

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри АВП
к.т.н., доцент
_____Олександр ДІДИК
«__» _____ 2024 р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему
«Автоматизація процесу регулювання температури
подрібненої маси при виробництві томатного соку»

Виконав здобувач вищої освіти
IV курсу групи АК-20
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
_____Сергій МАРТИНЕНКО
«__» _____ 2024 р.

Керівник проекту
професор, канд.техн.наук
_____Віктор КАЛІЧ
«__» _____ 2024 р.

Рецензент
_____Петро ПЛІШКОВ
«__» _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Зміст

Вступ	3
1 Огляд технології виробництва томатного соку.....	4
1.1 Технологія виробництва томатного соку	5
1.2 Контроль якості готової продукції.....	10
2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі	13
2.1 Аналіз АСУТП виробництва томатного соку.....	13
2.2 Вибір та аналіз елементів системи автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі	21
3 Проектування системи автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі	27
3.1 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння	27
3.2 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості.	28
3.3 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи	30
3.4 Побудова перехідного процесу замкнутої системи	31
3.5 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу	32
3.6 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкістю системи по вимогам, які пред'явлені до неї.....	33

3.7 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР	37
3.8 Визначення прямих показників якості синтезованої САР	38
4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання	40
4.1 Визначення періоду дискретизації.....	40
4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора	42
4.3 Опис принципової схеми регулятора.....	44
Висновки.....	52
Список літератури	53

Вступ

Виробництво безалкогольних напоїв включає як періодичні, так і безперервні процеси. Однак періодичні процеси можуть обмежувати ефективність обладнання та ускладнювати їх управління. Розробка й впровадження безперервних технологій виробництва є ключовим завданням для підвищення продуктивності і ефективності виробництва.

Розвиток автоматизації виробництва безалкогольних напоїв відбувається за двома напрямками: перший - це автоматизація періодичних процесів з активним використанням систем контролю і регулювання якості, а другий - це оптимізація управління безперервними процесами та створення комплексних автоматизованих систем управління. Всі процеси, як періодичні, так і безперервні, мають загалом послідовну структуру. З точки зору динамічних характеристик керованих процесів, відділи приготування безалкогольних напоїв відрізняються невеликою інерційністю та різним часом перебування реакційних середовищ у різних апаратах (від 1 хвилини у фільтрі-пресі на лінії газованих напоїв до 60 хвилин у варильній колоні на лінії приготування купажного сиропу), що значно менше, ніж у кондитерському виробництві (наприклад, тривалість перебування шоколадних мас у коншмашині може сягати 3 діб).

Процеси виробництва безалкогольних напоїв, з точки зору їх динамічних властивостей, є складними системами з одно- і багатомісними об'єктами, що мають транспортні затримки і розподілені параметри. У виробництві безалкогольних напоїв не використовуються великі буферні резервуари між відділеннями; замість цього існують рециркуляційні потоки та система зворотного зв'язку між відділеннями через обслуговуючий персонал.

Головними метою управління цими процесами є автоматизований контроль та регулювання ключових параметрів, а також виконання операцій дозування рідинних та твердих складових, а також транспортних операцій, як дистанційно, так і автоматично.

1 Огляд технології виробництва томатного соку

Томати - це плоди однорічних трав'янистих рослин, які походять з Південної Америки. Ця культура є однією з найпопулярніших серед овочевих культур. Томати містять цукри, такі як фруктоза та глюкоза, а також кислоти у концентрації від 0,4% до 0,8%, пектинові речовини від 0,1% до 0,2%, а також вітаміни С, групи В, РР і К.

Господарсько-ботанічні види томатів відрізняються формою (округлі, плоскі, подовжені, сливоподібні), розміром (дрібні - до 60 г, середні - до 100 г, великі - понад 100 г) та забарвленням плодів (зелені, молочні, бурі, рожеві, червоні). Томати можуть дозрівати під час зберігання та транспортування. Їх поверхня може бути гладкою або ребристою, а кількість насіннєвих камер - мало- або багатокамерними. Також вони поділяються за термінами дозрівання на ранні, середні та пізні. Найпопулярніші сорти включають Новачок, Волгоградський, Чудо ринку, Донецький, Будьонівка, Маяк, Сливовидний, Факел, Подарунок та інші.

Вимоги до якості томатів передбачають їх класифікацію на екстра, перший і другий класи. Плоди мають бути свіжими, цілими, чистими, здоровими, щільними, з плодоніжкою або без неї, неушкодженими шкідниками, незрілими, без механічних пошкоджень і сонячних опіків. Для першого класу допускаються плоди з незначними дефектами форми і забарвлення, з легкими натисками від тари, незначною пом'ятістю і зарубцьованими тріщинами не більше 1%, для другого класу - не більше 3%. Екстра клас вимагає червоного або рожевого кольору плодів, тоді як для першого і другого класів допускаються бурі плоди, які реалізуються окремо. Стандартами визначається також розмір плодів: екстра - не менше 4 см, перший і другий - не менше 3 см.

Основна харчова цінність томатів полягає у їх високому вмісті вітамінів. Ця рослина добре зберігається у консервах і соку, а також має корисні дієтичні властивості.

1.1 Технологія виробництва томатного соку

Існують різні види томатного соку: натуральний, з сіллю та з вітаміном С. Томатний сік класифікується на екстра, вищий і перший сорти в залежності від його якості. Сок з сіллю виготовляється з використанням першого сорту томатів, при цьому використовується кухонна сіль, яка має виварний стандарт, і має відповідати якості не нижче вищого сорту.

Для виробництва томатних продуктів необхідно використовувати плоди з високим вмістом сухих речовин (не менше 4,5% для натурального соку) та значною кількістю пектину. Сировина повинна відповідати таким вимогам: томати мають бути дозрілими, однорідними за ступенем зрілості, кулястої форми з гладкою поверхнею та невеликою кількістю насіння. Для продовження періоду переробки, важливо мати в господарстві томати різних термінів дозрівання.

Технологічна схема виробництва томатного соку наведена на рисунку 1.1.

Під час виробництва томатного соку томати піддаються миттю в елеваторних або вентиляторних мийках, а потім за допомогою стрічкових або роликів транспортерів видаляють гнилі, запліснявілі, недозрілі, пошкоджені і заражені хворобами плоди.

Томати сортують вручну в залежності від ступеня зрілості, використовуючи роликові конвеєри або фотоелектронні сортувачі (де червоні томати поглинаються водою, а незрілі, більш клітковинисті,

впливають). Для виготовлення соку обирають зрілі томати червоного кольору. Після сортування томати подрібнюють на дробарках з відокремленням насіння. Насіння витрібують, сушать і використовують як насінницький матеріал.

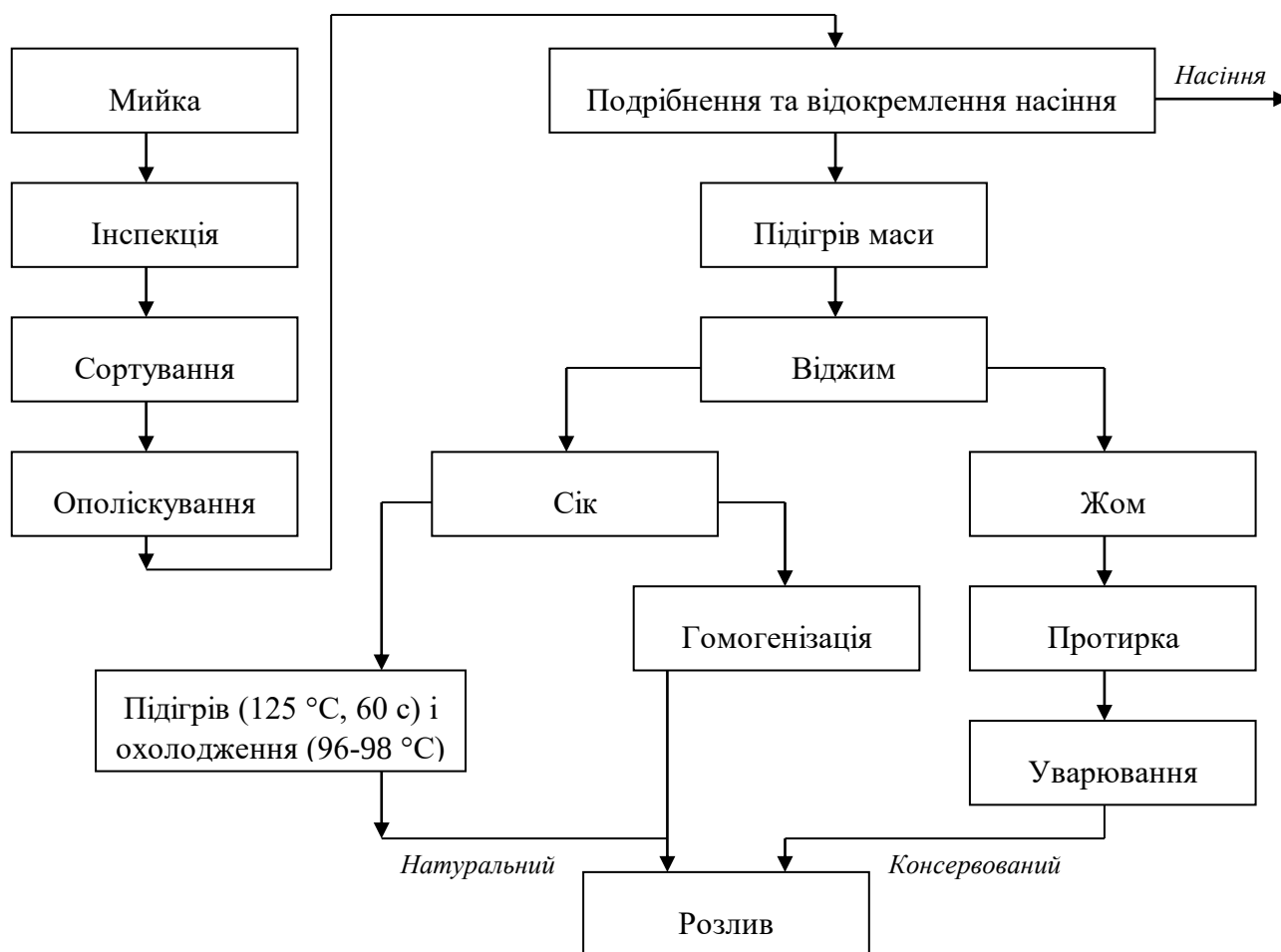


Рисунок 1.1 – Етапи виробництва томатного соку

Після подрібнення томатів їх проціджують через сита з отворами діаметром 5 мм для видалення грубих домішок, таких як плодоніжки, зелені частини плодів та інші небажані елементи. Отриману масу нагрівають до температури 75 ± 5 °C намагаючись зробити це якнайшвидше.

Швидкий нагрів томатної маси досягається шляхом впускання пари безпосередньо в масу. Це дозволяє зберегти в'язкість соку на рівні

95% від початкового, хоча можливе розбавлення конденсатом пари. Для нагрівання томатної маси найчастіше використовують багатоходові теплообмінники у формі труб.

З нагрітої томатної маси отримують сік за допомогою шнекових пресів (екстракторів), центрифуг або протиральних машин. На екстракторах використовують сита з отворами діаметром від 0,5 до 0,7 мм, з яких виходить сік у кількості 55-65% від маси томатів. Решту відходів подрібнюють на протиральній машині, утворюючи пюре, яке використовується для виробництва концентрованих томатних продуктів.

У процесі виробництва соку використовують протиральні машини з внутрішніми рухливими перегородками. Спочатку нагріту томатну масу пропускають через протиральну машину з ситом, яке має отвори діаметром 3 мм. Потім масу поділяють на фракції за допомогою машини з рухомими перегородками. Перша фракція, яка складає 55-65%, використовується для виробництва томатного соку, а друга, що становить 31-39%, використовується для виробництва концентрованих томатних продуктів.

Для процесу виробництва використовуються фільтруючі центрифуги, у яких ротор має сита з круглими отворами діаметром від 0,06 до 0,1 мм або щілиновидні з розмірами 0,06x2,2 мм. В результаті екстракції соку вихідна кількість складає 70-80%. Відходи після виділення соку використовуються для виробництва томатного пюре і томатної пасти.

При виробництві соку з додаванням солі до свіжої маси змішують 0,6-1,0% солі у спеціальному змішувачі з механічною мішалкою. Після цього масу піддають гомогенізації в плунжерних гомогенізаторах за тиску 8-10 МПа та температурі 65 ± 15 °C для запобігання розшаровування. Готовий продукт проходить процес деаерації при

залишковому тиску 0,015-0,035 МПа для видалення повітря, яке може залишатися в тканинах плодів та потрапити в сік під час переробки.

Томатний сік є одним з небагатьох кислих продуктів, в яких можуть розвиватися термостійкі мікроорганізми, такі як безспорові (молочнокислі бактерії) і спороносні (сапрофіти), а також бактерії, що можуть викликати ботулізм. Це призводить до необхідності стерилізації томатного соку при температурах вище 100 °С. Після деаерації масу піддають стерилізації в потоці за допомогою багатоходових трубчастих теплообмінників при температурі 125 °С протягом 70 секунд з автоматичним регулюванням температури. Після цього сік охолоджують до температури 97 ± 1 °С перед фасуванням.

