

Міністерство освіти і науки України
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

« ____ » _____ 2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА за ступенем вищої освіти «Бакалавр»

на тему:

**«Модернізація системи регулювання температури
заготовок в технологічному процесі виробництва
алюмінієвого профілю»**

**«Modernisation of the billet temperature control system
in the aluminium profile production process»**

Виконав студент IV курсу групи АК-20
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ М.А. Шилов

« ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи

доц, канд. техн. наук

_____ С.П. Плешков

« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент _____

« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Характеристика автоматизації процесу виробництва алюмінієвого профілю.....	6
1.1 Опис технології виробництва алюмінієвого профілю.....	6
1.2 Опис режимів роботи устаткування при виробництві алюмінієвих профілів.....	6
1.3 Аналіз процесу пресування профілів.....	13
2 Аналіз шляхів побудови системи.....	18
2.1 Особливості існуючої системи керування.....	18
2.2 Вимоги до якості і структури поверхні профілів.....	18
2.3 Критичний аналіз існуючої системи керування.....	20
2.4 Вимоги до системи керування і керованих параметрів.....	21
3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень.....	25
3.1 Аналіз процесу як об'єкту управління.....	25
3.2 Функціональна схема системи.....	28
3.3 Аналіз і вибір методу управління процесом нагріву заготовки.....	28
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність виробу.....	31
4.1. Побудова частотних характеристик розімкнутої системи.....	31
4.1.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи.....	31
4.1.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.....	32
4.1.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.....	33
4.2 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи.....	33
4.3 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості.....	34
4.3.1 Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца.....	34

4.3.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.....	35
4.3.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра.....	36
4.4 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.....	37
4.5 Побудова перехідного процесу вихідної системи.....	39
4.6 Визначення прямих показників якості вихідної системи.....	40
4.7 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.....	41
4.8 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками.....	43
4.9 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР.....	45
4.10 Визначення прямих показників якості синтезованої САР.....	46
5 Розробка схем автоматизації технологічного процесу	47
5.1 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	47
5.2 Розробка принципових схем системи.....	49
5.3 Обґрунтування вибору контролера.....	53
5.4 Розробка схем з'єднань і підключення зовнішніх електричних проводок.....	57
Висновки.....	59
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів.....	60
Список літератури.....	61

ВСТУП

З 2018 року світове споживання первинного алюмінію зросло на 5,5 % порівняно з 2017 роком, досягнувши 59,7 млн. тон. Прогнозується, що щорічний приріст споживання алюмінію залишатиметься на рівні 4-6% протягом наступних 5-7 років. Найбільшими споживачами алюмінію є транспортна і будівельна галузі. Експерти вважають, що саме транспортна галузь буде основним двигуном зростання попиту на алюміній у найближчі роки, причому автомобілебудування відіграє ключову роль. Кількість алюмінію, що використовується в автомобілях, постійно зростає: якщо 10 років тому на один автомобіль припадало близько 90-100 кг алюмінію, то зараз цей показник збільшився до 160 кг, і до 2025 року очікується, що він досягне щонайменше 250 кг на автомобіль.

Збільшення використання алюмінію в будівництві буде зумовлено поширенням стандартів "зеленого будівництва" та енергозберігаючих технологій. В Україні намагаються йти в ногу зі світовими тенденціями, але це вдається не завжди і не всім через як об'єктивні, так і суб'єктивні причини.

Одним із найбільш популярних видів продукції з алюмінію в країні є алюмінієвий профіль, який виробляють українські підприємства. За оцінками деяких фахівців, у 2020 році обсяг споживання алюмінієвих профілів в Україні становив близько 6-8 тис. тон. Водночас обсяг виробництва вітчизняних підприємств перевищить попит на внутрішньому ринку, тому частину найконкурентоздатнішої продукції буде експортовано. При цьому здійснюється імпорту профілів, головним чином з Туреччини та Китаю.

Згідно з опитуванням учасників ринку, трійка провідних виробників алюмінієвого профілю у 2023 році включає: Броварський алюмінієвий завод (група компаній ALUMETA), Групу компаній "АМТТ" та Алюпол (Група "Кенти С.А.").

Розробка та впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами є ключовою тенденцією розвитку сучасного промислового виробництва. Основні цілі автоматизації включають підвищення

ефективності та продуктивності праці, покращення якості продукції, оптимізацію планування та управління, а також звільнення людей від роботи в шкідливих умовах.

Автоматизація покращує ключові показники ефективності виробництва: збільшує обсяги випуску, покращує якість продукції, знижує її собівартість і підвищує продуктивність праці. Впровадження автоматичних пристроїв забезпечує високу якість продукції, скорочує кількість браку і відходів, зменшує витрати на сировину та енергію, знижує чисельність основних робітників, зменшує капітальні витрати на будівництво будівель (виробництво можна організувати просто неба), та продовжує терміни міжремонтного обслуговування обладнання.

Комплексна автоматизація процесів у хімічній технології передбачає не лише автоматичне забезпечення нормального ходу цих процесів за допомогою різних автоматичних пристроїв (контролю, регулювання, сигналізації тощо), але й автоматичне управління запуском і зупинкою апаратів для ремонтних робіт у критичних ситуаціях.

У бакалаврській роботі досліджується удосконалення процесу виготовлення алюмінієвих профілів. Потреба у модернізації впливає з необхідності більш точного контролю процесу нагрівання заготовок у контейнері та зменшення впливу зовнішніх факторів на цей процес.

У розділах роботи проводиться аналіз систем автоматизації у процесі виробництва алюмінієвих профілів; розробляється математична модель для управління процесом; виконується синтез автоматичної системи управління; розробляються схеми автоматизації процесу синтезу; визначаються заходи з монтажу, експлуатації та діагностики; а також вивчаються можливості енерго- і ресурсозбереження.

У графічному викладі бакалаврської роботи демонструються: схеми автоматизації; ключові розрахункові взаємозв'язки математичної моделі процесу; та синтез проекрованої системи управління.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВОГО ПРОФІЛЮ

1.1 Опис технології виробництва алюмінієвого профілю

Для проведення досліджень в якості базового об'єкта пропонується використати Броварський алюмінієвий завод. Зараз підприємство розробляє і виробляє широкий спектр алюмінієвих профілів під брендом "АЛТ", призначених для сонцезахисних і антимоскітних систем, а також для світлопрозорих і захисних конструкцій. Завод має великі виробничі потужності і технологічні можливості для виготовлення та постачання екструдованих алюмінієвих профілів згідно з вимогами замовників, що має велике значення для втілення у життя унікальних архітектурних концепцій.

Профілі серії АЛТ120 виготовляються з використанням сплавів EN AW - 6060, EN AW - 6063, АД31, АД0, і виготовлені з первинного алюмінію марки А7. Власне виробництво дозволяє більш гнучко відповідати на запити замовників, враховувати їхні унікальні вимоги до кожного виробу, та виконувати навіть нестандартні замовлення у найкоротші терміни.

Виробництво профілів у цьому цеху розпочинається з транспортування зливків. Доставка зливків з ливарного цеху здійснюється автомобільним транспортом, а внутрішнє переміщення у цеху - за допомогою мостового крана з вантажопідйомністю 10 тон.

Після перевірки якості поверхні зливків, їх піддають нагріванню в газовій печі до температури 480 - 500 °С, а потім вони розрізаються на відповідні довжини. Після нагріву вони піддаються пресуванню на гідравлічному пресі зусиллям 1800 МН.

Після виходу з пресу, профіль подається в губки візка лінії натягнення за допомогою попереднього механізму підйому, розташованого на пересувній платформі. Потім він переміщується до упору, розташованого на визначеній

відстані відповідно до довжини профілю. Наступний етап - передача профілю з приймального столу на кроковий поперечний транспортер, який виступає в ролі холодильника, охолоджуючи виріб до 30 °С. Для охолодження профілю вздовж вихідної лінії пресу встановлені вентилятори.

Охолоджений профіль надходить на лінію правильно-розтяжної машини, де застосовується зусилля в 1 МН. Виправлений профіль потрапляє на лінію для різання, де його переміщують до дискової пили. Після розрізання профіль проходить контрольну перевірку, після чого він укладається в кошик. Кошик із профілем подається на наступний етап - термічну обробку.

1.2 Опис режимів роботи устаткування при виробництві алюмінієвих профілів

Процес виробництва профілів з алюмінієвого сплаву АД31 включає такі етапи [1]: транспортування зливків; нагрівання зливків; формування за допомогою вирубки; пресування; термічна обробка для загартування.

1. Виготовлення заготівок

Зливки литтю виробляють за напівбезперервним методом у водоохолоджуваний кристалізатор у формі стовпів довжиною 5-6 метрів. Після цього зливки (стовпи) мають нерівну поверхню з різними забрудненнями та надлишками матеріалу. Для видалення неякісностей з поверхні зливки проводиться її обточування та гомогенізація.

Отримані зливки мають відповідати стандартам, які встановлені вимогами [2]. Після обробки поверхня зливків повинна бути добре очищеною. На ній не повинно бути раковин, тріщин, надривів, шлакових інклюзій та інших неметалічних домішок. Шорсткість обробленої поверхні повинна бути не більше 80 мкм.

2. Нагрівання зливків відбувається у газовій печі, через яку зливки-стовпи переміщуються в подовжньому напрямі. Піч оснащена пальниками, з яких струмені гарячого газу направляються безпосередньо на поверхню металу для його нагрівання. Це дозволяє прискорити процес нагріву та зменшити витрати

газу. Зливки-стовпи переміщаються за допомогою направляючих ланцюгових штовхальників.

3. Прес для вирубування стовпів розміщено на виході з газової печі. Вирубування проводять за допомогою рухомих кільцевих затисків у штампах. Нагрітий зливочок з газової печі направляється через відкриті кільцеві затиски штампів до обмежувача ходу, позиція якого регулюється фотоелементом в залежності від довжини заготівлі. За допомогою циліндрів зливок затискається з обох боків від площини різку. Робочий циліндр ножа спускається, відокремлюючи заготовку від зливка-стовпа. Кільцеві затиски відкриваються, і заготовка витягується на призму пресу за допомогою штовхача. Після цього заготовка переходить на лоток ланцюгового транспортера для подальшого переміщення на податчик. Робочий циліндр повертається в початкове положення, і зливочок-стовп повертається в газову піч за допомогою протилежного штовхача.

4. Після нагрівання заготовка вантажиться в контейнер пресу за допомогою сили в 1800 МН, після чого проводиться процес пресування.

На рис. 1.1 показана стандартна будова сучасного горизонтального гідравлічного пресу для прямого пресування профілів з алюмінієвих сплавів.

Технологічні операції проводяться в такій послідовності: спочатку, у початковому стані перед нагрітою заготовкою, пресуюча траверса з прес-штемплем розташована на максимальній відстані від контейнера. Заготовку спеціальним механізмом вводять на вісь пресу між прес-штемплем і торцем контейнера. Під час руху рухомої поперечки вперед прес-штемпель посуває заготівлю в контейнер, а потім подаючий механізм повертається до початкового положення, звільняючи простір для подальшого переміщення рухомої поперечки. Під час наступного руху прес-штемпеля після притискання контейнера до матриці відбувається розпресовка, коли заготовка згущується, а її діаметр стає рівним внутрішньому діаметру контейнера, а також відбувається випуск повітря з проміжку між заготовкою і контейнером. Потім відбувається сам процес пресування, який триває до досягнення заданої довжини прес-залишка, після чого рухому поперечку зупиняють. Для видалення прес-залишка контейнер відводять

від матриці, звільняючи простір для переміщення повзуна ножа і відбійника прес-залишка. Рухом ножа прес-залишок відділяють від виробу, і після цього він спадає по жолобу в приймач, а повзун ножа повертається до початкового положення. У той же час, разом з операціями відділення прес-залишка від виробу, прес-штемпель повертається до крайнього заднього положення, а наступна заготовка завантажується в контейнер пресу, розпочинаючи наступний цикл пресування.

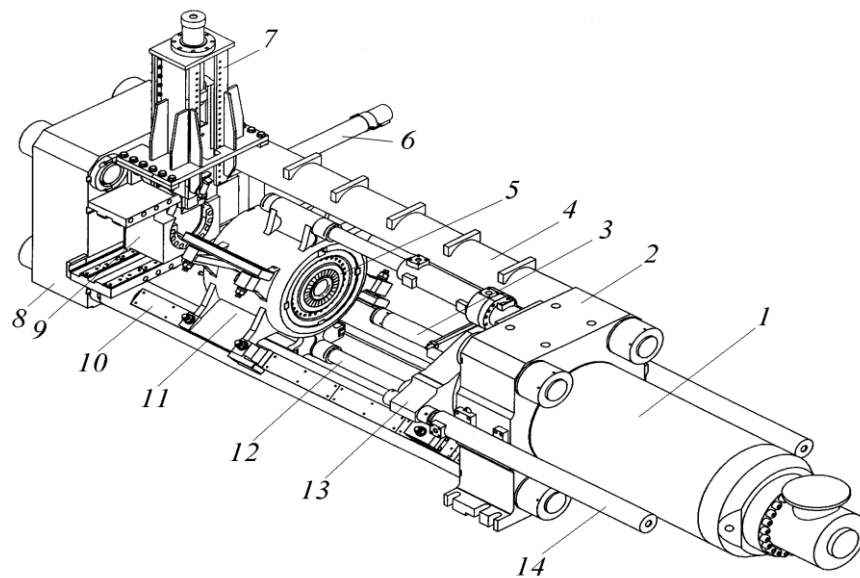


Рисунок 1.1 – Типова конструкція сучасного горизонтального гідравлічного пресу для прямого пресування профілів з алюмінієвих сплавів

1 - робочий (основний) циліндр; 2 - задня поперечка; 3 - прес-штемпель; 4 - колони; 5 - контейнер; 6 - пристрій переміщення матрицетримача; 7 - пристрій для відділення прес-залишку; 8 - передня поперечка; 9 - матрицетримач (санчата); 10 - похилі направляючі; 11 - контейнеротримач; 12 - циліндри переміщення контейнера; 13 - рухлива поперечка; 14 - циліндри подвійного ходу

Технологічні операції проводяться в такій послідовності: спочатку, у початковому стані перед нагрітою заготовкою, пресуюча траверса з прес-штемпелем розташована на максимальній відстані від контейнера. Заготовку спеціальним механізмом вводять на вісь пресу між прес-штемпелем і торцем контейнера. Під час руху рухомої поперечки вперед прес-штемпель посуває заготівлю в контейнер, а потім подаючий механізм повертається до початкового

положення, звільняючи простір для подальшого переміщення рухомої поперечки. Під час наступного руху прес-штемпеля після притискання контейнера до матриці відбувається розпресовка, коли заготовка згущується, а її діаметр стає рівним внутрішньому діаметру контейнера, а також відбувається випуск повітря з проміжку між заготовкою і контейнером. Потім відбувається сам процес пресування, який триває до досягнення заданої довжини прес-залишка, після чого рухому поперечку зупиняють. Для видалення прес-залишка контейнер відводять від матриці, звільняючи простір для переміщення повзуна ножа і відбійника прес-залишка. Рухом ножа прес-залишок відділяють від виробу, і після цього він спадає по жолобу в приймач, а повзун ножа повертається до початкового положення. У той же час, разом з операціями відділення прес-залишка від виробу, прес-штемпель повертається до крайнього заднього положення, а наступна заготовка завантажується в контейнер пресу, розпочинаючи наступний цикл пресування.

