

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

бакалавр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Модернізація системи автоматизованого обліку газу для УМГ
«Прикарпаттрансгаз»

Виконав: студент 2 курсу, групи 201-пМЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Студент Єндяров Є.О

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Свинцицький

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2021 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи бакалавра

«Модернізація системи автоматизованого обліку газу для УМГ

«Прикарпаттрансгаз»

Робота містить 55 сторінок, 7 плакатів, 22 використаних джерел.

Ключові слова: вимірювальний комплекс, облік газу, електропривод, кроковий двигун, система автоматичного керування.

Проведена модернізація автоматизованої системи обліку газу дозволяє значно покращити точність та надійність цього процесу. Встановлена завданням допустима статична похибка вимірювального комплексу не більше 1% при вимірюванні витрати газу не змінюється, але практично усувається (до 0,5%) час роботи вимірювальних перетворювачів за межами допустимих параметрів, що, згідно практичних спостережень, складає від 3 до 7% загального часу роботи. Це досягається шляхом використання електропривода для перемикання засувки і, таким чином, зміни ефективного перерізу вимірювального трубопроводу відповідно до обсягів споживання (витрати) газу.

Дослідження модернізованої САК показали, що система стійка за критеріями Михайлова і Гурвіца. Про це також свідчать і логарифмічні частотні характеристики, що мають достатні запаси по амплітуді та фазі.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання в газотранспортній системі України.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій**

_____ О.В. Шефер
“ 11 ” травня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Єндіярову Єгору Олександровичу

1. Тема роботи «Модернізація системи автоматизованого обліку газу для УМГ «Прикарпаттрансгаз»
керівник роботи Єрмілова Наталя Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2021 року № 158 -фа

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.06.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) технічна документація на вузол автоматизованого комерційного обліку витрати газу. Діаметри трубопроводів 80 та 100 мм. Передбачити витрату газу в основному трубопроводі у межах 70-3000 м³/год, в резервному 50-1200 м³/год, тиск у трубопроводах 1,5 – 6 кгс/см². Забезпечити належну точність обліку при підвищеній витраті газу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Опис функцій та технічних характеристик вимірювального комплексу. Аналіз недоліків системи обліку газу та постановка задач на кваліфікаційну роботу. Розрахунок ЕП засувки. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна. Модернізація схеми системи обліку газу. Розрахунок елементів схеми. Розроблення функціональної схеми автоматизації системи. Побудова структурної схеми САК. Визначення передавальної функції САК. Побудова та аналіз характеристик САК. Визначення якісних параметрів та стійкості системи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) загальний вигляд системи;
- 2) структурна та принципова схема модернізованого комплексу;
- 3) принципова схема керування ЕП засувки;
- 4) функціональна схема автоматизації;
- 5) структурна схема САК;
- 6) характеристики САК.

6. Дата видачі завдання 11.05.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата початку	Категорія	Відсоток виконання	
1	Опис функцій та технічних характеристик вимірювального комплексу. Аналіз недоліків системи обліку газу та постановка задач на кваліфікаційну роботу.	18.05.21		25%	Пл. 1
2	Розрахунок ЕП засувки. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна. Модернізація схеми системи обліку газу. Розрахунок елементів схеми.	26.05.21	I	50%	Пл. 2
3	Розроблення функціональної схеми автоматизації системи.	02.06.21		60%	Пл. 4
4	Побудова структурної схеми САК. Визначення передавальної функції САК. Побудова та аналіз характеристик САК. Визначення якісних параметрів та стійкості системи.	09.06.21		80 %	Пл. 5
5	Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	15.06.21	II	100%	Пл. 6

Студент _____

(підпис)

Єндяров Є.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Зміст

	Арк.
Вступ.....	5
1 Технологічна частина.....	6
1.1 Загальні положення.....	6
1.2 Будова і робота установки.....	10
1.3 Принцип роботи привода типу ПСВ-50/16.....	15
2 Конструкторська частина.....	19
2.1 Розрахунок потрібної компресорної установки.....	19
2.2 Підбір електродвигуна компресора.....	24
2.2.1 Мета вибору електродвигуна.....	24
2.2.2 Вибір електродвигуна для приводу компресора.....	24
2.2.3 Розрахунок пускових реакторів в колі статора.....	31
2.2.4 Розрахунок трифазного мостового некерованого випрямляча.....	34
2.2.5 Розрахунок керованого випрямляча.....	35
2.2.6 Розрахунок автономного інвертора напруги.....	41
2.3 Опис схеми керування компресорної установки.....	45
2.4 Розрахунок і вибір силових елементів перетворювача.....	50
2.4.1 Розрахунок і вибір вентилів.....	50
2.4.2 Розрахунок і вибір згладжувального дроселя.....	53
2.5 Розрахунок і вибір елементів захисту силового кола.....	54
2.5.1 Захист тиристорів від перенапруг.....	54
2.5.2 Захист тиристорів від перевантаження та струму короткого замикання.....	55
3 Дослідницька частина.....	56
3.1 Синтез регуляторів САР електроприводу ТПЧ-АД методом узагальненого характеристичного полінома.....	56
3.2 Оцінка параметрів роботи за допомогою ПЕОМ.....	68

3.3 Визначення стійкості системи.....	70
3.4 Перехідна функція замкненої системи.....	73
Висновки.....	97
Література.....	99
Додатки.....	102

Вступ

Управління магістральних газопроводів (УМГ) „Прикарпаттрансгаз” є одним з найбільших підприємств газотранспортної системи України. Значні об’єми транспортування природного газу магістральними газопроводами, як власним споживачам, так і на експорт в країни Західної Європи, вимагають особливої уваги точності та достовірності обліку природного газу, що насамперед визначається наявністю сучасних технічних засобів і відповідних методик вимірювання витрати природного газу. На даний час транспортування природного газу в УМГ “Прикарпаттрансгаз” здійснюється магістральними газопроводами та газопроводами-відгалуженнями загальною протяжністю в односторонньому обчисленні біля 5 тис. км.

