

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ  
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту”  
Зав. кафедрою АВП  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ О.К. Дідик  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**  
на тему:  
**«Модернізація системи стабілізації температури**  
**матеріалу в циліндрах екструдера»**  
**«Modernization of the material temperature stabilization**  
**system in the extruder cylinders»**

Виконав здобувач вищої освіти  
IV курсу, групи АК-21  
спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»  
\_\_\_\_\_ Сокур І.О.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи  
доц, канд.техн.наук  
\_\_\_\_\_ Трушаков Д.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

м. Кропивницький

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Область застосування та призначення системи автоматичної стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера.....	8
1.1 Види екструзії.....	8
1.2. Агрегати для виготовлення профільних виробів.....	8
1.3 Схема технології виробництва виробів шляхом екструзії.....	9
1.3.1 Підготовчі етапи.....	9
1.3.2 Приготування суміші.....	10
1.3.3 Екструзія та формуванням заготовки з поліетилену.....	10
1.3.4 Калібрування заготовки, охолодження і розрізання на корпуси.....	12
1.4 Системи збору даних.....	14
1.5 Проблеми під час процесу екструзії.....	16
2 Огляд рішень та обґрунтування принципу побудови виробу.....	18
2.1 Будова екструзійного агрегату.....	18
2.2 Обґрунтування засобів автоматизації процесів екструзії.....	26
2.3 Автоматичні екструзійні системи.....	27
2.4 Комплексне управління.....	28
2.5 Особливості управління.....	28
2.6 Правила регулювання температури розплаву.....	29
3 Обґрунтування проектних рішень автоматизації регулювання температури головки екструзійного агрегату.....	31
3.1 Регулювання температури.....	31
3.1.1 Використання регулятора типу "Ввімкнено-вимкнено".....	31
3.1.2 Використання пропорційного регулятора.....	33
3.1.3 Використання пропорційно-інтегрального регулятора.....	35
3.1.4 Використання пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора.....	35

3.1.5 Використання нечіткої логіки.....	37
3.2 Особливості вимірювання температури.....	37
3.2.1 Розташування датчиків .....	37
3.2.2 Використання подвійних датчиків.....	38
3.2.3 Типи використовуваних датчиків.....	39
3.2.4 Принцип роботи датчиків.....	40
3.3 Регулювання енергії нагріву і охолодження.....	41
3.3.1 Використання механічних контакторів.....	41
3.3.2 Використання ртутних контакторів.....	42
3.3.3 Використання твердотілих контакторів.....	42
3.3.4 Фазове управління – пропорційне керування енергією.....	42
3.4 Розробка схеми функціональної системи стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера.....	43
3.5 Розробка схем електричних принципових системи стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера.....	44
4 Розрахунки та матеріали, що підтверджують працездатність виробу.....	48
4.1 Вихідні дані для розрахунків системи.....	49
4.2 Будова, принцип дії системи.....	50
4.3 Функціональна схема системи.....	51
4.4 Структурна схема системи.....	51
4.5 Передаточні функції розімкнутої, замкнутої систем та характеристичне рівняння.....	53
4.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи.....	54
4.6.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи.....	54
4.6.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.....	55
4.6.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.....	56
4.7 Побудова дійсної частотної характеристики системи.....	57
4.8 Визначення стійкості системи і запасів стійкості.....	58

4.8.1	Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.....	58
4.8.2	Дослідження системи на стійкість та побудова кривої D-розбиття в площині одного параметра.....	59
4.9	Оцінка якості регулювання замкнутої системи по ЛАЧХ розімкнутої системи.....	60
4.10	Побудова перехідного процесу вихідної системи.....	61
4.11	Визначення прямих показників якості вихідної системи.....	62
4.12	Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи.....	63
4.13	Синтез коректуючого пристрою системи.....	65
4.14	Побудова кривої перехідного процесу синтезованої системи.....	67
4.15	Визначення прямих показників якості синтезованої системи.....	68
5	Опис робіт, що пов'язані із експлуатацією системи.....	69
5.1	Особливості монтажу обладнання.....	69
5.2	Поведінка персоналу на робочому місці.....	70
5.3	Особливості обслуговування обладнання екструдерів.....	71
	Висновки.....	73
	Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів.....	75
	Список літератури.....	76

## ВСТУП

У сучасних умовах розвитку світової економіки, а також економік окремих країн, дедалі більшого значення набуває рівень виробництва та використання полімерних матеріалів.

Переробка пластмас охоплює три основні групи процесів: підготовчі, формувальні та допоміжні. Підготовчі процеси включають підготовку композицій, сушіння та гранулювання. Формувальні процеси охоплюють основні методи виготовлення виробів із пластмас і поділяються на безперервні (наприклад, екструзія та каландрування) і періодичні (такі як лиття під тиском, пресування, видувне формування, термоформування листів, невмо- і вакуум-формування, ротаційне формування, напилення та інші).

До допоміжних процесів належать механічна та декоративна обробка готових виробів, зокрема фарбування, металізація, склеювання та зварювання, а також утилізація та повторна переробка відходів, що утворюються в процесі формування.

У промислово розвинених країнах інженери, що спеціалізуються на технології екструзії, іноді недооцінюють той факт, що сучасне виробництво все ще значною мірою залежить від участі людської праці. Повне усунення людського фактора на практиці є малореалістичним, особливо в умовах країн з невисоким рівнем автоматизації або дешевою робочою силою. У таких випадках обладнання, яке розроблене з урахуванням повної автоматизації, може виявитися малопридатним або економічно недоцільним для впровадження в менш розвинених регіонах.

Щоб зменшити залежність від вартості робочої сили та забезпечити стабільну якість продукції, доцільним рішенням є впровадження автоматизованих систем управління та контролю виробничих процесів. Автоматизація дозволяє значно підвищити ефективність, зменшити кількість людських помилок, а також мінімізувати витрати на обслуговування. У країнах з високим рівнем технічного розвитку такі системи можуть функціонувати на

повну потужність з мінімальними простоями, що забезпечує стабільність та конкурентоспроможність виробництва.

Таким чином, ключем до успішної інтеграції обладнання в будь-якому регіоні є адаптація виробничих процесів до сучасних вимог автоматизації, незалежно від соціально-економічного контексту.

У разі зміни властивостей полімеру чи умов експлуатації, система автоматично коригує параметри завдяки замкнутим контурам управління, зберігаючи якість продукції. Повністю автоматизоване керування дає змогу обслуговувати кілька виробничих ліній без участі операторів, забезпечуючи вищу якість порівняно з ручним управлінням. У разі збою система здійснює моніторинг і намагається усунути несправність автоматично; за необхідності — вимикається для уникнення пошкоджень.

Розробка таких систем потребує значних інженерних та конструктивних зусиль, оскільки вимагає перегляду стандартного режиму роботи. Наприклад, у традиційних умовах контроль параметрів здійснюється через світлові та звукові сигнали. Проте в автономному режимі, без участі операторів, необхідне впровадження додаткових рівнів безпеки, які забезпечуватимуть автоматичне відключення лінії у разі збою. Стандартного набору датчиків може бути недостатньо: система може не виявити несправність, якщо, скажімо, лазерний датчик фіксує якісну ділянку, попри те що голівка екструзії вже заблокована поліамідом. Тому важливо забезпечити максимальну стійкість системи до нештатних ситуацій.

Надійність є однією з ключових характеристик системи управління. Тому при виборі апаратно-технічної бази системи рекомендується обирати контролер, який включає сучасні засоби захисту від збоїв, такі як копіювання основних параметрів системи в незалежну пам'ять, захист від зависань тощо. Крім того, окрім контролера, автоматизована система управління конкретним процесом включає набір датчиків для вимірювання параметрів. Для передачі команд, що управляють виконавчими механізмами, система включає блок комутації з можливістю ручного управління.

Діагностика несправностей та можливостей системи є важливим елементом управління. У процесі експлуатації іноді виникають непередбачені ситуації. Вбудовані в систему методи діагностики повинні вчасно виявляти нестандартні ситуації і автоматично коригувати алгоритми управління, зберігаючи параметри процесу з мінімальними відхиленнями. Якщо вирішення ситуації без участі людини неможливе, система генерує аварійне повідомлення.

В даній роботі пропонується розв'язання актуальної задачі розробки системи автоматичної стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструзійного агрегату. Однак важливо відзначити, що для досягнення високої якості продукції та зменшення кількості відбракованих виробів, вирішення цієї задачі не можливе без інтеграції роботи вказаної системи з системою регулювання температури розплаву в зонах корпусу екструдера. Окремим елементом є система регулювання частоти обертання привода двигуна.

*Об'єктом дослідження* є процес виготовлення виробів з пластмас методом екструзії.

*Предмет дослідження* – система регулювання температури в циліндрах екструдера.

У рамках проекту основну увагу слід зосередити на регулюванні температури розплаву, оскільки цей параметр є ключовим для забезпечення ефективного процесу екструзії. З цією метою необхідно проаналізувати важливість підтримання стабільної температури, розглянути різні методи реалізації відповідних систем керування та обрати найбільш ефективний варіант. У процесі розробки системи потрібно сформулювати її функціональну та структурну схеми, визначити критерії якості регулювання, а також здійснити аналіз перехідних процесів. У разі виявлення відхилень від заданих параметрів необхідно виконати синтез коригувального пристрою, який дозволить підтримувати оптимальні умови функціонування системи.

# 1 ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ МАТЕРІАЛУ В ЦИЛІНДРАХ ЕКСТРУДЕРА

## 1.1 Види екструзії

Розрізняють наступні види екструзії:

1. Холодна екструзія – відбуваються виключно механічні зміни в матеріалі, що виникають в результаті його повільного переміщення під тиском та формування продукту відповідно до заданих форм.

2. Теплова екструзія – разом із механічним впливом, передбачає теплову обробку оброблюваного продукту, при цьому продукт підігрівається ззовні..

3. Гаряча екструзія - це процес, що здійснюється за високих тисків і швидкостей, при якому значна частина механічної енергії перетворюється в теплову. Це призводить до значних змін якісних характеристик продукту на різних глибинах. Саме цей метод широко застосовується в сучасному виробництві, і його автоматизація розглядається у даній роботі.

## 1.2. Агрегати для виготовлення профільних виробів

Агрегат для виробництва профільних виробів (рис. 1.1) складається з наступних компонентів: екструдера 3, прямої профільної головки 4, калібруючої насадки 5, охолоджувальної ванни 6, маркуючого пристосування 7, тягнучого пристрою 8, відрізного пристрою (циркулярної пили, яка коливається) 10, бункера із пристроєм для підсушування і підігрівання гранул 2, а також пневмозавантажувача 1.

Під час роботи агрегату, розплав полімеру виходить з голівки екструдера у вигляді безперервної профільної заготовки. Ця заготовка потім протягується через калібруючу насадку за допомогою тягнучого пристрою, де відбувається калібрування профілю і часткове охолодження. Далі профіль надходить у охолоджувальну ванну, де він повністю охолоджується водою. Після цього

готовий профіль проходить через маркуюче пристосування 7 та піддається розрізанню на шматки, які потім укладаються в штабель 11.

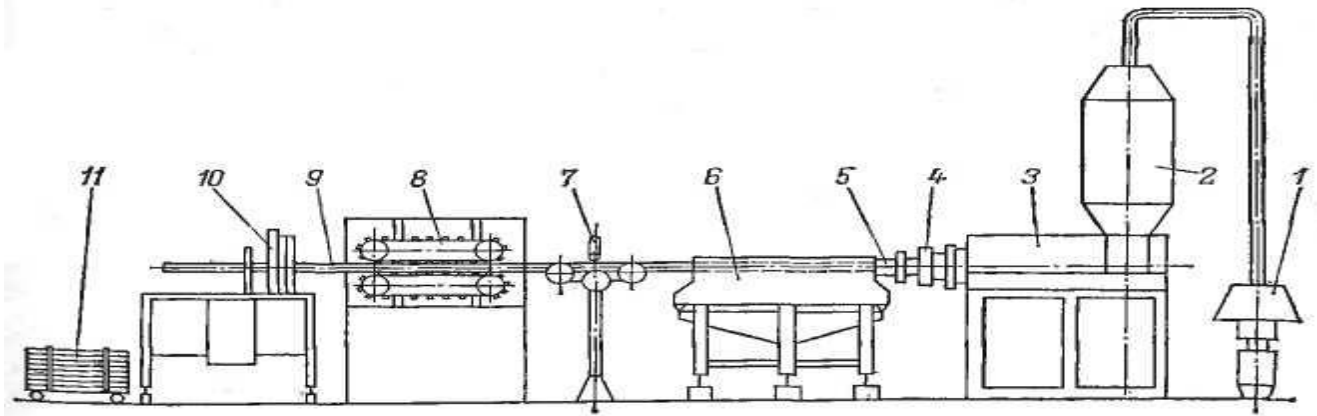


Рисунок 1.1 – Екструзійний агрегат. Пояснення в тексті.

### 1.3 Схема технології виробництва виробів шляхом екструзії

Загальна технологічна схема виробництва виробів із застосуванням екструзії наведена на слайді 01.00 в ілюстративному матеріалі.

#### 1.3.1 Підготовчі етапи

Сировина надходить на завод на машинах, які перевозять мішки. З цих машин сировину перекладають на електрокари або підйомники, які доставляють її на склад для зберігання сировини. Розтарювання сировини в мішках відбувається вручну. При організації вузла розтарювання можлива доставка сировини на завод у полімеровозах. Склад сировини та вузол розтарювання розташовані окремо для тимчасового зберігання сировини. Перед використанням у виробництві сировина повинна перебувати в цеху протягом не менше 24 годин.

В залежності від типу виробленої продукції, композиція для екструзії може складатися з однієї марки поліетилену або комбінації різних марок поліетилену, включаючи пігменти, суперконцентрати барвників, модифікуючі і ковзаючі добавки, додаткові стабілізатори або вторинну сировину. Перед приготуванням композицій розтарена сировина повинна бути доставлена на ділянку приготування композицій.

### 1.3.2 Приготування суміші

Змішування компонентів композиції відбувається у змішувачі типу "п'яна бочка". Завантаження компонентів композиції проводиться за допомогою вагового або об'ємного дозування на основі технологічної карти, в якій вказано склад готової композиції.

Композиція необхідного складу повинна бути приготована у необхідній кількості для виконання замовлення на цей тип виробу. Процес приготування композиції повинен бути централізованим і виконуватися із суворим дотриманням рецептур та процедур завантаження. Контроль за цим процесом покладається на змінного майстра. Час змішення компонентів у змішувачі становить 15-20 хвилин при кімнатній температурі. Готові композиції зі змішувача "п'яна бочка" вивантажуються в шлюзові сховища вручну або за допомогою пневмотранспорту. Потім, за допомогою пневмотранспорту або вручну, вони подаються в завантажувальні бункери екструдерів.

### 1.3.3 Екструзія та формуванням заготовки з поліетилену

Перед запуском агрегату проводиться перевірка стану вузлів механізмів та їхньої справності. Важливо переконатися у наявності достатньої кількості мастила, а також перевірити розміри проміжків щілин у головці. Особлива увага приділяється наявності і надійності кріплення заземлюючих пристроїв.

Під час пуску агрегату активується обігрів зон циліндра і формуючої головки екструдера. Температура цих зон нагрівається відповідно до показників плинності розплаву сировини і складу композиції, які вказані в таблиці 1.1 або в технологічній карті.

Відкривається вентиль водопровідної мережі для охолодження зон циліндра і шнека, а також калібруючої системи і охолоджувальних ванн. Після досягнення цих температур машина утримується в цьому тепловому режимі протягом не менше 2 годин для екструдера НР-45Н, який є об'єктом автоматизації в даній роботі (див. креслення 02.00 в ілюстративному матеріалі).

Під час періоду пуску екструдера після тривалої аварійної зупинки температурний режим завищується на 15-25°C, щоб уникнути надмірних навантажень на привід шнека і головку. Це робиться з метою забезпечення плавного та ефективного запуску обладнання та попередження можливих негативних наслідків, пов'язаних із стрибками температур.

Під час підготовки машини до запуску встановлюється проміжок по щупу. Корпус обігрівается електричними нагрівачами, розташованими в трьох теплових зонах, а головка, що формує, обладнана трьома електронагрівачами. Встановлення режимів здійснюється згідно з таблицею 1.1. Температура в теплових зонах екструдера автоматично регулюється в межах 0-185°C (залежно від сировини). Ділянка корпусу, що межує з завантажувальним отвором, має систему водяного охолодження до температури  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , що запобігає перегріванню матеріалу і його "запіканню" в зоні завантаження.

Для поліпшення якості виробів, скорочення втрат від обриву рукава та уникнення затримок чужорідних речовин в матеріалах на екструзійних лініях встановлені фільтруючі сітки. Кількість фільтруючих сіток і частота їх чищення залежать від якості сировини, що переробляється, складу композиції виробу та його товщини. При додаванні вторинної сировини кількість сіток збільшується на одну. Середня частота чищення сіток становить один раз у 3 дні або при переході на інший колір.

Пуск екструдера здійснюється на низьких обертах шнека, які пізніше поступово збільшуються. Швидкість збільшення обертань повинна бути не більше 5 оборотів шнека за 5 хвилин (не перевищуючи 200 за показами тахометра). Шибер для подачі матеріалу з завантажувального бункера на початковому етапі повинен бути обов'язково закритим. Після запуску шнека відкривання шибера здійснюється поступово.

Швидкість обертання шнека практично підбирається в межах паспортних даних устаткування в залежності від показника плинності розплаву. Крім того,

враховується зовнішній вигляд корпусу виробу, де важливо виявляти відсутність подряпин, щілин та розривів.

Процес виготовлення виробу розпочинається з того, що матеріал, що подається в циліндр, захоплюється шнеком. Під час просування по циліндру під впливом механічної енергії черв'яка і теплової енергії електронагрівачів, розташованих на корпусі, матеріал нагрівається, розплавляється, гомогенізується та протискається через систему фільтруючих сіток, яка розташована між циліндром і головкою. В результаті цих процесів матеріал стає однорідною в'язкою масою і виходить з профільуючої голівки у вигляді заготовки.

#### 1.3.4 Калібрування заготовки, охолодження і розрізання на корпуси

Заготовка, яка виходить з щілини екструзійної головки, збирається, стискується і направляється в калібруючий пристрій, охолоджувальну ванну, тягнучий пристрій, а потім в різальний пристрій. Ванну наповнюють водою та вмикають вакуум. Після твердіння частину заготовки відрізають. Виріб охолоджується в умовах ковзаючого контакту з формуючими поверхнями.

У вакуумній камері на вході розташована латунна калібруюча насадка, яка обладнана оборотною системою охолодження води. Холодильна установка утримує температуру води в межах  $10 \pm 2$  °C. При виготовленні прозорих виробів (без використання пігменту) температура охолодження повинна бути мінімальною ( $< 8$  °C), і може також вимагати введення в композицію нуклеатуючих добавок або використання прозорих марок поліетиленів. Завдяки зниженому тиску в камері порожнистий виріб розпирається внутрішнім тиском і притискатися до калібруючої втулки. Вакуум формує виріб, а втулка калібрує його зовнішній розмір. Тиск вакууму в камері утримується на рівні не більше 100-300 мм ртутного стовпа.

