

Міністерство освіти і науки України
Шосткинський інститут
Сумського державного університету
Центр дистанційної і заочної форми навчання
Кафедра системотехніки та інформаційних технологій
Спеціальність 6.151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Худолей Г.М.

«__» _____ 2022 р.

Бакалаврська робота на тему:
«Системи управління технологічним процесом
отримання простого гранульованого суперфосфату»

Керівник роботи:
(викладач-стажист)

Сердюк І.В.

Бакалаврант:
студентка групи СУз-81Ш

Карпенко В.О.

РЕФЕРАТ

Карпенко Вікторія Олександрівна. Система управління технологічним процесом отримання простого гранульованого суперфосфату. Кваліфікаційна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямом 6.151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Шосткинський інститут Сумського державного університету, Шостка, 2022 р.

Бакалаврська робота містить 77 аркушів пояснювальної записки, 58 рисунків, 13 таблиць, 27 джерел інформації, конструкторську документацію, яка містить 3 креслення.

В бакалаврській роботі виконане проектування системи управління технологічним процесом отримання простого гранульованого суперфосфату. В роботі проведений конструктивно-технологічний аналіз об'єкта автоматизації, визначені параметри технологічного процесу, вибрані канали контролю і управління, обрані необхідні технічні засоби, синтезована і проаналізована багатозв'язна САР різної структури з різними компенсаторами. Автоматизація технологічного процесу забезпечує управління основними технологічними операціями, які впливають на якість кінцевого продукту, дозволяють забезпечити високі показники збереження матеріалів і енергозбереження.

Ключові слова: система управління, автоматизація виробництва, параметр управління, параметр дії, аналоговий сигнал, дискретний сигнал, сигнал управління, вузол управління, мікропроцесорний контролер.

РЕФЕРАТ

Карпенко Виктория Александровна. Система управления технологическим процессом получения простого гранулированного суперфосфата. Квалификационная работа образовательно-квалификационного уровня «бакалавр» по направлению 6.151 «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии» – Шосткинский институт Сумского государственного университета, Шостка, 2022 г.

Бакалаврская работа содержит 77 листов пояснительной записки, 58 рисунков, 13 таблиц, 27 источников информации, конструкторскую документацию, содержащую 3 чертежа.

В бакалаврской работе выполнено проектирование системы управления технологическим процессом получения простого гранулированного суперфосфата. В работе проведен конструктивно-технологический анализ объекта автоматизации, определены параметры технологического процесса, выбраны каналы контроля и управления, выбраны необходимые технические средства, синтезирована и проанализирована многосвязная САР разной структуры с разными компенсаторами. Автоматизация технологического процесса обеспечивает управление основными технологическими операциями, влияющими на качество конечного продукта, позволяющими обеспечить высокие показатели сохранения материалов и энергосбережения.

Ключевые слова: система управления, автоматизация производства, параметр управления, параметр действия, аналоговый сигнал, дискретный сигнал, сигнал управления, узел управления, микропроцессорный контроллер.

ЗМІСТ

Список скорочень.....	4
Вступ.....	6
1 Конструктивно-технологічний аналіз об'єкта автоматизації	8
2 Дослідження матеріальних потоків у технологічному процесі, побудова схеми інформаційних потоків.....	12
3 Вибір параметрів контролю, регулювання та сигналізації	14
4 Вибір каналів внесення регулюючих дій	17
5 Вибір засобів автоматизації	22
5.1 Вибір датчиків.....	22
5.2 Вибір регулюючих органів	34
5.3 Вибір контролера	36
6 Розрахункова частина	43
6.1 Ідентифікація об'єкта управління.....	43
6.2 Побудова структурної схеми вихідної системи управління.....	43
6.3 Синтез безперервної БСАР	45
6.4. Синтез та дослідження мікропроцесорної БСАР.....	68
Висновок	77
Література	78

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- АРМ – автоматизоване робоче місце.
- АСУ – автоматизована система управління.
- АСУП – автоматизована система управління підприємством.
- АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом.
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач.
- БОУ – багатозв'язний об'єкт управління.
- БПУ – багатозв'язний пристрій управління.
- БСАР – багатозв'язна система автоматичного регулювання.
- ВМ – виконавчий механізм.
- ВП – вимірювальний перетворювач.
- ГДК – гранично-допустима концентрація.
- ДЗПНЧ – дискретна ланка приведеної безперервної частини.
- ЕСКД – єдина система конструкторської документації.
- КВП і А – контрольні-вимірювальні прилади і автоматика.
- МЕК – міжнародна електротехнічна комісія.
- МК – мікроконтролер.
- ММ – математична модель.
- МП – мікропроцесор.
- ОЗП – оперативний пристрій, що запам'ятовує.
- ОУ – об'єкт управління.
- П – пропорційний.
- ПВП – первинний вимірювальний перетворювач.
- ПЕВМ – персональна електронно-обчислювальна машина.
- ПЗП – постійний пристрій, що запам'ятовує.
- ПІ – пропорційно-інтегральний.
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний.
- ПК – персональний комп'ютер.
- ПЛК – програмований логічний контролер.
- ПНЧ – приведена безперервна частина.
- ПУ – пристрій управління.
- ПФ – передавальна (передатна) функція.
- ПЧ – перетворювач частоти.
- РКІ – рідкокристалічний індикатор.

РКП – робочий коефіцієнт перетворення.

РО — регулюючий орган.

САР – система автоматичного регулювання.

САУ — система автоматичного управління.

ТО– термоперетворювач опору.

ТП – термопара.

ЦАП — цифро-аналоговий перетворювач.

ЧЕ – чутливий елемент.

SSP – англ. Single Superphosphate.

ВСТУП

Суперфосфат є самим розповсюдженим і універсальним фосфатним добривом, що ефективно використовується під будь-які культури і на всіх видах ґрунтів. Суперфосфат одержують розкладанням апатитового концентрату сульфатною кислотою. Більша частина фосфору у суперфосфаті знаходиться у вигляді водорозчинного $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і вільної фосфатної кислоти. Крім того, в суперфосфаті присутні цитратнорозчинні сполуки фосфору, фосфати заліза і алюмінію та дикальційфосфат, а також нерозкладений залишок вихідного фосфату.

Прості суперфосфати (англ. Single Superphosphate – скорочено SSP) були першими комерційними мінеральними добривами. Саме їм завдячуємо розвитком сучасних добрив. Ще донедавна SSP були найбільш поширеними промисловими добривами.

Готовий SSP має вигляд сипучого порошку чи гранул сірого кольору. Його основними компонентами є первинний фосфат кальцію ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) та сульфат кальцію ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Звичайно, до складу простого суперфосфату входять також різні добавки, такі як фосфати заліза і алюмінію, діоксид кремнію або фосфорна кислота. Усі види суперфосфатів містять одні й самі компоненти, лише у різних пропорціях.

Суперфосфати є найпростішими і найчастіше застосовуваними фосфатними добривами. Вони легко розчиняються у воді, що полегшує всмоктування фосфору рослинами. Цей тип добрив можна використовувати на будь-якому типі ґрунту та при всіх типах вирощування, а також на луках та пасовищах, тому їх і називають . Фосфор є одним з основних поживних речовин для рослин, а його недолік проявляється їх жорсткістю та схильністю до ламкості, відсутністю блиску, можуть з'являтися також червоні плями на листі.

У бакалаврській роботі проведена робота по розробці автоматизації технологічного процесу отримання простого гранульованого суперфосфату, визначені параметри управління і сигналізації, визначені канали впливу на регульовані параметри, вибрані засоби автоматизації, що забезпечують нормальний хід цього процесу з використанням різних автоматичних пристроїв контролю, регулювання, сигналізації та ін., а також автоматичне керування пуском і зупинкою обладнання для проведення ремонтних робіт і у критичних ситуаціях.

Цілі, які планується досягти при розробці оптимізації управління технологічним процесом при виконанні бакалаврської роботи:

- скасування участі людини при вимірюванні параметрів процесу, зменшення впливу людини на функції управління технологічними параметрами;
- ведення технологічного процесу на основі автоматичного контролю технологічних параметрів;

- автоматичне керування виконавчими механізмами;
- запобігання виникненню аварійних ситуацій і забезпечення безпечного завершення процесу за заданим алгоритмом;
- безаварійний пуск/зупинку і перемикання технологічного обладнання;
- візуалізація параметрів технологічного процесу в номінальних і аварійних ситуаціях;
- можливість інтегрування нижніх і верхніх рівнів системи з отриманням інформації з верхнього рівня системи управління з метою формування керуючих впливів на виконавчі механізми передачею, відповідно, інформації з нижніх рівнів системи управління з метою аналізу роботи виробництва.

1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

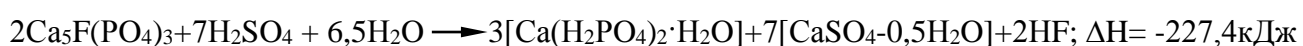
Отримання простого суперфосфату шляхом впливу сірчаної кислоти на фторапатит – це складний та багатоетапний процес.. Сама реакція протікає переважно у дифузному середовищі. Першим етапом є підготовка фосфоритів, який полягає у подрібненні їх зерен до розміру менше 0,16 мм. Паралельно з цим процесом можна проводити розведення (до концентрації близько 68%) та охолодження сірчаної кислоти. Залежно від виду використовуваної сировини застосовують H_2SO_4 з різною температурою. Як правило, це близько 30-40 °С у випадку фосфоритів і приблизно 60-70 °С у разі апатитів. Подрібнену сировину транспортують на ваги та пересипають у змішувач безперервної дії. Потім додають сірчану кислоту.

Наступний етап отримання простого суперфосфату полягає у його змішуванні, тобто. механічне змішування всіх компонентів. Вже зараз ініціюється початкове розкладання фосфоритів. Після змішування вміст із змішувача потрапляє в реакційну камеру безперервної дії, де протікають процеси застигання та твердіння.

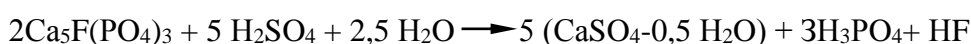
На подальшому етапі суперфосфат подрібнюють, а потім зберігають при температурі близько 35-40°C. Так підготовлена маса „дозріває” протягом приблизно 2-3 тижнів і в цей час завершується реакція розкладання фосфоритів. Під час циклу дозрівання в SSP зменшується вміст вільної фосфорної кислоти та збільшується кількість P_2O_5 , який дуже добре засвоюється рослинами. Перемішування суперфосфату під час зберігання, додатково, прискорює процеси, що відбуваються.

Останнім етапом є грануляція суперфосфату. Це надзвичайно важливий процес через те, що він впливає на фізичні властивості кінцевого продукту. Весь етап грануляції здійснюється в барабанних грануляторах, що обертаються. Порошкоподібний суперфосфат зволожують за допомогою розбризкувачів, а обертальний рух барабана призводить до утворення гранул різного розміру. Таким чином, підготовлений продукт після фінального сушіння поділяють на фракції з гранулами різного розміру і упаковують у паперові мішки. Зміст фосфору в простому суперфосфаті, як правило, становить 16-20% у перерахунку на P_2O_5 .

Процес розкладання може бути представлений наступним сумарним рівнянням:



Практично у процесі виробництва простого суперфосфату розкладання протікає у дві стадії. На першій стадії близько 70% апатиту реагує із сірчаною кислотою. При цьому утворюються фосфорні кислоти та напівгідрат сульфату кальцію.:



На рис. 1.1 зображена технологічна схема отримання простого суперфосфату безперервним способом з використанням кільцевої камери, що обертається.

Сірчану кислоту, підігріту до 55-65°C, з напірного бака 4 направляють в кислотний змішувач 2, де її розбавляють водою до утворення 68-68,5% H₂SO₄. Застосування сульфатної кислоти нижчої концентрації неприпустимо, оскільки з кислотою вводиться дуже багато води. В результаті може утворитися вологий суперфосфат або, взагалі, пульпа, що не затвердіє. Стехіометрична норма сульфатної кислоти складає 63,47 кг 100%-вої H₂SO₄ на 100 кг сировини. Щоб прискорити процес розкладання, практичну норму витрати сульфатної кислоти підвищують до 68-72 кг.

Через щілинний витратомір 3 сірчану кислоту безперервно подають у змішувач 25, де протягом декількох хвилин змішують з апатитовим концентратом, що надходить з бункера 1 через ваговий дозатор 26. Ступінь подрібнення фосфату значно впливає на швидкість розкладання. Дрібні частки сировини розкладаються швидше, ніж великі. Проте з підвищенням ступеня помелу фосфату збільшується витрата енергії на подрібнення. Дуже впливає на швидкість розкладання фосфату в початковий період інтенсивність і тривалість перемішування реагентів в змішувачі. Інтенсивне перемішування забезпечує однорідність пульпи, знижує ступінь пересичення розчину в пограничному шарі, що сприяє утворенню більших кристалів кальцій сульфату і, отже, проникних плівок на зернах фосфату. Це, у свою чергу, прискорює розкладання. Щоб уникнути затвердіння реакційної пульпи в змішувачах, тривалість перемішування має бути не більше 5-7 хв. Швидкість розкладання фосфатів збільшується зі зростанням температури. Однак при дуже високій температурі погіршуються фізичні властивості суперфосфату. Утворена при змішуванні густа сметаноподібна пульпа при температурі 110...115 °C безперервно надходить поступає в обертову суперфосфатну камеру 24. Тут продовжується реакція розкладання фосфату сульфатною кислотою, яка почалася ще в змішувачі. По мірі обертання камери суперфосфатна маса схоплюється і підходить для вивантаження до фрези. Підвищення температури сприяє також інтенсивнішому виділенню фторвмісних газів і більшому випаровуванню води, тобто зниженню вологості суперфосфату. В оптимальних умовах температура в суперфосфатній камері знаходиться в межах 115-120°C. Необхідний температурний режим підтримується за рахунок підігрівання вихідної сульфатної кислоти до 55-65°C.

Після затвердіння суперфосфатну масу вирізають ножами фрезера 22. Зрізаний суперфосфат через центральну (розвантажувальну) трубу 23 видаляють з камери і стрічковим транспортером 21 подають на склад. З транспортера суперфосфат потрапляє на розкидач 20, що розбиває грудки суперфосфату. При цьому частина вологи випаровується та суперфосфат охолоджується.

Фторвмісні гази, що виходять з камери, надходять на очищення в абсорбційні камери, зрошені водою або розведеним кремнієм фтористоводневою кислотою. При циркуляції в камерах утворюється 8-10%-ний розчин H_2SiF_6 , який відводять на переробку.

Суперфосфат витримують протягом 5-20 діб на складах, де він зберігається в купах висотою 6-10 м. Протягом цього часу за допомогою грейферного крана 19 суперфосфат 2-3 рази перелопачують для охолодження.

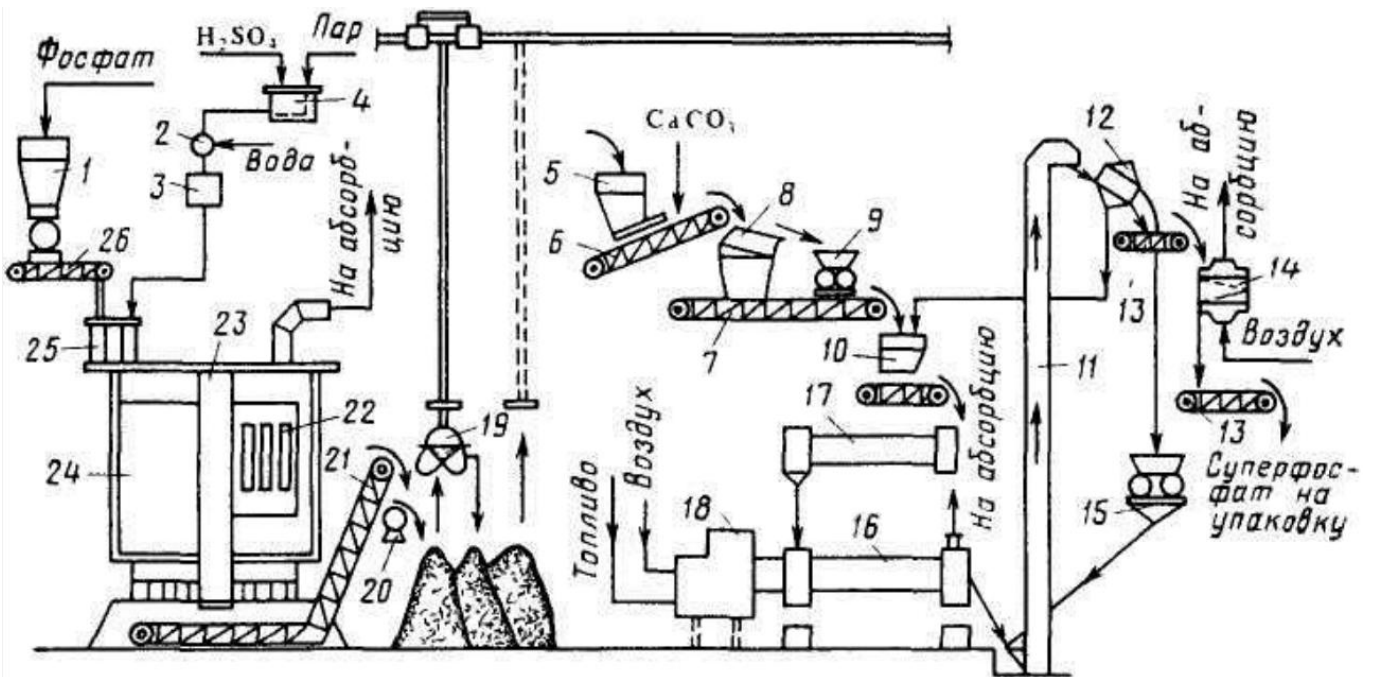


Рисунок - 1.1. Технологічна схема отримання простого гранульованого суперфосфату:

1 - бункер; 2 - кислотний змішувач; 3 - напірний бак; 4 - нагрівач кислоти; 5 - бункер для визрілого суперфосфату; 6, 7, 13, 21, 27 - транспортери; 8, 12 - гуркоти; 9, 15 - валкові дробарки; 10 - бункер для нейтралізованого суперфосфату; 11-елеватор; 14 - холодильник; 16 - барабанна сушарка; 17 - барабанний гранулятор; 18 - топка; 19 - грейферний кран; 20 - розкидач; 22 - фрезер; 23 - центральна (розвантажувальна) труба; 24 - суперфосфатна камера; 25 - шнековий змішувач; 26 - ваговий дозатор фосфату; 28- ваговий дозатор суперфосфату; 29 - ваговий дозатор ретурю.

Зрілий суперфосфат змішують із сухим вапняком для нейтралізації, відділяють від великих частинок на гуркоті 8 і подрібнюють у валковій дробарці 9. Потім у процесі гранулювання у барабанному грануляторі 17 порошкоподібний суперфосфат у певному співвідношенні, при якому готовий продукт відповідав би стандарту, змішують з ретуром, звожують і при обертанні барабана обкатують у гранули округлої форми. При неправильному дозуванні процес гранулювання порушується. Процес намагаються вести таким чином, щоб

звести до мінімуму добавку ретуру і забезпечити максимальний вихід товарної фракції. Вміст ретура в шихті, що надходить на гранулювання, складає всього приблизно 15- 30% мас. З підвищенням вмісту ретуру в шихті оптимальна її вологість знижується. Велике значення має також тривалість гранулювання і коефіцієнт заповнення гранулятора матеріалом. Для того, щоб встигло відбутися обкочування часток і утворилися нормальні гранули, потрібно 10-12 хв. Заповнення гранулятора не повинне перевищувати 25% його об'єму.

Вологі гранули сушать у барабанній сушарці 16 топковими газами. Температура продукту в процесі сушки не повинна перевищувати 105°C, щоб уникнути переходу водорозчинного монокальційфосфату в нерозчинні ди- і метафосфати кальцію. Тому при сушці суперфосфат і топкові газу рухаються проточією, тобто гарячий газ контактує з найбільш вологим продуктом, що зменшує загрозу перегріву. Топкові газу входять до сушарки з температурою 500°C, а виходять з неї при 150°C. Висушений продукт класифікують на віброгуркоті 12.

Фракція гранул розміром 1-4 мм є товарним продуктом. При правильній підготовці шихти, нормальному проведенні процесів гранулювання і сушіння продукт, що виходить із сушильного барабана, містить 80-84% гранул розміром від 1 до 4 мм. Дрібну фракцію направляють на грануляцію у вигляді ретуру, а крупну подрібнюють і знову повертають на класифікацію.

Товарний продукт охолоджують повітрям у апараті 14 з псевдозрідженим шаром твердої фази і подають на затарювання. Дрібну фракцію знову спрямовують на грануляцію, а велику подрібнюють у дробарці 15 і повертають елеватором 11 на гуркіт.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ, ПОБУДОВА СХЕМИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ

Будь-який технологічний процес виробництва характеризується рядом основних і допоміжних матеріальних і енергетичних потоків, які визначають кількісні і якісні показники технологічного процесу та відповідні показники готової продукції. Зважаючи на те, що якісні показники продукції в режимі реального часу контролювати не завжди можна, їхні значення досягаються шляхом підтримання показників матеріальних потоків і параметрів середовища обробки (реакцій) матеріалів (реагентів). Тому для наочного уявлення матеріальних, енергетичних потоків і пов'язаних з ними інформаційних потоків між складовими в технологічному процесі отримання простого гранульованого суперфосфату має істотне значення схема матеріально- інформаційних потоків.

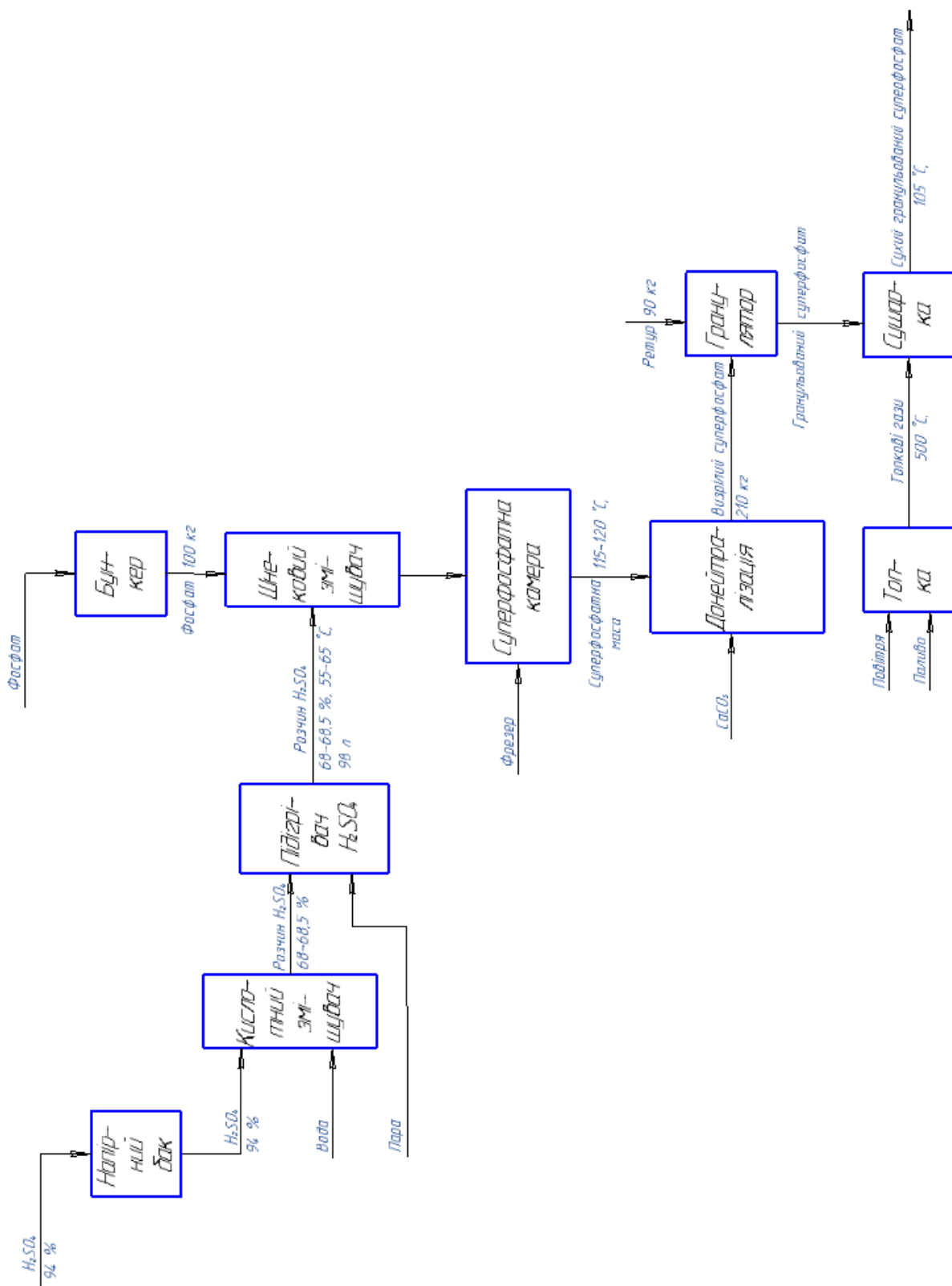


Рисунок 2.1- Схема матеріально-інформаційних потоків технологічного процесу отримання простого гранульованого суперфосфату.

