

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему **Розробка та дослідження частотно-регульованого електропривода дозатора установки для виробництва антисептиків**

Виконав: студент 6 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Курило В.С.

Керівник Борщ В.В.

Рецензент _____

Полтава – 2021 рік

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА АНТИСЕПТИЧНИХ ЗАСОБІВ	11
1.1 Особливості технологічного процесу виробництва антисептичних та дезінфікуючих засобів.....	11
1.2 Огляд установок і обладнання для промислового виробництва антисептичних засобів.....	13
1.3 Перспективні технології неперервного змішування компонентів.....	20
1.4 Технологія неперервного виробництва антисептиків з використанням гідродинамічного кавітаційного змішування.....	23
1.5 Аналіз способів дозування рідин.....	26
1.6 Способи регулювання подачі в дозуючих насосах.....	30
1.7 Методи синтезу систем керування частотно-регульованим електроприводом.....	32
1.8 Висновки за розділом 1.....	34
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ.....	36
2.1 Вибір насоса.....	36
2.2 Вибір привідного двигуна.....	38

2.3 Розрахунок додаткових параметрів двигуна і схеми заміщення....	40
2.4 Побудова електромеханічної та механічної характеристик двигуна.....	49
2.5 Математична модель привідного двигуна.....	53
2.6 Вибір і математична модель частотного перетворювача.....	56
2.7 Математична модель насоса.....	60
2.8 Математична модель трубопроводу та датчика тиску.....	64
2.9 Математична модель об'єкта керування в просторі станів.....	67
2.10 Висновки за розділом 2.....	69
РОЗДІЛ 3 АДАПТИВНО-МОДАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ГЛІЦЕРИНУ В ПОТОКОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ АНТИСЕПТИКІВ.....	71
3.1 Дослідження прямого пуску та роботи привідного асинхронного двигуна на номінальному навантаженні.....	71
3.2 Одноконтурна САК подачею гліцерину в потоковому виробництві антисептиків.....	76
3.3 Синтез і дослідження САК з модальним регулятором.....	80
3.4 Синтез спостерігача стану повного порядку.....	89
3.5 Адаптація модального регулятора та дослідження адаптивної САК тиском в каналі подачі гліцерину.....	93
3.6 Висновки за розділом 3.....	99

РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ САК ТИСКОМ У ТРУБОПРОВODІ ПОДАЧІ ГЛІЦЕРИНУ УСТАНОВКИ ВИРОБНИЦТВА АНТИСЕПТИКІВ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ.....	101
4.1 Техніко-економічне обґрунтування.....	101
4.2 Визначення витрат на створення електропривода та адаптивної САК.....	102
4.2.1 Визначення витрат на розробку електропривода насоса подачі гліцерину та адаптивної САК.....	102
4.2.2 Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.....	103
4.2.3 Визначення загальної суми витрат.....	104
4.3 Розрахунок річного фонду часу роботи установки виробництва антисептиків неперервної дії.....	104
4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності.....	105
4.5 Визначення поточних річних витрат в процесі експлуатації установки виробництва антисептиків неперервної дії.....	106
4.5.1 Розрахунок заробітної плати із нарахуваннями.....	107
4.5.2 Визначення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт.....	107
4.5.3 Визначення витрат на електроенергію.....	109
4.5.4 Розрахунок загальної суми річних витрат.....	110
4.6 Розрахунок вартості машино-години роботи установки УСБ.....	111
4.7 Розрахунок вартості технологічної операції для одиниці	111

продукції.....	
4.8 Визначення економічного ефекту від проведення модернізації....	112
4.9 Висновки за розділом 4.....	112
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116
ДОДАТОК	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АД – асинхронний двигун
- ВООЗ – Всесвітня організація охорони здоров'я
- ЗЗ – зворотний зв'язок
- ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний
- ПФ – передавальна функція
- САК – система автоматичного керування
- ТАК – теорія автоматичного керування
- ТО – технічне обслуговування
- УСБ – установка змішуюча швидкодіюча
- ЧРП – частотно-регульований електропривод

ВСТУП

Наприкінці 2019-го року людство вперше зіткнулося з новим видом коронавірусу SARS-CoV-2, який викликає небезпечне інфекційне захворювання COVID-19. Станом на кінець липня 2021-го року було зареєстровано більше 192 мільйонів випадків цього захворювання по всьому світу, в результаті яких померло більше 4 мільйонів людей [1].

В Україні перший офіційно підтверджений випадок коронавірусу був зафіксований у березні 2020-го року [2]. Після цього вірус став досить швидко поширюватися й вражати все більше людей. Наша країна, як і більшість інших держав, виявилася неготовою до того, щоб ефективно протистояти пандемії. Повноцінно не здійснювалися навіть мінімально необхідні заходи по попередженню розповсюдження вірусу, тому що в аптеках швидко зникли антисептичні й дезінфікуючі засоби. Серед основних причин їх нестачі експерти назвали «бюрократичний бар'єр» та нестачу сировини для виготовлення [3].

Одночасно огляд літературних джерел показує, що переважна більшість установок для виробництва антисептиків та дезінфектантів є зразками обладнання циклічного типу. У такому обладнанні вихідні компоненти подаються за допомогою перекачуючого насосу у ємність, всередині якої встановлено змішувачий пристрій. Установки циклічного типу вирізняються відносно невеликою продуктивністю й відсутністю гнучкості. Насоси розраховані на перекачування рідких компонентів з вузьким діапазоном в'язкості, тому при дефіциті базової сировини швидко перейти на альтернативні компоненти складно.

З огляду на це, використання обладнання неперервної дії видається виправданим. Особливо з урахуванням того, що на підприємствах спиртової промисловості уже не один рік ефективно працюють установки гідродинамічного кавітаційного змішування неперервної дії, які дозволяють одержувати водно-спиртові розчини. Модернізація таких установок за рахунок

введення ще одного каналу подачі додаткового компонента гліцерину, який передбачений рецептурою ВООЗ, дозволить виробляти антисептики з більшою продуктивністю й відразу проводити розлив продукції в тару. Дозування гліцерину зручно виконувати з використанням частотно-регульованого електропривода (ЧРП). Проте гліцерин має високу в'язкість, яка, крім того, дуже сильно залежить від температури. Тому розробка частотно-регульованого електропривода дозатора установки для виробництва антисептиків та адаптивної САК електроприводом є своєчасною, доцільною та актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва рідких антисептичних засобів шляхом розробки частотно-регульованого електропривода дозатора гліцерину та адаптивної САК електроприводом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати стан питання виробництва рідких антисептичних засобів та обрати напрямок дослідження.
2. Розробити математичну модель об'єкта керування (частотного перетворювача, привідного двигуна, насоса, трубопроводу) та розрахувати її параметри.
3. Виконати синтез ПІД-регулятора та модального регулятора САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину та дослідити ефективність їх роботи.
4. Запропонувати методику адаптації модального регулятора та методом комп'ютерного моделювання дослідити адаптивну САК в різних режимах роботи (відпрацювання заданого тиску, зміна в'язкості гліцерину).
5. Виконати економічну оцінку впровадження адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину.

Об'єктом дослідження є процес неперервного виробництва рідких антисептиків в установках гідродинамічного кавітаційного змішування.

Предметом дослідження є методи та САК електроприводом дозатора гліцерину в установках гідродинамічного кавітаційного змішування.

Для вирішення поставлених у магістерській роботі завдань використовувалися наступні **методи досліджень**:

- системного аналізу для обґрунтування задач дослідження;
- простору станів при розробці математичної моделі об'єкта керування (шестеренного насоса, асинхронного двигуна, частотного перетворювача та трубопроводу), синтезі асимптотичного спостерігача стану та модального регулятора;
- теорії адаптивних систем для адаптації модального регулятора;
- регресійного аналізу для одержання залежності між перепадом тиску в трубопроводі та коефіцієнтом підсилення в контурі адаптації з еталонною моделлю.

Дослідження роботи САК проводилося шляхом комп'ютерного моделювання із застосуванням *MATLAB Simulink*. Побудова механічних характеристик виконувалася з використанням програмного пакету *MathCAD*.

Новизна одержаних результатів. У процесі розв'язання поставлених завдань було одержано такі нові результати:

- уперше розроблена математична модель каналу подачі гліцерину в установках гідродинамічного кавітаційного змішування, яка враховує параметри частотного перетворювача, привідного двигуна, шестеренного насоса та трубопроводу;
- синтезовано асимптотичний спостерігач стану, що дозволяє з необхідною точністю ідентифікувати параметри об'єкта керування, недоступні безпосередньому вимірюванню;
- розроблена методика адаптації модального регулятора, яка дозволяє підвищити ефективність дозування гліцерину в потоковому виробництві антисептиків;
- уперше одержана залежність між перепадом тиску в трубопроводі подачі гліцерину установки гідродинамічного кавітаційного змішування й

коефіцієнтом підсилення контуру адаптації САК з еталонною моделлю, що дозволяє забезпечити необхідну точність дозування гліцерину при зміні його в'язкості.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропонована методика синтезу модального регулятора САК електроприводом дозатора гліцерину, яка може бути використана при розробці САК з подібними вимогами до якісних характеристик перехідних процесів;
- розроблена адаптивна САК дозволяє використовувати установки гідродинамічного кавітаційного змішування для одержання антисептиків з аналогами гліцерину для зволоження шкіри, наприклад, з екстрактом алое. При зниженні або відсутності попиту на антисептики установки з адаптивною САК можуть використовуватися для виробництва інших трьохкомпонентних продуктів на основі водно-спиртових розчинів (незамерзаючі рідини для автомобілів і т.п.).

Апробація результатів роботи. Основні положення й результати роботи доповідалися та обговорювалися на VII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (м. Полтава, 2021).

Публікації. За результатами магістерської роботи опубліковано статтю в збірнику наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика» (2021).

Структура й обсяг роботи. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел із 61 найменування та додатків. Повний обсяг роботи складає **XXX** сторінок, з яких основний зміст викладено на 115 сторінках друкованого тексту. До складу роботи ввійшло 46 рисунків і 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ВИРОБНИЦТВА АНТИСЕПТИЧНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Особливості технологічного процесу виробництва антисептичних та дезінфікуючих засобів

Ринок виробництва антисептиків в Україні був стабільним до початку 2020-го року. На той момент основними споживачами такої продукції були лікарні, медичні лабораторії, підприємства харчової промисловості, готелі, кафе, ресторани, торгові центри та ін. Проте все змінила пандемія коронавірусу, з початком якої суттєво зріс попит на антисептичні та дезінфікуючі засоби, який промисловість у повному обсязі задовольнити не змогла, в результаті чого виник дефіцит. Причинами відсутності антисептиків на полицях аптек фахівці назвали «бюрократичний бар'єр», який заважав швидко реєструвати нові препарати, а також брак необхідної сировини на українському ринку [4]. Однак, серед можливих причин також могли бути морально та фізично застарілі технології, які використовують вітчизняні виробники. Для перевірки цієї гіпотези розглянемо спочатку базову технологію виробництва антисептиків для рук, а потім проаналізуємо обладнання, яке при цьому використовується.

Перелік компонентів для виробництва антисептиків може дещо видозмінюватися залежно від того, який тип сировини є більш доступним у тій чи іншій країні. Тому в якості основної технології розглянемо ту, яка рекомендується Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) [5].

ВООЗ пропонуються дві рецептури:

- перша – етанол 96% (8333 мл), перекис водню 3% (417 мл), гліцерин 98% (145 мл), стерильна дистильована або кип'ячена охолоджена вода;
- друга – ізопропіловий спирт – 99,8% (7515 мл), перекис водню 3% (417 мл), гліцерин 98% (145 мл), стерильна дистильована або кип'ячена охолоджена вода.

Гліцерин необхідний для зволоження шкіри, перекис водню інактивує мікробні спори, щоб вони не потрапили в інфузійну систему, а спирт використовується для знищення різних видів бактерій.

Обидві рецептури реалізуються вручну. При цьому необхідно пройти наступну послідовність кроків:

1. Спирт наливається у велику пляшку або ємність до рівня градуйованої відмітки.
2. З використанням мензурки додається перекис водню.
3. З використанням мензурки додається гліцерин. Після цього залишки гліцерину змиваються з скляної поверхні мензурки стерильною дистильованою або охолодженою кип'яченою водою й суміш виливається до пляшки.
4. У пляшку додається стерильна дистильована або охолоджена кип'ячена вода.
5. Для того, щоб запобігти випаровуванню антисептика, пляшка закривається кришкою або пробкою.
6. Розчин розміщується за рахунок легкого побовтування, якщо це можливо фізично, або за допомогою лопатки.
7. Відразу після змішування компонентів антисептик переливається в контейнери кінцевого продукту. В якості контейнерів можуть використовуватися, наприклад, пластикові флакони ємністю 500 або 100 мл. Перед використанням флакони необхідно помістити на карантин, який триває не менше 72-х годин. Цей час необхідний для того, щоб знищити спорові форми мікроорганізмів, які можуть знаходитися в спирті або на стінках флаконів.

Ручне виробництво антисептиків займає досить багато часу й може розглядатися як дієве рішення лише за умови стабільного й малого попиту на антисептичні засоби. При різких стрибках задовольнити попит населення, лікарень, медичних лабораторій, ресторанів, кафе, готелів та торгових центрів може лише виробництво антисептиків у промислових об'ємах. Для цього

використовується спеціальне обладнання, яке розглядається у наступному підрозділі.

1.2 Огляд установок і обладнання для промислового виробництва антисептичних засобів

Технологічний процес виробництва антисептичних засобів у промислових об'ємах складається за наступних операцій [6]:

1. Зважування, відмірювання й завантаження компонентів.
2. Фільтрація етилового спирту (зазвичай через мембранний фільтр).
3. Дозування компонентів.
4. Змішування компонентів.
5. Відбір лабораторная зразка для перевірки якості готового продукту (за необхідності).
5. Розлив готового продукту в тару.
6. Закупорювання тари.

У цілому технологічний процес виробництва антисептиків має високу ступінь автоматизації, яка досягається за рахунок спеціальних автоматизованих ліній, які дозволяють дозувати компоненти, проводити розлив готового продукту й закупорювання тари. Але попри це процес є тривалим, а найбільше часу витрачається на етапі змішування компонентів. Для виявлення причин розглянемо типове обладнання для змішування компонентів антисептичних засобів, яке пропонується різними виробниками на українському ринку.

Німецька компанія GlobeCore GmbH випускає установки типу RS-150, які призначені для виробництва антисептиків на основі спиртів та водних розчинів [7]. Зовнішній вигляд цієї установки наведено на рисунку 1. RS-150 призначена для змішування від двох до чотирьох окремих рідин відповідно до рецептури. Вихідні компоненти подаються порційно за допомогою перекачуючого насосу в ємність, яка оснащена змішуючим пристроєм. Конструкція установки допускає додавання в ємність сипучих компонентів через завантажувальний

люк. Ці компоненти мають бути розчинними в рідині, а розмір їх частинок має бути допустимим для перекачуючого насоса.

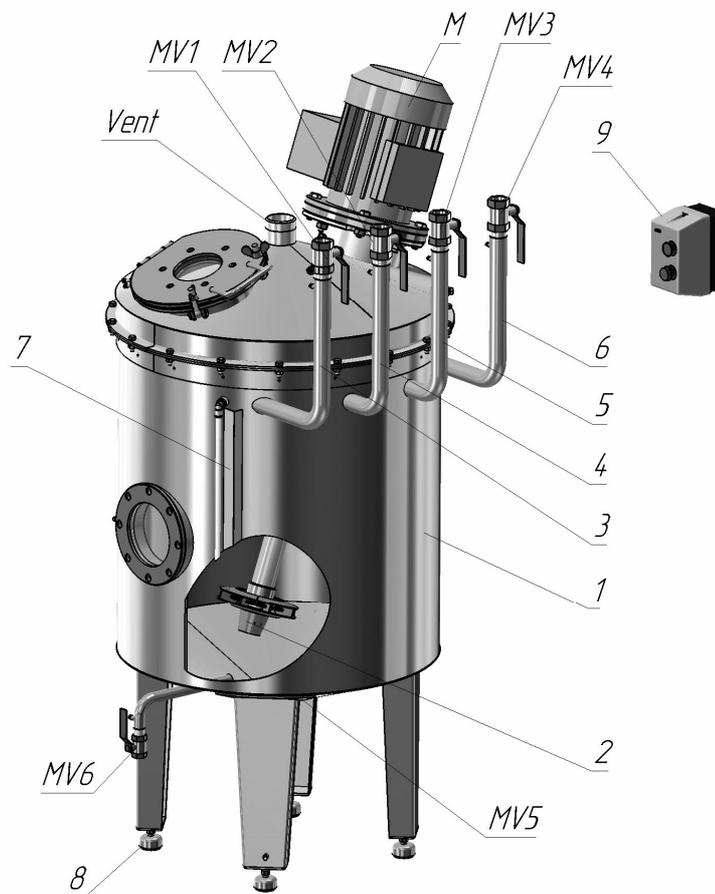


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд установки RS-150: 1 – ємність, 2 – змішувачий пристрій, 3, 4, 5, 6 – трубопроводи подачі рідких компонентів, 7 – вимірювач рівня заповнення ємності, 8 – регульована опора, 9 – пусковий пристрій, М – привідний двигун, MV1, MV2, MV3, MV4, MV5, MV6 – кран кульовий, Vent – патрубок вентиляційного каналу для відведення газів

RS-150 – установка порційного типу й працює циклічно. Її продуктивність становить 150 літрів за один цикл, а рекомендована кількість циклів за годину – два. Тобто за одну годину за допомогою даного обладнання можна отримати до 300 літрів антисептичного засобу.

Лінійка обладнання для виробництва антисептиків компанії GlobeCore представлена також установкою типу RS-2000 [8]. Зовні це обладнання подібне до установки RS-150, має ту ж призначення й дозволяє змішувати від

двох до чотирьох рідких компонентів. Основна відмінність полягає в розмірі ємності, яка є значно більшою, що дозволяє одержати більшу кількість антисептика за один робочий цикл – до 1135 літрів. Розрахункова тривалість циклу також складає 30 хвилин. Для зручності обслуговування модель RS-2000 обладнана драбиною з перилами, що полегшує оператору доступ до елементів установки.

Російська компанія «Гамбіт» пропонує широкий вибір обладнання типу СБН для виробництва антисептиків і санітайзерів, яке виробляється під замовлення [9]. Зовнішній вигляд установки СБН-200 наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд установки СБН-200

Це ємність у вигляді барабана загальним об'ємом 200 літрів. На відміну від установки компанії GlobeCore тут перемішування компонентів досягається не за рахунок роботи змішуючого пристрою, а за рахунок обертання барабана. Швидкість обертання барабана становить 18 обертів на хвилину. Корисний об'єм, в який можна завантажити компоненти антисептика, складає 50-70%. За

один цикл на даному обладнанні можна одержати від 100 до 140 літрів антисептика. Тривалість циклу – 10 хвилин. Методом нескладних підрахунків отримуємо, що за одну робочу зміну за допомогою установки СБН можна виготовити не більше 5 метрів кубічних антисептика. На сайті компанії виробника також доступні інші модифікації установок СБН, які відрізняються загальним і корисним об'ємом барабана (максимальний об'єм барабана – 1000 літрів).

Російський завод «ЮВС» випускає обладнання для виробництва антисептичних, дезінфікуючих, піномиючих засобів та антисептичних гелів [10]. На жаль детального опису принципу роботи свого обладнання завод на сайті не наводить. З представленого зображення видно, що технологія виробництва антисептичних засобів реалізується за рахунок металічних ємностей із змішуючими пристроями, тобто в загальному обладнання «ЮВС» нагадує обладнання компанії GlobeCore.

ООО «ІНОКСПА» (м. Київ, Україна) пропонує своїм потенційним клієнтам установку типу СМС-АТЕХ для виробництва водно-спиртових гелів, зовнішній вигляд якої зображено на рисунку 1.3 [11].



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд установки СМС-АТЕХ

Обладнання розраховане на роботу з такими компонентами, як етиловий спирт, вода, гліцерин та гелеутворюючі речовини. Установа СМС-АТЕХ оснащена двома змішувачами пристроями. Перший працює по принципу «ротор-статор», розташовується на дні ємності й призначений для збільшення поверхні контакту води й добавки. Другий – це пропелерна мішалка, яка також розташовується в ємності й призначена для ефективної циркуляції (переміщення) порошку до першого змішувача, а також скорочує час диспергування. Установа СМС-АТЕХ – також обладнання періодичної дії, тобто приготування антисептика здійснюється циклами. Виробником пропонується два типи ємностей: на 500 і 1000 літрів. Відомості про тривалість технологічного циклу не вказані.

Компанія «ХімМікс» (м. Мелітополь, Україна) випускає реактори для виробництва антисептиків [12]. Цей реактор було розроблено спеціально для виробництва рідких антисептичних лосьйонів для рук. До складу реактора входять два перемішувачі пристрої, завдяки яким можна реалізувати різні рецептури лосьйонів різної щільності і плинності. Технічні характеристики обладнання на сайті виробника відсутні й надаються по спеціальному запиті.

Компанія «Промвіт» (м. Черкаси, України) спеціалізується на випуску обладнання для фармацевтичної промисловості [13]. Зокрема, компанія випускає реактори для одержання ін'єкційних розчинів, сиропів, м'яких лікарських форм, мазей, гелів і т.п. На сайті «Промвіт» доступні різні моделі реакторів. Спільним для них є використання ємності, в якій розміщені один або два перемішувачі пристрої (якірного, турбінного та ін.). Доступні різні об'єми ємностей: від зразків лабораторного обладнання на кілька літрів до повноцінних промислових моделей на кілька сотень літрів. Максимальний об'єм – 1000 літрів. Тривалість технологічного циклу не вказується, оскільки вона залежить від рецептури й набору вихідних компонентів.

Китайська компанія Flowtam також розробляє реактори для випуску антисептичних засобів [14]. Зовнішній вигляд установки Flowtam наведено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд установки виробництва *Flowtam*

Обладнання працює в циклічному режимі. В металічній ємності розташований один перемішувачий пристрій, тип якого може змінюватися виробником під потреби замовника. Максимальний об'єм ємності – 300 літрів.

Узагальнені дані розглянутого обладнання для виробництва антисептиків наведені в таблиці 1.1. Наведений перелік обладнання не є максимально вичерпним, оскільки періодично на ринку про себе заявляють нові виробники й з'являються нові моделі обладнання. Однак, з даних таблиці можна зробити висновок про те, що наразі переважна більшість обладнання для виробництва антисептиків, з числа того, що представлено на ринку, працює в циклічному режимі й дозволяє отримувати відносно невелику кількість антисептиків за робочу зміну. Такого обладнання достатньо для задоволення стабільних потреб населення на антисептичні засоби. Але при різкому зростанні цього попиту, який спостерігався, наприклад, на початку пандемії COVID-19, обладнання з циклічним режимом роботи не може гарантувати виробництво необхідного об'єму продукту. На користь зростання об'ємів споживання антисептичних засобів у майбутньому говорить також постійна мутація штамів

хвороботворних мікроорганізмів, що призводить до появи нових вірусів і хвороб.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики обладнання для виробництва антисептиків

№	Виробник	Об'єм ємності, л	Режим роботи
1	GlobeCore (Німеччина)	1135	Циклічний
2	«ЮВС» (Росія)	Не вказано	Циклічний
3	ООО «ІНОКСПА» (Україна)	1000	Циклічний
4	«ХімМікс» (Україна)	Не вказано	Циклічний
5	«Гамбіт» (Росія)	200	Циклічний
6	«Промвіт» (Україна)	1000	Циклічний
7	Flowtam (Китай)	300	Циклічний

Теоретично збільшення продуктивності можна досягти за рахунок використання габаритніших ємностей, але таке рішення призведе до суттєвого збільшення необхідних промислових площ, зростання трудозатрат та фінансових витрат на експлуатацію.

Хорошим рішенням, яке відповідатиме сучасним вимогам і тенденціям у сфері виробництва антисептичних засобів може стати впровадження обладнання, яке має не циклічний, а неперервний режим роботи, при якому дозування й змішування вихідних компонентів здійснюється в потоці, тобто цикл не припиняється до того часу, поки його не зупинить оператор.

Можна виділити такі переваги обладнання для виробництва антисептиків з неперервним режимом роботи [15]:

- більша продуктивність. При неперервному виробництві продуктивність визначається лише ефективністю змішувача й продуктивністю насосів подачі компонентів у той час як при циклічному виробництві вона обмежена об'ємом ємностей, у яких здійснюється змішування;

- економія виробничих площ. При потоковому змішуванні зазвичай не використовуються габаритні ємності, в яких здійснюється змішування компонентів;
- компактність обладнання;
- можливість проводити розлив готового продукту в тару відразу після його виходу з установки;
- скорочення трудозатрат і фінансових витрат на експлуатацію й обслуговування обладнання.

1.3 Перспективні технології неперервного змішування компонентів

З точки зору неперервного виробництва антисептиків практичний інтерес представляє використання вже існуючих технологій, які добре зарекомендували себе в суміжних галузях промисловості, та їх адаптація до особливостей технологічного процесу виробництва антисептиків.

Так, при виробництві алкогольних напоїв, основними компонентами яких, як і в випадку з антисептиками, є спирт і вода, добре зарекомендували себе підходи до неперервного виробництва [16]:

- потоковий із струменевим змішуванням (Ленінградський лікеро-горілчаний завод);
- інжекційний (Полтавський лікеро-горілчаний завод).

Приготування водно-спиртової суміші в першому випадку здійснюється в потоковому багатоступінчатому змішувачі (рисунок 1.5).

Спирт і вода надходять через патрубки 1 і 4 відповідно в колектори 2 і 3 (I ступінь змішування). Далі перемішування суміші продовжується в колекторі, який обладнаний ситом 5 (II ступінь змішування). При зустрічному турбулентному русі струменів спирту й води в змішувачі I ступені відбувається швидке перемішування компонентів, яке супроводжується утворенням гідратів. Далі суміш надходить на III ступінь змішування, яка обладнана ситами 8 і

з'єднувальним стержнем 7. Водно-спиртовий розчин із даного змішувача через розділяючу діафрагму 9 і патрубок 6 надходить на фільтрацію.

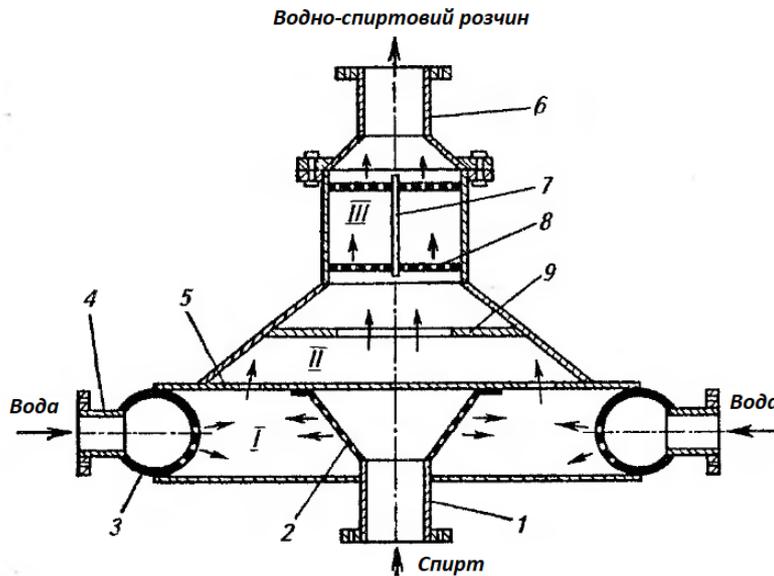


Рисунок 1.5 – Поточковий багатоступінчатий змішувач спирту й води

При роботі по цьому способу спирт і пом'якшена вода дозуються в відношенні 1:1,48. Міцність напою при цьому складає $40 \pm 0,2$ об. %.

Інгредієнти вводять в потік води перед змішувачем. Швидкість подачі спирту й пом'якшеної води контролюють витратомірами, а концентрацію спирту – поточковим густиноміром. Продуктивність установки складає 3... 5 м³/год.

Інжекторна установка, яка експлуатувалася на Полтавському лікеро-горілчаному заводі, демонструє більш стійку роботу й забезпечує міцність водно-спиртового розчину $40 \pm 0,05$ об. % (рисунок 1.6).

Спирт із спиртосховища надходить в мірник 1, а потім через оглядовий ліхтар у бачок постійного рівня 4. Спирт подається в інжектор-змішувач 7 за допомогою регулюючого вентиля 5, який обладнаний спеціальним маховиком. При зміні повороту маховика на одну поділку міцність напою змінюється на 0,05 об. %. При цьому враховується вплив температури сировини.

Оброблена вода подається із збірника 2 в змішувач відцентровим насосом 6, який працює з частотою обертання 3000 об/хв. Цей насос забезпечує сталість коефіцієнта інжекції суміші. Діаметр трубопроводу складає 50 мм. Сам

змішувач виконаний у вигляді інжектора 7, який закінчується турбулізатором 8, обладнаним усередині перфорованою трубкою.

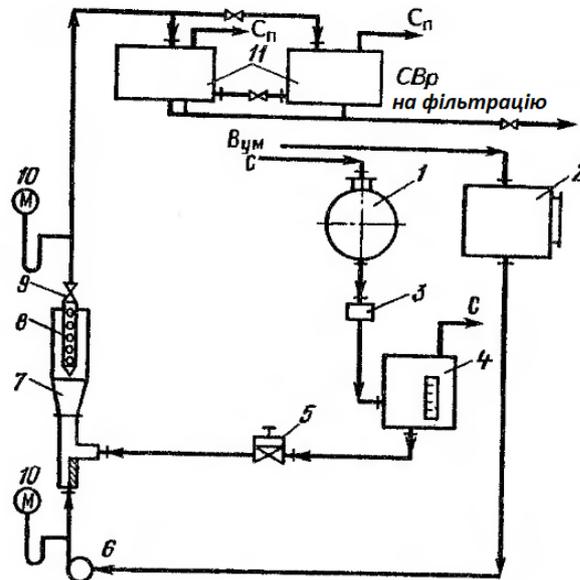


Рисунок 1.6 – Апаратурно-технологічна схема приготування водно-спиртового розчину інжекційним способом: С – спирт, СВр – спиртово-водний розчин, Вум – вода пом’якшена

Завдяки такій конструкції водно-спиртовий розчин піддається ефективному гідродинамічному перемішуванню. Турбулізатор з’єднаний через зворотний клапан 9 з напірним збірником водно-спиртового розчину 11. Манометри 10 реєструють тиск у системі. Спиртові пари Сп подаються на уловлювання.

Швидкість потоку суміші через отвір перфорованої трубки складає 2,5... 4,5 м/с. Тиск на вході в інжектор складає 0,8 МПа, а на виході – 0,1 МПа.

За необхідності при приготуванні сортової горілки в змішувач подають розраховану кількість інгредієнтів у вигляді відповідних розчинів.