Калібрований виріб, після проходження через латунну діафрагму в вакуумній камері, направляється в охолоджувальну ванну, де підтримується розрідження і остаточно охолоджується водою. На виході з охолоджувальної

ванни встановлено еластичне ущільнення. Система охолодження води у ванні забезпечена системою дозованого подавання та відведення води, пов'язаною з оборотною системою охолодження до 20 °С (градирнею). Охолоджувальні ванни виготовлені зі зварної корозійностійкої сталі. На торцях ванн розміщені отвори із змінними гумовими манжетами, діаметр отвору в манжеті слід трохи зменшувати порівняно зовнішнім розміром екструдованого профілю. У середині ванни встановлені підтримувальні ролики з пластмаси або алюмінію, які утримують охолоджуваний профіль під водою. Зазвичай ванну монтується на роликах, що дозволяють переміщати її по укріплених в підлозі направляючих. Для рівномірного охолодження профілю ванни оснащені автоматичними регуляторами температури і системами дозування подачі охолоджувальної води.

Протягання труб здійснюється за допомогою гусеничних, роликкових або комбінованих тягнучих пристроїв, обладнаних пневматичним, механічним або гідравлічним затиском профілю. Привід тягнучого пристрою включає систему безступінчатого регулювання швидкості витягу. Весь калібруючий пристрій змонтований на каретці, яка може переміщатися на роликах вздовж лінії транспортування виробів. Швидкість протягання виробу через калібруючий пристрій регулюється дистанційно і узгоджується з швидкістю обертання шнека.

Після тягнучого пристрою виріб подається по направляючим пристроям у відрізний пристрій. Направляючий пристрій оснащений оборотною системою охолодження води, що утримує температуру в межах  $10 \pm 2$  °С, для остаточного охолодження виробу. Відрізний пристрій має автоматичну систему регулювання довжини відрізуваних заготовок. Відрізний пристрій виконує зворотно-поступальний рух разом із подаваною заготовкою уздовж лінії її просування. Швидкість просування відрізного пристрою взаємно узгоджується із швидкістю протягання заготовки в гусеничному тягнучому пристрої, що забезпечує рівномірність (паралельність) поверхні відрізаної заготовки.

Відрізані заготовки, що мають встановлену довжину, подаються по нахиленим лоткам в технологічні ємності. Процес витягу заготовок

забезпечується за рахунок різниці швидкостей, яка створюється між тягнучими траками та швидкістю виходу заготовок з формуючої головки.

Регулювання швидкості обертання тягнучих валків і додаткове підкалібрування за допомогою калібрувальних болтів на головці дозволяє встановити необхідну товщину корпусу, особливо у виробках з пологим усередині профілем. Швидкість витягу, яка вказана в технологічній карті, підбирається оператором в кожному конкретному випадку в залежності від встановленої товщини корпусу виробу та швидкості обертання шнека. Розмір корпусу регулюється за допомогою ступеня вакуумування.

#### 1.4 Системи збору даних

Так, ваш висновок є важливим та правильним. В сучасному виробництві інформаційно-вимірювальні системи стають невід'ємною частиною оптимізації та контролю за процесами. Забезпечення нормального ходу виробництва та досягнення високої якості продукції вимагає відповідного моніторингу, аналізу та реагування на зміни у реальному часі. Інформаційно-вимірювальні системи забезпечують надійний збір та обробку даних, дозволяючи операторам та інженерам відслідковувати параметри процесів, виявляти аномалії та вчасно втручатися для запобігання проблемам. Це робить виробництво більш ефективним, ресурсозберігаючим та менш схильним до виробничих помилок. Використання сучасних технологій у сфері збору та обробки даних сприяє підвищенню продуктивності та якості виробництва, а також спрощує управління складними виробничими процесами. Системи збору та архівування даних надають велику користь при виявленні причин екструзійних проблем. Це особливо важливо тому, що такі проблеми часто виникають у випадках, коли оператор не активно спостерігає за приладовою панеллю екструдера. Коли оператор уважно слідкує за панеллю, йому обмежено можливо контролювати зазначену кількість змінних. Системи, які збирають і зберігають ключові

параметри процесу, є невід'ємними при аналізі виникаючих проблем. У випадку, коли несправність виникає, наприклад, о 2:30 ночі, технолог чи оператор, який приходить о 7:00 ранку, має можливість відновити хід подій, якщо важливі дані, пов'язані з цим часом, були збережені.

Найпростіша система для збору даних - це діаграмний самописець, який може зафіксувати ключові параметри процесу, такі як швидкість обертання шнека, тиск у головці, температура розплаву, навантаження на двигун і так далі. Комп'ютерні системи збору даних виявляються більш корисними, оскільки вони мають кілька важливих переваг:

- дані фіксуються у формі, яку можна легко ввести в комп'ютер;
- дані можна отримувати безпосередньо з електронних датчиків і вимірювальних пристроїв, що прискорює процес і мінімізує помилки;
- дані можуть бути аналізовані внутрішніми інструментами, що дозволяє отримувати статистичну інформацію, таку як середні значення і розмах;
- існують системи з установкою граничних значень, які можуть відзначати сигнал тривоги, якщо дані виходять за встановлені межі;
- системи збору даних можуть надавати інформацію не лише про змінні, але й про їх характеристики.

Популярність використання систем збору даних стрімко зростає після зниження цін на них до рівнів, доступних навіть для невеликих компаній. Зараз можна придбати переносні системи за менше ніж \$10 000.

Більшість систем збору даних надають користувачеві можливість обирати параметри, які вводяться в канали збору даних. Таким чином, вони дозволяють вимірювати різні параметри, включаючи ті, що стосуються допоміжного обладнання, наприклад, сушарок, а також зовнішні сигнали, такі як температура та відносна вологість повітря.

Важливими вхідними параметрами є:

- навантаження на двигун;
- температури по зонах головки;

- потужність нагріву в різних температурних зонах;
- лінійна швидкість екструзії;
- температури по довжині циліндра екструдера;
- температура(и) розплаву;
- температура в завантажувальному бункері;
- інтенсивність охолодження в різних зонах.

Інші характеристики, які підлягають нагляду, залежать від конкретності процесу. Наприклад, при екструзії з дегазацією часто необхідно вести контроль за рівнем розрідження у вакуумному каналі. Для докладного аналізу процесу система повинна мати не менше 32 каналів.

### 1.5 Проблеми під час процесу екструзії

Флуктуації ефективності екструдера є однією з найбільш поширених труднощів при екструзії, оскільки вони можуть виникати з різних причин, серед яких можна виділити:

- проблеми транспортування матеріалу в екструдері;
- порушення безперервності твердої фази;
- коливання температури по зонах робочого циліндра;
- недостатня здатність екструдера до плавлення полімеру;
- коливання температури шнека;
- проблеми подачі сипкого матеріалу із завантажувального бункера;
- огрублення поверхні розплаву;
- недостатня здатність змішувача екструдера;
- низький тиск в екструзійній головці;
- коливання швидкості в роботі тягнучого пристрою;
- неоднорідності температури розплаву в екструзійній головці;
- недостатній тиск, що розвивається шнеком екструдера.

Належне оснащення інструментарієм є життєво важливим для оперативної та точної діагностики та вирішення проблем, що виникають. Забезпечення стабільної екструзії передбачає ефективний привід екструдера, дієву систему контролю температури, високоефективний тягнучий пристрій і правильну конструкцію шнека.

У даній роботі розробляється система автоматичної стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструзійного агрегату, тому потрібно розглянути методи впровадження подібних систем.

## 2 ОГЛЯД РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ ВИРОБУ

### 2.1 Будова екструзійного агрегату

Виробництво різноманітних виробів методом екструзії полягає в підготовці розплаву в екструдері та наданні екструдату певної форми шляхом прокидання його через формуючі головки відповідної конструкції, за що слідує охолодження, калібрування і подальші операції.

Екструдери поділяються на шнекові, безшнекові і комбіновані згідно з пристроєм та принципом роботи основного вузла, який прокидає розплав в головку. Шнекові машини, відомі також як черв'ячні преси, є основним обладнанням для переробки пластмас методом екструзії.

У специфічних випадках обробки пластмас застосовують безшнекові, або дискові, екструдери, де робочим органом, що прокидає розплав в головку, є диск особливої форми. Вони генерують рушійну силу для продавлювання розплаву за рахунок розвитку нормального тиску, спрямованого перпендикулярно дотичним (збігається з напрямом обертання диска). Застосовуються дискові екструдери, коли потрібно досягти покращеного змішування компонентів суміші. З урахуванням неможливості генерації високого тиску формування такі екструдери використовують для отримання виробів зі зниженими механічними характеристиками та меншою точністю геометричних розмірів.

Комбіновані екструдери, відомі як черв'ячно-дискові, об'єднують в собі шнекову та дискову конструкції в робочому органі. Зазвичай їх використовують для забезпечення ефективного змішування, особливо при обробці композитів. Ці екструдери відмінно справляються із розплавами пластмас, які мають низьку в'язкість і високу еластичність. Однак дискові та комбіновані екструдери не будуть розглядатися в даному проєкті.

Шнекові екструдери можуть мати різні конфігурації, такі як:

1. Кількість шнеків: одношнекові, двошнекові;
2. Кількість ступенів: одноступенчаті, двоступенчаті;
3. Тип використання: універсальні, спеціалізовані;
4. Рух шнека: осцилюючий (уздовж осі), одночасно обертаючий ся;
5. Наявність зони дегазації: з зоною дегазації, без зони дегазації;
6. Напрямок обертання шнеків: з обертанням в одну сторону, з обертанням в протилежні сторони.

Кожен з цих типів шнекових екструдерів має свої особливості і використовується в залежності від конкретних завдань і потреб виробництва.

Найпростішим є одношнековий екструдер без зони дегазації (див. рис. 2.1, креслення 03.00). Основними компонентами екструдера є обігріваний циліндр, шнек (з системою охолодження або без неї), ґрата, розташована на ґратах, та формуюча головка. В залежності від властивостей полімеру та технологічних режимів обробки використовуються шнеки різного профілю, включаючи ті з різними характеристиками зміни глибини нарізки  $h$  вздовж шнека (див. рис. 2.2).

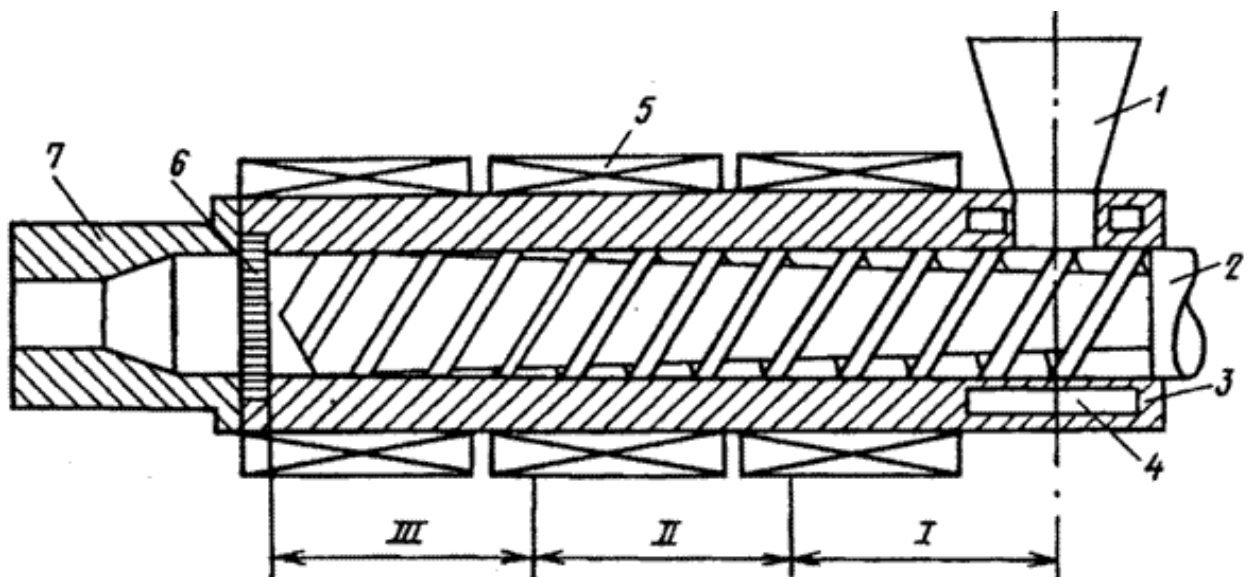


Рисунок 2.1 – Схема одношнекового екструдера:

- 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – циліндр; 4 – порожнина для циркуляції води; 5 – нагрівач; 6 – ґрати з сітками; 7 – формуюча головка; I, II, III – технологічні зони (пояснення в тексті).

Залежно від типу виробу, що виробляється, використовують коротко- або довгошнекові машини, тобто ті, у яких відношення довжини  $L$  до діаметру  $D$  шнека може бути маленьким або великим (див. рис. 2.2). Значення  $D$  і  $L/D$  є основними характеристиками одношнекового екструдера. В параметричному ряді вітчизняних екструдерів діаметри шнека зазвичай складають:  $D = 20; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 250; 320$  мм. У найменуванні типорозміру пресу вказуються  $D$  і  $L/D$ . Наприклад, ЧП-45×20 означає наступне: ЧП - черв'ячний прес,  $D = 45$  мм,  $L/D = 20$ .

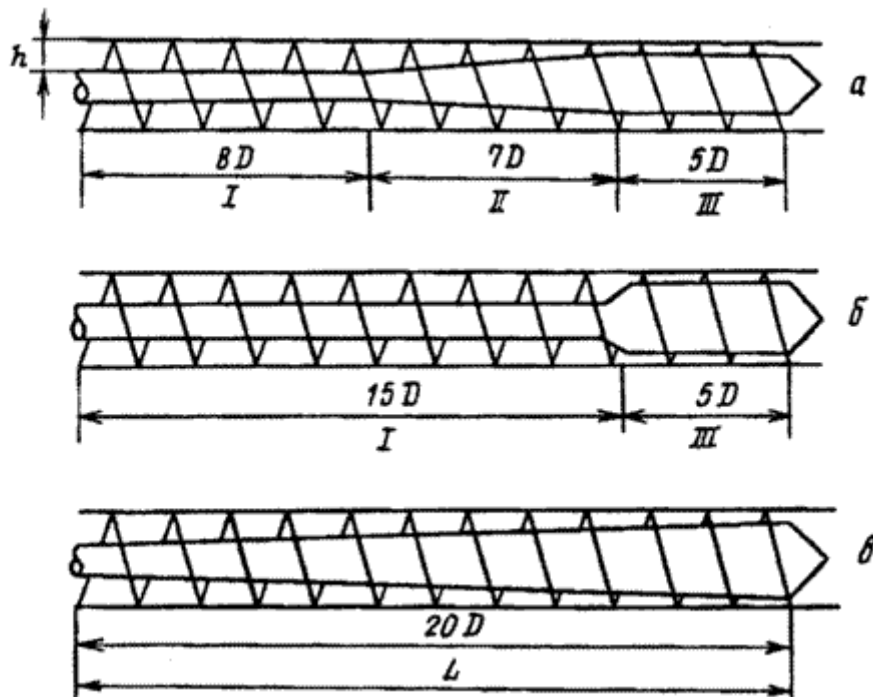


Рисунок 2.2 – Основні типи шнеків:

- а – шнек загального призначення з трьома (I, II, III) геометричними зонами; б – шнек для переробки висококристалічних полімерів; в – шнек для екструзії ПВХ;  
 $D$  - зовнішній діаметр;  $L$  - довжина (технологічна) шнека;  $h$  - глибина нарізки шнека

Технологічний процес екструзії включає послідовне переміщення матеріалу обертаючим шнеком через його різні зони (див. рис. 2.2): живлення (I), пластикації (II), дозування розплаву (III), а далі просування розплаву в каналах формуючої головки.

Ділення шнека на зони I - III проводиться згідно з технологічними ознаками і вказує на основну операцію, яку виконує кожен відрізок шнека. Цей

розподіл є умовним, оскільки початок і закінчення певних операцій можуть зміщуватися вздовж шнека в залежності від природи перероблюваного полімеру, температурно-швидкісного режиму та інших факторів, захоплюючи різні зони або переходячи з однієї ділянки в іншу. Також циліндр обладнаний зонами обігріву, і їхня довжина визначається розташуванням та температурою нагрівачів на поверхні циліндра. Межі зон шнека I - III та зон обігріву циліндра можуть не завжди збігатися. Для успішного переміщення матеріалу важливо враховувати умови просування твердого матеріалу і наповнення простору між витками, що розташовані під воронкою бункера.

На початковому етапі екструзії розглядається поведінка матеріалу, який надходить для обробки. Цей матеріал може бути у формі порошку, гранул чи стрічок, залежно від вихідної сировини. Наприклад, стрічкова сировина є характерною для переробки відходів плівкового промислового виробництва і обробляється на спеціальних екструдерах, що мають примусові живильники-дозатори, розташовані в бункерах. Рівномірне дозування матеріалу з бункера гарантує високу якість екструдату.

Обробка полімеру у формі гранул вважається оптимальним методом живлення екструдера. Це пояснюється тим, що гранули полімеру менше схильні до "заклинання" або утворення пробок в бункері, порівняно з порошком.

Порошкоподібний матеріал може комплексувати в процесі зберігання та транспортування, включаючи проходження через бункер. На відміну від порошку, гранульований матеріал володіє стійкою насипною масою. Заповнення простору під воронкою бункера відбувається на ділянці довжини шнека, рівній  $(1 - 1,5) D$ . При обробці складних багатокомпонентних матеріалів для завантаження їх в бункер використовують індивідуальні дозатори: шнекові (об'ємні), вібраційні, вагові і т. п. У випадку застосування порошкоподібних матеріалів, які мають непостійну сипучість, можуть виникати "зведення", які залишаються на стінках бункера, що може призводити до припинення живлення шнека матеріалом. Для усунення цього явища в бункерах слід використовувати

перетрушувачі. Сипучість матеріалу значно визначається його вологістю: чим вище вологість, тим менша сипучість. Тому перед використанням матеріали повинні бути попередньо висушені.

Для попереднього підігріву гранул і збільшення продуктивності машини можна використовувати прогрівальні пристрої. Також, застосовуючи пристрій для примусового подавання матеріалу з бункера на шнек, можна значно підвищити ефективність машини (в 3-4 рази). Під час ущільнення матеріалу в міжвитковому просторі шнека повітря витісняється назад через бункер. Якщо видалення повітря не буде повним, то воно залишиться в розплаві і після формування призведе до утворення порожнин у виробі, що є недоліком продукції.

Також важливо враховувати, що зміна рівня наповнення бункера матеріалом по висоті впливає на ступінь заповнення шнека. З цією метою бункер повинен бути обладнаний спеціальними автоматичними рівнемірами, які, отримавши відповідний сигнал, автоматично відкривають потік матеріалу до досягнення необхідного рівня. Завантаження бункера екструдера виконується за допомогою пневмотранспортної системи.

При тривалій експлуатації екструдера можливий нагрів циліндра під воронкою бункера і самого бункера, що може спричинити злипання гранул і припинення їх подачі на шнек. Для уникнення перегрівання цієї частини циліндра використовують порожнини для циркуляції охолоджуючої рідини (див. рис. 2.1, поз. 4).