Магістральні газопроводи і газопроводи-відгалуження, що експлуатуються УМГ “Прикарпаттрансгаз”, пролягають через території 7 областей України і забезпечують надійну подачу природного газу споживачам Івано-Франківської, Одеської, Чернівецької, Закарпатської та частково Тернопільської областей. Через систему магістральних газопроводів УМГ “Прикарпаттрансгаз” газ подається на експорт в країни Європи через газовимірювальну станцію (ГВС) „Ужгород”, ГВС „Берегове” та ГВС „Теково”, в країни Балканського регіону через ГВС „Орлівка”, в Молдову через ГВС „Олексіївка”, ГВС „Гребеники” та пункт вимірювання витрати газу (ПВВГ) „Лиманське”.

З метою збільшення обсягів транспортування природного газу та підвищення достовірності обліку проведено будівництво ПВВГ-2 на ГВС „Орлівка” на газопроводі АІ-2 Турецького напрямку та проводяться роботи по реконструкції існуючої ГВС „Орлівка”. Всі прикордонні ГВС оснащені основною і дублюючою системами обліку газу з використанням методу, що базується на змінному перепаді тиску на стандартному звужуючому пристрої – діафрагмі на базі вимірювальних комплексів SuperFlo ІІЕ і Флоутек з вимірювальними перетворювачами перепаду тиску класу точності 0,1 та вимірювальними перетворювачами температури - класу точності 0,3 згідно вимог „Технічної угоди” між ВАТ „Газпром”, НАК „Нафтогаз України” та АТ

„Молдовагаз”. Вимоги, встановлені ДК „Укрансгаз” до пунктів прийому-передачі газу на магістральних газопроводах в Україні, наближаються до вимог на прикордонних пунктах. Те ж саме стосується і пунктів вимірювання витрати природного газу, що закачується на зберігання в підземні сховища, а потім відбирається з них до газотранспортної системи. Сімнадцять газокompресорних станцій УМГ «Прикарпаттрансгаз» обладнані загальними системами обліку газу та системами автоматичного керування.

Вимірювальний комплекс “Флоутек” широко використовується при подачі блакитного палива як для промислових споживачів, так і для населення. Його особливістю є відносна простота технології обліку та зручність застосування. До плюсів можна віднести й те, що даний вимірювальний засіб повністю розроблено та спроектовано вітчизняною промисловістю (ПП “ТЕС” в співпраці з ВАТ “Укргазтех”), що значно знижує витрати на обслуговування та підвищує оперативність реагування у випадку потенційної поломки чи пошкодження котроїсь із складових комплексу.

Актуальність теми полягає в тому, що невід’ємною частиною експлуатації існуючих свердловин є коливання вмісту складових природного газу. Це зумовлює погіршення точності обліку та пов’язану з цим проблематику правового характеру. Існуючою особливістю енергетичного сектору є велика вага інвестиційної складової в структурі собівартості, тому дуже важливо економно модернізувати та підвищувати точність обліку, базуючись на вже існуючих системах. Це дозволить вирішити такі задачі, як підвищення ефективності функціонування газорозподільчої системи та інтегрування паливно-енергетичного комплексу в систему раціонального енергокористування.

Метою даної роботи є модернізація системи автоматизованого обліку газу, для чого необхідно вирішити завдання встановлення на входах вимірювальних трубопроводів додаткових засувок з відповідними комплектами датчиків, керованих електроприводом на базі крокового двигуна. Система керування здійснюватиме контроль за поточним значенням показників, що вимірюються.

1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Призначення та функції вимірювального комплексу

Система обліку газу [1], що експлуатується в УМГ “Прикарпаттрансгаз” являється засобом вимірювальної техніки і призначена для:

- вимірювання параметрів природного газу, що проходить по одному, чи двом вимірювальним трубопроводам;
- обчислення об'ємної витрати та об'єму газу приведених до нормальних умов;
- демонстрації результатів вимірів та обчислень на візуалізуючому пристрої коректора та екрані дисплея ЕОМ, а також у вигляді роздрукованих звітів чи протоколів.