Сік, який підлягає концентруванню, отримують виключно за допомогою фільтруючих центрифуг, що забезпечує більш тонку і гомогенну консистенцію. Гомогенізацію, деаерацію і стерилізацію в потоці проводять точно так само, як при виробництві звичайного томатного соку. Після стерилізації масу направляють на процес концентрування. Для цього використовують трьох- або двокорпусні випарні прямоточні установки. Проте перші корпуси цих установок, де випарювання відбувається при температурах вище 90 °С і низькому вакуумі, не використовують для концентрування соку, оскільки висока температура негативно впливає на колір і смак продукту. Сік концентрують до вмісту 40% сухих розчинних речовин.

Під час виробництва концентрованого томатного соку з додаванням солі, після концентрування сік змішують з сіллю та екстрактами прянощів у спеціальному змішувачі з паровою сорочкою та мішалкою. Отриманий концентрований продукт, з або без солі, підігрівають до 85-87 °С і фасують у скляну або металеву тару, після чого закупорюють і стерилізують в автоклавах при температурі 100 °С або в неперервнодіючих пастеризаторах. При застосуванні

пастеризаторів сік фасують в тару за температури 93 ± 2 °C і пастеризують при температурі 95-96 °C. Після розведення до потрібної щільності його вживають як напій. На основі концентрованого томатного соку також готують різноманітні змішані овочеві соки і напої.

Для упаковки концентрованого томатного соку використовують скляні та металеві лаковані банки 0,65 дм³, а також алюмінієві туби об'ємом не перевищують 0,2 дм³.

Згідно з побажаннями споживачів, томатний сік упаковують у скляні або металеві лаковані банки об'ємом не перевищують 1 літр, а також у пляшки об'ємом не більше 0,5 літра.

Томатний сік також можуть фасувати в упаковку з полімерних комбінованих матеріалів об'ємом не більше 50 літрів, а також у напівжорстку тару з полімерних або комбінованих матеріалів, включаючи ті, що базуються на алюмінієвій фользі, об'ємом не перевищують 50 літрів.

Маркування, транспортування і зберігання концентрованих томатних продуктів і соку виконуються відповідно до стандартів, таких як ГОСТ 13799-81 та інші відповідні нормативні документи та технічні вимоги, що застосовуються для інших овочевих і фруктових продуктів.

Томатний сік, упакований у скляні банки і пляшки, має гарантійний строк зберігання 3 роки, а у металевих банках - 2 роки. Сок з додаванням вітаміну С гарантовано зберігається протягом 1 року з моменту виготовлення.

Внаслідок життєдіяльності мікроорганізмів, томатний сік може піддатися процесу скисання, набрати характерний фенольний смак, а його зовнішній вигляд може погіршитися через утворення осаду або плаваючих пластівців сіро-білого або жовто-зеленого кольору, які є скупченнями бактеріальних тіл. Для забезпечення високої якості продукції необхідно використовувати дозрілі та здорові томати, строго

дотримуватися технологічних процесів виробництва і забезпечувати санітарні умови на всіх етапах виробничого процесу.

1.2 Контроль якості готової продукції

Виробництво томатного соку проводиться згідно зі стандартом ГОСТ 52183-2003, дотримуючись технологічних інструкцій та рецептур і забезпечуючи виконання санітарних норм.

Кожна партія томатного соку піддається перевірці якості за допомогою органолептичних та загальних фізико-хімічних параметрів, за винятком масової частки м'якоті. Також оцінюється об'єм соку в кожній споживчій упаковці, якість упакування та правильність маркування.

Масова частка м'якоті перевіряється у випадку відмінностей у візуальній оцінці томатного соку за органолептичними параметрами.

Виробник узгоджує з територіальними центрами Держсанепідслужби періодичність контролю токсичних елементів, мікотоксинів, патуліну, нітратів, пестицидів і радіонуклідів.

Партія томатного соку, яка не відповідає вимогам стандарту щодо соку першого сорту за всіма показниками, крім безпеки, може бути реалізована за згодою споживача як продукція без певного сортування.

Після збовтування соку томатного натурального проводять визначення його якості за органолептичними показниками. Щодо концентрованого томатного соку, органолептичні показники визначаються після його розведення дистильованою водою у співвідношенні 1:5. Якщо на стінках ємності, де приготований сік, присутнє біле кільце не мікробіологічного походження, то сік оцінюється як продукт першого сорту.

Під час зберігання соку допускається утворення осаду, який легко можна видалити після його змішування чи струшування.

Томатний сік має відповідати наступним фізико-хімічним вимогам: кількість сухих речовин, визначена рефрактометром, повинна відповідати характеру та сортуванню продукту.

Вимоги безпеки для томатопродуктів, встановлені відповідно до Санітарних правил і норм СанПіН 2.3.2.1078-01.

Оцінка якості консервів із фруктів та овочів включає перевірку наявності необхідних документів, відбір проб, перевірку відповідності маркування та упаковки вимогам ТНПА, а також аналіз органолептичних, фізико-хімічних, мікробіологічних показників та показників безпеки. Консерви із фруктів та овочів підлягають обов'язковій сертифікації, тому, крім товарно-транспортної накладної, для них обов'язкові сертифікат відповідності та протокол випробувань.

Уся партія перевіряється зовнішньо, щоб виявити наявність бомбажа, пошкоджень, вм'ятин, корозії на банках. Для оцінки маркування та стану транспортної тари випадковим чином відбирається зразок, кількість якого залежить від обсягу партії і типу тари відповідно до чинних стандартів.

Для оцінки інформаційної написової марки, стану етикеток і вигляду споживчої тари, необхідно випадковим чином відібрати зразок, кількість якого залежить від кількості одиниць споживчої тари в партії та її об'єму.

Для перевірки маси нетто, вмісту складових частин, а також фізико-хімічних і органолептичних показників, необхідно випадковим чином відібрати зразок з одиниць транспортної тари з продуктом у партії та її об'єму. Зразок формується з точкових проб, що складаються з вмісту споживчої тари, взятих у вибірку для визначення фізико-хімічних показників. Маса зібраного зразка повинна становити не менше 0,5 кг або 0,5 дм³.

Овочі та фрукти повинні бути непошкоджені, без ознак механічних ушкоджень, рівномірні за розміром та формою, чисті, без зморшок або дефектів. Для соків і напоїв вони мають бути перетерті до стану однорідної, непрозорої рідини з рівномірно розподіленою м'якоттю. Для продуктів, які мають пюре або соусну консистенцію, важливо, щоб текстура була однорідною, без грубих часток насіння чи шкірки, із збереженням рівноваги між рідиною та масою.

Смак і аромат повинні бути приємними та характерними для використаних овочів і фруктів, без домішок чи чужорідних запахів або смаків. Для закусочних консервів вони повинні мати характерний смак обсмажених овочів без гіркоти. Колір продукту має відповідати природному кольору використаних інгредієнтів, які були оброблені тепловою обробкою, і повинен бути рівномірним по всій масі продукту.

Недоречна діяльність мікроорганізмів може спричинити скисання томатного соку, надати йому фенольний присмак та змінити його зовнішній вигляд. Для забезпечення високої якості продукту необхідно суворо дотримуватися технологічних режимів виробництва та забезпечувати санітарні умови на всіх етапах технологічного процесу.

2 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі

Харчова промисловість відрізняється специфічними особливостями, зокрема, переважанням неперервно-дискретних та дискретних технологічних процесів у виробництві харчових продуктів. Ці процеси використовуються для обробки сировини, яка швидко псується, з використанням складних фізико-хімічних і біохімічних методів та точної дотримання рецептур з метою збереження якісних та смакових характеристик продукції. Головна мета полягає в забезпеченні стабільної якості виробленої продукції.

Системи автоматизації та управління технологічними процесами (АСУТП) відповідають за збір та обробку інформації для визначення оптимальних керуючих дій на об'єкті управління. У виробництві харчових продуктів, завдяки складності та недостатній деталізації технологічних процесів, значна роль управління залишається за людиною.

Створення та ефективне функціонування автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУТП) має на меті досягнення конкретних техніко-економічних результатів. Ці результати включають зниження витрат на виробництво, забезпечення стабільної якості продукції, розширення асортименту та забезпечення достатньої кількості харчових продуктів для відповіді на попит споживачів, а також поліпшення умов праці для персоналу, що займається обслуговуванням.

2.1 Аналіз АСУТП виробництва томатного соку

Для виготовлення натурального томатного соку з наступною його стерилізацією, томати доставляються у ящиках із зберігання до приймальної частини елеваторної мийної машини І через установку для розвантаження. Ця машина використовується для попереднього миття томатів. Щоб зробити цей

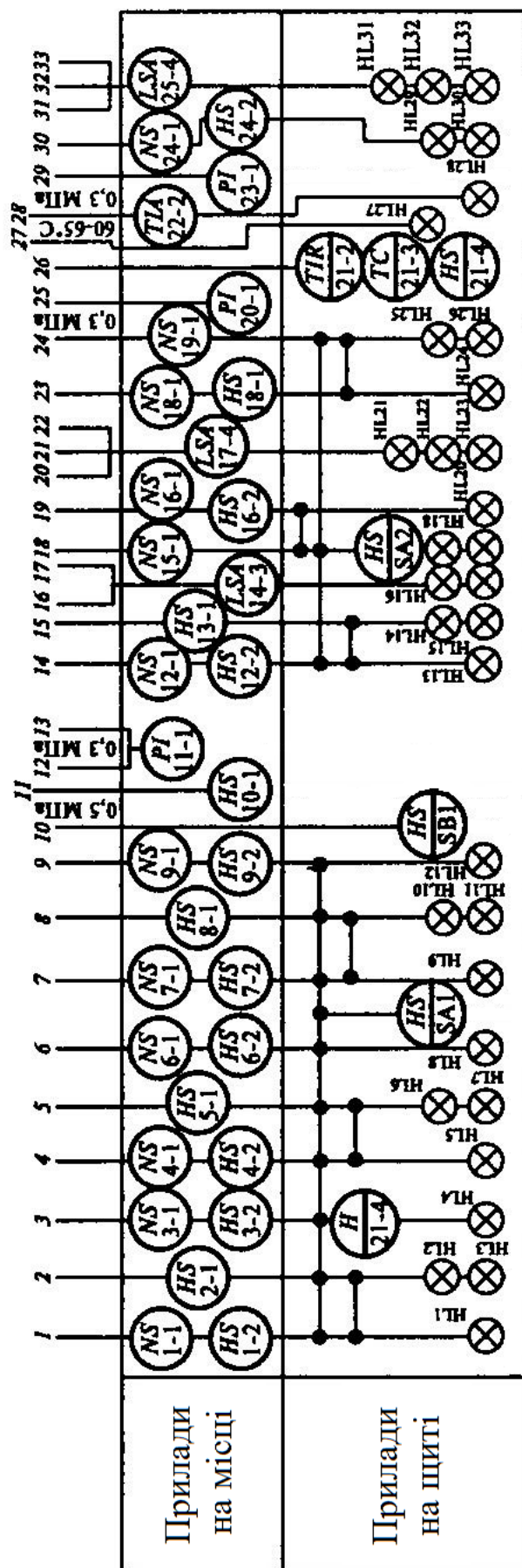
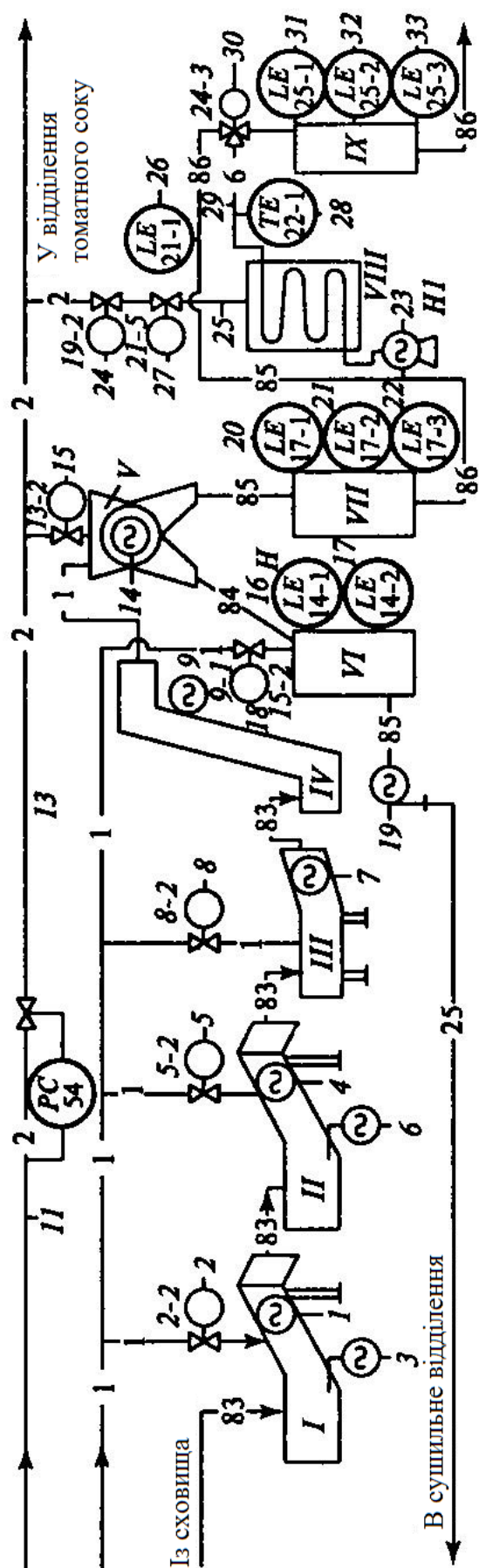