У зоні живлення (I) гранули, що поступають з бункера, заповнюють простір між витками шнека і піддаються ущільненню. Зазвичай ущільнення та стискування гранул в зоні I досягається шляхом зменшення глибини нарізки  $h$  шнека. Просування гранул відбувається через різницю в силах тертя полімеру об внутрішню поверхню корпусу циліндра та поверхню шнека. Оскільки поверхня контакту полімеру з поверхнею шнека є більшою, ніж з поверхнею циліндра, необхідно знизити коефіцієнт тертя полімеру об шнек. В іншому випадку

матеріал може перестати рухатися вздовж осі шнека і почати обертатися разом з ним. Це досягається підвищенням температури стінки циліндра (нагріванням) і зниженням температури шнека (охолодженням водою в зоні I). У зоні I внаслідок великої зовнішньої та внутрішньої тертя відбувається виділення тепла, яке також витрачається на нагрів матеріалу. У зону I подається тепло від нагрівачів, розташованих вздовж периметру циліндра. Іноді кількість тепла, яка виділяється при внутрішньому терті, може бути достатньою для плавлення полімеру, і тоді нагрівачі відключаються. Цей режим відомий як адіабатичний. У більшості випадків процеси за цим принципом не влаштовані. Якщо температура циліндра така, що відбувається передчасне плавлення полімеру біля його стінки, то матеріал може прослизати по цій поверхні, тобто обертатися разом з шнеком. Поступальний рух матеріалу припиняється. При оптимальній температурі полімер стискається, ущільнюється і утворює в міжвитковому просторі тверду пробку. Найкраще, якщо така ковзаюча пробка утворюється і зберігається на межі зон I і II. Властивості пробки визначають багато аспектів, таких як продуктивність машини, стабільність транспортування полімеру, максимальний тиск і інші.

При збільшенні частоти обертання шнека очікується зростання продуктивності екструдера, відповідно до визначеного рівняння.

$$Q = a \times r \times n \times N, \quad (2.1)$$

де  $r$  - щільність полімеру;  $Q$  - продуктивність машини;  $n$  - об'єм нарізки одного витка шнека;  $a$  - коефіцієнт заповнення шнека (0,15-0,50);  $N$  - частота обертання шнека.

Однак для точного розрахунку значення  $Q$  за цим рівнянням важливим є правильний вибір величини "а", яка залежить від форми та розмірів часток початкового полімеру (гранул, порошку) і методу їхнього заповнення міжвиткового простору.

Зона пластифікації та плавлення (II). Починаючи з початку зони II, відбувається поступове плавлення полімеру, який прилягає до поверхні

циліндра. Розплавлене покриття поступово накопичується, впливаючи на пробку (рис. 2.3), яка зменшується по ширині. З оскільки глибина нарізки шнека зменшується в процесі просування матеріалу від зони I до зони III, тиск, що виникає, примушує пробку щільно прилягати до гарячої стінки циліндра, де відбувається плавлення полімеру.

У зоні пластифікації пробка розплавляється за впливом тепла, яке виділяється в результаті внутрішнього, в'язкого тертя в матеріалі в тонкому шарі розплаву (поз. 3 на рис. 2.3), де відбуваються інтенсивні зсувні деформації, що призводять до пластифікації матеріалу. Ця обставина викликає виражений змішувальний ефект, оскільки розплав інтенсивно гомогенізується, а складові композиційного матеріалу перемішуються.

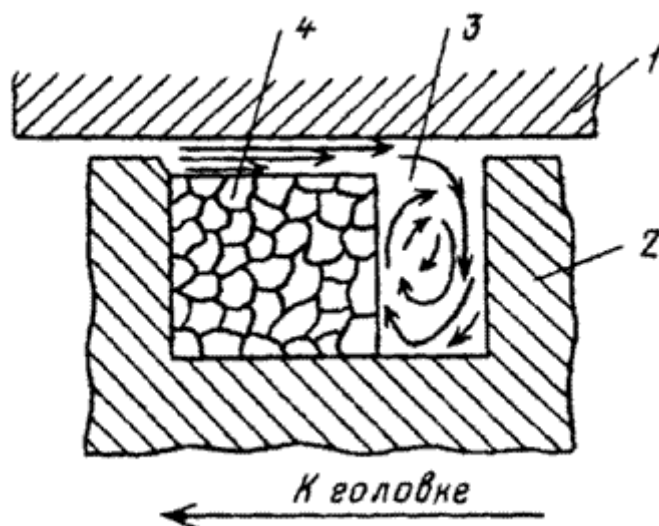


Рисунок 2.3 – Схема плавлення пробки матеріалу в зоні II в міжвитковому перерізі шнека:

- 1 - стінки циліндра; 2 - гребінь шнека; 3 - потоки розплаву полімеру;
- 4 - спресований твердий полімер (пробка) в екструдері.

Кінець зони II характеризується розпадом пробки на окремі фрагменти. Подальший розплав полімеру із залишками твердих часток потрапляє в зону дозування. Зменшення глибини нарізки шнека створює тиск, необхідний для прокладання розплаву через фільтруючі сітки, подачі його в головку, ущільнення і для виходу сформованого виробу.

Основний підйом тиску  $P$  розплаву відбувається на межі між зонами I і II. На цій межі утворюється пробка, яка, як ковзає по шнеку: в області I це твердий матеріал, в області II - плавкий. Ця пробка грає ключову роль у підвищенні тиску розплаву. Тиск, який залишається при виході з циліндра, використовується для подолання опору сіток, спрямування розплаву в каналах головки та формування виробу.

Область дозування (III). Продвиження гетерогенного матеріалу (розплав, частинки твердого полімеру) супроводжується виділенням внутрішнього тепла, що виникає внаслідок інтенсивних зсувних деформацій у полімері. Розплавлена маса продовжує гомогенізуватися, що виявляється в остаточному плавленні залишків твердого полімеру, усередненні в'язкості і температури розплавленої частини. У міжвитковому просторі розплав має ряд потоків, основними з яких є подовжній і циркуляційний. Розмір подовжнього (уздовж осі шнека) потоку визначає продуктивність екструдера  $Q$ , тоді як розмір циркуляційного потоку впливає на якість гомогенності полімеру або змішення компонентів.

Рух розплаву через сітки та устаткування для формування. Розплав, створений обертаючимся шнеком, примуштується проходити через ґрати, до яких прилягають металеві сітки. Сітки фільтрують, гомогенізують і створюють опір руху розплаву, що призводить до втрати частини тиску. Проходячи через систему фільтруючих сіток, частини полімерного розплаву з вищою в'язкістю залишаються на сітках. Цього часу достатньо для досягнення потрібної температури для цих частин розплаву. Високомолекулярні фракції полімеру та різноманітні домішки утримуються сітками, і через певний час вони, разом із сіткою, видаляються з циліндра екструдера.

Після того, як гомогенізований розплав пройшов через сітки, його піддають формуванню під залишковим тиском ( $P = 5,0 - 35$  МПа). Здобуваючи конкретний профіль, розплав виходить практично під дуже невеликим надмірним тиском з частини фільєра головки.

Основні технологічні параметри процесу екструзії включають температуру обробки полімеру, тиск розплаву, температуру в зонах головки і параметри терморегулювання для охолодження сформованого екструдату.

Основними технологічними характеристиками екструдера є:  $L$  (довжина шнека),  $D$  (діаметр шнека),  $L/D$  (відношення довжини шнека до його діаметра),  $N$  (швидкість обертання шнека), геометричний профіль шнека, міра зміни об'єму каналу шнека.

Основною характеристикою формуючого оснащення, разом із фільтруючими сітками, є коефіцієнт опору течії розплаву  $K$ . Перепад тиску на фільтруючих сітках служить показником засмічення, що вказує на збільшення опору сіток і, отже, є сигналом для їх заміни.

Показником ефективності роботи екструдера є його продуктивність, відносно споживаної потужності, що виражається як ефективність, або відношення виробленої продукції до витраченої енергії.

## 2.2 Обґрунтування засобів автоматизації процесів екструзії

Запуск екструзійної лінії різного типу вимагає довготривалого налаштування параметрів процесу методом проб і помилок. Зазвичай оператор вводить передбачені параметри екструзії в систему, отримує зразок виробу, вимірює його характеристики, коригує режим роботи лінії, отримує наступний зразок, знову вимірює його характеристики, знову налаштовує параметри процесу та продовжує цей цикл. Оскільки параметри роботи лінії взаємозалежні, необхідно тривалий час для досягнення відповідності усім вимогам до продукту. Крім того, коли екструдер доходить до стаціонарного теплового режиму або умови змінюються, оператор повинен розпочати налаштування спочатку.

Найвищу якість управління забезпечують системи із комплексним управлінням, в яких оператор вводить не лише передбачувані параметри переробки, але і характеристики кінцевого виробу. Після цього оператор просто

натиске кнопку, і автоматичні системи налаштовують процес відповідно до вимог до продукції. Весь цей процес налаштування займає всього 3-5 хвилин. І коли вимоги до якості продукції виконані, система автоматичного управління підтримує необхідні значення параметрів, вимагаючи тільки подавання полімеру з одного кінця лінії і вилучання готових виробів з іншого. З додатковим ефективним моніторингом і системою автоматичного відключення лінія може безпечно функціонувати протягом усієї зміни без втручання оператора.

Відсутність альтернатив для автоматизації цих процесів на сьогодні очевидна. Однак, враховуючи високу вартість нового обладнання, доцільним вважається вдосконалення використовуваного шляхом впровадження систем автоматичного керування на базі мікропроцесорів та передових засобів автоматики.

### 2.3 Автоматичні екструзійні системи

Очевидно, що залишити лінію, керовану людиною, без присутності оператора навіть на короткий час неможливо. При будь-якій зміні зовнішніх умов необхідна негайна коригуюча дія оператора, інакше може виникнути виробничий брак. Використання систем автоматичного управління (САУ) усуває подібні проблеми. Засоби управління повинні мати достатню складність для ефективного вирішення будь-яких передбачуваних порушень роботи. Система також повинна бути здатна відключити подачу енергії у випадку, якщо стандартний контур управління не здатний впоратися з критичною ситуацією.

Всі види екструзії в системах автоматизованого управління слідує схожим загальним принципам керування. Така екструзія встановлює високі стандарти для якості механічних компонентів, які повинні бути взаємозалежними для ефективної спільної роботи. Найсучасніші машини нічого не вартують без належного управління. Вони можуть розкрити свій потенціал лише за умови використання комплексної інтелектуальної системи, яка спрямовує їх дії як єдине ціле, а не як набір окремих компонентів.

## 2.4 Комплексне управління

Висунуто наступні положення, що окреслюють дану концепцію: якщо в екструзійній лінії існує параметр, який має вплив на кінцевий продукт, і в лінії також присутній "засіб", який можна використовувати для впливу на цей параметр або його коригування, і якщо існує принцип або правило, яке визначає, як цей "засіб" впливає на цей параметр, то для даного параметра слід створити замкнений контур управління.

Крім того, при наявності в екструзійній лінії різноманітних інтелектуальних процесорів, які керують різними підфункціями, необхідно мати центральний "мозок", який координує дії усіх підсистем лінії і забезпечує їх взаємодію як єдину зграйну систему. Ця система повинна бути простою у використанні навіть для недосвідчених операторів. Ефективна автоматична система повинна звільняти оператора від рутинних і складних завдань, а також бути легкою у обслуговуванні.

## 2.5 Особливості управління

Системи управління можна класифікувати в залежності від того, що саме вони регулюють. Управління обладнанням - це наочна область управління, яка включає в себе регулювання температури в окремих зонах екструдера та інших функціональних блоках лінії, контроль обертання шнека екструдера і швидкості руху будь-якого компонента технологічної лінії.

Така категорія була єдиною, якою займалися на початку розвитку екструзії. Виробник створював механічно вдалий екструдер, а потім вбудовував в нього температурні регулятори для кожної зони, додавав регулятори швидкості для всіх двигунів, і так далі.

Управління процесом. Пізніше фахівці з екструзії реалізували, що управління лише окремим устаткуванням є недостатнім. Важливим стало також регулювання течії полімеру і тиску в потоці розплаву.

Управління виробом. Керування устаткуванням і течією полімеру, безумовно, є важливим, але основна мета лінії екструзії - це виробництво продукції. З розвитком складних систем управління стає все більш реальним впливати безпосередньо на властивості виробів - не лише їхні розміри, але і текстура, колір, орієнтація та інші характеристики.

Унаслідок цього виникла концепція комплексного управління екструзійною лінією: подати полімерну сировину на одному кінці лінії і отримати готовий продукт на іншому кінці, який відповідає всім необхідним вимогам.

## 2.6 Правила регулювання температури розплаву

В результаті проведеного аналізу можна сформулювати наступні висновки і принципи, які будуть корисні при розробці системи регулювання температури розплаву:

- Регулятор температури може ефективно контролювати лише температуру в області, де розміщений його датчик. Система, яка намагається регулювати температуру полімеру, що стикається з внутрішньою стінкою циліндра екструдера, використовуючи датчик, розміщений на його зовнішній поверхні, не може надати точних результатів;

- Більшість тепла, необхідного для плавлення полімеру, генерується за допомогою механічної енергії, а не нагрівачів;

- Контроль температури на внутрішній поверхні циліндра, щоб забезпечити потрібні умови обробки, досягається за допомогою регулювання температури нагрівачів і систем охолодження на зовнішній стінці циліндра екструдера;

- Суттєві зміни в вихідному сигналі системи управління температурою необхідні саме при нормальній роботі екструдера. Оскільки основна кількість тепла генерується шнеком, система нагріву і охолодження циліндра екструдера виконує роль тонкого налаштування температури на внутрішній поверхні

циліндра, де значення температури є найкритичнішим. Таким чином, значні зміни в системі нагріву і охолодження необхідні для досягнення змін температури всередині екструдера;

- Сталь є слабким провідником тепла. Це означає, що кожного разу, коли тепло передається від нагрівачів до полімеру або від полімеру до сорочки охолодження, утворюється значний градієнт температур на поверхні циліндра. Для екструдера з діаметром D63 мм цей градієнт може сягати 10-15 °С, а для екструдера D90 мм - більше 38 °С.;

- Часова інерція для циліндра екструдера може бути значною; для екструдера D90 мм ця інерція становить приблизно 6 хвилин. Тут часові затримки розглядаються у класичному розумінні як часові константи. Іншими словами, якщо миттєво змінити температуру в сорочці охолодження або нагрівачі, то часова константа визначає час, за який цей ефект проявиться на 63,4% в глибині екструдера.

Для нагрівальних елементів рекомендується використовувати стандартні пристрої, оскільки зміна їх конструкції вимагатиме конструктивних змін у корпусі агрегату. Зчитування заданого значення температури з контролера, поточного значення з датчиків температури, їх порівняння і формування керуючого сигналу доцільно здійснювати за допомогою мікропроцесора.

### 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГОЛОВКИ ЕКСТРУЗІЙНОГО АГРЕГАТУ

#### 3.1 Регулювання температури

Розглянемо загальну структуру будь-якої системи управління, яка представлена на рис. 3.1, малюнок 04.01.ТК. Почнемо з вхідного сигналу, який відображає задане значення регульованого параметра. Від цього вхідного сигналу відняємо дійсне виміряне значення цього параметра для отримання сигналу помилки, який вказує на різницю між поточним станом і бажаним значенням. Далі регулятор генерує вихідний сигнал для корекції навантаження з метою досягнення заданого значення, іншими словами, для зведення сигналу помилки до нуля.

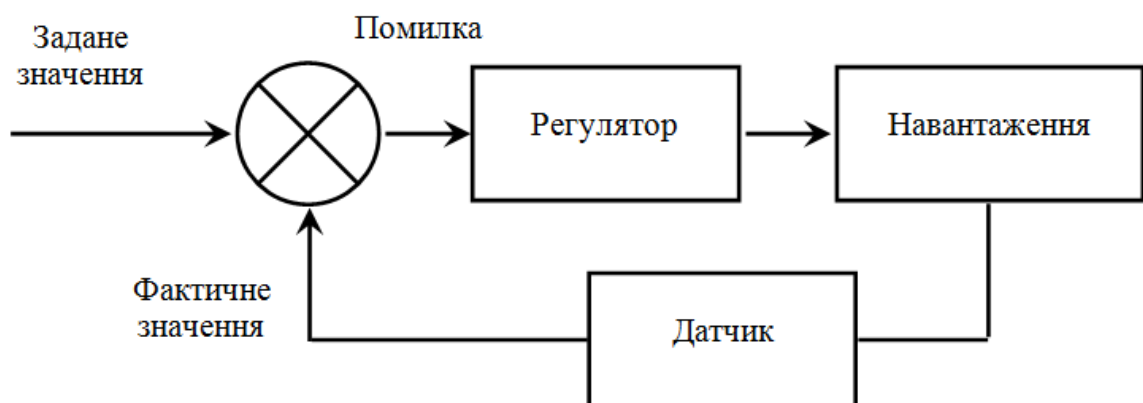


Рисунок 3.1 – Загальна схема системи регулювання

Тепер розглянемо наявні типи регуляторів температури.

##### 3.1.1 Використання регулятора типу "Ввімкнено-вимкнено"

Найвідоміший тип регулятора температури – це двопозиційний регулятор "Ввімкнено-вимкнено", який широко застосовується в системах обігріву, печах, холодильниках та інших пристроях. У цьому регуляторі встановлюються два задані рівні температури: один, при якому нагрів включається на 100%, і інший, при якому нагрів повністю відключається. Якщо зміна фактичної температури

відбувається досить повільно, в порівнянні з ефектом зміни температури в системі нагріву-охолодження, крива зміни температури буде схожа на ту, яку показано на рис. 3.2. Тут температура коливається між двома граничними значеннями з мінімальними відхиленнями від установлених значень або ж взагалі без них.

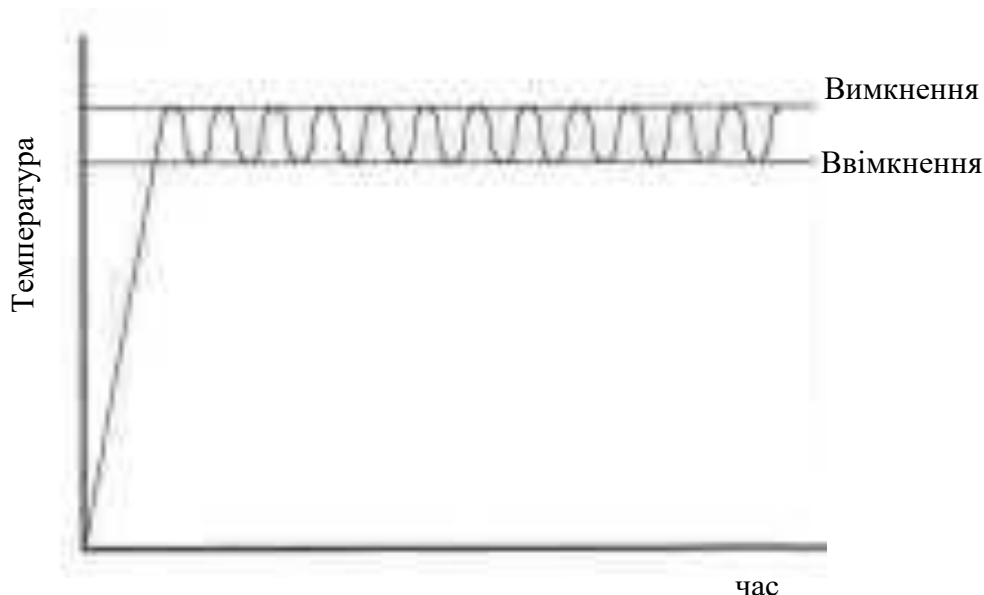


Рисунок 3.2 – Крива зміни температури при двопозиційному регулюванні типу "Ввімкнено-вимкнено" без часової затримки

У екструдері для обробки полімерів, як було вказано раніше, присутні значні часові затримки в вимірювальному контурі, які слід урахувати. Зміна температури відбуватиметься не так, як на попередньому графіку. Наприклад, для екструдера D90 з нагрівачами, розташованими зовнішньою стороною циліндра, і з датчиком температури, що знаходиться глибоко всередині стінки циліндра, близько до розплавленого полімеру, можна встановити затримку системи 6 хвилин. Температура буде зростати, а нагрівач відповідної зони вимкнеться, коли показники датчика досягнуть верхньої установленної межі. Проте, замість негайного припинення передачі тепла, це буде відбуватися протягом додаткових 6 хвилин через перехідний період для циліндра. Таким

чином, температура продовжить зростати за межі звичайної точки відключення регулятора.