Для зменшення втрат спирту спиртові пари Сп направляються в спиртопастки. Продуктивність змішувача інжекційного типу становить 18 м³/год. Якщо установку подібної конструкції використовувати для виробництва антисептиків, то за одну робочу зміну можна одержати 144 м³/год готового продукту. Дана технологія змішування повністю відповідає сучасним

тенденціям розвитку обладнання для виробництва антисептиків, тому в подальшому приймаємо її в якості базової.

1.4 Технологія неперервного виробництва антисептиків з використанням гідродинамічного кавітаційного змішувача

Технологія з використанням гідродинамічного кавітаційного змішувача, яка використовувалася на Полтавському лікєро-горілчаному заводі потребує певної модернізації (адаптації) для використання в процесі виробництва антисептиків. Даний підрозділ присвячений такій адаптації й реалізації процесу за допомогою установки типу УСБ, яка виробляється на полтавському заводу «Укрбудмаш» [17]. Розглянемо її будову й принцип роботи детальніше.

Зовнішній вигляд установки наведено на рисунках 1.7 та 1.8.

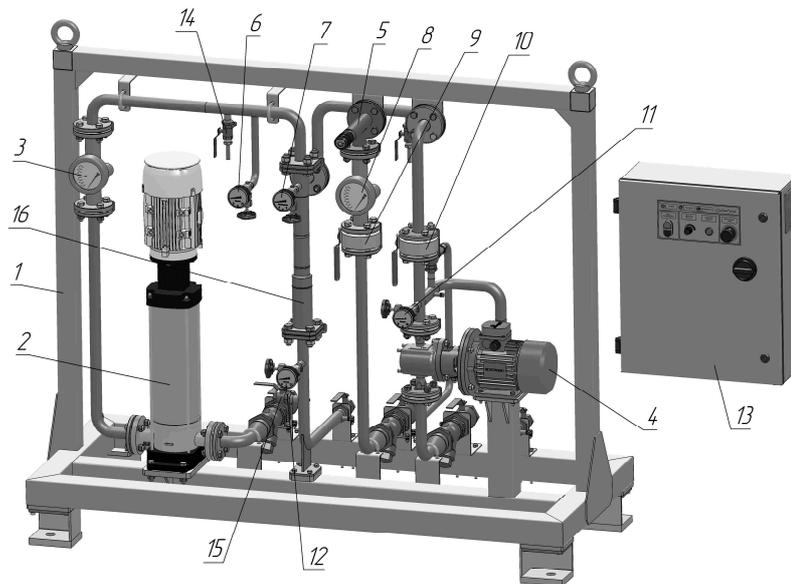


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд установки УСБ-1 (спереду)

Установка УСБ-1 складається з рами 1, на якій встановлений насос основного компоненту (спирту) 2, електродвигун 4 та змішувач 16. Для під'єднання до зовнішнього трубопроводу подачі основного компонента на установці є вхідний кран 21, який з'єднаний з фільтром 22.

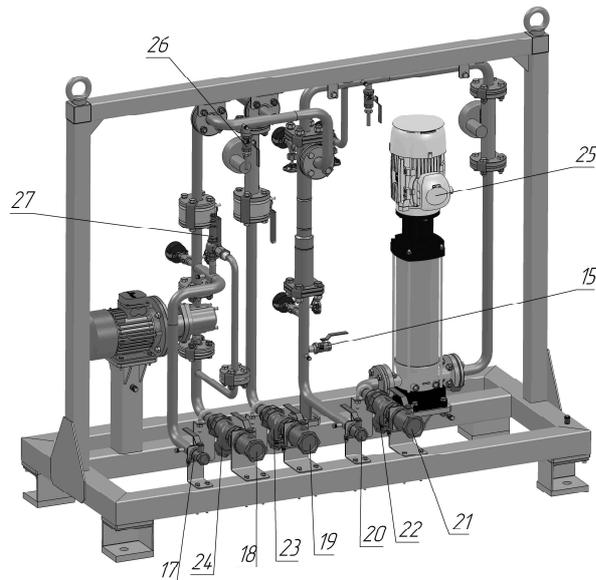


Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд установки УСБ-1 (ззаду)

Для під'єднання до зовнішнього трубопроводу подачі компонента №2 (гліцерину) на установці є вхідний кран 19, з'єднаний з фільтром 23. Для під'єднання до зовнішнього трубопроводу подачі компонента №3 (води) на установці є вхідний кран 18, з'єднаний з фільтром 24.

Для під'єднання до зовнішніх трубопроводів повернення додаткового компонента №2 на установці є вихідний кран 17.

Подача компонентів у змішувач контролюється за допомогою приладів, які встановлені на трубопроводах:

- ротаметр 3 (показує витрату основного компонента – спирту);
- манометр 6 (показує тиск рідини перед змішувачем – подача основного компонента);
- манометр 11 (показує тиск рідини перед змішувачем – подача додаткового компонента №2 (гліцерину);
- мановакуумметр 7 (показує тиск рідини в порожнині змішувача – всмоктування додаткового компонента №3 (води).

Регулювання подачі компонента №3 на змішувач виконується за допомогою ротаметра 8 і регулюючого вентиля 5. Кран 9 з'єднує ротаметр з

трубопроводом. Питання регулювання подачі додаткового компонента №2 (гліцерину) детальніше розглянемо в наступному підрозділі.

Після змішувача на вихідному трубопроводі є манометр 12 і кран 15, який можна використовувати для відбору проб готового продукту. Місце підключення відповідної магістралі до вихідного трубопроводу виконане через вихідний кран 20.

Крани 14 і 26 використовуються для видалення повітря з насосів і трубопроводів. На рамі установки є місце для підключення заземлюючого пристрою.

Для розгляду принципу роботи установки УСБ-1 зобразимо технологічну схему її підключення (рисунок 1.9).

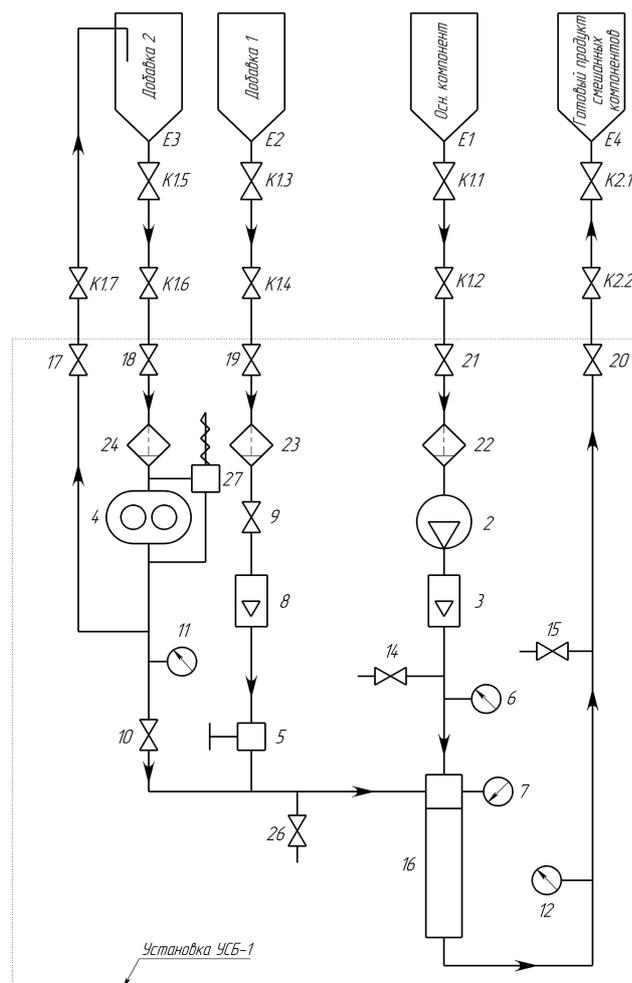


Рисунок 1.9 – Технологічна схема виробництва антисептиків з використанням установки УСБ-1

Основний компонент спирт подається із ємності Е1 після відкриття кранів К1.1 і К1.2 на підвідному трубопроводі і крану 21 на установці через фільтр 22 на насос 2, а далі через ротаметр 3 надходить у змішувач 16.

Насос під тиском подає рідину на сопло змішувача 16 (наявність тиску контролюється манометром 6). При цьому в інжекційній камері змішувача створюється розрідження (вакуум), за рахунок якого виникають передумови для подачі (всмоктування) додаткових компонентів у змішувач. Наявність вакууму контролюється по показам мановакуумметра 7.

Подача додаткових компонентів із ємностей Е2 і Е3 на установку здійснюється відповідно через крани 18 і 19. При цьому на підвідних трубопроводах мають бути відкриті відповідні крани К1.3, К1.4, К1.5 і К1.6, а на установці – крани 10, 18 і 19. Витрата рідин, що подаються, регулюється по ротаметру 8 вентилем 5 (добавка №1) і регулюючим пристроєм з панелі керування (добавка №2). Електродвигун насоса подачі добавки №2 також запускається за допомогою натискання відповідної кнопки на панелі керування.

Проходячи турбулізатор змішувача, всі рідини остаточно змішуються, а готовий продукт змішаних компонентів через кран 20 надходить в ємність Е4 на зберігання або на лінію розливу антисептика, при цьому крани К2.1 і К2.2 мають бути відкриті. Для відбору проб готового антисептика на установці є кран 15.

1.5 Аналіз способів дозування рідин

З попереднього підрозділу зрозуміло, що для адаптації роботи установки УСБ до виробництва антисептиків потрібно вирішити практичну задачу дозування (регулювання витрати) гліцерину.

Чистий гліцерин – це речовина, яка зовні нагадує сироп, без кольору й запаху з солодкуватим смаком. Гліцерин змішується з водою у всіх співвідношеннях, причому спостерігається розігрівання суміші й зменшення об'єму. Гліцерин також змішується з метиловим та етиловим спиртами.

Важливою відмінною ознакою цієї речовини є зміна в'язкості в широких межах при зміні температури [18]. Розглянемо основні методи дозування рідин й визначимо рішення, яке найбільше підходить для нашого випадку.

У загальному випадку виділяють такі види дозування рідин [19]:

- постійне й квазіпостійне;
- порціями;
- пропорційне;
- дозування в системах із зворотнім зв'язком.

Постійне й квазіпостійне дозування (continuous and quasi-continuous dosing). Нечисленні й дуже дорогі моделі дозуючих насосів можуть подавати рідину неперервно. Більшість же стандартних дозуючих насосів подають речовини не безперервно, а порціями. У межах однієї секунди подача рідини показує значні коливання. Однак ці коливання однорідні й рівномірні, тому протягом більш тривалого періоду часу середня подача рідини дозуючим насосом прямує до константи. Для тих процесів, де час виробництва (обробки) об'єкта триває від декількох хвилин до декількох годин, зміна подачі реагенту дозувальним насосом в межах секунди не має ніякого значення.

Вся справа в тому, як співвідноситься частота коливань подачі рідини насосом і загальний період дозування. Якщо коливання подачі всередині однієї секунди істотні, а весь процес дозування триває всього лише кілька секунд, то можна дуже сильно помилитися в подачі реагенту за період дозування. Однак якщо період дозування великий, то коливання подачі рідини всередині секунди втрачають значення. Таке дозування можна назвати «квазіпостійним». «Квазіпостійне» дозування може розглядатися як постійне, якщо фактична подача реагенту для будь-якого періоду дозування відповідає заданій потребі в межах допустимої похибки.

Дозування порціями (batch dosing). При порційному дозуванні завдання полягає в тому, щоб відміряти заданий об'єм реагенту й додати його в вихідну речовину. Для цих цілей дозуючий насос зазвичай працює протягом заданого періоду часу (наприклад, за таймером) або виконує заздалегідь задану кількість

робочих тактів. Інша можливість полягає в тому, щоб заповнити бак вихідною речовиною до необхідного рівня, а потім додати певну кількість реагенту. Якщо реагент повинен бути поданий в систему під тиском, то відкритий бак не підходить для цього завдання. Замість цього слід вибрати дозуючий пристрій, здатний подати реагент в систему незалежно від протитиску.

Пропорційне дозування (dosing in proportion to a guide signal).

Пропорційне дозування може застосовуватися в двох типах систем:

1. Якщо потік основної речовини може змінюватися протягом часу, то і подача реагенту теж повинна пропорційно змінюватися. Це робиться за допомогою керуючого сигналу. Хімічна речовина подається в інше середовище таким чином, щоб співвідношення обсягів обох речовин весь час було постійним.

Якщо, наприклад, 100 мл реагенту повинні бути додані в кожен кубічний метр питної води, то система дозування повинна безперервно адаптувати подачу реагенту в залежності від швидкості подачі води.

Якщо вода не подається, то і реагент не подається. Навпаки, якщо потік води максимальний, то і подача реагенту максимальна. Якщо швидкість подачі води становить 40% від максимуму, то і подача реагенту буде 40% від максимуму.

Пропорційне дозування забезпечує необхідну точність тільки якщо стан середовища (тиск, в'язкість, температура) залишається незмінним.

2. Також пропорційне дозування правильно застосовувати в системах з високою інерцією. Якщо між уприскуванням реагенту й реакцією проходить досить тривалий час (наприклад, через велику довжину трубок подачі реагенту), то системи, які базуються на зворотному зв'язку будуть помилятися в подачі реагенту. Як результат подача реагенту буде весь час або з надлишком, або недостатньою.

Дозування в системах із зворотним зв'язком (controlled dosing with feedback). Щоб отримати воду або іншу рідину із заданими характеристиками часто необхідно додати різну кількість реагенту для одного і того ж об'єму

води. В такому випадку пропорційне дозування не підходить для отримання правильного результату.

Якщо властивості води на вході в систему постійно змінюються, то система дозування повинна безперервно аналізувати якість води, щоб визначити кількість реагенту для додавання.

Вагове дозування. Для багатьох технологічних процесів важливо додавати реагент в розрахунку не на одиницю об'єму, а на одиницю маси. Однак, виміряти об'єм (витрату) речовини набагато простіше, ніж масу. Для середовищ, де співвідношення маси й об'єму є постійним, використовують саме об'ємне дозування (наприклад, пропорційний метод дозування), адже його простіше реалізувати. Таке постійне співвідношення маси й об'єму характерне для рідин.

При обробці сипучих матеріалів їх густина може змінюватися. Відповідно змінюється і маса в розрахунку на одиницю об'єму. Об'ємне дозування в такому випадку не підійде. В цьому випадку необхідно зважувати кожен окрему партію речовини й додавати в неї певну кількість реагенту.

Вагове дозування практично не застосовують при обробці газів, адже їх маса залежить не тільки від об'єму, а також від тиску й температури. Автоматично вимірювати всі ці три параметра досить складно.

Для нашого випадку маємо наступне:

- виробництво антисептиків в основному виконується з використанням рідких компонентів;
- установка УСБ працює в потоковому режимі, тобто дозування компонентів виконується неперервно, а їх витрата є постійною й визначається існуючою рецептурою;
- в залежності від зміни попиту (епідеміологічної ситуації) робота установки УСБ в режимі максимальної продуктивності може не знадобитися, тому витрата основного компоненту може зменшуватися. Пропорційно має зменшуватися й витрата гліцерину;

- оскільки в'язкість гліцерину в залежності температури може змінюватися в широких межах, система дозування повинна забезпечувати постійну подачу цього компонента незалежно від умов навколишнього середовища.

З урахуванням перелічених факторів при розробці системи дозування гліцерину в потоковому виробництві антисептиків мова повинна йти, по-перше, про пропорційне дозування, а, по-друге, про адаптивні властивості такої системи, яка має забезпечувати необхідну подачу при різних температурах.

1.6 Способи регулювання подачі в дозуючих насосах

Регулювання подачі дозуючих насосів, здійснюється декількома способами, застосування яких зумовлено вимогами технологічного процесу в умовах експлуатації [20]:

- ручне керування з використанням механізму приводу без зміни швидкості обертання привідного валу;
- дистанційне керування скважним методом і методом частотного регулювання з використанням електронного блока управління.

Способом, реалізованим у кожному насосі, є ручне керування довжиною ходу плунжера (завбільшки з робочий об'єм насоса). У насосах з дистанційним керуванням ручне керування є дублюючим, а також дозволяє розширити діапазон зміни подачі.

Ручне регулювання подачі в приводах різної конструкції здійснюється за допомогою механізму, що змінює довжину ходу плунжера при працюючому і при зупиненому насосі (насоси типів НДР та НДГР) або тільки при зупиненому насосі (насоси типів НД та НДГ). Кривошипно-шатунний механізм приводу перетворює обертальний рух валу електродвигуна у зворотно-поступальний рух плунжера, а відліковий пристрій забезпечує зміну амплітуди його переміщення. Приводний кривошипний вал та розміщений на ньому ексцентрик утворюють систему «ексцентрик в ексцентриці», сумарний ексцентриситет якої може

змінюватися від нуля до максимуму, що відповідає половині максимального ходу плунжера. Зміна сумарного ексцентриситету відбувається при обертанні ексцентрика навколо ділянки валу, ексцентрично розташованого щодо загальної осі обертання. У приводах насосів типів НД та НДГ ексцентрик має гладке посадкове місце та повертається втулкою відлікового пристрою.

У приводах насосів типів НДР і НДГР ексцентрик і вал об'єднані по гвинтовим шліцам і поворот ексцентрика валу здійснюється при осьовому переміщенні приводного валу гвинтом відлікового пристрою.

Дистанційне керування дозуючими насосами здійснюється за допомогою блоків керування. Робочий об'єм насоса у цьому випадку залишається незмінним. Варіантом комплектації дозуючих насосів типів НДЕ та НДГЕ є їхнє оснащення універсальними перетворювачами частоти. Оскільки застосовувані перетворювачі частоти дозволяють програмувати зміну частоти живлячого електроструму, а не безпосередньо подачі насоса в літрах на годину, в паспорті насоса наводиться методика налаштування, яка враховує умови експлуатації, що змінюються (в'язкість середовища, що перекачується, і тиск).

Скважний метод керування дозуючим насосом – це дискретне регулювання в режимі «пуск-зупинка електродвигуна». Робота із заданою подачею досягається установкою різних співвідношень періодів простою та роботи електродвигуна насоса. Періодичність пусків визначається базовим часом циклу дозування, що програмується споживачем у межах встановленого діапазону. Насос працює в автоматичному режимі, що визначається мікропроцесором.

Метод частотного регулювання подачі полягає у зміні частоти струму, що живить електродвигун насоса і, відповідно, частоти обертання двигуна та частоти ходів плунжера. Насоси з частотним регулюванням подачі застосовуються, як правило, в малоінерційних технологічних системах, де неприпустимо навіть короткочасне припинення подачі речовини, що дозується. Це якраз характерно для процесу неперервного виробництва антисептичних засобів і, зокрема, дозування гліцерину.

1.7 Методи синтезу систем керування частотно-регульованим електроприводом

Розглянемо перспективні методи синтезу систем керування частотно-регульованими електроприводами (ЧРП) та пристрої, що реалізують необхідний закон керування – регулятори.

Типи регуляторів САК. Класичним регулятором, який використовується в більшості систем керування, включаючи системи керування ЧРП, є так званий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор). Суть САК з ПІД-регулятором зводиться до вимірювання значення вихідної величини, його порівняння з заданим значенням і обчислення помилки керування. Далі на основі цієї помилки формується комплексний сигнал керування, який складається з суми трьох значень: інтегралу похибки, похідної похибки і значення, пропорційного похибці. Таким чином, задача синтезу зводиться до знаходження таких коефіцієнтів П-, І- та Д-складової, при яких забезпечується необхідна якість перехідного процесу. Для підбору коефіцієнтів може використовуватися класична методика Зіглера-Нікольса або метод комп'ютерного моделювання.

У більшості випадків ПІД-регулятори дозволяють досягти необхідних якісних показників перехідного процесу. Але одночасно не завжди вдається одержати необхідну форму перехідного процесу, який може містити небажані коливання. По цьому критерію перспективними є так звані модальні регулятори, які дають не тільки бажані характеристики перехідного процесу, а й забезпечують його необхідну форму. Суть модального керування полягає в використанні методу простору станів й уведення до системи таких зворотних зв'язків по змінним стану, які забезпечують розміщення коренів характеристичного рівняння системи в потрібній площині (напівплощині).

Fuzzy-регулятори є відносно новим напрямком у керуванні технічними системами, а теорія їх майбутнього практичного використання була закладена математиком Лотфі Заде. Такі регулятори застосовуються в реальних системах

керування, але переважно для об'єктів, яким доводиться працювати в умовах невизначеності.

Поширеними є також адаптивні САК (регулятори). Часто структура і (або) параметри об'єкта керування можуть змінюватися в процесі роботи. Також можуть змінюватися параметри зовнішнього середовища. Щоб забезпечити необхідну якість керування за нових умов САК і регулятори повинні володіти адаптивними властивостями, тобто підлаштовуватися під зміну умов так, щоб все одно забезпечувати необхідні якісні характеристики перехідного процесу. Такий випадок може мати місце тоді, коли температура гліцерину з якихось причин змінюється безпосередньо в процесі виробництва антисептиків. Тому САК має бути адаптивною й підтримувати витрату гліцерину на заданому рівні.

Принципи керування ЧРП. На сьогодні відомо два типи керування ЧРП – векторне й скалярне. Вони здійснюються за допомогою частотних перетворювачів і регуляторів. Частотні перетворювачі можуть реалізувати або якийсь один принцип керування (векторний або скалярний), або обидва одночасно.

Скалярне керування є простішим для реалізації й полягає в одночасній зміні частоти й модуля живлячої напруги з метою регулювання швидкості. При скалярному принципі керування зазвичай необхідно забезпечувати виконання співвідношення $U/f = const$. Скалярний закон добре зарекомендував себе на практиці при керуванні насосами, вентиляторами, конвейерами та іншим подібним обладнанням.

Векторне керування більш складне для реалізації, але одночасно дозволяє керувати не лише швидкістю, а й моментом на валу двигуна. Якщо порівнювати точність керування, то при скалярному керуванні вона складає $\pm 2-3\%$, а при векторному - $\pm 0,2\%$ (без датчика швидкості) та $\pm 0,01\%$ (з датчиком швидкості) [21]. Оскільки при дозуванні гліцерину в потоковому виробництві антисептиків можлива похибка $\pm 2-3\%$ не є критичною, то

ускладнювати систему немає сенсу й доцільно використовувати принцип скалярного керування.

Враховуючи все, що було викладене вище, можна сформулювати основні задачі магістерської роботи:

- проаналізувати стан питання виробництва антисептичних засобів та обрати напрямок дослідження;
- розробити математичну модель об'єкта керування (частотного перетворювача, привідного двигуна, насоса, трубопроводу) та розрахувати її параметри;
- виконати синтез ПД-регулятора та модального регулятора САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину та дослідити ефективність їх роботи;
- запропонувати методику адаптації модального регулятора та методом комп'ютерного моделювання дослідити адаптивну САК в різних режимах роботи (відпрацювання заданого тиску, зміна в'язкості гліцерину);
- виконати економічну оцінку впровадження адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину.

1.8 Висновки за розділом 1

1. Розглянуті типові рецептури виробництва антисептиків для рук, рекомендовані ВООЗ. Висунута гіпотеза відносно того, що дефіцит антисептичних засобів в розпал пандемії коронавірусу міг бути викликаний не лише нестачею необхідної сировини та «бюрократичним бар'єром», а й недосконалістю технології виробництва.
2. Здійснено огляд обладнання вітчизняного й закордонного виробництва для одержання антисептичних засобів у промислових об'ємах. Встановлено, що на ринку пропонуються лише установки з циклічним принципом дії, а продуктивність такого обладнання є досить малою і в

середньому рідко перевищує 1 м³/год. Це підтверджує гіпотезу про те, що нестача антисептиків у розпал коронавірусу в тому числі була викликана недосконалістю технологій виробництва.

3. Одночасно на підприємствах спиртової промисловості не один рік успішно функціонують установки неперервної дії, які працюють за принципом гідродинамічного кавітаційного змішування й дозволяють змішувати спирт та воду в потоці.
4. Запропонована технологічна схема неперервного виробництва антисептичних засобів на базі модернізації установки гідродинамічного кавітаційного змішування типу УСБ. Модернізація полягає в уведенні ще одного дозуючого каналу для подачі третього компонента – гліцерину.
5. Аналіз існуючих способів дозування рідин, способів регулювання в дозуючих насосах та методів синтезу систем керування показав, що дозування гліцерину доцільно проводити з використанням насосу, обладнаного частотно-регульованим електроприводом. Оскільки гліцерин є в'язкою речовиною, а в'язкість сильно змінюється при зміні температури, необхідно передбачити адаптацію системи керування до можливої зміни в'язкості.
6. Результати, одержані в першому розділі, дозволили остаточно сформулювати основні задачі, які необхідно вирішити для досягнення мети магістерської роботи.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

Синтезу системи автоматичного керування (САК) зазвичай передують побудова математичної моделі об'єкта керування. Для випадку неперервного дозування гліцерину в потоковому виробництві антисептиків відповідно до обраного в першому розділі підходу об'єкт керування буде складатися з насосної станції (насос, привідний двигун, частотний перетворювач) та трубопроводу.

2.1 Вибір насоса

Для вибору насоса необхідно знати відповіді на такі питання [22]:

1. Яка речовина буде перекачуватися (призначення насоса).
2. Де буде встановлюватися насос.
3. Скільки рідини необхідно перекачувати за одиницю часу (витрата).
4. Який тиск повинен створювати насос при вказаній витраті (напір).

У нашому випадку перекачувана речовина – це гліцерин, який є компонентом антисептичних засобів і необхідний для зволоження шкіри. Розглянемо, як змінюється в'язкість гліцерину в залежності від температури [23]. Відповідні чисельні дані наведені в таблиці 2.1.

З даних таблиці можна стверджувати наступне. Гліцерин є досить в'язкою речовиною, до того ж, його в'язкість сильно змінюється в залежності від зміни температури. Навіть при температурі, яка відповідає кімнатній (15-25 °С) в'язкість гліцерину може варіюватися в межах значень, які будуть відрізнятися в три-чотири рази.

Далеко не всі типи моделей промислових насосів розраховані на роботу з в'язкими середовищами в широкому діапазоні зміни в'язкості. У загальному випадку справедливі наступні рекомендації [24]:

- якщо температура гліцерину менша або рівна $+15^{\circ}\text{C}$, то доцільно обрати шестеренний або гвинтовий насос;
- якщо температура гліцерину знаходиться в межах від $+15$ до $+60^{\circ}\text{C}$, то доцільно обрати імпелерний, мембранний або шестеренний насос;
- якщо температура гліцерину перевищує $+60^{\circ}\text{C}$, то доцільно використовувати відцентровий насос.

Таблиця 2.1 – Зміна в'язкості гліцерину в залежності від температури

№	Температура гліцерину, $^{\circ}\text{C}$	В'язкість гліцерину, мПа·с
1	0	12100
2	5	7050
3	10	3950
4	15	2350
5	20	1480
6	30	600
7	40	330
8	50	180
9	60	102
10	70	59

Згідно завдання, температура гліцерину складає $15-25^{\circ}\text{C}$, тому вибір насоса звужується до трьох типів: імпелерного, мембранного й шестеренного. З перелічених типів шестеренний насос є одним із найбільш простих. До того ж, шестеренні насоси є дешевшими й достатньо апробовані вітчизняною промисловістю. Тому свій вибір зупинимо на насосі шестеренного типу.

Тепер визначимо необхідну витрату гліцерину. Згідно завдання, продуктивність потокового виробництва антисептиків (у нашому випадку – змішувальної установки УСБ) має становити $5\text{ м}^3/\text{год}$, а в рекомендованих ВООЗ рецептурах антисептиків частка гліцерину становить $1,45\%$ по об'єму.

Тоді насос має забезпечувати подачу гліцерину на рівні 0,0725 м³/год або 72,5 л/год. Необхідний робочий тиск, згідно завдання, складає 4 бари, що відповідає напору 41 м.

З [25] обираємо шестеренний насос *Liverani Gear 3*, який використовується для перекачування в'язких речовин (в'язкість до 20000 сСт) у хімічній, фармацевтичній, нафтовій, лакофарбній, харчовій, будівельній та інших галузях промисловості з наступними паспортними даними:

- країна-виробник – Італія;
- продуктивність – $Q = 0,105$ м³/год;
- тиск – до 5 бар;
- температура перекачуваної рідини – до 90 °С;
- частота обертання валу – $n = 700$ об/хв;
- потужність привода – $P = 0,13$ кВт.

2.2 Вибір привідного двигуна

Максимальний момент навантаження на валу двигуна дорівнює [26, 27]:

$$M_{н.мах} = \frac{P}{\omega_n}, \quad (2.1)$$

де ω_n – необхідна кутова частота обертання вала двигуна, рад/с.

Необхідна кутова частота обертання вала двигуна дорівнює

$$\omega_n = \frac{\pi n}{30}, \quad (2.2)$$

де n – необхідна частота обертання вала двигуна, об/хв.

Тоді

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 700}{30} = 73,3 \text{ рад/с}.$$

Підставивши значення, одержане з співвідношення (2.2) у (2.1), одержимо:

$$M_{н.мах} = \frac{130}{73,3} = 1,77 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Вибір двигуна необхідно здійснити таким чином, щоб, по-перше, виконувалися умови

$$n_{дв.н} \geq n; P_{дв.н} \geq P; M_{дв.н} \geq M_{н.мах}, \quad (2.3)$$

а, по-друге, враховувалася горючість гліцерину. Тому двигун необхідно обирати в вибухозахищеному виконанні.

З урахуванням викладеного вище та з використанням [28] обираємо вибухозахищений асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4ВР90LА8. Даний двигун має наступні паспортні характеристики:

- режим роботи – тривалий;
- потужність – $P_{дв.н} = 0,75$ кВт;
- синхронна швидкість обертання – $n_0 = 750$ об/хв;
- номінальна частота обертання – $n_{дв.н} = 700$ об/хв;
- ковзання – $S_n = 7\%$;
- струм – $I = 2,3$ А;
- номінальний момент $M_H = 10,2$ Нм;
- ККД – $\eta_n = 70\%$;
- коефіцієнт потужності – $\cos(\varphi_n) = 0,71$;
- кратність струмів – $I_{II}/I_H = 4,0$;
- кратність моментів – $M_{II}/M_H = 1,5$;
- перевантажувальна здатність – $M_{max}/M_H = 2,0$;
- момент інерції $J = 0,0063$ кг·м²;
- маса $m = 17,7$ кг.

2.3 Розрахунок додаткових параметрів двигуна і схеми заміщення

Для розрахунку й побудови механічних характеристики привідного двигуна необхідно скористатися його математичною моделлю, яка може бути представлена в вигляді різних схем заміщення. Для інженерних розрахунків однією з найбільш простих і зручних є Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором [29]. Її схема зображена на рисунку 2.1.