Привід гідравлічних пресів складається з різних основних компонентів, включаючи джерела рідини високого тиску, системи управління, приймачі рідини, акумулятори, трубопроводи з арматурою і робочою рідиною. У гідравлічних пресах зазвичай використовуються два типи гідравлічних приводів: насосний (включаючи насосний безакумуляторний) і привід від насосно-акумуляторної станції. У випадку насосного безакумуляторного приводу, робочу рідину високого тиску подають безпосередньо в циліндри пресу від насосів. Подача рідини насосами повинна відповідати швидкості плунжерів гідроциліндрів, і тиск, що створюється насосами, відповідає тиску на плунжері. Настановна потужність насосів визначається максимальним зусиллям пресу та його найбільшою швидкістю пресування. Отже, насосний привід використовує енергію, яка пропорційна корисній роботі, що виконується пресом.

У випадку насосно-акумуляторного приводу, робоча рідина високого тиску постачається в циліндри пресу від акумулятора. Цей акумулятор нагромаджує рідину під час перерв у технологічних процесах або в моменти, коли прес не виконує роботу, і живить циліндри пресу в період циклу, коли рідина високого

тиску витрачається швидше, ніж її подача насосами. Використання акумулятора забезпечує більш однорідне завантаження насосів протягом робочого циклу та знижує їх потужність, встановлену за настановою.

Основними компонентами гідравлічної установки є наступні: система високого тиску; система охолодження та фільтрації масла; допоміжна система та станції акумуляторів; клапан наповнення; розподільні блоки; резервуар або бак; трубопроводи.

Також, установка має додаткове обладнання, яке необхідне для її належної роботи і контролю, включаючи фільтри, термометри, манометри, реле тиску, впускні клапани і т. д.

Система високого тиску містить наступне обладнання:

- насос для закриття контейнера;
- основні насоси (2 одиниці).

Насоси та двигуни монтуються на рівні з підлогою.

Маслостанція регулює роботу насосів, щоб вони працювали з обмеженою витратою, досягаючи максимального тиску, щоб уникнути викиду масла через захисні клапани. Ця система призначена для забезпечення нормальної роботи пресу, навіть у разі, якщо один з основних насосів відключено через обслуговування чи аварію, за допомогою працюючого на зменшеному режимі пресування.

Використання насоса високого тиску передбачене для затискання та притискання контейнера до матриці під час процесу пресування.

Допоміжна система включає наступне обладнання:

- група акумуляторів, яка складається з двох поршневих акумуляторів і чотирьох балонів з азотом;
- основний клапан скидання тиску;
- насос з робочим тиском 180 бар, витратою до 130 л/хв та споживаною потужністю 45 кВт;
- основний клапан;
- приводний насос з клапаном для зниження тиску під час фази запуску.

Система охолодження і фільтрації масла функціонує як автономна система, через яку постійно проходить певний обсяг масла через фільтр і водяний теплообмінник. Після цього масло повертається в бак за допомогою насоса з постійною витратою. Кількість води, яка надходить до теплообмінника, регулюється термостатичним клапаном, що дозволяє підтримувати температуру масла нижче 50 градусів, навіть у разі безперервної роботи пресу з максимальним тиском.

Основний резервуар, що містить більшу частину масла (приблизно 4000 літрів), розташований вище за основним гідравлічним циліндром. Він обладнаний спеціальними діафрагмами, які перешкоджають надмірному перемішуванню масла та утворенню піни під час роботи з максимальними швидкостями. Для видалення повітря зверху бака встановлені відповідні фільтри, що запобігають попаданню пилу. Крім того, ряд постійних магнітів, розташованих біля вхідного колектора насосів, призначений для уловлювання металевих часток.

Розподільні блоки, що містять логічні елементи, виконують такі управляючі функції:

- керування рухом головного і бічних циліндрів;
- управління рухом ножиць для відокремлення прес-залишку;
- керування механізмом заміни матричного комплекту;
- регулювання подачі масла насосів за різними схемами;
- контроль переміщення контейнера та забезпечення його герметичності;
- контроль роботи навантажувача заготовок.

Керування приводом циліндрів низького тиску здійснюється за допомогою електроклапана.

Профіль, що виходить з каналу матриці, пройде через охолоджуючий пристрій та потрапить на вихідний стіл пресу, який можна регулювати. Потім профіль буде продовжувати свій шлях по вихідному столу пресу за допомогою тягнучого пристрою. Якщо профіль досягне певної довжини, він буде

відокремлений від прес-залишку за допомогою гарячої пилки, яка працює швидше, ніж звичайна.

Швидке охолодження допомагає виконати процес загартування прес-виробу. Це робиться з метою насичення твердого розчину легуючими елементами та стабілізації отриманого стану сплаву.

Вихідний регульований стіл пресу призначений для підтримки профілів, які можуть провисати під впливом високих температур.

Система подвійного пулера складається з двох паралельно розташованих пулерів, кожен з яких обладнаний електроприводом. Ці пулери спрямовані на повернення до пресу пулера № 1 у будь-якому випадку. Вони можуть рухатися в двох напрямках по рейковому шляху. Пулер № 1 затискає профіль, що пресується, губками і рухається разом з ним. Після відділення від пилки, що працює гарячіше, пулер № 1 продовжує супроводжувати профіль. Другий пулер вивільняє пресований профіль для подальшої передачі на стіл-холодильник, потім повертається до першого пулера, затискає його губками, і перший пулер вивільняє профіль, повертаючись до початкового положення, готуючи систему до наступного циклу.

Після відділення від прес-залишку і процедури загартування, профілі подаються на поперечний кроковий транспортер - холодильник для охолодження перед відправленням до правильно-розтяжної машини.

1.3 Аналіз процесу пресування профілів

На пресовій ділянці Броварського алюмінієвого заводу використовуються пресові лінії, оснащені горизонтальними гідравлічними короткоходовими пресами COMETAL зусиллям 1800-2000 тонн із заднім завантаженням зливка [5].

Лінія для виготовлення профілів включає в себе гідравлічний прес, гідробак, поршневі насоси, матрицю для формування профілю, контейнер для нагріву переміщуваних заготовок, пристрій для натягування, пулер для різання та інші компоненти.

Заготовка довжиною $L = 700$ мм, яка була перед тим оброблена, подається для наступної обробки в контейнер нагріву, де необхідно забезпечити наступні параметри: $T_{\text{печи}} = 480 - 500^{\circ}\text{C}$ з наступним розрізанням на виміряні довжини.

Після нагріву проводиться пресування напівбезперервним методом на гідравлічному пресі з навантаженням 1800 МТ. Заготовка, за допомогою прес-штемпеля, вводиться в контейнер, де підтримується задана температура $T_{\text{контейнера}} = 440^{\circ}\text{C}$. Швидкість руху прес-штемпеля та тиск, який застосовується контейнером до матриці, регулюються за допомогою масла, яке постачається від гідробака за допомогою трьох поршневих насосів, що прив'язані до двигунів M_1 , M_2 , M_3 . Швидкість руху прес-штемпеля $V_{\text{пресштемпеля}} = 0.01 - 0.09$ м/хв. Відпрацьоване масло повертається в гідробак, де попередньо охолоджується за допомогою теплообмінника. Температура у гідробаці регулюється на певному рівні $T_{\text{масла}} = 50^{\circ}\text{C}$ і рівень масла $L=3$ м. Якщо масло надходить до поршневих насосів з підвищеною температурою, клапан закривається, і насос вмикається через двигун M_4 , який направляє масло назад до теплообмінника для охолодження. Після того, як заготовка потрапляє в контейнер, контейнер за допомогою тиску $P_{\text{контейнера}} = 250$ бар притискається до матриці. Після цього заготовка видавлюється через матрицю з заданою швидкістю. Температура контейнера і втулки має відповідати температурі матриці $T_{\text{матриці}} = 440 - 450^{\circ}\text{C}$ для забезпечення заданих геометричних характеристик профілю. Температура верхньої та нижньої частин контейнера регулюється за допомогою природного газу та повітря. Газ постачається до контейнера за допомогою компресора, що працює на двигуні M_5 . Повітря подається за допомогою компресора, який прив'язаний до двигуна M_6 . Прес обладнаний системою ізотермічного пресування, що керує процесом пресування. Для цього потрібно, щоб температура профілю, який виходить з матриці $T_{\text{профіля}} = 440 - 450^{\circ}\text{C}$, була відповідною температурі контейнера та матриці. Потім прес-залишок відокремлюється за допомогою ножа.

При завершенні процесу виготовлення профілів на пресі встановлюється

пристрій, який тягне, відомий як пулер. Цей механізм рухається вздовж приймального столу, рухаючись по балці над ним або на спеціальному візку, і оснащений захватами для утримання виготовлених прес-виробів. Зусилля, яке використовується для тягнення, дуже мале і складає близько 0,1% від номінального пресуючого зусилля.

Пулер інтегрований у систему автоматизованого управління пресом і автоматично припиняє свою роботу під час перерви у роботі пресу, яка виникає при завантаженні заготовки або завершенні процесу пресування профілю.

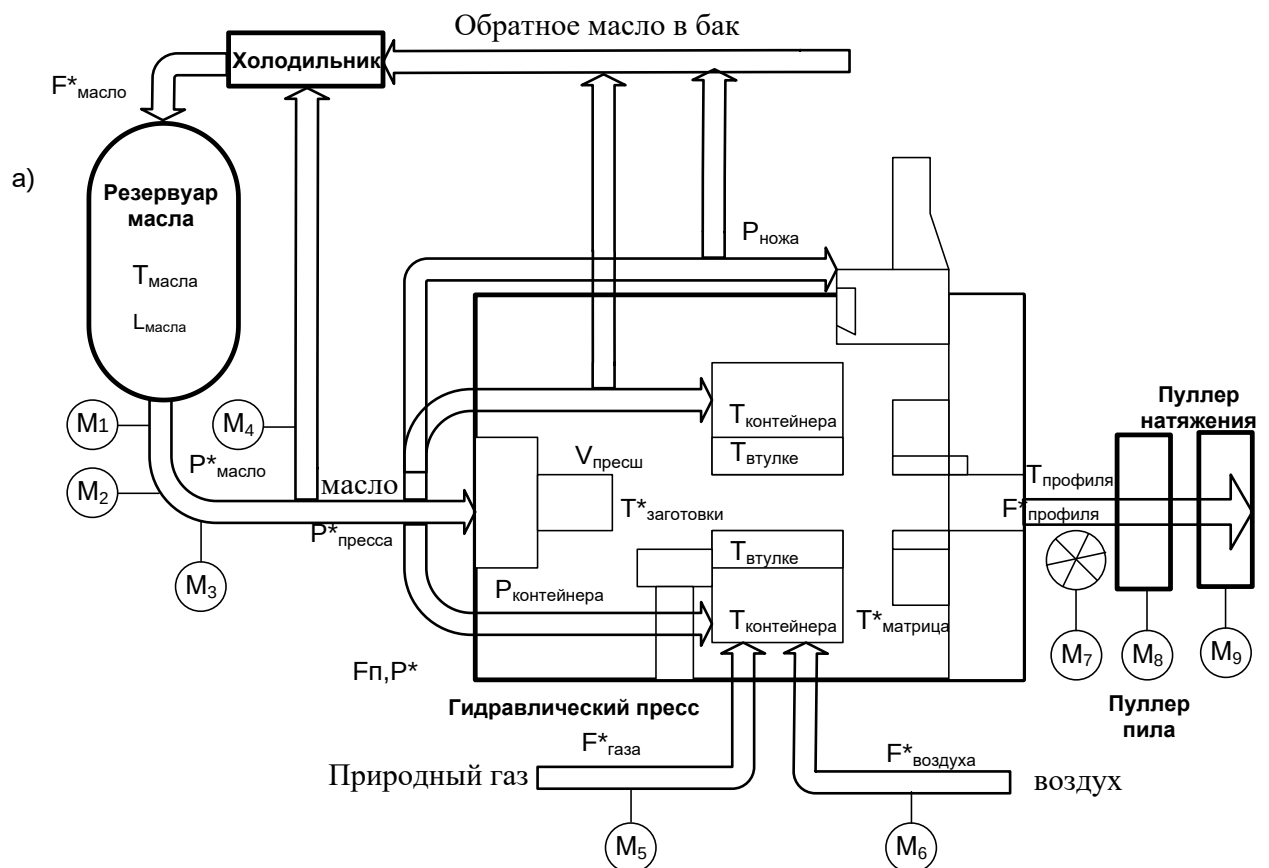
Зазвичай прес обладнаний двома пулерами, які працюють синхронізовано з пилою гарячого різання. Під час різання в точці зварювання один пулер знаходиться в режимі очікування біля пили, готовий захопити новий профіль, а інший повертається з крайнього переднього положення. Витягування профілю на певну відстань здійснюється з високою точністю завдяки стежачому приводу. До складу стежачого приводу входять двигуни (M_8 і M_9), підключені до перетворювачів частоти, та два енкодери. Переміщення пулера пили і пулера натягнення здійснюється за допомогою ланцюга, який через редуктор з'єднаний з двигунами M_8 і M_9 . Профілі витягуються пулерами на відстань 50 м. На транспортері встановлені вентилятори, підключені до двигуна M_7 , які забезпечують охолодження профілю із заданою частотою обертання. Відрізані профілі з вихідного столу переміщуються поперечно на холодильник, який представляє собою систему з крокуючими балками або транспортерними стрічками.

Після охолодження профілі випрямляються на розтяжній машині. Машина зазвичай складається зі стаціонарної частини з гідроциліндрами для затиску профілю і виконання робочого ходу під час розтягування, а також рухомої частини, оснащеної тільки механізмом для затиску профілю, яка переміщується вздовж холодильника при зміні довжини профілю. Рівень масла, встановлений на передній частині бака, повинен не перевищувати відмітки MAX, коли головний циліндр знаходиться в крайньому задньому положенні, і не доходити до значення MIN, коли головний циліндр в крайньому передньому положенні. Вихід рівня масла за ці межі спричинить аварійну зупинку пресу.

Під час пресування отримується профіль заданої якості. Для досягнення цього використовуються кілька контурів регулювання параметрів: підтримання рівня масла в гідробаку, стабілізація температури в гідробаку та контейнері нагріву заготовок, підтримання тиску та контроль швидкості прес-штемпеля.