Рисунок 2.1,а – Схема автоматизації виробництва томатного соку

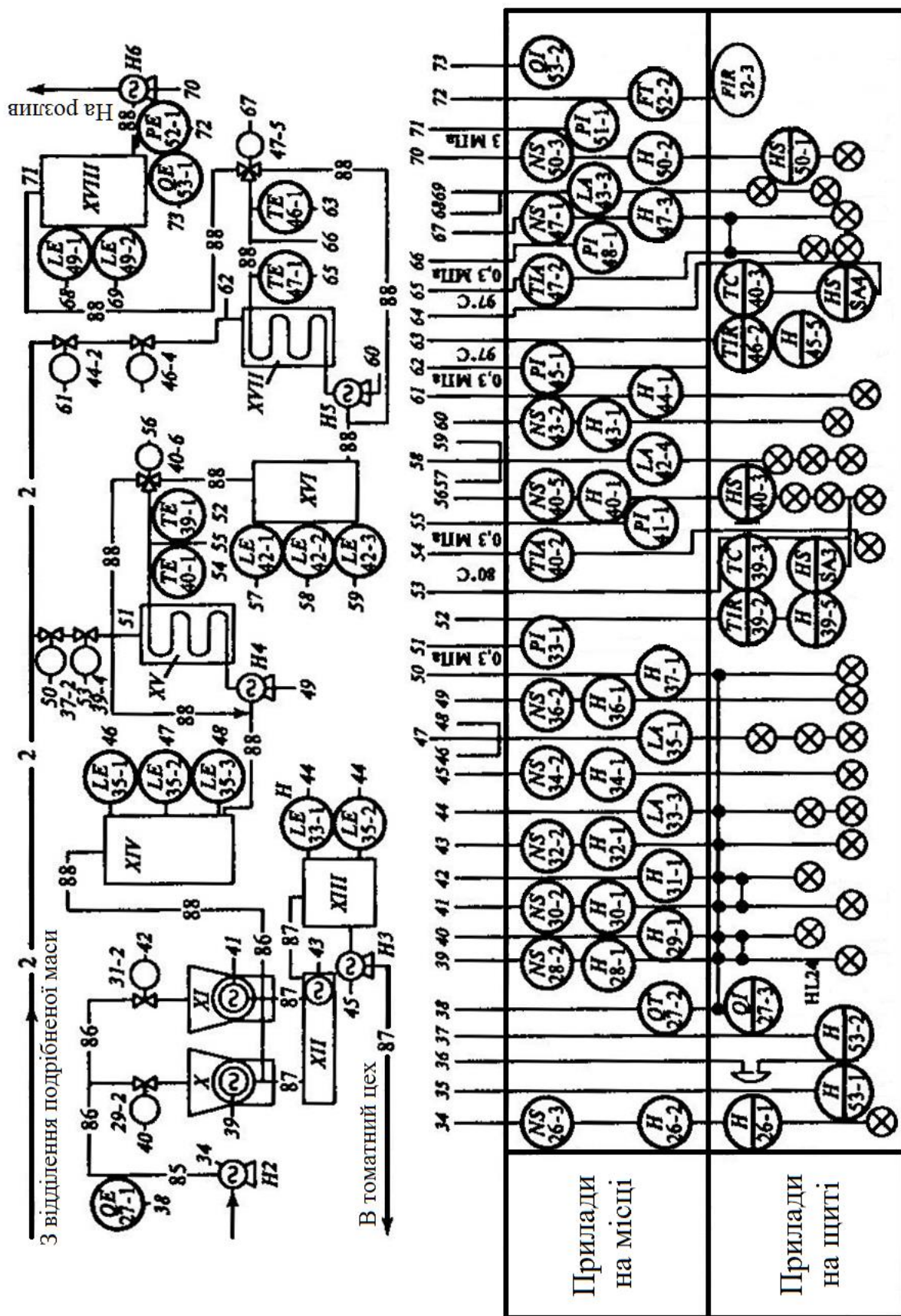


Рисунок 2.1,б – Схема автоматизації виробництва томатного соку

процес більш інтенсивним, вода перемішується повітрям, який подається вбудованим компресором. Після проходження через елеваторну мийну машину плоди продовжують свій шлях на транспортері, де обмиваються струменями чистої водопровідної води. Потім вони надходять до приймальної частини вентиляторної мийної машини II для остаточного миття струменями води. Для підвищення ефективності цього процесу у воду, що заповнює ванну, подають стиснене повітря через труби.

Наступним етапом у процесі приготування томатного соку є відбраковування томатів на інспекційному транспортері III та їх видалення із цеху. Підібрані плоди подаються підйомним транспортером IV в дробарку з відокремлювачем насіння V. Після подрібнення та відокремлення насіння утворена маса направляється в ємність VII, а насіння - у ємність VI, звідки насосом перекачується в сушильне відділення для отримання порошку, який використовується як добавка у корм для худоби. Томатна маса насосом H1 подається в трубчастий підігрівач VIII, де підігрівається до 60-65 °C, і потім насосом H2 через ємність IX направляється в екстрактори X і XI. Якщо подрібнена маса не достатньо нагріта (менше 60 °C), то вона за допомогою рециркуляційного клапана повертається на підігрів.

В екстракторах X і XI проводиться виділення томатного соку. Обидва екстрактора можуть працювати як окремо, так і одночасно, залежно від потреб продуктивності лінії. Відходи з екстракторів подаються на шнек відходів XII, потім в ємність відходів XIII, і за допомогою насоса H3 направляються в томатний цех для приготування томатної пасты. Сік з екстракторів потрапляє в ємність XIV, де частково відстоюється, після чого за допомогою насоса H4 підігрівається до 80-85 °C в підігрівачі XV. Якщо температура соку не досягає заданого рівня, він за допомогою рециркуляційного клапана повертається для додаткового нагрівання. Після підігрівача сік потрапляє в ємність XVI, де проходить

відстоювання, після чого за допомогою насоса Н5 направляється на остаточний підігрів (до 97 °С) в підігрівач XVII. Якщо температура соку після підігрівача нижча, ніж потрібно, він повертається для додаткового нагрівання за допомогою рециркуляційного клапана.

Багатоступінчастий процес підігріву необхідний для уникнення надмірного нагрівання та збереження оптимальної температури соку. Збереження сталої температури вкрай важливе для забезпечення високої якості томатного соку, оскільки зниження температури може призвести до його скисання, а збільшення – до пожовклості та гіркоти. Сік, який пройшов підігрів, потрапляє в ємність XVIII, звідти, за потреби, за допомогою насоса Н6 подається на лінію розливу.

Лінія виготовлення соку включає два основних відділення: відділення для підготовки подрібненої томатної маси та відділення для приготування томатного соку. Схема управління вирішує кілька ключових завдань: керує потоком робочої лінії в блокованому режимі, веде контроль та сигналізацію рівня, температури і тиску в основних точках процесу, регулює тиск пари в магістралі та дозволяє реєструвати обсяг приготованого томатного соку.

Система автоматизації технологічного процесу приготування томатного соку є середньомасштабною РСУ, що включає в себе різноманітні підсистеми: для збору та відображення інформації, автоматичного регулювання, дискретно-логічного управління, а також для забезпечення протиаварійних захистів і блокувань.

Елементами об'єкта управління є наступні пристрої та системи: елеваторна мийна машина 1, вентиляторна мийна машина 2, інспекційний транспортер 3, підйомний транспортер 4, дробарка 5, ємності 6, 7, 9, 14, 16 і 18, підігрівач 8, екстрактори 10 і 11, шнек відходів 12, ємність відходів 13, підігрівач 17.

Основні складові системи включають: три контролери КР-300 з повністю резервованими ресурсами; робочі місця оператора-технолога, керівника відділу та лабораторії, що базуються на комп'ютерах з процесором Pentium I промислового застосування, обладнаних 20-дюймовими моніторами з підвищеним захистом від електромагнітних впливів; мережеве забезпечення - технологія Ethernet на швидкості 10 Мбіт з повністю резервованими засобами; станція архівування з можливістю використання змінних магнітооптичних дисководів (640 Мбайт); сервер баз даних; принтери; програмні засоби пакету Трейс Моуд; всі ці компоненти зберігаються в 19-дюймовій шафі виробництва RITTAL.

Інформаційна місткість АСУТП (див. рис. 2.2 а, б) становить загалом 146 вхідних і вихідних сигналів. З них 35 є контрольованими аналоговими (такими як рівень, температура, тиск, витрата, рН), 78 - контрольованими дискретними (включаючи запірну арматуру), 22 - дискретними керуючими, 3 - контурів регулювання, та 16 - запірної арматури. Протиаварійні заходи та блокування здійснюються з 100%-м резервуванням, зокрема, 35 для аналогових параметрів, 111 для вхідних дискретних, і 173 для вихідних дискретних сигналів. Система управління працює за схемою «гарячого» резервування в трьох наборах.

Динаміка роботи АСУТП.

Максимальні інтервали опитування датчиків на контролері становлять: 100 мікросекунд для дискретного входу та 1 мілісекунду для аналогового входу. Максимальний час реакції на аварійні сигнали варіюється від 20 до 100 мілісекунд при обробці в ланцюгах аварійного захисту на рівні контролера, та до 200 мілісекунд при передачі до пультів оператора. Цикл зміни даних на пульті операторів при 200 динамічних елементах в кадрі коливається від 0,2 до 1,0 секунди, а цикл зміни кадрів - від 0,2 до 1,5 секунди. Мінімальний час реакції на команду оператора

становить 0,2 секунди. Час повного перезапуску складає 30 секунд для системи після відключення живлення та 20 секунд для контролерів після відключення живлення.

Контролер КР-300 має значну інформаційну потужність: він може працювати з 190 аналоговими входами та 304 дискретними входами/виходами. У конкретному випадку використовується лише частина цих можливостей: 35 аналогових входів та 35 аналогових виходів, а також 111 дискретних входів та 173 дискретних виходів. Крім того, на контролері реалізовано 32 контури регулювання, проте використовуються лише 3 з них.

Час безвідмовної роботи контролера становить 75 000 годин (у варіанті з подвійним забезпеченням - 150 000 годин).

Режим управління визначається за допомогою ключів SA1-SA4, які встановлені на пультах ПТК та АРМ технолога, а також через ПТК. Керування електродвигунами лінії у ручному режимі здійснюється за допомогою робочих станцій, що розташовані поруч.

Контроль тиску пари у магістралі проводиться за допомогою диференціальних манометрів, таких як (11-1), (20-1) і (45-1). В підігрівачах подрібненої маси використовуються диференціальні манометри, наприклад (23-1) і (33-1), а в підігрівачах соку XV і XVII - (51-1) і (62-1) відповідно. Після підігрівача соку XVII використовується диференціальний манометр (71-1), що передає сигналізацію на пульти ПТК і АРМ технолога через АЦП (ADAM-5017H) для відображення на моніторі, щоб забезпечити моніторинг стану і роботи обладнання. Стабілізація тиску пари у магістралі виконується через логіко-програмний канал КР-300 (53), який регулює приплив пари залежно від значення тиску. Рівень приготовленої маси в ємностях VI, XIII для насіння і відходів, в ємностях VII і IX для подрібненої маси, а також в ємностях XIV, XVI і XVIII для соку контролюється кондуктометричними

датчиками рівня. Ці дані передаються до електронних сигналізаторів рівня (14, 17, 25, 33, 35, 42 і 49), які відображають граничні рівні інформації на пультах ПТК і АРМ технолога за допомогою АЦП (ADAM-5017H).

Регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі здійснюється за допомогою систем автоматичного регулювання (САР), що включає термоопір TCM і АЦП (ADAM-5017) або модуль (ADAM-5013) (21-1). Отриманий сигнал передається для відображення і реєстрації (на телемоніторі і АЦПУ) (21-2) на пультах ПТК і АРМ технолога, а також на регулюючий канал КР-300 (21-3). Останній контролює виконавчий механізм (21-5), який регулює подачу пари в підігрівач подрібненої маси через клапан. Крім того, на пультах ПТК і АРМ технолога (21-4) передбачено можливість вибору режиму.

Аналогічні САР відповідають за автоматичне регулювання температури соку в підігрівачах XV і XV/II (контурів 39 і 46). Сигналізація про нормовані значення температури подрібненої маси забезпечується за допомогою датчика температури (модуль ADAM-5013) (22-1), сигнал якого подається на регулюючий канал КР-300 (22-2), реєструється за допомогою АЦПУ (на ПТК і АРМ технолога) і сигналізується світловими індикаторами HL27 і HL28, розташованими на пультах ПТК і АРМ технолога. Аналогічна сигналізація відносно температури томатного соку забезпечується після підігрівача XV (контур 40) і XV/II (контур 47).

Для моніторингу загальної витрати готового томатного соку передбачено використання індукційного датчика витрати (52-1) на схемі. Сигнал з цього датчика перетворюється на цифровий сигнал за допомогою нормованого перетворювача і АЦП (ADAM-5017) (52-2), після чого подається на відображення та реєстрацію (на телемоніторі і АЦПУ) (52-3), розташовані на пультах ПТК і АРМ технолога. На цих пультах

також розташовані кнопки SB1, які призначені для перевірки світлової та звукової сигналізації, а також SB2 для припинення звукового сигналу.