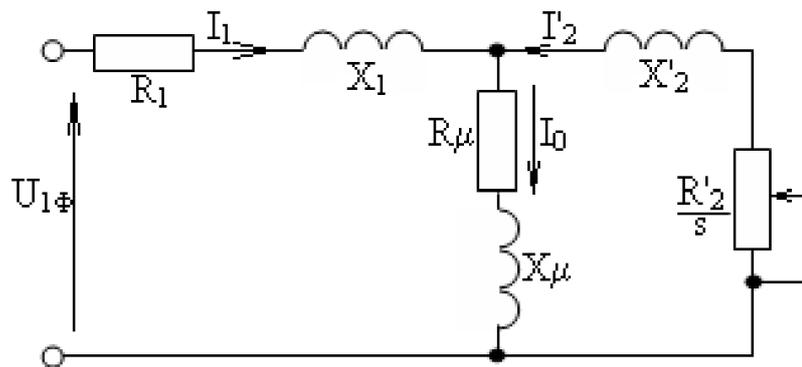


Рисунок 2.1 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

У Т-подібній схемі заміщення прийняті наступні позначення:

- R_1 – активний опір фазної обмотки ротора;
- X_1 – індуктивний опір фазної обмотки ротора;
- R'_2 – приведений активний опір фазної обмотки ротора;
- X'_2 – приведений індуктивний опір фазної обмотки ротора;
- R_μ – опір, який враховує магнітні втрати в сталі статора;
- X_μ – індуктивний опір взаємної індукції.

Існують довідники, в яких крім паспортних характеристик двигунів наводяться також і параметри схем їх заміщення. Однак, ці параметри подаються лише для певних моделей двигунів, які є найбільш типовими й розповсюдженими в промисловості. А реальні задачі вимагають установки не лише типових моделей, що має місце в нашому випадку. Тому параметри схеми

заміщення необхідно розрахувати. В науковій літературі пропонується багато підходів до розрахунку параметрів схем заміщення асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором [30-32]. Далі у цій роботі використовується один з найпростіших алгоритмів розрахунку.

Основні рівняння асинхронного двигуна, які відповідають вказаній схемі заміщення (рисунок 2.1), виглядають наступним чином:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{1\phi} - \bar{E}_1 - j \cdot X_1 \cdot \bar{I}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 &= 0; \\ \bar{E}_1 + j \cdot X'_2 \cdot \bar{I}'_2 + R'_2 \cdot \frac{\bar{I}'_2}{s} &= 0; \\ \bar{I}_1 + \bar{I}'_2 - I_0 &= 0.\end{aligned}\tag{2.4}$$

Векторна діаграма струмів, ЕРС та напруг, які задовольняють рівнянням (2.4), зображена на рисунку 2.2.

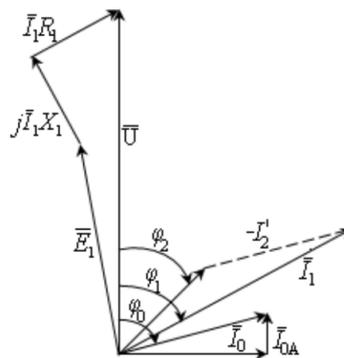


Рисунок 2.2 – Векторна діаграма асинхронної машини

Визначимо параметри Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна по каталожним даним, наведеним наприкінці підрозділу 2.2. При цьому враховується такі основні припущення [33]:

- магнітні й механічні втрати в двигуні складають $0,2P_n$;
- активні опори обмоток статора й ротора не залежать від режиму роботи двигуна, тобто ефекти витіснення не враховуються.

Номінальна частота обертання двигуна дорівнює

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - S_n) \cdot n_0.\tag{2.5}$$

Підставивши чисельні дані, одержимо

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - 0,07) \cdot 750 = 700 \text{ об/хв.}$$

Номінальна кутова частота обертання вала двигуна:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - S_{\text{н}}) \cdot \omega_0. \quad (2.6)$$

Тоді

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - 0,07) \cdot 78,5 = 73 \text{ рад/с.}$$

Номінальна фазна напруга й номінальний та лінійний струм статора (діючі значення) при схемі з'єднання обмоток «зіркою»:

$$U_{1\phi\text{н}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}}; \quad (2.7)$$

$$I_{1\phi\text{н}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{3U_{\phi\text{н}} \cos(\varphi_{\text{н}}) \eta_{\text{н}}}. \quad (2.8)$$

Підставивши відомі чисельні значення, одержимо:

$$U_{1\phi\text{н}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В};$$

$$I_{1\phi\text{н}} = I_{1\text{лн}} = \frac{750}{3 \cdot 220 \cdot 0,71 \cdot 0,7} = 2,3 \text{ А.}$$

Максимально споживаний струм двигуна при прямому пуску:

$$I_{1\text{max}} = k_{\text{ідв}} \cdot I_{1\text{лн}}, \quad (2.9)$$

де $k_{\text{ідв}} = I_{\text{н}}/I_{\text{н}}$.

Тоді

$$I_{1\text{max}} = 4 \cdot 2,3 = 9,2 \text{ А.}$$

Критичний момент двигуна на природній характеристиці:

$$M_K = k_{\max} \cdot M_{\text{дв.ном}}, \quad (2.10)$$

де $k_{\max} = M_{\max}/M_H$.

Тоді

$$M_K = 2 \cdot 10,2 = 20,4 \text{ Нм}.$$

Пусковий момент двигуна при прямому пуску складає:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_n \cdot M_{\text{дв.ном}}, \quad (2.11)$$

де $m_n = M_{II}/M_H$.

Підставивши чисельні дані, одержимо

$$M_{\text{дв.пуск}} = 1,5 \cdot 10,2 = 15,3 \text{ Нм}.$$

Струм холостого ходу асинхронного двигуна дорівнює

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - S_H) / (1 - p_* \cdot S_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - S_H) / (1 - p_* \cdot S_H))^2}}, \quad (2.12)$$

де I_{11} – струм статора двигуна при частковому навантаженні, A , p_* – коефіцієнт навантаження двигуна. Приймаємо $p_* = 0,75$.

Струм статора двигуна при частковому навантаженні визначаємо із співвідношення

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos(\varphi_{p_*}) \cdot \eta_{p_*}}, \quad (2.13)$$

де η_{p_*} – ККД при частковому навантаженні, $\cos(\varphi_{p_*})$ – коефіцієнт потужності при частковому навантаженні.

ККД при частковому навантаженні

$$\eta_{p_*} = \eta_H = 0,7. \quad (2.14)$$

Коефіцієнт потужності при частковому навантаженні

$$\cos(\varphi_{p*}) = 0,98 \cdot \cos(\varphi_H). \quad (2.15)$$

Тоді

$$\cos(\varphi_{p*}) = 0,98 \cdot 0,71 = 0,696.$$

Підставимо значення, розраховані по формулам (2.14) і (2.15) у (2.13):

$$I_{11} = \frac{0,75 \cdot 750}{3 \cdot 220 \cdot 0,696 \cdot 0,7} = 1,76 \text{ А}.$$

Тоді струм холостого ходу двигуна

$$I_0 = \sqrt{\frac{1,76^2 - (0,75 \cdot 2,3 \cdot (1 - 0,07) / (1 - 0,75 \cdot 0,07))^2}{1 - (0,75 \cdot (1 - 0,07) / (1 - 0,75 \cdot 0,07))^2}} = 0,71 \text{ А}.$$

Із формули Клоса визначимо співвідношення для розрахунку критичного ковзання. Приймаємо коефіцієнт, який характеризує співвідношення активних опорів статора й ротора $\beta = I$. Тоді критичне ковзання дорівнює

$$S_K = S_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}}{1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}. \quad (2.16)$$

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$S_K = 0,07 \cdot \frac{2 + \sqrt{1 - 2 \cdot 0,07 \cdot 1 \cdot (2 - 1)}}{1 - 2 \cdot 0,07 \cdot 1 \cdot (2 - 1)} = 0,307.$$

Визначимо проміжні коефіцієнти C_1 і A_1 :

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}; \quad (2.17)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H}, \quad (2.18)$$

де m – кількість фаз, $k_i = I_{1H}/I_H$.

Тоді проміжні коефіцієнти дорівнюють:

$$C_1 = 1 + \frac{0,71}{2 \cdot 4 \cdot 2,3} = 1,039;$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,07)}{2 \cdot 1,039 \cdot 2 \cdot 750} = 43,1.$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{S_K}\right) \cdot C_1}. \quad (2.19)$$

Тоді

$$R_2' = \frac{43,1}{\left(1 + \frac{1}{0,307}\right) \cdot 1,039} = 9,74 \text{ Ом.}$$

Активний опір статорної обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta. \quad (2.20)$$

Звідси

$$R_1 = 1,039 \cdot 9,74 \cdot 1 = 10,11 \text{ Ом.}$$

Визначимо параметр γ , який дозволить знайти індуктивний опір короткого замикання:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{S_K^2} - \beta^2}. \quad (2.21)$$

Підставивши, одержимо:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{0,307^2} - 1^2} = 3,1.$$

Тоді опір короткого замикання

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2. \quad (2.22)$$

Після підстановки чисельних даних маємо:

$$X_{\text{кн}} = 3,1 \cdot 1,039 \cdot 9,74 = 31,38 \text{ Ом}.$$

Для того, щоб визначити з індуктивного опору короткого замикання опір розсіювання фаз статора й ротора, скористаємося співвідношеннями, які справедливі для серійних двигунів.

Індуктивний опір розсіювання роторної обмотки, приведеної до статорної:

$$X'_{2\text{н}} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1}. \quad (2.23)$$

Звідси

$$X'_{2\text{н}} = \frac{0,58 \cdot 31,38}{1,039} = 17,52 \text{ Ом}.$$

Індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$X_{1\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}}. \quad (2.24)$$

Тоді маємо

$$X_{1\text{н}} = 0,42 \cdot 31,38 = 13,18 \text{ Ом}.$$

ЕРС гілки намагнічування, наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора в номінальному режимі:

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos(\varphi_{\text{н}}) - R_1 \cdot I_{1\text{н}})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\varphi_{\text{н}})} - X_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{н}})^2}. \quad (2.25)$$

Звідси

$$E_m = \sqrt{(220 \cdot 0,71 - 10,11 \cdot 2,3)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,71^2} - 13,18 \cdot 2,3)^2} = 181,7 \text{ В.}$$

Тоді індуктивний опір намагнічування визначиться як

$$X_{\mu\text{H}} = \frac{E_m}{I_0}. \quad (2.26)$$

Після підстановки чисельних даних одержимо

$$X_{\mu\text{H}} = \frac{181,7}{0,71} = 256,35 \text{ Ом.}$$

По знайденим значенням C_1 , R_2' та X_{KH} визначимо критичне ковзання:

$$S_{\text{K1}} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{KH}}^2}}. \quad (2.27)$$

Звідси

$$S_{\text{K1}} = \frac{1,039 \cdot 9,74}{\sqrt{10,11^2 + 31,38^2}} = 0,307.$$

Індуктивність розсіювання статорної обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\text{H}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{H}}}. \quad (2.28)$$

де $f_{1\text{H}}$ – номінальна частота живлячої мережі.

Тоді

$$L_{1\sigma} = \frac{13,18}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 42 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Індуктивність розсіювання роторної обмотки, приведеної до статорної:

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\text{H}}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{H}}}. \quad (2.29)$$

Тоді

$$L'_{2\sigma} = \frac{17,52}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 56 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Індуктивність гілки намагнічування:

$$L_{\mu\text{H}} = \frac{X_{\mu\text{H}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{H}}} \quad (2.30)$$

Звідси

$$L_{\mu\text{H}} = \frac{256,35}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,816 \text{ Гн.}$$

Значення номінального потокозчеплення двигуна:

$$\Psi_{2\text{H}} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_{\mu\text{H}} \quad (2.31)$$

Тоді

$$\Psi_{2\text{H}} = \sqrt{2} \cdot 0,71 \cdot 0,816 = 0,818 \text{ Вб.}$$

Номінальний електромагнітний момент двигуна дорівнює:

$$M_{\text{ем.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot S_{\text{H}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{S_{\text{H}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{S_{\text{H}} \cdot X_{\mu\text{H}}} \right)^2 \right]} \quad (2.32)$$

Тоді

$$M_{\text{ем.н}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 9,74}{78,5 \cdot 0,07 \cdot \left[31,38^2 + \left(10,11 + \frac{9,74}{0,07} \right)^2 + \left(\frac{10,11 \cdot 9,74}{0,07 \cdot 256,35} \right)^2 \right]} = 10,98 \text{ Нм.}$$

Момент опору від сил тертя на валу:

$$M_{\text{с}} = M_{\text{ем.н}} - M_{\text{дв.н}} \quad (2.33)$$

Звідси

$$M_c = 10,98 - 10,2 = 0,78 \text{ Нм.}$$

Параметри схеми заміщення зводимо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Параметри схеми заміщення електродвигуна

R_l , Ом	$X_{l\sigma}$, Ом	$L_{l\sigma}$, Гн	X_μ , Ом	L_μ , Ом	R_2' , Ом	$X_{2\sigma}'$, Ом	$L_{2\sigma}'$, Гн	$X_{кн}$, Ом
10,11	13,18	$42 \cdot 10^{-3}$	256,35	0,816	9,74	17,53	$56 \cdot 10^{-3}$	31,38

2.4 Побудова електромеханічної та механічної характеристик двигуна

Для побудови природної механічної характеристики двигуна $M(s)$ використаємо методику, запропоновану в [34]. Спочатку визначаємо чотири опорні точки механічної характеристики двигуна:

- 1) при ковзанні $S = 0$ двигун буде розвивати момент $M = 0$, тому маємо першу точку механічної характеристики $(0; 0)$;
- 2) при номінальному ковзанні $S = S_n$ двигун розвиватиме момент $M = M_n$, тобто друга точка матиме координати $(S_n; M_n)$;
- 3) при критичному ковзанні $S = S_{кр}$ двигун розвиватиме момент $M = M_{кр}$, тобто друга точка матиме координати $(S_{кр}; M_{кр})$;
- 4) при ковзанні $S = 1$, що відповідає частоті обертання ротора $n = 0$, двигун буде розвивати момент $M = M_n$, тобто четверта точка матиме координати $(1; M_n)$.

Чотирьох точок для побудови повноцінної природної механічної характеристики, звісно, недостатньо. Тому необхідно одержати ще кілька проміжних точок. Для цього використовується формула, в якій задіяні параметри схеми заміщення, розраховані в попередньому підрозділі [34]:

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot S \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_{\text{лн}}} \right)^2 \right]} \quad (2.34)$$

Оскільки будь-яка розрахункова методика одержання параметрів схеми заміщення дає певну похибку, зручно розрахунок усіх необхідних точок механічної характеристики провести за формулою (2.34).

Результати розрахунку з використанням формули (2.34) та формули $\omega = \omega_0(1-S)$ наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Точки для побудови природної механічної характеристики двигуна

ω , рад/с	78,5	73	64,37	58,09	54,4	31,4	23,55	11,77	0
M , Нм	0	10,98	19,45	21,19	21,31	17,78	16,38	14,53	12,99

По цим точкам будується природна механічна характеристика електродвигуна $\omega(M)$. Для побудови використовувалася програма *MathCAD*, а сама механічна характеристика привідного двигуна наведена на рисунку 2.3.

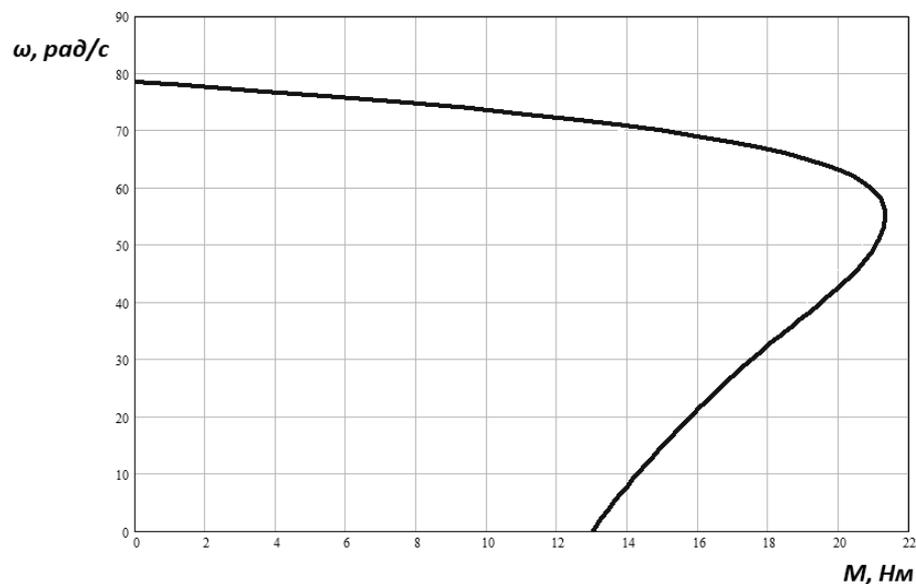


Рисунок 2.3 – Природна механічна характеристика двигуна $\omega(M)$

Команди для побудови графічної залежності мають такий вигляд:

```
omega := reverse(stack(78.5, 73, 64.37, 58.09, 54.4, 31.4, 23.55, 11.77, 0))
```

```
M := reverse(stack(0, 10.98, 19.45, 21.19, 21.31, 17.78, 16.38, 14.53, 12.99))
```

```
s := pspline(omega, M)
```

```
y(x) := interp(s, omega, M, x)
```

```
x := 0..80
```

Загальна методика побудови штучних механічних характеристик є такою ж. Штучні механічні характеристики також будуюмо за допомогою формули (2.34), але при цьому змінюємо величину живлячої напруги, приймаючи її значення на рівні 75% і 50% від номінального значення. Штучні механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зображені на рисунку 2.4.

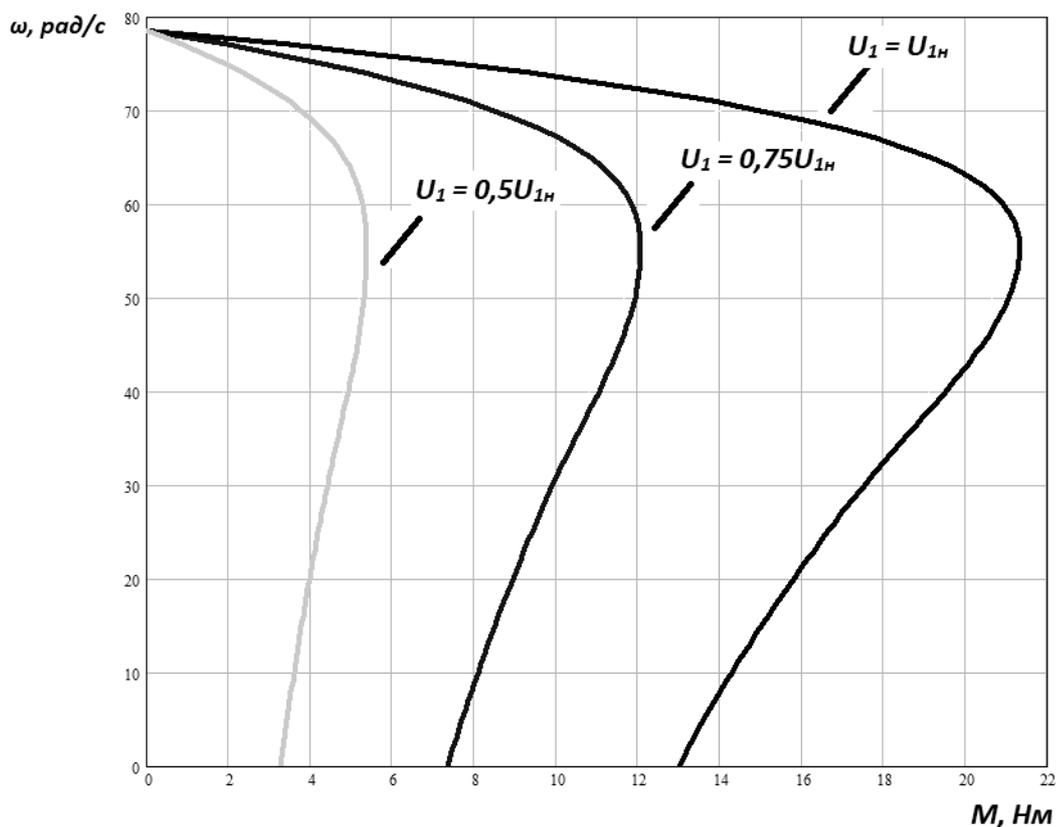


Рисунок 2.4 – Штучні механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Електромеханічна характеристика асинхронної машини – це графічна залежність струму фази обмотки ротора від ковзання або частоти обертання двигуна. Для розрахунку й побудови цієї характеристики також існують різні підходи. У цій роботі ми використаємо методику, яка викладена в роботі [33].

Її суть полягає в наступному. Розрахунок характеристики $I_2 = f(s)$ виконується за наступною формулою:

$$I_2(s) = \sqrt{\frac{M(s)\omega_0 s}{3R_2}}, \quad (2.35)$$

У рівняння (2.35) підставляються значення S і M , одержані з розрахунку механічної характеристики, й визначається I_2 . Активний опір фази ротора R_2 , який також входить у цей вираз, визначається як

$$R_2 = \frac{M_H \omega_0 S_H}{3I_{2H}^2}. \quad (2.36)$$

Підставимо відомі паспортні значення параметрів двигуна в рівняння (2.36)

$$R_2 = \frac{10,2 \cdot 78,5 \cdot 0,07}{3 \cdot 2,3^2} = 3,53 \text{ Ом}. \quad (2.37)$$

Тепер за допомогою співвідношення (2.35) розраховуємо точки для побудови електромеханічної характеристики двигуна й зводимо їх до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Точки для побудови електромеханічної характеристики двигуна

ω , рад/с	78,5	73	64,37	58,09	54,4	31,4	23,55	11,77	0
I_2 , А	0	2,38	5,09	6,39	6,96	8,89	9,21	9,56	9,81

По точкам з таблиці 2.4 та з використанням пакету *MathCAD* будемо електромеханічну характеристику двигуна, зовнішній вигляд якої наведено на рисунку 2.5.

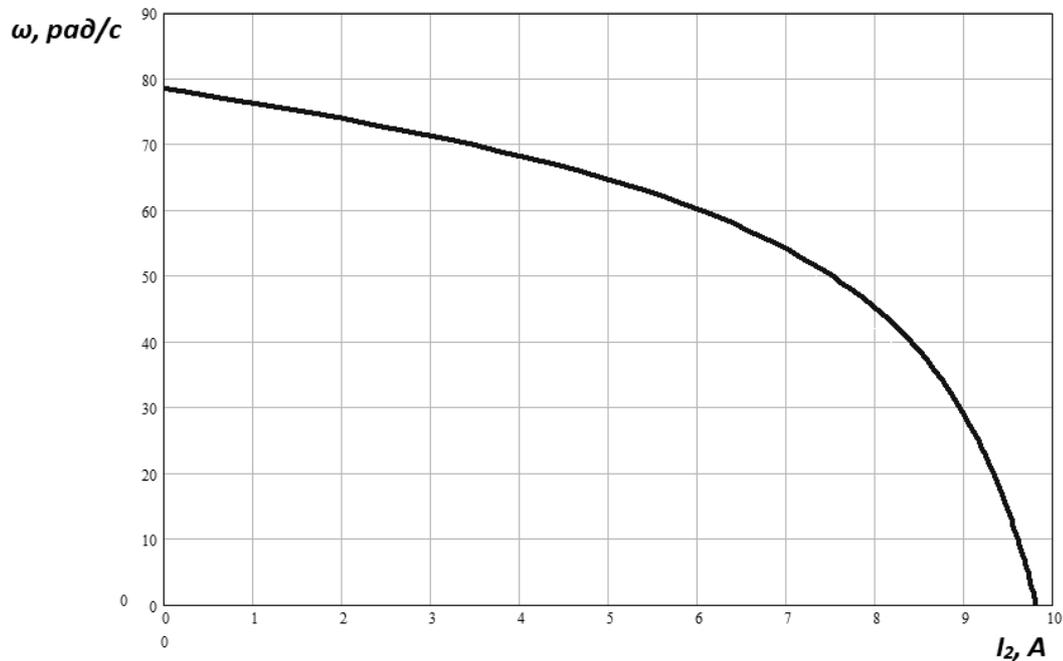


Рисунок 2.5 – Електромеханічна характеристика двигуна

2.5 Математична модель привідного двигуна

Проектування модальних регуляторів вимагає лінійної моделі об'єкта керування. Тому розглянемо лінеаризовану модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Запишемо основне рівняння руху електроприводу [35]:

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta M - \Delta M_c} = \frac{1}{\beta T_M} \quad (2.38)$$

або

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{\beta T_M} \cdot (\Delta M - \Delta M_c), \quad (2.39)$$

де β – модуль жорсткості механічної характеристики;

$\Delta\omega$ – приріст швидкості, рад/с;

ΔM – приріст моменту, Нм;

ΔM_C – приріст статичного моменту навантаження, Нм;

T_M – електромеханічна постійна часу двигуна.

Ще одне рівняння, яке описує асинхронний двигун, має вигляд:

$$T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega), \quad (2.40)$$

де T_e – електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора АД, с;

$\Delta\omega_0$ – приріст кутової швидкості електромагнітного поля АД, рад/с.

Розрахунок констант проведемо за допомогою формул, наведених у [36].

Жорсткість механічної характеристик двигуна дорівнює

$$\beta = \frac{M_{ном}}{\omega_{ном} \cdot S_{ном}}, \quad (2.41)$$

де $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість двигуна, рад/с;

$S_{ном}$ – номінальне ковзання;

$M_{ном}$ – номінальний момент, Нм.

Тоді

$$\beta = \frac{10,2}{73 \cdot 0,07} = 1,996.$$

Електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора

$$T_e = \frac{1}{\omega_{0ел.ном} S_K}, \quad (2.42)$$

де S_K – критичне ковзання;

$\omega_{0ел.ном}$ – кутова швидкість електромагнітного поля АД при номінальній частоті живлення 50 Гц, рад/с.

Тоді

$$T_e = \frac{1}{78,5 \cdot 0,297} = 0,043 \text{ с.}$$

Електромеханічна постійна часу

$$T_M = \frac{J_{\text{дв}}}{\beta}. \quad (2.43)$$

Підставивши чисельні дані, одержимо:

$$T_M = \frac{0,0063}{1,996} = 0,0031 \text{ с.}$$

Рівнянням (2.40) і (2.41) відповідає структурна схема, яка наведена на рисунку 2.6.

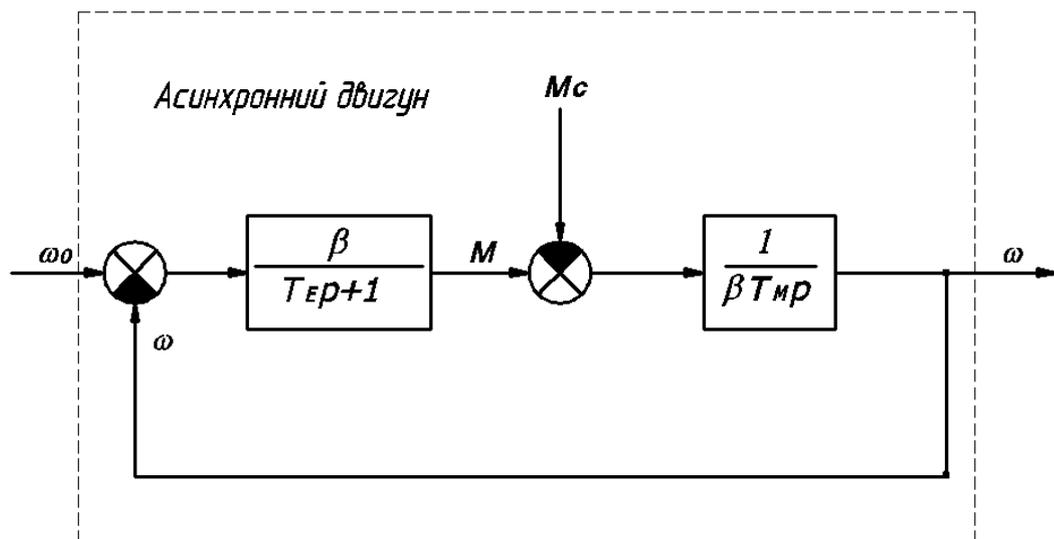


Рисунок 2.6 – Структурна схема асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором

Для перевірки адекватності моделі ця структурна схема була зібрана в середовищі *Simulink MATLAB*. Було проведено моделювання шляхом подачі на вхід задаючого впливу $\omega_0 = 78,5$ рад/с. Також у момент часу $t = 2$ с на вал двигуна подавалось номінальне навантаження рівне $M_{\text{ном}} = 10,2$ Нм. Результати моделювання представлені на рисунку 2.7.

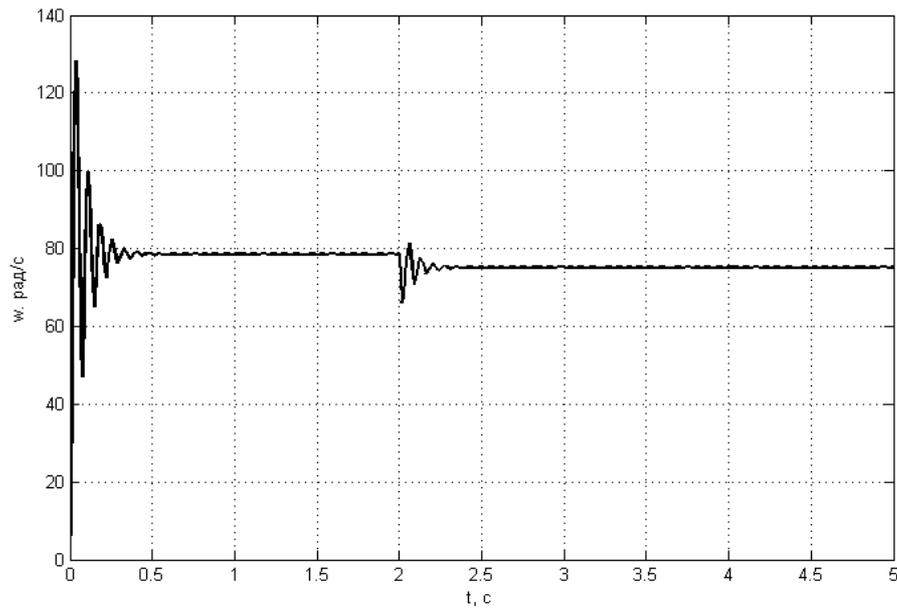


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості обертання валу двигуна від часу

З графіка видно, що після подачі номінального навантаження швидкість обертання двигуна падає з значення 78,5 рад/с до значення 75 рад/с, тобто абсолютна похибка моделі становить 2 рад/с, що відповідає відносній похибці 2,7%. Оскільки відносна похибка є меншою за 5%, будемо вважати, що запропонована модель добре описує досліджуваний двигун.

2.6 Вибір і математична модель частотного перетворювача

Спосіб регулювання швидкості обертання двигуна вибираємо частотний, так як він забезпечує плавне регулювання швидкості в необхідному діапазоні, а отримані характеристики володіють високою жорсткістю. Визначення напруги і частоти необхідні для роботи двигуна в заданій точці, зводяться до уточнення можливості забезпечення перетворювачем рівня напруги і частоти при різних навантаженнях і коливаннях напруги живильної мережі.