При побудові систем автоматизації виробничих процесів визначають технологічні параметри, які потрібно контролювати і регулювати, а також виявляють точки введення керуючих дій та канали їх проходження через об'єкт. З цією метою створюють схему взаємодії технологічних параметрів об'єкта, виділяють основні та додаткові канали проходження сигналу, а потім визначають контури регулювання, які компенсують коливання технологічних параметрів на вході апарату. Якщо потрібно, контури регулювання зв'язують між собою, і вибирають контрольовані величини таким чином, щоб їх кількість була мінімальною, але достатньою для повного уявлення про хід технологічного процесу.

За допомогою технологічної схеми процесу, що була викладена раніше, можна створити схему матеріальних потоків і відповідних інформаційних параметрів (рис. 1.2). На основі обраної структури управління процесом проводиться проектування функціональної схеми.



б)

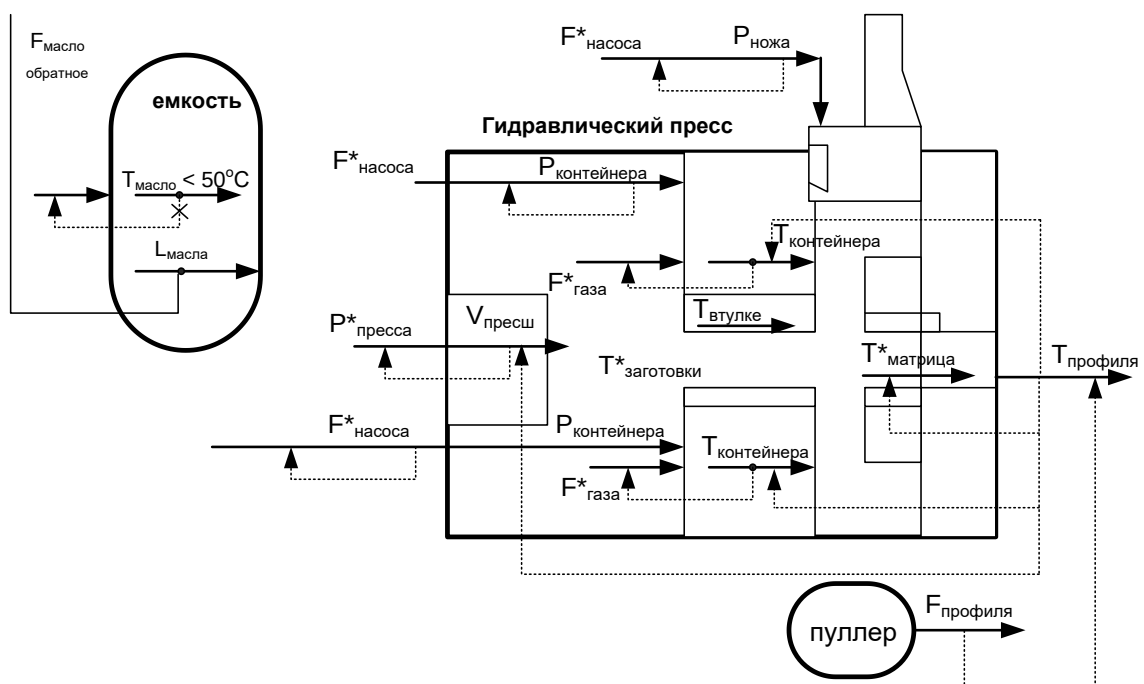


Рисунок 1.2 – Аналіз процесу виробництва алюмінієвих профілів :

а) Схема матеріальних потоків і їх інформаційних змінних;

б) Структурна схема САУ як об'єкт управління.

2 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ

2.1 Особливості існуючої системи керування

Під час етапу пресування для виробництва профілів європейського стандарту застосовано передові технологічні рішення. На Броварському алюмінієвому заводі використовується горизонтальний короткоходовий прес, де заготовка подається між прес-штемпелем і матрицею в центрі контейнера. Цей метод пресування має кілька переваг, таких як економія часу, зменшення деформації і спотворення геометрії профілів, а також зменшення витрати робочої рідини та енергії. Преси обладнані гідравлікою від провідних європейських компаній. Система управління пресом забезпечена ізотермічним пресуванням. Ці преси дозволяють виготовляти профілі з товщиною стінки до 0,8 мм.

Стандартом ефективного виробництва є використання ізотермічного пресування, що передбачає підтримання сталої температури прес-виробу на виході з матриці протягом усього циклу пресування, а також на всіх етапах процесу, включаючи нагрівальну піч, заготовку, контейнер і матрицю. Цей процес дозволяє досягти максимально можливої швидкості пресування завдяки зниженню температури заготовки і використанню максимального зусилля пресування, при цьому навантаження на матрицю залишається постійним.

2.2 Вимоги до якості і структури поверхні профілів

Важливо відзначити, що стандартною практикою є виготовлення алюмінієвих профілів з високою точністю розмірів поперечного перерізу в десяти долі міліметра. У деяких випадках може виникати ситуація, коли вимоги стандартів не можуть бути виконані. Для вирішення таких ситуацій може знадобитися зміна форми профілю або його післяпресова механічна обробка. Якщо точне виконання стандартів не є обов'язковим у певних випадках, для оцінки рівня відхилень розмірів профілю можна скористатися табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Допустимі геометричні розмірів в профілі

Розміри	Відхилення
Лінійні розміри поперечного перерізу профілю	$\pm 1\%$
Товщина стінки	$\pm 10\%$
Прямолінійність (стріла прогину)	1 мм (довжину профілю (м)
Кут скручування	1 ((довжину профілю (м)
Поперечна кривизна (площинна)	0,00,01 (розмір перерізу (мм)

Поверхня профілів не має мати тріщин, роздільних шарів, включень інших матеріалів, корозійних плям або оксидів.

На лицьовій поверхні профілю, який має нормальну або підвищену точність, зазначеної на кресленні, не допускається наявність механічних пошкоджень, пухирів глибиною понад 0,07 мм, слідів від матриці у продольному напрямку глибше 0,03 мм, а також поперечних слідів від матриці, які утворюються при зупинці пресу.

На протилежній поверхні профілів не припускаються механічні пошкодження, вм'ятини, пухирі, які глибше половини відповідного допустимого значення на товщину стінок і полиць, а також подряпини, потертості, довгі сліди від матриці глибше 0,15 мм.

На лицьовій поверхні профілю особливої точності, як вказано на кресленні, виключаються будь-які механічні ушкодження, пухирі глибиною понад 0,01 мм, подовжні сліди від матриці глибше 0,005 мм, а також поперечні сліди від матриці, що можуть утворюватися при зупинці пресу.

Для профілів нормальної точності максимальна допустима хвилястість полиць і стінок становить 1 мм, для профілів підвищеної точності - 0,5 мм, а для профілів особливої точності - 0,25 мм. Крім того, якщо хвилястість не перевищує 0,2 мм, крок хвилі не обмежується.

Кожен профіль піддається перевірці якості його поверхні.

Якість поверхні профілів залежить від наступних параметрів процесу пресування:

- співвідношення температур контейнера і заготовки;

- конструкція матриці, включаючи висоту перемичок і зварювальної камери, розміри форкамери;
- довжина прес-залишку;
- швидкість пресування;
- інтенсивність охолодження після пресування.

2.3 Критичний аналіз існуючої системи керування

На відміну від пресування сталей і мідних сплавів з високими швидкостями деформації, при пресуванні алюмінієвих профілів через низькі швидкості пресування (<25 мм/с), зважаючи на теплопровідність металу, зміни температури можуть впливати на результати значно. Тому в розрахунку температурного поля у деформованому сплаві слід враховувати зміну температури через теплопровідність пресованого металу та його теплообмін з інструментом [1].

Критичним параметром в процесі пресування є температура металу, яка виходить з матриці. Ця температура збільшується, коли кількість виділеного тепла від деформації та тертя перевищує втрати тепла, і зменшується, коли відбувається навпаки. Теплопровідність вимагає певного часу, тому при певних сплавах і умовах пресування, якщо швидкість переміщення прес-штемپеля перевищує певне значення, відбувається переважання генерації тепла. Це пояснює зміну температурного поля по довжині пресованого виробу залежно від швидкості прес-штемпеля.

Температура, яка має прес-виріб, впливає на якість продукту та тривалість служби матриці. Щодо якості виробу, температура металу, який виходить з матриці, впливає на процеси термообробки, стабільність розмірів і може спричиняти дефекти виробу. Також ця температура є критичним фактором, який визначає тривалість служби матриці.

2.4 Вимоги до системи керування і керованих параметрів

Процес екструзії алюмінію можна описати досить просто. Зазвичай для виготовлення різноманітних двовірних профілів у звичайних екструзійних пресах застосовують сталі матриці, через які під високим тиском проходять заготовки з алюмінію та його сплавів. Довжина екструдованого профілю залежить від площі його поперечного перерізу і об'єму заготовки. Контрольні параметри визначаються враховуючи склад матеріалів, їх використання та умови виготовлення. Окрім параметрів, що змінюються під час обробки кожної заготовки, виробничий процес може зазнавати змін від однієї заготовки до іншої протягом виготовлення кожного стовпа. Продуктивність визначається швидкістю екструзії кожної заготовки. Розмір прес-залишку, який залишається після екструзії, контролюється для уникнення деформацій у виготовленому виробі. Встановлення розмірів прес-залишку здійснюється емпірично, шляхом експерименту та аналізу залежностей.

У виробничому процесі пресування, точне налаштування як теплових, так і фізичних параметрів, є надзвичайно важливим. Вираз "майже відрегульований" не відповідає стандартам, оскільки потрібна абсолютна точність у налаштуванні цих параметрів.

- Матриця повинна бути розташована строго по центру контейнера.
- Усі частини преса повинні бути фізично точно центровані.
- Початкова температура матриці повинна точно відповідати температурі сплаву, що виходить з контейнера.
- Температура втулки контейнера повинна залишатися рівномірною, від нижньої до верхньої частини, для забезпечення однорідності температури заготовки та матеріалу під час пресування.

Фізичне центрування пресу

Не можна недооцінити важливість абсолютного фізичного центрування пресу. Наприклад, якщо матриця не розташована точно в центрі контейнера, потік сплаву буде нерівномірним, що може призвести до спотворення профілю.

Основний циліндр і прес-шайба повинні проходити через контейнер рівно, без зіскоків, щоб уникнути будь-яких проблем. Для цього необхідно, щоб прес був правильно фізично центрований.

Перший сигнал неправильного центрування - це нерівномірний знос передньої кромки або направляючої фаски прес-шайби, що впливає на потік сплаву з контейнера і може спотворити профіль. Нажаль, якщо прес уже досить зношений, його абсолютне центрування часто стає неможливим. Тому важливо регулярно перевіряти знос фітингів і прокладок, особливо фітингів направляючих і основного циліндра.

Проблема неправильного центрування пресу складна через вплив багатьох чинників, таких як основа пресу, анкерні болти, прес-штемпель, пристрій для завантаження заготовок, система заміни матриць і так далі. Жоден з цих факторів сам по собі не здається критичним, але разом вони можуть призвести до найбільш поширеної проблеми в процесі пресування - неправильного центрування пресу.

Ключовим елементом для забезпечення належного технічного обслуговування центрування пресу є систематична, докладна і ретельна перевірка.

Теплове регулювання матриці

Максимальна продуктивність неможлива, якщо попереднє нагрівання матриці екструзії проводиться нерівномірно при оптимальній температурі роботи. Нерівномірна температура може спричинити деформацію профілю. Якщо температура занадто низька, тиск заготовки на матрицю може спричинити її деформацію. Це може призвести до зміни геометрії профілю і збільшення сили тертя.

Нагрів матриці в традиційній печі зазвичай займає кілька годин. Проте, недостатньо завершений процес нагріву є значно більшою проблемою для виробників профілю, ніж просто час, необхідний для досягнення максимальної температури.

Частим рішенням цієї проблеми є встановлення ряду одиносередкових печей для нагріву матриць. У таких печах кожна матриця може бути нагріта окремо до необхідної однорідної температури експлуатації протягом меншого

часу, ніж в стандартній печі. Це дозволяє забезпечити належний нагрів матриці, знизити тиск до 10-15%, підвищити швидкість пресування, та практично виключити можливість деформації або пошкодження матриці.

Теплове регулювання контейнера

Під час пресування заготовки крізь контейнер, верхня частина контейнера зазвичай нагрівається більше, ніж його нижня частина. Навіть при наявності провідної теплопередачі всередині контейнера, тепловтрата знизу контейнера збільшується всередині його корпусу, що підвищує температуру у верхній частині. Це збільшує потік тепла зверху контейнера в матрицю і, відповідно, зменшує потік у нижній частині. Це може призвести до зміни форми профілю, а ще важливіше — до значних змін у максимальній довжині профілю (столу). Різниця в температурі на втулці в 5°C відповідає 1% зміні у довжині профілю (столу). Тому великою перевагою є використання системи термоконтролю, яка може нагрівати холоднішу зону незалежно від верхньої.

Постійна та рівномірна температура зберігається лише тоді, коли контейнер має можливість виправляти будь-які зміни в температурі втулки негайно, та в тих місцях, де вони виникають.

Аналіз процесу САУ показує наявність таких локальних систем стабілізації:

- регулювання рівня рідини в резервуарі;
- контроль швидкості пресування;
- контроль температури в контейнері;
- підтримка оптимальної температури масла в резервуарі;
- регулювання тиску притискання контейнера;
- управління видаленням прес-залишку;
- контроль відділення прес-залишку.

Після проведення аналізу параметрів технологічного процесу, які потребують контролю та налаштування, запишемо їх у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри підлягають контролю і регулюванню.

Найменування установки	Найменування параметра	Одиниці виміру	Межа виміру	Допустиме відхилення	Контроль	Регулювання
Ніж матриці	Тиск для відділення прес залишку	МПа	25	±8%	ні	так
Матриця	Температура матриці	°C	450	±5%	так	ні
Прес-штемпель	Швидкість пресування	м/с	0.02	±1%	так	так
Контейнер	Тиск притискання до матриці	МПа	25	±4%	так	так
	Температура внизу и вверху	°C	440	±5%	так	так
	Температура втулки	°C	445	±4%	так	ні
Резервуар масла	Рівень	м	1	±2%	так	так
Резервуар масла	Температура	°C	45	±2%	так	так
Профіль	Температура профілю	°C	440	±5%	так	ні
Пулер натягування	Зусилля натягування	кН	25	±2%	ні	ні

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ

3.1 Аналіз процесу як об'єкту управління

Технологічний процес виробництва профілю відрізняється складністю фізико-хімічних процесів, що відбуваються в технологічному обладнанні. Об'єкти управління є багатовимірними і характеризуються розподіленістю параметрів. Контейнер печі має значну інерційність каналів управління. Об'єкти управління зазвичай слабо визначені та схильні до впливу високого рівня шумів. Відсутній безперервний контроль за якістю виготовленого профілю. Управління режимом роботи технологічного обладнання здійснюється вручну. Ручні методи управління базуються на практичному досвіді і знаннях технологічного персоналу. Усі ці особливості ускладнюють автоматизацію управління процесом. Проблема автоматизації виробництва профілю є комплексною, вимагаючи спільного вирішення питань теорії систем управління, математичного моделювання, планування експериментів, врахування особливостей технології виробництва та практичних методів управління.