2.2 Аналіз та вибір елементів системи автоматичного контролю температури подрібненої маси в підігрівачі

Давайте проаналізуємо контур регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі VIII (зображений на рисунку 2.1). У цій системі автоматизованого управління технологічним процесом виробництва томатного соку застосовується пропорційний закон управління, який втілено у логіко-програмному каналі КР-300. Цей метод забезпечує стабільність регулювання, але ефективність його роботи залишає бажати кращого. Для поліпшення якості регулювання можна розглянути розробку системи автоматичного керування з використанням оптимального регулятора.

У цій системі автоматичного регулювання об'єктом є підігрівач, який контролює температуру подрібненої маси, необхідну для підтримки на певному рівні. Регулювання відбувається шляхом регулювання подачі пари в сорочку підігрівача. Показником успішності цього процесу є температура t_{II}'' продукту в підігрівачі, а метою регулювання є підтримка цієї температури на встановленому рівні.

Температурна залежність t_{II}'' , що виникає в результаті процесу, може бути визначена за допомогою рівняння теплового балансу:

$$G_{II}c_{II}(t_{II}'' - t_{II}') = G_Tc_T(t_T' - t_T''), \quad (2.1)$$

де G_{II} , G_T – представляють собою відповідно розхід продукту і теплоносія; c_{II} , c_T – їх питома теплоємність; t_{II}', t_T' – в рівнянні присутні

температури продукту і теплоносія на вході в теплообмінник; t_T'' - температура теплоносія на виході з нього.

Після вирішення даного рівняння для t_{II}'' , отримаємо:

$$t_{II}'' = (G_T c_T / G_{II} c_{II}) (t_T' - t_T'') + t_{II}' \quad (2.2)$$

Розхід продукту G_{II} визначається іншими технологічними процесами, а не процесом нагріву, тому він не може бути стабілізований та не може бути використаний для корекції регулюючих впливів. Зміни G_{II} можуть спричиняти значні збурення в роботі теплообмінника. Температури t_{II}', t_T' та питомі теплоємності c_{II}, c_T визначаються технологічними умовами інших процесів, тому стабілізація їх під час нагріву неможлива. До незмінних збурень також відносяться зміни температури оточуючого середовища та властивостей теплообмінного елемента через відкладення солей або корозію.

Після аналізу об'єкта регулювання виявлено, що більшу частину збурень неможливо усунути. Тому для параметра регулювання краще використовувати температуру t_T'' , а корекцію робити шляхом зміни розходу G_T .

Запізнювання в роботі теплообмінників, що є об'єктами регулювання температури, свідчать про необхідність ретельного підходу до вибору місця розташування датчика і встановлення закону регулювання. Слід вважати розход теплоносія, його кінцеву та початкову температури, а також тиск контрольними величинами. Адекватне відслідковування цих параметрів необхідне для нормального запуску, налагодження та експлуатації процесу.

Оскільки моделювання процесу теплообміну виявляється вкрай складним, у практиці використовується спрощена модель, яка враховує

питому теплоємність як постійну величину, а функцію передачі об'єкта регулювання представляється у вигляді:

$$W_{op}(p) = \frac{k_o}{p(T_o \cdot p + 1)}. \quad (2.3)$$

Для вимірювання температури в системі автоматизованого управління технологічним процесом використовуються термоперетворювачі опору (ТС). Ці пристрої призначені для вимірювання температури різних середовищ, включаючи тверді, рідкі, газоподібні і сипучі речовини. Термоперетворювачі опору здатні вимірювати температуру як у нейтральних, так і в агресивних середовищах. Вони виготовляються з чутливими елементами з платини (ТСП) або міді (ТСМ).

Термоперетворювач опору (ТС) представляє собою пристрій, який реагує на зміни температури. Він складається з чутливого елемента, який має захисну оболонку, внутрішні з'єднувальні проводи і зовнішні виводи. Ці виводи дозволяють підключати ТС до електричних вимірювальних пристроїв.

Давайте розглянемо більш детально характеристики термоперетворювача опору ТСМ-0295/1, що використовується для вимірювання температури в АСУТП виробництва томатного соку (див. табл. 2.1).

Згідно з таблицею 2.1, доступні п'ять різних варіантів схем підключення цього датчика, що зображені на рисунку 2.2.

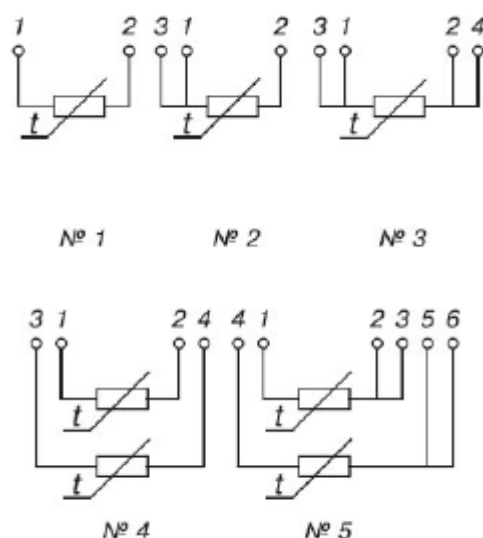


Рисунок 2.2 – Схеми підключення датчику TSM-0295/1

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики TSM-0295/1

Параметри	Значення
НСХ	50П, 100П, 50М, 100М, Pt100
Діапазон вимірювання	-50...+200 °С; -50...+180 °С
Клас допуску	А; В; С
Кількість чутливих елементів	1;2
Схема підключення	1; 2; 3; 4; 5
Довжина монтажно́ї частини	100, 140, 160, 200 мм
Показник теплової інерції	6 с
Умовний тиск	0,4 Па
Матеріал захисного чохла	Цільна труба 12Х18Н10Т
Кліматичні умови	Група виконання ДЗ: -50...+50 °С
Степінь захисту	IP54
Середній наробіток на відмову	15000 годин
Середній строк служби	6 років
<u>Міжповірочний інтервал</u>	2 роки

Передаточна функція цього температурного датчика, яка є аперіодичною ланкою першого порядку, може бути описана таким чином

$$W_{дт}(p) = k_2. \quad (2.4)$$

В якості виконавчого механізму використовується електромагнітний клапан для регулювання подачі гарячої води. Електромагнітний клапан бронзовий 15-Б-859-П призначений для використання як запірний пристрій з дистанційним управлінням на трубопроводах різних систем. Для опису передаточної функції цього виконавчого механізму використаємо наступний підхід.

$$W_{вм}(p) = \frac{k_1}{T_1 \cdot p + 1} \quad (2.5)$$

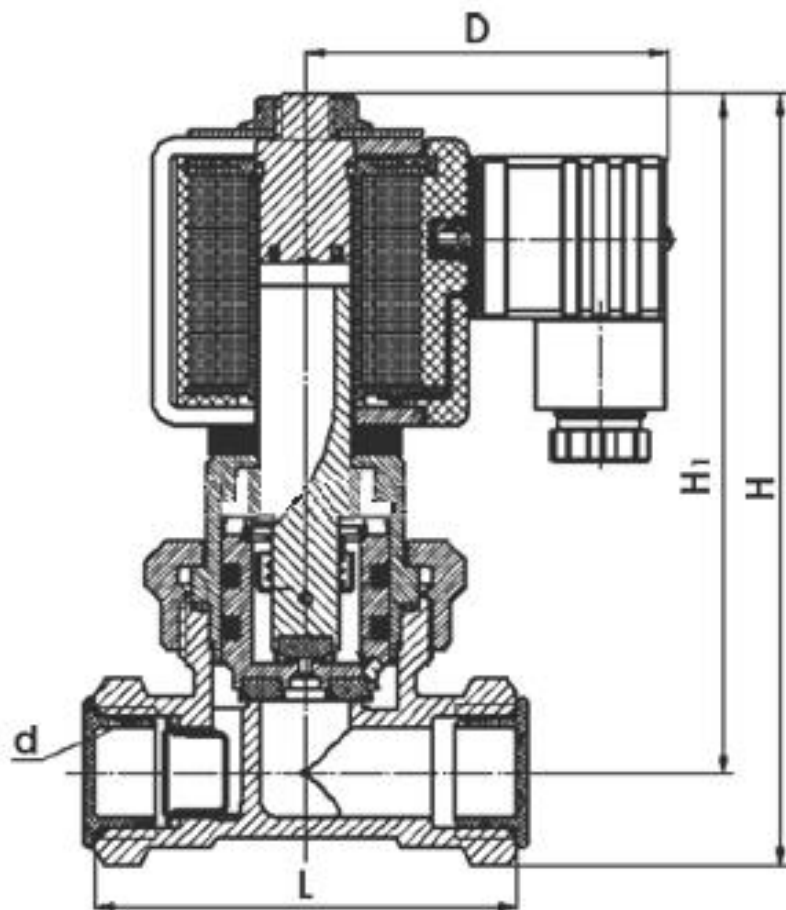


Рисунок 2.3 – Клапан електромагнітний 15-Б-859-П

У системі автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі, електромагнітний клапан може функціонувати в імпульсному режимі. Для цього регулятор повинен генерувати керуючі сигнали для виконавчого механізму у вигляді широтно-імпульсно модульованих сигналів. Точний відсоток заповнення імпульсами в проміжку передачі сигналу буде визначати потрібний розхід пари в сорочку підігрівача.

Після проведення аналізу компонентів системи автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі можна побудувати структурну схему цієї системи (рис. 2.4).

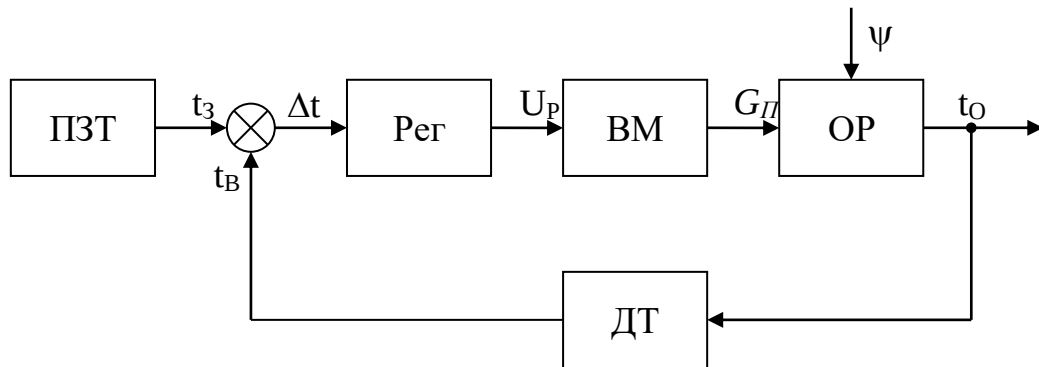


Рисунок 2.4 – Структурна схема САР температури подрібненої маси в підігрівачі

У даній схемі об'єктом регулювання (ОР) є підігрівач, у якому необхідно підтримувати задану температуру. Температура t_o в підігрівачі вимірюється за допомогою датчика (ДТ), і отриманий сигнал цифрується t_b для подальшого порівняння зі значенням t_3 програмованої температури. Різниця між виміряною та програмованою температурою подається на регулятор (Рег), який видає керуючий сигнал U_p для виконавчого механізму (ВМ). В даному випадку виконавчим механізмом є електромагнітний клапан, що регулює подачу пари G_{II} в сорочку підігрівача.

3 Перетворення системи автоматичного контролю температури подрібненої маси в підігрівачі

3.1 Переформулювання визначення передаточних функцій для відкритої та замкнутої систем та характеристичного рівняння.

Для проведення обчислень використовуємо наступні вихідні параметри:

$$T_0 = 1000 \text{ с}; T_1 = 0,06 \text{ с}; k_0 = 8 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{с} / \text{м}^3; k_1 = 1,2 \text{ В} / ^{\circ}\text{C}; k_2 = 1,25 \text{ м}^3 / \text{с} \cdot \text{В}.$$

Елементи системи автоматичного регулювання розташовані послідовно, тому для визначення передаточної функції відкритої системи потрібно перемножити передаточні функції всіх її елементів.

$$W_p(p) = W_{OK}(p) \cdot W_{BM}(p) \cdot W_{DT}(p) = \frac{k_0 k_1 k_2}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.1)$$

Щоб зробити процес більш зручним, давайте позначимо вхід:

$$k = k_0 k_1 k_2. \quad (3.2)$$

Таким чином, передаточна функція відкритої системи матиме такий вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.3)$$

Таким чином, для обчислення передаточної функції замкнутої системи, припускаючи, що $W_{zz}(p) = 1$, використовується наступна формула

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (3.4)$$

Характеристичний поліном записується у такій формі:

$$\begin{aligned} T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k &= 0, \\ 60 p^3 + 1000,06 p^2 + p + 12 &= 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.2 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості.

3.2.1 Розглянемо аналіз стійкості системи за допомогою критерію Гурвіца.

Критерій стійкості Гурвіца, або алгебраїчний критерій, дозволяє оцінити стійкість системи автоматичного регулювання, особливо коли маємо справу з системами високого порядку. Проте, використання цього критерію досить просто лише для рівнянь до п'ятого порядку, оскільки збільшується складність обчислень при подальшому збільшенні порядку системи.

За цим критерієм умови стійкості висловлюються наступним чином.