Дана система забезпечує:

- вимір через рівні задані проміжки часу температури й абсолютного (або надлишкового) тиску газу, що проходить по вимірювальному трубопроводу (ВТП);
- вимір через рівні задані проміжки часу перепаду тиску газу на стандартному звужуючому пристрої, установленому в ВТП;
- вимір об'ємної витрати газу;
- обчислення витрати й обсягу газу, наведених до нормальних умов, із заданою періодичністю;
- обчислення значень обсягу газу й середніх значень температури, тиску, перепаду тиску й щільності газу за заданий оперативний інтервал часу підсумовування й усереднення вимірювальної інформації, за оперативний інтервал часу тривалістю 1 година і за добу;
- можливість виводу на цифровий індикатор і перегляду результатів вимірів й обчислень із вказівкою номера ВТП, найменування параметра й одиниці виміру фізичної величини;
- можливість зберігання в пам'яті обчислювача добових й оперативних даних у вигляді записів, що містять значення обсягу й середніх значень

температури, тиску, перепаду тиску й щільності газу за заданий оперативний інтервал часу (15-45 доби), за годинний інтервал (15-45 доби) і за щодоби (32-96 доби) при кількості записів оперативних даних по кожному трубопроводі не менш 752-2256;

- дату та час початку й кінця періоду, до якого ставляться дані;
- виявлення й фіксацію в часі не менш 800 відхилень від нормальної роботи, у тому числі:
 - несправності складових частин вимірювальної системи й ліній зв'язку;
 - вихід вимірюваних параметрів за межі робочих діапазонів вимірювальних перетворювачів і повернення цих параметрів у робочі діапазони;
 - вихід за припустимі межі (при комерційному обліку газу) абсолютного тиску, температури й щільності газу, співвідношення перепаду тиску й абсолютного тиску газу;
 - зміна констант або заміну обмірюваних значень параметрів на константи й навпаки (втручання оператора);
 - аварійне зниження напруги електричного живлення;
 - можливість взаємодії з оператором за допомогою ПЕОМ;
 - можливість обміну інформацією з ПЕОМ верхнього рівня по телефонному комутованому каналу, чи виділеній двопровідній лінії, чотирипровідній лінії або по радіоканалу;
 - формування на базі архівних даних добового й місячного звітів, протоколів внесення змін на згадку обчислювача й реєстрації позаштатних ситуацій.

Система обліку газу оснащена цифровими вимірювальними перетворювачами, що підвищує стійкість та точність вимірів, виключаючи із процесу вимірів вплив шумів в лінії зв'язку з обчислювачем. Використання таких датчиків також спрощує процес повірки, так як виключає з неї лінії зв'язку, до того ж використані датчики не потребують періодичної корекції нуля протягом всього міжповірочного інтервалу, який складає два роки;

вимірювальний комплекс перекриває максимальний діапазон вимірювань одним комплектом датчиків.

Програмне забезпечення, що використовується в даній системі обліку газу, дозволяє здійснювати дистанційний запит до обчислювача, створювати на віддалених ПК бази даних по споживанню газу для аналізу та перевірок за необмежений проміжок часу.

1.3 Робота системи обліку газу та її технічні характеристики

Принцип дії системи базується на вимірюванні параметрів газу в трубопроводі при встановленому стандартному звужуючому пристрої та послідовному обчисленні витрати та об'єму газу, що пройшов по вимірюваному трубопроводу.

Багатопараметричні перетворювачі (рис.1.1) забезпечують одночасне вимірювання та перетворення абсолютного тиску, різниці тисків та температури газу в цифрові електричні вихідні сигнали. Конструкція перетворювачів забезпечує вимірювання тиску при подачі газу безпосередньо у вимірювальні камери [10].

Електричні сигнали постійного струму від перетворювачів тиску та температури надходять в обчислювач і, згідно заданих алгоритмів обчислювач формує та зберігає масиви інформації по вимірюваним та обчислювальним параметрам. Збережену обчислювачем інформацію можна зчитувати на ЕОМ, а також роздруковувати звіти та протоколи.

Модем забезпечує цифровий зв'язок обчислювача з ЕОМ чи з іншим модемом для автоматичного прийому-передачі даних програмування обчислювача та калібрування каналів вимірювання параметрів газу. Результати вимірювань і обчислень можна передати на відстань по інтерфейсу RS-232C.

Живлення здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму. Подача напруги живлення в перетворювачі різниці тисків здійснюється через бар'єр БИ-3. Він розділений на дві зони (умовно) – вибухонебезпечну та вибухобезпечну. Схема розв'язку та узгодження RS-232C сигналів дозволяє організувати двонаправлений швидкісний обмін даними між цими зонами.