На нижній межі ситуація аналогічна. Коли температура, вимірювана датчиком у глибокому свердлінні циліндра, досягне нижньої межі, нагрівач знову включиться, проте датчикам знадобиться ще 6 хвилин, щоб це зафіксувати. Протягом цього часу температура продовжить знижуватися нижче за нижню межу включення нагрівача, пов'язаного з даною зоною.

Головне, що варто відзначити тут – якість двопозиційного регулювання практично не залежить від якості регулятора, а майже повністю визначається характеристиками навантаження, зокрема часовою затримкою між нагрівачем і датчиком.

### 3.1.2 Використання пропорційного регулятора

Замість того, щоб кожного разу повністю включати або повністю вимикати нагрівач, будемо поступово використовувати його потужність: від нульового значення до повного. Наприклад, якщо відстань між межами виключення і повної потужності нагріву складає чверть від повної потужності, то говорять, що нагрівач включається на 25%. Якщо відстань складає половину від усього шляху, то на 50% і так далі. Іншими словами, вихідний сигнал дорівнює добутку коефіцієнта пропорційності і помилки або різниці між фактичним і заданим значеннями температури.

Для пропорційного регулятора можливий стійкий стан рівноваги, в якому тепло, що подається, в точності дорівнює потребі в ньому, тому температура залишатиметься постійною, як показано на рис. 3.3, де використовується потужність нагрівача постійна і складає 50% від його повної потужності.

На жаль, це картина, що занадто ідеалізується, заснована на неявному припущенні, що необхідна потужність регулятора постійна. Але якби це було так, то в регулятора б взагалі не було необхідності; досить було б простого трансформатора з різними виходами або автотрансформатора. Замість цього

відомо, що кількість тепла, потрібного від нагрівача при екструзії, зазвичай міняється в широких межах. Фактичний графік температури буде швидше схожий на показаний на рис. 3.4.

Пропорційний регулятор так само чутливий до часових затримок, як і двопозиційний регулятор. На практиці для забезпечення стабільності смуга пропорційності для цього типу регулятора повинна відповідати ширині смуги

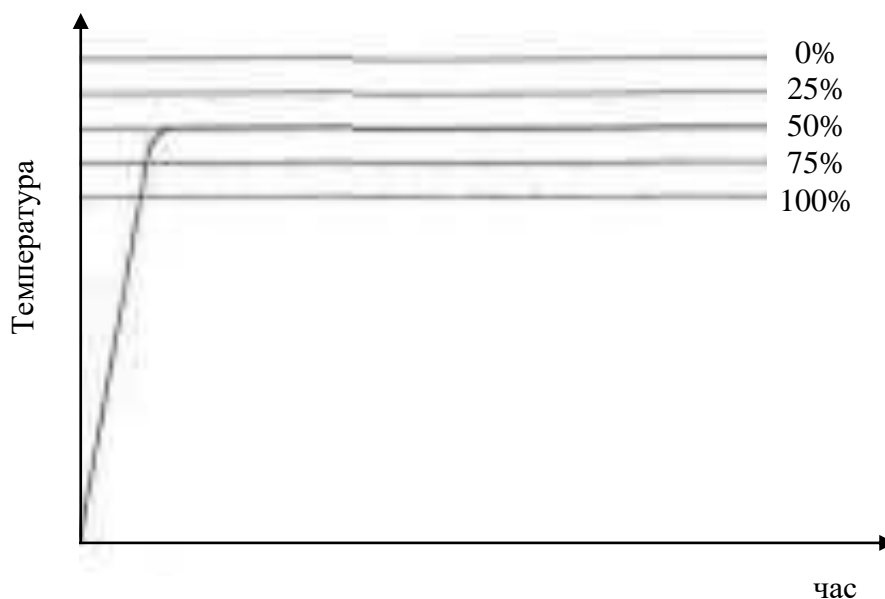


Рисунок 3.3 – Стан стійкої рівноваги для пропорційного регулятора

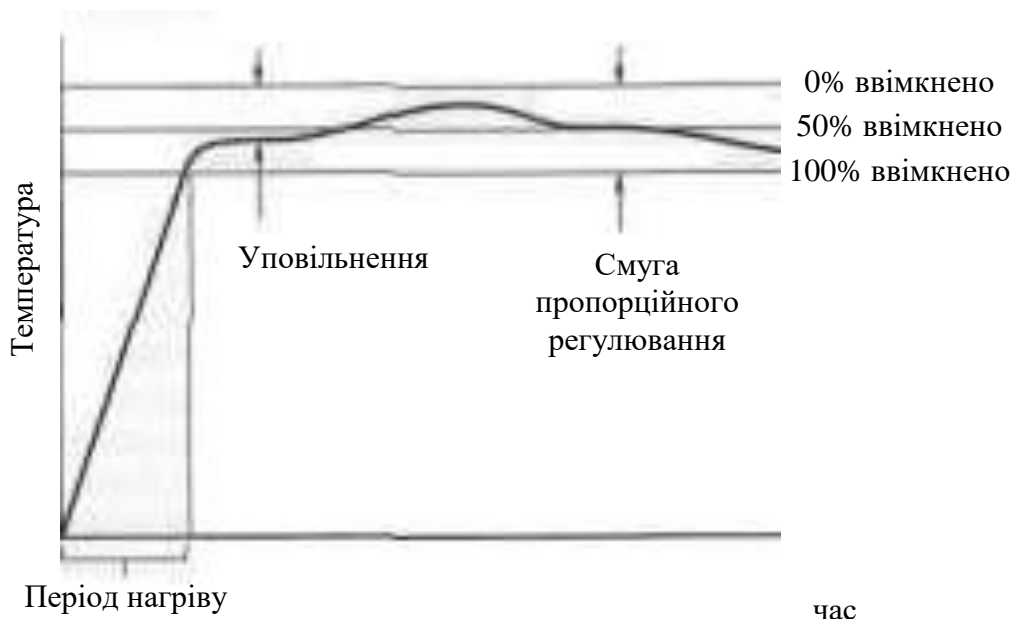


Рисунок 3.4 – Фактичний графік температури для пропорційного регулятора

коливань температури при двопозиційному регулюванні. При тривалій роботі якість регулювання для забезпечення стійкого стану пропорційного регулятора виявляється не краще, ніж для двопозиційного. Усуваються тільки пульсації - коливання з малим періодом.

Отже, жоден із двох типів простих регуляторів температури не може забезпечити високу якість роботи у випадку великих часових затримок, які є характерними для устаткування, використовуваного для переробки полімерів.

### 3.1.3 Використання пропорційно-інтегрального регулятора

З метою отримання високих показників роботи у випадку великих часових затримок, варто розглянути так званий пропорційно-інтегральний регулятор або пропорційний регулятор з автоматичним поверненням в початкове положення.

Зв'язок між вихідним сигналом регулятора  $X_{вих}$  і різницею між фактичною температурою і заданою  $\varepsilon$  визначається виразом:

$$X_{вих} = K_1 \varepsilon + K_2 \int \varepsilon dt \quad (3.1)$$

Фактичне стабільне значення температури для належно налаштованого ПІ-регулятора завжди буде відповідати заданому значенню. Ефективний регулятор забезпечить точність утримання температури зони циліндра екструдера на рівні  $1^\circ$  в усьому діапазоні зміни температури, від повного нагріву до повного охолодження, незалежно від часових затримок між нагрівачем і датчиком.

### 3.1.4 Використання пропорціонально-інтегрально-диференціального регулятора

У практично використовуваних регуляторах інтегральній складовій майже завжди додається диференціальна складова, яка не впливає на стійкий стан регульованої величини. Це попереджувальна складова, яка дозволяє регулятору швидше реагувати на зміни (рис. 3.5). Пропорціонально-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор), будь то окремий пристрій чи частина мікропроцесорної панелі, вважається найкращим рішенням для всіх

типів устаткування у сфері полімерного машинобудування та в інших завдань, де є значні часові затримки.

Отже, реальний вихідний сигнал ПД-регулятора може бути визначений за допомогою наступної формули

$$X_{вих} = K_1 \varepsilon + K_2 \int \varepsilon dt + K_3 \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.2)$$

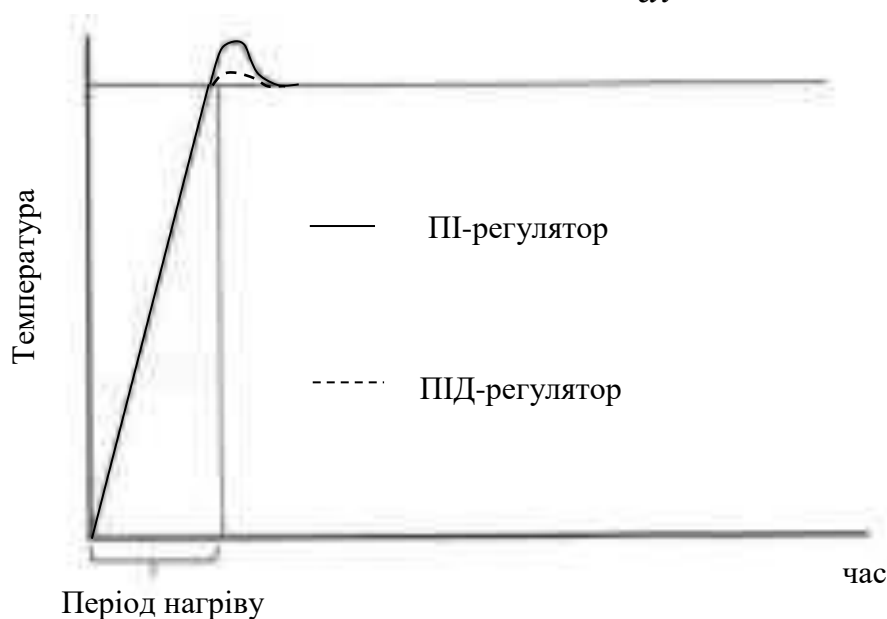


Рисунок 3.5 – Температурні криві для системи нагріву екструдера, що керується ПІ- та ПІД-регулятором

Отже, ПІД-регулятор здатний обробляти значні часові затримки та утримувати стає значення температури, але для досягнення оптимальної продуктивності йому необхідно належним чином налаштуватися. Параметри, такі як смуга пропорційного регулювання, час відновлення до початкового стану і швидкість регулювання, повинні бути оптимізовані залежно від конкретного обладнання та завдань, з якими воно стикається.

Так, налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора вимагає розуміння його принципів роботи і може бути завданням, що вимагає досвіду та обізнаності. Для недосвідченого оператора це може виявитися досить складним завданням, і навіть для досвідченого фахівця це може зайняти певний час для досягнення оптимальних налаштувань.

Сучасні мікропроцесорні регулятори вважаються ідеальним варіантом для вирішення таких задач. Вбудована програма аналізує термічний контур навантаження і автоматично оптимізує коефіцієнти для досягнення оптимальної реакції системи. Це звільняє оператора від довготривалої роботи з налаштуванням. Сучасні системи також дозволяють операторові налаштовувати саму систему, враховуючи його особисті переваги. Наприклад, деякі можуть віддавати перевагу повільному наростанню температури без перерегулювання, тоді як інші можуть бажати швидшої реакції для швидкого досягнення заданого значення температури. Після знаходження оптимальних налаштувань їх рідко доводиться змінювати.

### 3.1.5 Використання нечіткої логіки

Нечітка логіка є вельми ефективним підходом, особливо у системах з багатьма змінними та в тих випадках, коли точний взаємозв'язок причини та наслідку невідомий. Проте малоімовірно, що системи з нечіткою логікою зможуть працювати краще, ніж ПІД-регулятори в описаних простих контурах температурного регулювання.

Якщо одна система проявляє перевагу перед іншою, то це не в тому, що вони виконують різні завдання - обидві роблять одне й те саме, а в тому, як вони це роблять. У конкретних обставинах одна система може працювати швидше, ніж інша, але це лише аспект цієї переваги.

## 3.2 Особливості вимірювання температури

### 3.2.1 Розташування датчиків

Тому стало звичайною практикою розміщувати датчик в неглибокому каналі. В деяких випадках датчики розташовували навіть в самому нагрівачі. Обидва ці рішення призводили до дуже поганого регулювання температури. При розташуванні датчика температури в нагрівачі і при необхідності, наприклад, подати більше тепла для компенсації зниження тепловиділення при роботі

шнека, єдиним способом, за допомогою якого це можна зробити, буде зміна температури нагрівача. Але якщо датчик знаходиться в нагрівачі, ця температура не може бути змінена. Замість цього доведеться змінювати температуру процесу. Отже, зазвичай розташовування датчика в неглибокому каналі стало звичайною практикою. У деяких випадках датчики навіть розміщували в самому нагрівачі. Проте обидва ці підходи призводили до неефективного регулювання температури. Коли датчик температури розташовується в нагрівачі і, наприклад, потрібно подати більше тепла для компенсації зниження тепловиділення при роботі шнека, єдиним шляхом цієї зміни є зміна температури нагрівача. Проте, оскільки датчик знаходиться в нагрівачі, ця температура не може бути змінена. Замість цього доведеться впливати на температуру процесу.

Розташування датчика в неглибокому каналі працює трошки краще, але не настільки ефективно, як б хотілося. Щоб оцінити серйозність цього питання, розглянемо екструдер D90. Матеріальний циліндр цього екструдера виготовлений із сталі, що призводить до значного градієнту температури. Неправильне розташування датчика може призвести до точного регулювання невірної температури.

### 3.2.2 Використання подвійних датчиків

В кінці 1970-х років в практиці була впроваджена запатентована система, яка використовувала "середньо-зважене" значення показів датчиків у глибокому і мілкому каналах. Ця система передбачала поєднання швидкого температурного відгуку датчика в неглибокому каналі з точністю датчика у глибокому каналі.

На жаль, цей підхід не виправдав очікувань. Легко переконатися, що середні показники датчиків в глибокому і мілкому каналах еквівалентно показам одного датчика, розташованого десь посередині. Такий метод виміру температури, як і раніше, схильний до великих температурних помилок. Вони складають приблизно половину величини помилки одного датчика в неглибокому каналі.

Пізніше була запатентована система, відома як система регулювання із здвоєними датчиками, яка вирішує проблему шляхом використання каскадної схеми управління (рис. 3.6). Контур з неглибоко розташованим датчиком забезпечує швидкий відгук на події, що відбуваються зовні, наприклад, зміна температури навколишнього повітря або коливання напруги в мережі живлення, тоді як контур з глибоко розташованим датчиком усуває температурну помилку між показами на малій і великій глибині. Глибинний контур не управляє температурою безпосередньо, а швидше, регулює задане значення для контура з неглибоким датчиком. Подібна система також набагато подовжує термін служби нагрівача за рахунок обмеження діапазону його температурних режимів. Вона рекомендується для екструдерів з діаметром шнека 38 мм і вище.

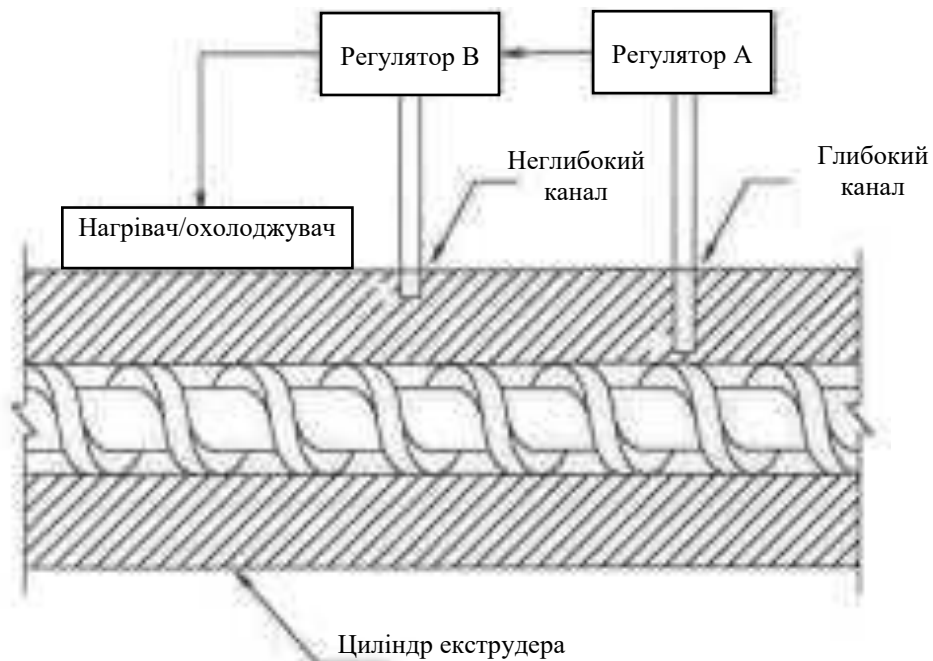


Рисунок 3.6 – Регулятор зі здвоєними датчиками

### 3.2.3 Типи використовуваних датчиків

Термопари знайшли своє застосування для вимірювання дуже високих температур або в точкових вимірах. Однак у полімерній промисловості виникли технологічні альтернативи, такі як платинові термометри опору, які виявилися набагато ефективнішими. Ці датчики опору відзначаються значними перевагами, що призвели до їх швидкого витіснення з використанням у старих пристроях.

### 3.2.4 Принцип роботи датчиків

Так, принцип роботи термопари базується на явищі виникнення електродвїжущої сили (ЕДС) при з'єднанні двох різних металів. Наприклад, якщо один кінець термопари виготовлений з константану, а інший - зі заліза, то в результаті різниці в енергії цих металів на відкритому кінці термопари виникає електродвїжущий потенціал.

Якщо обидва кінці дротів перебувають при рівних температурах, то їхні потенціали будуть однаковими, і вони будуть компенсувати один одного, що призведе до відсутності електричного струму в ланцюзі. Проте, якщо температура підвищується в одній точці з'єднання, то потенціал в цій точці також зростатиме, і виникне різниця потенціалів, що спричинить потік електричного струму в ланцюзі. Величина цього струму буде пропорційною різниці температур між двома точками спайки.