3 ВИБІР ПАРАМЕТРІВ КОНТРОЛЮ, РЕГУЛЮВАННЯ ТА СИГНАЛІЗАЦІЇ

При виборі регульованих величин визначаються істотні показники ефективності і їх значення при протіканні процесу, взаємозв'язок його з іншими процесами, а також аналізується можливість появи збурень в об'єкт управління. Визначаються шляхи усунення збурень або їх стабілізації.

Як об'єкт управління розглядається технологічний процес отримання простого гранульованого суперфосфату.

Показниками ефективності цього технологічного процесу є отримання простого гранульованого суперфосфату з мінімальною кількістю домішок і мінімальною затратою енергії, що досягається підтриманням необхідних режимів проведення хімічних реакцій.

Контролю підлягають практично всі параметри регулювання. Контролю підлягають ті параметри, значення яких забезпечить правильний пуск, наладку, роботу, зупинку об'єкта управління (ОУ).

Контролю підлягають ті параметри, при порушенні яких в ОУ можуть надходити впливи, які можуть призвести до порушення нормального ходу технологічного процесу, виникнення браку або передаварійної і аварійної ситуації, отруєння персоналу виробничими реагентами.

Для оптимального проведення хімічних реакцій необхідно підтримувати концентрацію H_2SO_4 68-68,5%, температуру H_2SO_4 на вході технологічного процесу на рівні 55-65 °С, норму витрати H_2SO_4 68-72 кг на 100 кг сировини; масу 100 кг сировини на вході шнекового змішувача, температуру 115-120° °С в суперфосфатній камері, співвідношення 70%:30% складу шихти (порошкоподібний суперфосфат : ретур) на вході гранулятора , температуру продукту 105° С в процесі сушки.

Аварійна сигналізація оповіщає про неприпустимі значення параметрів процесу або про аварійний відхилення будь-якого апарату технологічної системи.

Сигналізація положення (стану) вказує на стан об'єктів (відкриті або закриті) в даний момент. Цей вид сигналізації здійснюють за допомогою анімаційних ефектів на мнемосхемі.

Перелік перерахованих параметрів і функцій в системі управління наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1_ Перелік параметрів, які впливають на хід технологічного процесу

№ п.п.	Точка технологічної схеми	Параметр	Функція	Величина
1	Вихід кислотного змішувача	Концентрація H_2SO_4	Контроль, управління	68-68,5%
2	Вихід нагрівача кислоти	Температура H_2SO_4	Контроль, управління	55-65 °С
3	Вхід шнекового змішувача	Маса сировини	Контроль, управління	100 кг

Продовження табл. 3.1

4	Суперфосфатна камера	Температура суперфосфатної маси	Контроль, Управління, сигналізація	115-120° °С
5	Вхід барабанного гранулятора	Співвідношення за масою порошкоподібний суперфосфат : ретур	Контроль, управління	70%:30%
6	Вихід топки	Температура топкових газів	Контроль, управління	500 °С
7	Вихід барабанної сушарки	Температура сухого суперфосфату	Контроль, сигналізація	105 °С

Структурна схема автоматизації представлена на рисунку 3.1.

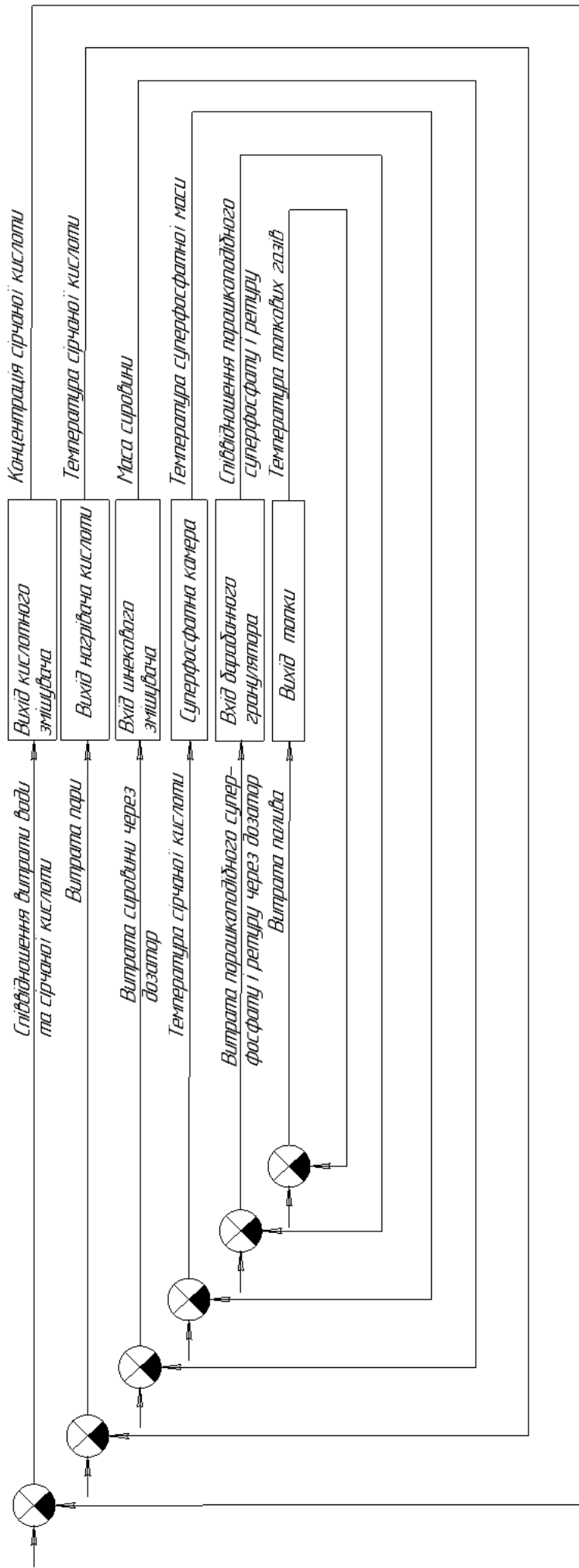


Рисунок 2.1-Структурна схема автоматизації.

4 ВИБІР КАНАЛІВ ВНЕСЕННЯ РЕГУЛЮЮЧИХ ДІЙ

4.1 Концентрацію H_2SO_4 на виході кислотного змішувача будемо регулювати шляхом зміни витрати води на вході кислотного змішувача у відповідності до витрати H_2SO_4 на вході кислотного змішувача. Канал контролю і управління концентрацією H_2SO_4 на виході кислотного змішувача представлений на рис. 4.1.

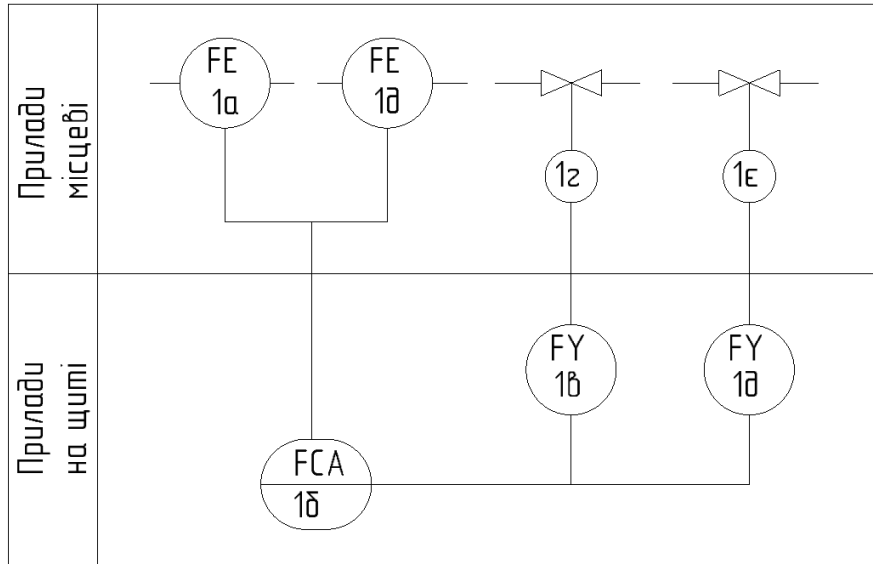


Рисунок 4.1 – Контур контролю і управління концентрацією на виході кислотного змішувача.

До складу каналу управління входить датчик витрати H_2SO_4 , датчик витрати води, перетворювачі сигналів датчиків, контролер - універсальний регулятор, перетворювачі сигналів контролера, виконавчі механізми і виконавчі органи на вхідних трубопроводах H_2SO_4 і води.

4.2 Температуру H_2SO_4 на виході нагрівача кислоти будемо регулювати за допомогою зміни витрати пари через нагрівач кислоти. Канал контролю і управління температурою H_2SO_4 на виході нагрівача кислоти представлений на рис. 4.2.

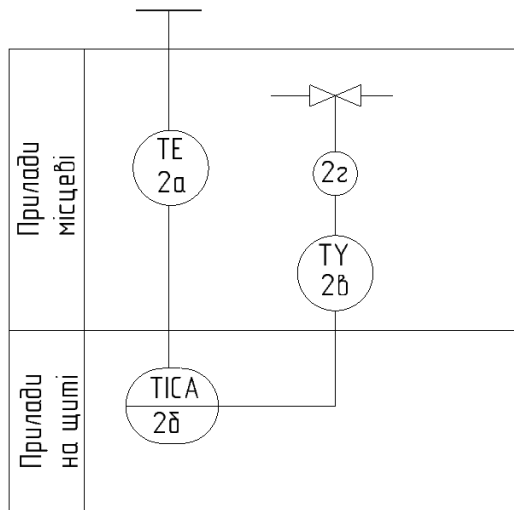


Рисунок 4.2 – Контур контролю і управління температурою H_2SO_4 на виході нагрівача кислоти.

До складу каналу управління входить датчик температури, перетворювач сигналу датчика, контролер - універсальний регулятор, перетворювач сигналу контролера, виконавчий механізм, виконавчий орган на трубопроводі подачі пари на вхід нагрівача кислоти.

4.3 Масу сировини на вході шнекового змішувача будемо регулювати за допомогою зміни витрати сировини із бункера фосфату через ваговий дозатор. Канал контролю і управління масою сировини на вході шнекового змішувача представлений на рис. 4.3.

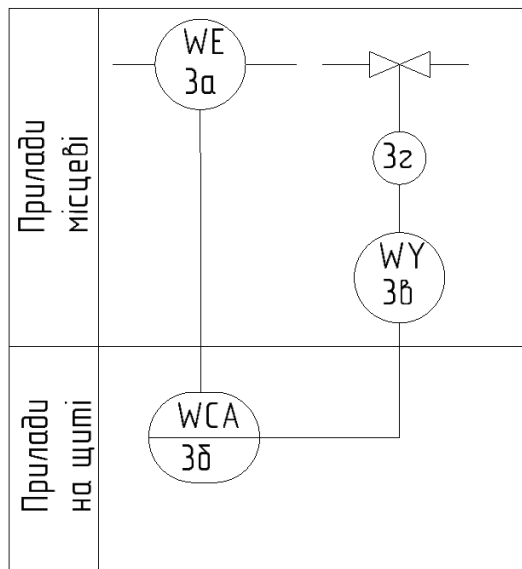


Рисунок 4.3 – Контур контролю і регулювання маси сировини на вході шнекового змішувача.

До складу каналу регулювання входить датчик маси сировини, перетворювач сигналу датчика, контролер - універсальний регулятор, перетворювач сигналу контролера, виконавчий механізм, виконавчий орган на бункері фосфату.

4.4 Температуру суперфосфатної маси у суперфосфатній камері будемо регулювати за допомогою зміни температури сірчаної кислоти шляхом зміни витрати пари через нагрівач кислоти. Канал контролю і управління температурою суперфосфатної маси у суперфосфатній камері представлений на рис. 4.4.

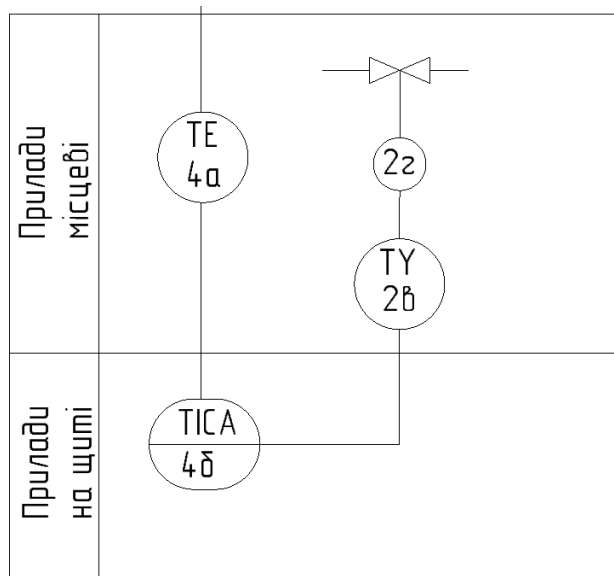


Рисунок 4.4 – Контур контролю і управління температурою суперфосфатної маси у суперфосфатній камері.

До складу каналу управління входить датчик температури, перетворювач сигналу датчика, контролер - універсальний регулятор, перетворювач сигналу контролера, виконавчий механізм, виконавчий орган на трубопроводі подачі пари на вхід нагрівача кислоти.

4.5 Співвідношення за масою порошкоподібний суперфосфат : ретур на вході барабанного гранулятора будемо регулювати за допомогою зміни витрати порошкоподібного суперфосфату через ваговий дозатор порошкоподібного суперфосфату і ретур через ваговий дозатор ретур на барабанного гранулятора . Канал контролю і управління співвідношенням за масою порошкоподібний суперфосфат : ретур на вході барабанного гранулятора представлений на рис. 4.5.

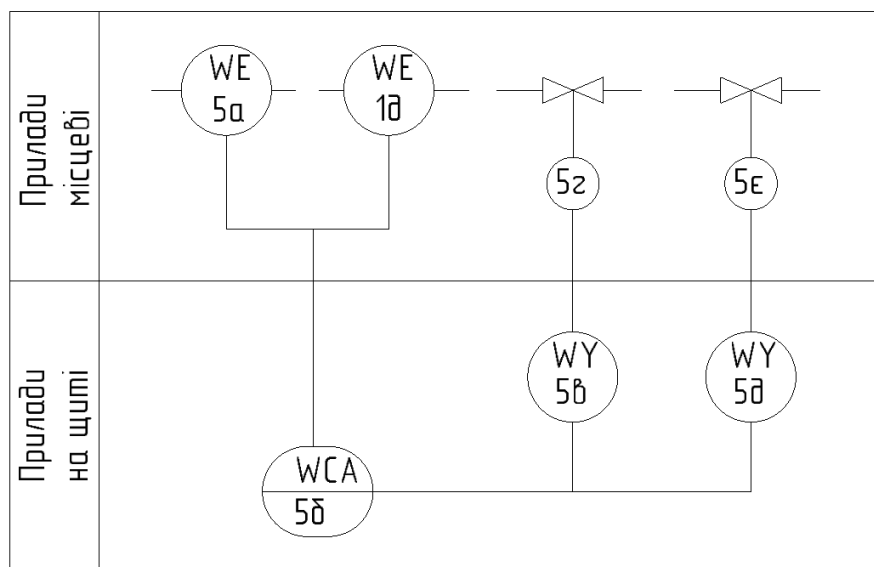


Рисунок 4.5 – Контур контролю і управління співвідношенням за масою порошкоподібний суперфосфат : ретур на вході барабанного гранулятора.

До складу каналу управління входить датчик маси порошкоподібного суперфосфату, датчик маси ретуру, перетворювачі сигналів датчиків, контролер - універсальний регулятор, перетворювачі сигналів контролера, виконавчі механізми і виконавчі органи на подачі порошкоподібного суперфосфату і ретуру.

4.6 Температуру топкових газів на виході топки будемо регулювати за допомогою зміни витрати палива на вхід топки. Канал контролю і управління температурою топкових газів на виході топки представлений на рис. 4.6.

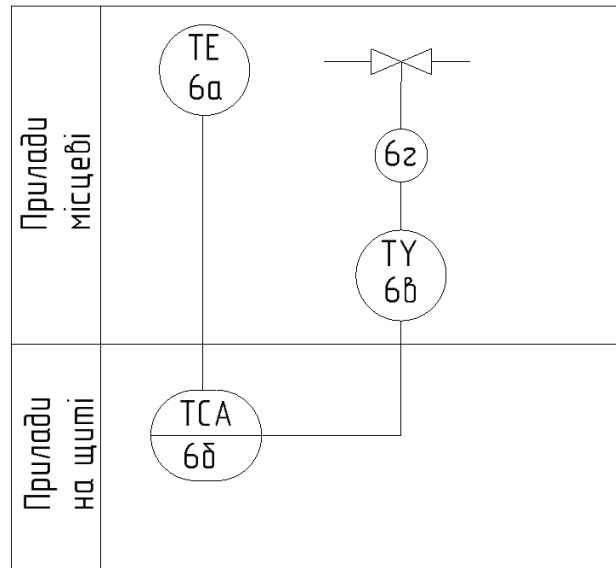


Рисунок 4.6 – Контур контролю і управління температурою топкових газів на виході топки.

До складу каналу управління входить датчик температури, перетворювач сигналу датчика, контролер - універсальний регулятор, перетворювач сигналу контролера, виконавчий механізм, виконавчий орган на трубопроводі подачі палива на вхід топки.

4.7 Температуру продукту на виході барабанної сушарки будемо контролювати за схемою, наведеною на рис. 4.7.

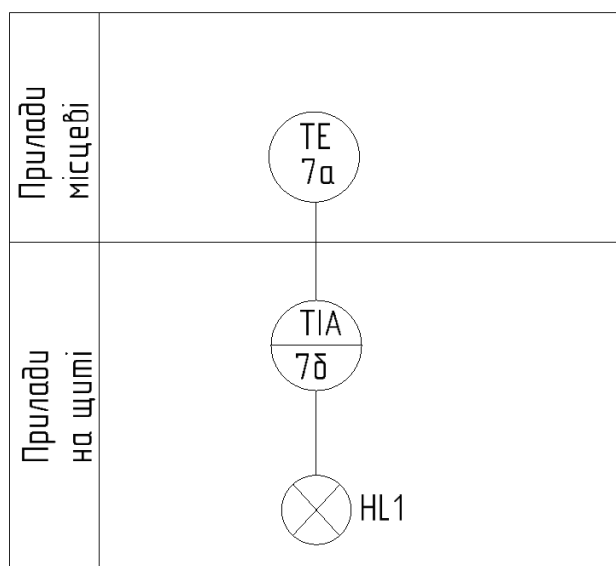


Рисунок 4.7 – Схема контролю температури продукту на виході барабанної сушарки

До складу схеми контролю температури входить датчик температури, пристрій індикації, пристрій сигналізації.

5 ВИБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Вибір датчиків

Для вимірювання параметрів технологічного процесу потрібно вибрати датчики, що відповідають необхідним межам вимірювань, точності, умовам застосування.

5.1.1 Вибір датчиків витрати

5.1.1.1 Датчик витрати води у каналі контролю і управління концентрацією H_2SO_4 на виході кислотного змішувача

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 30 °C;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- витрата 0...0,1 м³/год.

У каналі застосуємо стаціонарний ультразвуковий витратомір води FLUXUS WD[9] фірми FLEXIM.

Серія FLUXUS WD відноситься до найбільш надійних та точних неінвазивних ультразвукових систем вимірювання витрати – вони навіть вимірюють витрату до 0,01 м/с. Неточність інших вимірювальних технологій, таких як магнітно-індуктивні вимірники, може настільки різко зрости в діапазоні мінімальних витрат, що вони не підходять для контролю мінімальних витрат.

Для цих інструментів немає методу корекції дрейфу нуля - тому що вони просто не дрейфують. Це також стосується серії WD, яка встановлюється без калібрування нуля і постійно залишається без дрейфу. FLEXIM - єдина компанія, яка досягає цього завдяки унікальній комбінації узгоджених п'єзоперетворювачів та розширеного заводського калібрування.

FLEXIM поставляє серію WD із найміцнішою системою кріплення на ринку. Перетворювачі кріпляться до труби за допомогою широких стрічок із нержавіючої сталі та закріплюються у міцних корпусах із нержавіючої сталі. Самі перетворювачі мають захист IP68 та посилені кабелі перетворювачів. Ще однією унікальною особливістю FLEXIM є те, що датчики з'єднані за допомогою постійних контактних майданчиків, а не за допомогою гелю, який може зіпсуватися або змитися. Все це забезпечує довговічність системи та робить її придатною як для камерної, так і для підземної установки.

Вимірювач WD доступний з трьома типами перетворювачів і підходить для внутрішніх діаметрів від 50 до 6500 мм. Високий вихідний сигнал і технологія придушення шуму дозволяють використовувати серію WD для труб з будь-яких матеріалів, навіть для таких складних як труби з армованого волокном пластику (FRP). Видатні характеристики FLEXIM підтвержені тисячами відгуків у всьому світі.

Зовнішній вигляд стаціонарного ультразвукового витратоміра води FLUXUS WD наведений на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 - Зовнішній вигляд стаціонарного ультразвукового витратоміра води FLUXUS WD.

Технічні характеристики стаціонарного ультразвукового витратоміра води FLUXUS WD наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1_Технічні характеристики стаціонарного ультразвукового витратоміра води FLUXUS WD.