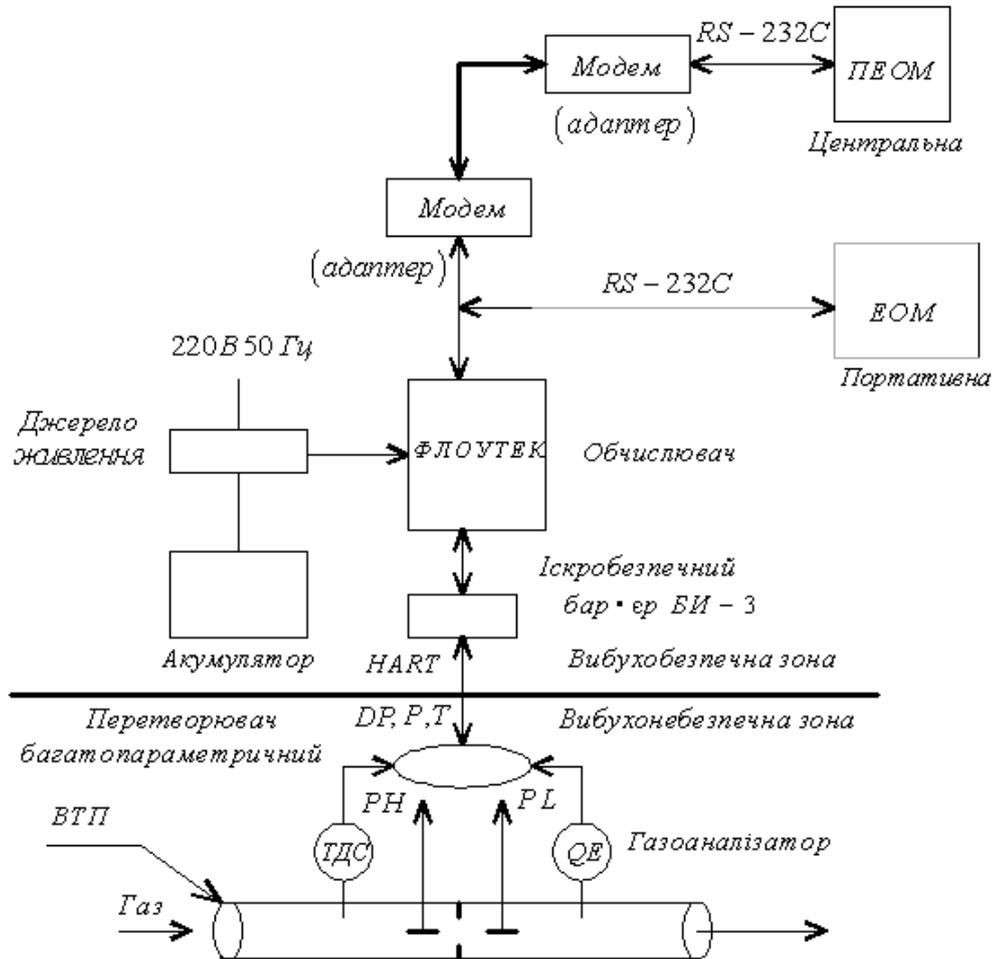


Рисунок. 1.1 - Структурна схема вимірювального комплексу

Вибухобезпечність вихідних електричних кіл бар'єра БИ-3 досягається за рахунок обмеження напруги та струму до іскробезпечних значень. Режим роботи системи обліку газу безперервний.

Основні технічні характеристики вимірювальних комплексів даного класу:

- внутрішній діаметр трубопроводу, по якому проходить газ, від 50 до 1000 мм;
- діапазон значень верхньої межі виміру абсолютного тиску від 0,1 до 10 МПа (можливість встановлення);
- діапазон значень верхньої межі виміру надлишкового тиску від 0,0063 до 10,5 МПа (можливість встановлення);
- діапазон значень верхньої межі виміру різниці тисків від 0,63 до 62 кПа;
- діапазон виміру температури газу від -40 до $+80^{\circ}\text{C}$.

Межі допустимої основної приведенної похибки при вимірюванні абсолютного чи надлишкового тиску газу не перевищують 0,15% від верхньої межі вимірів. Межі допустимої відносної похибки обчислювача при обчисленні об'ємної витрати та об'єму газу не більше $\pm 0,02\%$.

Автоматизований вузол комерційного обліку витрати природного газу складається із наступних вузлів:

- діафрагми та термоперетворювачів опору ТСМ, що розміщені безпосередньо на вимірювальному трубопроводі, та з'єднанні з обчислювачем через БИ-3;
- багатопараметричних вимірювальних перетворювачів ПМ-3, що розміщені на стіні кімнати оператора;
- вимірювальних камер (сенсорів) багатопараметричних перетворювачів, що підключенні до трубопроводу з діафрагмою за допомогою імпульсних ліній через трьохвентильний блок;
- трьохвентильного блоку, що містить два відсікаючих та один вирівнюючий вентиль, а для викиду газу в атмосферу при проведенні профілактичних робіт використовується штуцер із заглушкою;
- обчислювача (та інших приладів комплексу) розміщених у вибухобезпечній зоні;

- вибухобезпечного бар'єру, розміщеного у приміщенні операторної кімнати у вибухобезпечній зоні.

Один вимірювальний комплекс може одночасно обслуговувати до трьох вимірювальних трубопроводів. Він може працювати в наступних режимах:

- режим вимірювань;
- режим конфігурування;
- режим введення в пам'ять обчислювача параметрів номінальної статичної характеристики перетворення по кожній величині, що вимірюється.

Вибір режиму та тривалість роботи в ньому визначається оператором.

В режимі вимірювань здійснюється отримання, обробка та зберігання інформації, пов'язаної з основним функціональним призначенням вимірювального комплексу. В режимі конфігурування здійснюється конфігурування обчислювача під заданий об'єкт вимірювання витрати та об'єму газу. В режимі введення в пам'ять обчислювача параметрів номінальної статичної характеристики перетворення по кожній з вимірюваних величин здійснюється калібрування каналів вимірювання обчислювача під дані екземпляри вимірювальних перетворювачів перепаду тиску, тиску, температури та густини. Режими конфігурування та введення в пам'ять обчислювача параметрів номінальної статичної характеристики перетворення потребують присутності обслуговуючого персоналу. Режим вимірювань автоматичний та не потребує присутності обслуговуючого персоналу.

