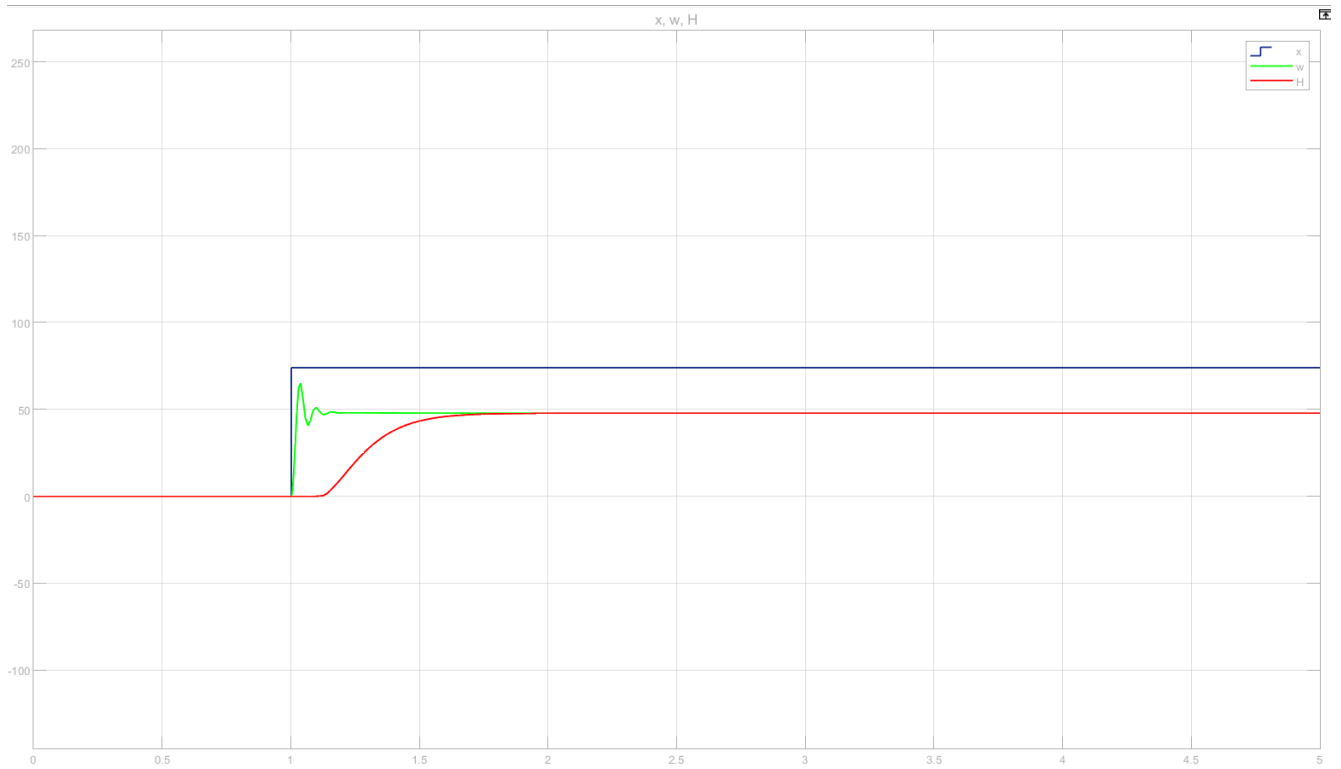


Рисунок 4.6 Графік перехідного процесу САК без регулятора

Додаємо в систему регулятор, та проведемо початкове налаштування регулятора.

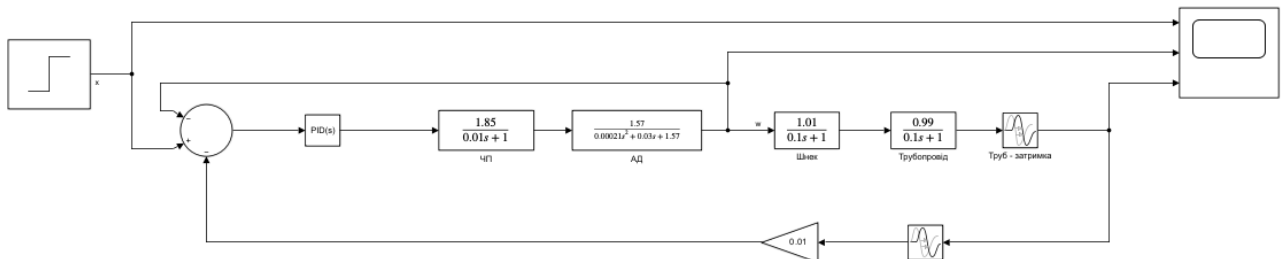


Рисунок 4.7 – Схема САК з регулятором

Виконавши початкове налаштування регулятора отримуємо наступну перехідну характеристику:

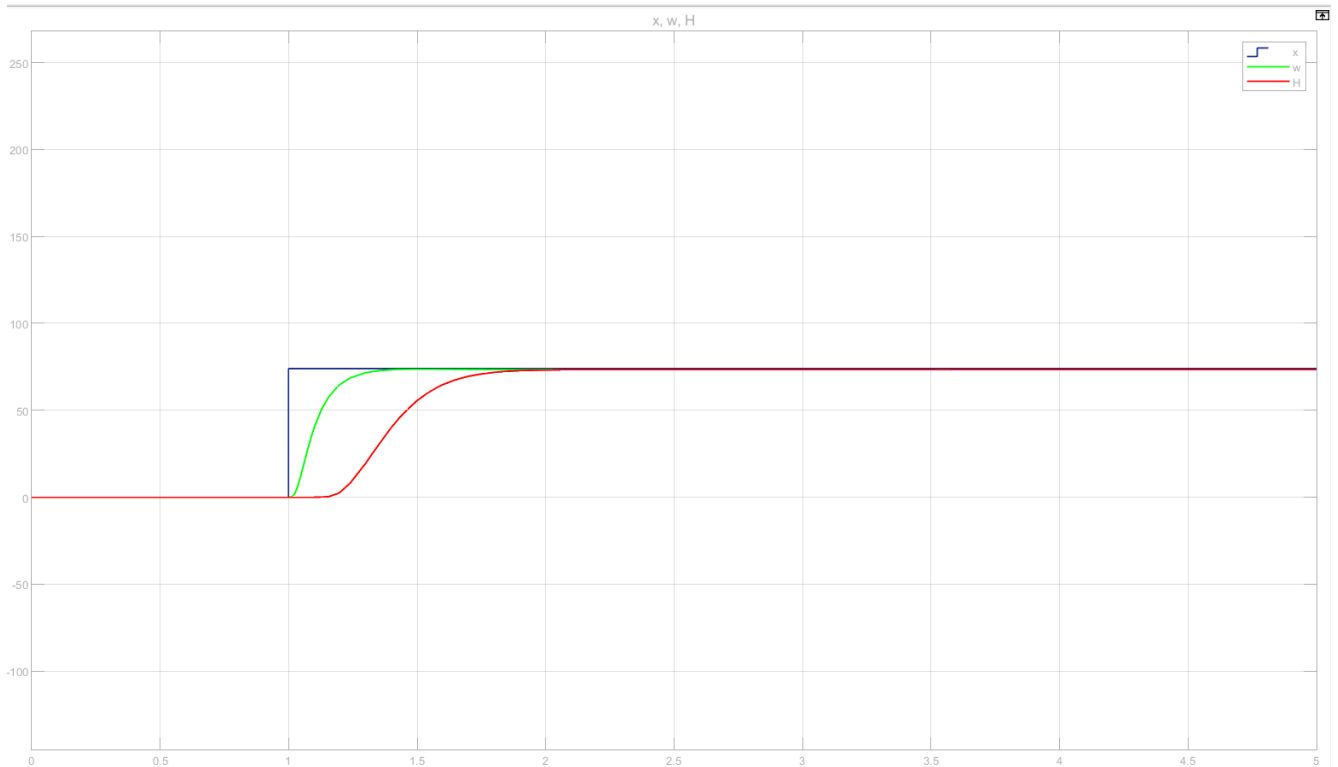


Рисунок 4.8 Графік перехідного процесу САК з регулятором

Як видно з Рис. 4.8 після застосування регулятора, продуктивність на виході з насосу відповідає заданим обертам. Проте в системі досить великий час перехідного процесу.