Зазвичай перетворювач має внутрішні зворотні зв'язки, і при зміні навантаження двигуна вихідна напруга і частота практично не змінюються. Тому надалі напругу і частоту на статорі електродвигуна будемо вважати незалежними від навантаження. Синхронна швидкість двигуна залежить від

частоти живильної мережі й кількості пар полюсів.

Для стійкої роботи двигуна необхідно зміною частоти підтримувати переважувальну здатність двигуна, що забезпечується регулюванням напруги на статорі за різними законами. Ці особливості необхідно враховувати при розрахунку частоти й амплітуди напруги. Найбільш поширений закон зміни амплітуди напруги пропорційно частоті у вигляді $U/f=const$, при такому законі максимальний момент постійний і не залежить від частоти.

Із паспортних даних перетворювачів частоти випиває що

$$I_{\max. np} = 1,5 \cdot I_n. \quad (2.44)$$

Номінальний струм перетворювача частоти I_{nc} , А, має бути не меншим за

$$I_{nc} = \frac{I_{\max. дв}}{1,5}, \quad (2.45)$$

де $I_{\max. дв}$ – максимальний струм асинхронного двигуна, А.

Тоді

$$I_{nc} = \frac{2,3}{1,5} = 1,53 \text{ А}.$$

Перетворювач частоти вибирається по значенню струму, розрахованому по формулі (2.45), а також по потужності P_{nc} , Вт, яка має на 20% перевищувати потужність двигуна:

$$P_{nc} = 1,2 \cdot P_n. \quad (2.46)$$

Тоді

$$P_{nc} = 1,2 \cdot 750 = 900 \text{ Вт}.$$

З [37] обираємо трьохфазний перетворювач частоти серії *CMF310*. Його основні характеристики наведені в таблиці 2.5.

Перевірочний розрахунок здійснюємо з умови, що перетворювач частоти має забезпечувати переважувальний пусковий момент $M_{136\%}$, Нм, рівний

$1,36 \cdot M_{ном}$:

$$M_{136\%} = 1,36 \cdot M_{ном} \cdot \left(\frac{I_{пч}}{I_n} \right). \quad (2.47)$$

Таблиця 2.5 – Характеристики частотного перетворювача *CMF310*

Модель	Потужність, кВт	Струм, А	Вихідна частота, Гц	Режим керування
CMF310	1,1	3,3	800	Скалярний

Тоді

$$M_{136\%} = 1,36 \cdot 10,2 \cdot \left(\frac{3,3}{2,3} \right) = 19,9 \text{ Нм}.$$

$M_{136\%} > M_n$ ($19,9 \text{ Нм} > 10,2 \text{ Нм}$), тому остаточно обираємо частотний перетворювач серії *CMF310*.

Рівняння, що описує перетворювач частоти, запишемо наступним чином:

$$T_{пч} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{пч} \Delta I_{пч}, \quad (2.48)$$

де $T_{пч}$ – стала часу перетворювача частоти, с;

$k_{пч}$ – передавальний коефіцієнт перетворювача частоти;

$\Delta I_{пч}$ – приріст струму на вході перетворювача, А.

Визначимо коефіцієнт передачі й сталу часу частотного перетворювача. Передавальний коефіцієнт перетворювача частоти дорівнює

$$k_{пч} = \frac{f_n}{I_{кер}}, \quad (2.49)$$

де f_n – частота живлячої мережі, Гц;

$I_{кер}$ – струм керування перетворювачем частоти, мА.

Для номінального режиму приймаємо $f_n = 50$ Гц, а, згідно паспортних

даних, $I_{кер} = 20$ мА.

Підставимо чисельні дані

$$K_{пч} = \frac{50}{20} = 2,5 \frac{\text{Гц}}{\text{мА}}.$$

Відповідно до запропонованої в попередньому розділі моделі двигуна, на її вході маємо частоту обертання ω , тобто необхідно, щоб на виході моделі частотного перетворювача була не частота живлячої мережі, а також ω . Для цього через коефіцієнт передачі частотного перетворювача необхідно врахувати перехід від частоти до швидкості обертання двигуна. Застосуємо відому формулу:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (2.50)$$

де p – кількість пар полюсів двигуна;

f – частота живлячої мережі, Гц.

Врахувавши, що частота обертання n пов'язана з кутовою частотою співвідношенням

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (2.51)$$

остаточно одержимо

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}. \quad (2.52)$$

Тоді коефіцієнт передачі частотного перетворювача необхідно домножити на $\frac{2\pi}{p}$ або з урахуванням того, що кількість пар полюсів нашого

двигуна $p = 4$, на 1,57.

Тоді

$$K_{пч} = 2,5 \cdot 1,57 = 3,92 \frac{\text{рад}}{\text{А} \cdot \text{с}}.$$

У загальному випадку перетворювач частоти складається з двох основних частин:

- система ШІМ з фільтром (стала часу $T_{\phi} = 0,003-0,005$ с);
- силова схема.

Стала часу силовій схемі дорівнює половині періоду пульсації випрямленої напруги, тобто

$$T_c = \frac{1}{2 \cdot f_H \cdot m}, \quad (2.53)$$

де m – кількість фаз.

Тоді

$$T_c = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 3} = 0,003 \text{ с}. \quad (2.54)$$

Стала часу частотного перетворювача дорівнює сумі сталих часу системи ШІМ з фільтром і силовій схемі:

$$T_{пч} = T_{\phi} + T_c. \quad (2.55)$$

Прийmemo $T_{\phi} = 0,003$ с, тоді

$$T_{пч} = 0,003 + 0,003 = 0,006 \text{ с}.$$

2.7 Математична модель насоса

Розглянемо шестеренний насос як об'єкт керування і проведемо математичний опис його статичних і динамічних режимів. Нагадаємо, що основними параметрами шестеренного насоса є подача Q і напір H . Подачею називають об'єм рідини (у нашому випадку гліцерину), який подається насосом

за одиницю часу. Напір – це різниця вмісту енергії в одному кілограмі гліцерину на ділянці від входу в насос до виходу з нього.

При перерахунку насосів на нові частоти обертання широко застосовуються так звані формули подібності, які дозволяють одержати параметри насоса при нових режимах роботи.

Ці формули мають вигляд [38]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (2.55)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}. \quad (2.56)$$

Нехай $Q_2 = Q_H$, $H_2 = H_H$, $\omega_2 = \omega_H$; $Q_1 = Q_*$, $H_1 = H_*$, $\omega_1 = \omega_*$. Тут прийняті наступні позначення:

- Q_H , H_H , ω_H – номінальні значення параметрів шестеренного насоса;
- Q_* , H_* , ω_* – поточні значення параметрів шестеренного насоса.

Тоді рівняння (2.55) і (2.56) набувають вигляду

$$\frac{Q_*}{Q_H} = \frac{\omega_*}{\omega_H}; \quad (2.57)$$

$$\frac{H_*}{H_H} = \frac{\omega_*^2}{\omega_H^2}. \quad (2.58)$$

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

$$Q_* = \frac{Q_H}{\omega_H} \cdot \omega_* = k_1 \cdot \omega_*; \quad (2.59)$$

$$H_* = \frac{H_H}{\omega_H^2} \cdot \omega_*^2 = k_2 \cdot \omega_*^2, \quad (2.60)$$

де k_1, k_2 – постійні коефіцієнти.

У САК насосними установками керування зазвичай здійснюється по тиску (напору). Уведемо позначення:

$$k_{\text{насоса}} = \frac{H_H}{\omega_H^2}. \quad (2.61)$$

Тоді

$$H_* = k_{\text{насоса}} \cdot \omega_*^2. \quad (2.62)$$

Як бачимо, напір і швидкість пов'язані між собою квадратичною залежністю, тобто функція є нелінійною.

Оскільки при проектуванні регуляторів зручно мати справу з лінійними рівняннями, що описують об'єкт керування, в науковій літературі часто використовують лінеаризовані математичні моделі. Наприклад, у роботі [39] насос представляється в вигляді аперіодичної ланки першого порядку, яка перетворює швидкість обертання валу ω на вході в подачу насоса Q . Тоді передавальна функція насоса має вигляд:

$$W_H(p) = \frac{K_H}{T_H p + 1}, \quad (2.63)$$

де K_H – статичний передавальний коефіцієнт насоса, T_H – стала часу насоса, с.

Передавальній функції виду (2.63) відповідає лінійне диференціальне рівняння

$$T_H \frac{d\Delta Q_H}{dt} + \Delta Q_H = K_H \Delta \omega_H. \quad (2.64)$$

Коефіцієнт передачі насоса визначається в статичному режимі як відношення номінальної подачі насоса до номінальної швидкості обертання:

$$K_H = \frac{Q_H}{\omega_H}. \quad (2.65)$$

Оскільки швидкість обертання двигуна вимірюється в радіанах за секунду, для обчислення коефіцієнта спочатку переведемо продуктивність, яка вимірюється в кубічних метрах за годину в продуктивність, яка вимірюється в кубічних метрах за секунду: $Q_H = 0,105 \text{ м}^3/\text{год} = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{хв} = 2,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

Після підстановки відомих значень одержимо

$$K_H = \frac{2,9 \cdot 10^{-5}}{78,5} = 3,69 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^3}{\text{рад}}. \quad (2.66)$$

Постійна часу насоса визначається як відношення робочого об'єму насоса до подачі насоса:

$$T_H = \frac{V_{\text{роб}}}{Q_H}, \quad (2.67)$$

де $V_{\text{роб}}$ – робочий об'єм насоса, м^3 ;

Q_H – подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

Робочий об'єм насоса – це величина, що чисельно дорівнює об'єму гліцерину, який перекачує насос за один оберт валу, тобто

$$V_{\text{роб}} = \frac{Q_H}{n_H}, \quad (2.68)$$

де Q_H – загальна подача насосу, $\text{м}^3/\text{хв}$;

n_H – частота обертання валу двигуна, $\text{об}/\text{хв}$.

$$V_{\text{роб}} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{700} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Тоді з (2.67) маємо

$$T_H = \frac{2,5 \cdot 10^{-6}}{2,9 \cdot 10^{-5}} = 0,086 \text{ с}. \quad (2.69)$$

2.8 Математична модель трубопроводу та датчика тиску

Зазвичай об'єктом керування (у нашому випадку – складовою об'єкта керування) є ділянка трубопроводу між точкою вимірювання тиску й регулюючим органом, а сам об'єкт керування у цьому випадку представляють передавальною функцією, яка є результатом послідовного з'єднання аперіодичної ланки й ланки з чистим запізненням [40]. Тобто

$$W_T(p) = \frac{K_T}{T_T p + 1} \cdot e^{-\tau p}, \quad (2.70)$$

де K_T – коефіцієнт передачі трубопроводу;

T_T – стала часу трубопроводу, с;

τ – час запізнення, с.

Як видно з рисунків 1.7 і 1.8, ділянки трубопроводів, які з'єднують елементи установки, є короткими, тому сталі часу T_T й τ будуть дуже малими, тому запізненням й інерційністю трубопроводу можна знехтувати. Тоді трубопровід описується рівнянням, яке буде відповідати безінерційній ланці

$$\Delta P_{вих} = K_T \cdot \Delta Q, \quad (2.71)$$

де $\Delta P_{вих}$ – тиск перед гідродинамічним змішувачем, бар;

ΔQ – подача насоса, м³/с.

Тоді коефіцієнт передачі трубопроводу дорівнює

$$K_T = \frac{P_{вих}}{Q_H}. \quad (2.72)$$

$P_{вих}$ і Q_H – відомі значення, після підстановки яких маємо

$$K_T = \frac{4}{2,9 \cdot 10^{-5}} = 1,38 \cdot 10^5 \frac{\text{бар} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}.$$

Тепер здійснимо вибір датчика тиску. Вихідним параметром для його вибору буде максимальний напір, який може розвиватися дозуючим насосом.

Цей параметр дорівнює 41 м, що еквівалентно максимальному тиску 4 бара. Дане значення має потрапляти в діапазон вимірювання датчика тиску. Виходячи з вказаної умови, з [41] обираємо датчик тиску *Wika* з наступними параметрами:

- призначення – загальнопромислове;
- діапазон вимірювання – 0... 10 бар;
- вихідний сигнал – 4-20 мА;
- температура вимірювального середовища - -40... +100°C;
- конструкційний матеріал – нержавіюча сталь;
- основна приведена похибка – 1% від діапазону.

Передавальну функцію датчика тиску представимо в вигляді безінерційної ланки з коефіцієнтом передачі

$$K_{дт} = \frac{I_{вих}}{P_{вих}}, \quad (2.73)$$

де $I_{вих}$ – струмовий сигнал на виході датчика тиску, мА;

$P_{вих}$ – тиск перед гідродинамічним змішувачем, бар.

Після підстановки чисельних значень маємо

$$K_{дт} = \frac{20}{4} = 5 \frac{мА}{бар}.$$

Остаточно об'єкт керування описується системою рівнянь виду

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta M - \Delta M_c} = \frac{1}{\beta T_M};$$

$$T_e \frac{d\Delta M}{dt} + \Delta M = \beta(\Delta\omega_0 - \Delta\omega);$$

$$T_{пч} \frac{d\Delta\omega_0}{dt} + \Delta\omega_0 = k_{пч} \Delta I_{пч};$$

$$T_H \frac{d\Delta Q_H}{dt} + \Delta Q_H = K_H \Delta\omega_H;$$

$$\Delta P_{вих} = K_T \cdot \Delta Q.$$
(2.74)

Структурна схема об'єкта керування, складена по рівняннях (2.74), наведена на рисунку 2.8.

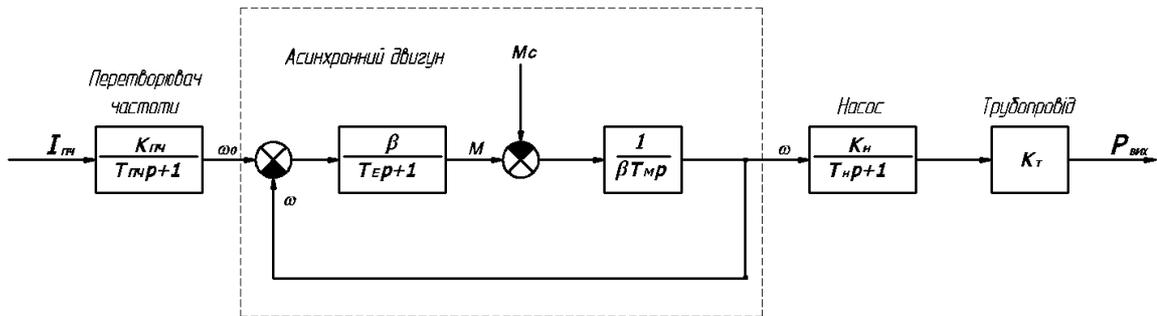


Рисунок 2.8 – Структурна схема об'єкта керування (частотний перетворювач, асинхронний двигун, насос і трубопровід)

2.9 Математична модель об'єкта керування в просторі станів

Однією з особливостей синтезу модальних регуляторів є те, що математична модель об'єкта керування має бути представлена в просторі станів, тобто від диференціальних рівнянь вигляду (2.74) необхідно перейти до вигляду

$$\dot{X}(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t);$$

$$Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t),$$
(2.75)

де $X(t)$ – n -вектор стану системи;

$U(t)$ – m -вектор зовнішніх впливів (керувань);

A – матриця динаміки системи розмірністю m на n ;

B – матриця керування (входу) розмірністю n на m ;

$Y(t)$ – r -вектор виходу системи;

C – матриця відображення динамічних змінних $X(t)$ на вихід системи розмірністю r на n ;

D – матриця компенсації системи (компенсується похибка у вихідному сигналі системи) розмірністю r на m .

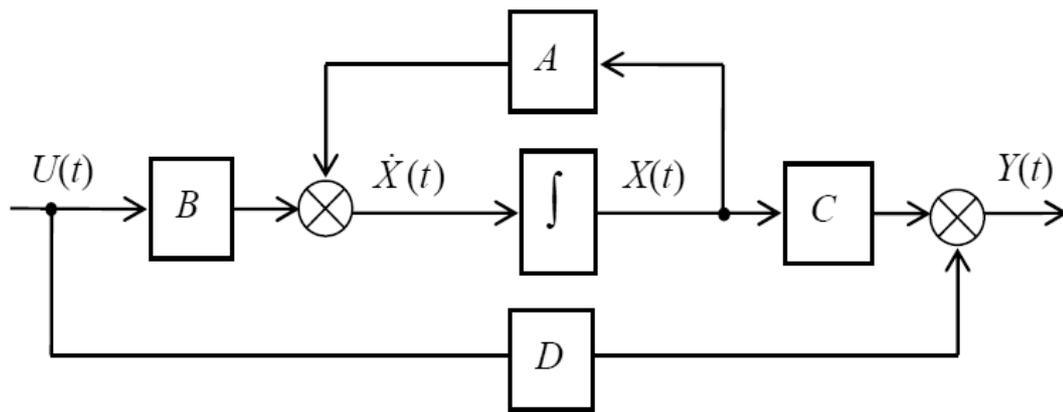


Рисунок 2.9 – Структура системи в просторі станів

Для цього спочатку необхідно одержати еквівалентну передавальну функцію (ПФ) об'єкта керування у формі «вхід-вихід». Вибір змінних стану є неоднозначним, тому що одній і тій же ПФ можуть відповідати різні моделі в просторі станів, але якщо використовувати канонічну форму керованості, то перехід від ПФ до рівнянь стану буде однозначним. Еквівалентна передавальна функція структурної схеми об'єкта керування, зображеної на рисунку 2.8, у загальному вигляді дорівнює:

$$W(p) = d + \frac{a_3 p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}{p^4 + b_3 \cdot p^3 + b_2 \cdot p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (2.76)$$

Здійснивши еквівалентні перетворення ланок, зображених на рисунку 2.8 (використані формули для послідовно з'єднаних ланок і одне перетворення для зворотного зв'язку), можемо знайти коефіцієнти передавальної функції (2.76). Ці коефіцієнти дорівнюють

$$d = a_3 = a_2 = a_1 = 0;$$

$$a_0 = \frac{K_{\text{ПЧ}} K_T K_H}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_0 = \frac{1}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_1 = \frac{T_H + T_{\text{ПЧ}} + T_M}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_2 = \frac{T_H(T_{\text{ПЧ}} + T_M) + T_M(T_E + T_{\text{ПЧ}})}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_3 = \frac{T_M T_H(T_{\text{ПЧ}} + T_E) + T_E T_M T_{\text{ПЧ}}}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H}.$$

Для передавальної функції виду (2.76) відповідні матриці дорівнюють [42]:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$
(2.77)

$$C = (a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3);$$

$$D = d.$$

Підставляючи чисельні дані, одержимо наступні значення коефіцієнтів моделі об'єкта керування в змінних стану:

$$a_0 = \frac{3,92 \cdot 1,38 \cdot 10^5 \cdot 3,69 \cdot 10^{-7}}{0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006 \cdot 0,086} = 2,9 \cdot 10^6;$$

$$b_0 = \frac{1}{0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006 \cdot 0,086} = 1,45 \cdot 10^7;$$

$$b_1 = \frac{0,086 + 0,006 + 0,0031}{0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006 \cdot 0,086} = 1,38 \cdot 10^6;$$

$$b_2 = \frac{0,086 \cdot (0,006 + 0,0031) + 0,0031 \cdot (0,043 + 0,006)}{0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006 \cdot 0,086} = 1,35 \cdot 10^4;$$

$$b_3 = \frac{0,086 \cdot 0,0031 \cdot (0,043 + 0,006) + 0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006}{0,043 \cdot 0,0031 \cdot 0,006 \cdot 0,086} = 201,55.$$

Оскільки об'єкти з одним входом й одним виходом є завжди спостережуваними й керованими, то перевірку на спостережуваність і керованість не проводимо [43].

2.10 Висновки за розділом 2

За результатами виконання другого розділу магістерської роботи можемо зробити такі висновки:

1. Відповідно до завдання на магістерську роботу здійснено вибір насоса для дозування гліцерину в потоковому виробництві антисептиків. Обрано насос *Liverani Gear 3*, який використовується для перекачування в'язких речовин.
2. По даним насоса здійснено вибір привідного двигуна. Обрано двигун типу *4BP90LA8* з вибухозахищеним виконанням.
3. Розраховані основні непаспортні параметри двигуна, а також параметри *T*-подібної схеми заміщення. З використанням розрахованих параметрів побудовані природна та штучні механічні характеристики, а також

електромеханічна характеристика двигуна.

4. З використанням паспортних даних двигуна здійснений вибір частотного перетворювача й проведений перевірочний розрахунок. Обрано частотний перетворювач серії *CMF310* зі скалярним керуванням.
5. Запропоновані лінійні рівняння складових математичної моделі об'єкта керування, яка включає частотний перетворювач, двигун, насос та трубопровід. Здійснений вибір датчика тиску для реалізації зворотного зв'язку та запропонована його математична модель. Розраховані невідомі коефіцієнти (параметри) математичних моделей.
6. По запропонованим рівнянням математичної моделі складена загальна схема об'єкта керування. Об'єкт керування приведений до єдиної передавальної функції у формі «вхід-вихід», яка описується характеристичним рівнянням четвертого порядку.
7. Для зручності подальшої розробки САК здійснено перехід від математичної моделі об'єкта керування в вигляді передавальної функції до математичної моделі в просторі станів. Розраховані невідомі коефіцієнти матриць простору станів.
8. Основні результати, які були одержані в другому розділі магістерської роботи, опубліковані в роботі [44].

РОЗДІЛ 3

АДАПТИВНО-МОДАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОДАЧІ ГЛІЦЕРИНУ В ПОТОКОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ АНТИСЕПТИКІВ

У даному розділі ми дослідимо прямий пуск привідного асинхронного двигуна та його роботу на номінальному навантаженні, синтезуємо класичну САК подачею гліцерину в потоковому виробництві антисептиків, синтезуємо САК з модальним регулятором, а також запропонуємо адаптивну САК з еталонною моделлю, яка дозволить забезпечити точність дозування незалежно від температури (в'язкості) перекачуваної рідини.

3.1 Дослідження прямого пуску та роботи привідного асинхронного двигуна на номінальному навантаженні

Якщо говорити про моделювання роботи асинхронного двигуна, то потрібно відзначити, що існуюче програмне забезпечення, наприклад, пакет *MATLAB*, надає для цього певні стандартні інструменти. Проте вони придатні переважно для дослідження пуску та роботи двигуна на номінальному навантаженні. Для дослідження САК такі стандартні моделі не підходять, оскільки не дають можливості змоделювати спільну роботу двигуна, наприклад, з ПІД- або модальним регулятором й виконати підбір їх параметрів. Тим не менше, дослідження пуску й робота на номінальному навантаженні також є невід'ємною складовою розробки САК, тому можемо залучити стандартні інструменти й методики [45-47].

Скористаємося стандартною бібліотекою *MATLAB* під назвою *SimPowerSystems*. Там є два блоки, які дозволяють змоделювати роботу асинхронної машини з короткозамкненим ротором: один блок розрахований на роботу з відносними параметрами, а інший – з абсолютними. Відзначимо, що для моделювання необхідно знати не тільки паспортні дані двигуна, а й основні параметри схеми заміщення, які були розраховані в другому розділі. Оскільки розрахунки проводилися в абсолютних одиницях, то для моделювання

вибираємо блок *Asynchronous Machine SI Units*, який використовується при роботі з абсолютними параметрами двигуна. Загальна моделююча схема в середовищі *Simulink MATLAB* наведена на рисунку 3.1.

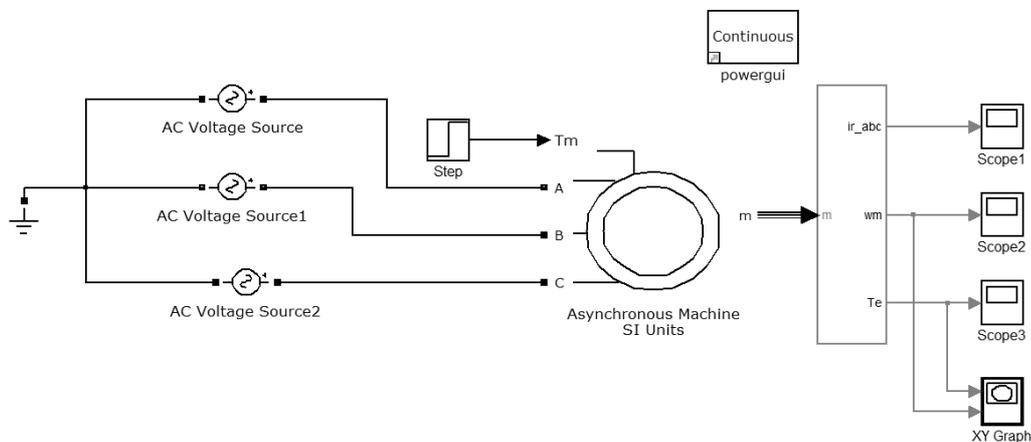


Рисунок 3.1 – Модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в середовищі *Simulink MATLAB*

Крім уже згаданого блоку *Asynchronous Machine SI Units* у схемі використовуються також інші допоміжні блоки. Пояснимо їх призначення:

- *AC Voltage Source* – джерело змінної напруги. Оскільки маємо трьохфазу систему, то таких блоків використано три. У якості параметрів блоку вказується значення частоти живлячої мережі (50 Гц) і лінійної напруги (380 В), а також значення фази кожного з векторів напруги, які будуть зсунуті одне відносно одного на 120° . На рисунку 3.2 наведене вікно для введення параметрів фази *A*. Параметри джерел змінної напруги для фаз *B* і *C* будуть схожими, лише з тією різницею, що зсув для фази *B* становитиме -120° , а для фази *C* - -240° ;
- *Step* – блок, який дозволяє змоделювати ступінчасту вхідну дію. У нашому випадку це накид номінального моменту 10,2 Нм у момент часу 2 с;
- *powergui* – блок, за допомогою якого ініціалізуються інші блоки моделі;

- *Scope, XY Graph* – блоки для візуалізації даних (одержання графічних залежностей).

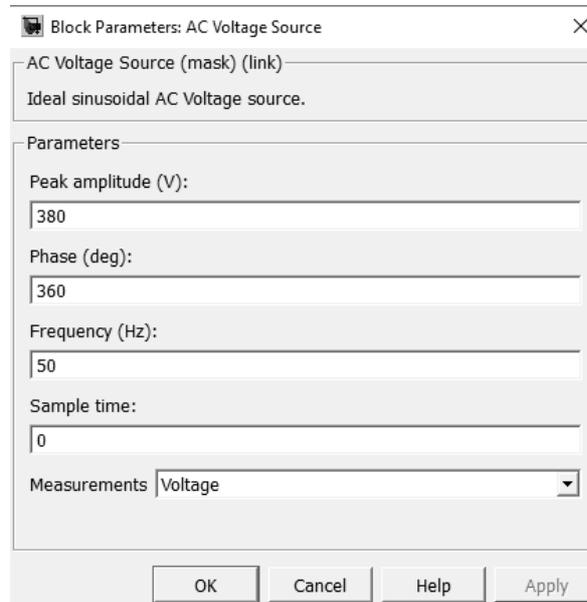


Рисунок 3.2 – Вікно для введення параметрів фази *A*

Розглянемо детальніше вікно введення параметрів блока *Asynchronous Machine SI Units* (рисунок 3.3).

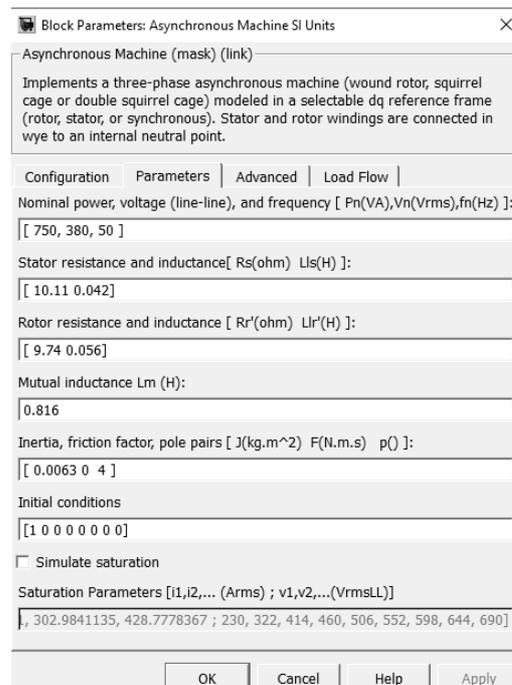


Рисунок 3.3 – Вікно для введення параметрів блока *Asynchronous Machine SI Units*

У блоці введені наступні дані (у порядку черги):

- перший рядок – потужність двигуна в ватах, лінійна напруга двигуна в вольтах, напруга живлення мережі в герцах;
- другий рядок – активний опір статорної обмотки в омах та індуктивність розсіювання статорної обмотки в генрі (розраховані в другому розділі);
- третій рядок – активний опір ротора, приведений до обмотки статора, в омах та індуктивність роторної обмотки, приведена до статорної, в генрі (розраховані в другому розділі);
- четвертий рядок – індуктивність гілки намагнічування в генрі (розрахована в другому розділі);
- п'ятий рядок – момент інерції двигуна в кілограмах на метр квадратний, коефіцієнт тертя в ньютонах на метр і на секунду (приймаємо рівним нулю) та кількість пар полюсів двигуна;
- шостий рядок – залишаємо існуючі параметри без змін.

Запустивши моделювання, одержимо графіки перехідних процесів, які наведені на рисунках 3.4-3.6.