Якщо всі коефіцієнти характеристичного рівняння додатні, і головний визначник Гурвіца, позначений як Δ_2 , більше нуля, а також всі його діагональні мінори позитивні, то всі корені характеристичного рівняння $T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0$ матимуть від'ємні дійсні частини. Після підстановки значень коефіцієнтів та сталих часу ми можемо це перевірити:

$$60p^3 + 1000,06p^2 + p + 12 = 0.$$

$$\Delta_2 := \left| \begin{pmatrix} 1000,06 & 12 \\ 60 & 1 \end{pmatrix} \right|$$

$$\Delta_2 = 280,06$$

Розглядаючи той факт, що головний визначник $\Delta_2 = 280,06 > 0$ є позитивним, що було визначено за допомогою правила обчислення визначників Гурвіца, і всі коефіцієнти мають додатні значення, можемо

зробити висновок, що система є стійкою згідно з критерієм стійкості Гурвіца.

3.2.2 3.2.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

Згідно з цим критерієм, стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначається шляхом аналізу амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише з стійких динамічних ланок і має не більше однієї інтегруючої ланки. Щоб замкнута система була стійкою, необхідно і достатньо, щоб амплітудно-фазова характеристика розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами $(-1; j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ .

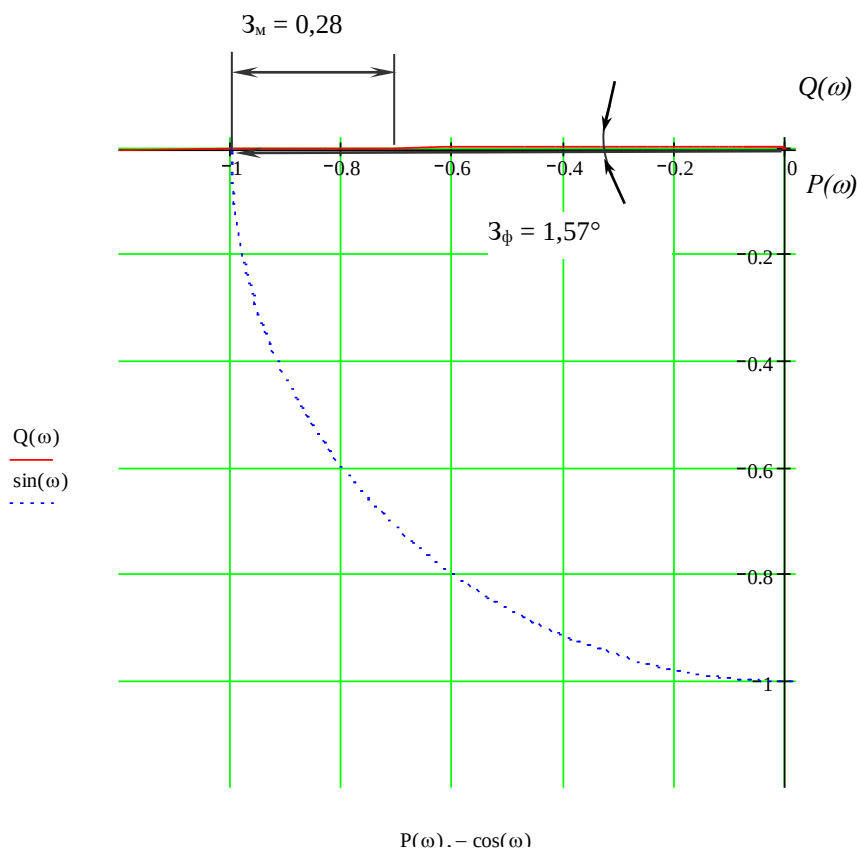


Рисунок 3.1 – Визначення резерву стійкості з погляду модуляції та фази за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Отже, згідно з критерієм Найквіста – Михайлова система є стійкою, з резервом стійкості за модулем $Z_M=0.28$; за фазою $Z_\phi=1.57^\circ$.

3.3 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка ефективності регулювання в замкнутих системах автоматичного регулювання (САР) полягає у визначенні резерву стійкості (за модулем і фазою) та частоти зрізу. Для визначення цих параметрів ми будемо амплітудно-фазову характеристику (АФХ) та фазо-частотну характеристику (ФЧХ) розімкнутої системи, забезпечуючи взаємне їх оптимальне розташування.

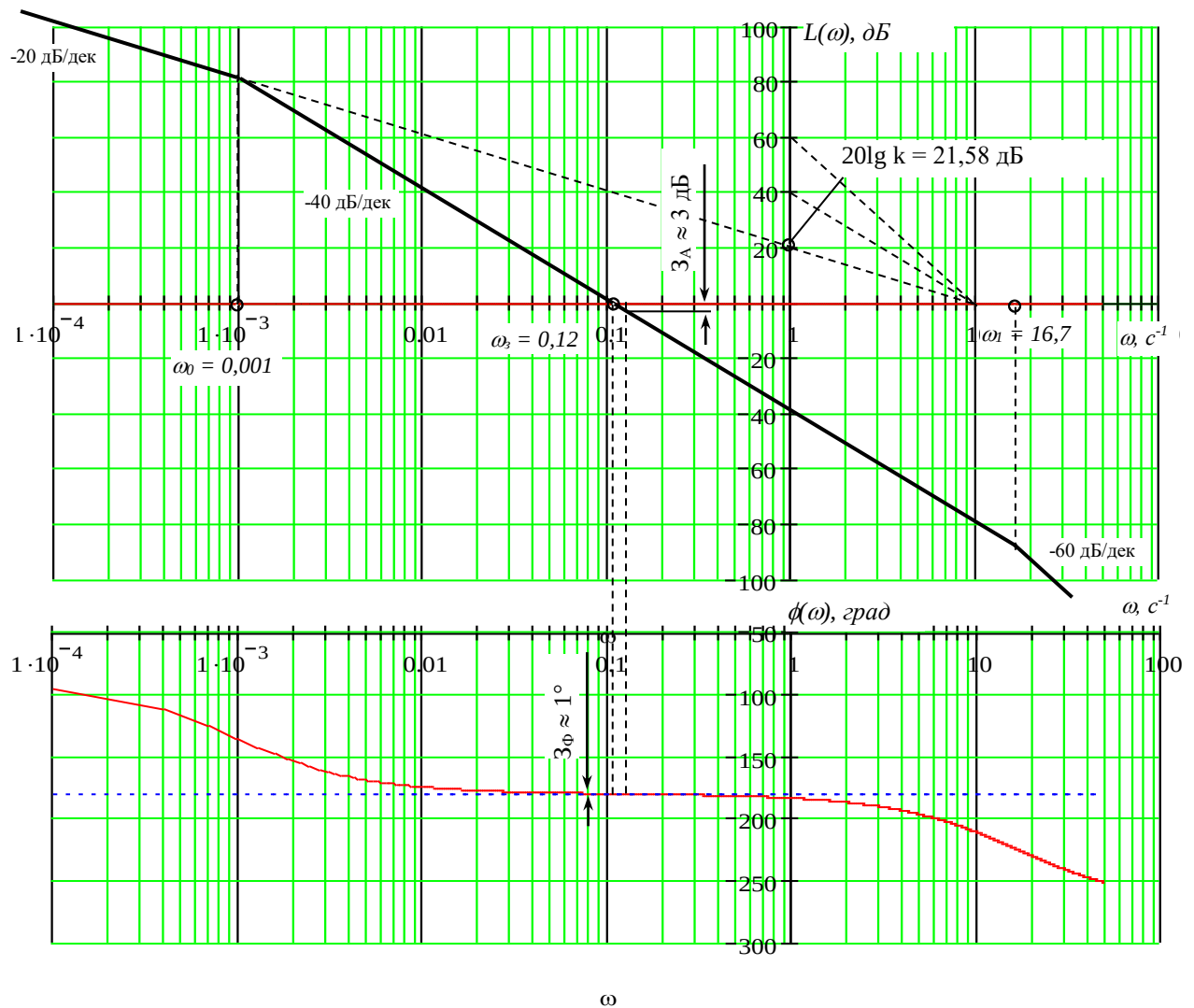


Рисунок 3.2 - Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

З цієї аналізу можна визначити наступне: частоту зрізу $\omega_z = 0.12 \text{ c}^{-1}$, що може бути використано для визначення часу регулювання, якщо систему поставити у жорсткі умови, $t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 52.36 \text{ c}$; резерв стійкості за амплітудою приблизно $3_M \approx 3 \text{ дБ}$; резерв стійкості за фазою $3_\phi \approx 1^\circ$.

3.4 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

При введенні одиничного ступінчастого сигналу на вхід системи, регульована величина в часі описується такою залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.6)$$

Після встановлення відповідних значень ми отримуємо графік, показаний на рисунку 3.3.

З графіку можна зробити висновок, що перехідний процес характеризується коливаннями, які відбуваються з постійним періодом.

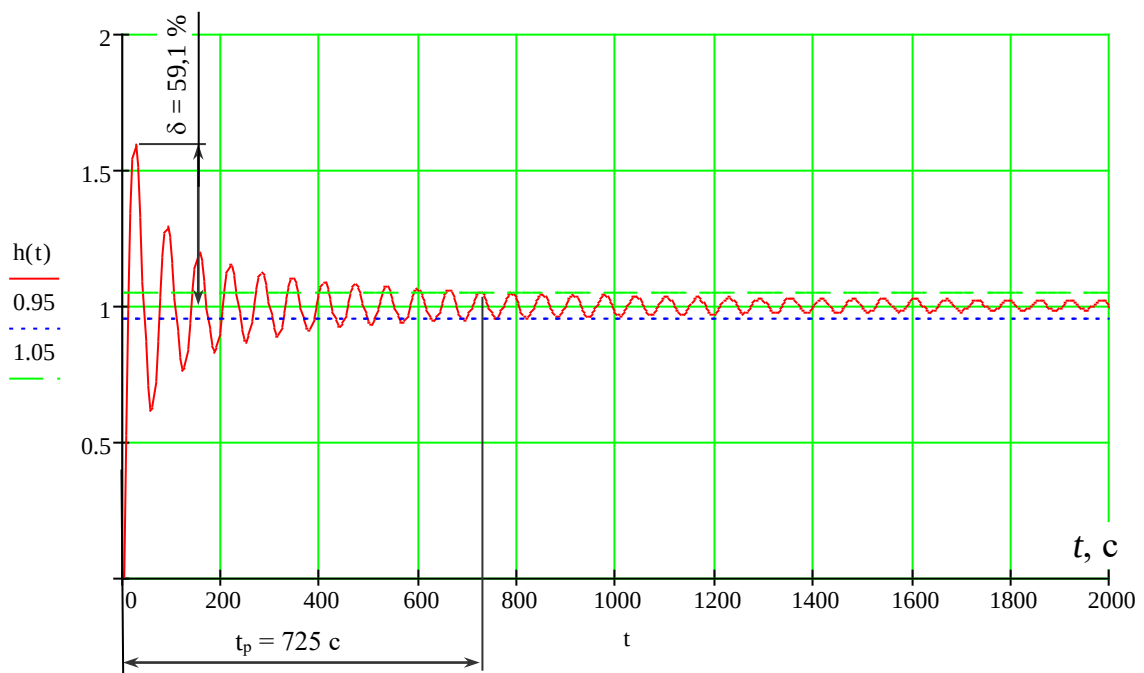


Рисунок 3.3 - Графік перехідного процесу вихідної системи

3.5 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу

З аналізу побудованого перехідного процесу можна визначити такі основні показники якості системи автоматичного регулювання:

1) Час регулювання $t_p \approx 725$ с – визначається як інтервал часу від моменту початку введення вхідного сигналу до моменту, коли система переходить у зону 2Δ. Цей параметр залежить від швидкості реакції динамічних ланок та їх кількості у головному контурі. Оскільки вимоги до системи є жорсткими, час регулювання приймається скороченим на 25% до значення $t_p=507,5$ с;

2) Перерегулювання $\delta=59.1\%$;

3) Частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0,098$ с⁻¹, де T=64 с – період коливань;

4) Кількість коливань перехідного процесу $n=11$;

5) час досягнення першого максимуму $t_{max1}=25$ с;

6) час наростання перехідного процесу $t_n=10$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;

7) Декремент затухання перехідного процесу визначає ступінь згасання коливань під час перехідного процесу. Це співвідношення між амплітудами сусідніх коливань, яке становить $d = 2,02$.

Відповідно до вимог до системи, час регулювання при проведенні аналізу та синтезу зменшується на 30% від отриманого значення. Для наших обчислень приймемо час регулювання, визначений через амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) за значенням ω_z , що становить $t_p = 52,36$ с, Після зменшення його на 30 %, отримаємо $t_p = 36,65$ с. Це дозволить нам встановити ще більш жорсткі умови для системи.

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

Для синтезу системи автоматичного регулювання (САР) потрібно врахувати наступні вимоги: час регулювання повинен становити $t_p=36,65$ с; максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25%; резерв

стійкості за модулем має бути не менше 15 дБ, а за фазою - не менше 30°. Для синтезу такої САР необхідно побудувати початкову амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) розімкнутої системи, бажану АЧХ, а також АЧХ коректуючого.

Створення бажаної амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) включає кілька етапів.

Створення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) в області низьких частот аналогічне побудові АЧХ статичної системи. Це включає проведення асимптоти з нахилом -20 дБ/декада через точку з координатами $20 \lg k = 21,58$ дБ.

Формування амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) в середньочастотній області - це найбільш важлива етапна асимптота.