Перевіримо як реагує система змінний ступінчастий сигнал на вході. Для цього застосуємо блок Repeating Sequence Stair, з наступними налаштуваннями (Рис. 4.9)

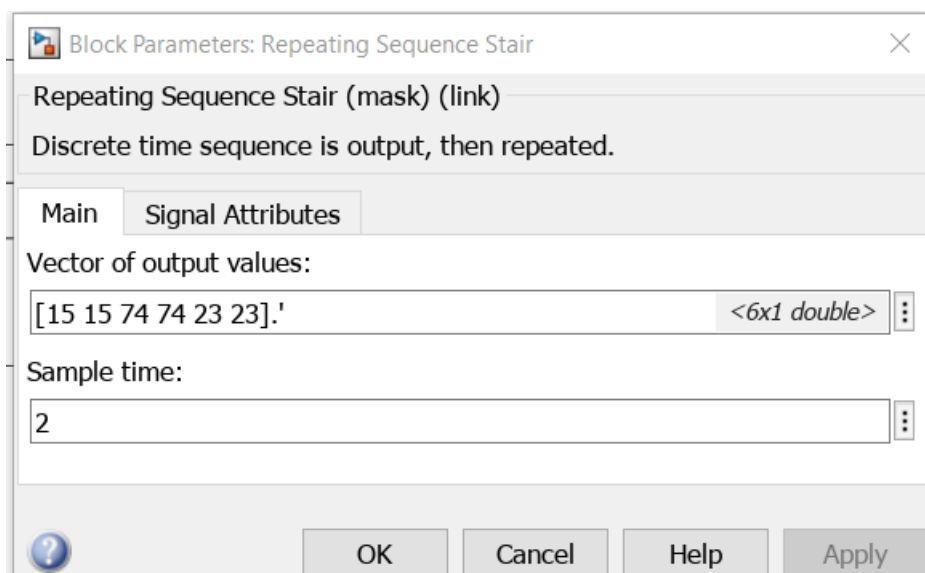


Рисунок 4.9 – Налаштування блоку Repeating Sequence Stair

На Рис. 4.10 відображена перехідна характеристика системи при змінному впливу керуючого сигналу.