Характеристика	Значення
Невизначеність вимірювання вимірювальної системи (об'ємна витрата)	$\pm 0,3\%$ від показання $\pm 0,005$ м/с
Невизначеність виміру в точці виміру (об'ємна витрата)	$\pm 1,0\%$ від показання $\pm 0,005$ м/с
Повторюваність	$0,15\%$ від показання $\pm 0,005$ м/с
Діапазон швидкості потоку	0,01 ... 25 м / с
Передавач зони Ех	тільки безпечна зона
Джерело живлення	100-230 В змінного струму, 24 В постійного струму, 12 В постійного струму
Доступний датчик	Хвиля зсуву
для діапазону розмірів труб	50 мм ... 6500 мм
для діапазону температур	-40 °С...+130 °С

Продовження таблиці 5.1

Виходи	4-20 мА активний/пасивний 4-20 мА HART активний/пасивний імпульсний / частотний / двійковий
Цифровий зв'язок	Modbus RTU/TCP BACnet MSTP/IP M-Bus Profibus PA Foundation Fieldbus

5.1.1.2 Датчик витрати H₂SO₄ у каналі контролю і управління концентрацією H₂SO₄ на виході кислотного змішувача

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 30 °С;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- витрата 0...0,1 м³/год.;
- агресивне робоче середовище.

У каналі застосуємо стаціонарний ультразвуковий витратомір для рідини PIOX S721[10] фірми FLEXIM.

PIOX S721 визначає масову витрату, концентрацію, щільність та інші параметри за допомогою ультразвукових накладних перетворювачів, встановлених на зовнішній стороні труби. Неінвазивна акустична технологія - це система вибору, коли речовини та процеси висувають найвищі вимоги до безпеки та надійності.

У великій кількості систем бінарних середовищ швидкість звуку знаходиться у фіксованій пропорції з концентрацією та щільністю. PIOX S721 вимірює швидкість звуку, тим самим визначаючи щільність та концентрацію середовища всередині труби. Одночасно реєструючи об'ємну витрату, PIOX S721 автоматично розраховує масову витрату.

Практично для всіх розмірів та матеріалів труб - будь то сталь, пластик, скло або спеціальні матеріали з покриттями.

Для температур до 400 °С.

Практично для всіх кислот, лугів та широкого спектру інших токсичних середовищ.

Для вибухонебезпечних зон - датчики та перетворювачі доступні у варіантах із сертифікатами ATEX, IECEx та FM.

Для 100% готовності установки – точка виміру може бути налаштована під час роботи.

Вимірювальна система PIOX S, що складається з передавача та пари накладних датчиків, точно визначає швидкість звуку в середовищі на основі часу проходження ультразвуку, виміряного між двома датчиками на поверхні труби. Оскільки вони не контактують із середовищем, система ідеально підходить для вимірювання хімічно агресивних, корозійних, абразивних чи особливо чистих середовищ.

PIOX S можна використовувати для визначення концентрації сірчаної кислоти високої чистоти, плавикової кислоти, азотної кислоти або навіть газоподібного аміаку, що використовується на заводах з виробництва добрив. Занепокоєння про хімічну сумісність, забруднення та герметичність датчиків залишилося у минулому.

Зовнішній вигляд стаціонарного ультразвукового витратоміра для рідини PIOX S721 наведений на рис. 5.2.



Рисунок 5.2 - Зовнішній вигляд стаціонарного ультразвукового витратоміра для рідини PIOX S721.

Технічні характеристики стаціонарного ультразвукового витратоміра для рідини PIOX S721 наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2_Технічні характеристики стаціонарного ультразвукового витратоміра для рідини PIOX S721.

Характеристика	Значення
Невизначеність виміру (об'ємна витрата)	$\pm 1,0\%$ від показання $\pm 0,005$ м/с
Повторюваність	$0,15\%$ від показання $\pm 0,005$ м/с
Діапазон швидкості потоку	0,01 ... 25 м / с
Перетворювач вибухонебезпечної зони	ATEX / IECEx зона 2, FM клас I / розділ 2
Джерело живлення	100-230 В змінного струму, 24 В постійного струму, 12 В постійного струму
Доступний датчик для вибухонебезпечних зон	Поперечна хвиля

Продовження таблиці 5.2

для діапазону розмірів труб	10 мм ... 6500 мм
для діапазону температур	-40 ° C ... + 240 ° C / WI: -200 ° C ... + 600 ° C
Виходи	4-20 мА активний/пасивний 4-20 мА HART активний/пасивний імпульсний / частотний / двійковий
Входи	Pt100/Pt1000 4-20 мА активний/пасивний двійковий вхід
Невизначеність вимірювання вимірювальної системи (об'ємна витрата)	±0,3% від показання ±0,005 м/с
Цифровий зв'язок	Modbus RTU/TCP BACnet MSTP/IP Profibus PA Foundation Fieldbus

5.1.2 Вибір датчиків температури

5.1.2.1 Датчик температури у каналі контролю температури H₂SO₄ на виході нагрівача H₂SO₄

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 100 °C;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- агресивне робоче середовище.

У каналі застосуємо вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248[12] з первинним перетворювачем типу К (ТХА) з НСХ типу К[11] у цілісноточеній захисній гільзі із сталі 10X17H13M2T (закордонний аналог AISI 316) з уніфікованим вихідним сигналом, призначений для вимірювання температури різних середовищ у широкому переліку галузей промисловості.

Rosemount 248 має стандартну конструкцію вимірювального перетворювача, що має гнучкість і надійність застосування у технологічних середовищах.

Вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248 забезпечує аналого-цифрове перетворення первинного сигналу від чутливого елемента, обробку результатів перетворення і цифро-аналогове перетворення у стандартний вихідний сигнал 4-20 мА з накладанням цифрового сигналу HART-протоколу.

Він має такі особливості:

Вимірювальний перетворювач, що монтується в головці, у виконанні DIN B;

- Кілька варіантів корпусу для DIN B;
- Монтаж на рейці;
- Протокол HART®/4–20 mA;
- Підтримує підключення термоперетворювача опору, термоелектричного перетворювача, а також мілівольтних та омичних пристроїв;
- Узгодження первинного перетворювача та вимірювального перетворювача постійними Каллендара-Ван Дюзена;
- Сумісність із рівнем безпеки SIL2: сертифікація за стандартом IEC 61508 незалежним акредитованим органом для використання у системах протиаварійного захисту до SIL 2;
- Підвищена точність та надійність у порівнянні з прямим підключенням сенсорів до цифрових систем управління за нижчих загальних витрат на монтаж;
- Річний рівень стабільності знижує витрати на технічне обслуговування;
- Діагностика сенсора з розмиканням/закорочуванням допомагає виявити проблеми у ланцюгах сенсорів;
- Компенсація температури навколишнього середовища покращує роботу вимірювального перетворювача.

Зовнішній вигляд термоперетворювача з уніфікованим вихідним сигналом Rosemount 248 наведений на рис. 5.3.



Рисунок 5.3 - Зовнішній вигляд термоперетворювача з уніфікованим вихідним сигналом Rosemount 248.

Первинний перетворювач поміщений у захисну арматуру, вимірювальний перетворювач (ВП) Rosemount 248 вбудований у сполучну головку або розташований на DIN рейці.

Сполучна головка має внутрішній та зовнішній гвинти заземлення.

У ВП Rosemount 248 реалізована гальванічна розв'язка входу від виходу.

У разі використання перетворювачів термоелектричних як первинних перетворювачів в Rosemount 248 виконується автоматична компенсація зміни термо-ЕРС при зміні температури холодного спаю.

Характеристики датчика температури Rosemount 248 наведені у табл 5.3.

Таблиця 5.3_Характеристики датчика температури Rosemount 248

Характеристики	Значення	
Вимірювальний термоперетворювач Rosemount 248		
НСХ (первинний перетворювач)	К (ТХА), N (ТНН), S, R (ТПП), В (ТПР), Е (ТХК), J (ТЖК), Т (ТМК), Pt100, Pt200, Pt500, Pt1000 (ТСП), Ni120, L(ТХК)	
Діапазон вимірювань, °С	залежно від НСХ первинного перетворювача	
Вхідні сигнали первинних перетворювачів (кількість каналів)	1	
Можливий протокол обміну даними/вихідний сигнал вимірювального перетворювача	HART/4 -20 мА	
Міжповірочний інтервал	на ВП - 2 роки (вир-во Німеччини); - 5 років (вир-во РФ).	
Основна похибка вимірювального перетворювача для НСХ Pt100, ±°С	0,2 похибка тільки ВП	
Вбудований захист від стрибків напруги	Є	
Діапазон температур довкілля, °С	- 40...85 (опція -51...85, -60...85)	
Ступінь пиловологозахисту	IP66/IP68	
Види виконань вибухозахисту	Exia і Exd	
Гальванічна розв'язка (вхід/вихід)	Є	
РКІ (відображення вимірюваної величини)	Нема	
Функції діагностики	Стандартна діагностика HART	
Первинний перетворювач		
	Термоперетворювачі опору Rosemount 0065	Термоелектричний перетворювач Rosemount 0185
Можливі НСХ	Pt100	J, K, N
Діапазон вимірюваних температур, °С	-196...600	-40...1000

Продовження таблиці 5.3

Клас точності	AA (1/3B), A, B	1
Діапазон довжин первинного перетворювача (стандартне), мм	50...2 500	50...2 500
Конструктивне виконання	Без захисної гільзи; Зварювальна захисна гільза; Цілісноточена захисна гільза	Без захисної гільзи; Зварювальна захисна гільза; Цілісноточена захисна гільза
Кількість ЧЕ	1 чи 2	1 чи 2
Схема для термоопорів/Спай для термопар	3-х, 4-х провідна	ізолюваний, неізолюваний
Види виконання вибухозахисту	Exia і Exd	Exia і Exd
Ступінь захисту	IP65/IP68	IP65/IP68
Міжповірочний інтервал	4 роки	4 роки
Матеріал захисної арматури	1.4404 (AISI 316L), 1.4571 (AISI 316Ti)	1.4404 (AISI 316L), 1.4571 (AISI 316Ti)

5.1.2.2 Датчик температури у каналі контролю і управління температурою суперфосфатної маси у суперфосфатній камері

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 115-120 °С;
- – тиск 0...0,101325 МПа;
- агресивне робоче середовище.

У каналі застосуємо вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248 з первинним перетворювачем типу К (ТХА) з НСХ типу К у цілісноточеній захисній гільзі із сталі 10X17H13M2T (закордонний аналог AISI 316) з уніфікованим вихідним сигналом як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

5.1.2.3 Датчик температури у каналі контролю і управління температурою топкових газів на виході топки

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 500 °С;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- агресивне робоче середовище.

У каналі застосуємо вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248 з первинним перетворювачем типу К (ТХА) з НСХ типу К у цілісноточеній захисній гільзі із сталі 10X17H13M2T (закордонний аналог AISI 316) з уніфікованим вихідним сигналом як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

5.1.2.4 Датчик температури у каналі контролю температури висушеного суперфосфату на виході барабанної сушарки

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 105 °С;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- агресивне робоче середовище.

У каналі застосуємо вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248 з первинним перетворювачем типу К (ТХА) з НСХ типу К у цілісноточеній захисній гільзі із сталі 10X17H13M2T (закордонний аналог AISI 316) з уніфікованим вихідним сигналом як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

5.1.3 Вибір датчиків ваги (маси)

5.1.3.1 Датчик ваги у каналі контролю і управління масою сировини у ваговому дозаторі на вході шнекового змішувача

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 30 °С;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- вага 0...100 кг.

У каналі застосуємо тензодатчик CAS SBA-1 500 кг[13] як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

Тензометричний датчик SBA-1 500 кг виробництва корейської фірми CAS має велику популярність на сучасному ринку. Виготовлений із високоякісної сталі, є покриття проти корозії. Максимально допустиме навантаження – 500 кг. Належить датчик до S-подібного типу.

Користуватися датчиком можна за температури від -30 до +80 градусів. Модель має високий клас захисту від проникнення вологи та пилу – IP65, завдяки чому її можна використовувати у складних промислових умовах.

Зовнішній вигляд тензометричного датчика SBA-1 500 кг наведений на рис. 5.4.



Рисунок 5.4 - Зовнішній вигляд тензOMETричного датчика SBA-1 500 кг.

Характеристики тензOMETричного датчика SBA-1 500 кг наведені у табл 5.4.

Таблиця 5.4_Характеристики тензOMETричного датчика SBA-1 500 кг

Тип	S-подібний
Тип навантаження	Розтягування
Одиниця виміру навантаження	Кілограм
Максимальне значення навантаження	500
Захист обладнання від води та пилу IP	IP66
Мінімальна робоча температура	-30 °C
Максимальна робоча температура	80 °C
Клас точності	C3
Напруга живлення	10В
Матеріал виготовлення	Нержавіюча сталь
Вхідний опір (Ом)	400
Вихідний опір (Ом)	350

5.1.3.2 Датчик ваги у каналі контролю і управління масою порошкоподібного суперфосфату у ваговому дозаторі на вході барабанного гранулятора

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 30 °C;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- вага 0...100 кг.

У каналі застосуємо тензOMETричний датчик ВВ[14] і вузол вбудовування АКЕССУАР 30901[15] як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

Датчики ВВ були розроблені для малопотужних систем, наприклад, конвеєрних ваг, систем дозування та наповнення, платформних ваг. Цей датчик є датчиком зсуву.

Тензодатчики ВВ виготовляються з нержавіючої сталі та оснащені гофрованою мембраною, завдяки якій досягається висока герметичність.

Основні характеристики датчика:

Навантаження: 20кг – 200кг;

Матеріал: Нержавіюча сталь;

Клас захисту: IP68.

Зовнішній вигляд тензометричного датчика ВВ наведений на рис. 5.5.



Рисунок 5.5 - Зовнішній вигляд тензометричного датчика ВВ.

Характеристики тензометричного датчика ВВ наведені у табл 5.5.

Таблиця 5.5_Характеристики тензометричного датчика ВВ

Характеристика	Значення
Номінальне навантаження (E_{max}), кг	100
Клас точності (OIML R 60)	C1, C3, C5
Дискретність за класом (ρ_{LC})	1000, 3000, 5000
Мінімальний інтервал зважування (V_{min})	$E_{max}/5000$, $E_{max}/10000$, $E_{max}/20000$
Загальна помилка	± 0.05 , ± 0.02 , ± 0.012
Похибка повернення на нуль (DR), % E_{max}	0.004
Мінімальне навантаження, % E_{max}	0
Максимальне навантаження, % E_{max}	150
Допустиме горизонтальне навантаження, % E_{max}	100
Руйнівне навантаження, % E_{max}	200
Деформація (при E_{max}), мм	0.5
Максимальна напруга збудження (U_{max}), В	15
РКП (Cn), мВ/В	2 ± 0.1 %
Нульовий баланс, % Cn	± 1
Вхідний опір, Ом	380 ± 20
Вихідний опір, Ом	350 ± 3
Опір ізоляції, Ом	> 500
Компенсований робочий діапазон	-10...+40
Робочий діапазон температур	-40...+80

Продовження таблиці 5.5

Матеріал датчика	Нержавіюча сталь
Клас захисту (за класифікацією EN60529)	IP68
Довжина кабелю, м	5
Діаметр кабелю, мм	5

Вузол вбудовування – це один або кілька пристроїв, що застосовуються для правильної установки тензодатчика у складі системи ваги. Основне призначення даної продукції полягає у передачі навантаження на тензодатчик відповідно до вимог щодо його експлуатації, захисту від небажаних навантажень або вібрацій, що призводять до виникнення похибок або скорочення терміну служби.

Зовнішній вигляд тензометричного датчика ВВ у вузлі вбудовування наведений на рис. 5.6.

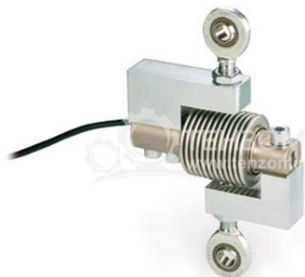


Рисунок 5.6 - Зовнішній вигляд тензометричного датчика ВВ у вузлі вбудовування.

5.1.3.3 Датчик ваги у каналі контролю і управління масою ретур у ваговому дозаторі на вході барабанного гранулятора

Вимоги робочого середовища вимірювання:

- температура до 30 °С;
- тиск 0...0,101325 МПа;
- вага 0...100 кг.

У каналі застосуємо тензометричний датчик ВВ і вузол вбудовування АКССУАР 30901 як такий, що повністю задовольняє вимогам робочого середовища вимірювання.

5.2 Вибір регулюючих органів

5.2.1 Канал управління концентрацією H_2SO_4 на виході кислотного змішувача

Для управління концентрацією H_2SO_4 на виході кислотного змішувача необхідно регулювати витрату H_2SO_4 і витрату води зміною положення клапанів на трубопроводі H_2SO_4 і на трубопроводі води на вході кислотного змішувача.

Вибираємо для сірчаної кислоти і для води також регулюючий електромагнітний клапан нержавіючий GEVAX 7901 1/2" N.C. 0 - 5 bar (PTFE)[16].

Використовується для автоматичного відкриття чи закриття потоку рідини, повітря, пари, нафтопродуктів, кислот, газу тощо. Соленоїдні клапани Gevax виконані в нержавіючому корпусі, шток та внутрішні запчастини з нержавіючої сталі. Тип клапан Нормально закритий (у знеструмленому стані закритий). Клапан даного типу застосовується у харчовій промисловості, хімічній, нафтовій, газовій промисловості, системах зрошення та зволоження повітря, приміщень.

Усі клапани Gevax укомплектовані електромагнітними котушками AMISCO (Італія). Напруга: 12V DC/AC, 24V DC/AC, 220V AC, 380V A.

Основні технічні характеристики:

Умовний діаметр: Ду 15.

Номінальний тиск: P_u 0 ... P_u 5 бар.

Температурний діапазон: від $-10\text{ }^\circ\text{C}$ до $+180\text{ }^\circ\text{C}$.

5.2.2 Канал управління температурою H_2SO_4 на виході нагрівача кислоти

Для регулювання температури H_2SO_4 на виході нагрівача кислоти необхідно регулювати витрату пари зміною положення клапана на трубопроводі пари на вході нагрівача кислоти.

Для однотипності використовуваного обладнання для управління зміною витрати пари будемо використовувати регулюючий електромагнітний клапан нержавіючий GEVAX 7901 1/2" N.C. 0 - 5 bar (PTFE) для води, пари, конденсату.

5.2.3 Канал управління температурою суперфосфатної маси у суперфосфатній камері

Для регулювання температури суперфосфатної маси у суперфосфатній камері необхідно регулювати температуру H_2SO_4 , що надходить у шнековий змішувач, зміною положення клапана на трубопроводі пари на вході нагрівача кислоти.

Для управління зміною витрати пари вже вибраний регулюючий електромагнітний клапан нержавіючий GEVAX 7901 1/2" N.C. 0 - 5 bar (PTFE) для води, пари, конденсату.

5.2.4 Канал управління температурою топкових газів на виході з топки

Для регулювання температури топкових газів на виході з топки необхідно регулювати витрату палива зміною положення клапана на трубопроводі подачі палива на вході топки.

Вибираємо для зміни витрати палива регулюючий електромагнітний клапан нержавіючий GEVAX 7901 1/2" N.C. 0 - 5 bar (PTFE) для нафтопродуктів.

5.2.5 Канал управління масою сировини на вході шнекового змішувача

Для регулювання маси сировини на вході шнекового змішувача необхідно застосувати бункерний дозатор з відкидним шибером з контролем за тензодатчиком ваги.

Застосуємо для дозування дозатор автоматичний для сипких матеріалів ДВС-301-100-2[17], призначений для дозування легко-текучих порошкових матеріалів.

Робота дозатора заснована на циклічному дозуванні. Дозування матеріалу здійснюється спеціальним міжфланцевим затвором (дисковою засувкою типу «батерфляй»), що забезпечує надійне перекриття та збіг матеріалу. Управління дозуванням у режимі «ГРУБО» та «ТОЧНО» забезпечується зміною положення диска засувки спеціальним приводом.

Мінімальна доза продукту 0,1 кг.

Максимальна доза продукту 100 кг.

Зовнішній вигляд дозатора автоматичного для сипких матеріалів ДВС-301-100-2 наведений на рис. 5.7.



Рисунок 5.7 - Зовнішній вигляд дозатора автоматичного для сипких матеріалів ДВС-301-100-2.

Особливості:

Висока продуктивність;

Комерційна точність дозування (клас 0,5);
Тракт із нержавіючої сталі;
Немає спеціальних вимог до умов експлуатації та персоналу;
Установка, налагодження та запуск у роботу протягом робочої зміни;
Простий в експлуатації, не потребує складних налаштувань;
Широкий температурний діапазон (від -10 до +50 °С) та промислове виконання (IP65);
Цифрова фільтрація для придушення низькочастотних динамічних перешкод сигналу;
2 канали послідовного інтерфейсу RS-485/RS-232;
Годинник реального часу, облік, зберігання та реєстрація журналу подій та підсумків;
Вбудовані тести та індикація аварійних ситуацій та помилок;
Віддалене оновлення програмного забезпечення.

5.2.6 Канал управління масою порошкоподібного суперфосфату на вході барабанного гранулятора

Застосуємо для дозування дозатор автоматичний для сипких матеріалів ДВС-301-100-2, призначений для дозування легко-текучих порошкових матеріалів.

5.2.7 Канал управління масою ретуру на вході барабанного гранулятора

Застосуємо для дозування дозатор автоматичний для сипких матеріалів ДВС-301-50-2[18], призначений для дозування легко-текучих порошкових матеріалів.

Він має характеристики, аналогічні ДВС-301-100-2 за винятком, максимальна доза продукту 50 кг.

5.3 Вибір контролера

Відповідно до обраних датчиків і типів каналів управління зробимо вибір контролера. Дані про вхідні сигнали наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6_ Вхідні сигнали управляючої системи

Параметр	Об'єкт управління	Вхідний сигнал
Витрата H ₂ SO ₄	Вхід кислотного змішувача	4 ... 20 мА
Витрата води	Вхід кислотного змішувача	4-20 мА
Температура H ₂ SO ₄	Вихід нагрівача кислоти	4...20 мА
Маса сировини	Вхід шнекового змішувача	4...20 мА
Температура суперфосфатної маси	Суперфосфатна камера	4...20 мА

Продовження таблиці 5.6

Маса порошкоподібного суперфосфату	Вхід барабанного гранулятора	4...20 мА
Маса ретуру	Вхід барабанного гранулятора	4...20 мА, ізольований, пасивний; релейний; імпульсний транзисторний (10мА/30В)
Температура топкових газів	Вихід топки	4÷20мА
Температура продукту	Вихід барабанної сушарки	0...5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА; 0...50 мВ; 0...100 мВ

Дані про вихідні сигнали наведені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7_ Вихідні сигнали управляючої системи

Параметр	Об'єкт управління	Вихідний сигнал
Витрата H ₂ SO ₄	Вхід кислотного змішувача	4...20 мА активний/пасивний 4...20 мА HART активний/пасивний імпульсний/частотний/двійковий
Витрата води	Вхід кислотного змішувача	4...20 мА активний/пасивний 4...20 мА HART активний/пасивний імпульсний/частотний/двійковий
Температура H ₂ SO ₄	Вихід нагрівача кислоти	4...20 мА/HART
Маса сировини	Вхід шнекового змішувача	4...20 мА, 0...10 В
Температура суперфосфатної маси	Суперфосфатна камера	4...20 мА/HART
Маса порошкоподібного суперфосфату	Вхід барабанного гранулятора	4...20 мА, 0...10 В
Маса ретуру	Вхід барабанного гранулятора	4...20 мА, 0...10 В
Температура топкових газів	Вихід топки	4...20 мА/ HART
Температура продукту	Вихід барабанної сушарки	4...20 мА/ HART
Сигналізація «Температура продукту»	Вихід барабанної сушарки	Лог. 1

На підставі даних таблиць 5.6 і 5.7 можна скласти вимоги до контролера і вибрати його на функціональному рівні. Вимоги по вхідних і вихідних сигналах наведені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8_ Вхідні і вихідні сигнали управляючої системи

Сигнал	Вид	Кількість
Вхідний	Аналоговий	9
	Дискретний	-
Вихідний	Аналоговий	9
	Дискретний	1

Оскільки закон управління на даному етапі невідомий, на функціональному рівні необхідно вибрати за вимогами вхідних і вихідних сигналів контролер, який реалізує П-, ПІ-, ПД і ПІД- закони управління.