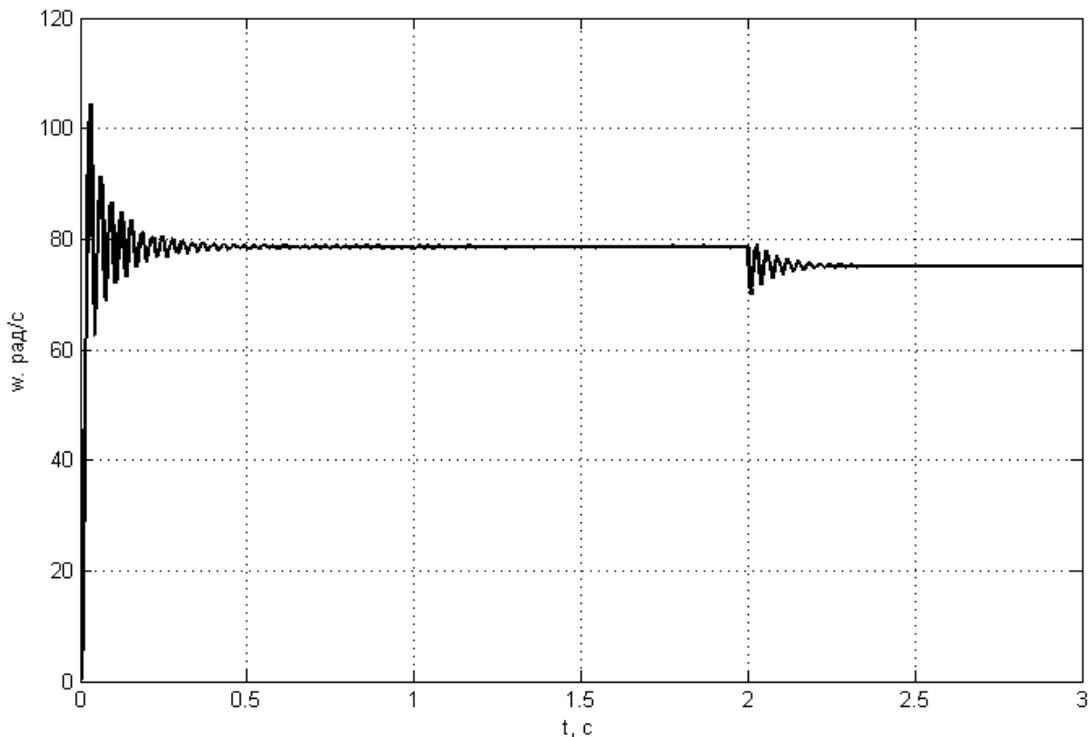


Рисунок 3.4 – Перехідний процес по швидкості

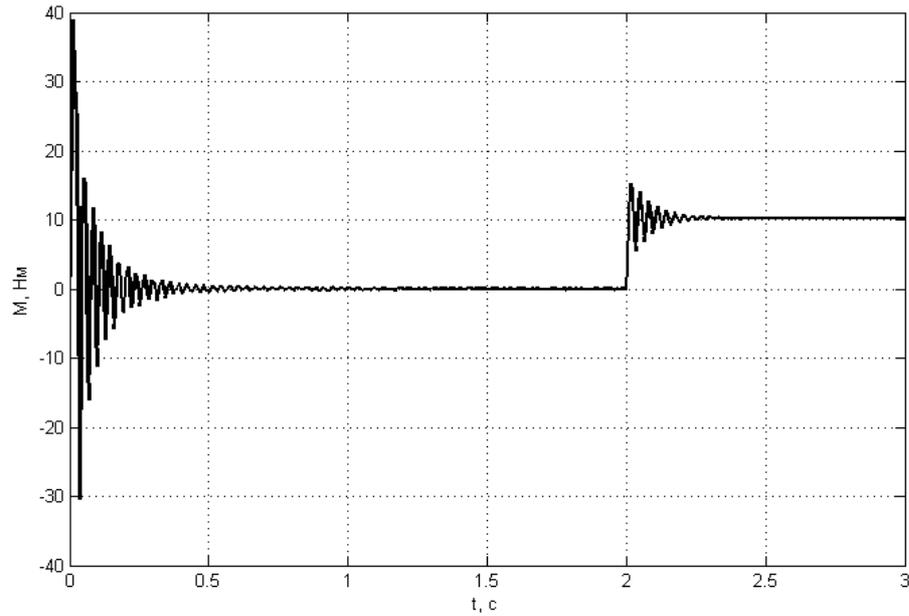


Рисунок 3.5 – Перехідний процес по моменту

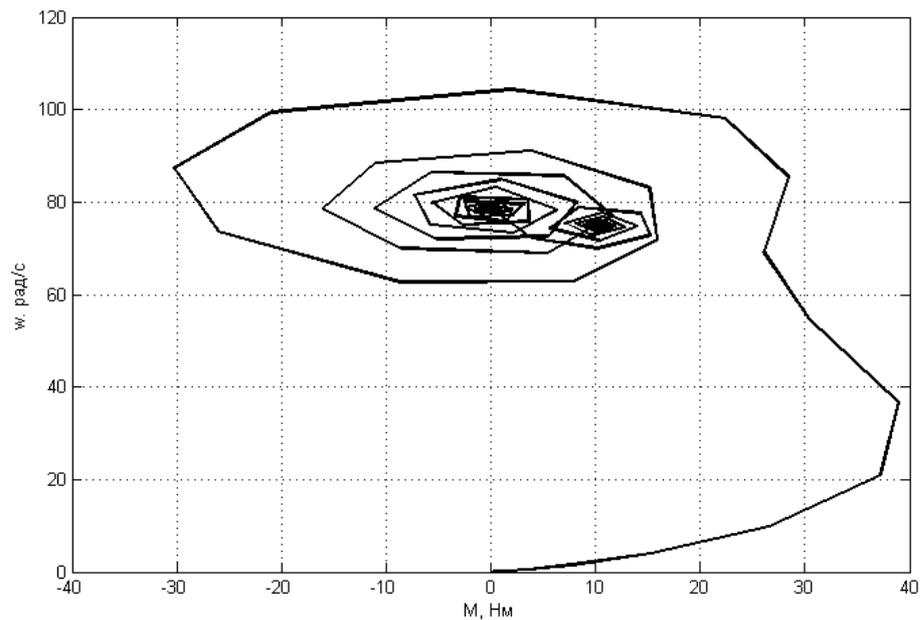


Рисунок 3.6 – Динамічна механічна характеристика асинхронного двигуна при прямому пуску й накиді номінального навантаження

З рисунку 3.4 видно, що час розгону двигуна становить близько 0,3 с. Також аналіз перехідних процесів (рисунки 3.4-3.6) при прямому пуску показує

наявність суттєвих коливань як в кривій момента, так і в кривій швидкості, які затухають по мірі розгону й виходу двигуна на номінальний режим.

3.2 Одноконтурна САК подачею гліцерину в потоковому виробництві антисептиків

Спочатку розглянемо традиційний спосіб синтезу САК подачею рідин, яка виконується за допомогою насосів. У роботах [48, 49] для вирішення цієї задачі використовуються одноконтурні САК з регулятором тиску. Даний підхід можна реалізувати для регулювання тиску в каналі подачі гліцерину установки УСБ. Структурна схема такої САК наведена на рисунку 3.7. Схема зібрана на основі математичної моделі об'єкта керування, запропонованої в другому розділі. Також в схему введений ПІД-регулятор для підтримки необхідного тиску, а об'єкт керування з регулятором охоплений зворотнім зв'язком, який реалізується за рахунок датчика тиску.

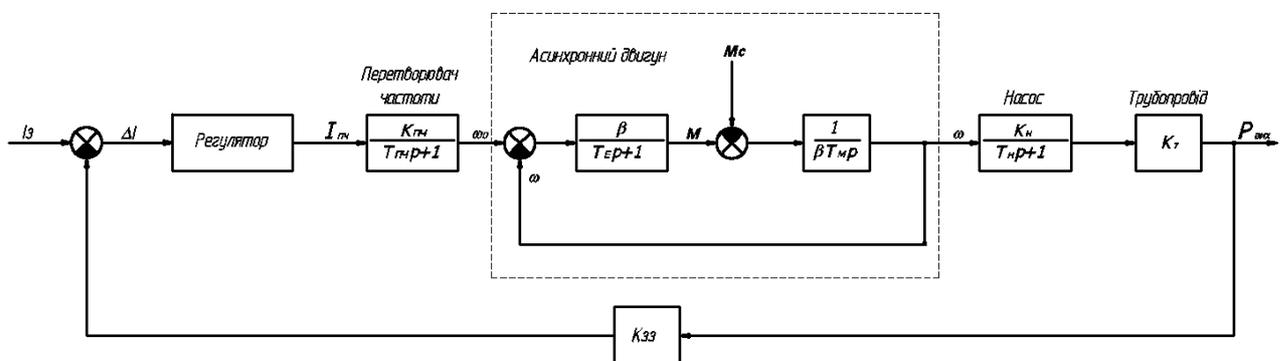


Рисунок 3.7 – Структурна схема одноконтурної САК подачею гліцерину в потоковому виробництві антисептиків

Логіка роботи САК є наступною. З панелі керування установки УСБ задається тиск, який необхідно підтримувати в трубопроводі перед гідродинамічним змішувачем. Далі цей тиск приводиться до уніфікованого струмового сигналу 4-20 мА і подається на програмований логічний контролер. У програмований логічний контролер також подається значення з датчика

тиску, відбувається порівняння заданого й реального значення, після чого формується сигнал розузгодження, на основі якого обчислюється вихідний струмовий сигнал. Цей сигнал подається на вхід частотного перетворювача, який, у свою чергу, змінює швидкість обертання двигуна й валу насоса, регулюючи таким чином тиск у трубопроводі і подачу гліцерину, тобто підтримуючи її на рівні заданого значення.

На даний момент відомі всі коефіцієнти моделі САК, наведеної на рисунку 3.7, крім коефіцієнтів ПІД-регулятора. На практиці для знаходження цих коефіцієнтів користуються методикою Зіглера-Нікольса, однак ручний підбір займає багато часу, тому доцільно скористатися методом комп'ютерного моделювання. Для цього по відомій структурній схемі САК зберемо моделюючу схему в середовищі *Simulink MATLAB*, доповнивши її блоком *Check Step Response Characteristics*. Даний блок дозволяє автоматизувати процес підбору коефіцієнтів ПІД-регулятора відповідно до деяких критеріїв оптимальності, яким має задовольняти крива перехідного процесу по тиску. Моделююча схема САК наведена на рисунку 3.8.

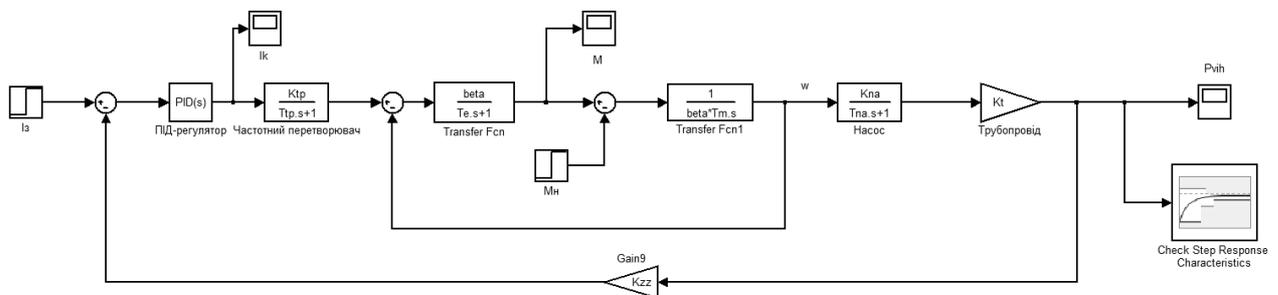


Рисунок 3.8 – Модель одноконтурної САК в середовищі *Simulink MATLAB*

Розглянемо параметри блока *Step Response Characteristics*:

- step time – час подачі сигналу;
- initial value – початковий рівень сигналу (тиску) в барах;
- rise time – час наростання перехідного процесу;
- setting time – час перехідного процесу;
- % overshoot – перерегулювання у відсотках;

- final value – кінцеве значення сигналу (тиску) в барах;
- % rise – величина наростання у відсотках;
- % settings – величина коридору після закінчення часу перехідного процесу у відсотках. Характеризує допустиму статичну помилку системи);
- % undershoot – недорегулювання у відсотках.

Умови моделювання були наступними. На вхід подавався бажаний ступінчастий вплив $I_3 = 20$ мА, що еквівалентно бажаному тиску в трубопроводі на вході в гідродинамічний змішувач $P_{вих} = 4$ бар. Вимоги до перехідного процесу по тиску визначалися завданням на магістерську роботу: відсутність перерегулювання й статичної помилки, а також час перехідного процесу не більше 2 с. Запуск моделюючої схеми дозволив отримати оптимальні значення складових ПД-регулятора за допомогою блока *Check Step Response Characteristics*, які дорівнюють:

- пропорційна складова $K_P = 0,15$;
- інтегральна складова $K_I = 20,5$;
- диференціююча складова $K_D = 0,15$.

Графіки перехідних процесів наведені на рисунках 3.9-3.11 (тиск, струм керування на виході ПД-регулятора та помилка (сигна розузгодження) системи.

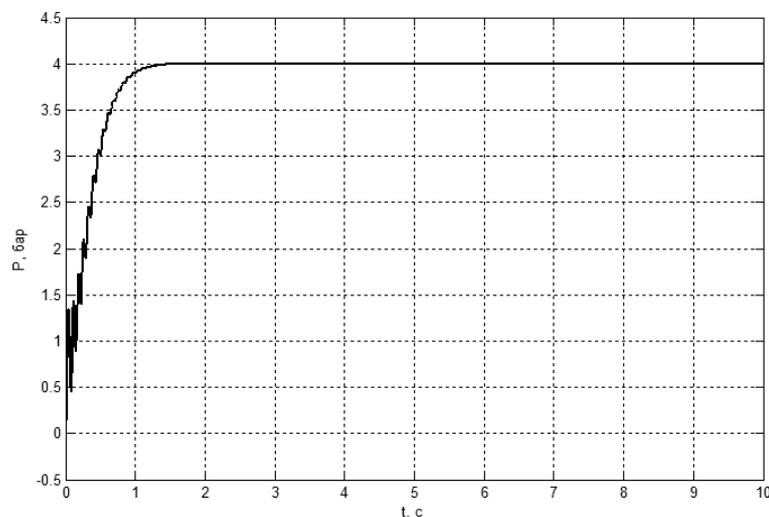


Рисунок 3.9 – Перехідний процес по тиску

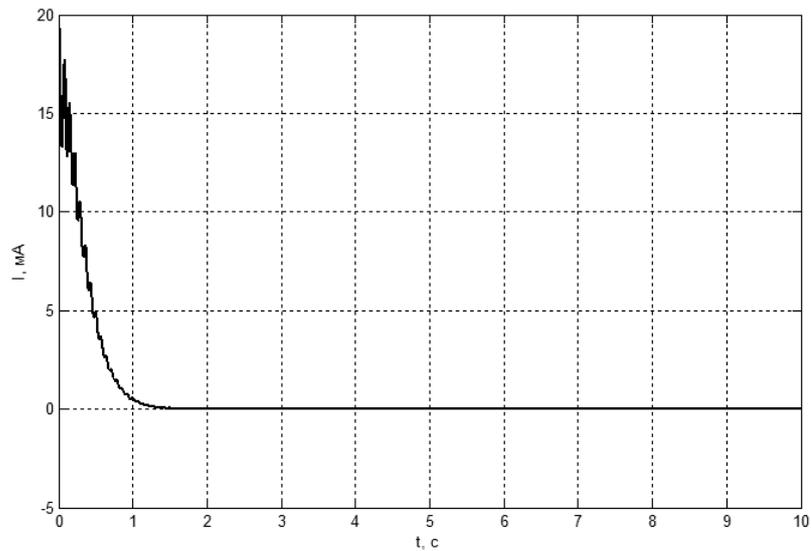


Рисунок 3.10 – Залежність похибки системи від часу

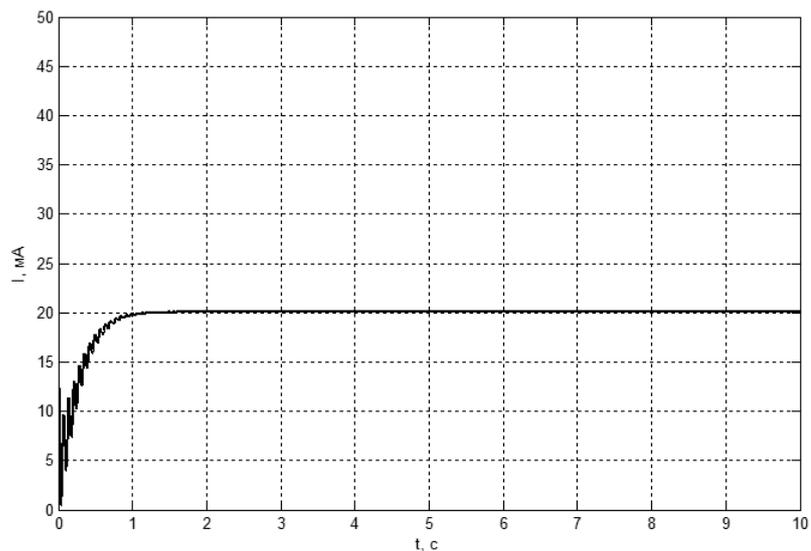


Рисунок 3.11 – Струм керування на виході ПІД-регулятора

З графіків перехідних процесів можна зробити наступні висновки. Перехідний процес по тиску задовольняє вимогам по відсутності перерегулювання та тривалості перехідного процесу. Також ПІД-регулятор забезпечує відсутність статичної похибки в системі. Однак графік перехідного процесу не є плавним, тобто містить коливальну складову, що небажано. Тому доцільно розглянути роботу системи з регулятором, який забезпечує не тільки

бажані якісні характеристики, а й форму кривої перехідного процесу. Цим вимогам відповідають модальні регулятори [50].

Також в ході моделювання виконувалася перевірка здатності синтезованого регулятора відпрацьовувати відхилення, які можуть виникати при зміні в'язкості гліцерину. Фізично зміни в системі можна пояснити таким чином. Наприклад, при зростанні в'язкості буде спостерігатися збільшення моменту опору й зменшення крутного моменту двигуна. Як наслідок, відбудеться падіння тиску в подаючому трубопроводі й зменшиться подача гліцерину, що небажано. Регулятор повинен відпрацьовувати нову похибку, яка виникає в результаті зростання в'язкості, й забезпечувати повернення тиску до заданого значення.

Моделювання цього випадку проводилося за рахунок різкого зменшення тиску в заданий момент часу. Було встановлено, що ПІД-регулятор з фіксованими параметрами не забезпечує відпрацювання відхилення по тиску й його повернення до заданого значення, тобто не володіє адаптивними властивостями. Дана обставина викликає необхідність синтезу адаптивної САК на базі модального регулятора. Вирішенню цих питань присвячені наступні підрозділи магістерської роботи.

3.3 Синтез і дослідження САК з модальним регулятором

Суть модального синтезу зводиться до того, щоб сформувати такі зворотні зв'язки по стану об'єкта керування, при яких полюси замкненої системи матимуть бажане розташування.

Сигнал керування описується формулою [50]:

$$y(t) = -KX(t), \quad (3.1)$$

де K – вектор коефіцієнтів. Зазвичай він є невідомим і саме його необхідно знайти в процесі модального синтезу.

У загальному рівняння стану замкненої системи записується як

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + B(-KX(t) + g(t)), \\ Y(t) &= CX(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

де $g(t)$ – заданий вхідний сигнал (уставка).

Якщо по цим рівнянням скласти структурну схему системи, то вона матиме вигляд, який наведено на рисунку 3.12.

Вільний рух системи (при $g(t)=0$) описується виразом

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu(t) \\ u(t) &= -KX(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Звідси

$$\dot{X}(t) = (A - BK)X(t), \quad (3.4)$$

де K – невідомий вектор коефіцієнтів зворотного зв'язку, який необхідно знайти.

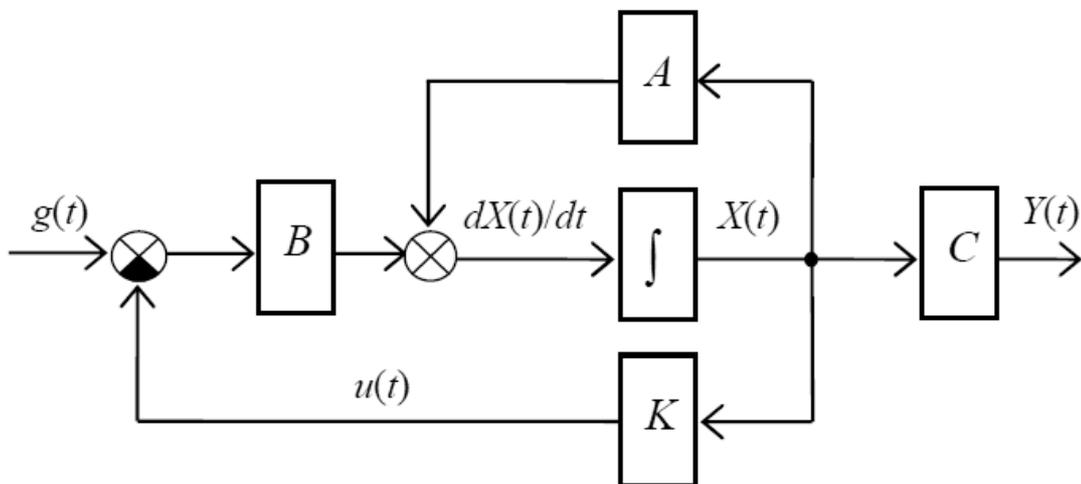


Рисунок 3.12 – Структура замкненої системи в просторі станів

Розв'язок рівняння (3.4) має вигляд

$$X(t) = e^{(A-BK)t} X(0). \quad (3.5)$$

З виразу (3.5) видно, що стійкість і характеристики перехідного процесу визначаються власними числами матриці $A - BK$.

Основна теорема модального керування стверджує, що якщо лінійна динамічна система є керованою, то лінійний зворотний зв'язок може бути вибраний таким чином, що матриця $(A - BK)$ буде мати бажане розміщення полюсів замкненої системи.

Тому на першому кроці модального синтезу необхідно обрати бажане розташування полюсів замкненої системи. Для цього відомі два основні способи [50-53]. Серед них:

1. Аналіз кореневих критеріїв якості системи.
2. Використання стандартних поліноміальних форм.

Розглянемо другий спосіб. Якщо бажаний характеристичний поліном замкненої системи має вигляд

$$q(p) = p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n, \quad (3.6)$$

то вектор коефіцієнтів зворотних зв'язків дорівнює [54]

$$K = [0 \ 0 \ 0 \ 1] \cdot [B \ AB \ A^2B \ A^{n-1}B]^{-1} \cdot [A^n + a_{n-1}A^{n-1} + \dots + a_1A + a_0I]. \quad (3.7)$$

Аналітичний розв'язок рівняння (3.7) займає багато часу, тому доцільно використовувати доступні можливості, які надає програмне забезпечення, зокрема пакет *MATLAB*. У ньому для знаходження матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків використовується всього одна команда під назвою *acker* [55]. Щоб можна було застосувати цю команду, спочатку необхідно одержати матриці A , B та P . Матриці A та B у нашому випадку відомі. Вони розраховувалися в другому розділі магістерської роботи й мають вигляд (2.77). А ось матрицю P , яка визначає бажане розміщення полюсів замкненої системи, необхідно визначити.

Щоб забезпечити оптимальне протікання реакції системи на ступінчатий одиничний вплив у літературі пропонуються різні способи розподілу коренів характеристичного рівняння на комплексній площині. Кожен такий

стандартний розподіл відповідає певному виду передавальної функції системи, яка одержується в результаті розташування коренів характеристичного рівняння у відповідності з цим вибраним стандартним розподілом. Тому і якість керування, по суті, забезпечується вибором розташування коренів характеристичного рівняння. Також необхідно пам'ятати, що динамічні характеристики системи залежать не лише від розташування полюсів передавальної функції на комплексній площині, аде й від розташування її нулів.

Основні стандартні розподіли полюсів передавальної функції і графіки перехідних процесів при одиничному коефіцієнті підсилення можна знайти в спеціальній літературі [50].

Щоб визначити бажаний час перехідного процесу використаємо комп'ютерне моделювання й подамо тестовий ступінчастий сигнал на вхід об'єкта керування. Це дозволяє одержати реакцію системи (перехідну характеристику об'єкта керування). Відгук системи на тестовий одиничний ступінчастий сигнал наведений на рисунку 3.13.

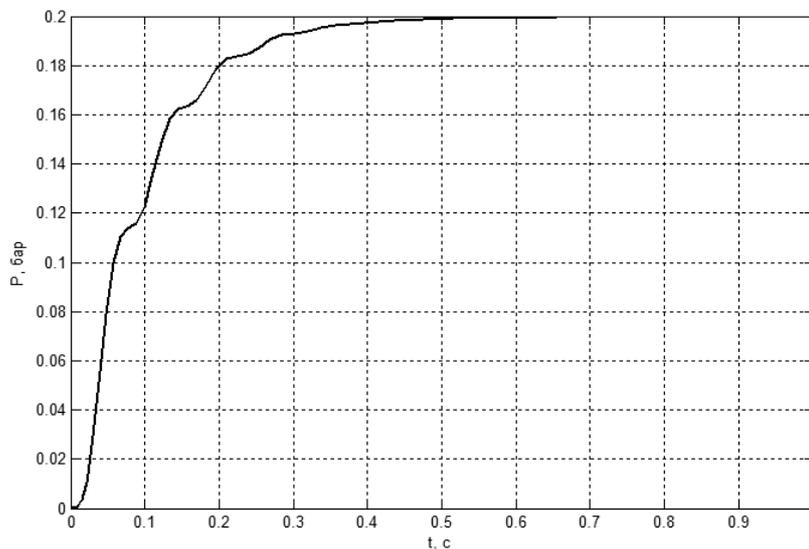


Рисунок 3.13 – Перехідна характеристика об'єкта керування

Як видно з графіка, час перехідного процесу складає 0,26 секунди. Прийmemo це значення в якості бажаної тривалості перехідного процесу T_{III} й використаємо його при розрахунку ω_0 .

Для спрощення розрахунків призначимо всі корені характеристичного рівняння в одну точку з координатами $(-\omega_0; 0j)$, де $j = \sqrt{-1}$. Значення ω_0 визначає швидкодію системи. Справедлива наступна закономірність: із зростанням ω_0 час перехідного процесу $T_{\text{пн}}$ зменшується. Узагальнене співвідношення між цими параметрами має вигляд:

$$T_{\text{пн}} = \frac{3}{\omega_0}. \quad (3.8)$$

Звідси

$$\omega_0 = \frac{3}{T_{\text{пн}}}. \quad (3.9)$$

$$\omega_0 = \frac{3}{0,26} = 11,5.$$

При такому виборі коренів характеристичне рівняння перетворюється в поліном Ньютона виду

$$(s + \omega_0)^n. \quad (3.10)$$

Нормовані перехідні характеристики полінома Ньютона представлені на рисунку 3.14.

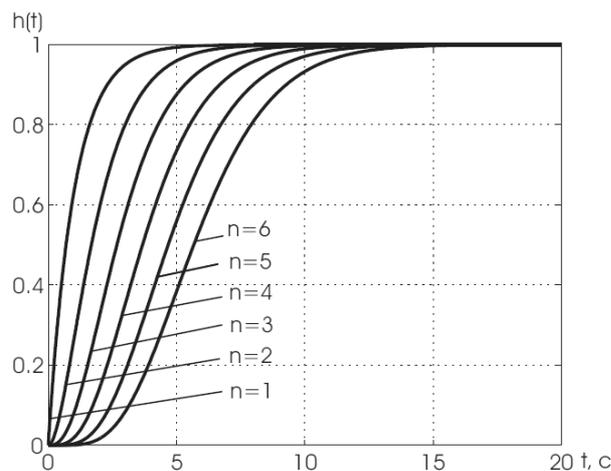


Рисунок 3.14 – Нормовані перехідні характеристики полінома Ньютона

Об'єкт керування описується характеристичним рівнянням четвертого порядку, тому йому також відповідатиме поліном Ньютона четвертого порядку виду [51]:

$$p^4 + 4 \cdot \omega_0 \cdot p^3 + 6 \cdot \omega_0^2 \cdot p^2 + 4 \cdot \omega_0^3 \cdot p + \omega_0^4 = 0. \quad (3.11)$$

Підставивши, одержимо

$$p^4 + 60p^3 + 793,5p^2 + 6083,5p + 17490 = 0.$$

Тоді матриця P буде представляти собою стовпець

$$P = \begin{pmatrix} -\omega_0 \\ -\omega_0 \\ -\omega_0 \\ -\omega_0 \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

або

$$P = \begin{pmatrix} -11,5 \\ -11,5 \\ -11,5 \\ -11,5 \end{pmatrix}.$$

Виклик функції $K = \text{acker}(A, B, P)$ після попереднього введення матриць A , B і P в командному рядку *MATLAB* дозволяє знайти матрицю коефіцієнтів зворотного зв'язку модального регулятора:

$$K = (-1,4521 \cdot 10^7 \quad -0,1377 \cdot 10^7 \quad -0,0013 \cdot 10^7 \quad 0).$$

Для моделювання реакції системи на одиничну ступінчасту дію почергово виконуємо команди $\text{sys} = \text{ss}(A - B * K, B, C, D)$ та $\text{step}(\text{sys})$. Це дозволяє отримати перехідну характеристику системи з модальним регулятором, яка наведена на рисунку 3.15.

З графіка видно, що усталене значення вихідної величини дуже відрізняється, від того, яке нам потрібно отримати. Насправді це логічно,

оскільки при модальному синтезі у першу чергу вирішується питання забезпечення заданої форми й тривалості перехідного процесу, а усталене значення вихідного параметра забезпечується не обов'язково.

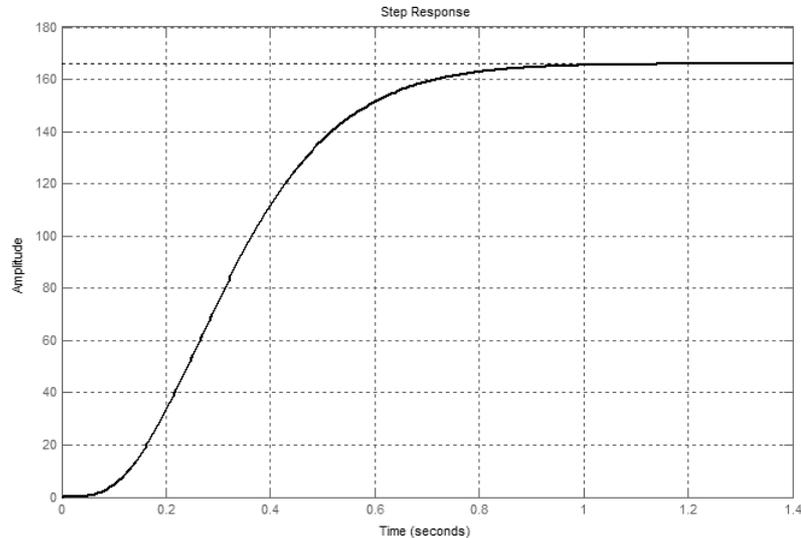


Рисунок 3.15 – Перехідна характеристика САК з модальним регулятором

Для забезпечення бажаного рівня вихідного сигналу необхідно ввести в систему масштабуючий коефіцієнт для вхідної дії. Цей коефіцієнт розраховується за формулою:

$$k_m = (-C \cdot (A - BK)^{-1} \cdot B)^{-1}. \quad (3.13)$$

У *MATLAB* є спеціальна команда, з допомогою якої можна визначити коефіцієнт підсилення в режимі, що встановився. Почерговий виклик команд `sys=ss(A-B*K,B,C,D)` та `k_m=inv(-C*inv(A-B*K)*B)` дозволяє одержати число 0,006, яке і є шуканим значенням масштабуючого коефіцієнта.

Моделююча схема САК тиском з модальним регулятором в середовищі *Simulink MATLAB* складена у відповідності з рисунком 3.12 й наведена на рисунку 3.16.

Результат відпрацювання САК ступінчастої задаючої дії $P_3 = 4$ бар наведено на рисунку 3.17. Щоб порівняти ефективність керування за

допомогою ПІД-регулятора й модального регулятора зручно побудувати обидва графіки перехідних процесів на одній координатній площині (рисунок 3.18).