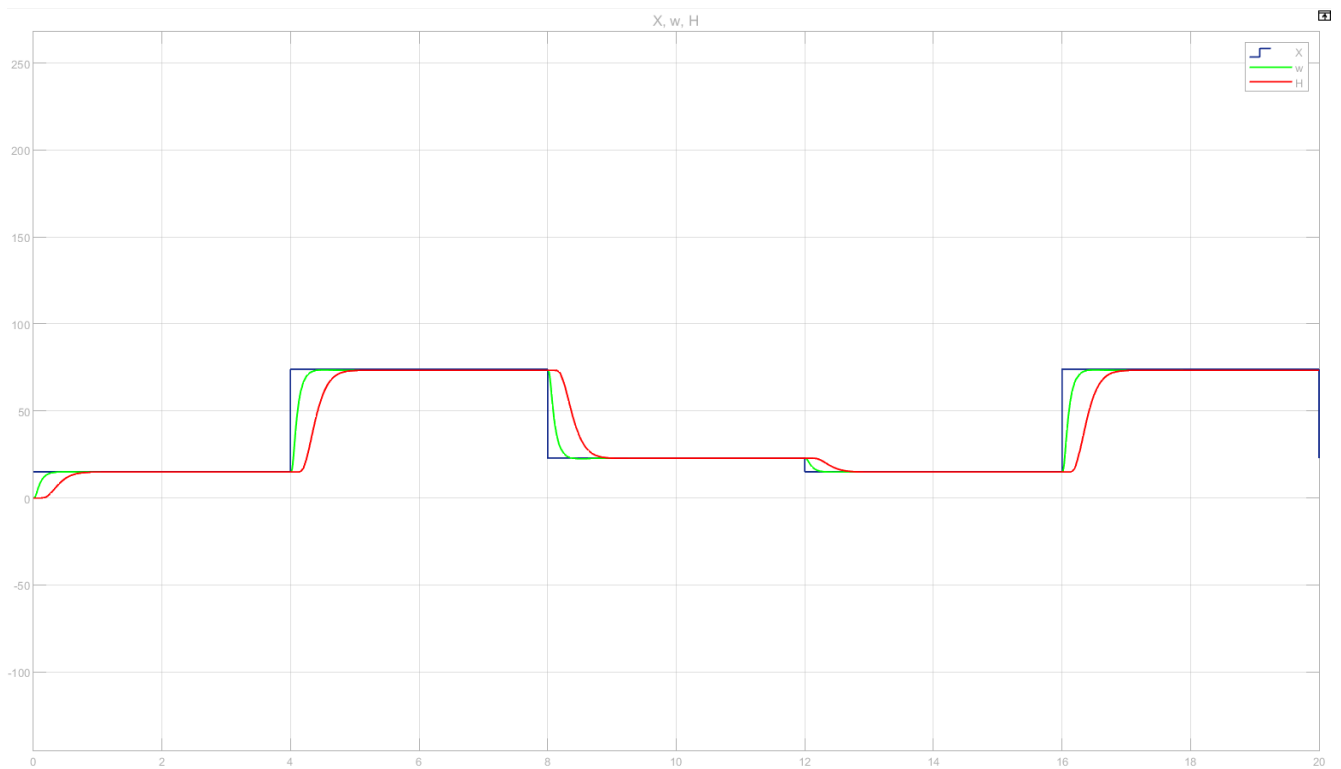


Рисунок 4.10 Графік перехідного процесу САК при змінній ступінчатий сигнал.

Як ми бачимо, система досить добре опрацьовує зміни керуючого сигналу. Проте час перехідного процесу залишається на тому ж рівні, що характеризується великою інерційністю системи.

Також є доцільним перевірити як системи реагую на збурення. Наприклад зміни температури або вологості можуть впливати на характеристики суміші, та її властивості можуть змінюватись у процесі друку. Для емуляції таких збурень додамо блок Uniform Random Number

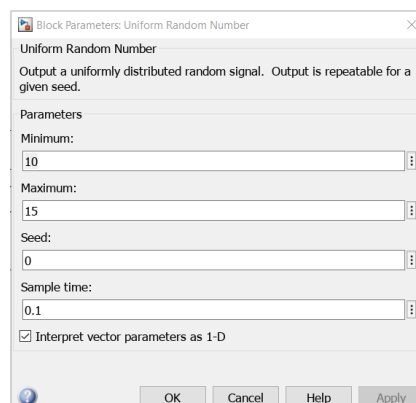


Рисунок 4.11 Налаштування блоку Uniform Random Number

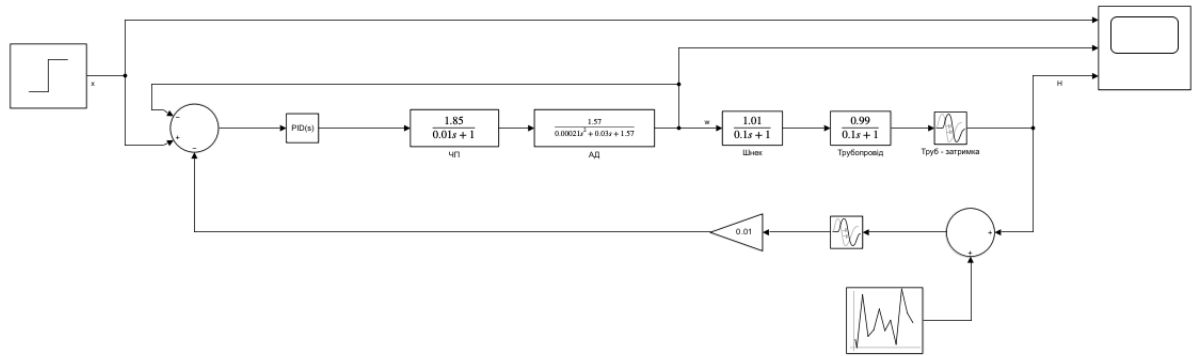


Рисунок 4.12 – Схема Matlab(Simulink) з блоком для емуляції збурень
 Переглянемо перехідну характеристику у випадку наявності збурень