В обраному діапазоні, формування амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) визначається встановленими значеннями перерегулювання та тривалості перехідного процесу. Для наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією), нахил середньочастотної асимптоти бажаної АЧХ вибирається як -20 дБ/декада. Вибір частоти зрізу (ω_z), тобто частоти, при якій АЧХ перетинає вісь частот, виконується на основі нерівності. $\omega_{z \min} \leq \omega_z \leq \omega_{z \text{ опт.}}$. Для забезпечення вимог до якості системи, потрібно, щоб ω_z була меншою за частоту зрізу $\omega_{z \text{ опт.}}$, яка визначається максимальним прискоренням координати та величиною керуючого ступінчастого сигналу. Крім того, ω_z повинна перевищувати частоту зрізу $\omega_{z \min}$, яка вибирається за значенням максимального перерегулювання δ_m часом регулювання t_p . Задане значення δ_m використовується для визначення відповідного значення $\delta = f(P_{z \max})$ за допомогою номограми. $P_{z \max}$. Потім, за значенням $P_{z \max}$ також за допомогою номограми, знаходиться $t_p = f(P_{z \max})$ знаходимо значення

$\frac{3 \cdot \pi}{t_p}$. Ця величина прирівнюється до заданого часу регулювання $t_p=36,65$ с

і з отриманого рівняння визначається частота зрізу $\omega_{z \min}=0,257$ с⁻¹.

Обрану частоту зрізу, що становить $\omega_z = 1,4$ с⁻¹ (незначно збільшену), відображаємо на графіку. Потім ми будемо середньочастотну асимптоту, яка проходить через точку ω_z на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дек.

За відомим значенням дійсної частини характеристики $P_{z \max}=1.2$ ми визначаємо мінімальне значення $P_{z \min}$, використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $P_{z \min}=1-P_{z \max}=-0,2$

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі потрібно розширити середньочастотну асимптоту в обидва напрямки на певну величину. Запаси стійкості визначаються за допомогою номограм $L(\omega) = f(\varphi)$ де P_z є константою - це кільцеві діаграми, а P_z – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Таким чином, за допомогою номограм ми визначаємо криві, які відповідають $P_{z \max} = 1.2$ і $P_{z \min} = -0.2$. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді визначаємо, проводячи горизонтальні дотичні до цих кривих і читаючи значення на осі ординат, $L_1 = 15$ дБ, $L_2 = -15$ дБ. Отже, середньочастотну асимптоту слід продовжувати ліворуч і праворуч до значень ординат L_1 та L_2 а потім вже спрягати з сусідніми ділянками.

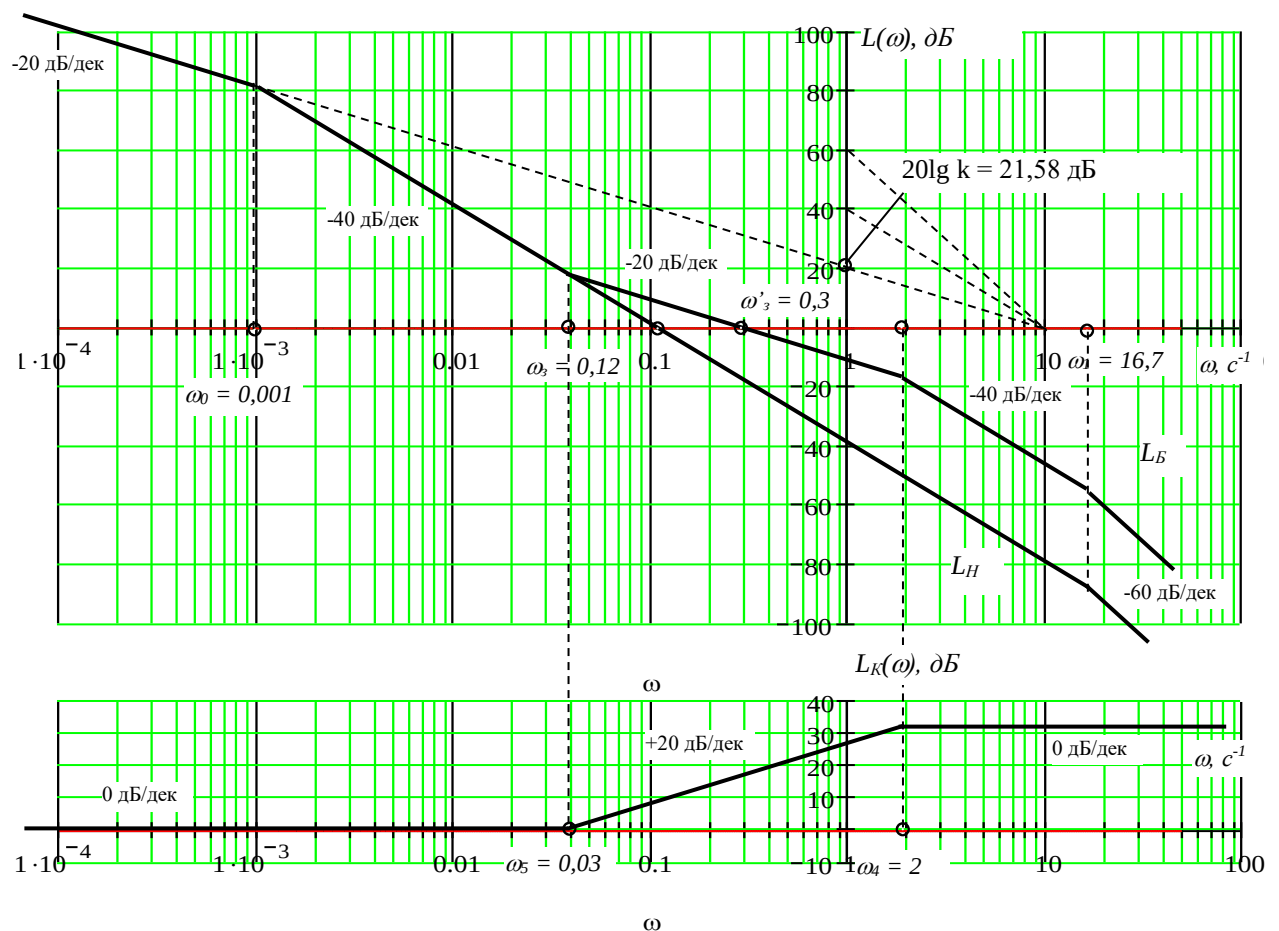


Рисунок 3.4 - Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коректуючого пристрою

У цьому випадку, для знаходження запасу стійкості по фазі, $\angle_{\phi}$ проводяться вертикальні дотичні до кривих $P_{\max} = 1,2$ і $P_{\min} = -0,2$ і потім відраховується значення кута у градусах від дотичної до лінії -180° . В даному випадку отримується $\angle_{\phi} = 45^\circ$.

Для визначення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) коректуючого пристрою використовується різниця між бажаною і статичною АЧХ $L_k = L_B(\omega) - L_H(\omega)$ (рис. 3.8).

Передаточна функція коригуючого пристрою узагальненому вигляді:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{k(T_5 p + 1)}{(T_4 p + 1)}$$

де $T_4 = 1/\omega_4 = 1/2 = 0,5$ с;

$$T_5 = 1/\omega_5 = 1/0,03 = 33,33 \text{ с}$$

Таким чином, передаточна функція коректуючого пристрою може бути виражена таким чином:

$$W_{\text{кп}}(p) = \frac{1 \cdot (33,33p + 1)}{(0,5p + 1)}$$

3.7 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію для системи замкнутого керування, після коригування

$$W_{\text{зк}}(p) = \frac{k(T_5p + 1)}{p(T_1p + 1)(T_0p + 1) \cdot (T_4p + 1) + k \cdot (T_5p + 1)} \quad (3.7)$$

Після заміни $p = j\omega$, ми використовуємо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики. Цю операцію найзручніше виконати за допомогою математичного редактора, такого як Mathcad. Для цього введіть значення коефіцієнтів підсилення, сталих часу динамічних ланок та вираз передаточної функції в робочій області екрана за допомогою такого виразу:

$$P(\omega) := \text{Re}(W(\omega)).$$

Це дозволить побудувати дійсну частотну характеристику системи після коригування (рис. 3.5).

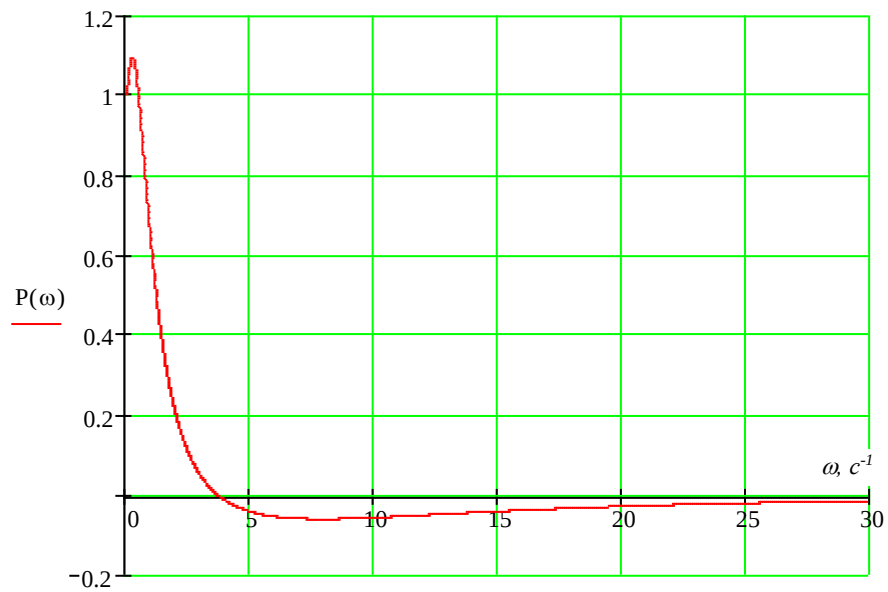


Рисунок 3.5 - Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

Давайте побудуємо графік перехідного процесу для скоригованої системи автоматичного регулювання.

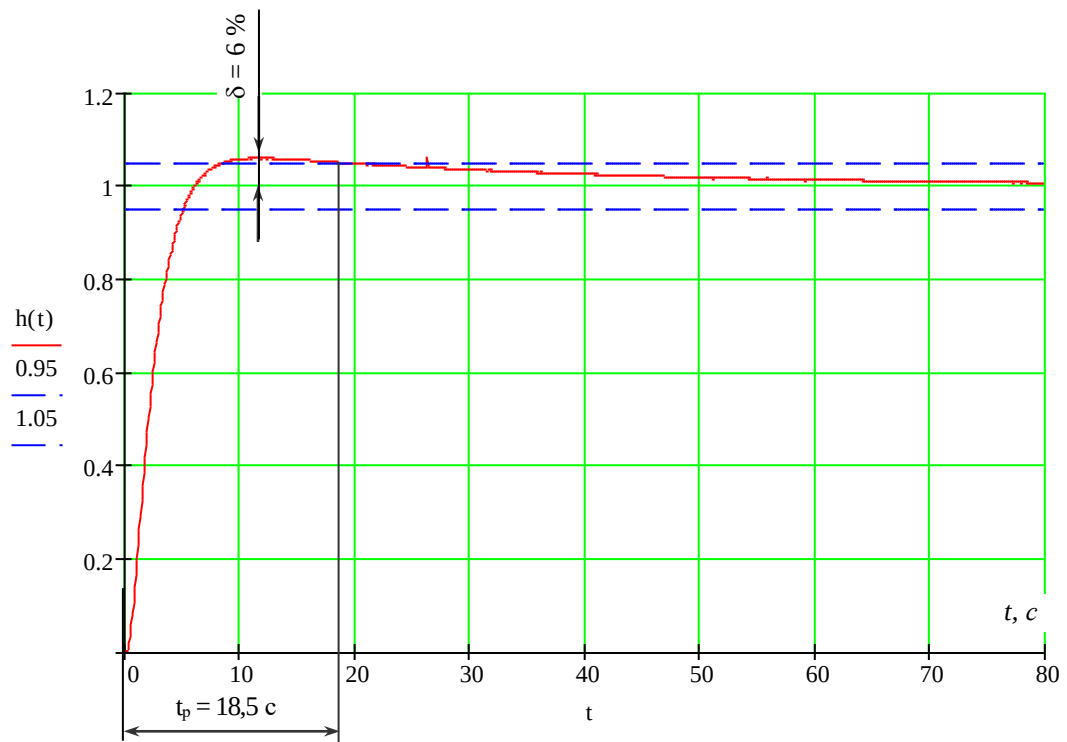


Рисунок 3.6 - Графік перехідного процесу синтезованої системи

3.8 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З аналізу графіка перехідного процесу можна визначити такі ключові параметри якості системи автоматичного регулювання:

- час регулювання $t_p=18,5$ с;
- перегулювання $\delta=6\%$
- час наростання перехідного процесу $t_n=6,1$ с;

Перехідний процес характеризується як аперіодичний з вираженим перерегулюванням.

Отримані результати відповідають вимогам, що були поставлені до системи автоматичного регулювання.

4 Практична реалізація системи автоматичного регулювання

4.1 Визначення періоду дискретизації

Процес перетворення неперервних сигналів на дискретні пов'язаний з використанням дискретних елементів, виходом яких є послідовність імпульсів. Один з таких елементів - це ключ K' , який замикається кожен період квантування T .