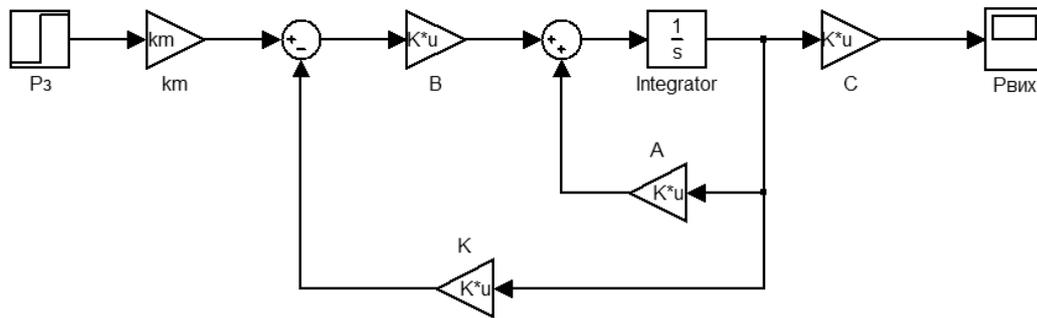


Рисунок 3.16 – Моделююча схема САК тиском з модальним регулятором в середовищі *Simulink*

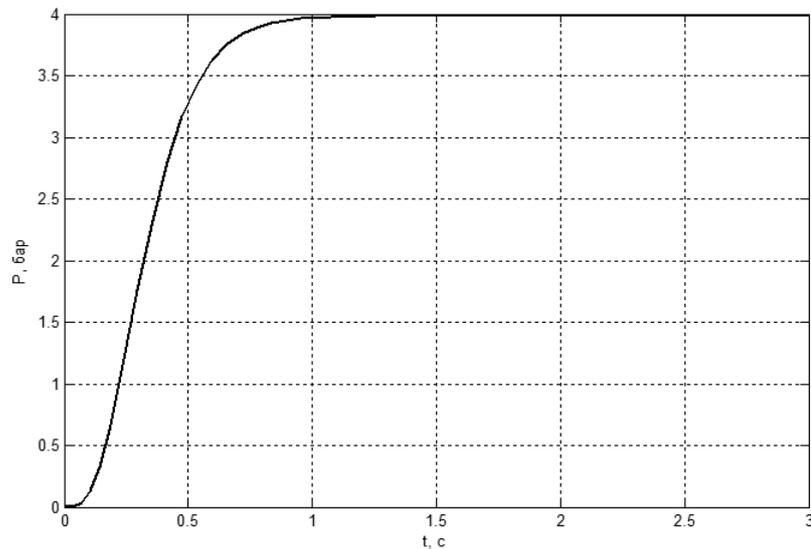


Рисунок 3.17 – Перехідний процес САК з модальним регулятором по тиску

Аналізуючи рисунок 3.18 можемо відзначити наступне. Обидві САК (і з ПІД-регулятором, і з модальним регулятором) забезпечують відпрацювання заданого значення тиску на рівні 4 бар. Однак, перехідний процес САК з ПІД-регулятором містить суттєву коливальну складову, у той час, як перехідний процес по тиску в САК з модальним регулятором є аперіодичним. До того ж, система з модальним регулятором володіє кращою швидкодією: час перехідного процесу складає 0,68 с, протии 1 с для системи з ПІД-регулятором.

Тому саме модальний регулятор забезпечує всі необхідні якісні характеристики перехідного процесу, які визначені в завданні на магістерську роботу.

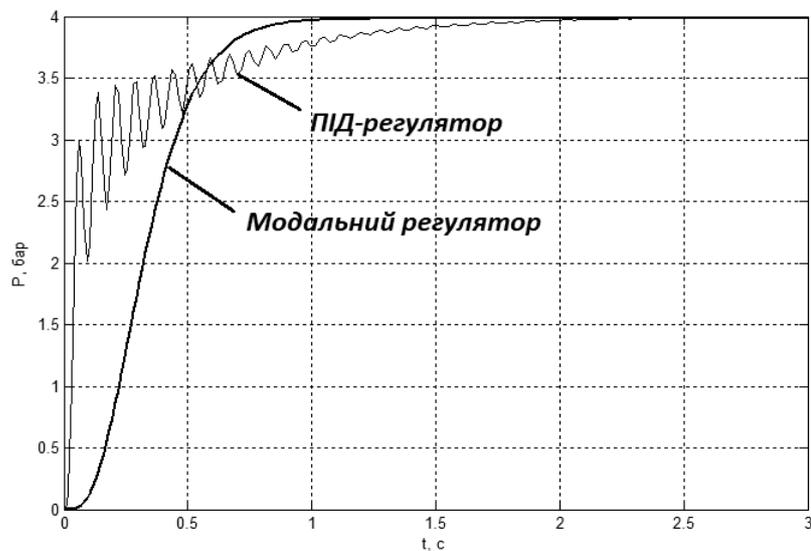


Рисунок 3.18 – Перехідні процеси в САК з модальним і ПІД-регулятором

Одержані результати дозволяють сформулювати загальну методичку синтезу модального регулятора САК тиском, яка може використовуватися при розробці та дослідженні схожих систем. Представимо методичку в вигляді таких послідовних кроків:

1. Задавання порядку об'єкта керування й показників якості системи.
2. Визначення порядку характеристичного полінома.
3. Вибір у якості еталону полінома Ньютона.
4. Побудова нормованої перехідної характеристики.
5. Визначення часу перехідного процесу на нормованій перехідній характеристиці.
6. Обчислення параметра ω_0 , який визначає швидкодію системи.
7. Знаходження коефіцієнтів бажаного характеристичного рівняння.
8. Обчислення коефіцієнтів модального регулятора.

Синтез модального регулятора в цьому підрозділі виконувався з припущення того, що всі компоненти вектора стану X можна виміряти. На практиці це припущення виконується рідко, тому що не всі змінні вектора стану

можуть мати реальний фізичний зміст або просто немає необхідної кількості вимірювальних приладів [50, 56]:

Але якщо система є спостережуваною, що справедливо для нашого випадку, оскільки всі системи з одним входом і одним виходом є спостережуваними, то всі компоненти вектора стану можуть бути відновлені по спостереженням вектора виходу системи [57]. Спеціальні алгоритми, які реалізують відновлення вектора стану по спостереженням вектора виходу системи дістали назву спостерігачів стану. Синтезу такого пристрою для САК тиском в каналі подачі гліцерину присвячений наступний підрозділ.

3.4 Синтез спостерігача стану повного порядку

Залежно від, яку кількість змінних вектора стану дозволяє оцінювати спостерігач, розрізняють спостерігачі стану повного й пониженого порядку. Другий випадок передбачає, що частина змінних стану може бути виміряна, а іншу частину треба оцінити (ідентифікувати). Припустимо, що в нашому випадку змінні стану недоступні для вимірювання за допомогою давачів, тому постає задача синтезу спостерігача стану повного порядку.

Спостерігач стану представляє собою динамічну систему, яка описується моделлю самого об'єкта:

$$\begin{aligned} \hat{X}(t) &= A\hat{X}(t) + BU(t) \\ \hat{Y}(t) &= C\hat{X}(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

де $\hat{X}(t)$ – оцінка стану об'єкта, $\hat{Y}(t)$ – оцінка виходу об'єкта.

Якщо початкові стани моделі й об'єкта співпадають, і модель адекватна об'єкту, то можна вважати в будь-який момент часу, що

$$\hat{X}(t) = X(t). \quad (3.15)$$

Але на практиці забезпечити повну адекватність об'єкта і моделі неможливо. Також важко гарантувати й повну рівність початкових умов. Тому в реальності можна розраховувати лише на виконання умови

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{X}(t) = X(t). \quad (3.16)$$

Подібною властивістю володіють так звані асимптотичні спостерігачі стану.

Асимптотичний спостерігач стану використовує зворотній зв'язок за похибкою відновлення вектора стану. Тому робота системи з спостерігаючим пристроєм описується рівняннями:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) &= A\hat{X}(t) + BU(t) + N(Y(t) - \hat{Y}(t)) = A\hat{X}(t) + BU(t) + NCE(t) \\ \hat{Y}(t) &= C\hat{X}(t) \\ U(t) &= K\hat{X}(t) \end{aligned} \quad (3.17)$$

де N – матриця параметрів спостерігаючого пристрою.

На рисунку 3.19 наведена структурна схема САК з модальним регулятором і спостерігаючим пристроєм.

Можна записати, що

$$\dot{E} = \dot{X} - \dot{\hat{X}} = (A - NC)E. \quad (3.18)$$

Розв'язок рівняння (3.18) визначається за допомогою формули

$$E(t) = e^{(A-NC)t} E(0). \quad (3.19)$$

Таким чином, якщо власні числа матриці $A-NC$ мають від'ємну дійсну частину, то з плином часу похибка стану зменшиться до нуля. Відповідно, при синтезі спостерігача необхідно вибрати положення коренів характеристичного рівняння:

$$|\lambda I - (A - NC)| = 0. \quad (3.20)$$

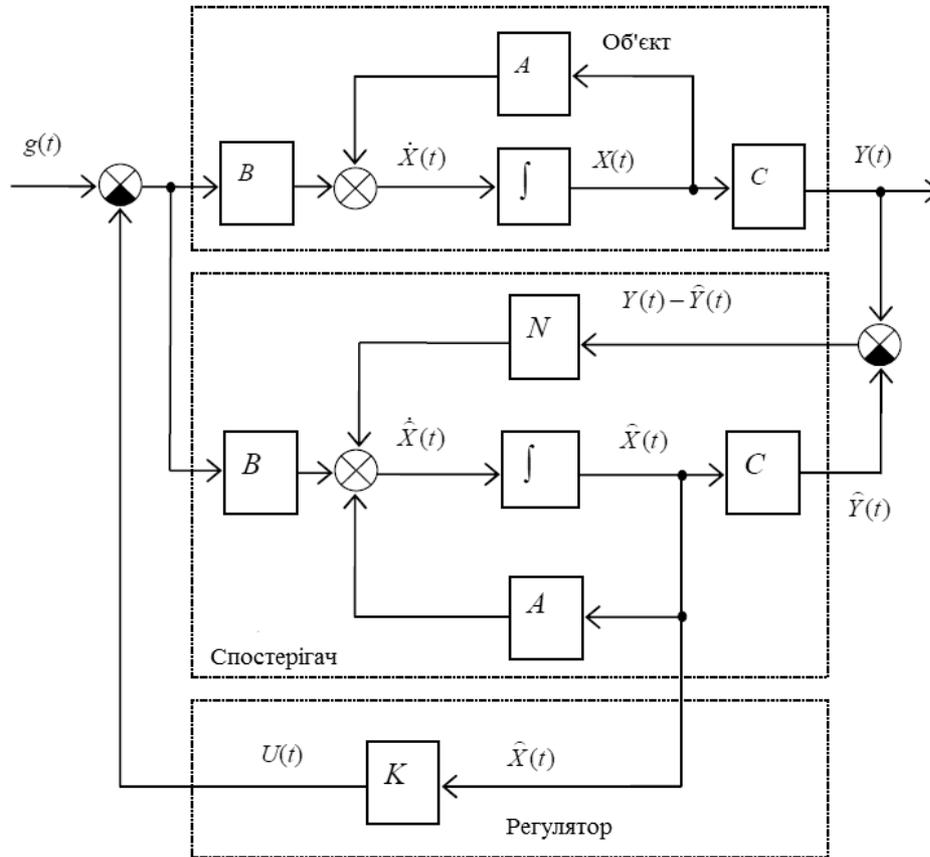


Рисунок 3.19 – Система з спостерігачем стану й модальним регулятором

Зрозуміло, що процеси в спостерігачі стану мають протікати швидше, ніж процес в системі. Емпірично встановлено, що спостерігач має володіти швидкодією, яка в 2-4 рази перевищує швидкодію системи.

При розрахунку регулятора був заданий вектор полюсів бажаної замкненої системи

$$P = \begin{pmatrix} -11,5 \\ -11,5 \\ -11,5 \\ -11,5 \end{pmatrix}.$$

Задамо для спостерігаючого пристрою полюси, які забезпечують більшу швидкодію

$$P_1 = \begin{pmatrix} -23 \\ -23 \\ -23 \\ -23 \end{pmatrix}.$$

Описана вище функція *acker*, яка використовувалася при пошуку коефіцієнтів матриці зворотного зв'язку, також може бути застосована до розрахунку коефіцієнтів зворотного зв'язку спостерігача одновимірної системи. Для цього потрібно транспонувати матрицю *A*, а також замінити матрицю *B* на *C*. Застосувавши в робочому вікні *MATLAB* функцію $N=acker(A',C',P1)$, одержимо матрицю коефіцієнтів зворотного зв'язку асимптотичного спостерігача стану:

$$N = (0 \quad 0,004 \quad -0,7571 \quad 145,29).$$

Перевірку ефективності роботи спостерігача стану здійснимо в *Simulink MATLAB*. Для цього складемо моделюючу схему у відповідності з рисунком 3.19.

Моделювання показує повне співпадіння дійсного й оціненого значення вектора стану $X(t)$. Тобто асимптотичний спостерігач й модальний регулятор забезпечують такий же перехідний процес в САК, як і на рисунку 3.17.

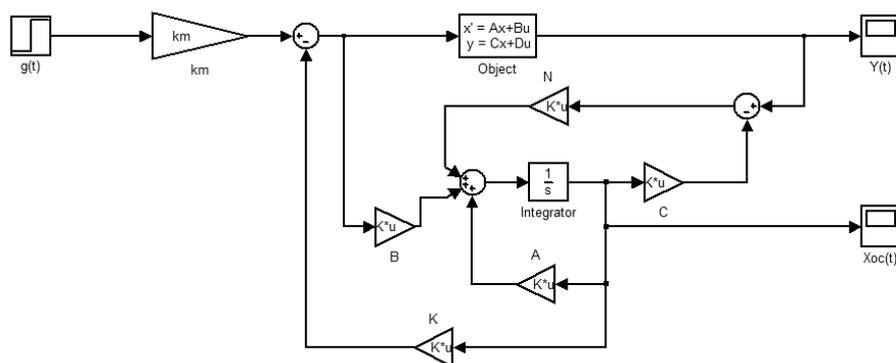


Рисунок 3.20 – Система з спостерігачем стану й модальним регулятором в середовищі *Simulink MATLAB*

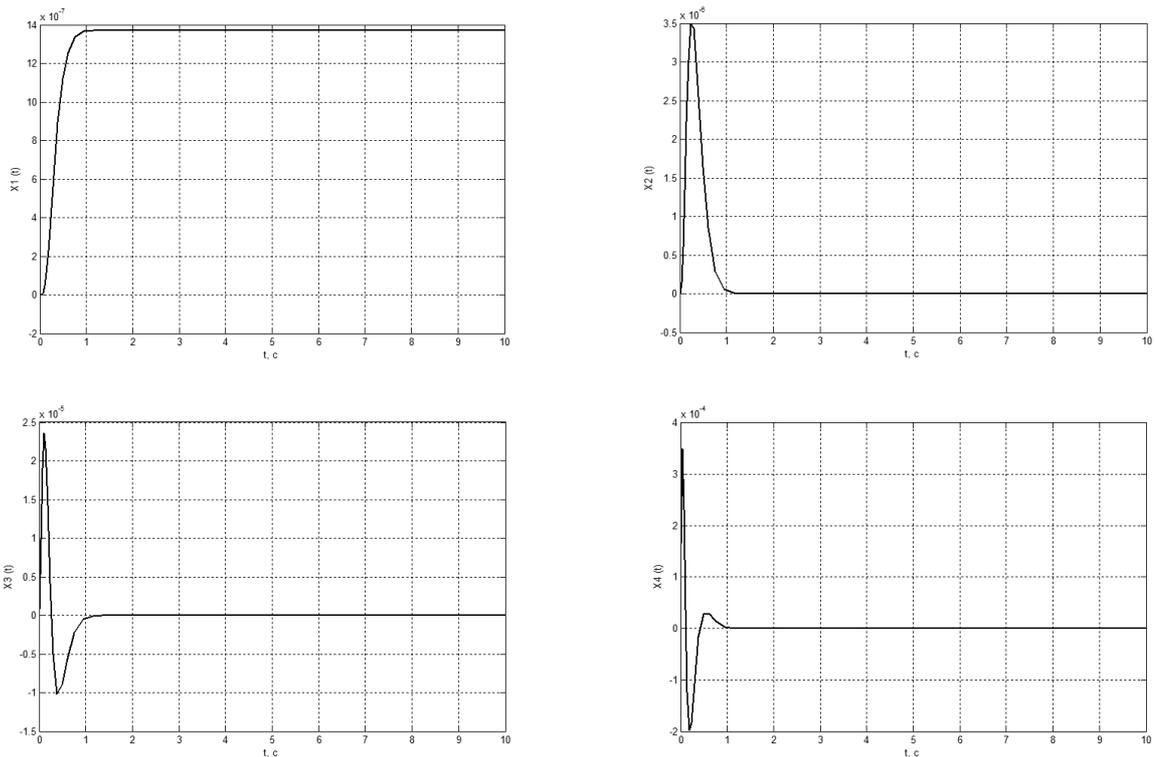


Рисунок 3.21 – Дійсні та оцінені значення змінних стану (співпадають)

3.5 Адаптація модального регулятора та дослідження адаптивної САК тиском в каналі подачі гліцерину

Існують різні типи адаптивних систем. Аналізуючи останні дослідження в даній сфері, може відзначити, що найчастіше адаптивні САК синтезуються з використанням так званої еталонної моделі, реакція якої на вхідний вплив є найбільш бажаною [58-61].

Уведемо еталонну модель до схеми САК з модальним регулятором, яка представлена на рисунку 3.19. Тоді адаптивна САК матиме вигляд, зображений на рисунку 3.22.

У якості еталонної моделі виберемо аперіодичну ланку першого порядку з передавальною функцією виду

$$W(p) = \frac{1}{0,25p + 1}. \quad (3.21)$$

А підсилювач будемо моделювати пропорційною ланкою з змінним коефіцієнтом підсилення r . Структурній схемі, наведеній на рисунку 3.22, відповідає моделююча схема в *MATLAB Simulink*, наведена на рисунку 3.23.

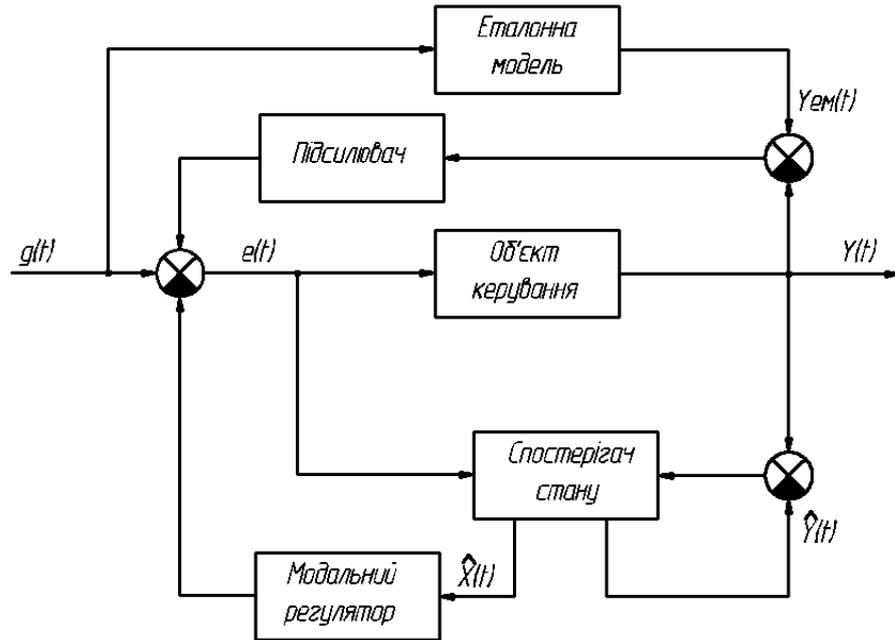


Рисунок 3.22 – Структурна схема адаптивної САК тиском у каналі подачі гліцерину

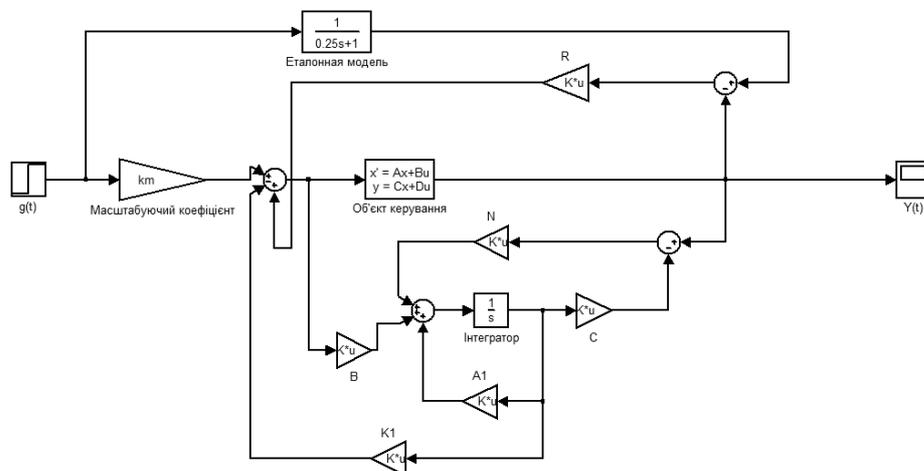


Рисунок 3.23 – Моделююча схема адаптивної САК тиском в каналі подачі гліцерину у середовищі *Simulink*

Виконаємо моделювання для задаючого вхідного впливу $P_3(t) = 4$ бар. Для цього спочатку необхідно визначити значення коефіцієнта підсилення r , який буде коригувати перехідний процес у залежності різниці між реакцією на вхідний вплив об'єкта керування й еталонної моделі. Для визначення цього коефіцієнта скористаємося *Check Step Response Characteristics*, який ми вже використовували в цьому розділі. Знайдене значення коефіцієнта $r = 0,001$. У результаті одержимо перехідний процес, який зображений на рисунку 3.24.

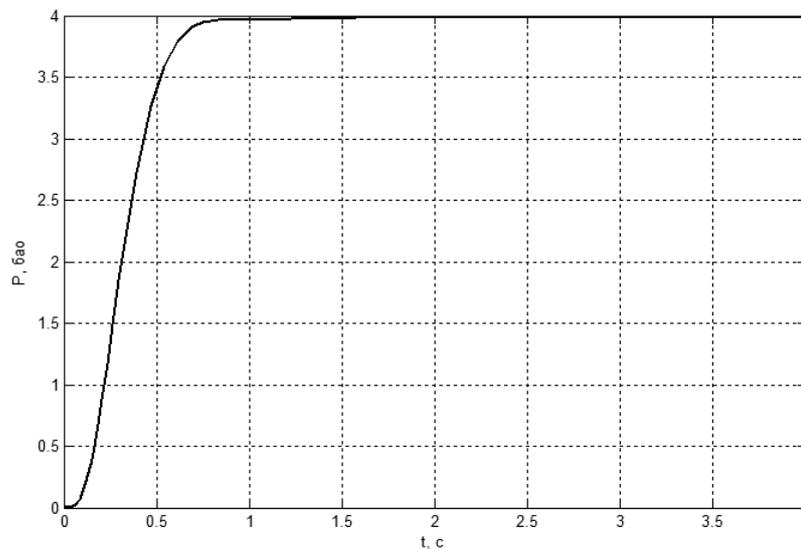


Рисунок 3.24 – Відпрацювання адаптивною САК задаючого впливу $P_3 = 4$ бар

Як видно з рисунка, САК забезпечує бажані якісні характеристики перехідного процесу по тиску.

Тепер оцінимо роботу САК для двох випадків:

- 1) подача на вхід задаючого впливу, який становить 75% і 50% від початкового;
- 2) різке зменшення тиску з 4 до 2 бар в момент часу 10 с.

Другий випадок – це імітація ситуації, при якій змінюється температура гліцерину й, відповідно, його в'язкість. Нагадаємо, що в діапазоні температур 15... 25 °С в'язкість гліцерину може змінюватися майже в три рази. При суттєвому зростанні в'язкості буде спостерігатися також зростання моменту опору двигуна, який уповільнюватиме швидкість обертання валу. Подача й

відповідно тиск, який створюється насосом також знизиться. Для моделювання цих двох випадків використано схему *Simulink MATLAB*, яка наведена на рисунку 3.25. У цій моделі блоки *H1* та *H2* відповідають за імітацію різкого зменшення тиску на 2 бар в момент часу 10 с (ланки, які дозволяють створити ступінчастий вплив та за рахунок суматора додати його до загального сигналу).

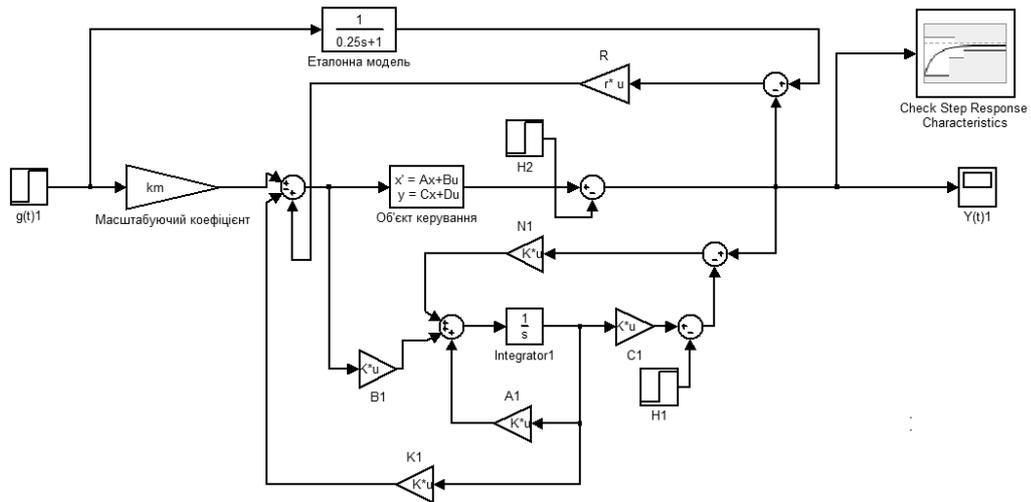


Рисунок 3.25 – Моделююча схема роботи адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину

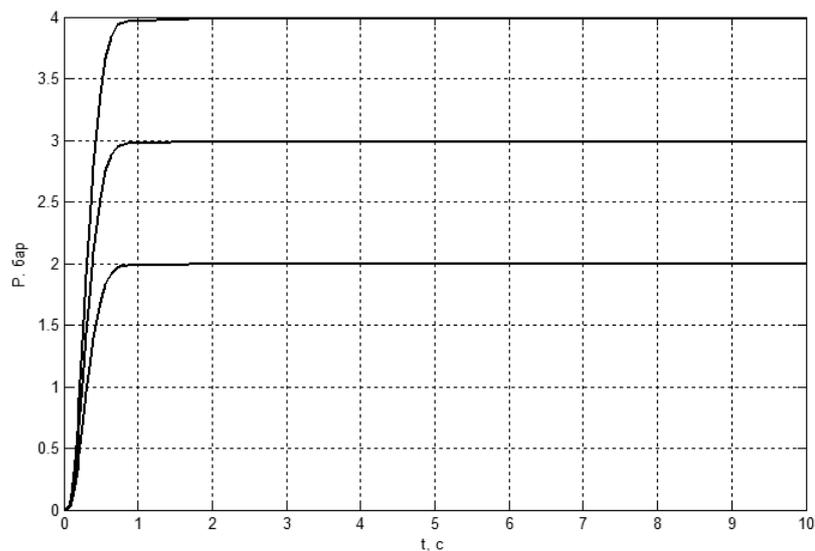


Рисунок 3.26 – Відпрацювання адаптивною САК задаючих ступінчастих впливів 2, 3 і 4 бар

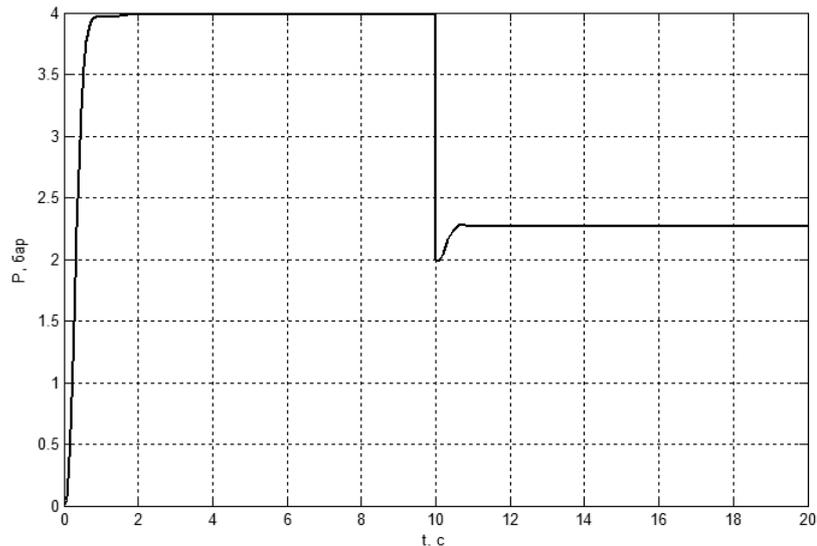


Рисунок 3.27 – Відпрацювання адаптивною САК різкого зменшення тиску при коефіцієнті $r = 0,001$

Як видно з графіка 3.26, адаптивна САК добре справляється з задаючими вхідними впливами на рівні 100, 75 і 50%. Одночасно по рисунку 3.27 можемо констатувати, що при сталому коефіцієнті $r = 0,001$ САК лише робить спробу вийти на бажаний рівень тиску 4 бар після його зниження до 2 бар, але це їй не вдається. Тому необхідно, щоб коефіцієнт r був змінним і ситуативно підлаштовувався під зміну тиску. Для відпрацювання різкого зниження тиску на 2 бар в момент часу 10 с шукане значення $r = 0,0131$. Графік перехідного процесу зображений на рисунку 3.28.