Багатофункціональний контролер для технологічних процесів АКС[19] від ТЕРА

Контролер АКС розроблений на базі мікропроцесора нового покоління з високою продуктивністю та великим обсягом пам'яті, що дозволило значно розширити кількість його входів та виходів, реалізувати складніші алгоритми управління та збільшити приладовий архів.

Основною перевагою АКС є кольоровий графічний TFT індикатор з високою роздільною здатністю. Завдяки своїм розмірам, на індикаторі можливе одночасне відображення великої кількості параметрів у вигляді таблиць, графіків та мнемосхем. АКС дозволяє обробляти дані як від провідникових, так і від бездротових датчиків температури.

Контролер може постачатися разом із програмним забезпеченням TechnologSoft для управління та візуалізації процесу на комп'ютері.

Основні характеристики:

- 16 входів для підключення термоперетворювачів опору;
- 8 аналогових входів для підключення датчиків вологості, газоаналізаторів, датчиків положення заслінок і т. п.;
- 8 аналогових виходів для управління виконавчими пристроями: заслінками, частотними перетворювачами і т. д.;
- 16 дискретних виходів управління виконавчими пристроями: вентиляторами, зволожувачами, клапанами, насосами тощо;
- підтримання заданих параметрів у ручному або автоматичному режимі;
- діагностика роботи датчиків та виконавчих пристроїв;
- аварійна сигналізація відхилень вимірюваних параметрів;
- передача на комп'ютер основних технологічних параметрів за інтерфейсом RS485;
- збереження параметрів та налаштувань регулювання в незалежній пам'яті;

- можливість дистанційного керування з комп'ютера;
- інтерфейсний вхід для підключення блоків розширення входів та виходів;
- споживана потужність: не більше 18 Вт.

Особливості та структура контролера:

Контролер АКС складається з регулятора на DIN рейці, який монтується всередину пластикового щита, та панелі оператора з TFT дисплеєм на лицьовій панелі щита. До складу щита також входять: блоки живлення, мережевий фільтр, перемикач подачі мережного живлення, зовнішні кнопки завдання режимів відображення та аварійні лампи.

Зовнішній вигляд багатофункціонального контролера для технологічних процесів АКС і наповнення шафи управління наведені на рис. 5.8.

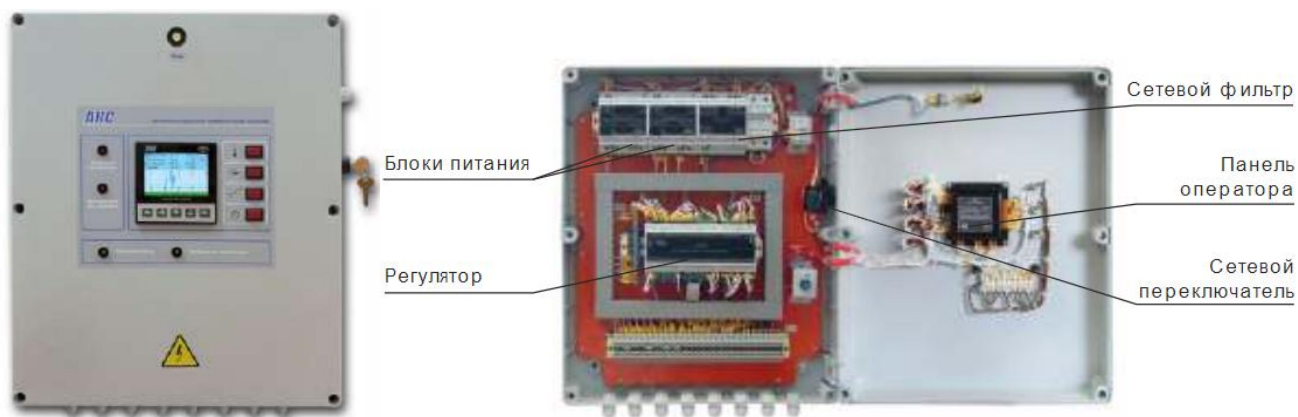


Рисунок 5.8 - Зовнішній вигляд багатофункціонального контролера для технологічних процесів АКС і наповнення шафи управління.

Також можлива комутація інших, відмінних від стандартної комплектації типів вхідних та вихідних пристроїв. Все це дозволяє за необхідності підібрати індивідуальну конфігурацію під конкретні технологічні особливості об'єкта.

Різні типи входів:

- ТС (всі типи термоперетворювачів опору);
- ТП (термопары ТМКн, ТХК, ТХКн, ТХА, ТЖК, ТНН, ТПП, ТПР);
- УН (всі типи термопар та термоперетворювачів опору с $R_0=100\Omega$);
- АТ (аналоговий струм 0...20, 4...20, 0...5 мА);
- АН (аналогова напруга 0...1, 0...10, 2...10 В);
- класи точності від 0,2 до 1,0;
- період опитування від 0,2 с на канал;
- масштабування вхідної величини;
- обчислення різниці (на двоканальних моделях);
- обчислення середнього арифметичного (на чотирьох- та восьмиканальних моделях);

- добування квадратного кореня;
- фільтрація перешкод та нестабільності показань;
- компенсація похибки датчиків;
- світлодіодна індикація обриву датчиків;
- опція - вихід RS (вихід RS485, гальванічно нерозв'язаний, протокол обміну T-bus або Modbus RTU);
- опція - вихід ЕЗ на аварійну сигналізацію (вихід е-м реле на замикання 1А 220 В АС/DC);
- широкоформатна модель у корпусі 2Д з ультраясравою індикацією та висотою цифри 48 мм;
- живлення 90...242 В АС.

Характеристики сполучної лінії приладу з датчиком наведені у табл. 5.9.

Таблиця 5.9_Характеристики сполучної лінії приладу з датчиком

Код входу	Максимальний опір лінії (одного провідника), Ом	Тип лінії
УН (ТС)	3,0 (к. А, Б), 20,0 (к. С1, Е, Д, 2Д)	Трипровідна екранована
УН (ТП)	25,0 (к. А, Б, С), 100,0 (С1, Д, 2Д, Е)	Термокомпенсаційний екранований кабель (термопарний)
ПТ	1,0	Двопровідна екранована
ТР	1,0	Двопровідна екранована
АТ	Для $U_{жив} = 24В DC$: 100,0 (к. А, Б), 250 (к. Д, 2Д, Е)	Двопровідна екранована
АН	1,0	Двопровідна екранована
ЕМ	5,0	Чотирипровідна екранована

Типи вихідних пристроїв (типи виходів):

Вихідні пристрої (далі – ВУ) призначені для ініціалізації та управління виконавчими пристроями або проміжними підсилювальними вузлами. ВУ поділяються на такі типи: ключові, аналогові та цифрові, а також на гальванічно розв'язані та нерозв'язані по відношенню до виконавчих пристроїв.

До ключових гальванічно розв'язаних ВУ відносяться:

- електромагнітні реле. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями малої та середньої потужності (активними або реактивними) або проміжними підсилювачами потужності (реле, пускачі). Поділяються на два типи: реле на замикання та реле на перемикання.

- оптосимістори. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями малої потужності (активними або реактивними (реле, пускачі, лампи розжарювання) або проміжними підсилювачами потужності на основі потужних симісторів.

- напівпровідникові оптоключі. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями малої потужності (активними або реактивними) (реле, пускачі, лампи розжарювання), а також використовуватися як ключі типу “сухий контакт” для передачі сигналу про стан керуючого пристрою.

До ключових гальванічно нерозв'язаних ВУ відносяться:

- ВУ типу відкритий колектор. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями малої потужності (активними) (реле, пускачі постійного струму, лампи розжарювання, світлодіодні індикатори) або використовуватися як ключі для передачі сигналу про стан виконавчого пристрою.

- ВУ з активним виходом за напругою. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями малої потужності (активними) (реле та пускачі постійного струму, лампи розжарювання, світлодіодні індикатори), а також проміжними підсилювачами потужності на основі потужних симісторів. Даний тип ВУ використовує внутрішнє або зовнішнє джерело живлення приладу.

До ВУ аналогового типу (можуть бути як гальванічно розв'язаними, так і нерозв'язаними) відносяться:

- регульований генератор струму 4...20, 0...20, 0...5 мА. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями середньої та великої потужності зі стандартними входами 4...20 мА (частотні перетворювачі, приводи заслінок, засувки, клапанів тощо).

- регульований генератор напруги 0...10, 2...10 В. Можуть безпосередньо керувати виконавчими пристроями середньої та великої потужності зі стандартними входами 0...10, 2...10 В (частотні перетворювачі, приводи заслінок, засувки, клапанів і т.д.).

Характеристики ключових та аналогових вихідних пристроїв наведені у табл. 5.10.

Таблиця 5.10_Характеристики ключових та аналогових вихідних пристроїв

Код виходу	Вихідний пристрій	Параметр	Значення
ЭЗ	Е/м реле на замикання	U / I	220 В 2 А (3А) АС/ 30В 2А DC
ЭП	Е/м реле на перемикавання	U / I	220 В 2 А (3А) АС/ 30В 2А DC
ОС	Оптосимістор	U / I	220 В 50 мА АС у пост. режимі, 220 800 мА АС в імп. режимі
ПК	Оптоключ	U / I	180 В 100 мА АС/DC

Продовження таблиці 5.10

ОК	Загальний колектор	U / I	40 В 30 мА DC
ИВ	Вихід за напругою	U / I	12 В 20 мА DC
АВ	Генератор струму	I	4...20 мА, навантаження 100...500 Ом
АМ	Генератор напруги	U	2...10 В, навантаження >100 кОм

ВУ цифрового типу відносяться:

- гальванічно нерозв'язаний цифровий вихід RS485 (код – RS). Використовується для зв'язку з комп'ютером та передачі даних у мережі. Дозволяє комутувати до 64 пристроїв однієї мережі довжиною лінії до 500 м з низьким рівнем перешкод. Швидкість передачі 9600 Кбіт/с.

- гальванічно розв'язаний цифровий вихід RS485 (код – RG). Використовується для зв'язку з комп'ютером та передачі даних у мережі. Дозволяє комутувати до 64 пристроїв в одній мережі довжиною лінії до 500 м. Гальванічно розв'язана лінія дає можливість виключити вплив поздовжніх перешкод (як власних, і наведених), що виникають у довгій лінії з єдиною шиною заземлення. Розв'язка також дозволяє провести ефективніше екранування лінії передачі. Швидкість передачі даних – 9600 Кбіт/с.

- цифровий вихід 10Base-T (код – ET). Інтерфейс Ethernet є найпоширенішою технологією обчислювальних мереж. Максимальна довжина сегмента – 100 метрів, швидкість передачі даних - до 10 Мбіт/с.

- цифровий вихід USB 2.0. Послідовний інтерфейс передачі даних для периферійних пристроїв за чотирипровідною лінією. Застосовується безпосередньо для обміну даними між пристроєм та ПК.

Порівнявши технічні характеристики багатофункціонального контролера для технологічних процесів АКС, можна зробити висновок, що цей ПЛК при відповідному конфігуруванні входів і виходів повністю задовольняє вимоги і може бути використаний у системі управління отриманням простого гранульованого суперфосфату.

6 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

6.1 Ідентифікація об'єкта управління

Для розрахунку виберемо контур керування температурою у суперфосфатній камері, в якій проводиться безперервна нейтралізація сірчаної кислоти апатитовим концентратом до утворення густої сметаноподібної пульпи з подальшим твердінням і перетворенням у суперфосфат як один з основних, що впливають на якісні показники готової продукції. Об'єкт являє собою обертовий апарат безперервної дії, на вхід якого надходить суміш апатитового концентрату і сірчаної кислоти зі шнекового змішувача. Необхідно стабілізувати температуру твердіння суперфосфату і, відповідно, зменшити час технологічної операції і забезпечити якісні фізичні властивості суперфосфату. Температура у суперфосфатній камері залежить від підігріву сірчаної кислоти, яка після цього змішується з апатитовим концентратом і температура зменшується, тобто є зв'язана система, яка залежить від іншого контуру.

6.2 Побудова структурної схеми вихідної системи управління

Складні (багатозв'язні) технічні об'єкти разом із вузлами (пристроями) управління першого, виконавчого рівня утворюють підсистеми оперативного управління, які є багатозв'язними системами автоматичного регулювання (БСАР) за типом стежачих систем[21]. Задачі впливу їм формуються на другому, тактичному рівні, а цілі управління полягають у відтворенні з достатньою точністю необхідних законів зміни кожної керованої змінної. При цьому критерієм оцінки ефективності БСАР будуть функціонали від помилок, що задають відтворення впливів.

На етапі розрахунку БСАР ці впливи приймаються типовими, а перетворювальні та власні динамічні властивості БСАР певним чином обмежуються, щоб при синтезі алгоритмів управління тактичного рівня їх неідеальністю можна було знехтувати.

Проектування БСАР слідкуючого типу, як підсистем виконавчого рівня у складі багаторівневої системи управління є традиційним для ТАУ завданням динамічного синтезу. Однак її рішення має дуже суттєві особливості, зумовлені факторами багатовимірності та багатозв'язності об'єкта управління ОУ; високим порядком його математичної моделі; особливостями оцінки якості роботи БСАР та ін. З цих причин безпосереднє застосування традиційних інженерних методів синтезу одномірних стежачих СУ виявляються неможливими без їх узагальнення на багатовимірний випадок. Наукові роботи в цій галузі переважно присвячені

аналітичним методам оптимального синтезу БСАР. Функціонали якості (критерії оптимальності), що використовуються при цьому, призначаються, як правило, виходячи з умов математичної розв'язності задачі, і здебільшого мають узагальнений, абстрактний характер, слабо пов'язаний з інженерними додатками та вимогами.

Метою розрахунку є: частковий синтез та дослідження багатовимірної БСАР у складі розподіленої системи управління складним технічним об'єктом.

Вихідні дані.

Структурна схема БСАР, що розглядається, показана на рис. 6.1.

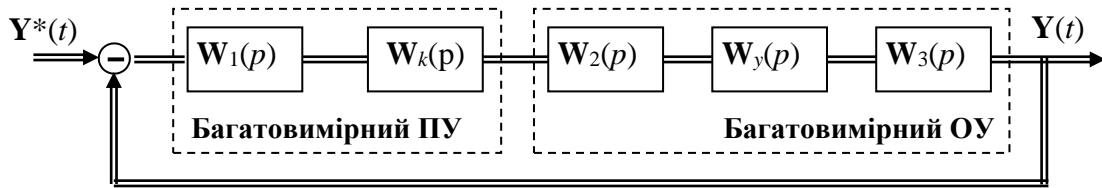


Рисунок 6.1 – Структурна схема БСАР

Передатні матриці (ПМ) лінійних матриць діагональних зв'язків в складі двовимірної БСАР мають вигляд:

$$W_1(p) = \text{diag}\{W_{p1}(p); W_{p2}(p)\};$$

$$W_2(p) = \text{diag}\{W_{01}(p); W_{02}(p)\};$$

$$W_3(p) = \text{diag}\{1/p; 1/p\},$$

де $W_{pi}(p)$ – ПФ i -го сепаратного регулятора, що підлягає визначенню; $i = 1; 2$.

$$W_{0i}(p) = \frac{K_i}{(1 + pT_{ai})(1 + pT_{bi})} - \text{ПФ незмінної частини } i\text{-го сепаратного каналу};$$

$W_k(p)$ – ПМ компенсатора (у розрахунку розглядаються два його варіанти):

a) $W_k(p) = [E + W_x(p)]$ – ПМ компенсатора з прямими перехресними зв'язками;

b) $W_k(p) = [E - W_x(p)]^{-1}$ – ПМ компенсатора зі зворотними перехресними зв'язками.

Тут $W_x(p) = \begin{bmatrix} 0 & W_{x2}(p) \\ W_{x1}(p) & 0 \end{bmatrix}$, а $W_{x1}(p)$ і $W_{x2}(p)$ – передавальні функції прямих (або зворотних)

перехресних зв'язків у складі послідовного компенсатора, що підлягають визначенню, що забезпечує властивість автономності каналів регулювання.

$$W_y(p) = \begin{bmatrix} 1 & W_{y2}(p) \\ W_{y1}(p) & 1 \end{bmatrix}, \text{ де } W_{y1}(p) = \frac{-K_{y1}}{1 + pT_{y1}}; \quad W_{y2}(p) = \frac{K_{y2}}{1 + pT_{y2}} - \text{ПФ перехресних зв'язків}$$

у об'єкті керування ОУ, а $K_{y1}=15$; $K_{y2}=10$; $T_{y1}=0.4T_{a1}$; $T_{y2}=1.5T_{b2}$.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

i	K_i, c^{-1}	T_{ai}, c	T_{bi}, c	$\omega_{зрі}$	M_i
1	125	0,07	0,01	41	1,23

6.3 Синтез безперервної БСАР

6.3.1 Визначення ПФ сепаратних регуляторів

Зобразимо структурну схему БСАР за відсутності перехресних зв'язків у багатовимірному пристрої управління та багатовимірному об'єкті управління (рис. 6.2)

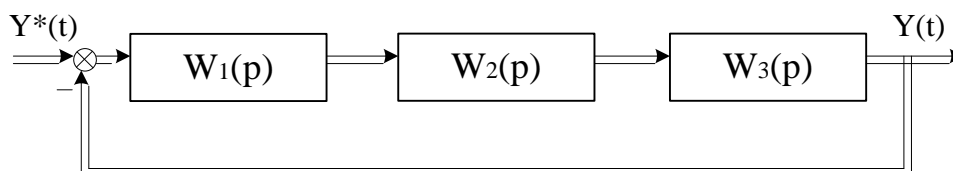


Рисунок 6.2 – Структурна схема БСАР за відсутності перехресних зв'язків у БПУ та БОУ

Запишемо передавальні матриці із заданими числовими значеннями параметрів:

$$W_1(p) = \begin{bmatrix} W_{p1}(p) & 0 \\ 0 & W_{p2}(p) \end{bmatrix};$$

$$W_2(p) = \begin{bmatrix} \frac{125}{(1+0.07p)(1+0.01p)} & 0 \\ 0 & \frac{135}{(1+0.11p)(1+0.009p)} \end{bmatrix};$$

$$W_3(p) = \begin{bmatrix} \frac{1}{p} & 0 \\ 0 & \frac{1}{p} \end{bmatrix};$$

Застосовуючи формули В.А. Бесекерського для типової «симетричної» ЛАХ, виберемо вигляд та параметри ПФ $W_{p1}(p)$ і $W_{p2}(p)$, що забезпечують задані властивості сепаратним каналам за точністю (коефіцієнт добротності $K=K_i$), за швидкодією ($\omega_{зп}$) і за коливальністю (M).

1) Перший сепаратний канал

Зобразимо структурну схему першого сепаратного каналу (рис. 6.3)

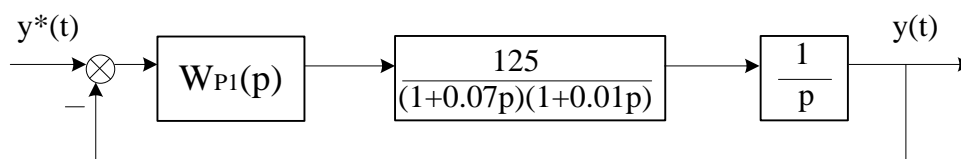


Рисунок 6.3 – Структурна схема першого сепаратного каналу

Запишемо передатну функцію першого розімкнутого сепаратного каналу:

$$W^1(p) = \frac{125}{(1+0.07p)(1+0.01p)p}; \quad (6.1)$$

Визначимо, чи забезпечуються задані властивості сепаратного каналу.

Побудуємо ЛАЧХ першого сепаратного каналу.

Перша асимптота ЛАЧХ з нахилом -20 дБ/дек перетинає вісь $L(\omega)$ у точці $20\log K_1$, що відповідає вимогам за точністю.

Визначимо частоту зрізу.

$\log \omega_{зр} = 1.6$, $\omega_{зр} = 40 \text{ рад/с}$. Вона наближена до необхідного значення.

Побудуємо АЧХ замкнутого сепаратного каналу (рис. 6.3), як залежність модуля частотної передавальної функції замкнутого каналу від частоти.

Передавальна функція замкнутого каналу визначається формулою

$$\Phi(p) = \frac{W_{np}(p)}{1 + W(p)} \quad (6.2)$$

Визначимо показник коливальності M , використовуючи формулу

$$M = \frac{N_{max}}{N(0)}; \quad (6.3)$$

де $N(\omega)$ – модуль частотної передавальної функції замкнутого каналу.

$$M = \frac{30}{1} = 30$$

Властивості першого сепаратного каналу за колюванням не відповідають заданим.

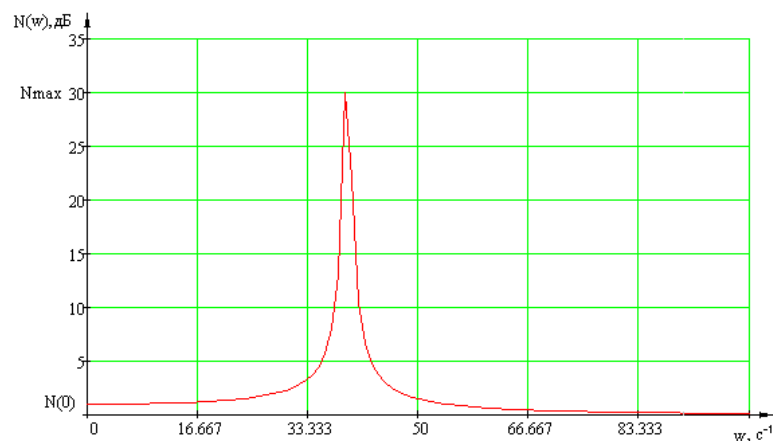


Рисунок 6.4 – АЧХ замкнутого сепаратного каналу 1

Визначимо передатну функцію сепаратного регулятора.

Типова "симетрична" ЛАХ на середньочастотній ділянці має нахили (-40 дБ/дек; -20 дБ/дек; -40 дБ/дек). Порівнюючи із заданою передатною функцією першого сепаратного каналу, визначимо, що бажана передатна функція матиме вигляд:

$$W_{баж}^I(p) = \frac{K_1(1 + T_2p)}{p(1 + T_1p)(1 + T_3p)(1 + T_4p)}. \quad (6.4)$$

Для оцінки параметрів бажаної передавальної функції скористаємося формулами Бесекерського:

$$\begin{aligned}
 T_2 &\geq \frac{1}{w_{cp}} \cdot \frac{M}{M-1}, \\
 T_3 &\leq \frac{1}{w_{cp}} \cdot \frac{M}{M+1}, \\
 T_3 + T_4 &\leq \frac{1}{w_{cp}} \cdot \frac{M}{M+1}.
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

Проведемо побудову бажаної ЛАЧХ і з побудови визначимо постійну часу T_1 та ЛАЧХ сепаратного регулятора.