Справді, термопара фактично вимірює не саму температуру, а відмінність температур між двома її точками. Одну точку розміщують у місці вимірювання (у процесі), а іншу – у вимірювальному пристрої.

Справжньо, принцип роботи термометра опору базується на зміні опору майже будь-якого металу при зміні температури. У випадку платини ця залежність лінійна в широкому діапазоні температур. Оскільки платина може бути отримана з мінімальною кількістю домішок, термометри опору з платиновими елементами відрізняються високою відтворюваністю. Платина, як благородний метал, практично не утворює хімічні сполуки, і має дуже високу точку плавлення, що робить її ідеальним матеріалом для точного вимірювання і регулювання температури.

Метод вимірювання температури за допомогою термометра опору ґрунтується на використанні моста Уїтстона. Одне рукоятка цього моста - це точний потенціометр або змінний резистор. Значення цього потенціометра визначає опір датчика, при якому міст буде урівноважений, і вихідний сигнал буде нульовим. При температурах вище цього нуля вихідний сигнал буде

позитивним і пропорційним відхиленню від заданого значення, а при нижчих температурах він буде негативним і також пропорційним відхиленню.

Переваги використання термометрів опору порівняно з термопарами наступні:

- відсутність необхідності компенсації холодного спаю;
- відсутня необхідність використання спеціальних з'єднувальних дротів;
- покращена взаємозамінність;
- підвищені довготривала стабільність і строк служби;
- більш легка перевірка пристроїв;
- незалежність показів від коливань напруги живлення і температури оточуючого середовища;
- наявність у більшості сучасних термометрів опору вбудованих засобів захисту;
- висока чутливість термометрів опору та високий рівень вихідного сигналу;
- не погана придатність для використання з ковзкими контактами.

### 3.3 Регулювання енергії нагріву і охолодження

Методи управління енергією для систем нагріву та охолодження екструдерів розвивалися паралельно з самим розвитком засобів регулювання.

#### 3.3.1 Використання механічних контакторів

Спочатку системи нагріву та охолодження екструдерів регулювалися за допомогою механічних контакторів і реле. Оскільки потужність нагрівачів циліндра екструдера коливалася від 1500 Вт до 4000-6000 Вт, термін служби контактів регуляторів суттєво обмежувався. Крім того, для зменшення "пили" температури бажано було, щоб інтервал між послідовними циклами включення і відключення складав всього декілька секунд. Це призводило до великої кількості перемикань в одиницю часу, що ставало дуже високим навантаженням на контакти. В результаті витрати на обслуговування механічних контакторів виявлялися досить високими, а їхня ефективність залишалася низькою.

### 3.3.2 Використання ртутних контакторів

Впровадження контактів на основі ртуті виявилось значним покращенням по відношенню до існуючих механічних контакторів. Хоча вартість пристроїв трошки зросла, термін їх служби істотно збільшився. Крім того, ці контакти забезпечили трошки кращі показники роботи завдяки скороченим інтервалам між циклами включення і відключення.

Недоліком є токсичність ртуті. Використання ртуті абсолютно заборонено при виробництві продукції медичного призначення та для упаковки продуктів. Таким чином, реле і контактори, що містять ртуть, не є прийнятним рішенням для практичного використання.

### 3.3.3 Використання твердотілих контакторів

На сьогодні для завдань включення і відключення живлення найбільш ефективними з точки зору різних критеріїв є твердотілі модулі. З їхньою допомогою забезпечується підвищена частота перемикавання, а при правильному використанні - значно краще регулювання температури. Крім того, твердотілі модулі істотно подовжують термін служби, що призводить до значного зменшення вимог до обслуговування таких контактів.

### 3.3.4 Фазове управління – пропорційне керування енергією

Найбільш широко використовуваним твердотілим перемикачем в сучасності є напівпровідниковий керований тиристор - триністор (тріодний тиристор). Його особливість полягає в можливості переходу із провідникового стану в будь-який момент циклу вхідної напруги. Коли триністор переходить в провідниковий стан, він залишається в цьому стані до кінця півхвилі вхідної напруги. При зниженні напруги до нуля триністор відкриває ланцюг і повертається до початкового стану. Протягом наступної півхвилі подачі напруги його можна знову перевести або залишити в провідниковому стані в залежності від потреби.

Фазове управління живленням має численні важливі переваги. Це забезпечує плавне регулювання живлення з майже необмеженою точністю. Вартість системи управління живленням, хоча і вища, ніж у випадку використання різноманітних контакторів, залишається прийнятною.

Є, однак, проблеми, які не є очевидними. Фазове регулювання призводить до значних перехідних процесів у лінії живлення через високу швидкість перемикання і високу ефективність триністора. Ефект аналогічний підключенню генератора імпульсів до лінії живлення. Це може негативно впливати на комп'ютерні та інші чутливі вимірювальні пристрої на підприємстві. Вирішення цих проблем можливе за допомогою використання пристроїв, де перемикання триністорного управління відбувається при нульовій вхідній напрузі.

#### 3.4 Розробка схеми функціональної системи стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера

На основі вищевикладеного можна створити функціональну схему розроблюваної системи. Зазначена схема, яка подана на малюнку 04.02 в ілюстративному матеріалі, включає такі елементи:

- Датчик температури: Вимірює температуру в потрібній області.
- Погоджувальний блок (масштабуючий підсилювач): Забезпечує приведення сигналу з датчика температури до рівня, придатного для введення в мікроконтролер.
- Мікроконтролер: Обробляє вхідні дані від датчика температури і генерує керуючий сигнал для вмикання нагрівача.
- Силові ланцюги: Забезпечують підсилення керуючих сигналів з виходу мікроконтролера та їхнє подавання на нагрівач.

Ця схема визначає основні елементи системи регулювання температури, включаючи вимірювальні, обчислювальні та керуючі компоненти.

На основі зазначеного вище матеріалу, загальний алгоритм роботи розроблюваної системи представлено на малюнку 07.02 в ілюстративному матеріалі.

### 3.5 Розробка схем електричних принципів системи стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера

Виникнення та швидкий розвиток мікропроцесорних технологій призвели до широкого їх використання в різних галузях економіки. Функціональна гнучкість, висока надійність, компактні розміри та доступність мікропроцесорних засобів роблять їх вигідним вибором для використання в системах автоматизованого управління.

Сучасні елементи цифрової техніки відкривають широкі можливості для створення цифрових регуляторів, що реалізують операції в реальному часі на основі мікропроцесорів. Зокрема, мікроконтролери, які є вбудованими системами, об'єднують у собі компоненти мікропроцесора, програмну та оперативну пам'ять, а також програмовані інтерфейси для взаємодії з зовнішнім середовищем. Використання мікроконтролерів в системах керування дозволяє досягти високої ефективності за невеликої вартості, при маленьких розмірах, вазі, енергоспоживанні і при цьому забезпечує високу обчислювальну потужність.

Структурна організація, командний набір та засоби вводу/виводу інформації мікроконтролерів найбільш ефективно використовуються для вирішення завдань управління та регулювання в пристроях, приладах і системах автоматики. У практиці проектування мікропроцесорних систем автоматичного керування (САК) необхідно враховувати кілька ключових факторів, таких як забезпечення високих показників якості управління, оптимальний розподіл функцій між апаратними та програмними засобами, а також взаємодія між цифровою та аналоговою складовими САК.

Якість управління, така як динаміка, точність та вірогідність виконання функцій керування, суттєво залежать від особливостей цифрової реалізації алгоритму керування в мікроконтролері. Цифрове представлення інформації включає в себе дискретизацію процесів у часі та квантування по рівню.

Дискретизація часових процесів, здійснювана відповідно до критеріїв якості функціонування системи автоматичного керування (САК), ставить вимоги до швидкодії мікроконтролера, тоді як квантування по рівню може призводити до появи шумів квантування.

Вирішення завдання розподілу функцій системи автоматичного керування (САК) між апаратним та програмним забезпеченням пов'язане з розглядом багатьох факторів. Першочерговими серед них, разом із забезпеченням заданої потужності мікроконтролера, є структура системи, форма подання вхідної та вихідної інформації та особливості цифрових алгоритмів обробки інформації.

Для забезпечення взаємодії аналогової частини системи автоматичного керування (САК) з мікроконтролером використовують аналого-цифрові та цифроаналогові перетворювачі (АЦП та ЦАП). Цим пристроям висуваються високі вимоги до швидкодії, точності та лінійності перетворення. З'являється потреба у схемотехнічному та програмному забезпеченні спряження АЦП з іншою розрядністю, порівняно з розрядністю мікроконтролера. Проте за останні часи мікроконтролери з вбудованими АЦП достатньо високої розрядності стали досить поширеними, що дозволяє уникнути використання додаткових мікросхем і значно полегшує проектування електричних схем.

Враховуючи раніше наведені вимоги, однокристальний мікроконтролер типу AT90S4433 є відповідним вибором для побудови мікропроцесорної системи автоматичного керування (САК).

У порівнянні з цифровими регуляторами, які мають апаратну реалізацію, програмно реалізовані регулятори є менш швидкодіючими. Однак вони компенсують цей недолік більшою універсальністю, легкістю налаштування та поліпшеними масо-габаритними характеристиками. У порівнянні з системами, що використовують інші типи елементів, мікропроцесорні системи автоматичного керування володіють вищою надійністю.

Цифроаналоговий перетворювач (ЦАП) однозначно конвертує кодові комбінації цифрового сигналу в аналоговий сигнал. На відміну від цього, аналого-цифровий перетворювач (АЦП) вирішує задачу встановлення однозначної відповідності між аналоговим сигналом і цифровим кодом. Однією з ключових вимог до обох типів перетворювачів є їхня здатність до взаємодії з мікропроцесором. Це передбачає сумісність логічних рівнів цифрових сигналів, що виходять з перетворювачів, і шини даних мікропроцесора, а також співпадіння видів цифрових кодів і формату даних, а також програмну сумісність. Вибраний мікроконтролер типу AT90S4433 вже має вбудовані ЦАП і АЦП, що спрощує їхнє інтегрування в систему.

У схемі регулювання температури головки екструдера можна виділити дві основні частини: слабкострумову (керуючу) та силову (енергетичну). Реалізація слабкострумової частини на одному мікропроцесорі підвищує надійність і універсальність системи автоматичного керування (САК), дозволяє достатньо просто впровадити необхідні закони зміни керуючих дій. Оскільки інформація про процес регулювання міститься в самому цифровому сигналі і не пов'язана з його енергією, то вона менш піддана дії перешкод та викривлень.

Слабкострумова частина мікропроцесорної Системи Автоматичного Керування (САК) повинна вирішувати завдання програмної реалізації цифрового регулятора та генерації спеціальних кодових послідовностей для управління силовою частиною. Метою цього є отримання сигналу для керування включенням та відключенням нагрівачів.

Принципова структура системи може бути визначена за допомогою схеми, представленої на малюнку 07.01. Основними компонентами є мікроконтролер AT90S4433, виконуючий алгоритм управління; вхідний роз'єм, призначений для прийому сигналів від датчика температури та пристрою установки; вхідні масштабуючі підсилювачі, які адаптують вхідні сигнали до стандартного рівня, зрозумілого для мікроконтролера; вихідний роз'єм, через

який сигнали надсилаються на пристрої для управління нагрівачами; і рідкокристалічний індикатор.

Елемент DD3, який представляє собою мікросхему AT90S4433, інтегрує мікроконтролер з вбудованим тактовим генератором G1. Частота цього генератора визначається зовнішнім кварцовим резонатором і становить 12 МГц. Вхідні масштабуючі підсилювачі, що конвертують вхідні сигнали від датчика та задаючого пристрою до рівня, зрозумілого для мікропроцесорної системи, реалізовані на елементах DA3 та DA4 (мікросхеми K140УД17). Ці операційні підсилювачі використовуються для підсилення сигналів без викривлень з датчиків, підсилення позитивного сигналу, забезпечення малої напруги зміщення нуля, малого дрейфу, низького рівня шумів і великого вхідного опору. Регулювання масштабу виконується за допомогою зміни коефіцієнта підсилення операційного підсилювача. Сигнали з підсилювачів поступають на входи мікроконтролера через мультиплексор DD1 (мікросхема AD7890). Керуючі сигнали з портів PB1 та PB2 мікроконтролера надходять на демультимплексор DD2 (мікросхема K530 ИД7), звідки через роз'єм подаються на пускач. Включення мультиплексора та демультимплексора в проект обумовлено можливістю розширення функціональності мікроконтролера, оскільки його технічні характеристики дозволяють провести такі модифікації.

На цьому кресленні представлена принципова електрична схема стабілізатора блока живлення розроблюваної системи. Роз'єм XP3 забезпечує можливість програмування і перепрограмування мікроконтролера через SPI INTERFACE у випадку розширення його функціональності.

#### 4 РОЗРАХУНКИ ТА МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

Автоматизація знаходить широке застосування в сучасному суспільстві з метою поліпшення різних аспектів виробництва та життя. Це включає досягнення ефективності у використанні ресурсів, поліпшення екологічних показників, підвищення якості та надійності продукції, сприяння умовам праці, розробку комплексних механізаційних систем, автоматизацію технологічних процесів, зменшення витрат на виробництво, підвищення якості виробів, а також оптимізацію кількості працівників та зменшення потреби у виробничих площах. Сучасні технології дозволяють автоматизувати практично будь-який етап виробничого процесу.

Проектування систем автоматичного регулювання може бути здійснене двома основними підходами: методом аналізу, де параметри системи визначаються на основі розрахунків або моделювання; і методом синтезу, де зразу обирається оптимальна структура та параметри системи відповідно до заданих вимог. Обидва методи знайшли широке застосування в практиці. Метод синтезу часто є більш прийнятним у випадках, коли відсутній досвід розробки систем, і це стає важливим критерієм вибору для досягнення покращення показників якості вивчуваної системи.

Для вирішення поставленої задачі в першу чергу важливо визначити стійкість системи та показники якості. Це включає в себе розгляд структури, принципів функціонування та механізму регулювання. Наступними кроками є розробка функціональної, принципової та структурної схем системи автоматичного регулювання, побудова ЛАЧХ (логарифмічної амплітудно-частотної характеристики) розкритої системи, АФЧХ (амплітудно-фазової характеристики) розкритої системи, а також аналіз перехідних характеристик. Важливим етапом є визначення показників якості системи.

У випадку, якщо виявиться, що визначені показники якості не відповідають заданим значенням, необхідно здійснити пошук коректуючого пристрою. Цей пристрій вводиться в систему, і після цього проводиться повторний аналіз показників якості, щоб визначити, чи вони відповідають заданим критеріям. Процес корекції дозволяє досягти бажаних результатів та гарантує відповідність системи встановленим стандартам.

#### 4.1 Вихідні дані для розрахунків системи

Рівняння елементів системи:  
об'єкта:

$$T_0 \left( \frac{d\Theta}{dt} \right) + \Theta = k_0 \mu - k_1 f ; \quad (4.1)$$

вимірювальної схеми:

$$U_m = k_3 \rho ; \quad (4.2)$$

підсилювача:

$$X = k_5 U_m ; \quad (4.3)$$

виконавчого механізму

$$T_1 \frac{d\mu}{dt} + \mu = k_4 \Delta X ; \quad (4.4)$$

чутливого елемента

$$\rho = k_2 \Theta . \quad (4.5)$$

Параметри:

$\rho$  – сигнал чутливого елемента;  $\Theta$  – температура розплаву в циліндрі екструдера;  $X_0$  – задане значення температури розплаву;  $X$  – поточне значення температури після підсилювача;  $\mu$  – зміна кількості енергії, виділяємої нагрівачем;  $\Delta X = X_0 - X$  – відхилення температури (вхідний сигнал виконавчого механізму);  $U_m$  – вихідна напруга вимірювального мосту;  $f$  – еквівалентне збурююче діяння;  $U_0$  – напруга живлення мостової схеми.

Значення параметрів:

$$k_0 = 4 \text{ град/Вт}; \quad T_0 = 3600 \text{ с}; \quad T_1 = 1,2 \text{ с}; \quad k_1 = 0,3 \text{ град/Вт};$$

$$k_2 = 10 \text{ Ом/град}; \quad k_3 = 1 \text{ В/Ом}; \quad k_4 = 300 \text{ Вт/В}; \quad f = 5 \text{ Вт}.$$

#### Вимоги до синтезованої САР:

- максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25 %;
- в процесі синтезу САР розробити систему, оптимальну за швидкодією;
- час регулювання забезпечити не більше 3 с для заданих параметрів системи;
- запас стійкості за модулем не менше 15 дБ, за фазою не менше 30°.

#### 4.2 Будова, принцип дії системи

Система автоматичного регулювання (САР) має за завдання забезпечувати стабільну температуру розплаву на заданому рівні, який встановлюється оператором. Це досягається шляхом контролю та регулювання кількості тепла, яке поступає в зону розплаву. Температурний режим контролюється за допомогою термодатчика, який вимірює актуальну температуру розплаву.

На рисунку 4.1 зображено основний принцип системи автоматичного регулювання (САР) температури в області розплавлення екструдера. Система включає в себе компоненти, такі як об'єкт регулювання, термодатчик, вимірювальна мостова схема, задаючий пристрій, фазочутливий підсилювач, виконавчий пристрій і елемент порівняння.

У стійкому режимі, коли температура в області розплавлення відповідає заданому значенню, система знаходиться в рівновазі: відхилення на виході вимірювального моста дорівнює нулю, напруга на виході підсилювача також нульова, і виконавчий пристрій не змінює рівень тепловиділення.

У випадку, якщо температура в області розплавлення зміниться у зв'язку з різними обставинами, міст втратить баланс, і на його виході з'явиться різниця в напрузі з відповідною фазою. Це відхилення підсилюється фазочутливим підсилювачем з необхідним коефіцієнтом підсилення для керування виконавчим пристроєм. Виконавчий пристрій, в свою чергу, змінює кількість тепла, що

подається в зону розплавлення, в залежності від знаку напруги на вході підсилювача, що призводить до зменшення чи збільшення тепловиділення.

Отже, у цій схемі використовується принцип регулювання, заснований на відхиленні фактичного значення вихідної величини об'єкта від його заданого значення. Для ефективного використання принципу керування за відхиленням, система автоматичного регулювання (САР) повинна бути замкненою. Головною особливістю і перевагою цієї схеми є те, що САР реагує на відхилення фактичного значення регульованої величини від заданого незалежно від причин, які викликали це відхилення.

#### 4.3 Функціональна схема системи

Побудуємо функціональну схему САР, к відповідності з напрямком передачі діянь, яка представлена на рис. 4.1.

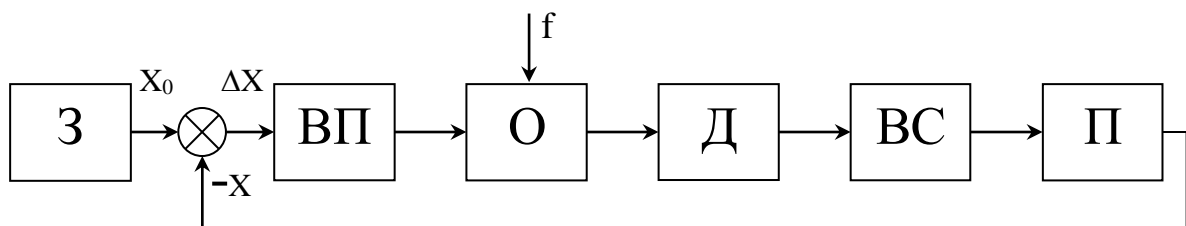


Рисунок 4.1 – Функціональна схема САР температури в зоні розплаву:

ВП – виконавчий пристрій; З – задаючий пристрій; О – об'єкт регулювання; ; ВС – вимірювальна схема; Д – датчик П – підсилювач

#### 4.4 Структурна схема системи

При розробці структурної схеми системи автоматичного регулювання (САР) використовувалися диференціальні рівняння для компонентів схеми, які можна знайти в розділі 4.1. Тепер перейдемо від диференціальних рівнянь для окремих елементів системи до їх передаточних функцій. Передаточна функція

елемента визначається як відношення Лаплас-зображення вихідної величини до Лаплас-зображення вхідної величини за умови нульових початкових умов.