У таблиці 3.1 наведені експериментальні значення коефіцієнта r при різних перепадах тиску. Для одержання універсальної залежності, яка дозволить адаптивній САК обчислювати необхідне значення коефіцієнта r у будь-який момент часу в залежності від перепаду тиску використаємо метод регресійного аналізу. У програмі *MathCAD* спочатку задаємо у вигляді матриці розмірністю 9 на 1 перепад тиску ΔP й коефіцієнт r , після чого за допомогою виклику функції *line* ($\Delta P, r$) знаходимо невідомі значення коефіцієнтів лінійної регресійної залежності:

$$r = 1,04 \cdot 10^{-3} \Delta P + 6,047 \cdot 10^{-3}. \quad (3.22)$$

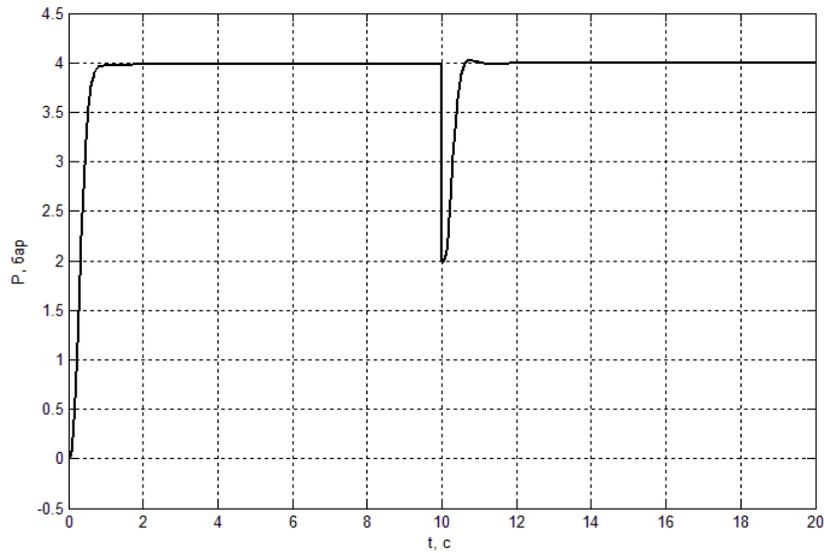


Рисунок 3.28 – Відпрацювання адаптивною САК різкого зменшення тиску при коефіцієнті $r = 0,0131$

Таблиця 3.1 – Експериментальні значення коефіцієнту r при різних перепадах тиску

№	ΔP	r
1	0	0,001
2	0,5	0,0041
3	1	0,0071
4	1,5	0,0101
5	2	0,0131
6	2,5	0,0162
7	3	0,0192
8	3,5	0,0222
9	4	0,0252

Результати, одержані в третьому розділі магістерської роботи, дозволяють сформулювати методику адаптації модального регулятора САК тиском у трубопроводі подачі гліцерину неперервного процесу антисептичних засобів:

1. Задавання вихідних початкових змінних математичної моделі об'єкта керування.
2. Ідентифікація об'єкта керування з допомогою асимптотичного спостерігача стану.
3. Якщо об'єкт керування ідентифіковано, то перехід до кроку 4. Якщо ні, то продовження ідентифікації.
4. Обчислення коефіцієнтів модального регулятора з використанням полінома Ньютона. Вибір еталонної моделі та одержання універсальної регресійної залежності між коефіцієнтом підсилення в контурі адаптації та перепадом тиску.
5. Розрахунок коефіцієнту адаптації (при зміні режимів роботи) з використанням співвідношення (3.22).
6. Керування системою.
7. Якщо похибка не перевищує 5%, то повернення до пункту 6. Якщо ж похибка перевищує вказане значення, то повернення до пункту 2.

3.6 Висновки за розділом 3

За результатами виконання третього розділу магістерської роботи можна зробити наступні висновки:

1. З використання стандартних інструментів *Simulink MATLAB* досліджено прямий пуск привідного асинхронного двигуна та його робота при накиді номінального навантаження. Одержані перехідні процеси по швидкості та моменту, а також динамічна механічна характеристика двигуна.
2. Методом комп'ютерного моделювання проведено дослідження роботи одноконтурної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину з ПІД-

регулятором тиску. Установлено, що крива перехідного процесу по тиску володіє суттєвою коливальністю, що є небажаним.

3. З використанням полінома Ньютона синтезовано модальний регулятор САК. Порівняння роботи САК з ПІД-регулятором та САК з модальним регулятором показало, що і в першому, і в другому випадку забезпечується відпрацювання заданого сигналу. Але в САК з модальним регулятором це відбувається швидше – час перехідного процесу складає 0,68 с, а в САК з ПІД-регулятором – 1 с.
4. Синтезовано асимптотичний спостерігач стану, що дозволяє проводити точну оцінку змінних стану, по яким виконується модальне керування. Математичне моделювання підтвердило повне співпадіння дійсного й оціненого значень усіх чотирьох змінних стану об'єкта керування.
5. Запропонована методика адаптації модального регулятора, яка базується на використанні еталонної моделі й додаткового адаптивного контура. У рамках цієї методики експериментально з використанням методу комп'ютерного моделювання одержано регресійне рівняння, яке зв'язує коефіцієнт підсилення в контурі адаптації та перепад тиску в трубопроводі подачі гліцерину. Застосування розробленої методики дозволило синтезувати САК, яка забезпечує необхідні якісні характеристики перехідних процесів при зміні задаючого впливу й в'язкості гліцерину. Якісні характеристики перехідного процесу по тиску повністю відповідають завданню на магістерську роботу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ САК ТИСКОМ У ТРУБОПРОВІДІ ПОДАЧІ ГЛІЦЕРИНУ УСТАНОВКИ ВИРОБНИЦТВА АНТИСЕПТИКІВ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

4.1 Техніко-економічне обґрунтування

Огляд існуючих установок і технологій, виконаний у першому розділі, показав, що зараз виробництво антисептиків здійснюється виключно з використанням обладнання періодичної дії. Воно характеризується малою продуктивністю (у середньому не більше 1-2 метрів кубічних за годину) та великим споживанням електроенергії, яке з'являється за рахунок тривалої роботи механічних мішалок з потужними електроприводами.

Тому в магістерській роботі пропонується технічне рішення, яке полягає в тому, щоб зробити процес виробництва антисептиків не періодичним, а неперервним, тобто виробництво здійснювати в потоці. Для цього рекомендується модернізувати установки гідродинамічного кавітаційного змішування типу *УСБ*. Дане обладнання випускається українською промисловістю серійно й експлуатується на деяких лікєро-горілочаних заводах для одержання водно-спиртових сумішей. Однак для одержання антисептиків крім води й спирту необхідне введення ще одного компоненту – гліцерину, який потрібен для зволоження шкіри.

У даній магістерській роботі розроблена адаптивна система автоматичного керування (САК) тиском у трубопроводі подачі гліцерину установки виробництва антисептиків неперервної дії типу *УСБ*. Система здійснює керування електроприводом подаючого насоса за рахунок зміни струму керування частотного перетворювача і, як наслідок, швидкістю обертання валу привідного двигуна. Відповідно змінюється й подача гліцерину. Система є адаптивною, що дозволяє дозувати гліцерин з заданою точністю в потоці незалежно від зміни його температури та в'язкості.

Модернізація установок *УСБ* за рахунок впровадження розробленої САК матиме ряд позитивних наслідків, серед яких виділимо два головні елементи економії:

- підвищення продуктивності процесу виробництва антисептиків, що особливо актуально в часи пандемії коронавірусу;
- економія електроенергії за рахунок налагодження потокового виробництва. Установка *УСБ* споживає менше електроенергії при більшій продуктивності, ніж її аналоги періодичної дії.

Враховуючи викладене вище, проведемо економічне обґрунтування впровадження електропривода насоса й адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину установки неперервного виробництва антисептиків.

4.2 Визначення витрат на створення електропривода та адаптивної САК

4.2.1 Визначення витрат на розробку електропривода насоса подачі гліцерину та адаптивної САК

Одноразові капітальні витрати на обладнання для створення адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину складаються з вартостей основного та додаткового обладнання. Перелік базового основного обладнання, яке необхідне для створення електропривода й системи, наведено в таблиці 4.1.

Використавши суми усіх цін основного обладнання з останнього стовпця таблиці, у підсумку одержимо значення *25580 грн.* Тобто сумарні витрати на основне обладнання складають $Z_{осн} = 25580 \text{ грн.}$ Вартість допоміжного обладнання, до складу якого входять підсилювачі, провідники, роз'єми та інше, зазвичай не перевищує 10% від вартості основного, тобто можемо записати, що:

$$Z_{дод} = 0,1 \cdot Z_{осн} . \quad (4.1)$$

Таблиця 4.1 – Базове основне обладнання, яке необхідно закупити для створення електропривода й адаптивної САК

Найменування	Кількість, шт	Ціна, грн
Шестеренний насос <i>Liverani Gear 3</i>	1	10000
Асинхронний двигун <i>4BP90LA8</i>	1	6410
Частотний перетворювач <i>CMF310</i> (потужність 1,1 кВт)	1	4200
Датчик тиску <i>Wika</i> (0... 10 бар)	1	2030
Контролер <i>SIMATIC S7-200</i>	1	2940
Разом		25580

Вартість допоміжного обладнання складе:

$$Z_{\text{дод}} = 0,1 \cdot 25580 = 2558 \text{ грн.}$$

Тоді витрати на придбання комплектуючих складуть

$$Z_K = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{дод}}. \quad (4.2)$$

Підставивши чисельні значення, одержимо:

$$Z_K = 25580 + 2558 = 28138 \text{ грн.}$$

4.2.2 Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями

Для створення електроприводу й адаптивної САК тиском необхідно виконати роботи по монтажу, наладці та пуску системи.

Їх можуть виконати два працівники: один спеціаліст КВПіА п'ятого розряду й один електрик п'ятого розряду протягом п'яти днів.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$Z_{зпм} = K_{HB} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{t=1}^m C_{ti} \cdot (1 + H), \quad (4.3)$$

де K_{HB} – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{HB} = 1,3$, λ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$, t – час виконання робіт, $t = 40$ год, C_{ti} – годинна тарифна ставка для працівників 5-го розряду, яка зараз дорівнює $C_{ti} = 37,87$ грн, H – норма нарахувань на заробітну плату, $H = 0,22$, m – кількість робітників, $m = 2$ чел.

Тоді заробітна плата з нарахуваннями дорівнює:

$$Z_{зпм} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 40 \cdot 2 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 6006 \text{ грн}.$$

4.2.3 Визначення загальної суми витрат

Витрати на створення адаптивної САК тиском у трубопроводі подачі гліцерину визначимо як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну платню з нарахуваннями робітників, які проводять модернізацію:

$$Z_M = Z_K + Z_{зпм}. \quad (4.4)$$

Тоді

$$Z_M = 28138 + 6006 \approx 34140 \text{ грн}.$$

4.3 Розрахунок річного фонду часу роботи установки виробництва антисептиків неперервної дії

Розрахунок річного фонду часу роботи установки виробництва антисептиків неперервної дії проведемо за формулою:

$$T_P = \frac{T_\Phi}{\frac{1}{t_{3M} K_{3M}} + D_P}. \quad (4.5)$$

де T_P – річний фонд робочого часу, $T_\Phi = 365$ днів, t_{3M} – тривалість зміни в машиногодинах, $t_{3M} = 8$ машиногодинах, K_{3M} – коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{3M} = 3$, D_P – простой в машиноднях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину.

Простой в машиноднях визначимо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^n d_{Pi} a_{Pi}}{T_{\text{Ц}}}, \quad (4.6)$$

де n – число різновидів ТО та ремонтів за міжремонтний період, прийmemo рівним $n = 1$, d_{Pi} – тривалість перебування в i -му ремонті або ТО, приймаємо рівним 4 год, $T_{\text{Ц}}$ – час міжремонтного циклу, приймаємо рівним $T_{\text{Ц}} = 8760$ год, a_{Pi} – кількість ремонтів або технічних обслуговувань за міжремонтний період, приймаємо рівним 6.

$$D_P = \frac{1 \cdot 4 \cdot 6}{8760} \approx 0,0027 \frac{\text{маш} \cdot \text{днів}}{\text{маш} \cdot \text{год}}.$$

Річний фонд часу роботи установки виробництва антисептиків до і після модернізації дорівнює:

$$T_P = \frac{365}{\frac{1}{8 \cdot 3} + 0,0027} = 8220 \text{ год}.$$

4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності

Річну експлуатаційну продуктивність можна розрахувати виходячи з виразу:

$$B = B_{\text{еч}} \cdot T_P \cdot K_{\text{ПП}}, \quad (4.7)$$

де B_{ech} – часова експлуатаційна продуктивність, м³/год, $K_{ПР}$ – коефіцієнт, що враховує простої, не враховані в часовій експлуатаційній продуктивності, приймаємо рівним 0,9.

Відзначимо, що до модернізації установка *УСБ* не могла використовуватися для потокового виробництва антисептиків, тому що в ній не передбачався канал дозування гліцерину, а були лише канали дозування спирту й води. Після модернізації установка дозволяє виробляти антисептики з продуктивністю 5 м³/год. За результатами огляду існуючих технологій, який був проведений у першому розділі, було встановлено, що наразі антисептики виробляються з використанням установок періодичної дії. Тому для порівняння візьмемо установку періодичної дії *RS-2000*, яка дозволяє одержати максимальну продуктивність з усіх установок, розглянутих в першому розділі. Її продуктивність складає 2,27 м³/год. Відзначимо, що це продуктивність з урахуванням перерв в циклі на злив готового антисептику з змішувальних ємностей, тому при подальшому обчисленні робочого часу установки періодичної дії тривалість змін також прийматимемо рівною трьом по вісім годин кожна, а простої будуть враховані в кінцевій продуктивності установки *RS-2000*.

Тоді річна експлуатаційна продуктивність після модернізації:

$$B = 5 \cdot 8220 \cdot 0,9 = 36990 \text{ м}^3 / \text{рік} .$$

Річна експлуатаційна продуктивність до модернізації:

$$B = 2,27 \cdot 8220 \cdot 0,9 = 16790 \text{ м}^3 / \text{рік} .$$

4.5 Визначення поточних річних витрат в процесі експлуатації установки виробництва антисептиків неперервної дії

Поточні річні експлуатаційні витрати визначаються до і після модернізації.

4.5.1 Розрахунок заробітної плати із нарахуваннями

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{зпм} = K_{НВ} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ii} \cdot (1 + H), \quad (4.8)$$

де $K_{НВ}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{НВ} = 1,3$, λ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$, t – час виконання робіт, приймаємо рівним річному фонду часу роботи установки УСБ, C_{ii} – годинна тарифна ставка для працівників i -розряду, H – єдиний соціальний внесок, $H = 0,22$, m – кількість робітників. Для поточного обслуговування установки достатньо одного оператора, якому необхідно попередньо пройти нетривале навчання роботі з установкою. У подальшому цю роботу може виконувати працівник четвертого розряду, тому $C_{ii} = 25,17$ грн. Оскільки робота обладнання ведеться в три зміни, то сумарно буде задіяно три оператори однакової кваліфікації, але кожен працюватиме в свою зміну, тому приймаємо $m = 1$ чол.

Витрати на заробітну плату до і після модернізації однакові й дорівнюють:

$$S_{зпм} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 8220 \cdot 25,17 \cdot (1 + 0,22) \approx 410200 \text{ грн.}$$

4.5.2 Визначення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт установки визначимо за формулою:

$$S_{ТО} = S_{ТОЗ} + S_{ТОМ}, \quad (4.9)$$

де $S_{ТОЗ}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями, грн, $S_{ТОМ}$ – витрати на матеріали та запасні частини, грн.

До модернізації технічне обслуговування проводив один робітник четвертого розряду, а після модернізації система стала більш складною, тому її обслуговування повинен виконувати спеціаліст із розрядом не нижче п'ятого.

Витрати на заробітну плату ремонтним робітникам із нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{ТОЗ} = \frac{T_P}{T_{Ц}} K_{НВ} \lambda C_P \sum_{i=1}^m a_i \Psi_i (1 + H), \quad (4.10)$$

де C_P – середня тарифна ставка ремонтного робітника, $C_P = 25,17$ грн/год – для четвертого розряду і $C_P = 37,87$ грн/год – для п'ятого розряду, a_i – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту, Ψ_i – трудоемкість і-го технічного обслуговування та поточного ремонту, $\Psi_i = 1,57$.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{ТОМ} = K_{1n} \frac{S_{ТОЗ} (1 - H)}{K_{НЗ}} K_{ЗР}, \quad (4.11)$$

де K_{1n} – норма накладних витрат по всім видам витрат, крім заробітної плати, $K_{1n} = 1,1$, $K_{ЗР}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{ЗР} = 1,25$.

Таким чином, витрати на заробітну плату ремонтних робітників дорівнюють:

– до модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{8220}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 25,17 \cdot 6 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,22) = 476 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОЗ} = \frac{8220}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 37,87 \cdot 6 \cdot 1,57 \cdot (1 + 0,22) = 663 \text{ грн}.$$

Відповідно витрати на матеріали та запасні частини:

– до модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{476 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 392 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТОМ} = 1,1 \cdot \frac{663 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 547 \text{ грн}.$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт системи складають:

– до модернізації:

$$S_{ТО} = 476 + 392 = 868 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{ТО} = 663 + 547 = 1211 \text{ грн}.$$

4.5.3 Визначення витрат на електроенергію

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{ЕЛ} = K_{1n} W_{ЕЛ} Ц_{КЛ} T_P, \quad (4.12)$$

де $Ц_{ЕЛ}$ – ціна 1 кВт·год електроенергії для підприємств, грн, $W_{ЕЛ}$ – витрата за годину енергії, кВт·год.

Ціни на електроенергію для промислових підприємств навіть в межах України можуть дещо відрізнятися залежно від енергорозподільчої компанії та класу напруги (1-й або 2-й клас). Тому в якості орієнтиру приймемо $Ц_{ЕЛ} = 4,26$ грн. Така ціна зафіксована для побутових споживачів 1-го класу напруги в грудні 2021-го року на офіційному сайті ТОВ «Рівненська обласна енергопостачальна компанія».

Для підрахунку затрат на електроенергію визначимо споживану потужність обладнання для виробництва антисептиків. Установка періодичної дії типу *RS-2000* споживає 5,3 кВт, а установка неперервної дії *УСБ* – не більше 3 кВт.

Тоді витрати на електроенергію становлять:

– до модернізації:

$$S_{\text{ел}} = 1,1 \cdot 4,26 \cdot 5,3 \cdot 8220 = 204100 \text{ грн};$$

– після модернізації:

$$S_{\text{ел}} = 1,1 \cdot 4,26 \cdot 3 \cdot 8220 = 115600 \text{ грн}.$$

4.5.4 Розрахунок загальної суми річних витрат

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію установки виробництва антисептиків неперервної дії типу *УСБ* зводимо до таблиці 4.2.

Тут приводяться дані, розраховані в попередніх підрозділах економічної частини.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат, грн	
	До модернізації	Після модернізації
Заробітна плата з нарахуваннями	410200	410200
ТО та поточний ремонт	868	1211
Електроенергія	204100	115600
Всього	615200	526900

4.6 Розрахунок вартості машино-години роботи установки УСБ

Вартість машино-годин установки УСБ розраховуємо за формулою:

$$S_{MЧ} = \frac{S}{T_P}. \quad (4.13)$$

До модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{615200}{8220} = 74,84 \text{ грн / год},$$

після модернізації:

$$S_{MЧ} = \frac{526900}{8220} = 64,1 \text{ грн / год}.$$

4.7 Розрахунок вартості технологічної операції для одиниці продукції

Вартість технологічної операції для одиниці продукції визначається за формулою:

$$S_{1П} = \frac{S}{B}. \quad (4.14)$$

До модернізації:

$$S'_{1П} = \frac{205600}{16790} = 64,1 \text{ грн / м}^3.$$

після модернізації:

$$S_{1П} = \frac{526900}{36990} = 36,63 \text{ грн / м}^3.$$

4.8 Визначення економічного ефекту від проведення модернізації

Економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S'_{1II} - S_{1II})B. \quad (4.15)$$

Тоді

$$E = (64,1 - 36,63) \cdot 36990 \approx 828100 \text{ грн.}$$

Термін окупності витрат після модернізації визначимо за формулою:

$$T_M = \frac{Z_M}{E}. \quad (4.16)$$

Тоді

$$T_M = \frac{34140}{828100} \approx 0,041 \text{ року} = 0,5 \text{ місяця.}$$

4.9 Висновки за розділом 4

За результатами проведених у цьому розділі розрахунків можна зробити такі висновки:

- витрати на модернізацію склали 34140 грн;
- витрати на заробітну плату робітників, які обслуговували установку періодичної дії й будуть обслуговувати установку неперервної дії, не змінилися й складають 410200 грн;
- витрати на ТО і ПР після проведення модернізації збільшилися на 39,5%;
- витрати на електроенергію після проведення модернізації зменшилися на 43,4%;

- вартість машино-години роботи установки виробництва антисептиків типу УСБ після модернізації зменшилася на 14,4%;
- вартість технологічної операції для одиниці продукції після модернізації знижена на 42,9%;
- економічний ефект від проведення модернізації склав 828100 грн/рік;
- термін окупності витрат на модернізацію склав 0,5 місяця.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської роботи можна зробити наступні висновки.

1. Проаналізовано сучасний стан питання виробництва рідких антисептиків. За результатами проведеного аналізу встановлено, що однією з причин дефіциту антисептиків у розпал коронавірусу стало використання застарілих технологій виробництва, які реалізуються за рахунок установок періодичної дії. Огляд такого обладнання від українських і закордонних виробників показав, що його середня продуктивність є невисокою й рідко перевищує $1 \text{ м}^3/\text{год}$.

Одночасно на підприємствах спиртової промисловості не один рік для змішування води й спирту успішно використовуються установки неперервної дії типу УСБ. Їх модернізація за рахунок введення додаткового дозуючого каналу для ще одного компонента (гліцерину) дозволить використовувати обладнання з метою одержання антисептиків. Проте гліцерин є досить в'язкою речовиною, а його в'язкість навіть температурах $15\text{-}25^\circ\text{C}$ може змінюватися в три рази.

Практичне вирішення даної задачі потребує розробки САК, яка б забезпечувала необхідну подачу гліцерину в потоковому виробництві антисептиків незалежно від його в'язкості. Аналіз існуючих систем дозування показав, що такі САК доцільно будувати на базі шестеренного насоса, асинхронного двигуна, частотного перетворювача та адаптивно-модального регулятора.

2. Для практичної реалізації адаптивно-модального регулятора САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину розроблена математична модель об'єкта керування в просторі станів, яка враховує особливості шестеренного насоса, частотного перетворювача, двигуна та трубопроводу.

3. Для точної оцінки змінних стану об'єкта керування розроблено асимптотичний спостерігач стану, що дозволило обійтися без додаткових

датчиків та реалізувати модальне керування процесом подачі гліцерину в потоковому виробництві антисептиків.

4. Синтезовано модальний регулятор САК процесом подачі гліцерину. Порівняння якісних показників перехідного процесу САК з розробленим модальним регулятором і САК з ПІД-регулятором продемонструвало переваги першої системи (відсутність коливань, менший час перехідного процесу).

5. Комп'ютерне моделювання роботи САК з модальним регулятором продемонструвало, що він не забезпечує бажаної подачі при зміні в'язкості гліцерину. У зв'язку з цим була запропонована методика адаптації модального регулятора з використанням еталонної моделі. Дослідження САК з адаптивно-модальним регулятором підтвердило ефективність її роботи в різних режимах роботи (зміна рівня подачі та зміна в'язкості гліцерину).

6. Впровадження результатів, одержаних у магістерській роботі, дозволить удосконалити процес одержання антисептиків за рахунок реалізації неперервного виробництва й збільшення продуктивності, уникнувши таким чином дефіциту в розпал пандемій та епідемій небезпечних хвороб.

Очікуваний економічний ефект становить 828100 грн на одну установку неперервної дії в рік. Термін окупності капітальних вкладень складає 0,5 місяця.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. COVID Live Update [Електронний ресурс]. – Режим доступу: worldometers.info/coronavirus (дата звернення 01.08.2021) – Назва з екрана.
2. В Україні – перший випадок коронавірусу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: pravda.com.ua/news/2020/03/3/7242332 (дата звернення 01.08.2021) – Назва з екрана.
3. Ринок дезінфікуючих засобів в Україні – огляд Pro-Consulting [Електронний ресурс]. – Режим доступу: pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-dezinficiruyushih-sredstv-v-ukraine-obzor-pro-consulting (дата звернення 01.08.2021) – Назва з екрана.
4. Немченко А. Огляд розвитку виробництва антисептичних засобів в Україні / А. Немченко, В. Міщенко, О. Винник, Б. Данилюк // Young Scientist. – 2020. – №10. – С. 279-283.
5. Реактор 250 л для виробництва антисептиків [Електронний ресурс]. – Режим доступу: khimmix.ua/himicheskie-reaktory/reaktor-dlya-proizvodstva-antiseptikov (дата звернення 16.10.2021) – Назва з екрана.
6. Single layer mixing tank [Електронний ресурс]. – Режим доступу: flowtam.com/mixing-tank/single-layer-mixing-tank.html (дата звернення 16.10.2021) – Назва з екрана.
7. Установка змішуюча швидкодіюча УСБ-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: globecore.ua/produksiya/obladnannya-dlya-zmishuvannya/ustanovki-dlya-zmishuvannya-usb/ustanovki-dlya-kompaunduvannya-ralnogo-usb.html (дата звернення 17.10.2021) – Назва з екрана.
8. Насоси для гліцерину [Електронний ресурс]. – Режим доступу: debem.com.ua/ukr/examples/nasosy_dlya_vyazkikh_sred/glycerol (дата звернення 31.10.2021) – Назва з екрана.
9. Насос для перекачування гліцерину [Електронний ресурс]. – Режим доступу: vaterpass.ua/ua/nasos-dlya-perekachivaniya-glicerina (дата звернення 31.10.2021) – Назва з екрана.

10. Онушко В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.

11. Вибухозахищений електродвигун 4ВР 90 LA8 (0,75 кВт 750 об/хв) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: systemax.ua/ua/elektrodivigateli/vzryvozashishennye-elektrodivigateli/4vr/4vr90la8-0-75-kvt-750-ob-min.html (дата звернення 31.10.2021) – Назва з екрана.

12. Безручко В.М. Електричні машини та електропривод: методичні вказівки до практичних занять та розрахунково-графічної роботи для студентів напряму підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Безручко. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – 78 с.

13. Датчик тиску WIKA 0-10 бар 4..20 мА G1/4 роз'єм M12*1 тип O-10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: eta.org.ua/ua/p800377367-datchik-tisku-wika.html (дата звернення 07.11.2021) – Назва з екрана.

14. Борщ В.В. Частотно-регульований електропривод насоса дозування гліцерину в потоковому виробництві антисептиків / В.В. Борщ, О.Б. Борщ, В.С. Курило, В.О. Таран // Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика: збірник наукових праць за матеріалами VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика», 5 листопада, 2021 р. / Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – 2021. – С. 54–56.

55. Нелюба Д.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із курсу “Електропривід і автоматизація верстатів автоматів” для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми навчання / Нелюба Д.М., Гонтар М.М. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – 43 с.

ДОДАТКИ

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

***Розробка та дослідження частотно-
регульованого електропривода дозатора
установки для виробництва антисептиків***

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розробив студент групи 601 МЕ
Керівник магістерської роботи

В.С. Курило
В.В. Борщ

2021 рік

Мета і завдання роботи

Розробка та дослідження частотно-регульованого електропривода дозатора установки для виробництва антисептиків

Мета роботи: підвищення ефективності виробництва рідких антисептичних засобів шляхом розробки частотно-регульованого електропривода дозатора гліцерину та адаптивної САК електроприводом

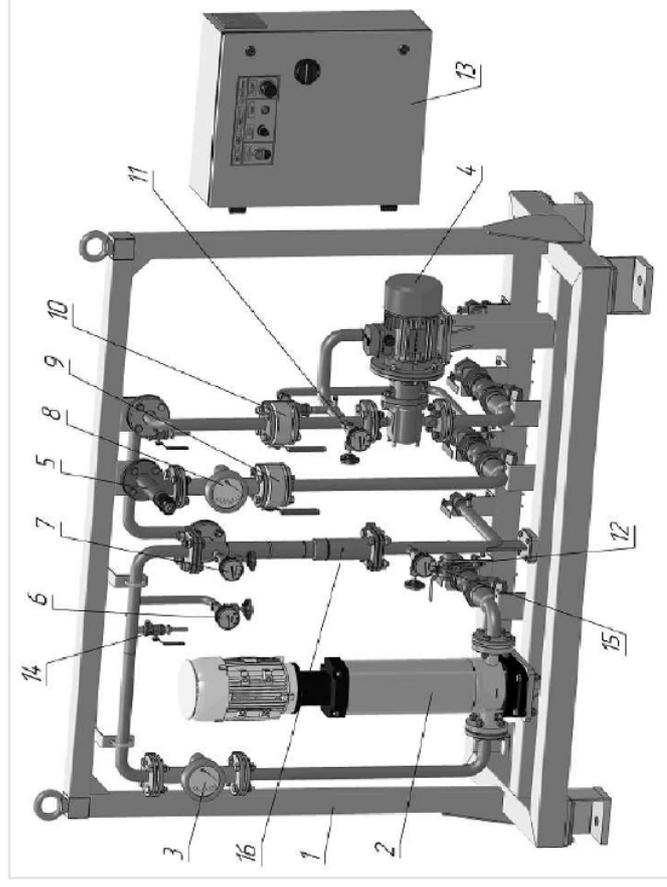
Основні завдання:

- 1. Проаналізувати стан питання виробництва рідких антисептичних засобів та обрати напрямок дослідження.*
- 2. Розробити математичну модель об'єкта керування (частотного перетворювача, привідного двигуна, насоса, трубопроводу) та розрахувати її параметри*
- 3. Виконати синтез ПІД-регулятора та модального регулятора САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину та дослідити ефективність їх роботи.*
- 4. Запропонувати методику адаптації модального регулятора та методом комп'ютерного моделювання дослідити адаптивну САК в різних режимах роботи (відпрацювання заданого тиску, зміна в'язкості гліцерину).*
- 5. Виконати економічну оцінку впровадження адаптивної САК тиском в трубопроводі подачі гліцерину.*

1. Зважування, відмірювання і забатаження компонентів.
2. Фільтрація етилового спирту (зазвичай через мембранний фільтр).
3. Дозування компонентів.
4. Змішування компонентів.
5. Відбір лабораторного зразка для перевірки якості готового продукту (за необхідності).
6. Розлив готового продукту в тару.
7. Закупорювання тари.