Таким чином, передатна функція першого сепаратного регулятора, що забезпечує задані властивості першому сепаратному каналу, має вигляд:

$$W_{PI}(p) = \frac{(1+0.17p)(1+0.07p)}{(1+0.0065p)(1+0.473p)}.$$

Передатна функція розімкнутого сепаратного каналу:

$$W_P^I(p) = \frac{125(1+0.17p)}{(1+0.0065p)(1+0.473p)(1+0.01p)p}. \tag{6.6}$$

Визначимо показник коливальності скоригованого сепаратного каналу за формулою (6.3),

для цього збудуємо АЧХ замкнутого сепаратного каналу. (рис. 6.5)

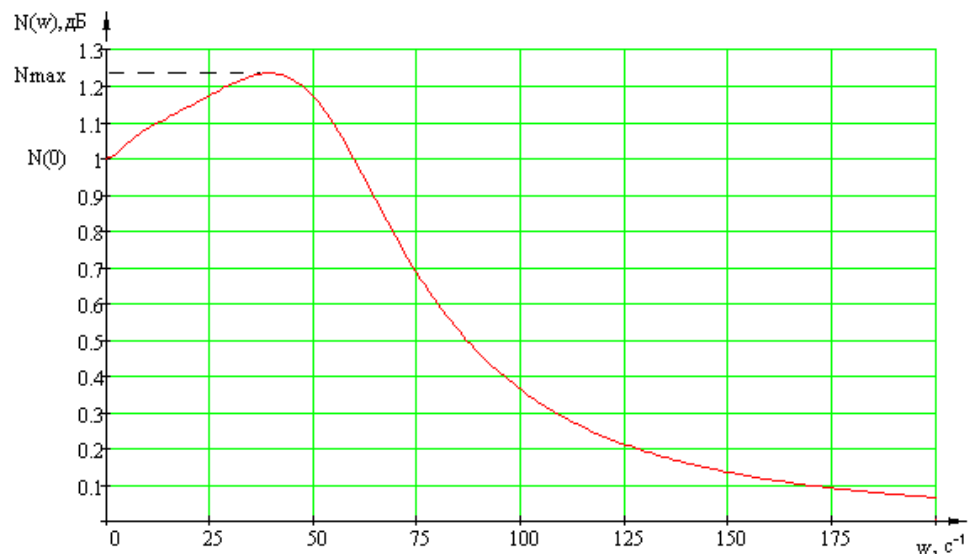


Рисунок 6.5 – АЧХ замкнутого сепаратного каналу 1 з регулятором

$$M = \frac{1.23}{1} = 1.23.$$

Властивості сепаратного каналу за точністю, швидкодією та коливальністю відповідають заданим.

2) Другий сепаратний канал

Зобразимо структурну схему другого сепаратного каналу (рис. 6.6)

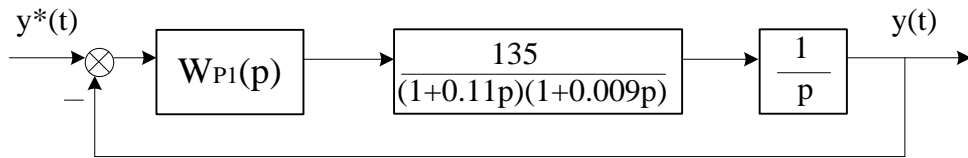


Рисунок 6.6 – Структурна схема другого сепаратного каналу

Запишемо передатну функцію другого розімкнутого сепаратного каналу:

$$W''(p) = \frac{135}{(1+0.11p)(1+0.009p)p}; \quad (6.7)$$

Визначимо, чи забезпечуються задані властивості сепаратного каналу.

Побудуємо ЛАЧХ другого сепаратного каналу.

Перша асимптота ЛАЧХ із нахилом -20 дБ/дек перетинає вісь $L(\omega)$ у точці $20 \log K_2$, що відповідає вимогам за точністю.

Визначимо частоту зрізу.

$\log \omega_{зр} = 1.53$, $\omega_{зр} = 34 \text{ рад/с}$. Вона наближена до необхідного значення.

Побудуємо АЧХ замкнутого сепаратного каналу 2 (рис. 6.7), визначимо показник коливальності M , використовуючи формулу (6.3)

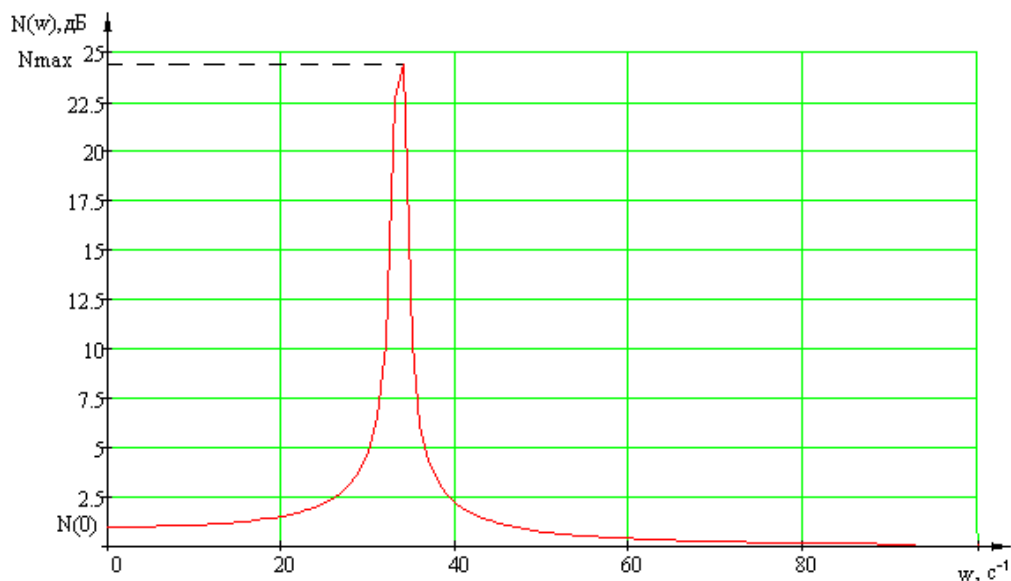


Рисунок 6.7 – АЧХ замкнутого сепаратного каналу 2

$$M = \frac{24.3}{1} = 24.3$$

Властивості другого сепаратного каналу за коливальністю не відповідають заданим.

Визначимо передатну функцію другого сепаратного регулятора.

Аналогічно першому сепаратному каналу, бажана передатна функція матиме вигляд:

$$W''_{\text{баз}}(p) = \frac{K_2(1+T_2p)}{p(1+T_1p)(1+T_3p)(1+T_4p)} \quad (6.8)$$

Для оцінки параметрів бажаної передавальної функції скористаємося формулами Бесекерського (6.5).

Проведемо побудову бажаної ЛАЧХ і з побудови визначимо постійну часу T_1 та ЛАЧХ сепаратного регулятора.

Таким чином, передатна функція другого сепаратного регулятора, що забезпечує задані властивості другого сепаратного каналу, має вигляд:

$$W_{P2}(p) = \frac{(1 + 0.11p)(1 + 0.11p)}{(1 + 0.01p)(1 + 0.447p)}$$

Передатна функція розімкнутого сепаратного каналу:

$$W_P^{\text{II}}(p) = \frac{135(1 + 0.11p)}{(1 + 0.447p)(1 + 0.009p)(1 + 0.01p)p} \quad (6.9)$$

Визначимо показник коливальності скоригованого сепаратного каналу за формулою (6.3), для цього побудуємо АЧХ замкненого сепаратного каналу. (рис. 6.8)

$$M = \frac{1.34}{1} = 1.34.$$

Властивості сепаратного каналу за точністю, швидкодією та коливальністю відповідають заданим.

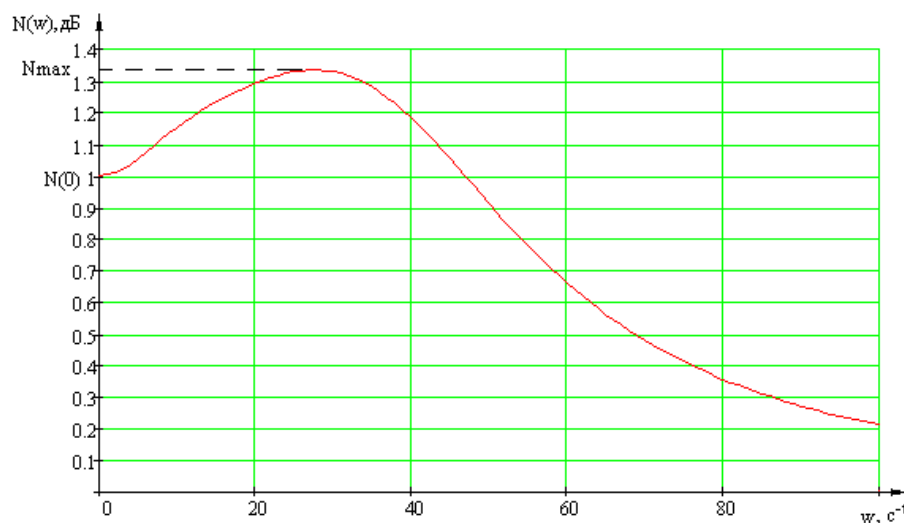


Рисунок 6.8 – АЧХ замкненого сепаратного каналу 2 з регулятором

5.1.2 Дослідження властивостей сепаратних каналів БСАР

Прямі та частотні показники якості перехідного процесу

Для визначення прямих показників якості перехідного процесу отримаємо перехідні характеристики першого та другого сепаратних каналів.

1) Перший сепаратний канал

Перехідна характеристика першого сепаратного каналу зображена на рис. 6.9.

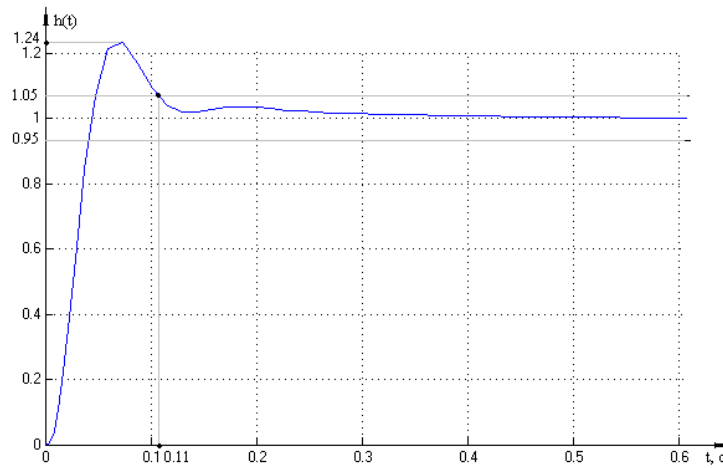


Рисунок 6.9 – Перехідна характеристика першого сепаратного каналу

Використовуючи графік перехідної характеристики, визначимо час перехідного процесу як час, після якого відхилення керованої величини від значення, що встановилося, стане менше 5%.

$$t_{mn} = 0,11 \text{ с.}$$

Визначимо перерегулювання як відношення максимального відхилення керованої величини від свого значення до встановленого значення.

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_{уст}}{h_{уст}} \times 100\% \quad (6.10)$$

$$\sigma = \frac{1,24 - 1}{1} \times 100\% = 24\%$$

Частотний показник якості перехідного процесу – показник коливальності – був визначений у п. 6.1 у рамках перевірки властивостей сепаратного каналу.

2) Другий сепаратний канал

Перехідна характеристика другого сепаратного каналу зображена на рис. 6.10.

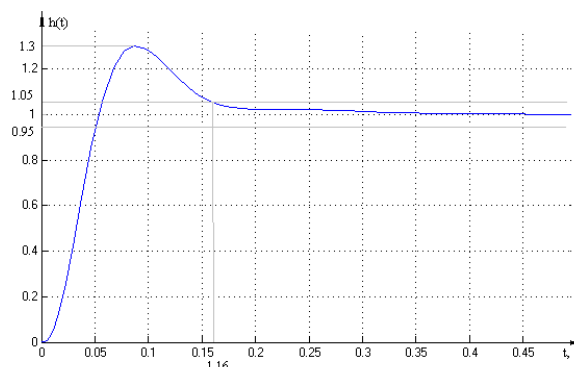


Рисунок 6.10 – Перехідна характеристика другого сепаратного каналу

Аналогічно першому сепаратному каналу:

$$t_{mn} = 0,16 \text{ с.}$$

Визначимо перерегулювання за формулою (6.10)

$$\sigma = \frac{1,3 - 1}{1} \times 100\% = 30\%$$

Частотний показник якості перехідного процесу – показник коливальності – був визначений у п. 6.3 у межах перевірки властивостей сепаратного каналу.

Показники точності

Визначимо показники точності у вигляді амплітудних (δ_A) та фазових (δ_φ) спотворень на частоті $\omega_1 = 0,3\omega_{зр2}$

Частота зрізу другого сепаратного каналу визначена завданням.

$$\Omega_{зр2} = 33 \text{ рад/с},$$

$$\omega_1 = 0,3 \cdot 33 = 9,9 \text{ рад/с}.$$

Знайдемо амплітудно-фазові спотворення для кожного сепаратного каналу за формулами:

$$\delta_A = \frac{|\Phi(\omega_1)| - 1}{1} \times 100\% \quad (6.11)$$

$$\delta_\varphi = |\arg(\Phi(\omega_1))| \quad (6.12)$$

де

$\Phi(\omega)$ – частотна передатна функція замкненого сепаратного каналу.

1) Перший сепаратний канал

Запишемо частотну передавальну функцію замкнутого каналу, використовуючи формулу (6.2):

$$\Phi^I(\omega) = \frac{125(1 + 0.17j\omega)}{j\omega(1 + 0.0065j\omega)(1 + 0.473j\omega)(1 + 0.01j\omega) + 125(1 + 0.17j\omega)} \quad (6.13)$$

Визначимо амплітудні спотворення:

$$|\Phi^I(\omega_1)| = 1.082$$

$$\delta_A = \frac{1.082 - 1}{1} \times 100\% = 8.2\%$$

Визначимо фазові спотворення:

$$\arg(\Phi(\omega)) = \left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \right),$$

де $Q(\omega)$ і $P(\omega)$ – уявна та дійсна частина частотної передавальної функції замкнутого каналу.

$$\delta_\varphi = 0.178 \text{ рад}$$

2) Другий сепаратний канал

Запишемо частотну передавальну функцію замкнутого каналу:

$$\Phi^{II}(\omega) = \frac{135(1 + 0.11j\omega)}{j\omega(1 + 0.447j\omega)(1 + 0.009j\omega)(1 + 0.01j\omega) + 135(1 + 0.11j\omega)} \quad (6.14)$$

Визначимо амплітудні спотворення:

$$|\Phi^{II}(\omega_1)| = 1.15$$

$$\delta_A = \frac{1.15 - 1}{1} \times 100\% = 15\%$$

Визначимо фазові спотворення:

$$\delta_\varphi = 0.2 \text{ рад}$$

Запаси стійкості

Визначимо запаси стійкості сепаратних каналів, використовуючи критерій Найквіста на площині ЛЧХ.

Побудуємо ЛЧХ розімкнутих сепаратних каналів. (рис. 6.11)

За графіками визначимо запаси стійкості

$$L1_{зан} = 14,48 \text{ дБ} \quad \varphi1_{зан} = 0,74 \text{ рад}$$

$$L2_{зан} = 14,93 \text{ дБ} \quad \varphi2_{зан} = 0,77 \text{ дБ}$$

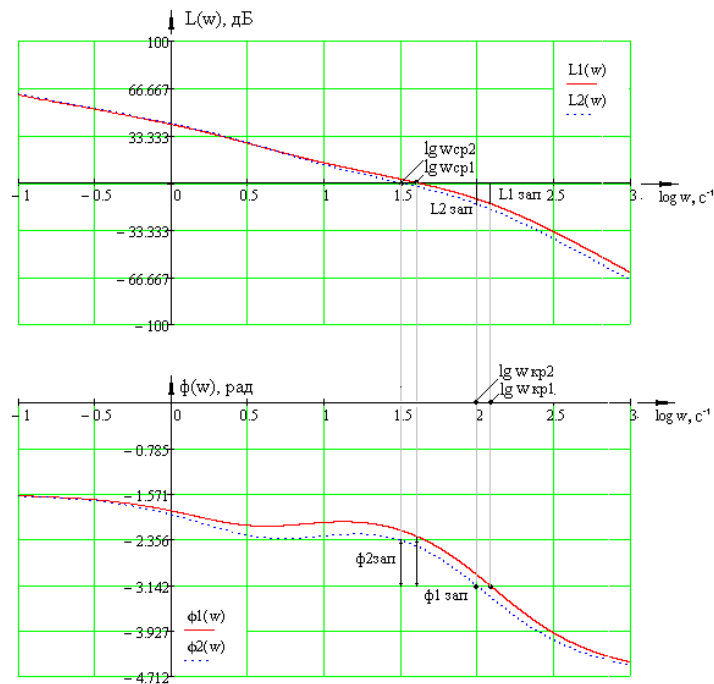


Рисунок 6.11-ЛЧХ розімкнутих сепаратних каналів

6.3.3 Дослідження властивостей вихідної БСАР (при $W_k(p)=E$)

Зобразимо структурну схему БСАР з урахуванням перехресних зв'язків у багатовимірному об'єкті управління (рис. 6.12).

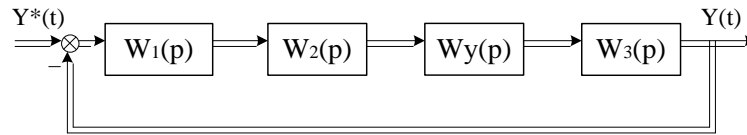


Рисунок 6.12 – Структурна схема БСАР з урахуванням перехресних зв'язків у БОУ

Передавальна матриця $W_y(p)$ має такий вигляд:

$$W_y(p) = \begin{bmatrix} 1 & W_{y2}(p) \\ W_{y1}(p) & 1 \end{bmatrix},$$

де $W_{y1}(p)$, $W_{y2}(p)$ – передавальні функції перехресних зв'язків в об'єкті керування

$$W_{y1}(p) = \frac{-15}{1+0.028p},$$

$$W_{y2}(p) = \frac{10}{1+0.0135p}.$$

Стійкість вихідної БСАР

1) Узагальнений критерій Найквіста

Запишемо передавальну матрицю розімкнутої системи, зображеної на рис. 6.12

$$W(p) = W_3(p) \cdot W_y(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p) \quad (6.15)$$

Вираз для отримання характеристичного рівняння:

$$\det [\mathbf{E} + \mathbf{W}(p)] = 0. \quad (6.16)$$

Тут $[\mathbf{E} + \mathbf{W}(p)]$ – матриця повернених різниць. Її визначник є дробово-раціональною функцією $H(p)$, у чисельнику якої – характеристичний поліном $\varphi_3(p)$ для замкнутої БСАР, а у знаменнику – характеристичний поліном $\varphi_p(p)$ для розімкнутої БСАР:

$$H(p) = \varphi_3(p) / \varphi_p(p). \quad (6.17)$$

Ця особливість функції $H(p)$ використовується для отримання узагальненого критерію Найквіста при дослідженні замкнутої стійкості БСАР.

Знайдемо характеристичний поліном розімкнутої БСАР. Прирівняємо отриманий поліном до нуля і отримаємо корені характеристичного рівняння розімкнутої БСАР:

$$\begin{aligned} p_1 &= -37.8, & p_6 &= -114.0 + 47.9j \\ p_2 &= -180, & p_7 &= -2.17 - 0.120j \\ p_3 &= 0, & p_8 &= -2.17 + 0.102j \\ p_4 &= 0, & p_9 &= -64.7 - 13.8j \\ p_5 &= -114.0 - 47.9j, \end{aligned}$$

Розімкнена БСАР знаходиться на аперіодичній межі стійкості.

Побудуємо узагальнений годограф Найквіста. Зробимо заміну $p = j\omega$ і представимо визначник матриці повернених різниць у вигляді суми дійсної та уявної частини:

$$H(j\omega) = |E + W(j\omega)| = P(\omega) + jQ(\omega)$$

Побудуємо узагальнений годограф Найквіста (рис. 6.13).

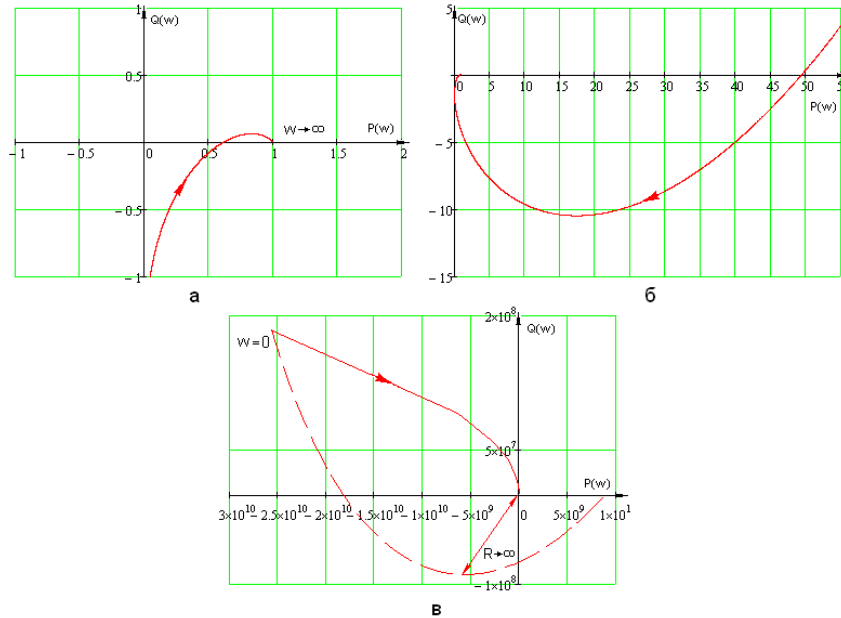


Рисунок 6.13 – Узагальнений годограф Найквіста

- а) годограф на високочастотній ділянці;
- б) годограф на середньочастотній ділянці;
- в) загальний вигляд годографа.

Якщо розімкнена система знаходиться на аперіодичному кордоні стійкості, то для стійкості замкнутої БСАР необхідно і достатньо, щоб узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, не охоплював крапку з координатами $(0; j0)$.

Оскільки узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, охоплює крапку з координатами $(0; j0)$ (рис. 1.12 в), то замкнута БСАР є нестійкою.

2) Метод еквівалентування щодо першого каналу

Розглянемо деталізовану до рівня одномірних ланок структурну схему БСАР (рис. 6.14)

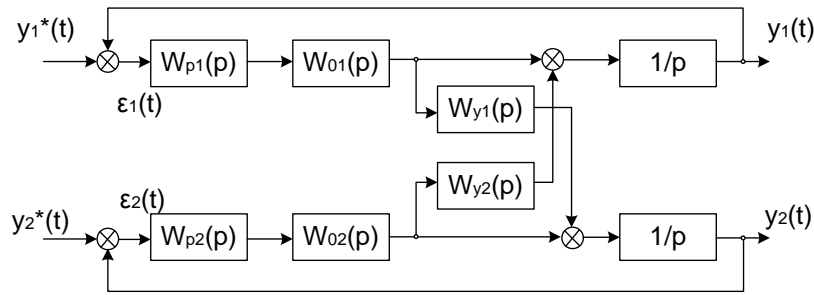


Рисунок 6.14 – Деталізована до рівня одномірних ланок структурна схема БСАР

Зобразимо структурну схему з урахуванням лише зовнішнього впливу першого каналу регулювання, тоді другий канал регулювання представимо еквівалентною ланкою (рис. 6.15).