1.4. Недоліки системи та постановка задач на кваліфікаційну роботу

На існуючих в Івано-Франківській, Одеській, Чернівецькій, Закарпатській та Тернопільській областях родовищах газу, внаслідок їх досить тривалої експлуатації, можливі відносно різкі зміни концентрації

супутніх газів протягом доби. Оскільки при існуючій моделі експлуатації комплексу вміст CO_2 та N_2 заноситься в пам'ять обчислювача спеціалізованою комісією один раз протягом місяця за результатами вибіркового заміру їх вмісту в трубопроводі, то можливе досить значне відхилення значень облікованого газу від реальних. Для корекції вмісту основних супутніх газів у трубопроводі в реальному часі доцільно встановити спеціалізований газоаналізатор, інтерфейс для підключення якого передбачено в електронній схемі обчислювача.

Експериментально встановлено коливання об'єму проходження газу по трубопроводу в залежності від експлуатаційного режиму родовища. Оскільки похибка обліку газу при комерційному режимі регламентована і складає:

- в діапазоні витрат від Q_{\min} до $0,2 \cdot Q_{\min}$ $\pm 2,0\%$;
- в діапазоні витрат від $0,2 \cdot Q_{\max}$ до Q_{\max} $\pm 1,0\%$,

то існує неточність обліку на границях допустимих меж (згідно стандартів, для комерційного обліку газу, максимальна допустима похибка не повинна перевищувати $\pm 1,0\%$).

Для усунення цього недоліку та підвищення меж вимірювання об'ємної витрати та об'єму газу рекомендується внести зміни у вимірювальну систему шляхом встановлення паралельно двох засувок, керованих електроприводом на базі крокового двигуна на входах вимірювальних трубопроводів (аналогічно – на виходах) з відповідними комплектами датчиків. ВТП мають різні діаметрами отвору діафрагми на звужуючому пристрої. Система керування здійснюватиме контроль за поточним значенням показників, що вимірюються. При наближенні їх до значення, при якому даний режим роботи ВТП не може забезпечити належної точності вимірювання, вона буде приймати рішення про:

- автоматичне переключення на трубопровід з іншим діаметром отвору діафрагми (отже, і з іншими межами вимірювань), та здійснить його за допомогою засувки, що керується електроприводом;

- автоматичне включення обох ВТП для забезпечення належної точності обліку при підвищеній витраті газу;

- регулювання тиску газу у ВТП шляхом руху засувки при наближенні вимірювального показника до границі заданої точності вимірювань у даному ВТП, але забезпечуючи необхідну витрату газу (використовується при спільній роботі двох ВТП)

В даній системі для передачі сигналу між вимірювальними перетворювачами та обчислювачем використовується цифровий сигнал, фізичний та канальний (передачі даних) рівні якого згідно моделі OSI забезпечуються «відкритим» HART – протоколом. Даний протокол добре адаптований для зв'язку між периферійними пристроями та обчислювачем, але має недоліки у вигляді слабкого захисту від помилок при передачі даних. Необхідно розрахувати теоретичне зростання загальної точності вимірювання через зменшення помилкових пакетів даних (обчислювач здійснює опитування вимірювальних перетворювачів раз в 1 чи 2 сек, в залежності від установок, заданих при конфігуруванні). В роботі пропонується ввести в специфікацію HART-протоколу стандартний алгоритм контролю з використанням циклічного надлишкового коду CRC-16.

“Слабким” місцем існуючої системи вимірів є наявність аналогового датчика вимірювання температури, сигнал з якого оцифровується безпосередньо в обчислювачі.

При значних перепадах температури атмосферного повітря існує вплив опору з'єднувальних проводів (між датчиком та обчислювачем) на кінцеві показники витрати газу. Для усунення даного недоліку вважаємо за доцільне встановити плату АЦП безпосередньо в корпус датчика, таким чином нівелюючи опір з'єднувальних проводів та зменшуючи похибку.

2. РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1. Розрахунок засувки з висувним шпинделем

Спочатку визначаємо зусилля на вісі та обертовий момент на шпинделі.

У даній системі обліку газу використовуються засувки типів 30с41нж та 3076нж з наступними параметрами: внутрішній діаметр герметизуючого кінця $D_b = 0,45$ м, зовнішній діаметр герметизуючого кільця $D_n = 0,55$ м, ширина герметизуючого кільця $b = 0,05$ м. Найбільше осьове зусилля на шпинделі виникає в момент закриття засувки, коли на клин зі сторони входу середовища діють наступні сили:

- сила тиску середовища (при максимально можливому значенні, вище якого спрацює запобіжний клапан)

$$P = p\pi \left(D_b + \frac{2}{3}b \right)^2 / 4 = 16 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot (0,45 + 2/3 \cdot 0,05)^2 / 4 = 2931509,57 \text{ Па}, \quad (2.1)$$

де p – умовний тиск ($p = 16 \cdot 10^6$ Па).