Прирівняємо до нуля збурюючі діяння  $f$ , для отримання передаточної функції об'єкта, так як наша задача – отримати передаточну функцію за керуючим діянням, отже отримаємо диференціальне рівняння об'єкта в такому вигляді:

$$T_0 \left( \frac{d\Theta}{dt} \right) + \Theta = k_0 \mu \quad (4.6)$$

Для отримання передаточних функції елементів схеми застосовано пряме перетворення Лапласа (наведено на кресленні 05.01 в ілюстративному матеріалі):

$T_0 \bar{\Theta} p + \bar{\Theta} = k_0 \bar{\mu}$ , де  $p$  – оператор Лапласа.

$$W_o(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{\Theta}}{\bar{\mu}} = \frac{k_0}{T_0 p + 1} \quad (4.7)$$

Це аперіодична динамічна ланка.

Аналогічним чином отримуємо передаточні функції інших елементів системи:

- вимірювальної схеми:

$$W_{\text{вс}}(p) = \frac{\bar{U}_m}{\bar{\rho}} = k_3 \quad (4.8)$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- підсилювача:

$$W_n(p) = \frac{\bar{X}}{\bar{U}_m} = k_5 \quad (4.9)$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- виконавчого пристрою:

$$W_{\text{ВП}}(p) = \frac{\bar{\mu}}{\Delta \bar{X}} = \frac{k_4}{T_1 p + 1} \quad (4.10)$$

Це аперіодична динамічна ланка;

чутливого елемента:

$$W_o(p) = \frac{\bar{\rho}}{\Theta} = k_2. \quad (4.11)$$

Це підсилювальна динамічна ланка.

Об'єднавши стандартні динамічні елементи відповідно до передачі сигналів, отримаємо структурну схему системи автоматичної стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструзійного агрегату (див. рис. 4.2 і ілюстративний матеріал на рис. 05.02).

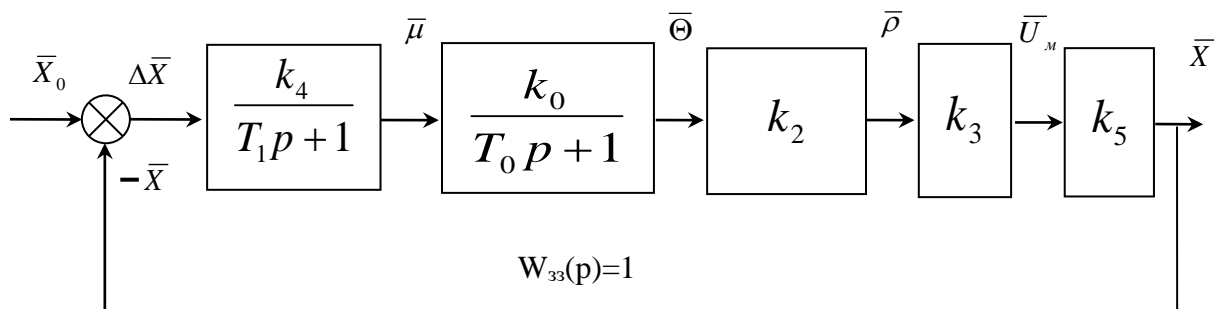


Рисунок 4.2 – Структурна схема розроблюваної системи

#### 4.5 Передаточні функції розімкнутої, замкнутої систем та характеристичне рівняння

Компоненти структурної схеми САР розташовані у послідовності, тому для отримання передаткової функції відкритої системи потрібно перемножити передаткові функції всіх елементів:

$$W_p(p) = W_{ВП}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_d(p) \cdot W_{ВС}(p) \cdot W_{П}(p) = \frac{k_4 k_0 k_2 k_3 k_5}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}$$

Введемо позначення:

$$k = k_4 k_0 k_2 k_3 k_5$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи:

$$W_p(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (4.12)$$

Передаточна функція замкнutoї системи, з врахуванням того, що  $W_{33}(p) = 1$ , розраховується за формулою

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (4.13)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} T_1 T_0 p^2 + (T_1 + T_0) p + 1 + k &= 0. \\ 4320 p^2 + 3601,2 p + 1 + 4320 &= 0. \end{aligned} \quad (4.14)$$

#### 4.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

##### 4.6.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи

Для побудови АФЧХ розімкнутої системи необхідно у передаточній функції провести заміну  $p = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – частота), виділити дійсну частину  $P(\omega)$  і уявну частину  $Q(\omega)$  та, змінюючи частоту від 0 до  $\infty$ , відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned} W_p(j\omega) &= \frac{k}{(T_1 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^2 + (T_1 + T_0)(j\omega) + 1} = \\ &= \frac{k}{-T_1 T_0 \omega^2 + j(T_1 + T_0)\omega + 1} = \frac{k}{(1 - T_1 T_0 \omega^2) + j(T_1 + T_0)\omega} = \\ &= \frac{k((1 - T_1 T_0 \omega^2) - j(T_1 + T_0)\omega)}{(1 - T_1 T_0 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_0)\omega)^2} \end{aligned}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \frac{k(1 - T_1 T_0 \omega^2)}{(1 - T_1 T_0 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_0)\omega)^2} = \frac{4320(1 - 4320 \omega^2)}{(1 - 4320 \omega^2)^2 + (3601,2\omega)^2}; \\ Q(\omega) &= \frac{-k(T_1 + T_0)\omega}{(1 - T_1 T_0 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_0)\omega)^2} = \frac{-4320(3601,2)\omega}{(1 - 4320 \omega^2)^2 + (3601,2\omega)^2}. \end{aligned}$$

Підставляючи значення  $\omega$  в рані вирази, побудуємо графік АФЧХ розімкнутої системи (рис. 4.3, та 05.03 в ілюстративному матеріалі).

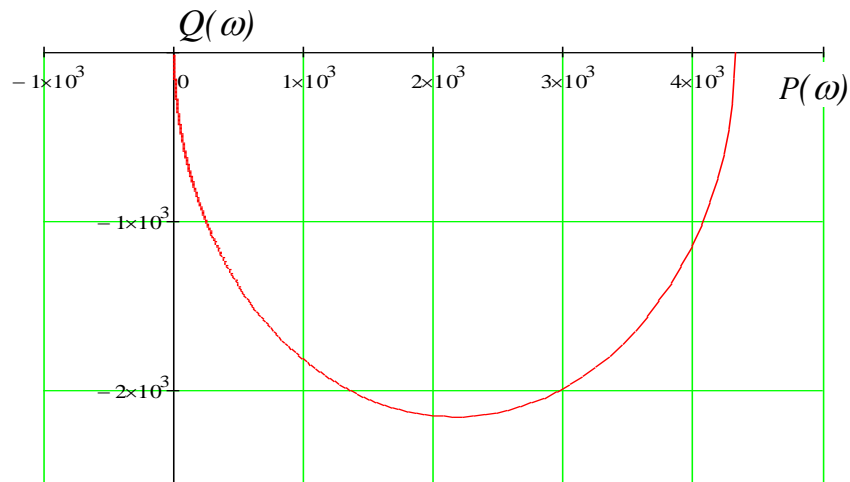


Рисунок 4.3 – АФЧХ розімкнутої системи

#### 4.6.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

Для побудови ЛАЧХ за допомогою асимптотичного методу передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{3600} = 0,0003 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{1,2} = 0,83 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці}.$$

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі (рис. 4.4). Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при  $\omega < \omega_0$  являє собою пряму з нахилом 0 дБ/дек, так як система не містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при  $\omega = 1$  повинна мати ординату, яка дорівнює  $20 \lg k = 72,7$  дБ ( $k = 4320$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Після кожного зі спрягаючих нахилів характеристики, наочені значення змінюються на -20 дБ/дек у порівнянні з попереднім рівнем, оскільки ці частоти відносяться до аперіодичних динамічних ланок першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, які перевищують  $\omega_1$ , має нахил -40 дБ/дек.

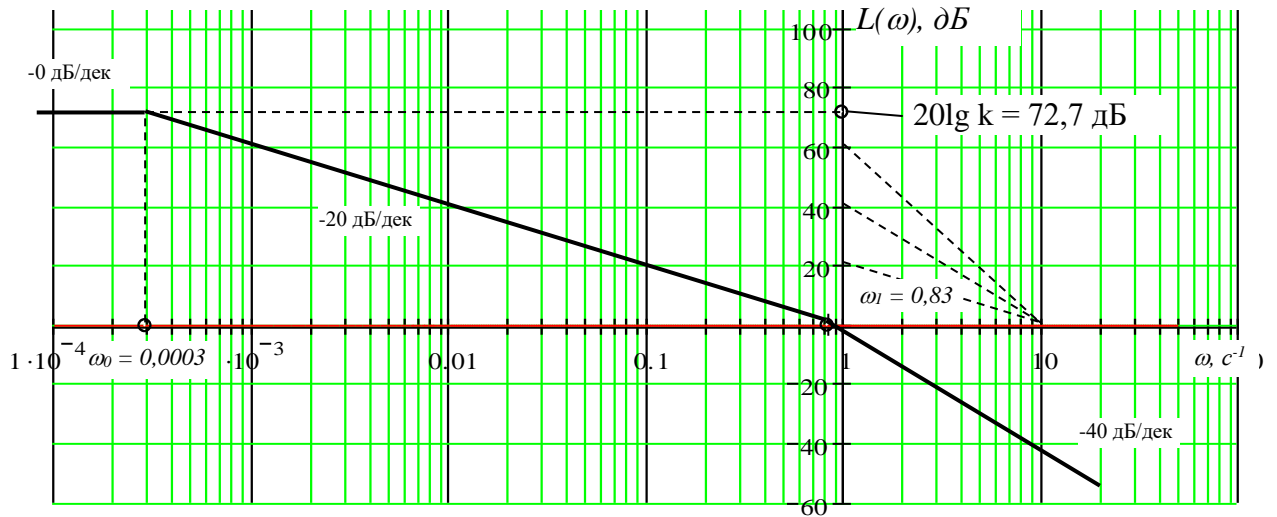


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ розімкнутої системи  $L(\omega)$

#### 4.6.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ (рис. 4.5) одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок:

$$\phi(\omega) = (-\arctg(\omega T_0) - \arctg(\omega T_1)) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.15)$$

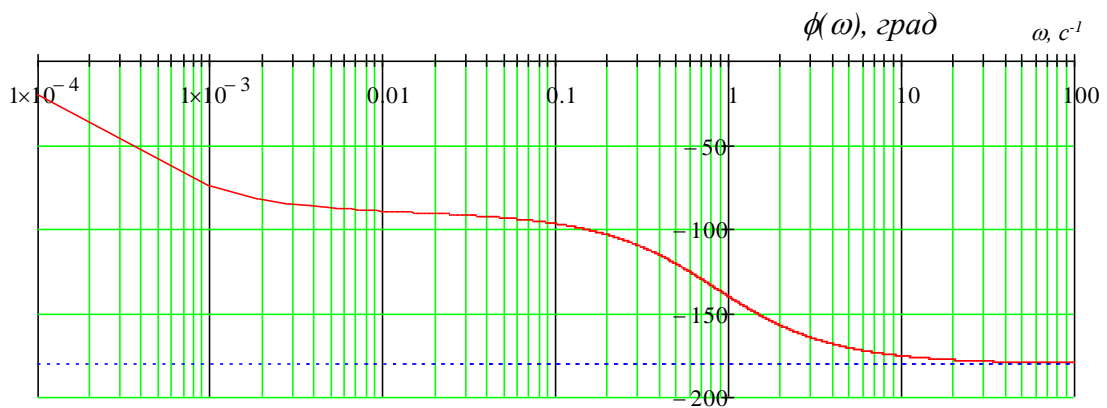


Рисунок 4.5 – ЛФЧХ розімкнутої системи  $\phi(\omega)$

#### 4.7 Побудова дійсної частотної характеристики системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну  $p = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  - частота), та, змінюючи частоту від 0 до  $\infty$ , відкласти відповідні значення  $P_3(\omega)$ :

$$W_3(\omega) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k} = \frac{k}{T_1 T_0 p^2 + (T_1 + T_0)p + 1 + k};$$

Підставимо  $p = j\omega$ , отримаємо:

$$\begin{aligned} W_3(\omega) &= \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^2 + (T_1 + T_0)(j\omega) + 1 + k} = \frac{k}{-T_1 T_0 \omega^2 + j(T_1 + T_0)\omega + 1 + k} = \\ &= \frac{k}{(1 + k - T_1 T_0 \omega^2) + j(T_1 + T_0)\omega} = \frac{k((1 + k - T_1 T_0 \omega^2) - j(T_1 + T_0)\omega)}{(1 + k - T_1 T_0 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_0)\omega)^2} \end{aligned}$$

Виділимо дійсну частину:

$$P_3(\omega) = \frac{k(1 + k - T_1 T_0 \omega^2)}{(1 + k - T_1 T_0 \omega^2)^2 + ((T_1 + T_0)\omega)^2} = \frac{4320(1 + 4320 - 4320\omega^2)}{(1 + 4320 - 4320\omega^2)^2 + (3601,2\omega)^2}.$$

Побудуємо графік дійсної частотної характеристики замкнутої системи (рис. 4.6, та 06.01 в ілюстративному матеріалі).

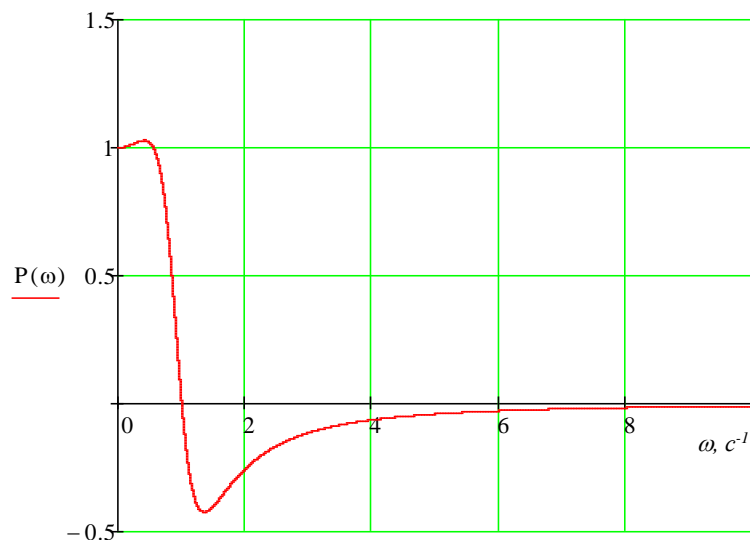


Рисунок 4.6 – Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

## 4.8 Визначення стійкості системи і запасів стійкості

### 4.8.1 Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Стійкість замкненої системи автоматичного регулювання оцінюється за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи, яка відображена на рис. 4.7. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо складається лише з стійких динамічних ланок (з не більше ніж однією інтегруючою ланкою). Якщо розімкнута система автоматичного керування є стійкою, то для стійкості замкненої системи є необхідним і достатнім умовою те, щоб АФХ розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами  $(-1, j0)$  при зміні частоти від  $0$  до  $\infty$ . Побудуємо графік АФЧХ в околі вказаної точки і наведемо коло одиничного радіуса, щоб визначити запаси стійкості за модулем і фазою.

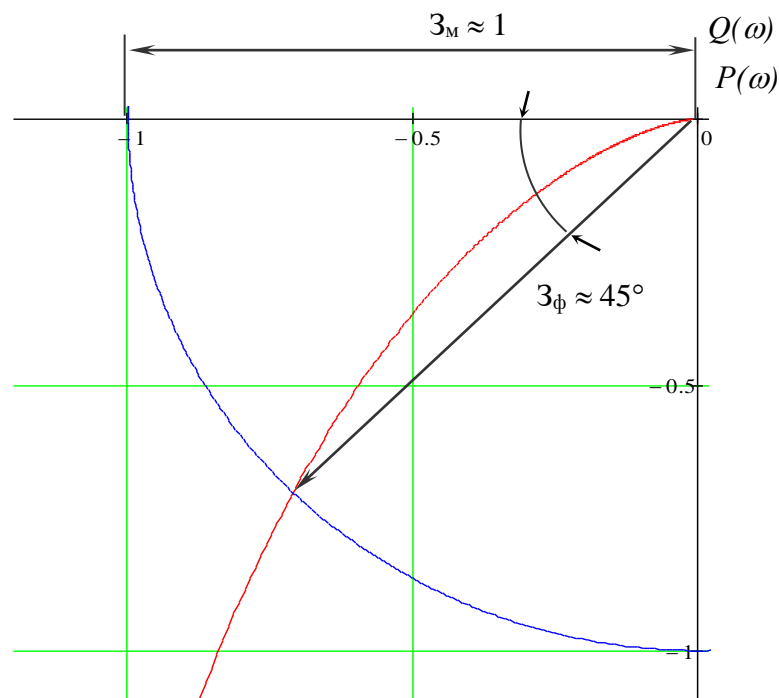


Рисунок 4.7 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Таким чином маємо, за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем  $Z_m \approx 1$ ; за фазою –  $Z_\phi \approx 45^\circ$ .

#### 4.8.2 Дослідження системи на стійкість та побудова кривої D-розбиття в площині одного параметра

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру  $k_5$ , тому що його легко змінювати шляхом підбору коефіцієнту підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 p^2 + (T_1 + T_0) p + 1 + k_4 k_0 k_2 k_3 k_5 = 0.$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно  $k_3$ :

$$K(p) = -\frac{T_1 T_0 p^2 + (T_1 + T_0) p + 1}{k_4 k_0 k_2 k_3}$$

Підставимо  $p = j\omega$  та виділимо дійсну і уявну частини даного виразу:

$$K(\omega) = -\frac{(1 - T_1 T_0 \omega^2) + j(T_1 + T_0)\omega}{k_4 k_0 k_2 k_3} = \frac{(1 - T_1 T_0 \omega^2)}{k_4 k_0 k_2 k_3} + j \frac{(T_1 + T_0)\omega}{k_4 k_0 k_2 k_3}.$$
$$P(\omega) = \frac{(1 - T_1 T_0 \omega^2)}{k_4 k_0 k_2 k_3}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1 + T_0)\omega}{k_4 k_0 k_2 k_3}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру  $k_5$  при зміні частоти від  $-\infty$  до  $+\infty$  (рис. 4.8, та 05.03 в ілюстративному матеріалі).