Визначимо передатну функцію еквівалентної ланки:

$$W_s''(p) = W_{y1}(p) \cdot \frac{1}{p} \cdot W_{p2}(p) \cdot W_{02}(p) \cdot W_{y2}(p) \quad (6.18)$$

$$W_s''(p) = \frac{-20250(1+0.11p)}{p(1+0.028p)(1+0.447p)(1+0.01p)(1+0.009p)(1+0.0135p)}$$

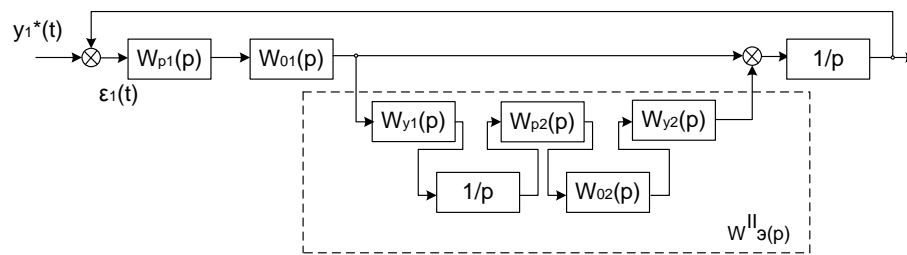


Рисунок 6.15 – Структурна схема з еквівалентною другому каналу регулювання ланкою

Запишемо передавальну функцію розімкненої системи

$$W_p(p) = W_{p1}(p) \cdot W_{01}(p) \cdot (1 + W_s''(p)) \cdot \frac{1}{p} \quad (6.19)$$

Для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб усі корені її характеристичного рівняння були лівими.

Запишемо характеристичне рівняння замкнутої системи:

$$1 + W_p(p) = 0$$

Знайдемо його корені

$$\begin{aligned} p_1 &= 70.7, & p_6 &= -66.5 + 124.0j \\ p_2 &= 30.6 + 90.3j, & p_7 &= -66.5 - 124.0j \\ p_3 &= 30.6 - 90.3j, & p_8 &= -171.0 + 81.9j \\ p_4 &= -5.88, & p_9 &= -171.0 - 81.9j \\ p_5 &= -9.09, & p_{10} &= -222 \end{aligned}$$

Не всі корені характеристичного рівняння замкнутої системи ліві, отже, система нестійка.

Коливальна межа стійкості

За допомогою узагальненого годографа Найквіста підберемо таку пару значень параметрів K_1 і K_2 , при яких БСАР знаходиться на коливальній межі стійкості.

Значення параметрів K_1 і K_2 , при яких БСАР знаходиться на коливальній межі стійкості, наступні:

$$K_1 = 0.262,$$

$$K_2 = 135.$$

Зобразимо годограф Найквіста системи зі знайденими коефіцієнтами в області високих частот (рис. 6.16).

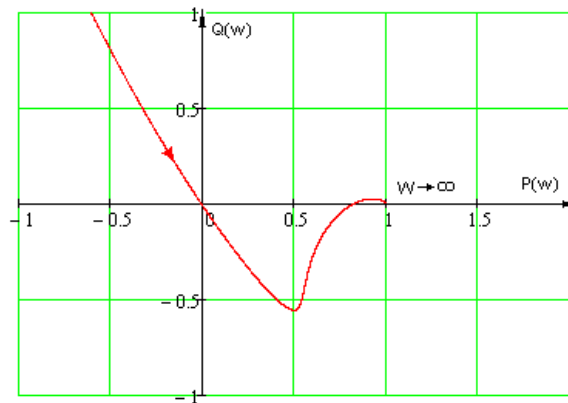


Рисунок 6.16 – Узагальнений годограф Найквіста при $K_1 = 0.262$, $K_2 = 135$

Перевіримо правильність знайдених значень моделюванням. Графіки перехідних процесів, отримані в результаті моделювання, представимо на рис. 6.17.

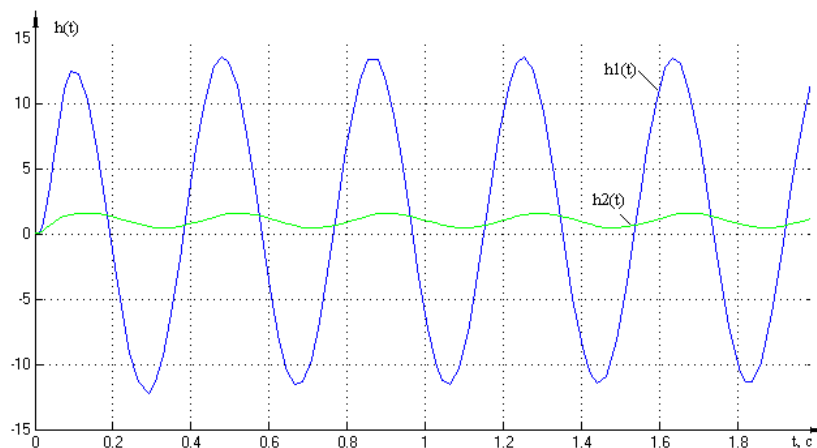


Рисунок 6.17 – Перехідні характеристики

Графіки перехідних характеристик є незагасаючими коливаннями, отже, при заданих параметрах система знаходиться на межі стійкості.

Вплив перехресних зв'язків на точність БСАР в режимі, що установився

Запишемо передавальну матрицю замкнутої системи, зображеної на рис. 6.12.

$$\Phi(p) = [E + W(p)]^{-1} \cdot W(p),$$

де $W(p)$ – передавальна матриця розімкнутої системи (6.15), визначена у пункті 6.1.3.

Розглянута система має два входи і два виходи, отже, передавальна матриця замкнутої системи має вигляд:

$$\Phi(p) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(p) & \Phi_{12}(p) \\ \Phi_{21}(p) & \Phi_{22}(p) \end{bmatrix}. \quad (6.20)$$

Передавальна матриця замкнутої системи, що відповідає парі «вх. 1 – вих. 1», – $\Phi_{11}(p)$, парі «вх. 1 – вих. 2», – $\Phi_{21}(p)$.

Побудуємо АЧХ замкнутої БСАР щодо пар «вх. 1 – вих. 1» і «вх. 1 – вих. 2».

$$N_{11}(w) = |\Phi_{11}(jw)|,$$

$$N_{21}(w) = |\Phi_{21}(jw)|.$$

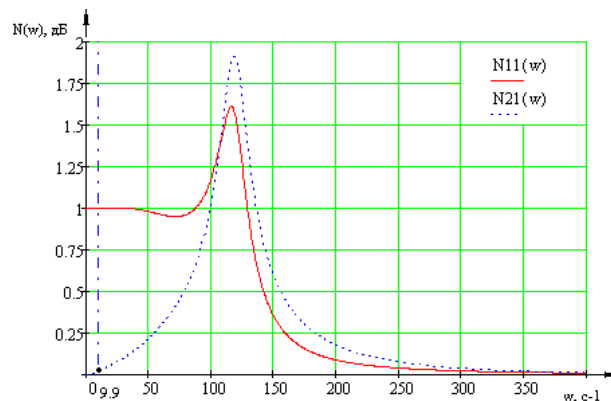


Рисунок 6.18 – АЧХ замкнутої БСАР щодо пар «вх. 1 – вих. 1» і «вх. 1 – вих. 2»

Визначимо ординати збудованих характеристик на частоті $\omega_1 = 9.9 \text{ c}^{-1}$:

$$N_{11}(9.9) = 1.001,$$

$$N_{21}(9.9) = 0.023.$$

За точність БСАР в режимі, що установився, відповідає низькочастотна ділянка АЧХ, за якою можна визначити амплітудно-фазові спотворення.

Проведемо порівняння АЧХ першого сепаратного каналу та АЧХ вихідної системи щодо пари «вх1-вих1». Представимо їх на одному графіку.

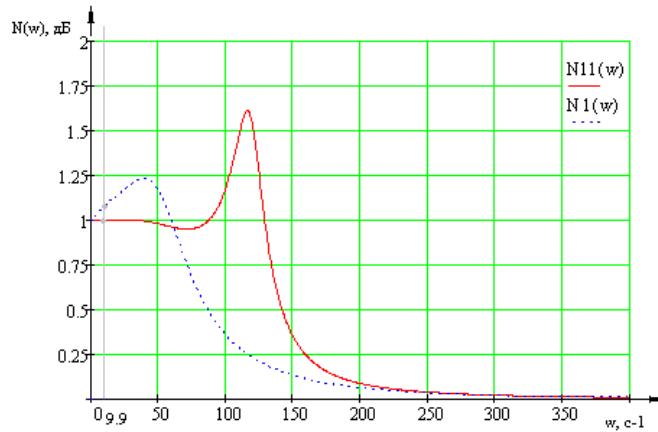


Рисунок 6.19 – АЧХ замкненої БСАР щодо пари «вх. 1 – вих. 1» та першого сепаратного каналу

Якщо припустити, що режим існує, то, судячи з низькочастотного діапазону АЧХ, наслідком впливу перехресних зв'язків є зменшення амплітудних спотворень на частоті, що розглядається. $\omega_1 = 9.9 \text{ рад}$.

Вплив перехресних зв'язків на динамічні властивості БСАР

Побудуємо графіки перехідних функцій щодо пар «вх. 1 – вих. 1», «вх. 1 – вих. 2» з використанням раніше записаної передавальної матриці замкнутої системи (6.20).

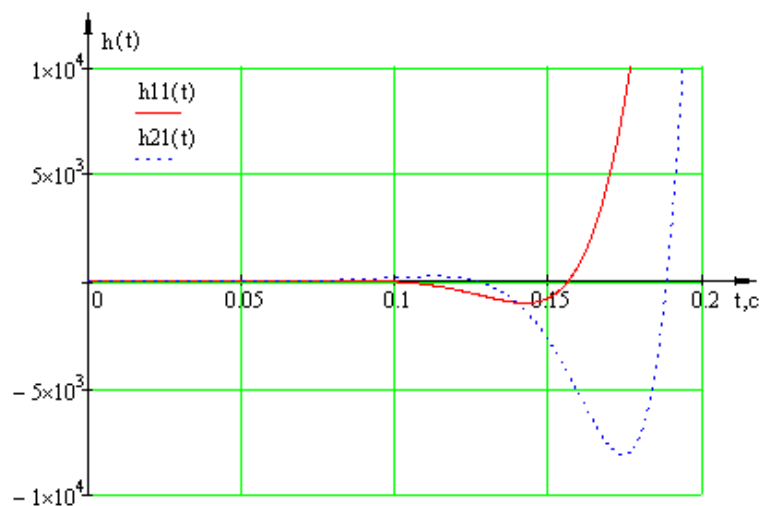


Рисунок 6.20 – Перехідні функції щодо пар «вх. 1 – вих. 1», «вх. 1 – вих. 2»

За графіками перехідних функцій видно, що вихідна двовимірна САР (при $W_k(p) = E$) є нестійкою. Таким чином, уведені перехресні зв'язки в об'єкт управління погіршують динамічні властивості БСАР.

6. 3.4 Розрахунок послідовного компенсатора (частковий синтез автономної САР)

Зобразимо структурну схему БСАР із послідовним компенсатором (рис. 6.21).

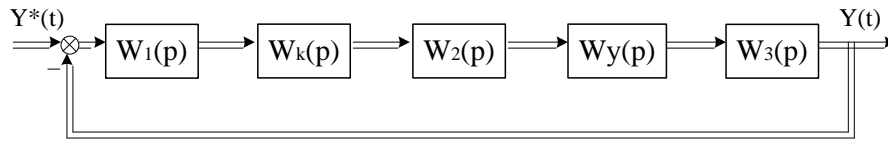


Рисунок 6.21 – Структурна схема БСАР з урахуванням перехресних зв'язків у БОУ

Передавальна матриця компенсатора $W_k(p)$ має вигляд

а) $W_k(p) = [E + W_x(p)]$ – для компенсатора з прямими перехресними зв'язками;

б) $W_k(p) = [E - W_x(p)]^{-1}$ – для компенсатора зі зворотними перехресними зв'язками.

Тут

$$W_x(p) = \begin{bmatrix} 0 & W_{x2}(p) \\ W_{x1}(p) & 0 \end{bmatrix}.$$

$W_{x1}(p)$, $W_{x2}(p)$ – передавальні функції перехресних зв'язків послідовного компенсатора, що підлягають визначенню.

Передавальні функції прямих та зворотних перехресних зв'язків

Необхідною та достатньою умовою повної автономності каналів регулювання є діагональний вид передавальної матриці $\Phi(p)$ замкненої БСАР щодо впливів, що задають:

$$\Phi_{ij}(p) = 0 \text{ при } i \neq j \text{ або } \Phi(p) = \text{diag}\{\Phi_{ii}(p)\}.$$

Для структури з одиничним негативним зворотним зв'язком (ОНЗЗ) математичні умови автономності можна отримати для передавальної матриці розімкнутої системи.

У даному випадку САР є двовимірною, коли кількість перехресних зв'язків невелика, їх передавальні функції легко отримати на основі принципу двоканальності Б.М. Петрова.

1) БСАР з прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

Розглянемо деталізовану до рівня одномірних ланок структурну схему розімкнутої БСАР (рис. 6.22).

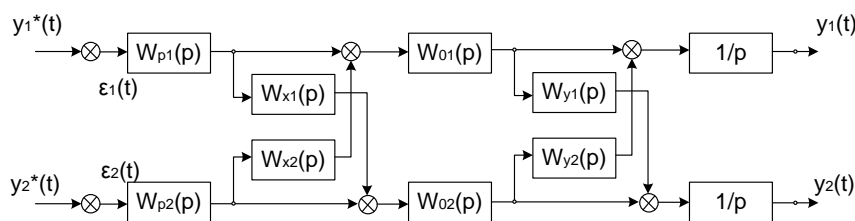


Рисунок 6.22 – Деталізована до рівня одномірних ланок структурна схема розімкнутою БСАР

Передатну функцію прямого перехресного зв'язку $W_{x1}(p)$ визначимо з умови рівності нулю суми передавальних функцій двох каналів розповсюдження сигналу $\epsilon_1(p)$ до другого виходу БОУ.

$$W_{p1}(p) \cdot W_{x1}(p) \cdot W_{02}(p) \cdot \frac{1}{p} + W_{p1}(p) \cdot W_{01}(p) \cdot W_{y1}(p) \cdot \frac{1}{p} = 0,$$

$$W_{x1}(p) = \frac{-W_{01}(p) \cdot W_{y1}(p)}{W_{02}(p)},$$

$$W_{x1}(p) = -\frac{\frac{125}{(1+0.07p)(1+0.01p)} \cdot \frac{-15}{1+0.028p}}{\frac{135}{(1+0.11p)(1+0.009p)}}$$

$$W_{x1}(p) = \frac{13.89(1+0.11p)(1+0.009p)}{(1+0.07p)(1+0.01p)(1+0.028p)}$$

Аналогічно визначимо і передавальну функцію $W_{x2}(p)$:

$$W_{p2}(p) \cdot W_{x2}(p) \cdot W_{o1}(p) \cdot \frac{1}{p} + W_{p2}(p) \cdot W_{o2}(p) \cdot W_{y2}(p) \cdot \frac{1}{p} = 0,$$

$$W_{x2}(p) = \frac{-W_{o2}(p) \cdot W_{y2}(p)}{W_{o1}(p)},$$

$$W_{x2}(p) = -\frac{\frac{135}{(1+0.11p)(1+0.009p)} \cdot \frac{10}{1+0.0135p}}{\frac{125}{(1+0.07p)(1+0.01p)}}$$

$$W_{x2}(p) = \frac{-10.8(1+0.07p)(1+0.01p)}{(1+0.11p)(1+0.009p)(1+0.0135p)}$$

Динамічні властивості автономних каналів регулювання в загальному випадку можуть відрізнятися від властивостей відповідних сепаратних каналів регулювання, одержуваних формальним відкиданням всіх перехресних зв'язків і в БОУ, і в регуляторі. У разі точного збігу цих властивостей у БСАР досягається абсолютна автономність, інакше – звичайна, проста автономність.

Визначимо вид автономності системи. Для цього порівняємо передавальні функції розімкнених автономних та сепаратних каналів регулювання.

Передатна функція розімкнутої системи з урахуванням перехресних зв'язків має вигляд:

$$W(p) = W_3(p) \cdot W_y(p) \cdot W_2(p) \cdot W_k(p) \cdot W_1(p) \quad (6.21)$$

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{3-11}(p)W_{o1}(p)(1-W_{y2}(p)W_{y1}(p)W_{p1}(p)) & 0 \\ 0 & W_{3-22}(p)W_{o2}(p)(1-W_{y2}(p)W_{y1}(p)W_{p2}(p)) \end{bmatrix}$$

Передавальна матриця розімкнутої системи без урахування перехресних зв'язків:

$$W_{без\ ПС}(p) = W_3(p)W_2(p)W_1(p)$$

$$W_{без\ ПС}(p) = \begin{bmatrix} W_{3-11}(p)W_{o1}(p)W_{p1}(p) & 0 \\ 0 & W_{3-22}(p)W_{o2}(p)W_{p2}(p) \end{bmatrix}$$

Відповідні передавальні функції розімкнених автономних та сепаратних каналів регулювання не збігаються, а отже, не збігаються і властивості цих каналів. Отже, спостерігається проста автономність каналів.

2) БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі

Розглянемо деталізовану до рівня одномірних ланок структурну схему розімкнутої БСАР (рис. 6.23)

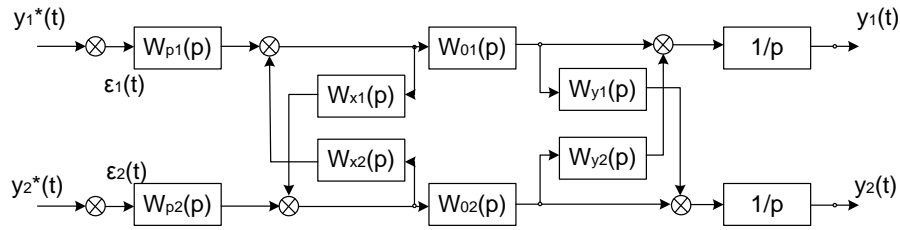


Рисунок 6.23 – Деталізована до рівня одномірних ланок структурна схема розімкнутою БСАР

Передатну функцію зворотного перехресного зв'язку $W_{x1}(p)$ визначимо з умови рівності нулю суми передавальних функцій двох каналів розповсюдження сигналу $\epsilon_1(p)$ до другого виходу БОУ.

$$W_{p1}(p) \cdot W_{x1}(p) \cdot W_{02}(p) \cdot \frac{1}{p} + W_{p1}(p) \cdot W_{01}(p) \cdot W_{y1}(p) \cdot \frac{1}{p} = 0,$$

$$W_{x1}(p) = \frac{-W_{01}(p) \cdot W_{y1}(p)}{W_{02}(p)},$$

$$W_{x1}(p) = -\frac{\frac{125}{(1+0.07p)(1+0.01p)} \cdot \frac{-15}{1+0.028p}}{(1+0.11p)(1+0.009p)},$$

$$W_{x1}(p) = \frac{13.89(1+0.11p)(1+0.009p)}{(1+0.07p)(1+0.01p)(1+0.028p)}.$$

Аналогічно визначимо і передавальну функцію $W_{x2}(p)$:

$$W_{p2}(p) \cdot W_{x2}(p) \cdot W_{01}(p) \cdot \frac{1}{p} + W_{p2}(p) \cdot W_{02}(p) \cdot W_{y2}(p) \cdot \frac{1}{p} = 0,$$

$$W_{x2}(p) = \frac{-W_{02}(p) \cdot W_{y2}(p)}{W_{01}(p)},$$

$$W_{x2}(p) = -\frac{\frac{135}{(1+0.11p)(1+0.009p)} \cdot \frac{10}{1+0.0135p}}{(1+0.07p)(1+0.01p)},$$

$$W_{x2}(p) = \frac{-10.8(1+0.07p)(1+0.01p)}{(1+0.11p)(1+0.009p)(1+0.0135p)}.$$

Визначимо вид автономності системи. Для цього порівняємо передавальні функції розімкнених автономних та сепаратних каналів регулювання.

Передатна функція розімкнутої системи з урахуванням перехресних зв'язків має вигляд:

$$W(p) = W_3(p) \cdot W_y(p) \cdot W_2(p) \cdot W_k(p) \cdot W_1(p) \quad (6.22)$$

$$W(p) = \begin{bmatrix} W_{3_11}(p) W_{01}(p) W_{p1}(p) & 0 \\ 0 & W_{3_22}(p) W_{02}(p) W_{p2}(p) \end{bmatrix}$$

Передавальна матриця розімкнутої системи без урахування перехресних зв'язків:

$$W_{\text{без пс.}}(p) = W_3(p) W_2(p) W_1(p)$$

$$W_{\text{без пс.}}(p) = \begin{bmatrix} W_{3_11}(p) W_{01}(p) W_{p1}(p) & 0 \\ 0 & W_{3_22}(p) W_{02}(p) W_{p2}(p) \end{bmatrix}$$

Відповідні передавальні функції розімкнених автономних та сепаратних каналів регулювання збігаються, а отже, збігаються і властивості цих каналів. Отже, спостерігається абсолютна автономність каналів.

Дослідження частотних та часових характеристик автономних каналів БСАР

1) БСАР з прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

Запишемо передавальну матрицю замкнутої системи.

$$\Phi(p) = [E + W(p)]^{-1} \cdot W(p),$$

де $W(p)$ – передавальна матриця розімкнутої системи (6.22), визначена у пункті 6.3.4.1

Передавальна матриця, що розглядається, має вигляд:

$$\Phi(p) = \begin{bmatrix} \Phi_{11}(p) & 0 \\ 0 & \Phi_{22}(p) \end{bmatrix}.$$

де $\Phi_{11}(p), \Phi_{22}(p)$ – передавальні функції замкнутих автономних каналів регулювання.

Побудуємо АЧХ для кожного з автономних каналів (рис. 6.24).

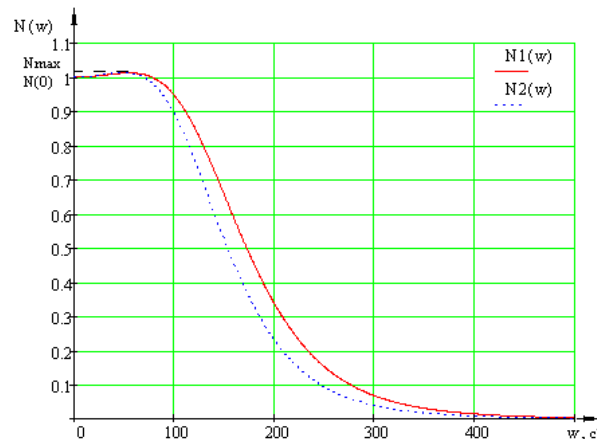


Рисунок 6.24 – АЧХ замкнутих автономних каналів регулювання

Визначимо показник коливальності за формулою (6.2):

$$M_1 = \frac{1.013}{1} = 1.013$$

$$M_2 = \frac{1.014}{1} = 1.014$$

Побудуємо перехідні характеристики (рис. 6.25) для кожного з автономних каналів регулювання.

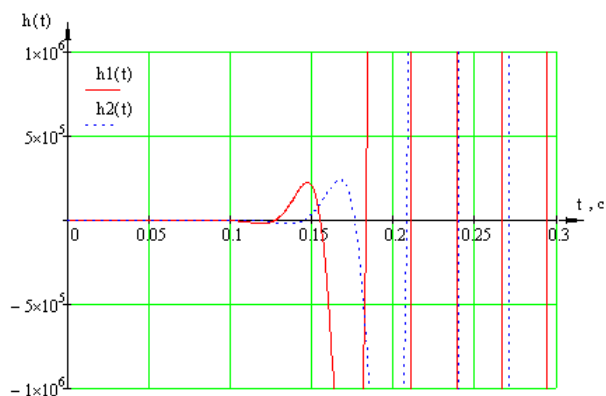


Рисунок 6.25 – Перехідні характеристики автономних каналів регулювання

За графіками перехідних функцій видно, що перехідний процес розходиться.

2) БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі

Оскільки в п. 6.3.4 доведено, що при включенні послідовного компенсатора зі зворотними перехресними зв'язками спостерігається абсолютна автономність каналів регулювання, характеристики автономних каналів регулювання збігаються з аналогічними характеристиками сепаратних каналів.

Перевіримо це моделюванням БСАР. Отримаємо перехідні характеристики автономних каналів БСАР зі зворотними перехресними зв'язками (рис. 6.26).

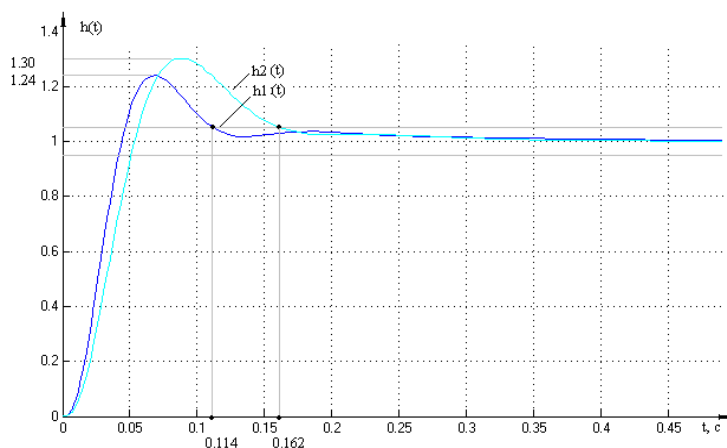


Рисунок 6.26 – перехідні характеристики автономних каналів БСАР зі зворотними перехресними зв'язками

Визначимо час перехідного процесу та перерегулювання за графіками.

$$t_{m1} = 0,114 \text{ c.} \quad \sigma_1 = 24\%$$

$$t_{m2} = 0,162 \text{ c.} \quad \sigma_2 = 30\%$$

Зазначимо, що значення прямих показників якості перехідного процесу автономних каналів БСАР зі зворотним перехресним зв'язком збігаються з аналогічними показниками сепаратних каналів.

Оскільки вихідна БСАР нестійка, говорити про прямі показники якості системи некоректно.

Стійкість автономної БСАР

Передавальна матриця розімкнутої системи визначена в п. 5.1.4.

Використовуючи передавальні функції розімкнених автономних каналів регулювання, побудуємо ЛЧХ для кожного з випадків перехресних зв'язків і визначимо запаси стійкості автономних каналів регулювання.

1) БСАР з прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

Побудуємо графіки ЛЧХ для кожного із розімкнутих каналів регулювання(рис. 6.27).

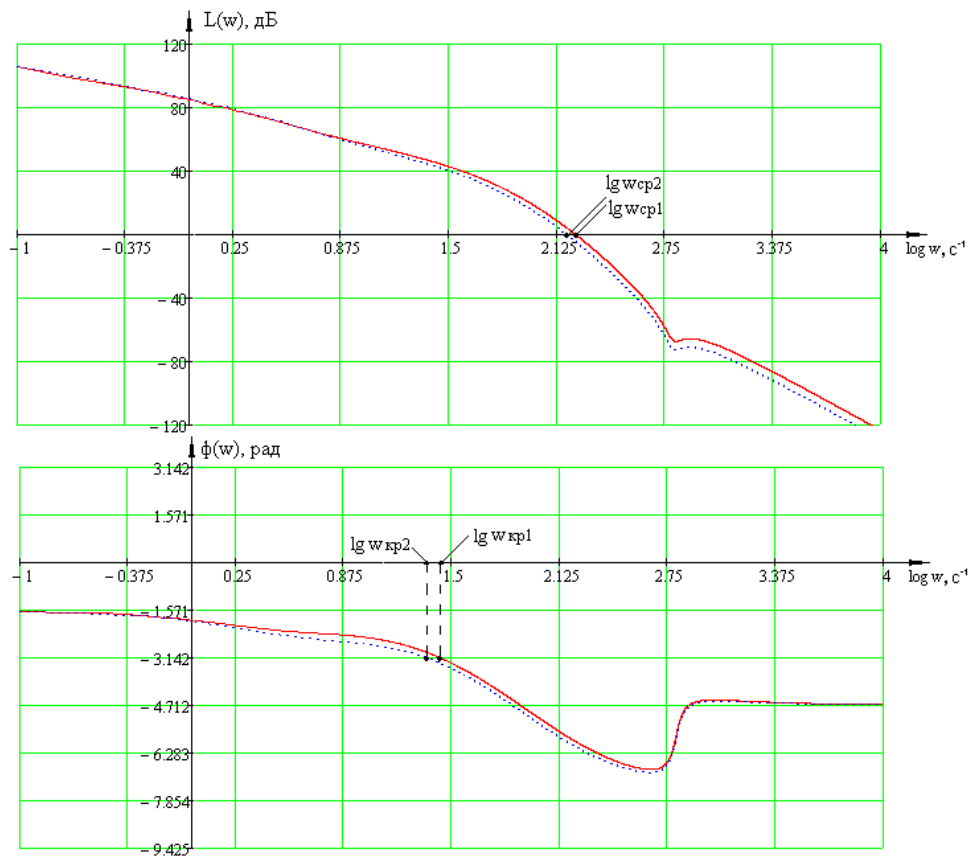


Рисунок 6.27 – ЛЧХ автономних каналів регулювання БСАР із прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

За графіками ЛЧХ видно, що критична частота менша за частоту зрізу, отже, автономні канали регулювання з прямими перехресними зв'язками в компенсаторі нестійкі, а, отже, нестійка і аналізована БСАР.

Досягнемо стійкості автономних каналів регулювання.

Розглянуті вище сепаратні канали стійкі і задовольняють вимогам щодо точності, швидкодії та коливальності.

Передавальні функції кожного із сепаратних каналів у загальному вигляді записуються:

$$W^I(p) = W_{p1}(p) W_{o1}(p) W_{3_11}(p),$$

$$W^II(p) = W_{p2}(p) W_{o2}(p) W_{3_22}(p);$$

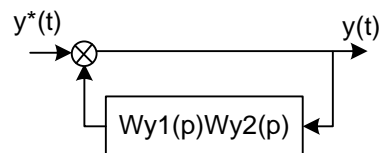
Порівняємо їх із передатними функціями автономних каналів регулювання, які мають вигляд:

$$W_1(p) = W_{3_11}(p) W_{o1}(p) (1 - W_{y2}(p) W_{y1}(p)) W_{p1}(p)$$

$$W_2(p) = W_{3_22}(p) W_{o2}(p) (1 - W_{y2}(p) W_{y1}(p)) W_{p2}(p)$$

Зазначимо, що якщо ввести в коло кожного автономного каналу такий коригуючий пристрій, який компенсував би множник $1 - W_{y2}(p) W_{y1}(p)$, то передатні функції автономних каналів регулювання збігатимуться з передатними функціями сепаратних каналів, спостерігатиметься абсолютна автономність каналів БСАР і наступне з цього задоволення розглянутими каналами вимог.

Таким коригуючим пристроєм, що, буде включений послідовно в ланцюг є контур наступного виду:



Представимо структурну схему скоригованої БСАР із прямими перехресними зв'язками у компенсаторі (рис. 6.28).

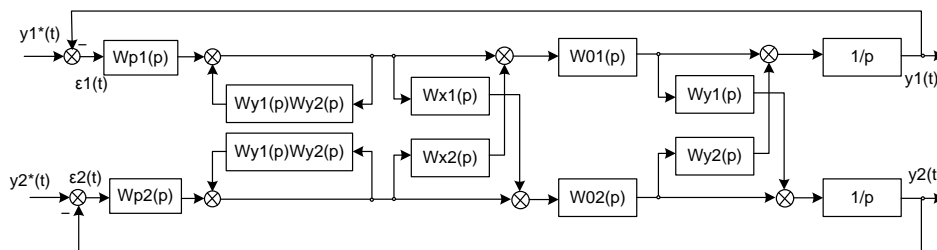


Рисунок 6.28 – Деталізована до рівня одномірних ланок структурна схема скоригованої БСАР із прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

Побудуємо ЛЧХ автономних каналів регулювання. (рис. 6.29).

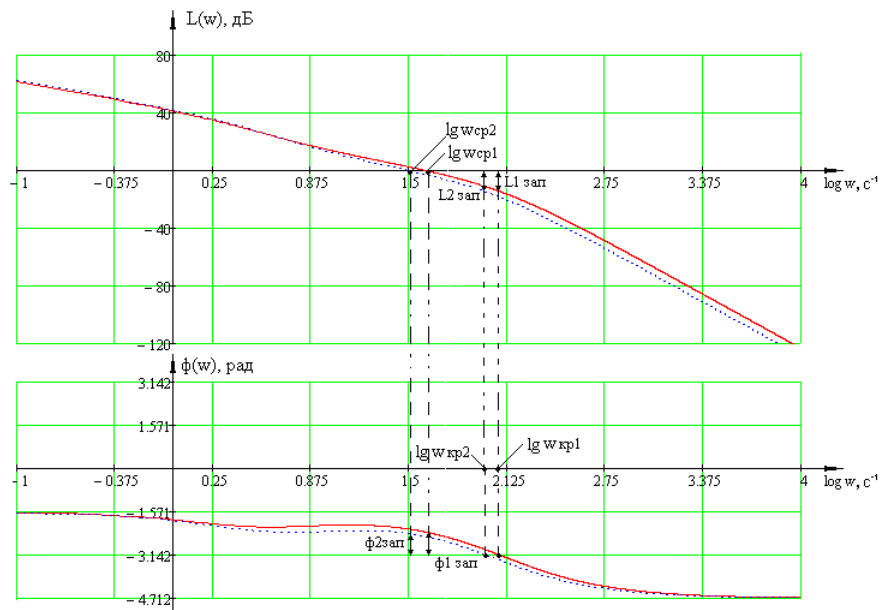


Рисунок 6.29 – ЛЧХ автономних каналів регулювання з БСАР із прямими перехресними зв'язками у компенсаторі

Визначимо запаси стійкості.

$$L1_{zap} = 14,5 \text{ дБ} \quad \varphi1_{zap} = 0,74 \text{ рад}$$

$$L2_{zap} = 14,85 \text{ дБ} \quad \varphi2_{zap} = 0,78 \text{ рад}$$

Оскільки введенням коригувального контуру вдалося досягти абсолютної автономності системи, запаси стійкості автономних каналів регулювання БСАР з прямими перехресними зв'язками збігаються із запасами стійкості сепаратних каналів регулювання.

Зі стійкості автономних каналів регулювання впливає стійкість і аналізованої БСАР.

2) БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі

Побудуємо графіки ЛЧХ для кожного із розімкнутих каналів регулювання (рис. 6.30).

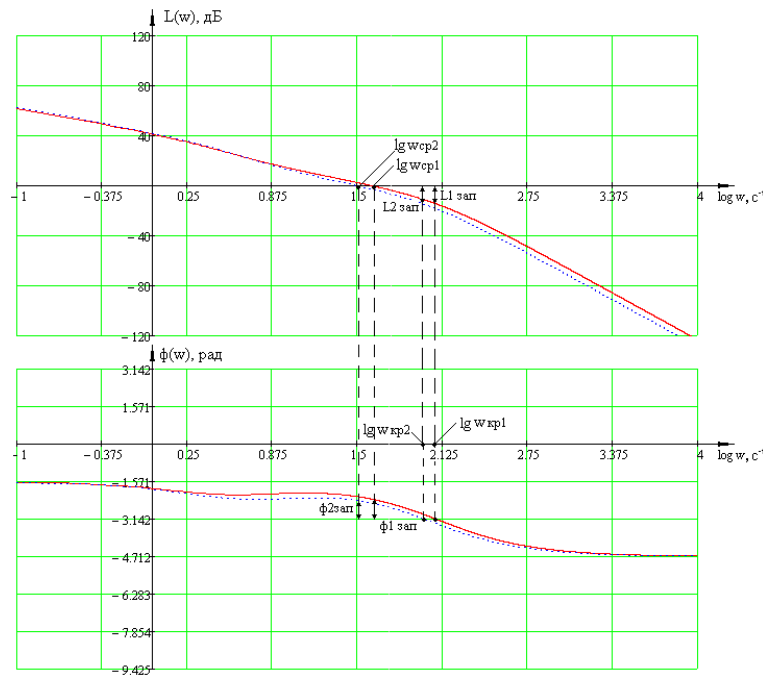


Рисунок 6.30 – ЛЧХ автономних каналів регулювання

За графіками ЛЧХ видно, що критична частота більша за частоту зрізу, отже, автономні канали регулювання зі зворотними перехресними зв'язками в компенсаторі стійкі.

Визначимо запаси стійкості.

$$L1_{zan} = 14,5 \text{ дБ} \quad \varphi1_{zan} = 0,74 \text{ рад}$$

$$L2_{zan} = 14,85 \text{ дБ} \quad \varphi2_{zan} = 0,78 \text{ рад}$$

Оскільки у п. 6.3.4 доведено, що при включенні послідовного компенсатора із зворотними перехресними зв'язками спостерігається абсолютна автономність каналів регулювання, то запаси стійкості автономних каналів регулювання збігаються із запасами стійкості сепаратних каналів.

Зі стійкості автономних каналів регулювання впливає стійкість і всієї аналізованої БСАР.

Показники точності як амплітудних спотворень на частоті $\omega_I = 9,9 \text{ c}^{-1}$ для сепаратних каналів регулювання було визначено у п. 6.3.2.2. Ці величини збігаються з амплітудними спотвореннями автономних каналів регулювання БСАР зі зворотними перехресними зв'язками в компенсаторі та прямими перехресними зв'язками в компенсаторі з урахуванням коригування, оскільки в цих випадках спостерігається абсолютна автономність каналів регулювання.

Амплітудні спотворення автономних каналів регулювання БСАР із прямими перехресними зв'язками в компенсаторі без урахування коригування визначимо за графіком АЧХ для цих каналів, зображеному на рис. 6.30.

$$\delta_A I = \frac{0.0011 - 1}{I} \times 0.11\%$$

$$\delta_A I = \frac{0.0014 - 1}{I} \times 0.14\%$$

Складемо порівняльну таблицю амплітудних спотворень (табл. 6.2) для автономних каналів регулювання та сепаратних каналів регулювання.

Таблиця 6.2 _ Амплітудні спотворення

	Сепаратні канали	Автономні канали	Прямі перехресні зв'язки				Зворотні перехресні зв'язки	
			До коригування		Після коригування.		До коригування	Після коригування.
	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал		
	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал		
Амплітудні спотворення $\delta_A, \%$	8,2	15	0,11	0,14	8,2	15	8,2	15

Припускаючи, що режим, режим, що встановився, існує для кожного з варіантів перехресних зв'язків у компенсаторі, можна відзначити, що прямі перехресні зв'язки забезпечують більшу точність за величиною амплітудних спотворень.

6.4. Синтез та дослідження мікропроцесорної БСАР

6.4.1 Функціональна схема цифрової БСАР. Розрахункова структурна схема

Перейдемо від безперервної БСАР до цифрової. Для цього зробимо заміну безперервного коригувального пристрою на цифровий пристрій.

Зобразимо функціональну схему цифрової БСАР (рис. 6.31).

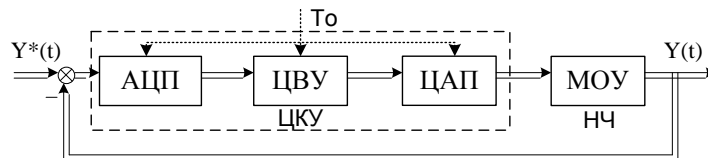


Рисунок 6.31 – Функціональна схема цифрової БСАР

ЦВУ, АЦП і ЦАП – цифровий коригуючий пристрій (ЦКУ), що працює з періодом T_0 .

Структурний метод заснований на заміні «нестандартних» елементів, якими є пристрої дискретної дії, їх еквівалентними схемами заміщення з наступними структурними перетвореннями.

Основними етапами структурного методу при отриманні розрахункових структурних схем є наступні:

1. Заміщення. Усі пристрої дискретної дії у складі вихідної структурної схеми замінюються своїми еквівалентними схемами заміщення. Формувачі імпульсів ФІ, а також

фіксатори об'єднуються з розташованими слідом за ними безперервними частинами НЧ з утворенням наведених безперервних частин ПНЧ.

2. Дискретизація виходу. Вихідний сигнал системи розглядається лише у дискретні моменти часу $t_k = kT_0$. Формально це відповідає розміщенню фіктивного ключа в ланцюзі спостереження на виході безперервної частини та не впливає на вигляд процесів у системі.

3. Структурні перетворення. Виконуються допустимі перетворення отриманої вище проміжної структурної схеми.

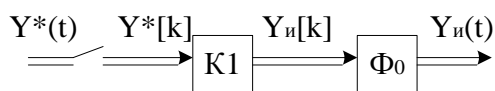
4. Визначення дискретних ланок. Виявляються ділянки структурної схеми, котрим як входи, так і виходи є дискретними сигналами. Ці ділянки структурної схеми оголошуються дискретними ланками.

Застосуємо цей метод для вихідної структури.

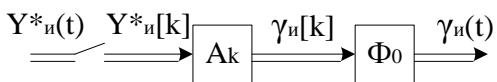
1) Заміщення

Подаємо еквівалентні схеми заміщення для пристроїв дискретної дії.

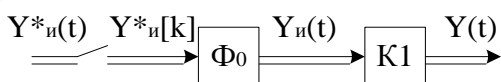
а) АЦП



б) ЦВУ



в) ЦАП



2) Дискретизація виходу

Розмістимо фіктивний ключ у ланцюзі спостереження на виході безперервної частини (рис. 6.32).

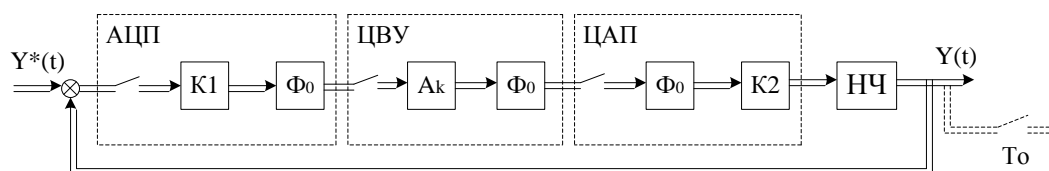


Рисунок 6.32 – Функціональна схема цифрової БСАР у складових частинах.

3) Структурні перетворення.

Виконаємо допустимі структурні перетворення.

Ключ із виходу суматора перенесемо на його входи.

Коефіцієнти $K1$ і $K2$ задовольняють умову $K2 = 1/K1$.

Послідовність фіксатора і безперервної частини є приведеною безперервною частиною.

Послідовно розташовані фіксатор та ключ не змінюють дискретного сигналу.

4) Визначення дискретних ланок.

Послідовно з'єднані ПНЧ та ключ утворюють дискретну ланку приведеної безперервної частини ДЗПНЧ.

Таким чином, зобразимо розрахункову структурну схему (рис.6.33):

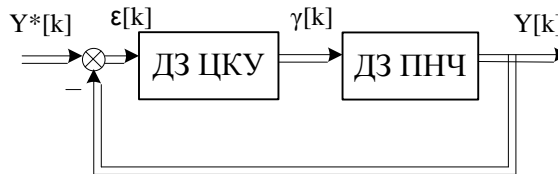


Рисунок 6.33 – Розрахункова структурна схема

6.4.2 Період дискретизації T_0 . Дискретні передавальні матриці діагонального регулятора та компенсатора

Відповідно до методу аналогового прототипу, крок дискретизації T_0 можна визначити, знаючи частоту зрізу $\omega_{зр}$ та запас стійкості по фазі $\varphi_{зап}$ автономних каналів регулювання безперервної БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі.

$$T_0 \leq \frac{2\delta\varphi_{зап}}{\omega_{зр}} ;$$

Тут δ - допустиме зменшення запасу стійкості по фазі. Задасмося значенням $\delta=6\%$.

Використовуючи дані пункту 6.3.4.3, визначимо крок дискретизації для кожного з автономних каналів.

$$T_{01} \leq \frac{2 \cdot 0.06 \cdot 0.74}{39.81}, T_{01} \leq 2.23 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

$$T_{02} \leq \frac{2 \cdot 0.06 \cdot 0.78}{31.62}, T_{02} \leq 2.96 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Виберемо з значень кроку дискретизації менше. Розрахункове значення періоду дискретності цифрової БСАР

$$T_0 = 0.00223 \text{ с}.$$

Відповідно до методу аналогового прототипу та апроксимації інтеграторів за методом трапецій визначимо дискретні передавальні матриці «діагонального» регулятора та компенсатора.

Здійснимо наступну заміну:

$$p = \frac{2(z-1)}{T_0(z+1)};$$

$$W_I(z) = \begin{bmatrix} W_{p1}(z) & 0 \\ 0 & W_{p2}(z) \end{bmatrix},$$

$$W_{p1}(z) = \frac{2.011z^2 - 3.933z + 1.924}{0.596z^2 - 1.016z + 0.421},$$

$$W_{p2}(z) = \frac{1.02z^2 - 2.0z + 0.98}{0.411z^2 - 0.739z + 0.328}$$

$$W_x(z) = \begin{bmatrix} 0 & W_{x2}(z) \\ W_{x1}(z) & 0 \end{bmatrix}.$$

$$W_{x1}(z) = \frac{2.898z^3 - 2.209z^2 - 2.886z + 2.222}{3.882z^3 - 10.46z^2 + 9.372z - 2.788},$$

$$W_{x2}(z) = \frac{-1.409z^3 + 1.086z^2 + 1.4z - 1.095}{2.462z^3 - 6.429z^2 + 5.572z - 1.603}$$

6.4.3 Перехідні характеристики БСАР щодо пар «вх1-вих1» і «вх1-вих2»

Далі проведемо порівняння перехідних характеристик автономної БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі та цифровий БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі. Перехідні характеристики автономної БСАР з прямими перехресними зв'язками у компенсаторі після коригування збігаються з перехідними характеристиками автономної БСАР зі зворотними перехресними зв'язками компенсаторі, так як і в тому, і в іншому випадку спостерігається абсолютна автономність.

Методом комп'ютерного моделювання отримуємо перехідні характеристики щодо пар «вх1-вих1» і «вх1-вих2» безперервної БСАР зі зворотними перехресними зв'язками у компенсаторі.

Для отримання перехідних показників цифрової БСАР проведемо деяке структурне перетворення. Розрахуємо передавальну матрицю компенсатора та включимо його в систему безпосередньо.

$$W_k(p) = \left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot W_x(p) \right]^{-1},$$

$$W_k(p) = \begin{bmatrix} \frac{0.000378p^2 + 0.0415p + 1}{0.000378p^2 + 0.0415p + 151} & \frac{0.02646p^3 + 3.969p^2 + 145.8p + 1350}{-0.0000467775p^4 - 0.010758375p^3 - 19.3508125p^2 - 2251.3125p - 18875} \\ \frac{-0.001670625p^3 - 0.3245625p^2 - 16.6525p - 125}{-0.0000023814p^4 - 0.00053361p^3 - 0.984582p^2 - 109.0935p - 1359} & \frac{0.000378p^2 + 0.0415p + 1}{0.000378p^2 + 0.0415p + 151} \end{bmatrix}$$

Порівняємо графіки перехідних характеристик щодо пар «вх1-вих1» для безперервної та дискретної БСАР (рис. 6.34).