Задача вибору оптимального періоду квантування T є однією з ключових проблем при реалізації систем цифрового керування, оскільки вона впливає на ефективне використання машинного часу. При зменшенні T точність керування збільшується, але це може призвести до збільшення завантаження обчислювальної техніки. Навпаки, збільшення T може призвести до погіршення якості керування. Тому важливо знайти компромісне рішення, що задовольняє ці протилежні вимоги. Вибір оптимального значення T зазвичай здійснюється відповідно до теореми Котельникова, залежно від спектра неперервної функції $\Theta(t)$.

Згідно з теоремою Котельникова, якщо функція часу $\Theta(t)$, не містить гармонічних компонент з частотами, що перевищують частоту $\omega_{\max}$ то ця функція може бути повністю відтворена за її значеннями в моменти часу nT , розташованими вздовж вісі абсцис, які відокремлені один від одного на інтервали, що дорівнюють періоду T

$$T = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (4.1)$$

Отже, для відтворення неперервної функції точно за її значеннями у дискретних моментах часу, частота квантування повинна бути обрана відповідно до умови, що визначається теоремою Котельникова. При такому виборі, дискретна решітчаста функція точно відтворить

неперервну функцію, і втрат інформації при процесі квантування буде мінімальними.

$$\Theta(t) = \Theta \left[n \cdot \frac{\pi}{\omega_{\max}} \right] \quad (4.2)$$

За критерієм Джурі можна визначити максимальну частоту $\omega_{\max}$ у спектрі вихідного сигналу $\beta(j\omega)$ за амплітудно-частотною характеристикою замкненого контуру цифрового керування. Якщо на вхід регулятора подати гармонічний одиничний сигнал $\alpha(t) = \sin \omega t$, то вихідний сигнал замкненого контуру можна розглядати як функцію, тобто

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \quad (4.3)$$

Звідси можна визначити частоту $\omega_{\max}$ при якій амплітуда $|\beta(j\omega)|$ матиме невелике значення. Це стає можливим, оскільки замкнена система вбирає високочастотні складові сигналу. Значення Θ_{om} визначає точність, яку потрібно забезпечити на виході системи.

На основі початкових даних проводимо визначення оптимального інтервалу квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передаточна функція об'єкта керування характеризується рівнянням, яке визначає залежність між вхідним і вихідним сигналами системи у частотному діапазоні

$$W_{OK}(p) = \frac{12}{p(0.06p + 1)(1000p + 1)} \quad (4.4)$$

Рівнянням описується частотна передаточна функція регулятора, яка визначає зв'язок між вхідними і вихідними сигналами регулятора у частотному діапазоні

$$W_P(p) = \frac{1(33.33p + 1)}{(0.5p + 1)} \quad (4.5)$$

Необхідно досягти точності керування об'єктом в стійкому режимі до рівня $\Theta_{om} = 0.1$.

Виразом визначається частотна передаточна функція замкненої системи, що описує залежність між вхідним і вихідним сигналами в усталеному стані

$$\beta(j\omega) = \frac{W_P(j\omega) \cdot W_{OK}(j\omega)}{1 + W_P(j\omega) \cdot W_{OK}(j\omega)} = \Theta \quad (4.6)$$

Після вставки виразів (4.4, 4.5) у (4.6) ми отримаємо результат

$$\frac{12(33.33j\omega + 1)}{j\omega(0.06 \cdot j\omega + 1)(0.5 \cdot j\omega + 1)(1000 \cdot j\omega + 1) + 12(33.33j\omega + 1)} = 0,1 \quad (4.7)$$

Розв'язавши це рівняння, ми визначимо значення частоти $\omega_{max} = 1,96$

Оптимальний інтервал квантування сигналів, який використовується для обчислень

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{max}} = \frac{\pi}{1,96} = 1,6с \quad (4.8)$$

Приймаємо $T < T_{роз}$ $T_d = 0,01 с$

Ми обираємо цей інтервал дискретизації з метою забезпечення найвищої можливої точності системи.

4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для реалізації системи регулювання на мікропроцесорній основі необхідно здійснити Z-перетворення передаткової функції регулятора, яку було синтезовано у розділі 3.

$$W_p(p) = \frac{1(33.33p + 1)}{(0.5p + 1)} \quad (4.9)$$

Ми розглянемо розбиття передаткової функції регулятора на прості дробу:

$$W_p(p) = 66.66 - \frac{65.66}{(0.5p + 1)}. \quad (4.10)$$

Тепер ми застосуємо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, використовуючи час дискретизації $T_0 = 0.01$ с.

$$W_p(z) = 66.66 - \frac{2}{z - 0.9753}. \quad (4.11)$$

$$W_p(z) = 66.66 - \frac{2 \cdot z^{-1}}{1 - 0.9753 \cdot z^{-1}} \quad (4.12)$$

Ми складемо різницеві рівняння на основі отриманої дискретної передаткової функції регулятора:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n];$$

$$u_1[n] = 66.66 x[n];$$

$$u_2[n] = -2 x[n-1] + 0.9753 u_2[n-1];$$

На схемі програмної реалізації, яка показана на рисунку 4.1, коефіцієнти є рівними:

$$a = 66.66; b_1 = -2; b_2 = 0.9753.$$

На основі отриманої схеми програмної реалізації потрібно розробити регулятор з використанням мікропроцесора.

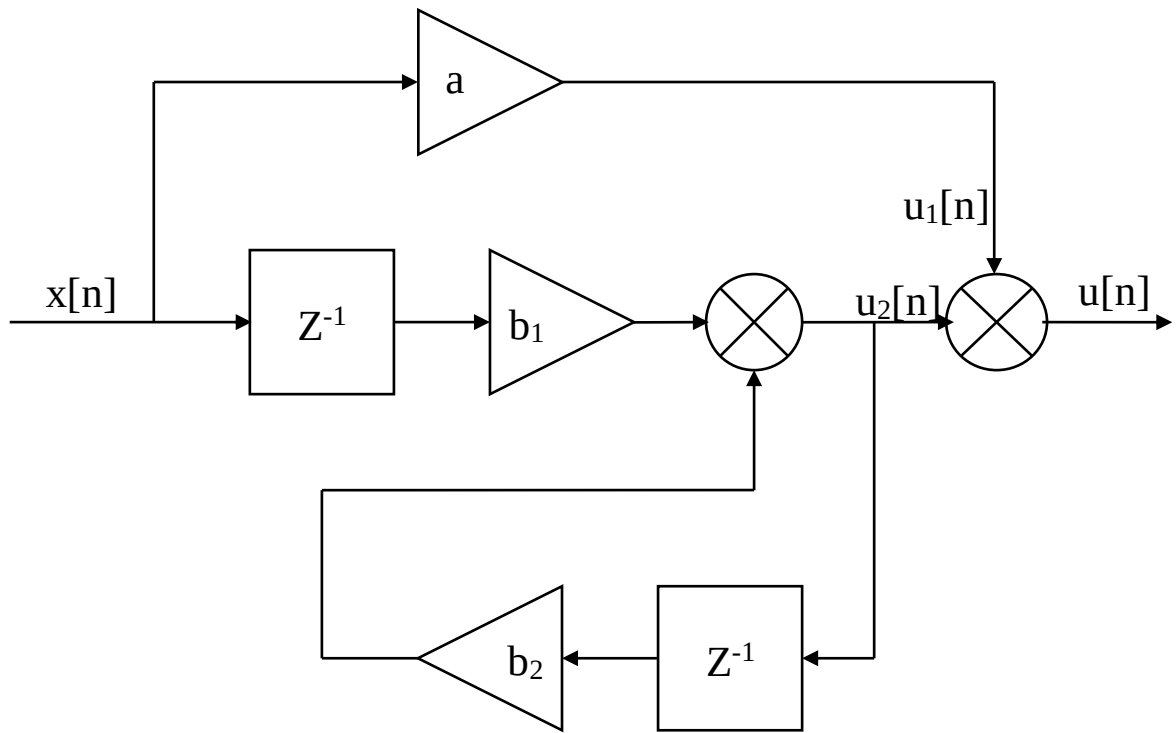


Рисунок 4.1 – Схема програмної реалізації регулятора

4.3 Опис принципової схеми регулятора

Ми використовуємо мікроконтролер AVR AT90S8515 для реалізації цифрового регулятора.

Ця мікросхема має такі особливості:

8-розрядний мікроконтролер AVR® з 8 Кб Flash-пам'яті, що підтримує внутрішню прошивку

Відмінні риси:

Особливості AVR® включають високу продуктивність і архітектуру RISC з низьким енергоспоживанням

Інструкційний набір містить 118 потужних команд, більшість з яких виконуються за один такт

Flash-пам'ять обсягом 8 Кб з підтримкою внутрішнього програмування:

- Має послідовний інтерфейс SPI для завантаження програмного забезпечення

Ця мікросхема має наступні характеристики:

- Flash-пам'ять обсягом 512 байт, з ресурсом 1000 циклів запису/стирання.
- EEPROM обсягом 512 байт, з ресурсом 100 000 циклів запису/стирання.
- Внутрішня SRAM обсягом 512 байт.
- 32 x 8 регістрів загального призначення.
- 32 програмовані шини введення/виведення (I/O).
- Програмований послідовний UART.
- SPI послідовний інтерфейс.
- Робочий діапазон напруги VCC від 2.7 В до 6.0 В.
- Повністю статичний режим роботи.
- Можливість роботи від 0 до 8 МГц при напрузі від 4.0 В до 6.0 В та від 0 до 4 МГц при напрузі від 2.7 В до 4.0 В.
- Продуктивність до 8 MIPS при частоті 8 МГц.
- Один 8-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником частоти.
- Один 16-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником частоти, з режимами порівняння та захоплення.
- Підтримка здвоєного широтно-імпульсного модуляції (PWM).
- Можливість використання зовнішніх і внутрішніх джерел переривань.
- Програмований таймер з вбудованим тактовим генератором.
- Вбудований аналоговий компаратор.

Ця мікросхема також має режими зниженого енергоспоживання, включаючи:

- Режим спокою (Idle).
- Режим відключення (Power Down).

Мікроконтролер AT90S8515 є 8-розрядним CMOS пристроєм з

низьким споживанням енергії, побудованим на основі вдосконаленої AVR RISC архітектури. Цей контролер досягає високої продуктивності, виконуючи високоефективні інструкції за один тактовий період, наближаючись до рівня 1 MIPS на МГц. Це дозволяє розробникам оптимізувати споживання енергії відповідно до потрібної обчислювальної продуктивності. Крім того, пристрій має програмований блокувальний механізм для захисту програмного забезпечення.

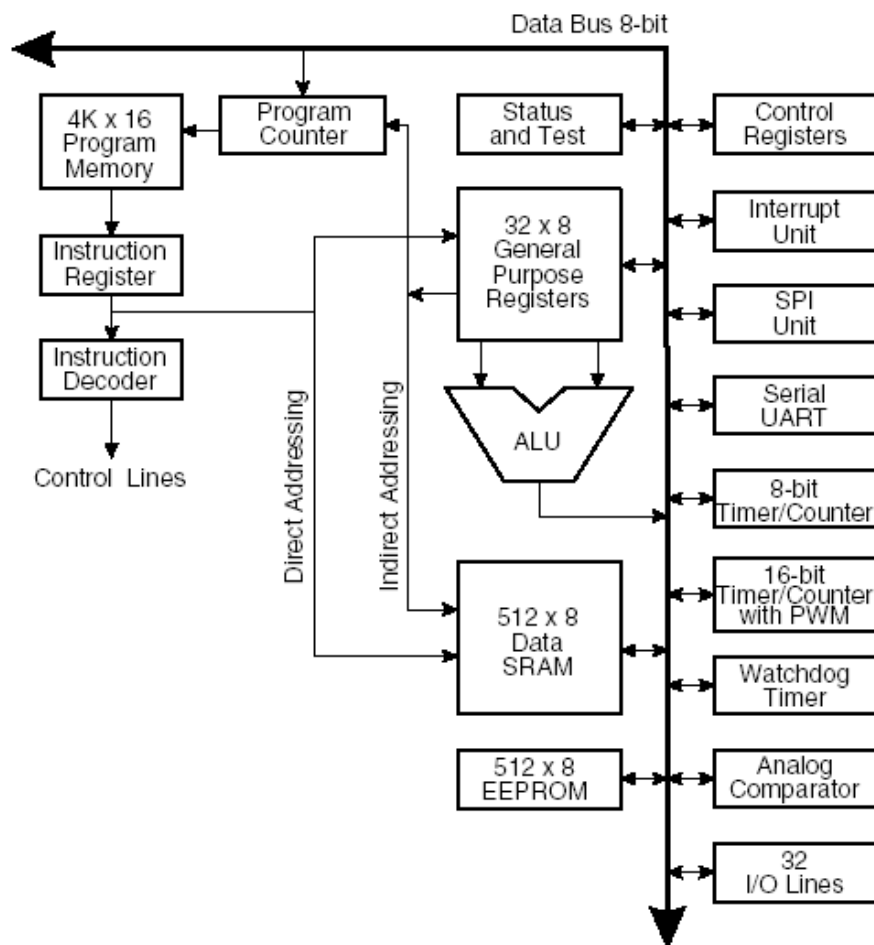


Рисунок 4.2 – Блок- схема AT90S8515

Ядро AVR володіє розширеним набором потужних інструкцій та 32 робітниками регістрів загального призначення. Кожен з цих 32 регістрів прямо підключений до арифметико-логічного пристрою (АЛП), що дає змогу звертатися до двох незалежних регістрів під час виконання однієї інструкції за один такт. Ця архітектура значно підвищує ефективність коду та пропускну здатність, що може перевищувати стандартні

мікроконтролери CISC в декілька разів, навіть до 10 разів.