Оскільки всі корені у стійкій системі знаходяться ліворуч від уявної осі, при подальшому обході від  $-\infty$  до  $+\infty$ , ділянка стійкості також залишається ліворуч від побудованої кривої. Для зручності визначення цієї ділянки можна штрихувати на графіку, прокладаючи штриховану лінію зліва при русі від  $-\infty$  до  $+\infty$ . З отриманої області стійкості можна вивести критичне значення коефіцієнта  $k_5$ . З аналізу графіка видно, що система залишається стійкою при будь-яких фізично можливих значеннях цього коефіцієнта. Очевидно, що задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача  $k_5 = 0,36$  знаходиться в межах області стійкості, тому для подальших розрахунків можна залишити це задане значення параметра.

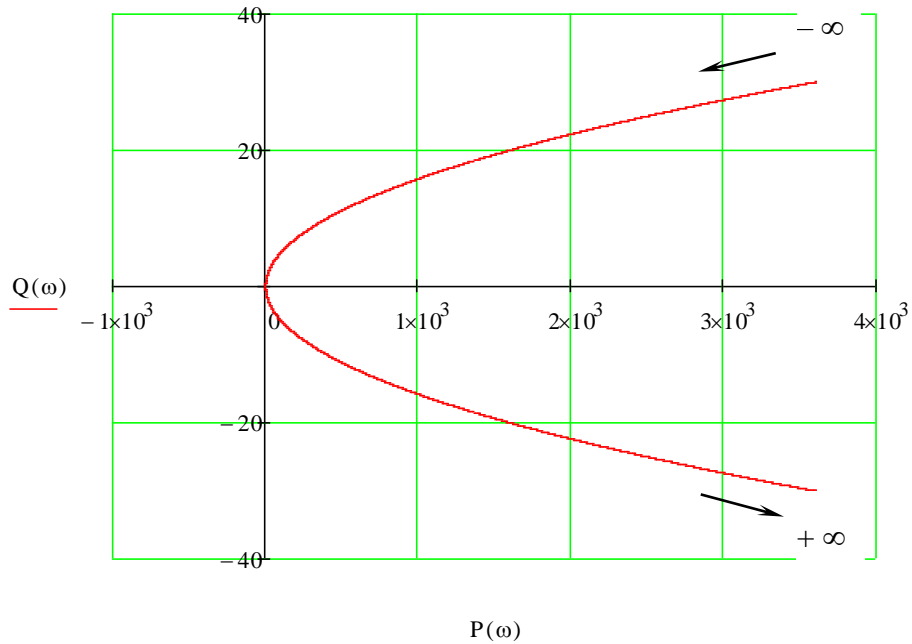


Рисунок 4.8 – D-розбиття в площині параметру  $k_5$

#### 4.9 Оцінка якості регулювання замкнутої системи по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої системи полягає в визначенні запасу стійкості та частоти зрізу. Для визначення цих величин будемо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи, при чому виконуємо їх взаємне розміщення (рис. 4.9, та 05.04 в ілюстративному матеріалі).

З даної побудови можна визначити: частота зрізу  $\omega_z = 0,9 \text{ с}^{-1}$ , звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови,  $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 6,98 \text{ с}$ ; оскільки ЛФЧХ системи перетинає лінію  $-180^\circ$  теоретично в  $\infty$ , можна стверджувати, що запас стійкості по амплітуді  $z_A$  є значним, значно більше 15 дБ; запас стійкості по фазі  $z_\phi \approx 43^\circ$ .

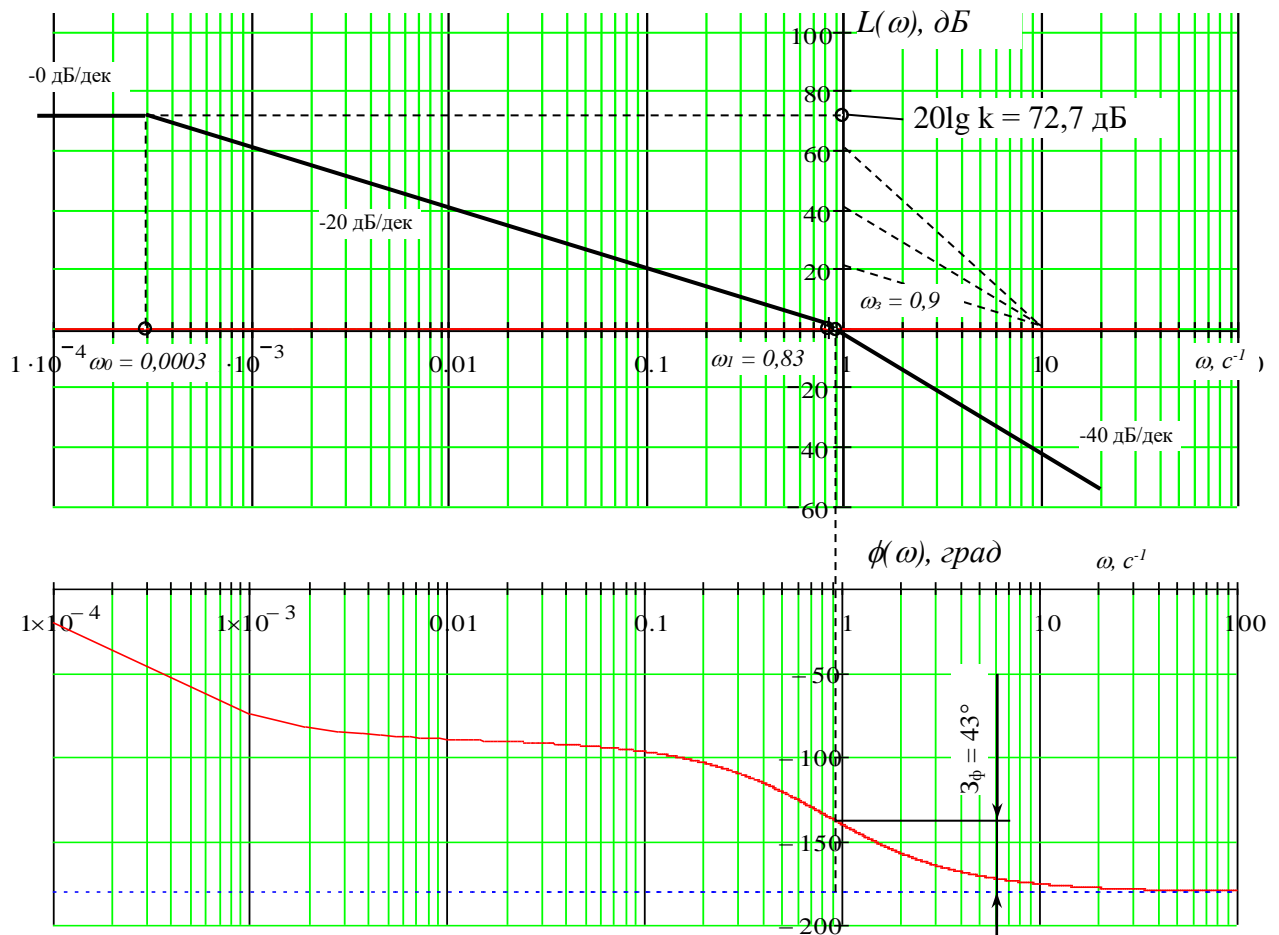


Рисунок 4.9 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

#### 4.10 Побудова перехідного процесу вихідної системи

Регульована величина при подачі на вхід системи одиничного східчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (4.16)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо графік, наведений на рис. 4.10, та 06.01 в ілюстративному матеріалі.

По графіку робимо висновок, що перехідний процес – коливальний, він здійснюється з незмінним періодом коливань.

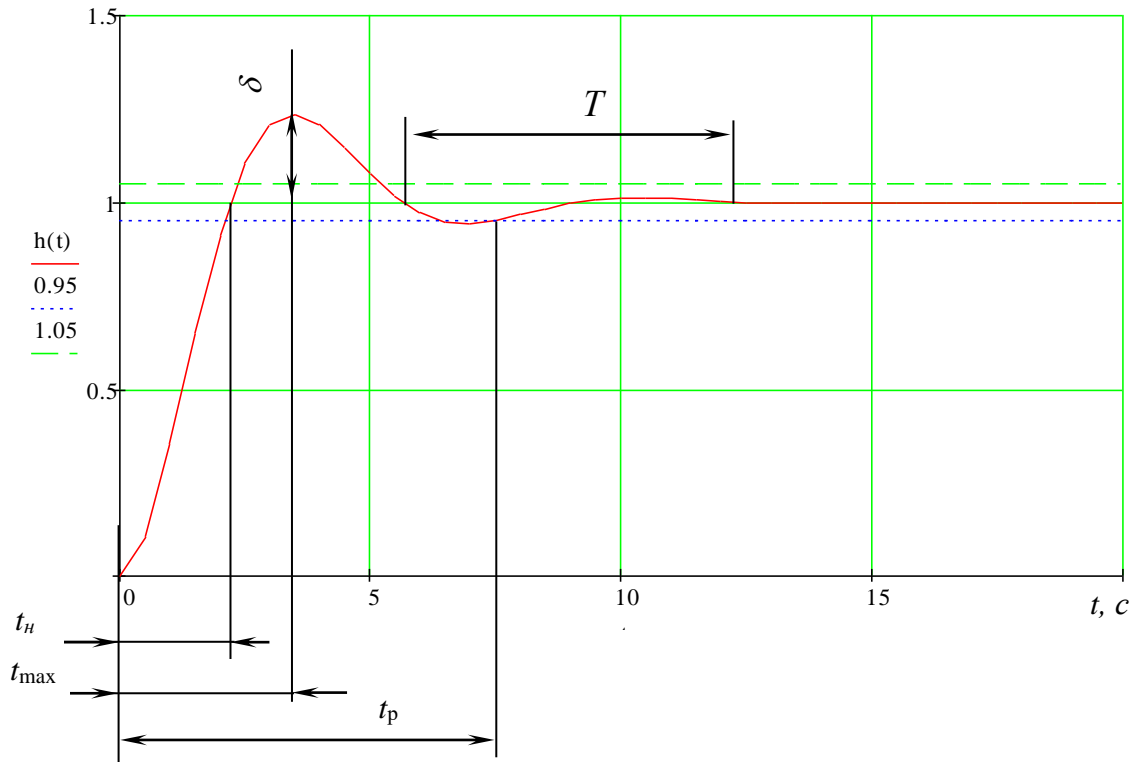


Рисунок 4.10 – Графік перехідного процесу вихідної системи

#### 4.11 Визначення прямих показників якості вихідної системи

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання  $t_p \approx 7,5$  с; як вимога до САР для синтезу коректуючого пристрою, приймається рівним  $t_p = 3$  с;
- частота коливань  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,9$  с<sup>-1</sup>, де  $T = 7$  с – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу  $n = 1$ ;
- час наростання перехідного процесу  $t_n = 2,2$  с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;
- перерегулювання  $\delta = 23,6$  %;
- час досягнення першого максимуму  $t_{\max 1} = 3,5$  с;
- декремент затухання  $d = 18,2$ .

#### 4.12 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкненої оптимальної за швидкодією системи

Вимоги до синтезуємої САР: максимальне перерегулювання  $\delta = 25\%$ ; час регулювання  $t_p = 3$  с; запас стійкості за модулем 15 дБ; за фазою  $30^\circ$ . Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкненої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів.

Побудова в області низьких частот подібна до створення логарифмічної амплітудної частотної характеристики сталої системи. Це означає проведення асимптоти з нахилом  $-20$  дБ/дек через точку із координатами  $20 \lg k = 72,7$  дБ.

Створення в області середніх частот представляє собою ключову асимптоту (зображено на рисунку 06.02 в ілюстративному матеріалі). У цьому діапазоні ЛАЧХ визначається конкретними значеннями перерегулювання та тривалості перехідного процесу. З огляду на наближеність реального процесу до оптимального (з точки зору швидкодії), нахил середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається  $-20$  дБ/дек. Визначення частоти зрізу (тобто тієї, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот), проводиться на основі нерівності . Для того, щоб відповідати вимогам до якості системи, необхідно, щоб було менше за частоту зрізу , яка визначається за максимальним прискоренням координати та значенням керуючого ступінчастого сигналу. Крім того, ця частота повинна бути більше , яку визначає задане значення максимального перерегулювання та тривалість регулювання  $t_p$ . По заданому значенню  $\delta_m$  за допомогою кривої  $\delta = f(P_{z_{\max}})$  номограми визначаємо відповідне значення  $P_{z_{\max}}$ . Потім по значенню  $P_{z_{\max}}$  за допомогою кривої  $t_p = f(P_{z_{\max}})$  визначаємо значення  $\frac{3\pi}{t_p}$ . Цю величину прирівнюємо до заданого значення  $t_p = 3$  с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу  $\omega_{z_{\min}} = 3,14$  с<sup>-1</sup>.

Вибрану частоту зрізу  $\omega_3 = 5 \text{ c}^{-1}$ , наносимо на графік (рис. 4.11). Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку  $\omega_3$  на осі абсцис з нахилом  $-20 \text{ дБ/дек}$ .

По відомому значенню  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення  $P_{\text{зmin}}$ , використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики  $P_{\text{зmin}} = 1 - P_{\text{зmax}} = -0,2$ .

Щоб забезпечити необхідний запас стійкості системи як по амплітуді, так і по фазі, потрібно продовжити середньочастотну асимптоту як ліворуч, так і праворуч на певну величину. Запаси стійкості визначаються за допомогою номограм  $L(\omega) = f(\varphi)$ , де  $P_3$  є константою, а саме - значенням дійсної частотної характеристики замкненої системи. Таким чином, на номограмі знаходимо лінії, що відповідають  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  та  $P_{\text{зmin}} = -0,2$ . Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді можна визначити, провівши горизонтальні дотичні до цих кривих і вимірявши відповідні величини на осі ординат:  $L1 = 15 \text{ дБ}$  та  $L2 = -15 \text{ дБ}$ . Це означає, що треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч до відповідних значень  $L1$  та  $L2$  перед з'єднанням з сусідніми ділянками. З метою спрощення конструкції коректуючого пристрою планується трошки збільшити коефіцієнт підсилення  $k_5$  до 1,5, що, проте, не призведе до втрати стійкості системи. Таким чином, отримаємо загальний коефіцієнт підсилення системи  $k = 18000$ , що відповідає  $20 \lg k = 85 \text{ дБ}$ .

Запас стійкості по фазі  $\gamma$  знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  і  $P_{\text{зmin}} = -0,2$  і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії  $-180^\circ$ . В даному випадку  $\gamma = 45^\circ$  [22], [23].

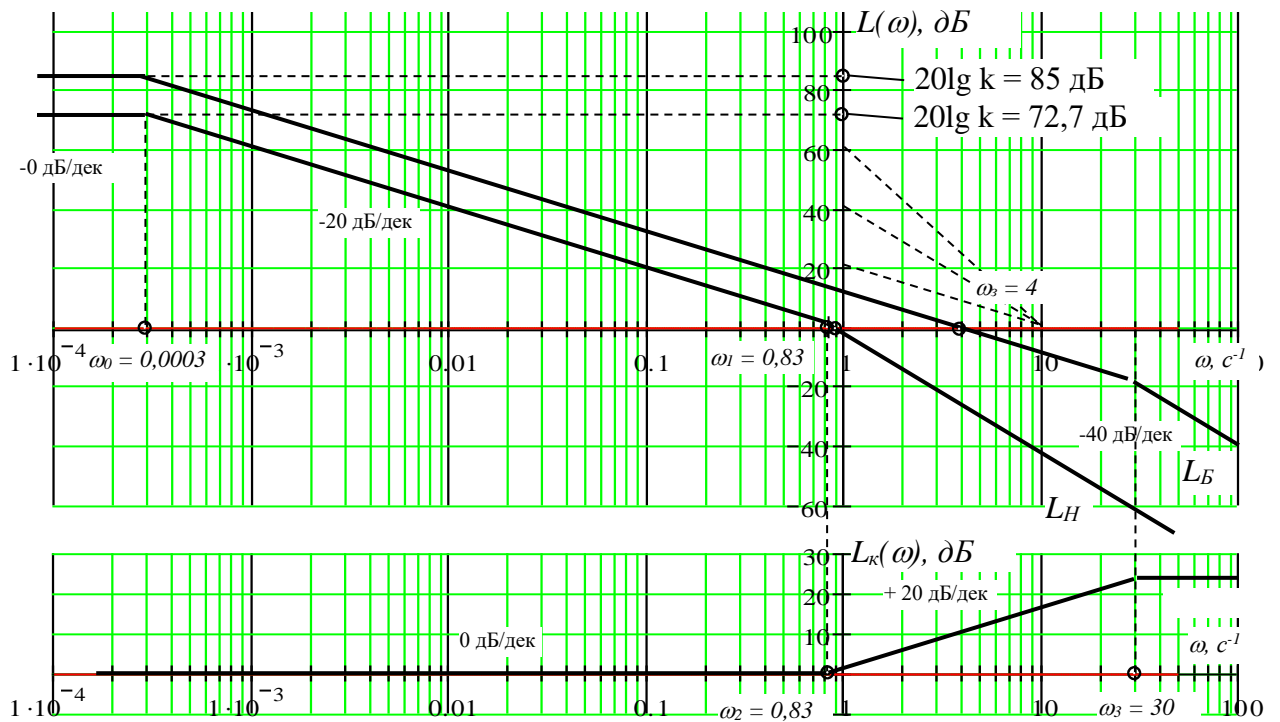


Рисунок 4.11 – Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи

#### 4.13 Синтез коректуючого пристрою системи

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ  $L_k(\omega) = L_b(\omega) - L_n(\omega)$  (рис. 4.11, та 06.02 в ілюстративному матеріалі). За виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою обираємо схему коректуючого пристрою (рис. 4.12 [18]).

Передаточна функція такого чотиріполюсника у загальному вигляді:

$$W_{kn}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)}$$

де  $T_2 = 1/\omega_2 = 1/0,83 = 1,2$  с;

$T_3 = 1/\omega_3 = 1/30 = 0,033$  с.