Температура є одним з ключових параметрів процесу пресування алюмінієвих профілів. З підвищенням температури зменшується напруга, що викликає пластичну деформацію, і таким чином полегшується сам процес деформації. Проте, одночасно з цим знижується максимально можлива швидкість пресування, оскільки підвищення температури від деформаційного нагрівання може призвести до виникнення різноманітних дефектів. На зміну і розподіл температури металу під час пресування впливають наступні фактори [1]:

- напруга плинності сплаву при заданих умовах, деформація та швидкість деформації;
- теплопередача між металом та інструментом, а також між металом та навколишнім середовищем;
- початкова температура заготовки;
- тертя при контакті між заготовкою та інструментом.

Вплив зазначених факторів виявляється через наступні механізми.

Властивості матеріалу. Механічні властивості матеріалу заготовки суттєво впливають на кількість тепла, що утворюється через деформацію та граничне тертя. Під час деформації розсіюване тепло пропорційне напрузі пластичної течії матеріалу при відповідній температурі та швидкості. У випадку тертя, підвищення температури пропорційне дотичній напрузі тертя та швидкості ковзання металу по інструменту.

Термічні властивості металу впливають на підвищення його температури під час пластичної деформації, а також безпосередньо на теплопровідність.

Тертя. Розподіл температури значно залежить від коефіцієнта тертя на контакті між заготовкою і контейнером, а також між деформованим матеріалом і матрицею. Підвищення температури також спричинене вищою дотичною напругою тертя в зоні ускладненої деформації.

Швидкість переміщення прес-штемпеля. Підвищення швидкості прес-штемпеля впливає на підвищення температури металу під час пресування. Це зумовлено тим, що швидкість деформації прямо пропорційна швидкості прес-штемпеля, а теплове виділення від деформації збільшується разом зі швидкістю деформації. Крім того, при збільшенні швидкості деформації, як правило, зростає опір металу пластичній деформації (напруга плинності). Зниження швидкості прес-штемпеля дозволяє більшій частині тепла розсіятися і передатися в інструмент.

Коефіцієнт витягу. При підвищених значеннях коефіцієнта витягу спостерігається збільшення температури на виході з матриці, оскільки деформація відбувається швидше і створюється більша напруга плинності.

Периметр. Зазвичай температура на виході, що формується під час пресування, зростає зі збільшенням периметра каналу матриці. Це зростання відбувається через збільшення поверхні тертя матриці з металом.

Тягнуче зусилля пулера. Застосування пулера допомагає значно покращити геометричні параметри профілю, що виходить з пресу, шляхом усунення або зниження криволінійності, хвилястості і різних відхилень форми поперечного

перерізу профілю. Розтягуюча напруга в профілі, яка виникає в результаті дії пулера, не перевищує межі плинності матеріалу профілю.

Швидкість охолодження в лінії пресу. Механічні характеристики профілів залежать від температури, при якій профіль виходить з пресу, а також від швидкості охолодження. У випадку сплавів, які піддаються термічній обробці за допомогою охолодження в лінії пресу (закалка на пресі), існує певний період часу - приблизно декілька хвилин - протягом якого метал повинен остигнути до зазначеної температури.

Розрахункове визначення зміни температури металу при пресуванні визначає методику розв'язання широкого спектру завдань, серед яких наступні:

- визначення оптимальної температури нагріву заготовки, яка забезпечує оптимальну пластичність пресованого металу;
- встановлення режиму пресування, при якому забезпечуються стабільні умови температури, що дозволяють досягти найвищої продуктивності та механічних властивостей;
- аналіз температурного поля металу для точного визначення його реологічних властивостей та стану напруження-деформації;
- прогнозування фізико-механічних характеристик готового виробу.

Теплові процеси в обробці металів під тиском мають велике значення, оскільки вони впливають як на рух металу, так і на його структуру та властивості [10, 19]. При розробці технології пресування одним із факторів, які впливають на рух металу у каналі матриці, є температура заготовки разом із швидкістю пресування. Зміна цих параметрів впливає на розподіл температурного поля, що, в свою чергу, впливає на рух металу та змінює такі параметри, як вигин і скручування профілю на виході з каналу матриці.

В даний момент, для вибору оптимальних температурно-швидкісних режимів деформації кожного пресованого профілю використовується експериментальний підхід на обладнанні промислового рівня. Використання комп'ютерного моделювання для цієї мети дозволить прискорити процес вивчення профілів, розширити спектр досліджуваних параметрів та

автоматизувати процеси проектування та налаштування пресових матриць. Важливо також зазначити, що більшість сплавів, які використовуються у виробництві пресованих профілів, мають обмежений діапазон температур обробки, виходячи за який може викликати утворення дефектів.

3.2 Функціональна схема системи

Створимо функціональну схему САР, яка зображена на рис. 3.1.

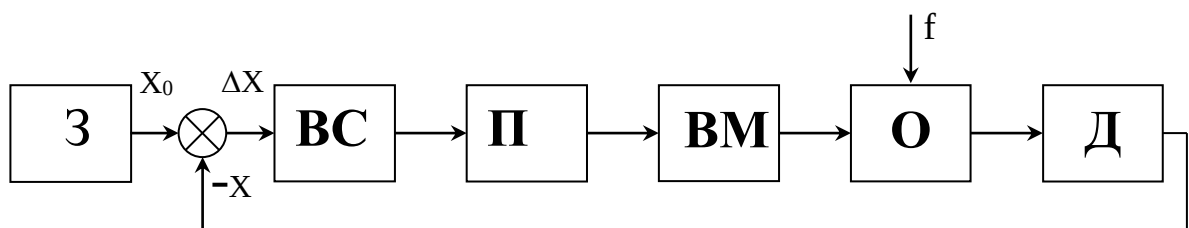


Рисунок 3.1 – Структурна схема одноконтурної САР температури заготовок на виході з контейнера:

З – задаючий пристрій; ВС – вимірювальна схема; П – підсилювач; ВМ – Виконавчий механізм; О – об’єкт регулювання; Д – датчик

3.3 Аналіз і вибір методу управління процесом нагріву заготовки

На основі критичного аналізу існуючої системи управління технологічним процесом встановлено, що модернізована система управління має забезпечувати підтримку регульованого параметра на попередньо заданому рівні з високою точністю [10]. На рис. 3.1 наведено структурну схему регулювання температури заготовки на виході з контейнера.

Рівняння елементів системи:

вимірювальної схеми:

$$U_{\text{м}} = k_2 \Delta X ;$$

виконавчого двигуна (з редуктором і клапаном):

$$T_1 \left(\frac{d^2 \mu}{dt^2} \right) + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U_y .$$

об’єкта:

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

підсилювача:

$$U_y = k_3 U_m ;$$

Параметри:

Θ – температура повітря в печі; X_0 – задане значення температури печі; X – поточне значення температури після датчика; U_y – напруга управління двигуном; $\Delta X = X_0 - X$ – відхилення температури; μ – переміщення регулюючого органа; f – еквівалентне збурююче діяння; U_0 – напруга живлення мостової схеми; U_m – вихідна напруга вимірювального мосту.

Вихідні дані для розрахунків:

$$\begin{aligned} T_0 = 1,5 \text{ с}; \quad k_0 = 3,0 \text{ град/см}; \quad T_1 = 0,015 \text{ с}; \quad k_1 = 0,6 \text{ град/см}; \\ k_2 = 0,4 \text{ В/град}; \quad k_4 = 0,4 \text{ см/В}\cdot\text{с}; \quad k_3 = 25; \quad f = 0,9 \text{ см} \end{aligned}$$

При розробці структурної схеми САР користувалися диференціальними рівняннями елементів схеми. Тепер перейдемо від диференціальних рівнянь елементів системи до їх передаточних функцій. Передаточна функція елемента - це відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної величини за умови нульових початкових умов.

Для отримання передаточної функції об'єкта прирівнюємо збурюючий вплив f до нуля, оскільки наша мета полягає в отриманні передаточної функції за керуючим впливом. Таким чином, отримуємо диференціальне рівняння об'єкта у наступному вигляді:

$$T_0 \left(\frac{d\Theta}{dt} \right) + \Theta = k_0 \mu \quad (3.1)$$

Для визначення передаточних функцій окремих елементів схеми використано пряме перетворення Лапласа:

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

$$W_o(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{\Theta}}{\bar{\mu}} = \frac{k_0}{T_0 p + 1}. \quad (3.2)$$

Це аперіодична динамічна ланка.

Так же отримуємо передаточні функції інших елементів системи:

- вимірювальної схеми:

$$W_{ec}(p) = \frac{\bar{U}_m}{\Delta \bar{X}} = k_2. \quad (3.3)$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- підсилювача:

$$W_n(p) = \frac{\bar{U}_y}{\bar{U}_m} = k_3. \quad (3.4)$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- виконавчого механізму:

$$W_{д6}(p) = \frac{\bar{\mu}}{\bar{U}_y} = \frac{k_4}{p(T_1 p + 1)}. \quad (3.5)$$

Цей елемент є реальною інтегруючою ланкою. Згідно з одиницями вимірювання, стала інтегрування входить у знаменник передаточної функції, і його значення $T_i = 1/k_4 = 2$ с є значним. Тому, оскільки фізично важко виділити окремі динамічні складові даного агрегату, фактично будемо приймати $T_i = 1$ с, і через це його значення не буде включено у формулу. В чисельнику передаточної функції врахуємо безрозмірне значення $k_4 = 0,5$;

- датчика:

$$W_d(p) = 1. \quad (3.6)$$

Це повторювач.

Об'єднавши типові динамічні ланки відповідно до передачі діянь, отримаємо структурну схему системи автоматичного регулювання температури.

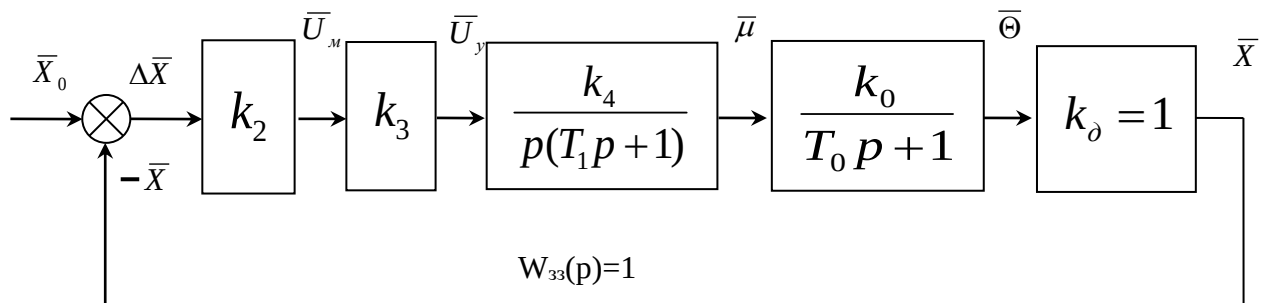


Рисунок 3.1 - Структурна схема одноконтурної системи автоматичного регулювання температури заготовок на виході з контейнера

4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Побудова частотних характеристик розімкнутої системи

4.1.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи.

Для створення амплітудно-фазової частотної характеристики відкритої системи потрібно здійснити заміну у відповідній передаточній функції $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω – частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини, і змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned} W_p(j\omega) &= \frac{k}{j\omega(T_1 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0)(j\omega)^2 + j\omega} = \\ &= \frac{k}{-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega} = \frac{k}{-(T_1 + T_0)\omega^2 + j(\omega - T_1 T_0 \omega^3)} = \\ &= \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2 - j(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} \end{aligned}$$

Таким чином, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \frac{k(-(T_1 + T_0)\omega^2)}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{12(-1,515\omega^2)}{(-1,515\omega^2)^2 + (\omega - 0,023 \cdot \omega^3)^2}; \\ Q(\omega) &= \frac{k(-(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{12(-(\omega - 0,023 \cdot \omega^3))}{(-1,515\omega^2)^2 + (\omega - 0,023 \cdot \omega^3)^2} \end{aligned}$$

Побудуємо графік АФЧХ розімкнутої системи (рис. 4.1).

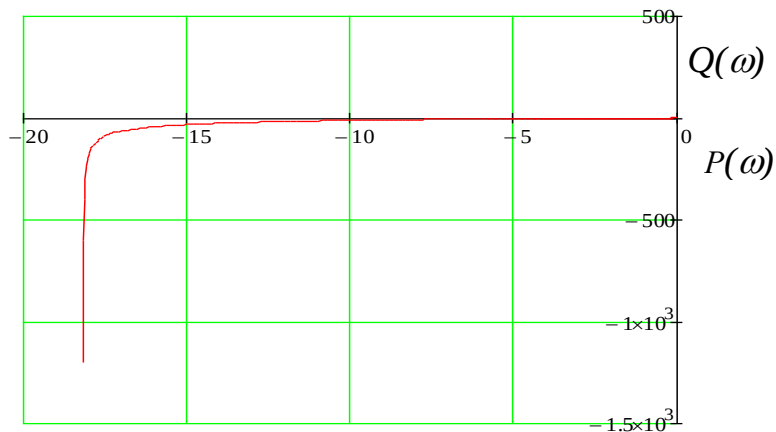


Рисунок 4.1 – АФЧХ розімкнутої системи

4.1.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.

Для побудови ЛАЧХ за допомогою асимптотичного методу перш за все необхідно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{1,5} = 0,67 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,015} = 66,67 \text{ с}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці}.$$

Спряжені частоти, знайдені раніше, маркуємо на вісі частот у логарифмічному масштабі (рис. 4.2). Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$ представлена прямою з нахилом -20 дБ/дек, оскільки система включає інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при $\omega = 1$ повинна мати ординату, яка дорівнює $20 \lg k = 21,6$ дБ ($k = 12$ – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Після кожної спрягаючої частоти нахил характеристики $L(\omega)$ змінюється на -20 дБ/дек, порівняно з попереднім значенням, оскільки ці частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших ω_1 , має нахил -60 дБ/дек.