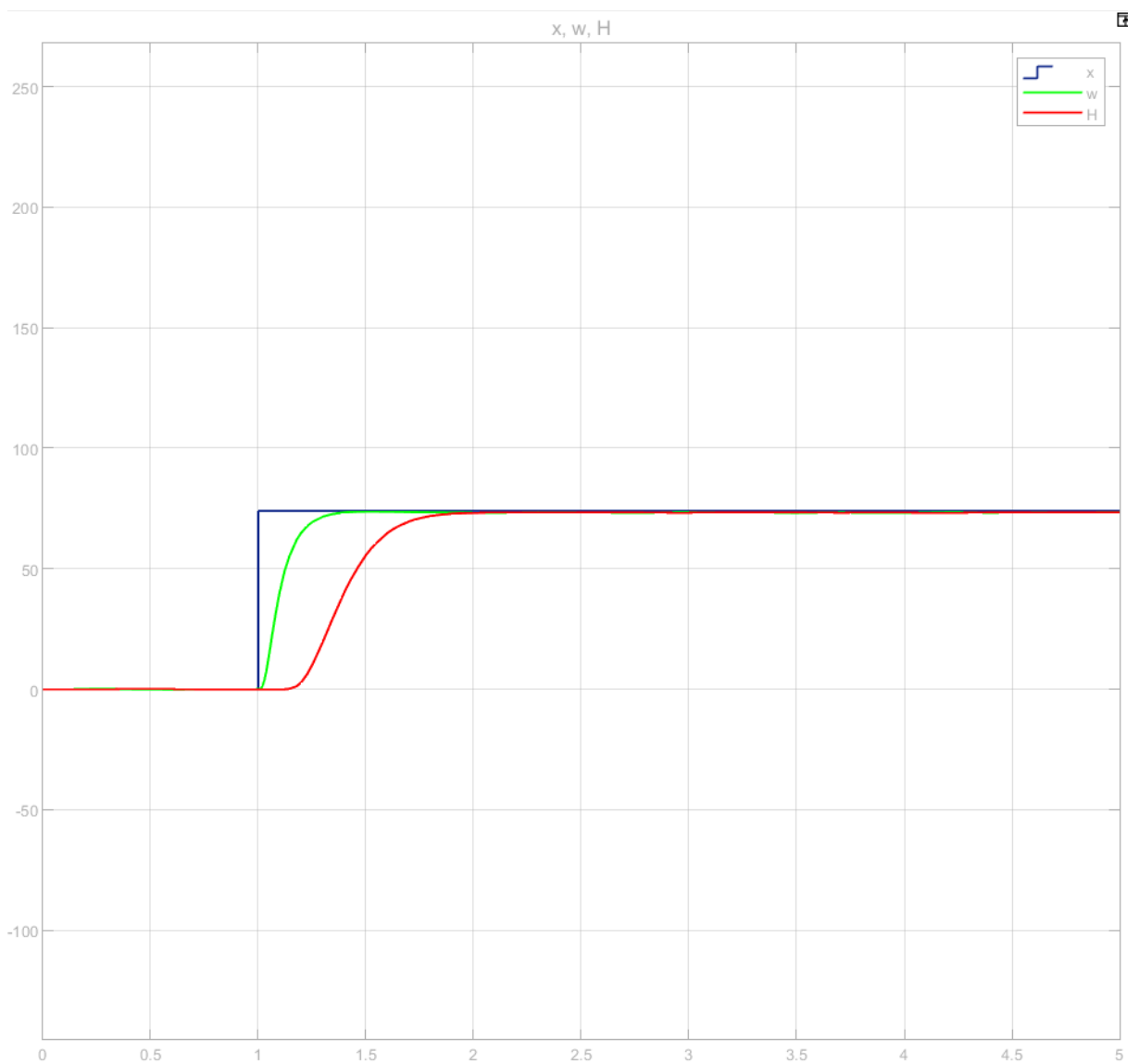


Рисунок 4.13 – Перехідна характеристика САК зі збуреннями.

Як ми бачимо з графіку (Рис. 4.13)– система досить добре реагує на зовнішні збурення. На графіку видно деякі, дуже не значні відхилення напору насосу, проте

вони зовсім не значні. Це можна пояснити наявністю коефіцієнта в зворотному зв'язку. Цей коефіцієнт є коефіцієнтом ланки давача вимірювання товщини шару бетону на виході з екструдера, та був підібраний експериментальним шляхом. Проте, виявилось, що цей коефіцієнт має додатковий важливий вплив на реакцію системи керування на збурення.