- реакція N_1 герметизуючої поверхні корпусу зі сторони входу середовища, яку розраховують за питомим навантаженням, що забезпечує герметичність, $q = (0,25 \div 0,50)p$:

$$N_1 = q\pi (D_n^2 - D_e^2) / 4 = 0,5 \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 3,1415 \cdot (0,55^2 - 0,45^2) / 4 = 628318,5 \text{ Па}; \quad (2.2)$$

- сила тертя $F_1 = N_1 f$, де f – коефіцієнт тертя на герметизуючій поверхні (приймаємо $f = 0,15$).

В момент закриття клин притискається до герметизуючої поверхні зі сторони входу середовища під дією сил P , N_1 , F_1 і на герметизуючій поверхні зі сторони виходу середовища виникають реакції N_2 та сила тертя $F_2 = N_2 f$, що діють на клин. На клин також діють сила тиску шпинделя Q та сила тяжіння G , що направлена по вертикалі.

З умови рівності нулю суми проекцій на вісь X усіх сил, що діють на клин,

$$(P + N_1) \cos \alpha - F_1 \sin \alpha - N_2 \cos \alpha + N_2 f \sin \alpha = 0, \quad (2.3)$$

можна визначити силу

$$N_2 = \frac{(P + N_1) \cos \alpha - F_1 \sin \alpha}{\cos \alpha - f \sin \alpha}. \quad (2.4)$$

Приймаємо $\alpha = 5^\circ$, тому, враховуючи малу величину $\sin \alpha$, вважаємо:

$$N_2 \cong P + N_1. \quad (2.5)$$

Зусилля Q_k , яке потрібно прикласти до осі шпинделя для компенсації сил, що діють на клин, визначають з умови рівності нулю суми проекцій на вісь Y всіх сил, що діють на клин:

$$Q_k + G - (P + N_1) \sin \alpha - F_1 \cos \alpha - N_2 \sin \alpha - F_2 \cos \alpha = 0. \quad (2.6)$$

Використовуємо рівності (2.2) і (2.5) і враховуємо, що $F_2 = N_2 f$, отримуємо:

$$Q_k = P(2 \sin \alpha + f \cos \alpha) + 2N_1(\sin \alpha + f \cos \alpha) - G.$$

(2.7)

Отже при $\alpha = 5^\circ$ та $f = 0,15$:

$$Q_k \cong 0,32P + 0,47N_1 - G = 5533539,17 \text{ Н}. \quad (2.8)$$

Зусилля на шпинделі, що необхідне для переборення сили в сальниках дорівнює:

$$Q_c = \pi d_{ш} 0,4 h f p = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,4 \cdot 0,25 \cdot 0,1 = 0,0055 \text{ Н}, \quad (2.9)$$

де $d_{ш}$ – діаметр шпинделя; h – висота сальника; $f = 0,1$ – коефіцієнт тертя.

Зусилля на шпинделі від внутрішнього тиску на торець шпинделя:

$$Q_0 = p \pi d_{ш}^2 / 4 = 16 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,01^2 / 4 = 1256,64 \text{ Н}. \quad (2.10)$$

Відповідно сумарне осьове зусилля, що стискає шпиндель,

$$Q = Q_k + Q_c + Q_0 = 5534795,17 \text{ Н}. \quad (2.11)$$

Момент тертя, що виникає у різьбі:

$$M_1 = Q r_c \operatorname{tg}(\alpha_1 + \varphi) = 5534795,17 \cdot 0,005 \cdot 0,0999 = 2515,82 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.12)$$

де r_c – середній радіус різьби; α_1 – кут нахилу нарізки різьби; $\varphi = 6^\circ$ – кут тертя.

Шпиндель розраховують на стиск та кручення під дією сили Q та обертового моменту M_1 , а також перевіряють на повздовжній згин при закритому положенні засувки.

2.1.1. Визначення моменту на маховику

Обертний момент M , який необхідно прикласти до маховика, щоб закрити засувку, складається з моменту тертя в різьбі M_1 та моменту тертя у підшипнику втулки шпинделя M_2 :

$$M = M_1 + M_2 = 3572,3 \text{ Н}\cdot\text{м} . \quad (2.13)$$

Момент тертя у підшипнику втулки:

$$M_2 = QfR_c = 5534795,17 \cdot 0,1 \cdot 0,0018 = 1056,48 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (2.14)$$

де R_c – середній радіус опорного заплечика втулки (радіус до центру кульок підшипника), f – коефіцієнт тертя.

2.1.2. Розрахунок планетарної передачі

Механізм, що складається із зубчастих чи фрикційних коліс, в якому геометрична вісь хоча б одного з коліс рухома, називають планетарним.