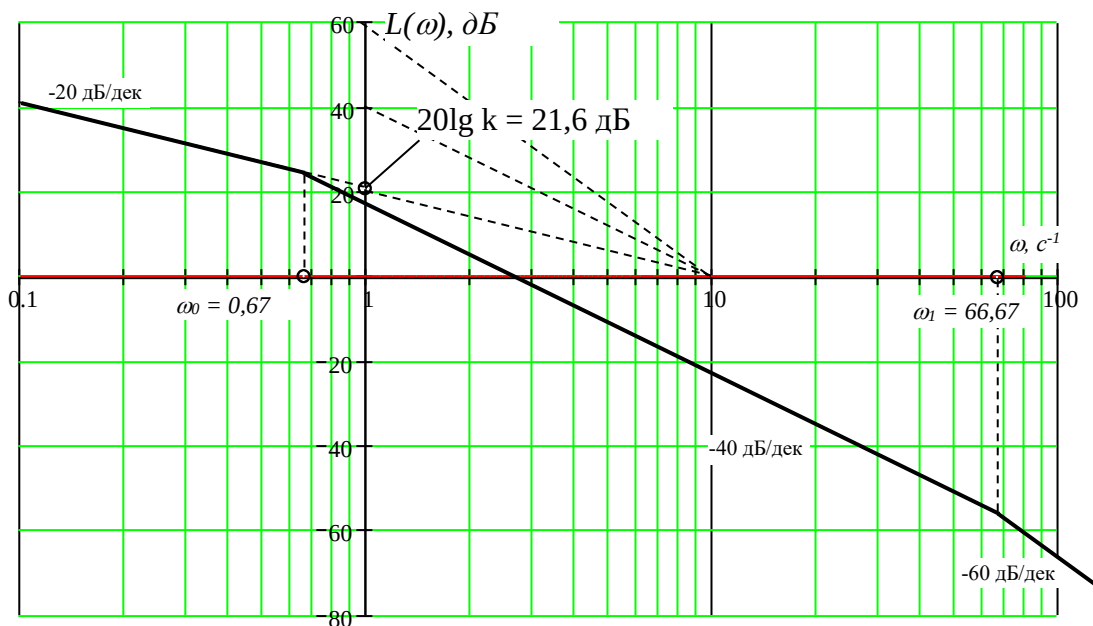


Рисунок 4.2 – ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

4.1.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи формується шляхом простого додавання значень фазових характеристик типових ланок (рис. 4.3):

$$\phi(\omega) = \left(-\arctg(\omega T_0) - \left(\frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (4.1)$$

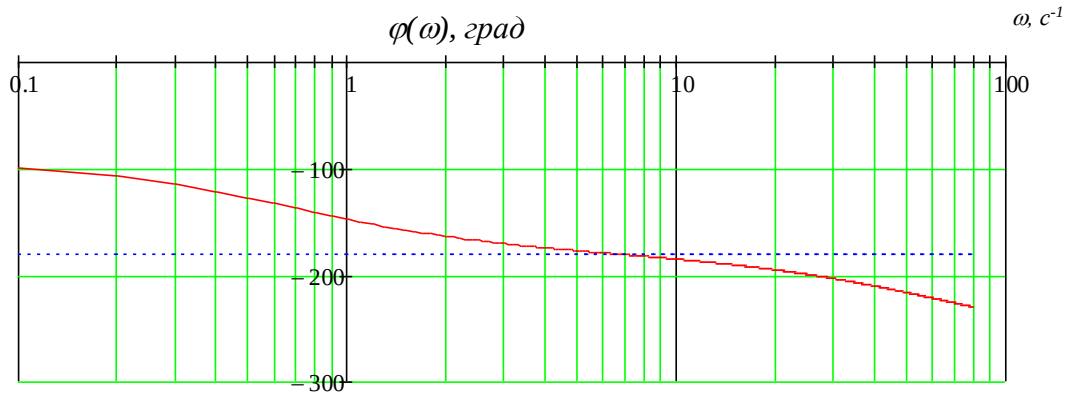


Рисунок 4.3 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\phi(\omega)$

4.2 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для цього потрібно виділити дійсну складову передаточної функції замкнутої системи, виконавши відповідну заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення $P_s(\omega)$:

$$W_s(\omega) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k} = \frac{k}{T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0)p^2 + p + k};$$

Підставимо $p = j\omega$, отримаємо:

$$\begin{aligned} W_s(\omega) &= \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0)(j\omega)^2 + j\omega + k} = \frac{k}{-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega + k} = \\ &= \frac{k}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2) + j(\omega - T_1 T_0 \omega^3)} = \frac{k((k - (T_1 + T_0)\omega^2) - j(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} \end{aligned}$$

Виділимо дійсну частину:

$$P_s(\omega) = \frac{k(k - (T_1 + T_0)\omega^2)}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{12(12 - 1,515\omega^2)}{(12 - 1,515\omega^2)^2 + ((\omega - 0,023 \cdot \omega^3))^2}$$

Побудуємо графік дійсної частотної характеристики замкнутої системи (рис. 4.4).

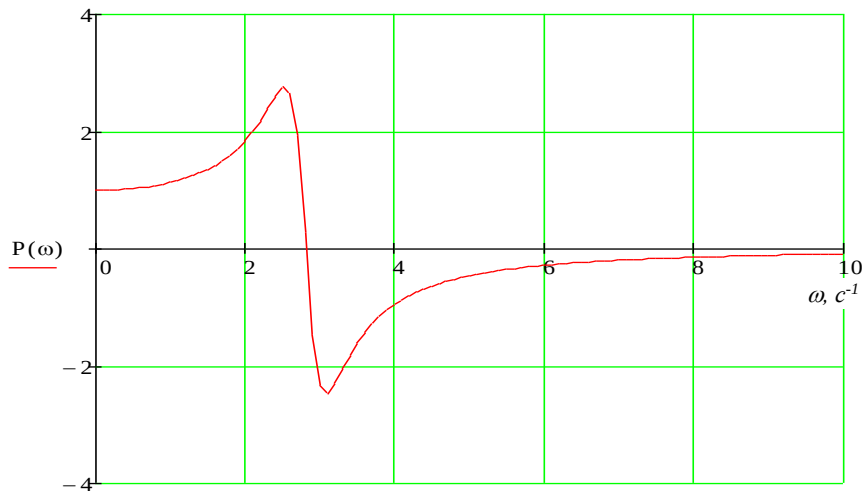


Рисунок 4.4 – Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

4.3 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості

4.3.1 Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца

Критерій стійкості Гурвіца, що базується на алгебраїчних виразах, дозволяє оцінити стійкість системи автоматичного регулювання навіть у випадку систем високого порядку. Однак його застосування виявляється досить простим лише для рівнянь до п'ятого порядку, оскільки з ростом порядку складність обчислень значно збільшується.

Згідно з цим критерієм умови стійкості формуються наступним чином.

Якщо всі коефіцієнти характеристичного рівняння $T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0$ будуть додатні при додатному знаку, всі корені матимуть від'ємні дійсні частини. Це станеться, якщо головний визначник Гурвіца $\Delta_2 > 0$ і всі його діагональні мінори будуть більше нуля. Після підстановки значень коефіцієнтів та сталих часу, отримаємо:

$$0,023p^3 + 1,515p^2 + p + 12 = 0.$$

$$\Delta_2 := \left| \begin{pmatrix} 1.515 & 12 \\ 0.023 & 1 \end{pmatrix} \right|$$

$$\Delta_2 = 1.239$$

З огляду на те, що головний визначник $\Delta_2 = 1,239 > 0$, обчислений за правилом визначення визначників Гурвіца, і всі коефіцієнти мають додатні значення, можемо зробити висновок, що система є стійкою за критерієм Гурвіца.

4.3.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначається на основі амплітудно-фазової частотної характеристики стійкої відкритої системи (рис. 4.5). Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо складається лише з стійких динамічних ланок (не більше однієї інтегруючої ланки). Якщо розімкнута система автоматичного керування є стійкою, тоді для стійкості замкнутої системи є необхідною і достатньою умовою те, щоб АФХ розімкнутої системи не зазначала точку з координатами $(-1, j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ .

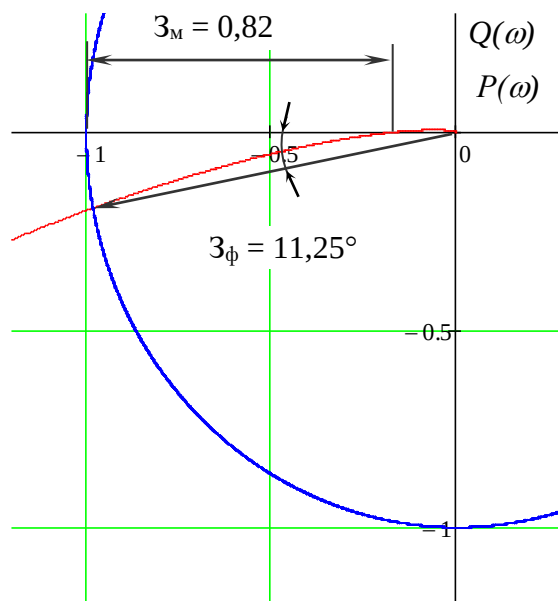


Рисунок 4.5 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Отже, отримуємо: за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем $Z_M = 0,82$; за фазою – $Z_\phi = 11,25^\circ$.

4.3.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_3 , оскільки його можна легко змінювати, підбираючи коефіцієнт підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k_0 k_2 k_3 k_4 = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_3 :

$$K(p) = - \frac{(T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p)}{k_0 k_2 k_4}$$

Якщо підставити $p = j\omega$ та виділити дійсну і уявну частини цього виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = - \frac{(-j T_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0) \omega^2 + j \omega)}{k_0 k_2 k_4} = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_2 k_4} + j \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_2 k_4}.$$

$$P(\omega) = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_2 k_4}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_2 k_4}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру k_3 при зміні частоти від $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 4.6).

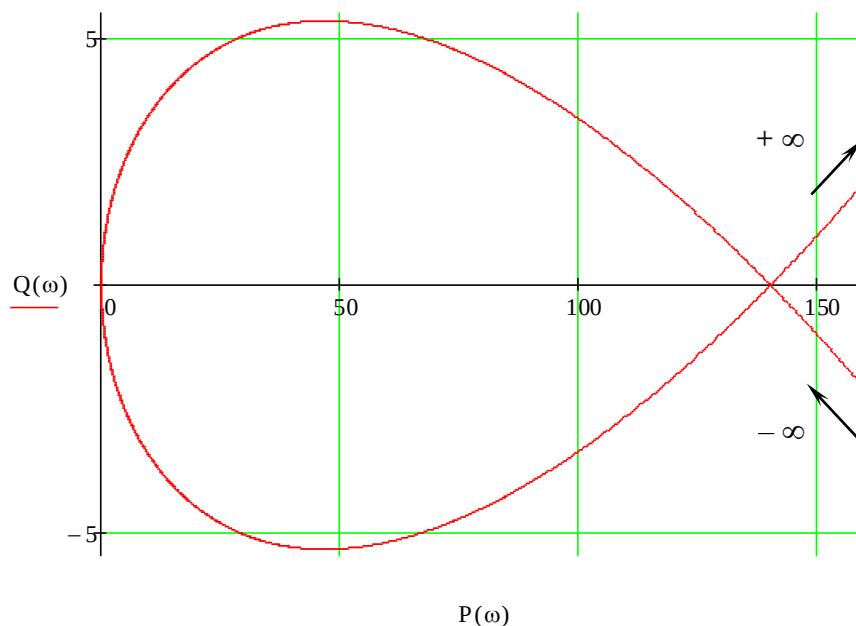


Рисунок 4.6 – D-розбиття в площині параметру k_3

У стійкій системі всі корені розташовані ліворуч від уявної осі. При обході цієї осі від $-\infty$ до $+\infty$, ділянка стійкості також буде розташована ліворуч від отриманої кривої. Для зручності визначення цієї ділянки можна накласти штриховку на криву зліва під час переміщення від $-\infty$ до $+\infty$. З отриманої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_3 , яке в даному випадку становить $k_{3\text{кр}} = 140$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача $k_3 = 25$ знаходиться в межах зони стійкості, що означає, що для подальших розрахунків можна залишити це задане значення параметра.

4.4 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка ефективності регулювання замкнутої САР включає в себе визначення запасу стійкості (за модулем і фазою) та частоти зрізу. Для цього будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, забезпечуючи їх взаємне розташування (рис. 4.7).

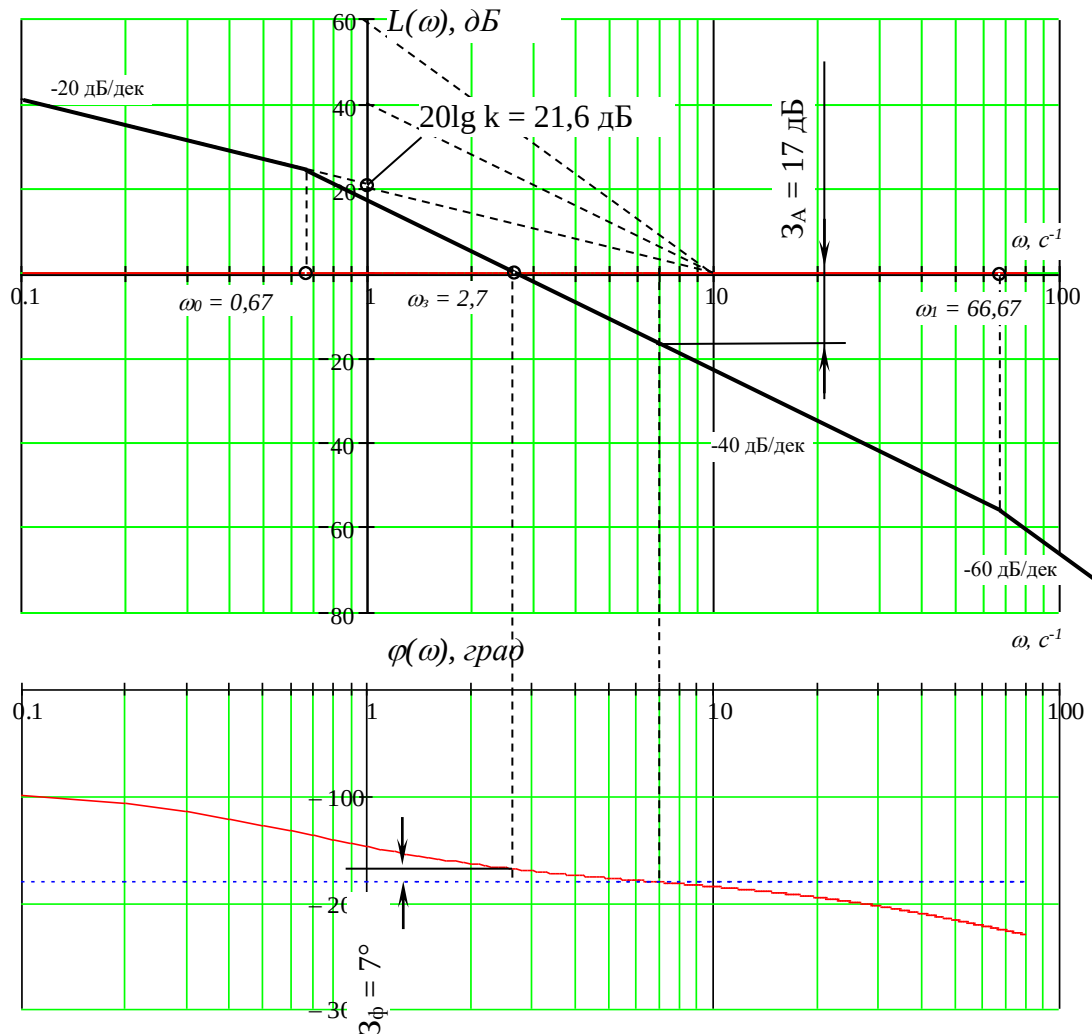


Рисунок 4.7 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Ці побудовані характеристики дають змогу визначити наступні параметри: частоту зрізу, яка становить $\omega_z = 2,7 \text{ с}^{-1}$, що в свою чергу дозволяє визначити час реакції системи у жорстких умовах, який складає приблизно $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 2,3 \text{ с}$; запас стійкості за амплітудою, який складає близько $3_A \approx 17 \text{ дБ}$; запас стійкості за фазою, який приблизно становить $z_\phi \approx 7^\circ$.