Загальний вигляд установки гідродинамічного кавітаційного змішування УСБ

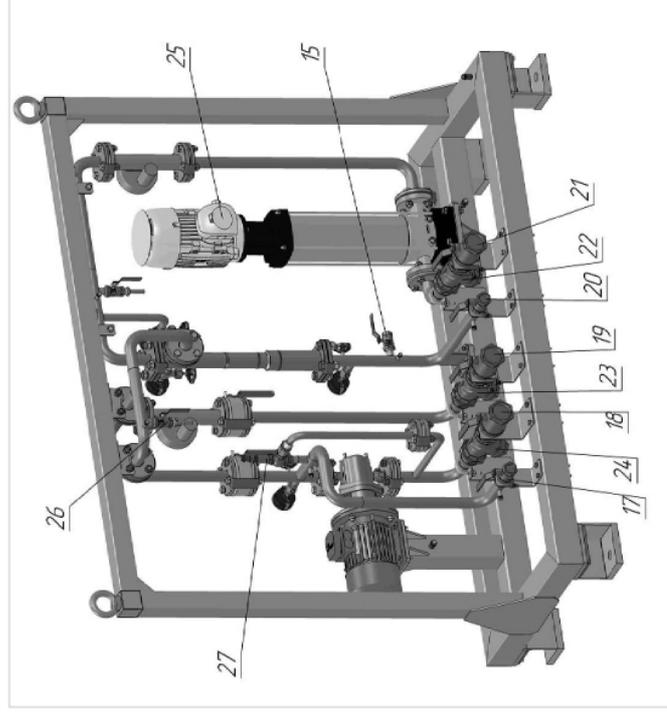
3



Вид спереду

Умовні позначення:

- 1 – Рама;
- 2, 4 – Насоси;
- 3, 8 – Ротаметри;
- 5 – Вентиль;
- 6, 11, 12 – Манометри;

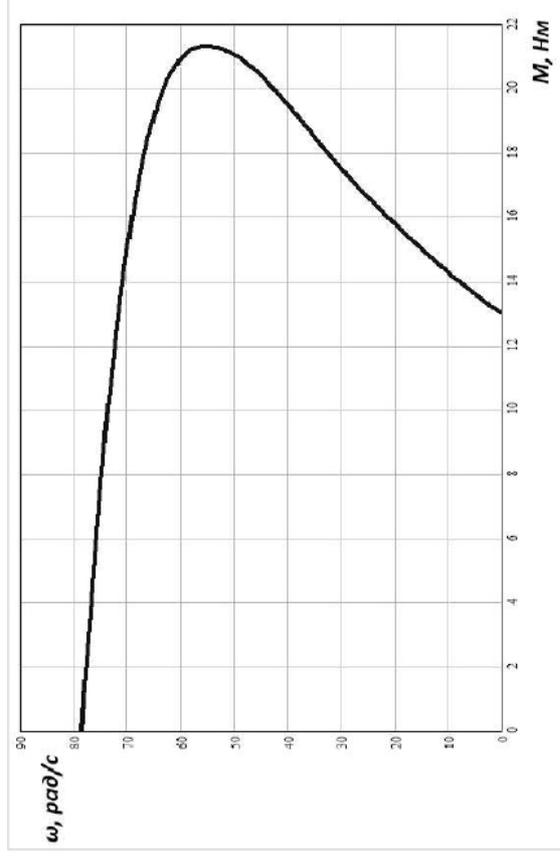


Вид ззаду

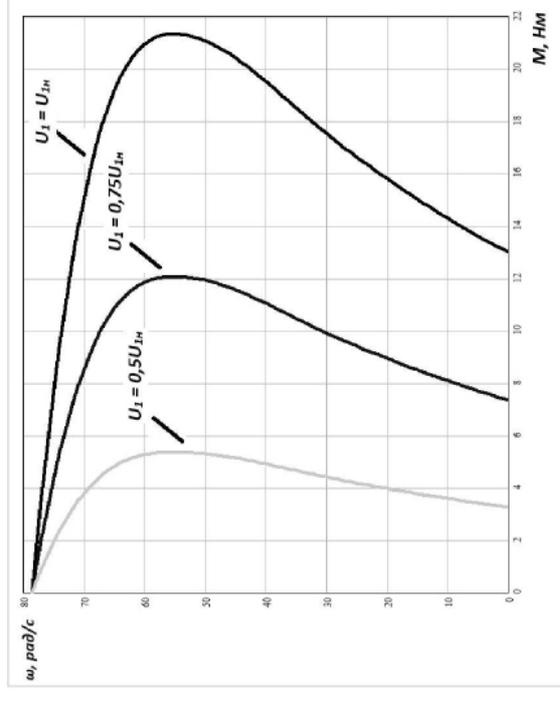
- 18, 19, 21 – Вхідні крани;
- 22, 23, 24 – Фільтри;
- 25 – Електропривід.

- 7 – Мановакууметр;
- 9, 10, 14, 15, 26 – Крани;
- 13 – Шафа керування;
- 16 – Гідродинамічний змішувач;
- 17, 20 – Вихідні крани;

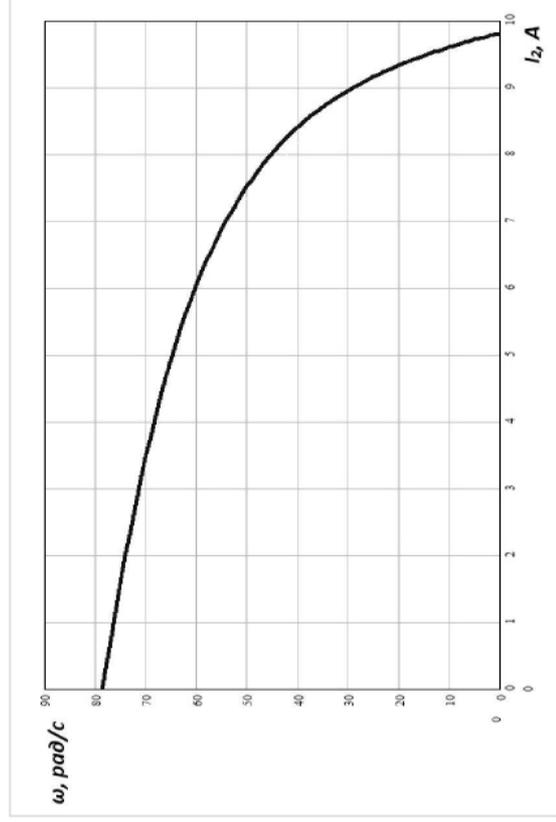
Механічні й електромеханічні характеристики двигуна



Графічна механічна характеристика двигуна $\omega(M)$



Шлунчі механічні характеристики двигуна $\omega(M)$



Електро-механічна характеристика двигуна $\omega(I_2)$

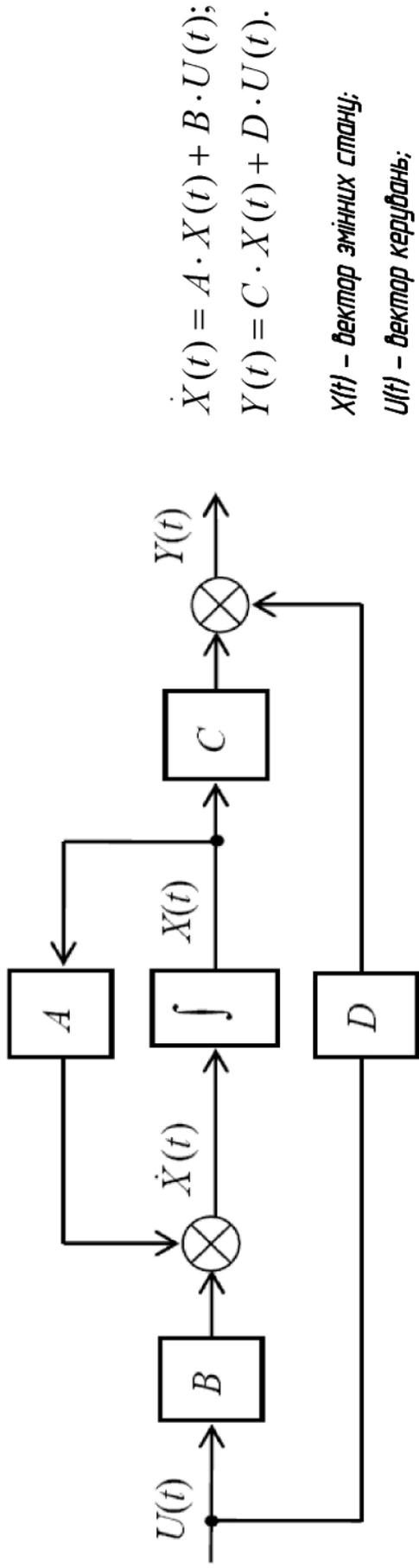
Основні технічні характеристики двигуна:

- номінальна потужність – 0,75 кВт;
- синхронна швидкість обертання – 750 об/хв;
- номінальне ковзання – 7%;
- номінальний струм – 2,3 А;
- коефіцієнт корисної дії – 70%;
- номінальний момент – 10,2 Нм.

Основні технічні характеристики насоса:

- продуктивність – 0,105 м³/год;
- тиск – до 4 бар;
- температура перекачуваної рідини – до 90°C;
- швидкість обертання валу – 700 об/хв.

Математична модель об'єкта керування (двигун, насос, частотний перетворювач, трубопровід) в просторі станів



$X(t)$ – вектор змінних стану;

$U(t)$ – вектор керувань;

$Y(t)$ – вектор виходу системи.

Відповідні матриці дорівнюють:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 \end{pmatrix};$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$C = (a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3);$$

$$D = d.$$

Значення коефіцієнтів:

$$d = a_3 = a_2 = a_1 = 0;$$

$$a_0 = \frac{K_{\text{ПЧ}} K_T K_H}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_0 = \frac{1}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_1 = \frac{T_H + T_{\text{ПЧ}} + T_M}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_2 = \frac{T_H(T_{\text{ПЧ}} + T_M) + T_M(T_E + T_{\text{ПЧ}})}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H};$$

$$b_3 = \frac{T_M T_H(T_{\text{ПЧ}} + T_E) + T_E T_M T_{\text{ПЧ}}}{T_E T_M T_{\text{ПЧ}} T_H}.$$

Параметри моделі:

K_H – коефіцієнт передачі насоса;

$K_{\text{ПЧ}}$ – коефіцієнт передачі перетворювача частоти;

K_T – коефіцієнт передачі трубопроводу;

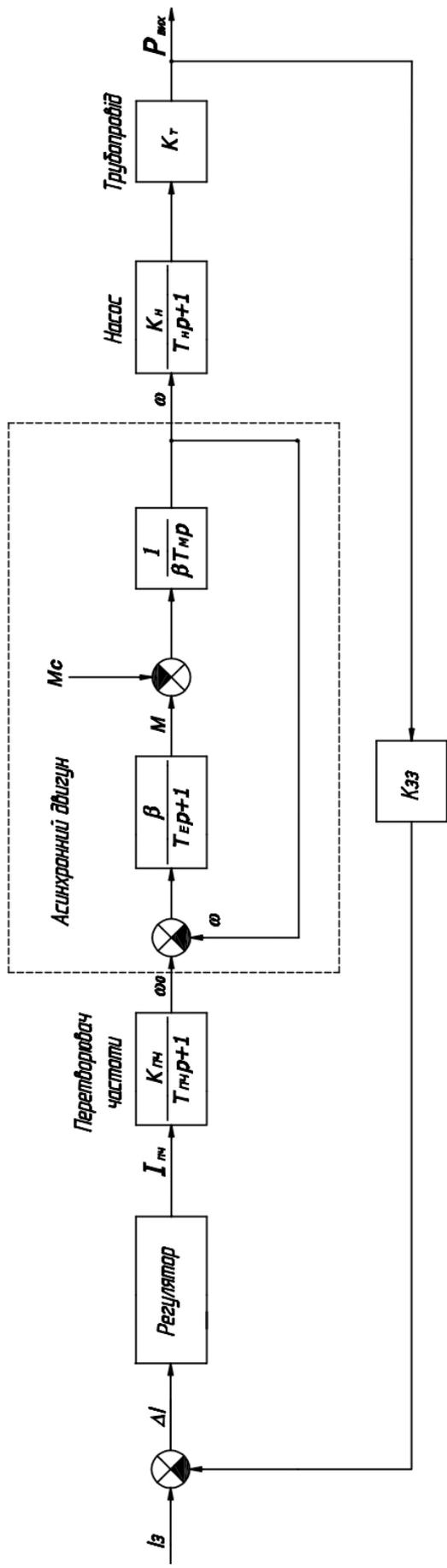
$T_{\text{ПЧ}}$ – стала часу перетворювача частоти;

T_M – електромагнітна постійна часу двигуна;

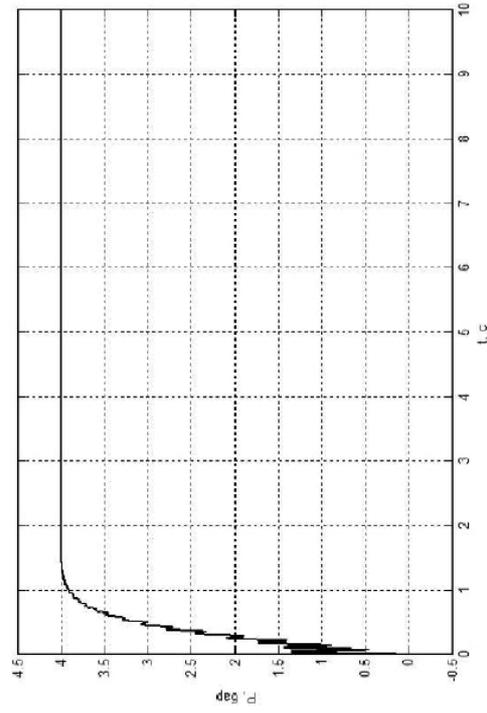
T_E – електромагнітна постійна часу двигуна;

T_H – постійна часу насоса

Дослідження САК з ПІД-регулятором тиску



Структурна схема одноконтурної САК з ПІД-регулятором тиску



Перехідний процес САК з ПІД-регулятором тиску

Чисельні значення параметрів моделі:

Пропорційна складова регулятора – 0,15; $T_{\epsilon} = 0,043$ с;

Інтегральна складова регулятора – 20,5; $T_{м} = 0,0031$ с;

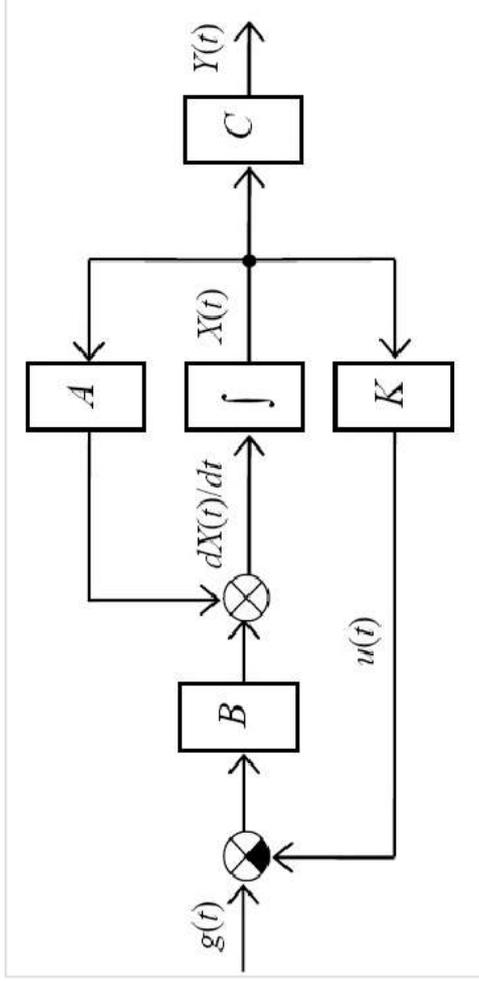
Диференціальна складова регулятора – 0,15; $T_{п} = 0,086$ с;

$K_{пч} = 3,92$ рад/А·с; $K_{п} = 3,69 \cdot 10^{-7}$ м³/рад; $K_{зз} = 5$ МА/бар.

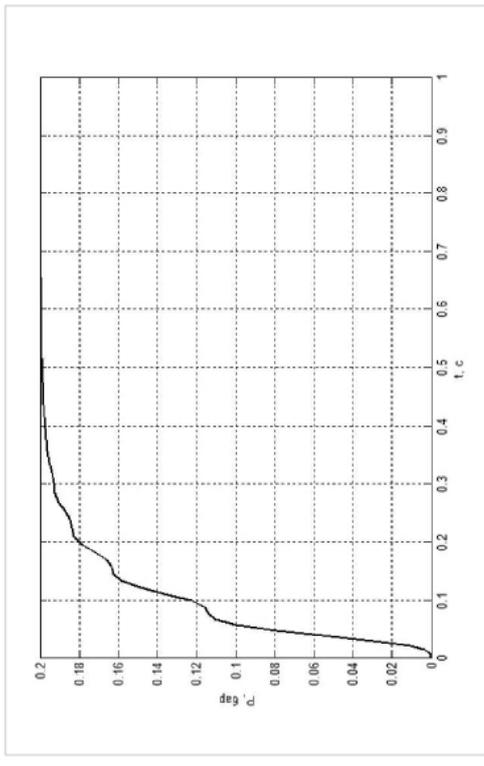
$T_{пч} = 0,006$ с; $K_{т} = 1,38 \cdot 10^5$ бар·с/м³;

$\beta = 1,996$;

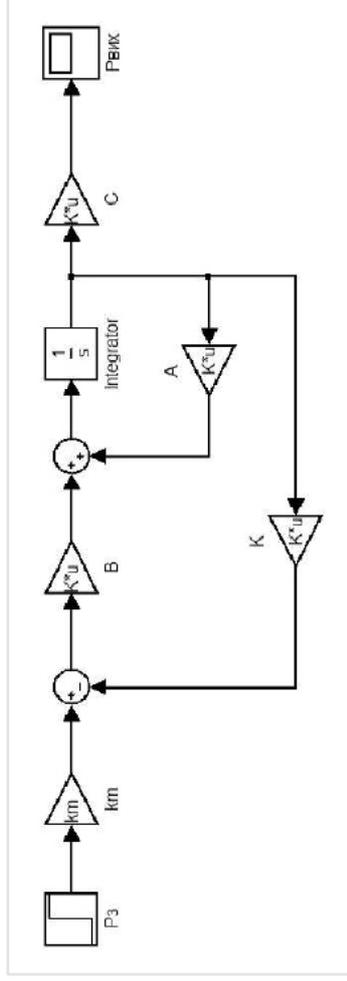
Дослідження САК з модальним регулятором



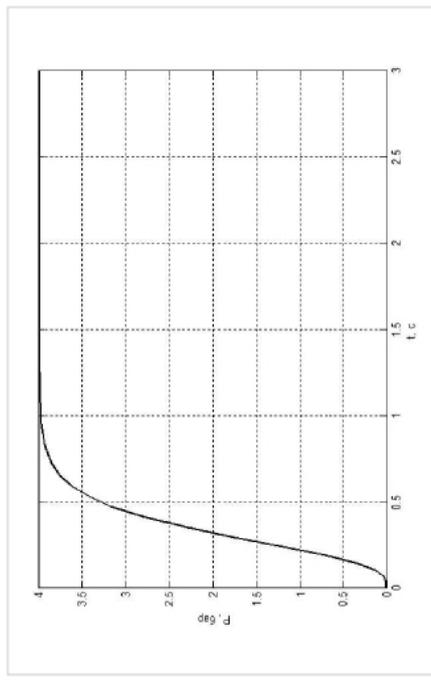
Структурна схема САК тиском з модальним регулятором



Перехідна характеристика об'єкта керування



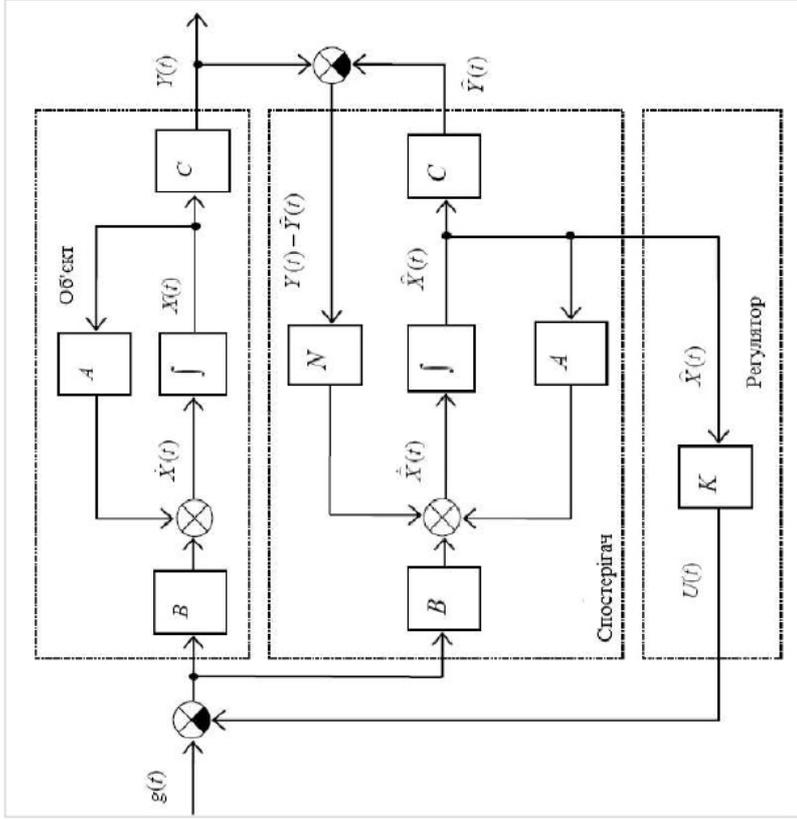
Моделююча схема САК у середовищі Simulink MATLAB



Перехідний процес САК з модальним регулятором

по тиску

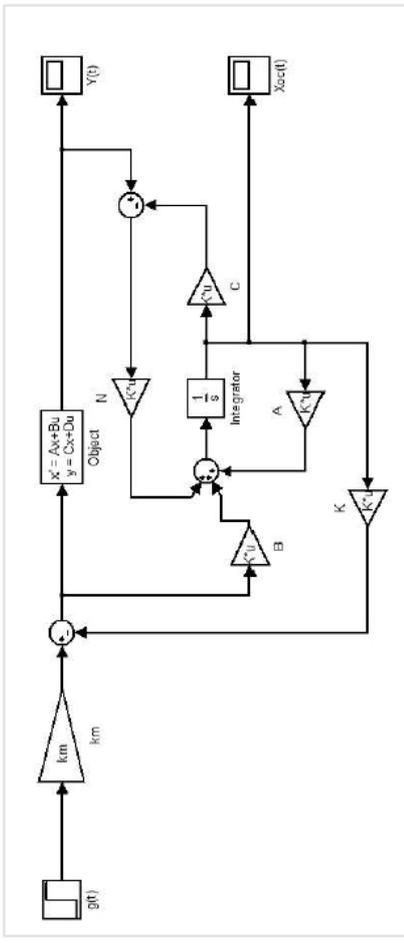
Дослідження САК з модальним регулятором та спостерігачем стану



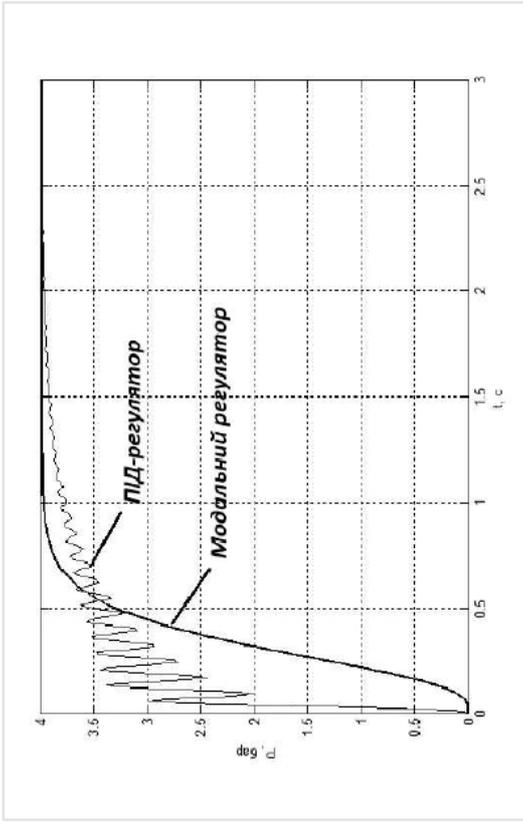
Структурна схема САК подачею гліцерину з спостерігачем стану повного порядку і модальним регулятором

Матриця параметрів спостерігача стану:

$$N=10 \quad 0,004 \quad -0,7571 \quad 14,5,29$$



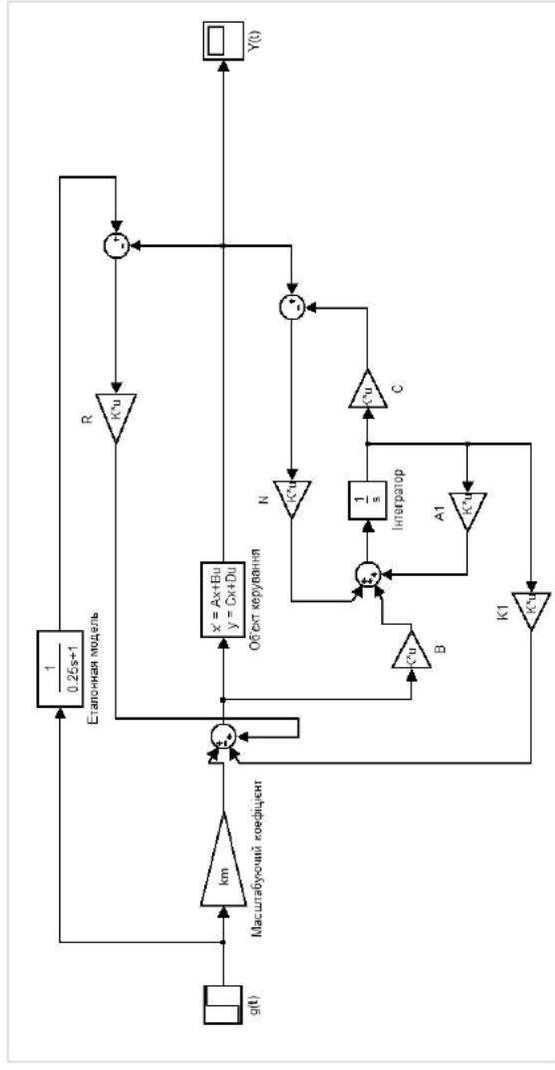
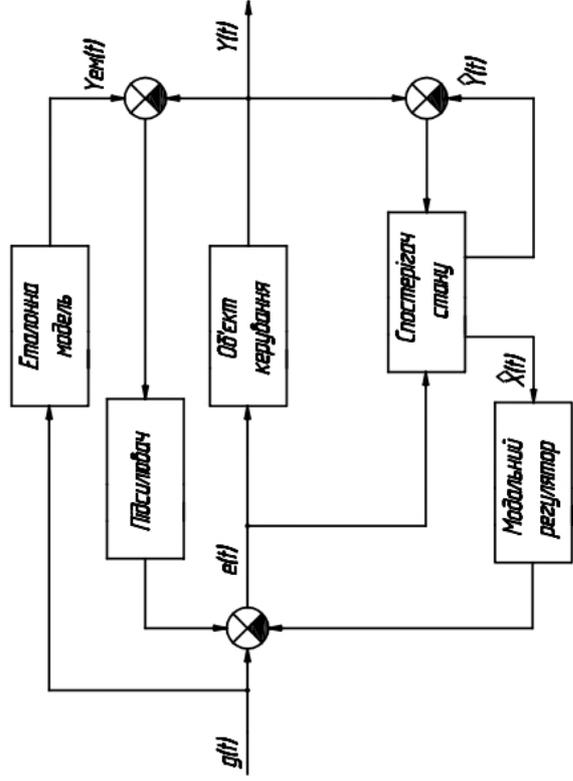
Моделююча схема САК у середовищі Simulink MATLAB



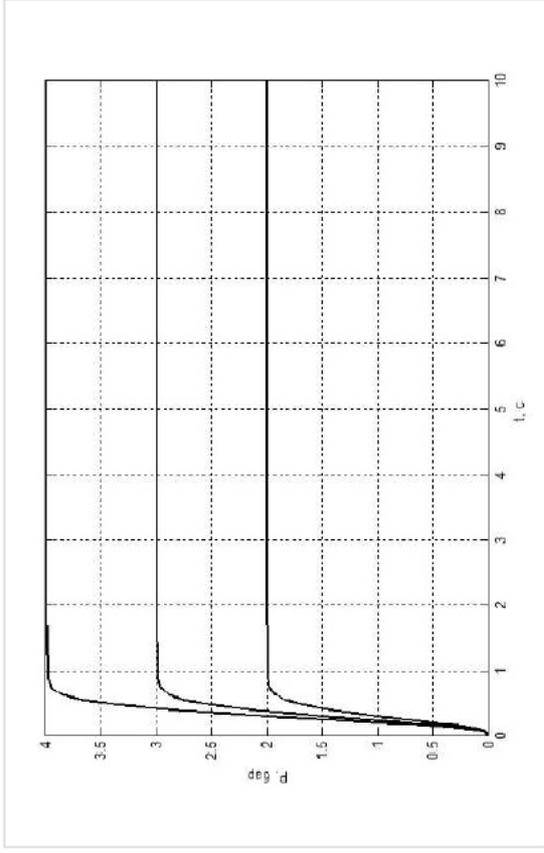
Перехідні процеси САК з ПІД-регулятором та модальним регулятором з спостерігачем стану по тиску

Дослідження адаптивної САК

9

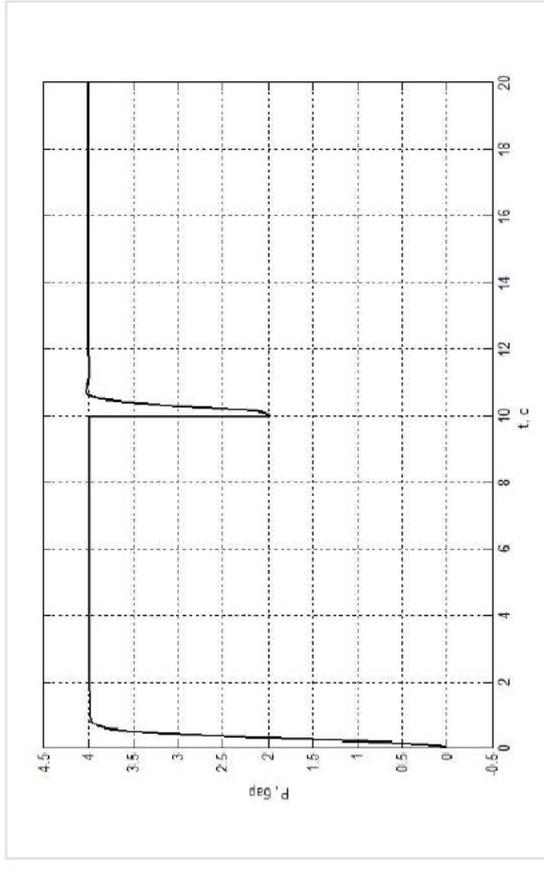


Структурна схема адаптивної САК подачею гліцерину



Відпрацювання адаптивною САК ступінчатих впливів 2,3 і 4 бар

Моделююча схема адаптивної САК у середовищі Simulink MATLAB



Відпрацювання адаптивною САК різкого зменшення тиску

Методики синтезу й адаптації модального регулятора



№	Показники	Одиниця виміру	Значення		Абсолютне відхилення
			До модернізації	Після модернізації	
1	Капітальні витрати на модернізацію	грн	-	34140	-34140
2	Річний фонд часу роботи	годин	8220	8220	-
3	Річна експлуатаційна продуктивність	м ³ /рік	16790	36990	+20200
4	Річні експлуатаційні витрати:	грн	615200	526900	-88300
5	- витрати на зарплату;	грн	410200	410200	-
6	- витрати на ТО та поточний ремонт;	грн	868	1211	+343
7	- витрати на електроенергію	грн	204100	115600	-88500
8	Вартість однієї машино-години роботи	грн/год	74,84	64,1	-10,74
9	Вартість технологічної операції	грн/м ³	64,1	36,63	-27,47
10	Річний економічний ефект	грн	-	828100	-
11	Строк окупності капітальних вкладень	років	-	0,04	-

Дякую за увагу!