Ланка планетарного механізму, в якому встановлені зубчасті колеса з рухомими вісями, називається водилом, позначається h . Зубчасті колеса з рухомими вісями – сателіти. Їх може бути декілька, ми беремо найбільш раціональну систему з кількістю сателітів рівною трьом ($n_w = 3$, рис.2.1)

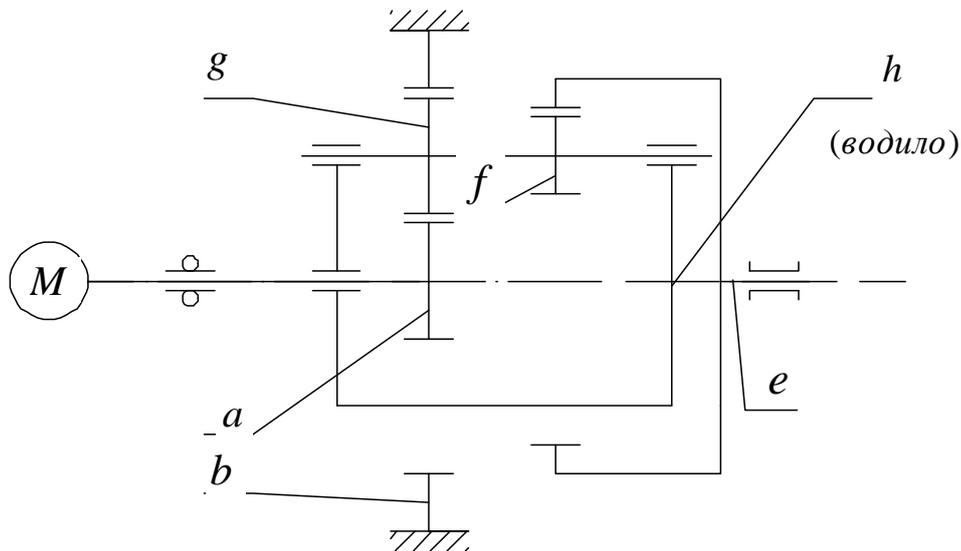


Рисунок 2.1 – Кінематична схема редуктора

Відношення кутових швидкостей ланок, що обертаються, називається передаточним відношенням та позначається літерою i з додаванням внизу двох індексів, що відповідають ланкам, що обертаються. Для ланок a та b маємо:

$$i_{ab} = \omega_a / \omega_b \text{ та } i_{ba} = \omega_b / \omega_a = 1/i_{ab} . \quad (2.13)$$

Якщо в загальному випадку для планетарного механізму дані кутові швидкості ω_A , ω_B , ω_C то кутові швидкості ланок А та В відносно С дорівнюють: $\omega_A - \omega_C$ та $\omega_B - \omega_C$.

$$(\omega_A - \omega_C) / (\omega_B - \omega_C) = i_{AB}^C . \quad (2.14)$$

Аналогічно для планетарного механізму:

$$(\omega_a - \omega_h) / (\omega_b - \omega_h) = i_{ab}^h . \quad (2.15)$$

При підборі числа зубців планетарних передач слід враховувати те, що одні ж ті ж близькі значення передаточних відношень можуть бути отримані при різних кількості зубців. Вибір кількості зубців здійснюємо з урахуванням вимог для міцності на згин.

$$d_{\omega 1} = d'_{\omega 1} \sqrt[3]{[k'_0] / [k_0]} , \quad (2.16)$$

$$a_{\omega} = a'_{\omega} \sqrt[3]{[k'_0] / [k_0]} , \quad (2.17)$$

$$b_{\omega} = b'_{\omega} \sqrt[3]{[k'_0] / [k_0]} .$$

(2.18)

Доцільно вибрати якомога більше значення кількості зубців. Специфіка роботи привода засувки характеризується короткочасними зусиллями при невеликих швидкостях для зубчастих коліс з високими значеннями твердості робочих поверхонь та, особливо при характерних частих реверсивних навантаженнях. Кількість зубців коліс (z_A , z_B , z_C), що зчепляються не повинні мати спільних множників та не були кратні n_w .

З [3] вибираємо планетарний редуктор типу 3к. На рисунку 2.1 показано сателіт з вінцями g, e, f. Значення передаточних відношень лежать у обмеженому діапазоні, при цьому ККД даного типу передачі $\eta = 0,8 \dots 0,9$. Для даного типу передачі $n_w = 3$ та z_A , z_B , z_C кратні трьом число зубців зубчастих коліс по заданій величині передаточного відношення (максимально можливий, враховуючи специфіку роботи крокового двигуна) $i_n = i_{ae}^b$ вибираємо з таблиці у [3], використовуючи залежність:

$$i_{ab}^e = 1 - i_{ae}^b . \quad (2.19)$$

При цьому вимагається виконання умови співвісності.

$$z_a + z_g < z_b - z_g \quad \text{тобто} \quad (a)_a < (a)_b , \quad (2.20)$$

$$z_a + z_g > z_b - z_g \quad \text{тобто} \quad (a)_a > (a)_b . \quad (2.21)$$

З урахуванням цього маємо співвідношення:

$$i_{ab}^h = -\frac{z_b}{z_a} , \quad (2.22)$$

$$i_{eb}^h = -\frac{z_b z_f}{z_g z_e} . \quad (2.23)$$

За критерій оптимізації обирається міцність на згин зубчастих коліс як зовнішнього так внутрішнього зачеплення з врахуванням прийнятих конкретних значень коефіцієнтів зміщення.