4.5 Побудова перехідного процесу вихідної системи

Регульована величина у часі при введенні одиничного ступінчастого сигналу до системи характеризується таким виразом

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (4.2)$$

Підставивши відповідні числові значення, отримаємо наступний графік (рис. 4.8).

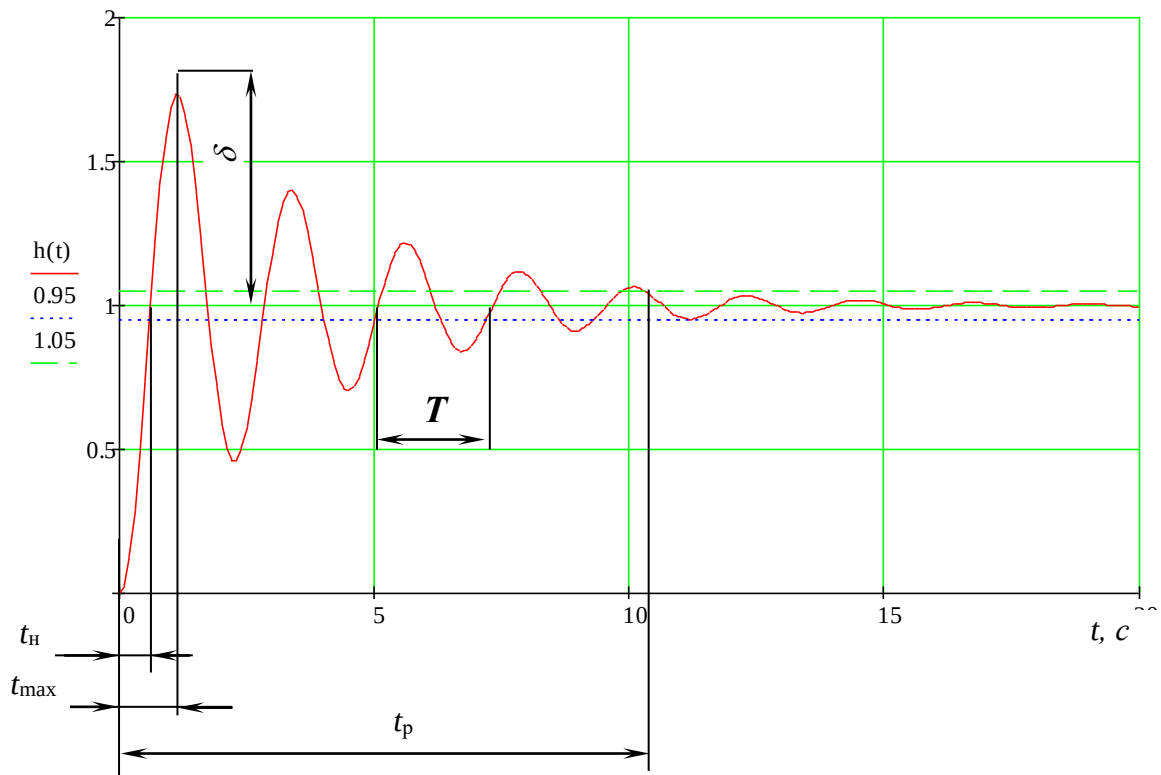


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу вихідної системи

З аналізу графіка можна зробити висновок, що перехідний процес характеризується коливальними коливаннями з постійним періодом.

4.6 Визначення прямих показників якості вихідної системи

З аналізу перехідного процесу можна визначити наступні основні критерії якості САР:

- час регулювання приблизно $t_p \approx 10,3$ с, представляє період часу від моменту введення вхідного впливу до того, як система увійде в зону подвійного запасу стійкості 2Δ . Цей параметр залежить від ефективності та кількості динамічних ланок у головному контурі. Оскільки до системи висуваються строгі вимоги, час регулювання приймається рівним $t_p = 2,3$ с, зазначений з ЛАЧХ розімкнутої системи, щоб застосувати ще більш жорсткі умови;

- частота коливань складає $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2,7 \text{ с}^{-1}$, де $T = 2,3$ с – період коливань;

- перший максимум досягається за $t_{\max 1} = 1,1$ с;
- час наростання перехідного процесу складає $t_n = 0,6$ с – це час, необхідний для досягнення вихідної величини усталеного значення;
- відсоток перерегулювання складає $\delta = 73,4$ %;
- перехідний процес включає в себе чотири коливання ($n = 4$);
- декремент затухання перехідного процесу вказує на його затухання і дорівнює $d = 1,84$, що представляє відношення відхилень між сусідніми коливаннями.

Відповідно до вимог до системи, час регулювання для проведення аналізу та синтезу зменшується на 30 % від отриманого значення, тобто $t_p = 1,61$ с.

4.7 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

Критерії синтезу для розгляду САР такі: час регулювання $t_p = 1,61$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 25\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30° . Для синтезу САР потрібно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ передбачає кілька етапів.

При роботі в області низьких частот процес будування аналогічний до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Зокрема, проводиться асимптота з нахилом - 20 дБ/дек через точку з координатами $20 \lg k = 21,6$ дБ.

Побудова в області середніх частот є ключовою, оскільки в цьому діапазоні визначається найбільш відповідальна асимптота. Тут формується ЛАЧХ за заданими значеннями перерегулювання та тривалості перехідного процесу. Для наближення реального процесу до оптимального за швидкодією, нахил середньочастотної асимптоти обрано -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу ω_z (точки перетину ЛАЧХ з віссю частот) виконується на основі нерівності $\omega_{z\min} \leq \omega_z \leq \omega_{z\max}$. Для відповідності вимогам до якості системи, важливо, щоб ω_z було менше, ніж частота зрізу $\omega_{z\max}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати та величиною керуючого ступінчастого сигналу. Крім того, ω_z повинно перевищувати $\omega_{z\min}$ та враховувати задане значення максимального перерегулювання δ_m та часу регулювання t_p . За відомим значенням δ_m використовуючи криву $\delta = f(P_{z\max})$ номограми [1] визначаємо відповідне значення $P_{z\max}$. Після цього, по значенню $P_{z\max}$, використовуючи іншу криву $t_p = f(P_{z\max})$ знаходимо значення $\frac{3\pi}{t_p}$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення часу регулювання $t_p = 1,61$ с і вирішуємо отримане рівняння, щоб знайти частоту зрізу $\omega_{z\min} = 5,85 \text{ с}^{-1}$.

Вибрану частоту зрізу $\omega_z = 6 \text{ с}^{-1}$ (трохи збільшену), відображаємо на графіку (рис. 4.9). Потім будуємо асимптоту середніх частот, прокладаючи її через точку ω_z на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дек .

За відомим значенням $P_{\text{зmax}} = 1,2$ дійсної частотної характеристики, визначаємо мінімальне значення $P_{\text{зmin}}$ за допомогою наближеного співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $P_{\text{зmin}} = 1 - P_{\text{зmax}} = -0,2$.

Для забезпечення потрібного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі потрібно подовжити середньочастотну асимптоту в обидва боки на певну величину. Запаси стійкості визначаються за допомогою номограм $L(\omega) = f(\varphi)$, де P_z є постійною, що визначається коловими діаграмами, а P_z відображає значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Таким чином, з номограми знаходимо криві, що відповідають $P_{\text{зmax}} = 1,2$ і $P_{\text{зmin}} = -0,2$. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Для знаходження запасу стійкості по амплітуді ми проводимо горизонтальні дотичні до цих кривих і вимірюємо значення на осі ординат, $L_1 = 15 \text{ дБ}$, $L_2 = -15 \text{ дБ}$. Таким чином, потрібно подовжити середньочастотну асимптоту вліво і вправо до значень L_1 та L_2 на вісі ординат, а потім з'єднати її з сусідніми ділянками.

Запас стійкості по фазі γ можна визначити, проводячи вертикальні дотичні до кривих $P_{\text{зmax}} = 1,2$ і $P_{\text{зmin}} = -0,2$ і вимірюючи значення кута в градусах від дотичної до лінії -180° . У даному випадку $\gamma = 45^\circ$.

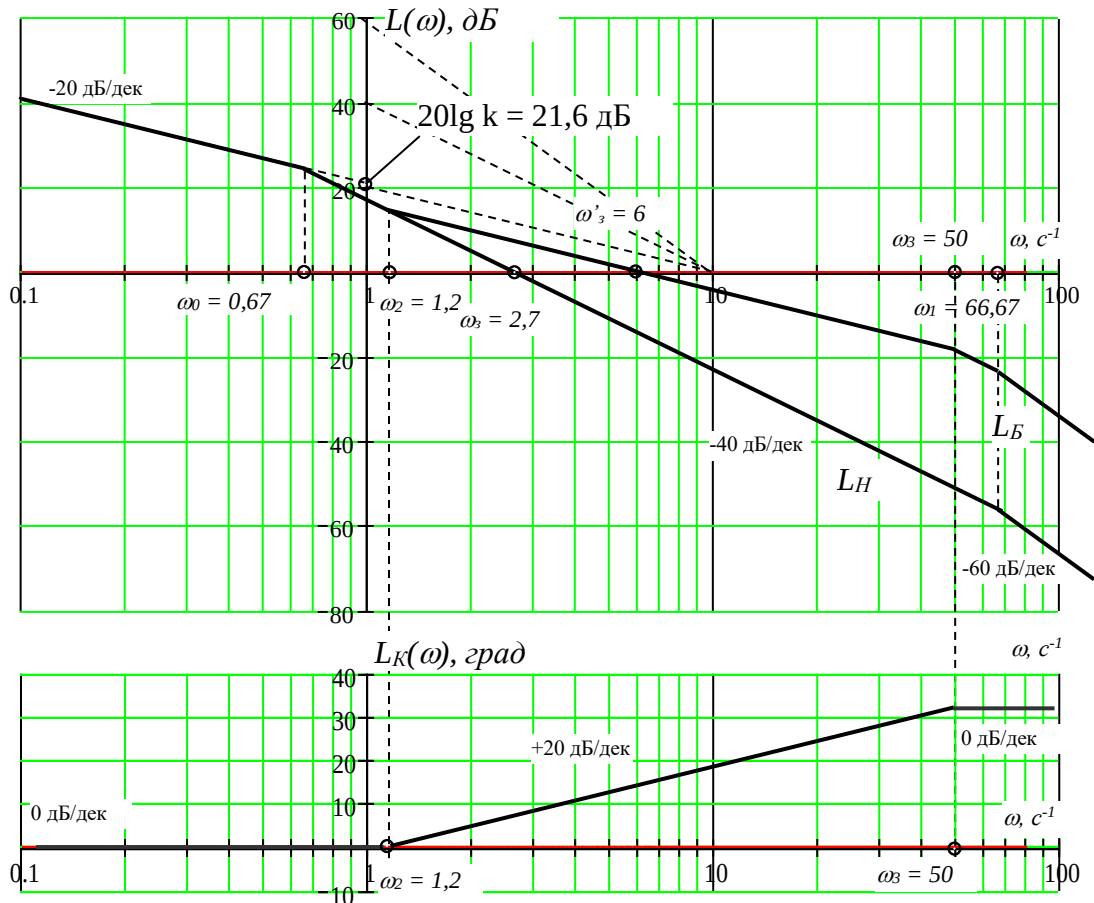


Рисунок 4.9 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ корегуючого пристрою

4.8 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

Визначаємо ЛАЧХ коректуючого пристрою як різницю між бажаною та незмінною ЛАЧХ: $L_K(\omega) = L_B(\omega) - L_H(\omega)$ (рис. 4.9). На основі цієї форми ЛАЧХ коректуючого пристрою, обираємо його схему (рис. 4.10).

У загальному вигляді передаточна функція такого чотириполюсника може бути виражена як:

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

де $T_2 = 1/\omega_2 = 1/1,2 = 0,83$ с; $T_3 = 1/\omega_3 = 1/50 = 0,02$ с.

Після підстановки в загальне рівняння значень сталих часу, отримаємо передаточну функцію коректуючого пристрою:

$$W_{кл}(p) = \frac{1 \cdot (0,83p + 1)}{(0,02p + 1)}$$

Розраховуємо значення параметрів R_1 , R_2 , C для 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 визначення номіналів елементів коректуючого пристрою, прийнявши $C = 2 \times 10^{-6} = 2$ мкФ, отримано такі значення опорів:

$$R_1 = T_2 / C = 0,83 / 2 \times 10^{-6} = 0,415 \times 10^6 = 415 \text{ кОм.}$$

$$\text{Далі, оскільки } k = T_3 / T_2 = 0,02 / 0,83 = 0,024 \text{ і } k = \frac{R_2}{R_2 + R_1},$$

$$R_2 = \frac{k R_1}{1 - k} = \frac{0,024 \cdot 0,415 \times 10^6}{1 - 0,024} = 10,2 \times 10^3 \approx 10 \text{ кОм.}$$

Оберемо стандартні значення опорів: $R_1 = 430$ кОм, $R_2 = 10$ кОм.

Обрана коректуюча ланка є активним чотириполісником. Щоб забезпечити коефіцієнт передачі $k_k = 1$, потрібно взяти $R_{зв.з} = R_1 + R_2 = 440$ кОм, але для вибору стандартних значень опорів оберемо $R_{зв.з} = 430$ кОм.