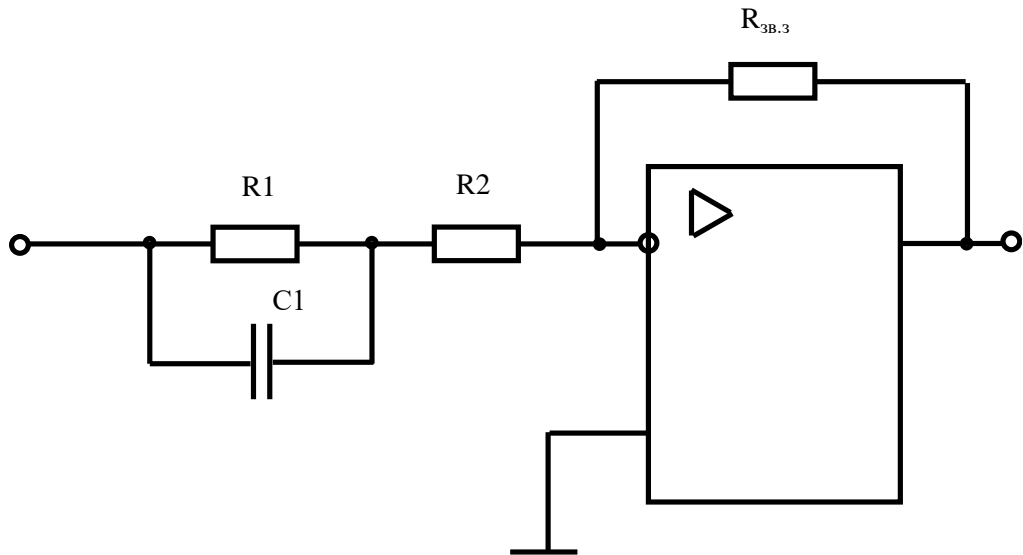


Рисунок 4.12 – Схема коректуючого пристрою

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу, матимемо передаточну функцію коректуючого пристрою:

$$W_{kn}(p) = \frac{1 \cdot (1,2p + 1)}{(0,033p + 1)}$$

Обчислюємо параметри  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C$  схеми коректуючої ланки за допомогою формул [1]:

$$k = \frac{R_2}{R_2 + R_1}; T_2 = R_1 C; T_3 = k \cdot T_4 = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавшись  $C = 2 \times 10^{-6} = 2$  мкФ, отримано такі значення опорів:

$$R_1 = T_2 / C = 1,2 / 2 \times 10^{-6} = 0,6 \times 10^6 = 600 \text{ кОм.}$$

Далі, через те, що  $k = T_3 / T_2 = 0,033 / 1,2 = 0,0275$  і  $k = \frac{R_2}{R_2 + R_1}$ ,

$$R_2 = \frac{k R_1}{1 - k} = \frac{0,0275 \cdot 0,6 \times 10^6}{1 - 0,0275} = 16,97 \times 10^3 \approx 17 \text{ кОм.}$$

Вибираємо номінали резисторів зі стандартного ряду опорів  $R_1 = 620$  кОм,  $R_2 = 18$  кОм.

Вибрана коректуюча ланка є активним чотириполюсником. Для забезпечення  $k_k = 1$  необхідно прийняти  $R_{зв.3} = R_1 + R_2 = 638 \text{ МОм}$ , приймемо зі стандартного ряду опорів  $R_{зв.3} = 620 \text{ кОм}$ .

#### 4.14 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої системи

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (4.17)$$

Провівши заміну  $p = j\omega$ , виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики (рис. 4.13):

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot (1 + k - (T_0 T_1 + T_0 T_3 + T_1 T_3) \omega^2) + k T_2 \omega (-T_1 T_0 T_3 \omega^3 + (T_0 + T_1 + T_3) \omega + k T_2 \omega)}{(1 + k - (T_0 T_1 + T_0 T_3 + T_1 T_3) \omega^2)^2 + (-T_1 T_0 T_3 \omega^3 + (T_0 + T_1 + T_3) \omega + k T_2 \omega)^2}$$

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР температури розплаву екструдера (рис. 4.14, та 06.03 в ілюстративному матеріалі).

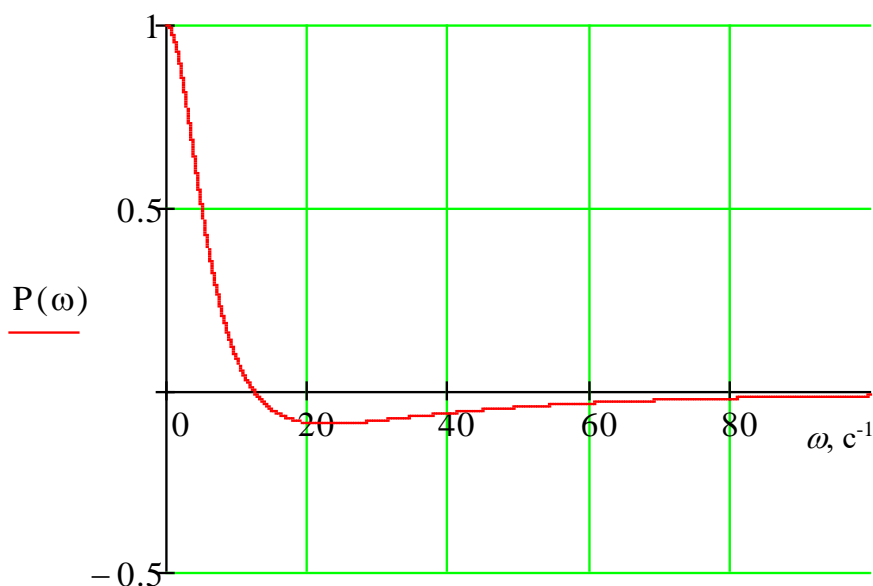


Рисунок 4.13 – Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

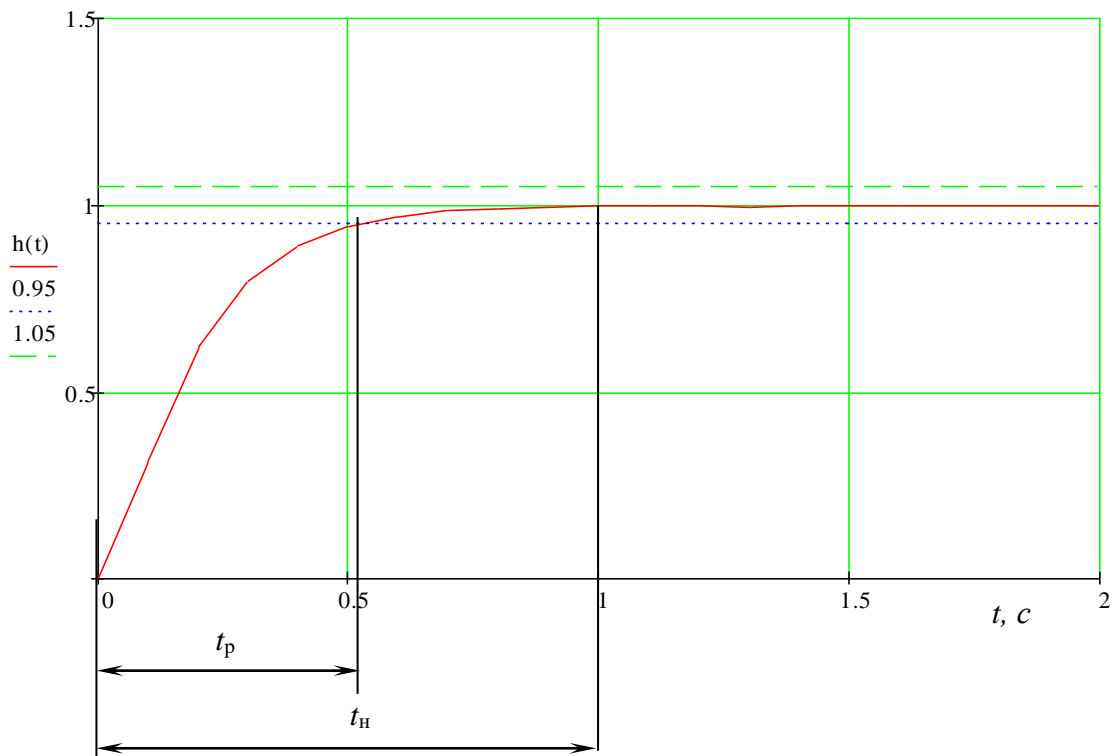


Рисунок 4.14 – Крива перехідного процесу синтезованої САР температури розплаву екструдера

#### 4.15 Визначення прямих показників якості синтезованої системи

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- перерегулювання  $\delta = 0 \%$ ;
- час наростання перехідного процесу  $t_H = 1 \text{ c}$ ;
- по вигляду кривої цей перехідний процес монотонний;
- час регулювання  $t_p = 0,52 \text{ c}$ .

Отже, використання отриманого виразу для передаточної функції коректуючого пристрою та включення його до основного контуру системи буде мати позитивний вплив на показники якості системи. Цей вплив забезпечить навіть кращі результати, ніж ті, які були вказані у вихідних вимогах. Це підтверджується порівнянням графіків перехідних процесів для вихідної та скорегованої систем.

## 5 ОПИС РОБІТ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЄЮ СИСТЕМИ

### 5.1 Особливості монтажу обладнання

Фундамент для екструдера, зі звичайною цегляною облицюванням, зазвичай підготовлюється будівельною організацією. Однак перед початком кладки фундаменту йому проводиться технічний огляд для перевірки відповідності виконання проекту згідно з кресленнями. Після такого огляду та перевірки складається акт про його прийняття та акт на приховані роботи, пов'язані з будівництвом фундаменту.

При виконанні робіт на діючому підприємстві монтажний майданчик зачіплюється дерев'яними щитами на висоту, необхідну для конструкції екструдера. Розмітка габаритів екструдера перед початком монтажу виконується згідно з робочими кресленнями, використовуючи відмітки-репери, які нанесені на колони або стіни будівлі. Для цього навколо фундаменту встановлюється рівнювальна конструкція із стійок і дошок, товщина яких становить не менше 25 мм. Висота цієї конструкції залежить від висоти обладнання та будівлі і коливається від 3,5 до 5 метрів.

Усі виміри висоти екструдера визначаються від поверхні чистої підлоги, причому відмітки розмірів закріплюються на найближчих колонах або стінах будівлі та зберігаються до завершення повного монтажу. Після цього проводиться збірка екструдера.

Перед розпочатком монтажу всі деталі та вузли проходять ретельний зовнішній огляд для перевірки комплектності, наявності паспортів та іншої технічної документації, а також для виявлення будь-яких видимих дефектів чи поломок. Здійснюється особливо уважний огляд та приймання комунікацій. Перевіряються клейма заводу-виготівника та дата виготовлення складових комплектуючих. Перед початком монтажу всі металеві частини екструдера піддаються очищенню від іржі, випрямляються погнуті місця, а конвеєрні

ланцюги, ролики та шарикопідшипники промиваються гасом. Ланцюгові блоки та зірочки перевіряються на відповідність зубів та роликів ланцюга для усунення дефектів механічної обробки. Редуктори приводів розкривають, очищають від мастила, після чого збирають і заповнюють машинним маслом. Змащення та чищення механізмів екструдера проводиться під час його зупинки.

Перед встановленням на місце проводиться уважна перевірка та порівняння довжин та кривизни направляючих, а також перевіряється наявність отворів для болтів у них. Монтаж валів, підшипників та натяжних механізмів виконується в точному відповідності з осьовими лініями валів.

Інструкції з техніки безпеки та обслуговування розробляються для кожного типу екструдера і враховують його конструктивні особливості. До проведення робіт з обслуговування екструдерів допускаються особи обох статей, які досягли 18-річного віку та успішно склали іспити з "Правил безпеки". Результати перевірки фіксуються у протоколах, на підставі яких видаються відповідні посвідчення.

## 5.2 Поведінка персоналу на робочому місці

Приміщення обладнано засобами пожежогасіння та протипожежним інвентарем, розташованими на видному місці і вільному від захаращень. При довготривалій зупинці екструдера (під час ремонту) та перевірці його електроустаткування здійснюється відключення від електромережі. Обслуговуючий персонал несе відповідальність за пошкодження та аварії, які можуть виникнути внаслідок невиконання встановлених інструкцій і правил безпеки. Тривалість запуску та зупинки обладнання реєструється в змінному журналі. Члени обслуговуючого персоналу екструдера повинні мати знання загальних правил техніки безпеки, діючих на підприємстві.

### 5.3 Особливості обслуговування обладнання екструдерів

Пуск екструдера може відбутися лише після завершення повних монтажних та налагоджувальних процесів, які підтверджені актами ревізії обладнання і приладів відповідно до Контрольно-вимірювальних протоколів. Перед першим включенням та при тривалих зупинках необхідно ретельно очистити черв'як, корпус, ґрати і формуючу головку від залишків термопластів (за винятком поліолефінів, які можуть бути перезапущені без попереднього очищення робочих органів), які раніше оброблялися. Перед початком роботи обслуговуючий персонал повинен перевірити наявність сторонніх предметів у шнековій камері, налагодження захисних огорожень на приводах екструдера, а також справність основного обладнання і механізмів.

Запуск екструдера слід виконувати лише після досягнення заданих температур у зонах корпусу та головки, а також утримання при цих температурах протягом 25-30 хвилин для повного прогрівання головки та черв'яка. Початково екструдер включають на мінімальній швидкості обертання черв'яка (5-8 обертів за хвилину) при періодичному (інтервальному) живленні. Після виявлення розплавленого матеріалу з головки поступово підвищують швидкість обертання черв'яка до встановленого значення і повністю відкривають шибер бункера. Порушення цього принципу може спричинити перевантаження та поломку екструдера (розрив болтів кріплення головки, пошкодження опорного підшипника, ушкодження внутрішньої поверхні корпусу).

У разі виявлення термодеструкції полімеру під час запуску або роботи екструдера, необхідно негайно вилучити розкладений полімер, одночасно знижуючи температури в зонах дозування та головки і збільшуючи частоту обертання черв'яка. У випадку, якщо ці заходи не призводять до бажаного ефекту, слід припинити подачу матеріалу, через 1-2 хвилини зупинити роботу екструдера, вимкнути обігрів, активувати систему охолодження у всіх зонах, від'єднати головку, дотримуючись всіх заходів безпеки. Під час розкладання

галогеновмісних полімерів оператор, від'єднуючи головку, повинен надіти захисний протигаз і перебувати вбік від каналів, через які виливається полімер з головки та корпусу екструдера, щоб уникнути впливу газів і парів кислот або інших продуктів розкладання.

Під час експлуатації екструдера важливо періодично перевіряти всі тепловантажені з'єднання, які можуть розслабитися через коливання температури. У випадку виявлення дефектів, таких як стукіт та зайвий шум під час роботи екструдера, слід негайно призупинити його роботу та усунути несправності. Включення обертання черв'яка без наповнення матеріалом допускається лише при мінімальних частотах на короткий час під час достатньої подачі графітованої мастила в циліндр корпусу. Невиконання цього правила може призвести до блокування та поломки черв'яків.

Під час експлуатації екструзійних агрегатів необхідно забезпечувати належну чистоту робочого приміщення, щоб уникнути забруднення матеріалу, що піддається обробці, і особливо уникати потрапляння металевих включень. Очищення обладнання слід проводити негайно після завершення роботи, поки воно ще не остигло нижче за температуру плавлення термопласту більше, ніж на 5-10 °С.

Регулярно ремонтують екструдери у відділах ремонтно-механічних цехів заводів, які використовують екструзійне обладнання. Зазвичай відновлюють черв'яки за допомогою плазмового наплавлення гребенів, а потім проводять їх шліфування. Ремонт електротехнічних засобів і приладів КВП здійснюється в спеціалізованих сервісних службах.

Експлуатацію екструзійного обладнання можна розпочати лише при наявності письмового свідоцтва інспекції з техніки безпеки, яке підтверджує справність всіх пристроїв безпеки та захисних засобів, а також належної роботи систем вентиляції у приміщенні та витяжки над головою. З метою уникнення можливого враження обслуговуючого персоналу електричним струмом, шафи електроприводу, теплової автоматики та сам екструдер повинні бути заземлені.

## ВИСНОВКИ

Метою цієї випускної кваліфікаційної роботи було вдосконалення організації виробничого процесу, спрямоване на створення системи автоматичної стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструзійного агрегату для підвищення точності регулювання та, відповідно, зменшення відходів на завершальному етапі виробництва. Крім того, робота спрямована на поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу.

Під час виконання проекту проведено всебічний аналіз виробничого процесу стосовно виготовлення профільних виробів із термопластів. У рамках цього огляду розглянуте обладнання та системи контролю якості виробництва на підприємствах даного галузі промисловості.

Здійснено аналіз існуючих рішень та обґрунтування вибору прийнятого принципу побудови системи, проведено технічний опис об'єкта. Також розглянуті рекомендації щодо експлуатації екструзійного обладнання та процедура монтажу та підготовки до роботи.

Крім аналізу екструдера, було вивчено інше стандартне обладнання, проведено опис схеми регулювання температури головки екструдера. Вирішено розробляти цю систему на основі мікроконтролера з родини Atmega. Розроблені функціональна та структурна схеми системи. Визначені передаточні функції відкритої та закритої систем, а також характеристичне рівняння закритої системи. Проведено побудову АЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ відкритої системи для визначення стійкості за частотним критерієм Найквіста-Михайлова і запасів стійкості. Окремо визначено область стійкості методом D-розбиття в площині одного параметра. За допомогою ЛАЧХ та ЛФЧХ відкритої системи проведено оцінку якості регулювання закритої системи автоматичного регулювання.

Розроблено перехідний процес для закритої системи та визначено основні показники її якості. Зафіксовано час реакції системи як один із критеріїв її синтезу. Створено бажану логарифмічну амплітудно-частотну характеристику для відкритої оптимальної системи з урахуванням поставлених вимог. Виконано

синтез корекційного пристрою для системи автоматичного регулювання, враховуючи логарифмічні частотні характеристики. Побудовано криву перехідного процесу для синтезованої системи автоматичного регулювання та визначено ключові показники якості, що відповідають вимогам, поставленим перед нею.

Під час роботи над проектом було виконано опис організаційних заходів, пов'язаних із встановленням та експлуатацією обладнання.

В розділі, присвяченому охороні праці, розглянута законодавча база та нормативні документи, що стосуються охорони праці в Україні. Проведено аналіз шкідливих та небезпечних факторів, які впливають на персонал, та визначено заходи для зменшення (усунення) впливу цих факторів. У розрахунковій частині цього розділу виконано розрахунок штучного освітлення за методом використання коефіцієнта використання світлового потоку.

## Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

БЖ – блок живлення;

МК – мікроконтролер;

ПЗП – постійний запам'ятовуючий пристрій;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

НДДКР – науково-дослідна та дослідно-конструкторська робота;

ФЧХ – фазова частотна характеристика;

ЛФЧХ – логарифмічна фазова частотна характеристика;

ОЗП – оперативний запам'ятовуючий пристрій;

АЧХ – амплітудна частотна характеристика;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

ПК – персональний комп'ютер;

АЛП – арифметико-логічний пристрій;

БП – блок підсилювачів;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

МП – мікропроцесор.

## Список літератури

1. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин. ч.1. - Київ: "Вища школа", 1993. – 320 с.
2. Расчёт измерительных и усилительных элементов автоматических систем (справочное пособие) Н.М. Чумаков, А.Э. Асланян, М.Г. Вайнер, В.И. Панов, Н.С. Сивов, О.К. Спасокукоцкий, А.И. Суд-Злочевский, В.П. Теплов, И.И. Чугунов. «Техника», 1971, 356 стр.
3. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів: навч. посіб. / І.О. Мікульонок, О.Л. Сокольський, В.І. Сівецький, Л.Б. Радченко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
4. Мікульонок І.О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І.О. Мікульонок. — К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. — 265 с.
5. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії : монографія / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.
6. Танатор А. И. Элементы промышленной автоматике и их динамические свойства. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.
7. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 337 с.
8. Мікульонок І. О. Переробка вторинної сировини екструзією: монографія / І.О. Мікульонок, Л.Б. Радченко. — К.: ІВЦ «Вид-во „Політехніка”», 2006. — 184 с.
9. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
10. Гончар В.Ф., Тищенко Л.П. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. – К.: Вища школа, 1989. – 343 с.

11. Жулай Є.Л. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній. – К., 2002.

12. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.

13. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління : навч. посіб. для студ. ВНЗ / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, В.В. Іващук; Нац. ун-т харч. технологій. - К. : НУХТ, 2010. - 195 с.

14. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. - Киев: “Наукова думка”, 1981. – 940 с.