Мікроконтролер AT90S8515 має вражаючий набір характеристик, серед яких 8 Кбайт Flash-пам'яті з можливістю внутрішнього програмування, 512 байт EEPROM та 512 байт SRAM для зберігання даних. Крім того, він має 32 лінії введення/виведення загального призначення, 32 регістри загального призначення, а також універсальні таймери/лічильники з різними режимами порівняння. Мікроконтролер підтримує внутрішні та зовнішні переривання, програмований UART і послідовний порт SPI для обміну даними. Крім того, він має два режими економії енергії: "Idle Mode", який зупиняє центральний процесор, але дозволяє функціонування інших компонентів, та "Power Down", який вимикає тактовий генератор та інші функції мікроконтролера для економії енергії, поки не спрацює зовнішнє переривання або не буде проведена апаратна ініціалізація.

Мікроконтролер AT90S8515 виготовляється з використанням енергонезалежної пам'яті високої щільності, розробленої в компанії Atmel. У нього вбудована Flash-пам'ять з підтримкою внутрішнього програмування, що дозволяє перепрограмувати програмний код в межах системи через SPI послідовний інтерфейс або за допомогою стандартного програматора енергонезалежної пам'яті. Поєднання вдосконаленого 8-бітного RISC процесора з Flash-пам'яттю з підтримкою внутрішнього програмування на одному кристалі створило високопродуктивний мікроконтролер AT90S8515, що надає гнучке та економічно-високоєфективне рішення для багатьох систем управління.

Мікроконтролер AVR AT90S8515 підтримується повним комплектом програм та інструментів розробки, який включає в себе компілятори мови програмування C, макроасемблери, відладчики/симулятори програм, внутрішньосхемні емулятори та набори для макетування.

Для отримання даних з датчиків використовується паралельний інтерфейс RS-485, що реалізований за допомогою мікросхеми фірми MAXIM - MAX1481. Для опитування трьох термopідвісок використовуються три відповідні мікросхеми паралельного інтерфейсу DD1-DD3.

Інтерфейс RS-485, також відомий як EIA/TIA-485, є одним з найбільш поширених стандартів фізичного рівня зв'язку. Фізичний рівень визначає канал зв'язку та метод передачі сигналу, що є першим рівнем моделі взаємозв'язку відкритих систем OSI.

Мережа, побудована на інтерфейсі RS-485, складається з приймачів та передавачів, які з'єднані за допомогою витої пари - двох скручених проводів. Основний принцип роботи інтерфейсу RS-485 ґрунтується на диференціальній (балансовій) передачі даних. Це означає, що один і той самий сигнал передається по двом проводам. На одному з них (А, наприклад) передається оригінальний сигнал, тоді як на іншому (В, наприклад) передається його інверсія. Іншими словами, якщо на одному проводі "1", то на іншому буде "0", і навпаки. Таким чином, між двома проводами витої пари завжди існує різниця потенціалів: вона буде позитивною при "1" і негативною при "0".

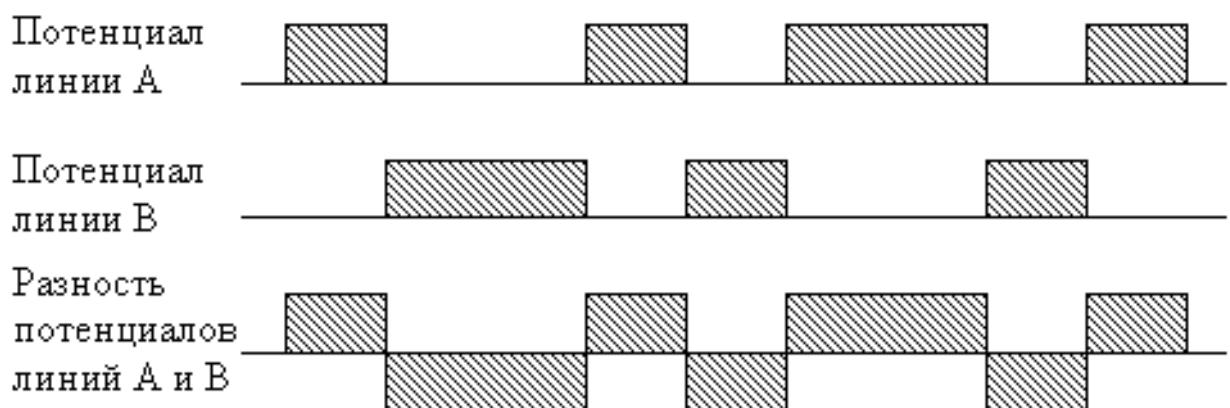


Рисунок 4.3 - Принцип диференціальної передачі даних

Саме ця різниця потенціалів відтворює сигнал. Такий метод

передачі забезпечує високу стійкість до співфазних перешкод. Співфазні перешкоди - це перешкоди, які однаково впливають на обидва проводи лінії зв'язку. Наприклад, електромагнітна хвиля, що проникає через ділянку лінії зв'язку, створює потенціал на обох проводах. У разі, коли сигнал передається потенціалом одного провідника відносно загального, як у RS-232, наведення на цей провідник може спотворити сигнал в порівнянні з добре заземленим навколишнім середовищем. Крім того, на опорі довгого спільного проводу може виникнути падіння потенціалу землі, що є додатковим джерелом шуму. У разі диференціальної передачі не відбувається такого перекручування. Якщо два провідники прокладені поруч, особливо якщо вони перевиті, то наведення на обидва провідника буде однаковим. Потенціал на обох провідниках змінюється однаково, тоді як інформативна різниця потенціалів залишається незмінною.

Апаратна реалізація інтерфейсу передбачає використання мікросхем приймача-передавача з диференціальними входами/виходами для зв'язку з лінією та цифровими портами для підключення до UART контролера. Існують два типи цього інтерфейсу: RS-422 і RS-485.

RS-422 - це повнодуплексний інтерфейс, що передбачає окремі пари проводів для прийому і передачі. Кожна пара проводів може мати лише один передавач.

RS-485 - це напівдуплексний інтерфейс, де прийом і передача відбуваються по одній парі проводів і розподіляються за часом. У мережі може бути кілька передавачів, оскільки вони можуть вимикатися під час прийому.

Давайте звернемо увагу на прийомопередавач RS-485 для детальнішого розгляду. Цифровий вихід приймача (RO) підключається до порту приймача UART (RX), тоді як цифровий вхід передавача (DI) - до порту передавача UART (TX). Оскільки приймач і передавач з'єднані на диференціальному рівні, під час прийому необхідно відключати передавач,

а під час передачі - приймач. Для цього використовуються керуючі входи - дозвіл приймача (RE) і дозвіл передавача (DE). Оскільки вхід RE є інверсним, його можна підключити до DE і перемикати приймач і передавач одним сигналом з будь-якого порту контролера. При рівні "0" відбувається робота на прийом, а при "1" - на передачу.

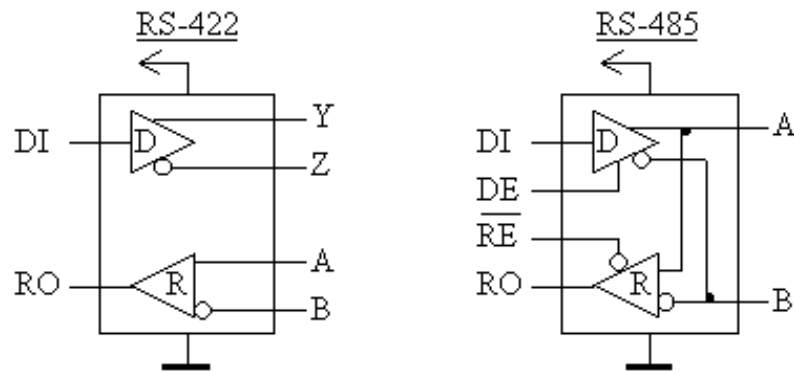


Рисунок 4.4 – функціональна схема апаратної реалізації інтерфейса
D (driver) - передавач;
R (receiver) - приймач;
DI (driver input) - цифровий вхід передавача;
RO (receiver output) - цифровий вихід приймача;
DE (driver enable) - дозвіл роботи передавача;
RE (receiver enable) - дозвіл роботи приймача;
A - прямий диференціальний вхід/вихід;
B - інверсний диференціальний вхід/вихід;
Y - прямий диференціальний вихід (RS-422);
Z - інверсний диференціальний вихід (RS-422).

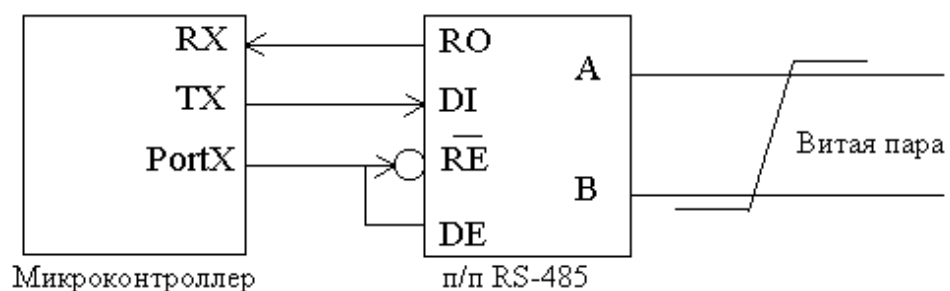


Рисунок 4.5 – Приклад підключення інтерфейсу RS-485 до мікроконтролера

Приймач перетворює різницю потенціалів (UAB), отриману на диференціальних входах (AB), у цифровий сигнал на виході RO. Чутливість приймача може варіюватися, але виробники мікросхем приймопередавачів зазвичай вказують гарантований діапазон розпізнавання сигналу у

документації, який зазвичай становить ± 200 мВ. Тобто, якщо рівень UAB перевищує +200 мВ, приймач інтерпретує його як "1", а якщо менше -200 мВ, то як "0". Проте, якщо різниця потенціалів настільки мала, що не виходить за межі гарантованого діапазону, правильне розпізнавання сигналу не гарантується. Крім того, у лінії можуть виникати не синфазні перешкоди, які можуть спотворити дуже слабкий сигнал.

Вхідний опір приймача зі сторони лінії (RAB) зазвичай складає 12 кОм. Це обмежує кількість приймачів, які можуть бути підключені до лінії, оскільки потужність передавача не є необмеженою. Згідно зі специфікацією RS-485, з урахуванням резисторів, які відповідають, передавач може обслуговувати до 32 приймачів. Однак деякі мікросхеми мають підвищений вхідний опір, що дозволяє підключати до лінії значно більше 32 пристроїв.

У відповідності зі специфікацією RS-485, максимальна швидкість передачі даних може сягати 10 Мбіт/с. Максимальна допустима відстань становить 1200 метрів. У випадку потреби у зв'язку на відстані більшій за 1200 метрів або при підключенні більшої кількості пристроїв, ніж дозволяє максимальне навантаження передавача, застосовують спеціальні пристрої - повторювачі або репітери.

Ми також використовуємо паралельний інтерфейс RS-485 для підключення мікроконтролера до електромагнітного клапана, щоб передавати сигнали управління і отримувати інформацію про стан клапана.

Для відображення інформації про температуру подрібненої маси та тиск теплоносія, використовується чотирьохзначний восьмисегментний індикатор, а для вибору датчика, з якого необхідно відобразити інформацію, використовується клавіатура з трьох рядків та чотирьох стовпців.

Оскільки система має повільну динаміку, обраний час дискретизації $T_0 = 0.1$ с в повній мірі відповідає поставленим вимогам.

Висновки

1. Під час виконання бакалаврської роботи було досліджено технологію виготовлення томатного соку, а також проведений аналіз всіх її етапів.
2. Було проведено аналіз автоматизованої системи управління та контролю виробництва томатного соку, де розглянуті основні контури регулювання, контролю та захисту. Обрано підігрівач подрібненої маси як об'єкт регулювання, і поставлена задача з регулювання температурного режиму.
3. Була розроблена структурна схема автоматичного регулювання температури подрібненої маси в підігрівачі, і вибрані компоненти цієї системи.
4. У дослідженні було проведено аналіз системи автоматичного регулювання, визначено запаси стійкості, час реакції та інші параметри системи у відсутність регулятора.
5. Застосований метод синтезу дозволив визначити передаточну функцію регулятора та налаштувати показники ефективності виправленої системи: час реакції регулювання $t_p = 18,5$ с; перерегулювання $\delta = 6$ %; та характер перехідного процесу – аперіодичний із невеликим перерегулюванням.
6. Була розроблена концепція схеми автоматичного контролю температури роздробленої маси в підігрівачі, а також складено алгоритм для програмної реалізації цієї системи.

Список літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
3. Astrom K.J. Advanced PID Control [Текст] / Astrom K.J., Hagglund T. - Instrumentation, Systems, and Automation Society, USA, 2006. – 250 p.
4. Astrom K.J. Control System Design. Lecture notes for ME 155A [Текст] / Astrom K.J. - Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, Sweden, 2002. – 168 p.
5. Гостев В. Й., Стеклов В.К. Системи автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: "Радіоаматор", 1998.
6. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
7. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
8. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
9. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.

10. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.

11. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.

12. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.

13. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.