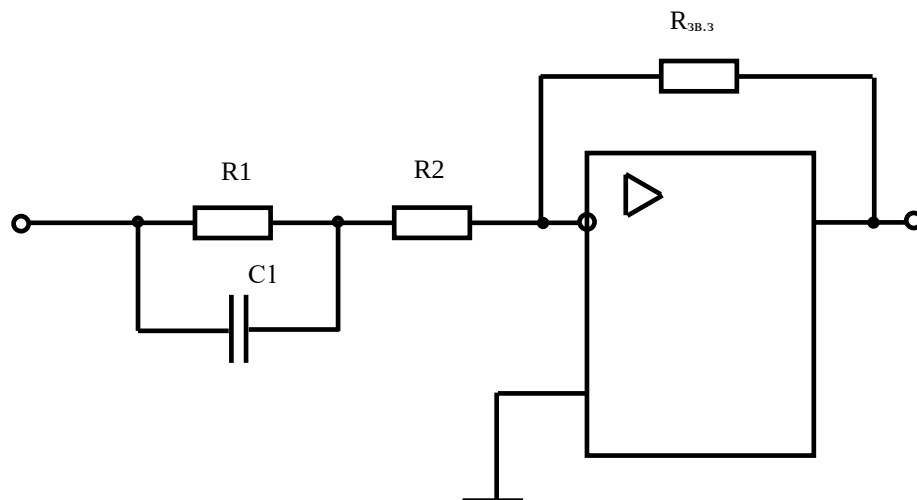


Рисунок 4.10 – Схема коректуючого пристрою

4.9 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (4.3)$$

Після заміни $p = j\omega$, можемо виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики (рис. 4.11).

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot T_2 \omega ((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0 T_3)\omega^3) + k(T_1 T_0 T_3 \omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k)}{(T_1 T_0 T_3 \omega^4 - (T_0 + T_1 + T)\omega^2 + k)^2 + ((1 + kT_2)\omega^5 - T_1(T_0 + T_1 + T_0 T_3)\omega^3)^2}$$

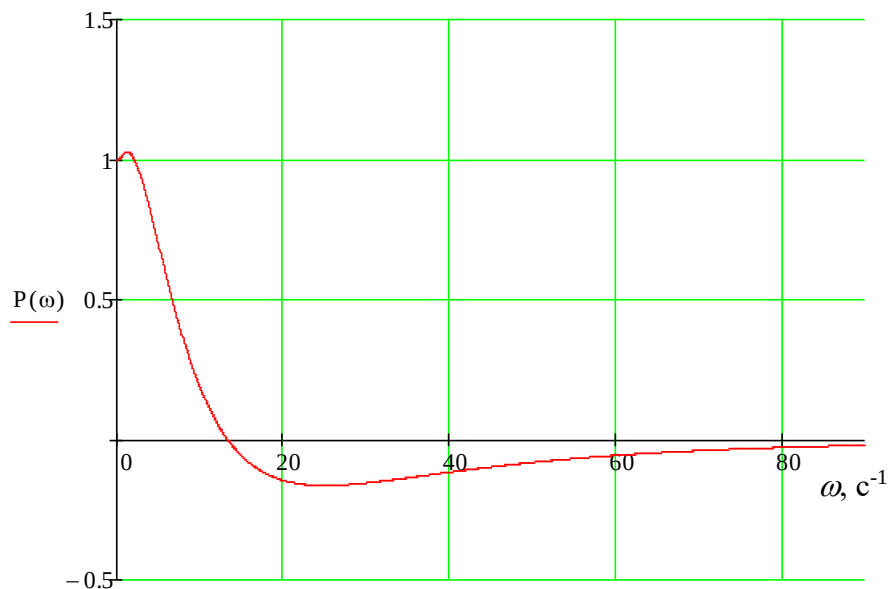


Рисунок 4.11 – Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР для температури повітря в приміщенні (рис. 4.12).

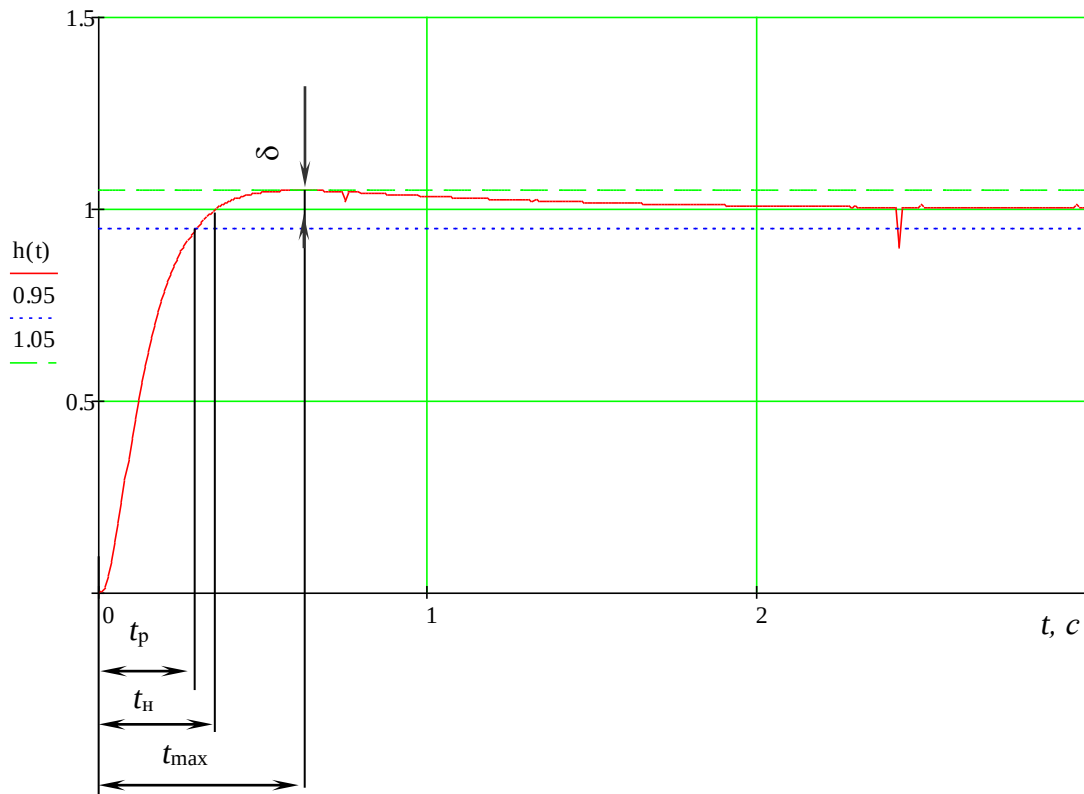


Рисунок 4.12 – Графік перехідного процесу системи, скоректованої шляхом синтезу

4.10 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З отриманого перехідного процесу можна визначити такі основні показники якості САР:

- перерегулювання становить $\delta = 4,93 \%$;
- час регулювання складає $t_p = 0,29$ с;
- час наростання перехідного процесу t_n дорівнює $0,35$ с;
- час досягнення першого максимуму t_{max} становить $0,62$ с;
- за характером кривої видно, що перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням.

Отже, використання отриманого виразу передаточної функції коректуючого пристрою гарантує відповідність вимогам щодо якості системи.

5 РОЗРОБКА СХЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональні схеми автоматизації є ключовим технічним документом, який визначає функціонально-блокову структуру окремих вузлів автоматичного контролю, управління і регулювання технологічного процесу, а також оснащення об'єкта управління приладами та засобами автоматизації.

При розробці функціональних схем автоматизації технологічних процесів потрібно вирішувати наступні завдання:

- безпосередній вплив на технологічний процес для його керування;
- отримання первинної інформації про стан технологічного процесу та обладнання;
- стабілізація технологічних параметрів процесу;
- контроль і реєстрація технологічних параметрів та стану обладнання.

Функціональні завдання автоматизації зазвичай виконуються за допомогою технічних засобів, які включають: відбірні пристрої, засоби отримання первинної інформації, засоби представлення та передачі інформації обслуговуючому персоналу, а також комбіновані, комплектні та допоміжні пристрої.

Результатом складання функціональних схем є:

- підбір основних технічних засобів автоматизації, які найбільше відповідають вимогам та умовам роботи;
- визначення приводів виконавчих механізмів регулюючих і запірних органів технологічного обладнання, керованих автоматично або дистанційно;
- вибір методів вимірювання технологічних параметрів;
- розміщення засобів автоматизації на щитах, пультах, технологічному обладнанні та трубопроводах тощо, а також визначення способів представлення інформації про стан технологічного процесу і обладнання.

Базуючись на досвіді проектування систем управління та автоматизації, можна сформулювати кілька загальних принципів, яких слід дотримуватися при розробці функціональних схем автоматизації:

- повинна зберігатися можливість розширення функцій управління;
- при розробці функціональних схем автоматизації та виборі технічних засобів слід враховувати: тип і характер технологічного процесу, умови пожежної та вибухової небезпеки, агресивність довкілля тощо;
- потрібно враховувати відстань від місць встановлення датчиків, допоміжних пристроїв, виконавчих механізмів, приводів машин і запірних органів до пунктів управління та контролю, а також необхідну точність і швидкодію засобів автоматизації;
- схема повинна відповідати певному рівню науково-технічних розробок та мати можливість модернізації й розвитку;
- також необхідно враховувати параметри та фізико-хімічні властивості вимірюваного середовища;
- система автоматизації технологічних процесів повинна базуватися на серійно випущених засобах автоматизації та обчислювальної техніки.

Слід прагнути до використання однотипних засобів автоматизації, віддаючи перевагу уніфікованим системам, які відзначаються простотою з'єднання, взаємозамінністю та зручністю розміщення на щитах управління. Використання однотипної апаратури дає значні переваги при монтажі, наладці, експлуатації, забезпеченні запасними частинами тощо:

- вибір засобів автоматизації, що використовують допоміжну енергію (електричну, пневматичну або гідравлічну), визначається умовами пожежної та вибухонебезпеки об'єкту, агресивністю довкілля, вимогами до швидкодії, дальності передачі сигналів інформації та управління тощо;
- якщо функціональні схеми автоматизації не можуть бути побудовані виключно на основі серійної апаратури, під час проектування видаються відповідні технічні завдання на розробку нових засобів автоматизації;

– кількість приладів, апаратури управління і сигналізації, що встановлюються на оперативних щитах і пультах, повинна бути обмеженою. Надлишок апаратури ускладнює експлуатацію, відволікає увагу обслуговуючого персоналу від спостереження за основними приладами, що визначають хід технологічного процесу, а також збільшує вартість установки та терміни монтажних і налагоджувальних робіт.

Доцільніше розміщувати прилади і засоби автоматизації допоміжного призначення на окремих щитах, розташованих у виробничих приміщеннях поблизу технологічного устаткування.

На основі вказаних вимог була розроблена функціональна схема автоматизації процесу, яка представлена у графічній частині проекту (02.00).

На нижній частині схеми вказано розміщення пристроїв за їхнім розташуванням на місці, а також подано рядки вхідних і вихідних модулів мікропроцесорного контролера.

Вибір приладів здійснюється з урахуванням умов експлуатації пристрою, його простоти, надійності та актуальності [6].

5.2 Розробка принципів схем системи

Принципові схеми визначають повний асортимент приладів [18], апаратів та пристроїв (а також їх зв'язки), які впливають на вирішення завдань управління, регулювання, захисту, вимірювання та сигналізації. Ці схеми служать основою для розробки інших проектних документів, таких як монтажні таблиці щитів і пультів, схеми зовнішніх з'єднань тощо. Залежно від складності проектування, різні ланцюги можуть бути відображені на одному або декількох кресленнях, або ж для кожного з ланцюгів можуть бути розроблені окремі схеми, наприклад, принципів електричних схем управління, сигналізації тощо. Зазвичай схеми створюються для систем (об'єктів), які перебувають у вимкненому стані. Проте у випадках необхідності можуть зображуватися окремі елементи схем у конкретному робочому положенні, яке відображається на полі креслення.

При проектуванні систем автоматизації технологічних процесів, зазвичай створюються принципові електричні схеми для окремих автономних елементів, установок або ділянок системи, яку потрібно автоматизувати. Використовуючи ці схеми, у потрібний момент складають принципові електричні схеми, що охоплюють всі складові частини, установки або агрегати, і забезпечують повне уявлення про зв'язки між усіма елементами управління, блокування, захисту і сигналізації цих установок або агрегатів. У всіх випадках, крім відповідності вимогам до системи управління, кожна схема повинна гарантувати високу надійність, простоту та економічність, зрозумілість дій у випадку аварійних режимів, зручність в роботі та обслуговуванні, а також чітке оформлення.

Принципові схеми зазвичай створюються без точного дотримання масштабу, і реальне просторове розташування елементів системи автоматизації, як правило, не узгоджується або, у разі необхідності, приблизно враховується.

Враховуючи рекомендації, було розроблено принципову схему для системи автоматизації процесу, яка подана у графічній частині проекту з кодом (04.00).

Розглянемо принципову схему.

САР температури в гідробаку. Для підтримки стабільної температури в гідробаку використовується датчик температури ТСМУ Метран 274 (1-1). Сигнал з цього датчика передається на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал подається на електрогідравлічний перетворювач Remosa (1-2). Далі сигнал подається на гідравлічний виконавчий механізм (1-3), який забезпечує керування регулюючим органом (1-4) для контролю витрати масла в процесі виробництва.

САР температури на подачу. Для підтримки стабільної температури в трубопроводі використовується датчик температури ТСМУ Метран 274 (2-1). Сигнал з цього датчика передається на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал подається на електрогідравлічний перетворювач Remosa (2-2). Далі сигнал подається на

гідравлічний виконавчий механізм (2-3), який керує регулюючим органом (2-4) для контролю витрати масла у поршневих насосах.

САР температури внизу контейнера. Для підтримки стабільної температури в контейнері використовується датчик температури ТСПУ Метран 276 (10-1). Сигнал з цього датчика передається на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал подається на електропневматичний перетворювач МТМ810 (10-2). Далі сигнал подається на пневматичний виконавчий механізм (10-3), який керує регулюючим органом (10-4) для контролю витрати газу на нагрів.

САР температури вверху контейнера. Для збереження сталої температури в контейнері застосовується датчик температури ТСПУ Метран 276 (9-1), що передає сигнал на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал подається на електропневматичний перетворювач МТМ810 (9-2). Далі сигнал передається на пневматичний виконавчий механізм (9-3), який управляє регулюючим органом (9-4) для контролю витрати газу на нагрів.

САР рівня в гідробаку. Для забезпечення сталого рівня в колоні синтезу використовується датчик рівня Метран -100-ДД (3-1). Сигнал з цього датчика надходить на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал подається на електрогідравлічний перетворювач Remosa (3-2). Далі сигнал передається на гідравлічний виконавчий механізм (3-3), який контролює регулюючий орган (3-4) для управління витратою масла в гідробак.