ВИСНОВОК

Проаналізовано параметри та чинники, що впливають на подачу бетону для будівельного 3D принтеру. Розглянуто типи бетонних насосів, за способом створення тиску, що використовуються для подачі бетону. Обґрунтовано вибір насосу на основі шнекової пари, як такий, що є оптимальний, з точки зору стабільності подачі, для використання у будівельному 3D принтері для подачі бетону.

Визначені головні завдання, які повинна виконувати автоматизована система керування та виконаний розрахунок параметрів шнекової пари для визначеної продуктивності бетононасосу. Зроблений розрахунок потужності електричного двигуна, що обертає ротор шнекової пари. Визначено спосіб керування продуктивністю насосу шнекового типу.

Розроблено математичну модель для опису елементів системи керування подачею бетону, представлено передатні функції об'єкта керування та інших ланок системи та побудовано структурну схему математичної моделі. Проведено моделювання в середовищі MathLab для аналізу динамічних характеристик системи. Проаналізовано поведінку системи при впливі зовнішніх збурень та при зміні керуючого впливу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Atta Ur Rehman, Arnaud Perrot, Bizu Melesse Birru, Jung-Hoon Kim. (2023). Recommendations for quality control in industrial 3D concrete printing construction with mono-component concrete: A critical evaluation of ten test methods and the introduction of the performance index. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100232>
2. Nathalie Labonnote, Anders Rønquist, Bendik Manum, Petra Rüter. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>
3. Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home. URL: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>
4. ApisCorp. URL: <https://apis-cor.com/technologies/>
5. [Самое большое напечатанное здание в Дубае на 3D принтере.](https://3dreams.com.ua/samoe-bольшое-naпечатанное-zдание-v-Дубае-na-3D-принтере/)
URL: <https://3dreams.com.ua/samoe-bольшое-naпечатанное-zдание-v-д>
6. <https://www.linkedin.com/company/3d-technology-utu>
7. <https://www.facebook.com/profile.php?id=100070434145599>
8. 高荣芝, 王佳茜 (2010). Concrete pump and method for adjusting driving pressure value for swinging actuator in concrete pump. URL: <https://patents.google.com/patent/CN102094779B/en>
9. . Васин, В. М. Электрический привод: учеб. пособие для техникумов / В. М. Васин. – М.: Высшая школа, 1984.
10. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции. М.: Стройиздат, 1986.
11. Справочник по электрическим машинам : В 2 т./ Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.: ил.

12. Бунеев В.А., Федюн Р.В. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАСОСОМ ВОДОПРОВОДНОГО УЗЛА. 2012. URL:
http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/5943/1/Бунеев_Федюн.pdf
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/ Под ред. Л.Г. Мамякоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.
14. Боровська, Т. М. Теорія автоматичного управління : курс лекцій Вінниця : ВНТУ, 2018. – 256 с.
15. Розводюк М.П., Левицький С.М., Бомбик В.С. Розрахунок і конструювання трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Курсове проектування: навчальний посібник / Вінниця: ВНТУ, 2018 - 135с.
16. А.А. Ласкин, Р.Р. Якупов, А.А. Райков, Т.Н. Мустафин, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров. 2022. Математическая модель рабочего процесса винтового вакуумного насоса. doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-65-73
17. Andrey V. Smolyaninov Irina V. Poshneva Liudmila V. Chernenkaya. Mathematical Model of Asynchronous Motor with Frequency-Cascade Regulation: 2019 International Russian Automation Conference
18. Принципи роботи насосів [Електронний ресурс] – 2019. – URL:
https://www.ampika.ru/Princip_raboty.html
19. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
20. Створення автоматичної системи керування технологічними процесами Дирекції Котельня ППВ (проект). // Інвестиційна програма Дирекції Котельня північного промвузла /, 2018.

21. Jay G. Sanjayan, Behzad Nematollahi. Chapter 1 - 3D Concrete Printing for Construction Applications. 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00001-4>
22. Li Zhang, Yang Liu, Yongju Zhang, Wenfei Liu, Ziyun Chen. Geometric design and performance analysis of conical-rotor screw vacuum pump with adjustable flow field clearances. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112201>
23. Jun Wang, Shuhong Wei, Rundong Sha, Hongjie Liu, Zengli Wang. Design methodology of a new smooth rotor profile of the screw vacuum pump. 2018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.10.064>