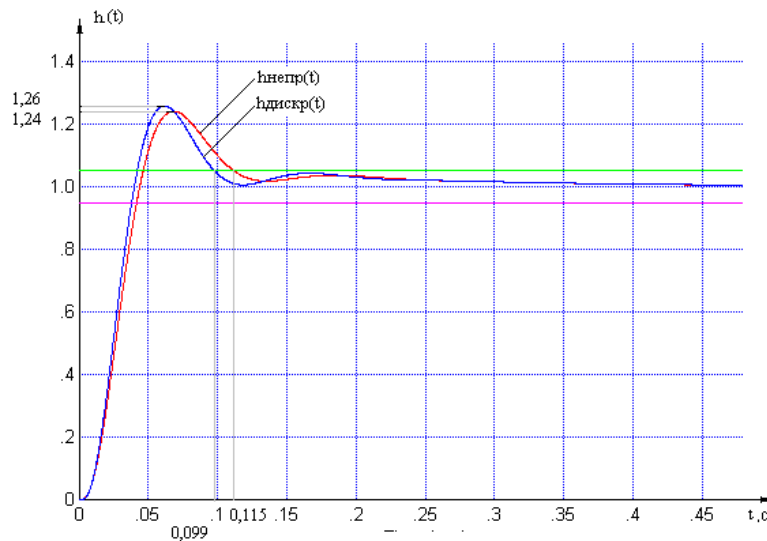


Рисунок 6.34 – Перехідні характеристики щодо пар «вх1-вих1» для дискретної та безперервної БСАР

Визначимо час перехідного процесу та перерегулювання для кожного з варіантів:

$$t_{пт_непр} = 0,115 \text{ с},$$

$$t_{пт_дискр} = 0,099 \text{ с}.$$

$$\sigma_{непр} = \frac{1,24 - 1}{1} \times 100\% = 24\%,$$

$$\sigma_{дискр} = \frac{1,26 - 1}{1} \times 100\% = 26\%.$$

Можна зазначити, що прямі показники якості перехідного процесу безперервної БСАР краще, незважаючи на те, що час перехідного процесу, в даному випадку, дискретної БСАР менше, так як його визначення проводилося на рівні 5%. Якщо збільшити вимоги до точності, час перехідного процесу для дискретної БСАР збільшиться значніше, ніж для безперервної БСАР.

Порівняємо графіки перехідних характеристик щодо пар «вх1-вих2» для безперервної та дискретної БСАР (рис. 6.35).

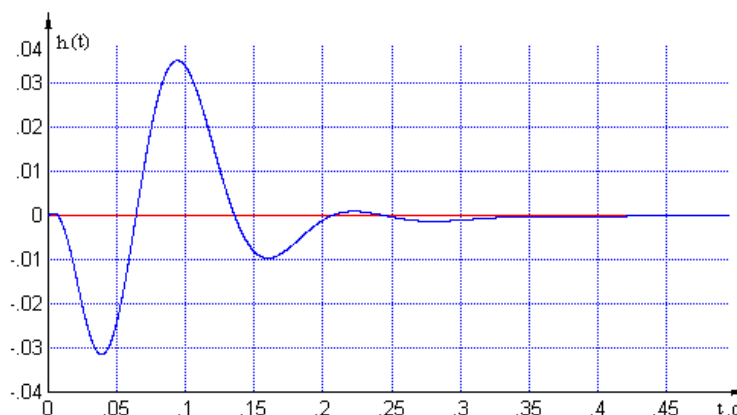


Рисунок 6.35 – Перехідні характеристики щодо пар «вх1-вих2» для дискретної та безперервної БСАР

Графік перехідної функції дискретної БСАР щодо пари «вх. 1 – вих. 2» не збігається з аналогічним графіком перехідної функції безперервної БСАР. Це свідчить про грубу автономність каналів регулювання цифрової БСАР.

Визначимо підбором на моделі нове розрахункове значення кроку дискретизації T_0 , при якому властивість автономності для цифрової САР можна вважати практично виконаною.

Збільшимо крок дискретизації. Отримаємо перехідні характеристики для $T_{01} = 0,0023c$, $T_{02} = 0,0025c$, $T_{03} = 0,0027c$, $T_{04} = 0,003c$, (рис. 6.36).

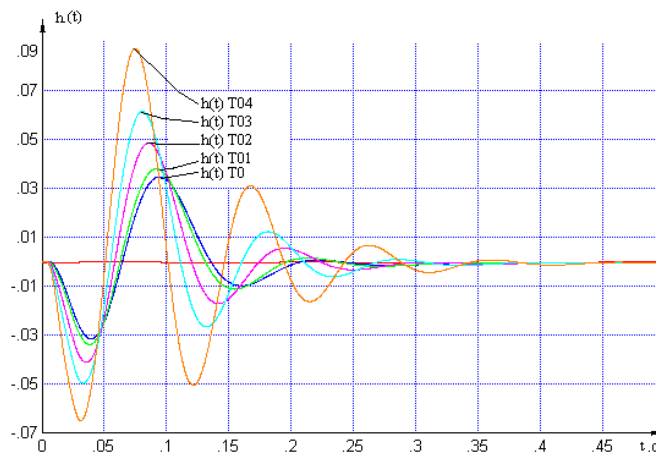


Рисунок 6.36 – Перехідні характеристики щодо пар «вх1-вих2» для дискретної БСАР з різними T_0

Спроба збільшити крок дискретизації призводить до збільшення максимального відхилення керованої величини від значення і часу встановлення.

Зменшимо крок дискретизації. Отримаємо перехідні характеристики для $T_{01} = 0,002c$, $T_{02} = 0,0017c$, $T_{03} = 0,0015c$, $T_{04} = 0,0013c$, $T_{05} = 0,0011c$. (рис. 6.37).

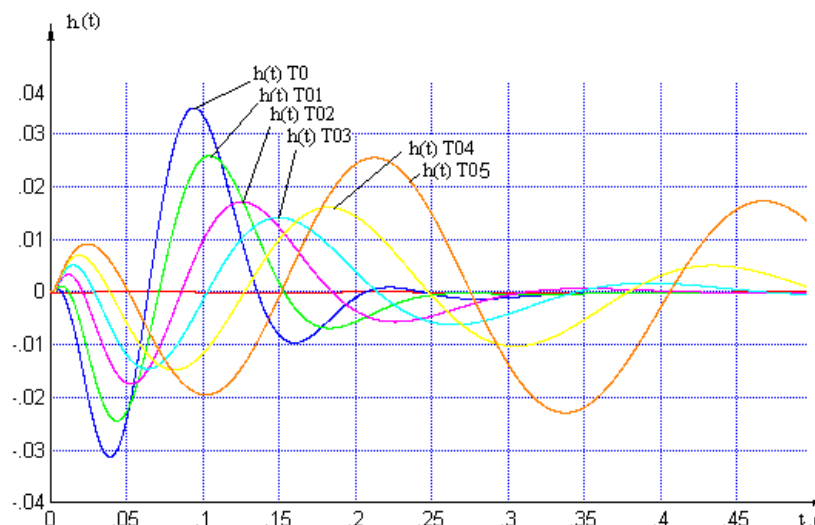


Рисунок 6.37 – Перехідні характеристики щодо пар «вх1-вих2» для дискретної БСАР з різними T_0

З графіків видно, що зменшуючи крок дискретизації можна домогтися зменшення максимального відхилення керованої величини від значення, що встановилося. Оптимальне значення $T_{0_opt} = 0,0017c$, тому що в цьому випадку спостерігається мінімальне значення $h_{max}(t)$, в той же час досить швидко досягається значення, що встановилося.

Таким чином, при $T_0 = 0,0017c$, автономність є менш грубою, при такому значенні кроку дискретизації властивість автономності можна вважати практично виконаною.

6.4.4 Стійкість цифрової БСАР

Запишемо передавальну матрицю приведені безперервної частини:

$$W_{ПНЧ}(p) = W_{НЧ}(p) \times \frac{1 - e^{-pT_0}}{p},$$

$$W_{ПНЧ}(p) = W_3(p) \times W_y(p) \times W_2(p) \times \frac{1 - e^{-pT_0}}{p}. \quad W_{ПНЧ}(p) = W_3(p)W_y(p) \frac{1 - e^{-pT_0}}{p} \quad (6.23)$$

Запишемо частотну передавальну матрицю ДЗ ПНЧ:

$$W^*(j\omega) = \frac{1}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} W_{ПНЧ}(j(\omega - r \frac{2\pi}{T_0})), \quad (6.24)$$

де $\omega \in [0; \frac{\omega_0}{2}]$, тут $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ – частота дискретизації.

Визначимо значення частоти дискретизації:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{0,00223} = 2817,57 \text{ c}^{-1}$$

Отримаємо передатну матрицю цифрового коригувального пристрою за методом трапецій підстановкою $p = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1}$:

$$W_{ЦКУ}(z) = [E - W_x(p)]^{-1} W_f(p) \Big|_{p = \frac{2}{T_0} \frac{z-1}{z+1}} \quad (6.25)$$

Частотно-передавальна матриця розімкнутої системи запишеться у вигляді

$$W(j\omega) = W^*(j\omega) \times W_{ЦКУ}(z) \Big|_{z=e^{j\omega T_0}}$$

Визначник матриці повернених різниць:

$$F(j\omega) = |E + W(j\omega)| = P(\omega) + jQ(\omega)$$

Побудуємо узагальнений годограф Найквіста (Рисунок 6.38).

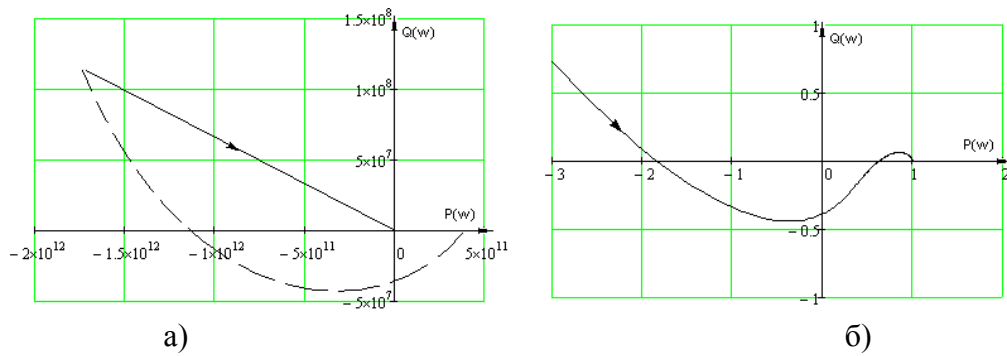


Рисунок 6.38 – Узагальнений годограф Найквіста цифровий БСАР

а) загальний вигляд годографа Найквіста

б) побудова годографа в області високих частот;

Розімкнена система не має правого кореня характеристичного рівняння, тому для стійкості замкнутої БСАР необхідно і достатньо, щоб узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, не охоплював крапку з координатами $(0; j0)$. Оскільки узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, не охоплює крапку з координатами $(0; j0)$, то цифрова БСАР при $T_0 = 0.00223$ с є стійкою.

Перевіримо стійкість цифрової БСАР за допомогою узагальненого критерію Найквіста при збільшеному втричі розрахунковому значенні T_0 :

$$T'_0 = 3T_0 = 2 \cdot 0.00223 = 0.00669 \text{ с}$$

Передавальну матрицю приведеної безперервної частини, частотну передавальну матрицю ДЗ ПНЧ, дискретну передавальну матрицю цифрового коригувального пристрою визначимо за формулами (6.23) – (6.25).

Побудуємо годограф Найквіста (рис. 6.39).

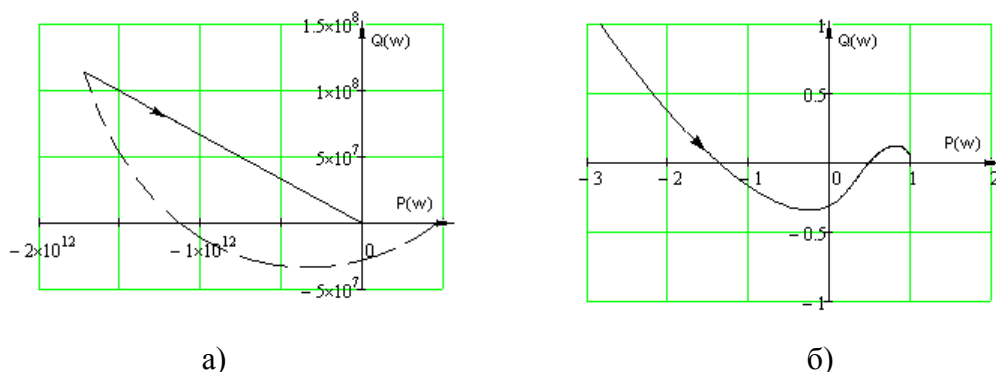


Рисунок 6.39 – Узагальнений годограф Найквіста цифровий БСАР

а) загальний вигляд годографа Найквіста

б) побудова годографа в області високих частот.

Розімкнена система не має правого кореня характеристичного рівняння, тому для стійкості замкнутої БСАР необхідно і достатньо, щоб узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, не охоплював крапку з координатами $(0; j0)$. Оскільки узагальнений годограф Найквіста, доповнений на ділянці розриву дугою нескінченно великого радіусу, не охоплює крапку з координатами $(0; j0)$ (рисунок 6.39 б)), то цифрова БСАР при $T_0' = 0.0126$ с є стійкою, але запаси стійкості системи зменшуються (узагальнений годограф Найквіста при $T_0' = 0.0126$ с перетинає координатні осі площини ближче до точки $(0; j0)$, ніж при $T_0 = 0.0063$ с).

6.4.5 Реакція цифрової БСАР на гармонійний вплив

Отримаємо реакцію цифрової БСАР по першому каналу на гармонійний вплив із частотою $\omega_1 = 9.9$ та порівняємо її з аналогічною реакцією першого сепаратного каналу.

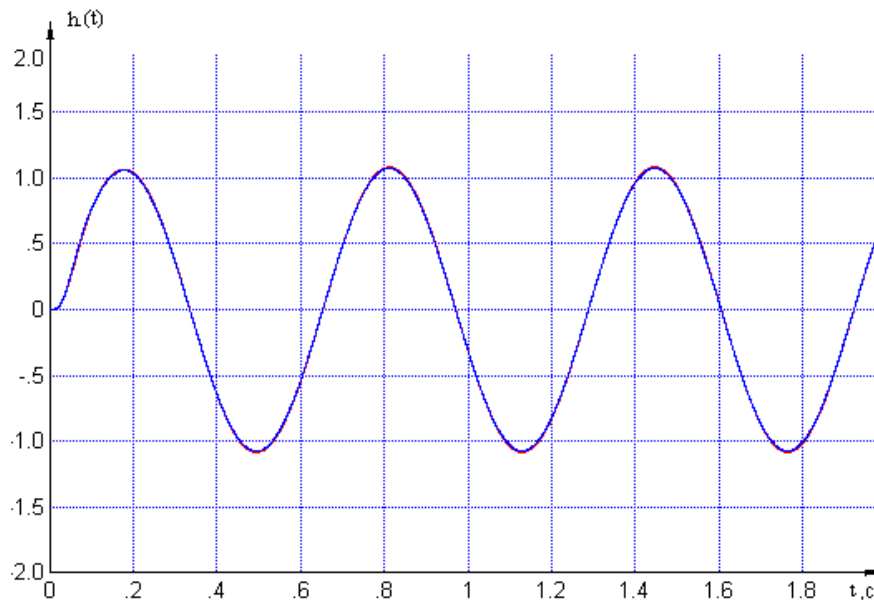


Рисунок 6.40 – Реакція цифрової БСАР по першому каналу та першого сепаратного каналу на гармонійний вплив із частотою $\omega_1 = 9.9$.

Порівняємо амплітуди коливань вихідного сигналу першого каналу цифрової БСАР та першого сепаратного каналу:

$$A_{\text{дмсар}} = 1.058$$

$$A_{\text{сеп.канал}} = 1.064$$

Таким чином, можна зробити висновок про досить високу точність БСАР, так як реакції цифрової БСАР по першому каналу на гармонійний вплив практично збігається з реакцією на аналогічний вплив першого сепаратного каналу, амплітуди коливань вихідних сигналів незначно відрізняються.

ВИСНОВОК

В роботі виконано проектування системи управління технологічним процесом отримання простого гранульованого суперфосфату. Виконано аналіз технологічного процесу, обрані канали управління, зроблено вибір засобів автоматизації, а саме, датчиків, виконавчих механізмів і контролера. Також були розроблені структурна схема автоматизації, функціональна схема автоматизації, структурна схема системи управління, монтажно-комутаційна схема і схема з'єднань, алгоритм роботи системи управління.

Виконаний частковий синтез та дослідження багатовимірної САР у складі розподіленої системи управління температурою у суперфосфатній камері, у якій проводиться безперервна нейтралізація сірчаної кислоти апатитовим концентратом за відсутності перехресних зв'язків у БПУ та БОУ, також виконаний частковий синтез та дослідження багатовимірної САР у складі розподіленої системи управління температурою у суперфосфатній камері, у якій проводиться безперервна нейтралізація сірчаної кислоти апатитовим концентратом з урахуванням прямих і зворотних перехресних зв'язків у БПУ та БОУ, розрахунок послідовного компенсатора, синтез та дослідження мікропроцесорної БСАР.

ЛІТЕРАТУРА

1. Общая химическая технология. Под редакцией доктора технических наук профессора И.П.Мухленова. Издательство «Высшая школа». Москва 1964.
2. Process Control of Technological Processes https://www.ispatguru.com/process-control-of-technological-processes/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=process-control-of-technological-processes (дата звертання 01.03.2022)
3. Deciding Upon Control-System Technology [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ethanolproducer.com/articles/1456/deciding-upon-control-system-technology> (дата звертання 03.03.2022)
4. В.А. Голубятников, В.В. Шувалов Автоматизация производственных процессов в химической промышленности, – М.: Химия, 1972. – 248с.
5. Проектування систем автоматизації: Навч пос. / М.С. Пушкар, С.М. Проценко, 2013.- 268 с.
6. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справ пос. / А.С. Ключев Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский, А.А. Ключев; под ред. А.С. Ключева – М.: Энергоатомиздат, 1990.-464 с.
7. A Guide to the Automation Body of Knowledge (2nd Edition) Trevathan, Vernon L. (2006) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpAGABKE07/viewerType:toc//root_slug:guide-automation-body?b-cat-name=Process%20Design%2C%20Control%20%26%20Automation&b-cat-slug=process-design-control-automation&b-cat-id=197&b-order-by=name&b-sort-by=ascending&b-filter-by=all-content (дата звертання 05.03.2022)
8. Автоматизація виробничих процесів: Підручник. / І.В. Ельперін, О.М. Пупена, В.М. Сідлецький, С.М. Швед. — К.: Видавництво Ліра-К, 2015— 340 с.
9. Стационарный ультразвуковой витратомер воды FLUXUS WD. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nkm-flexim.com.ua/product/fluxus_wd (дата звертання 10.03.2022)
10. Стационарный ультразвуковой витратомер для рідини PIOX S721. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nkm-flexim.com.ua/product/piox_svhxib (дата звертання 11.03.2022)
11. Первинний перетворювач типу К (ТХА) з НСХ типу К [Електронний документ]. Систем. вимоги: Adobe Acrobat Reader. /. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation/%D0%BB%D0%B8%D1%81%D1%82->

[%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D1%85-%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85-%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C-%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9-rosemount-248-ru-ru-87736.pdf](#) (дата звертання 14.03.2022)

12. Вимірювальний перетворювач температури Rosemount 248. [Електронний документ]. Систем. вимоги: Adobe Acrobat Reader. /. – Режим доступу: <https://www.emerson.com/documents/automation/%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3-%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA%D0%B8-%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D1%8B-ru-ru-61696.pdf> (дата звертання 14.03.2022)
13. Тензодатчик CAS SBA-1 500 кг [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://esitukraine.com.ua/p772971853-tenzodatchik-cas-sba.html>
14. Тензометричний датчик ВВ <https://tenzomir.com/katalog/tenzometriya/tenzometrisheskij-datchik-bb/> (дата звертання 31.01.2022)
15. Вузол вбудовування АКССУАР 30901 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tenzomir.com/katalog/tenzometriya/aksessuar-30901/> (дата звертання 19.03.2022)
16. Регулюючий електромагнітний клапан нержавіючий GEVAX 7901 1/2" N.C. 0 - 5 bar (PTFE) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://goodmax.com.ua/ru/product/elektromagnitnyj-klapan-nerzhaveyuschij-gevox-7901-12-nc-0---5-bar?gclid=CjwKCAjwp7eUBhBeEiwAZbHwkaYVLRwz-xlFCx7PPWmmhhxePvp7qW9rQyCQSkW4BliCXDomwTH4dRoCzZkQAvD_BwE (дата звертання 31.01.2022)
17. Дозатор автоматичний для сипких матеріалів ДВС-301-100-2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com/search?q=17.+%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%BB%D1%8F+%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2+%D0%94%D0%92%D0%A1-301-100-2&oq=17.%09%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%BB%D1%8F+%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2+%D0%94%D0%92%D0%A1-301-100-2>

<https://www.google.com/search?q=17.+%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%BB%D1%8F+%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2+%D0%94%D0%92%D0%A1-301-50-2&aqs=chrome..69i57.15130j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

(дата звертання 19.03.2022)

18. Дозатор автоматичний для сипких матеріалів ДВС-301-50-2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.google.com/search?q=17.+%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%BB%D1%8F+%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2+%D0%94%D0%92%D0%A1-301-50-2&oq=17.%09%D0%94%D0%BE%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80+%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9+%D0%B4%D0%BB%D1%8F+%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%BA%D0%B8%D1%85+%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2+%D0%94%D0%92%D0%A1-301-50-2&aqs=chrome..69i57.15130j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

(дата звертання 19.03.2022)

19. Багатофункціональний контролер для технологічних процесів АКС [Електронний документ]. Систем. вимоги: Adobe Acrobat Reader. / – Режим доступу:

<http://ahv.kpi.ua/wp-content/Lukinuk/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2i%20%D0%B7%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%20%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86ii%20%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%20%D0%B7%D0%B0%D0%B2%D0%BE%D0%B4i%D0%B2-%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BAi%D0%B2/%D0%9F%D0%90%D0%A2%D0%A2%D0%95%D0%A0%D0%90'-%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3-2018.pdf>

(дата звертання 22.03.2022)

20. А.И. Бояринов, В.В. Кафаров Методы оптимизации в химической технологии, – М.: Химия, 1969. – 564с.

21. Чинаев П.И. Методы анализа и синтеза многомерных автоматических систем / – Киев: Техника, 1969. – 377 с.
22. Худoley Г.М. Конспект лекцій і практик з ТАУ, 2015.
23. Advanced PID Control Åström, Karl J.; Hägglund, Tore (2006) [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpAPIDC001/viewerType:toc//root_slug:advanced-pid-control?b-cat-name=Process%20Design%2C%20Control%20%26%20Automation&b-cat-name=Process%20Design%2C%20Control%20%26%20Automation&b-cat-slug=process-design-control-automation&b-cat-id=197&b-order-by=name&b-sort-by=ascending&b-filter-by=all-content (дата звертання 31.01.2022)
24. Методические указания по оформлению курсовых и дипломных проектов. Инструктивные материалы. Для студентов специальности 6.091401 "Компьютеризованные системы управления и автоматика". - Сумы.: СумГУ, 1998. – 77 с.
25. Інструктивні вказівки до виконання курсових і дипломних проектів / укладачі : В. Д. Черв'яков, О.Ю. Журавльов, І.В. Щокотова. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 69с.
26. ДСТУ Б А.2.4-3:2009 Національний стандарт України. Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів.
27. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. -М.: Изд-во стандартов, 1989. - 325 с.