САР переміщення прес-штемпеля. Для стабілізації переміщення в гідравлічному пресі використовується датчик переміщення ЛІР-9 (5-1), сигнал з якого подається на модуль аналогового введення контролера. Після обробки контролером (через модуль аналогового виводу) сигнал передається на електрогідравлічний перетворювач Remosa (5-2). Далі сигнал надсилається на гідравлічний виконавчий механізм (9-3), який контролює регулюючий орган (9-4) для регулювання витрати масла в розподільники.

САР притиску контейнера до матриці. Для підтримки стабільного тиску в гідравлічному пресі використовується датчик тиску [7] Sitrans DSIII (4-1), звідки сигнал подається на модуль аналогового введення контролера. З контролера (за допомогою модуля дискретного виводу) сигнал надсилається на електрогідравлічний перетворювач Remosa (4-2). Потім сигнал подається на гідравлічний виконавчий механізм (4-3), який контролює регулюючий орган (4-4) для регулювання витрати масла в розподільники.

САР відділення прес-залишку. Для підтримки стабільного тиску в гідравлічному пресі використовується датчик тиску Sitrans DSIII (7-1), звідки сигнал надсилається на модуль аналогового введення контролера. Після цього сигнал, відправлений з контролера через модуль дискретного виводу, надходить на електрогідравлічний перетворювач Remosa (7-2). Наступним кроком є передача сигналу на гідравлічний виконавчий механізм (7-3), який зв'язаний з регулюючим органом (7-4) для управління витратою масла в розподільники.

САР переміщення пулера пили. Для забезпечення стабільної швидкості переміщення на пулері пилки використовується інкрементальний енкодер DDS36 (12-1). Сигнал з цього енкодера подається на перетворювач частоти DanfosVLT208 (12-2), після чого сигнал надходить в модуль аналогового виводу контролера і модуль дискретного виводу. Таким чином забезпечується регулювання швидкості руху пулера пилки.

САР переміщення пулера натягнення. Для забезпечення стабільної швидкості переміщення пулера натягнення використовується інкрементальний енкодер DDS36 (13-1). Сигнал з цього енкодера подається на перетворювач частоти [11] DanfosVLT208 (13-2), після чого сигнал надходить в модуль аналогового виводу контролера і модуль дискретного виводу. Це дозволяє регулювати швидкість руху пулера натягнення.

САР переміщення пуллера натягнення. Для регулювання швидкості обертання вентиляторів використовується перетворювач частоти [11] DanfosVLT208 (14-2). Після цього сигнал направляється в модуль аналогового

виводу контролера і модуль дискретного виводу, що дозволяє налаштовувати швидкість обертання вентиляторів.

САК температури втулки. Для вимірювання температури втулки (8-1) використовується датчик температури ТСПУ Метран 276. Після цього сигнал подається на вхід модуля аналогового введення контролера.

САК температури профілю. Для вимірювання температури профілю на виході (11-1) використовується пірометр М67П. Після цього сигнал подається на вхід модуля аналогового введення контролера.

САК наявності полум'я в 1-му пальнику. Для вимірювання наявності полум'я в 1-му пальнику (6-1) використовується датчик ФДА-0.3. Після цього сигнал подається на вхід модуля аналогового введення контролера.

САК наявності полум'я в 2-му пальнику. Для вимірювання наявності полум'я в 2-му пальнику (15-1) використовується датчик ФДА-0.3. Після цього сигнал подається на вхід модуля аналогового введення контролера.

5.3 Обґрунтування вибору контролера

Основними критеріями вибору промислового контролера виступають:

- надійність, що означає безвідмовну роботу та постійне живлення;
- простота монтажу, налаштування і експлуатації;
- швидкодія, тобто швидкість обробки даних;
- можливість розширення системи;
- забезпечення зв'язку з ЕОМ верхнього рівня;
- простота завантаження та зміни робочої програми;
- вартість.

Найбільш відповідним для врахування цих критеріїв є програмований логічний контролер (ПЛК) з каркасною архітектурою, що включає вбудований процесорний модуль, блок живлення та інтерфейс для зв'язку з зовнішніми пристроями.

Контролер Simatic S7 - 300, відповідає цим критеріям.

SIMATIC S7-300 - це програмовані контролери з модульною конструкцією, що працюють за допомогою природного охолодження. Можливість створення розподілених структур управління та привітний користувальницький інтерфейс роблять ці контролери економічними для рішення широкого спектру завдань автоматизації в промисловому виробництві. Контролер SIMATIC S7-300, маючи модульну структуру, включає такі компоненти:

1. Модулі центральних процесорів (CPU), які можуть відрізнятися за продуктивністю, обсягом пам'яті, наявністю вбудованих входів-виходів та спеціальних функцій, а також за наявністю або відсутністю комунікаційних інтерфейсів, в залежності від складності задачі, яку потрібно вирішити.

2. Сигнальні модулі (SM), які служать для зчитування та виведення дискретних і аналогових сигналів з різними електричними та часовими параметрами.

У рамках лінійки контролерів SIMATIC S7-300 доступні різні типи центральних процесорів (CPU) з різними характеристиками:

1) CPU 312 IFM - призначений для автоматизації невеликих установок з або без використання аналогових входів/виходів.

2) CPU 313 - використовується для автоматизації установок з підвищеними вимогами до об'єму програми управління.

3) CPU 314 - призначений для автоматизації процесів, які потребують великого обсягу програми управління та швидкого її виконання.

4) CPU 314 IFM - компактний центральний процесорний модуль з вбудованими входами і виходами, призначений для автоматизації процесів з високими вимогами до об'єму програми управління і її швидкості обробки.

5) CPU 315/315-2 - DP, CPU316, CPU318 - призначені для вирішення складних завдань автоматизації з великим об'ємом програми управління та для побудови систем управління з децентралізованою структурою на базі PROFIBUS.

У контролері використовується модуль блоку живлення (PS), який дозволяє живити контролер від мережі змінного струму з напругою 120 або 230В.

Контролери відрізняються високою стійкістю до ударних і вібраційних навантажень та мають стандартне виконання з робочим діапазоном температур від 0 до 60°C.

Конфігурація ПЛК, включаючи вибір типу та кількості модулів, базується на функціональній схемі автоматизації. У нашому випадку система автоматичного керування процесом включає наступні контури:

- регулювання:

а) регулювання переміщення прес-штемпеля (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

б) регулювання температури в гідробаку (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

в) регулювання температури в трубопроводі (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

г) регулювання рівня в гідробаку (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

д) регулювання притиску контейнера до матриці (1 аналоговий вхідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

е) регулювання притиску контейнера до матриц (1 аналоговий вхідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

ж) регулювання відділення залишків пресу від матриці (1 аналоговий вхідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

з) регулювання притиску контейнера до матриці (1 аналоговий вхідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

и) регулювання температури нижньої частини контейнера (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

к) регулювання температури верхньої частини контейнера (1 аналоговий вхідний канал і 1 аналоговий вихідний канал);

- контролю:

а) контроль температури втулки (1 аналоговий вхідний канал);

б) контроль температури профілю після виходу з матриці (1 аналоговий вхідний канал);

в) контроль наявності полум'я в 1-ій верхній частині контейнера (1 аналоговий вхідний канал);

г) контроль наявності полум'я в 2-ій нижній частині контейнера (1 аналоговий вхідний канал);

д) контроль запалювання пальника 1 (1 дискретний вихідний канал);

е) контроль запалювання пальника 2 (1 дискретний вихідний канал);

ж) контроль підключення 4 поршневих насосів (4 дискретних вхідних канали і 4 дискретних вихідних канали);

з) контроль підключення 2 компресорів для подачі природного газу та повітря (2 дискретних вхідних канали і 2 дискретних вихідних канали);

и) контроль регулювання переміщення пулера пили (1 аналоговий вихідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

к) контроль регулювання переміщення пулера натягнення (1 аналоговий вихідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

л) контроль регулювання швидкості охолодження за допомогою вентиляторів (1 аналоговий вихідний канал і 1 дискретний вихідний канал);

Отримали наступне: 12 аналогових вхідних каналів, 13 дискретних вихідних каналів, 9 аналогових вихідних каналів і 6 дискретних вхідних каналів.

Обирання технічного обладнання

Для контролю та налаштування технологічних параметрів було обрано програмований логічний контролер S7-300, оскільки він має кілька переваг:

- можливість модульної комплектації, що дозволяє вибирати необхідні компоненти;
- використання засобів програмування на мові Step-7, яка є простою та зручною для розробки програм;
- можливість забезпечення зв'язку між процесорами за допомогою мережі Profibus DP;
- відносна доступність у плані покупки та обслуговування.

Серед центральних процесорів S7-300 було обрано CPU NET і CPU 315/315-2 - DP (Profibus DP - слейв), які мають технічні характеристики, описані у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Блоки, що входять до складу контролера

Тип модуля	Характеристика	Опис
1	2	3
315/315-2 - DP	Об'єм пам'яті 15,2, пам'ять даних 6, максима число входів/виходів 1184	Базова плата зі вбудованим ЦП на 5 слотів
SM331	8 каналів введення, вх. струм 4-20мА, 0-20мА; живлення від 24 В.	Блок аналогового введення
SM332	8 каналів виводу, вх. струм 4-20мА, 0-20мА; живлення від 24 В.	Блок аналогового виводу
SM321	8 каналів введення, вх. струм 4-20мА, 0-20мА; живлення від 24 В.	Блок дискретного введення
SM322	8 каналу виводу, вих. струм 2А на канал, живлення 55мА від 5В	Блок дискретного виводу
LOGO	Вихідна напруга 24 В,	Блок живлення

5.4 Розробка схем з'єднань і підключення зовнішніх електричних проводок

Схема з'єднань зовнішніх проводок - це комплексна схема, яка відображає електричні та трубопровідні зв'язки між приладами та системами автоматизації, встановленими на технологічному обладнанні, як на самому обладнанні, так і на електричних щитах. Також ця схема включає в себе підключення проводів до приладів та електричних щитів. Їй присвоєно найменування "Схема з'єднань зовнішніх проводок".

Схеми з'єднань і підключення зовнішніх проводок розробляються на основі наступних джерел і матеріалів:

- принципів, електричних, пневматичних та гідравлічних схем;
- схем автоматизації технологічних процесів;
- таблиць з'єднань і підключення проводок щитів і пультів;
- експлуатаційній документації на прилади та засоби автоматизації, що

використовуються в проекті.;

- креслень розташування технологічного, сантехнічного, енергетичного та іншого обладнання, а також трубопроводів з відповідними засобами контролю та приймання, а також будівельних креслень з усіма необхідними конструкціями для прокладання зовнішніх проводок, такими як заставні та приварні конструкції, тунелі, канали, отвори та інші елементи.

Схеми з'єднань і підключення створюються без урахування масштабу на одному або декількох листах формату не більше А1.

Фактичне просторове розташування пристроїв і елементів схеми може бути або повністю ігнороване, або приблизно враховане.

Товщина ліній, які відображають пристрої і елементи схеми, включаючи кабелі, дроти та труби, повинна бути в межах від 0,4 до 1 мм.

Схеми повинні містити мінімальну кількість згинів і перетинів проводів.

ВИСНОВКИ

Результатом проведення бакалаврської роботи є розроблена автоматизована система управління процесом виробництва алюмінієвих профілів. Для досягнення основної мети роботи були проаналізовані процеси, які відбуваються в контейнері. За допомогою пакету MatLab був розрахований і синтезований контур управління температурою нагріву заготовки.

Була розроблена функціональна схема для автоматизації процесу виробництва алюмінієвих профілів. Вибрані технічні засоби автоматизації, які дозволяють проводити контроль і управління технологічним процесом з високою точністю і швидкістю. Для цього використовується пристрій віддаленого збору даних і управління Siemens з серії S300.

Були розроблені наступні елементи: функціональна схема, принципова електрична схема, схема зовнішніх з'єднань та схема розташування обладнання. Також були визначені передаточні функції для розімкнутої та замкнутої систем, а також характеристичне рівняння для замкнутої системи. Були побудовані АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ для розімкнутої системи з метою визначення стійкості замкнутої системи та запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова. Також була побудована область стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра. За допомогою ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи оцінено якість регулювання замкнутої САР.

Було проведено аналіз перехідного процесу замкнутої системи та визначено основні показники якості САР. Час регулювання системи був визначений як один із ключових критеріїв для синтезу САР. На основі вимог, що ставилися до системи, була побудована бажана ЛАЧХ розімкнутої оптимальної системи. Здійснено синтез корекційного пристрою САР за логарифмічними характеристиками частоти. Також була побудована крива перехідного процесу синтезованої САР та визначені основні показники якості, які відповідають вимогам, поставленим до системи.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

САК – система автоматичного керування;
САР – система автоматичного регулювання;
КВП – контрольно-вимірювальні прилади;
КОК – контрольно-обчислювальний блок;
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
ЛСА – локальна система автоматики;
АЦП – аналого-цифровий перетворювач;
ВБ – вимірювальний блок;
МК – мікроконтролер;
ОР – об'єкт регулювання;
АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;
ПП – підсилювач потужності;
ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;
ЛФЧХ – логарифмічна фазова-частотна характеристика;
ТУ – технічні умови;
РЕА – радіоелектронна апаратура;
ІМС – інтегральна мікросхема;

Список літератури

1. Данченко В.Н., Миленин А.А., Головко А.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология: учеб. пособие /Данченко В.Н., Миленин А.А., Головко А.Н. – Днепропетровск: ДНВП "Системные технологии", 2001. – 448 с.
2. Руководство по эксплуатации гидравлического прессы фирмы Comettall. утв. СООО «Алюминтехно» текст по состоянию на 1 декабря 2010 г. — Verona, Italy, 2004. — 600 с.
3. Танатар, А.И. Элементы автоматики и их динамические свойства /А.И. Танатар. — Киев: Техніка, 1975. — 232 с.
4. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин. ч.1. - Київ: “Вища школа”, 1993. – 320 с.
5. Основи проектування одночерв’ячних екструдерів: навч. посіб. / І.О. Мікульонюк, О.Л. Сокольський, В.І. Сівецький, Л.Б. Радченко. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 200 с.
6. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії : монографія / Л. Б. Радченко. — К. : ІЗМН, 1999. — 220 с.
7. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.]. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 337 с.
8. Гончар В.Ф., Тищенко Л.П. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. – К.: Вища школа, 1989. – 343 с.
9. Жулай Є.Л. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній. – К., 2002.
10. 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.

11. Мікульонок І.О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І.О. Мікульонок. — К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. — 265 с.
12. Танатор А. И. Элементы промышленной автоматике и их динамические свойства. – К.: Техніка, 1975. – 232 с.
13. Мікульонок І. О. Переробка вторинної сировини екструзією: монографія / І.О. Мікульонок, Л.Б. Радченко. — К.: ІВЦ «Вид-во „Політехніка”», 2006. — 184 с.
14. 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.
15. 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.
16. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. - Киев: “Наукова думка”, 1981. – 940 с.