Вибираємо $u = 156$, $n_a = 1300$ об/хв, визначаємо передаточне відношення i_{ae}^b планетарної передачі 3к ($z_A = 15$, $z_B = 93$, $z_C = 90$, $z_g = 39$, $z_f = 36$). Модуль коліс однаковий. При нерухомому колесі b передаточне відношення буде:

$$i_{ae}^b = \frac{1 - i_{ab}^h}{1 - i_{eb}^h} = \left(1 + \frac{z_b}{z_a}\right) : \left(1 - \frac{z_b z_f}{z_g z_e}\right) = 116 . \quad (2.24)$$

Частота обертання водила знаходиться з умови:

$$\frac{n_a - n_b}{n_h - n_b} = i_{ah}^b = 1 - i_{ab}^h = 6 . \quad (2.25)$$

Так як $n_b = 0$, то отримуємо:

$$n_h = n_a / i_{ah}^b = 240 \text{ об/хв} . \quad (2.26)$$

Частота обертання сателіта в русі відносно водила $(n_g - n_h) = (n_f - n_h)$ складе

$$\frac{n_g - n_h}{n_a - n_h} = i_{ga}^h = -\frac{z_a}{z_g} = -\frac{1}{2} . \quad (2.27)$$

$$(n_g - n_h) = -\frac{1}{2}(n_a - n_h) = -600 \text{ об/хв} . \quad (2.28)$$

Кутову швидкість обертання сателітів визначаємо з

$$\omega_h = \frac{1}{1 - i_{ab}^h} \omega_a . \quad (2.29)$$

$$\omega_g - \omega_h = \omega_f - \omega_h = -\frac{z_b}{z_g} \omega_h \quad . \quad (2.30)$$

Моменти, що діють на зубчасте колесо (води́ло) зі сторони вала та від зусиль в зачепленні (зусилля зі сторони сателітів) направлені в протилежних напрямках. Добутку моменту, що діє на зубчасте колесо зі сторони вала (M_a) та кутової швидкості приписують знак “+” при співпаданні їх напрямків і знак “-” – якщо вони протилежні. Відповідно до цього $M_{\text{ведуч}} > 0$, а $M_{\text{веден}} < 0$. У даному випадку знехтуємо витратами на тертя, тоді залежності між моментами основних ланок

$$M_A + M_B + M_C = 0; \quad M_A n_A + M_B n_B + M_C n_C = 0. \quad (2.31)$$

З [6] розраховуємо моменти коліс

$$M_a = -M_e \frac{z_a}{z_a + z_b} \left(1 - \frac{z_b z_f}{z_g z_e} \right) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{ae}^b} \right) = -3573 \cdot \frac{15}{15 + 93} \cdot \left(1 - \frac{93 \cdot 36}{39 \cdot 90} \right) \cdot \frac{1}{0.8} = 28,63 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\text{(при } M_a \cdot \omega_a > 0) \quad (2.1.32)$$

$$M_b = -M_e \frac{z_b}{z_a + z_b} \left(1 + \frac{z_a}{z_e} \right) = -3573 \frac{93}{15 + 93} \cdot \left(1 + \frac{15}{90} \right) = -3589,5 \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (2.33)$$

2.2. Розрахунок потужності та вибір електродвигуна

Системи з кроковим приводом при дискретному керуванні від ЕОМ більш компактні, надійні і точні. Процес заміни звичайних виконавчих механізмів у цифрових системах керування кроковими двигунами (КД) обумовлений також усталеною роботою останніх при впливі несприятливих кліматичних факторів, механічних перевантажень і інших збурювальних впливів.

2.2.1. Переваги та недоліки крокового двигуна

До переваг КД можна віднести:

- кут повороту ротора визначається числом імпульсів, що подані на двигун;

- двигун забезпечує повний момент у режимі зупинки (якщо обмотки заживлені);
- прецизійне позиціонування і повторюваність. Гарні крокові двигуни мають точність від 3 до 5% від величини кроку, причому ця помилка не накопичується від кроку до кроку;
- висока надійність, пов'язана з відсутністю щіток, термін служби крокового двигуна фактично визначається терміном служби підшипників;
- однозначна залежність положення від вхідних імпульсів забезпечує позиціонування без зворотного зв'язку;
- можливість швидкого старту/зупинки/реверсування;
- можливість одержання дуже низьких швидкостей обертання для навантаження, що приєднане безпосередньо до вала двигуна без проміжного редуктора;
- може бути перекритий досить великий діапазон швидкостей, швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Недоліки двигуна загалом визначаються наступними факторами :

- кроковим двигунам присутнє явище резонансу;
- можлива втрата контролю положення через роботу без зворотного зв'язку;
- споживання енергії не зменшується навіть без навантаження;
- ускладнена робота на високих швидкостях;
- невисока питома потужність;
- відносно складна схема керування.

Але більшість цих недоліків можна нівелювати, застосовуючи сучасні КД і схеми керування. Контроль положення засувки є досить актуальним, але його позиціонування та моніторинг досягнення граничних станів забезпечуються мікропроцесорною схемою. Робота ж на високих швидкостях для нього не вважається характерною, так як зміни тиску газу в неаварійних режимах роботи визначаються значною інерційністю. Так само і немає

необхідності у високій питомій потужності завдяки використанню планетарного редуктора.

В якості схеми керування можна запропонувати керування за допомогою мікроконтролера, який програмується ПЕОМ. Сам мікроконтролер, що структурно під'єднаний до обчислювача, підключається до комп'ютера, і за допомогою спеціальних програм здійснюється програмування. Все це значно спрощує керування КД. Враховуючи вищеописане, обираємо схему керування електроприводом засувок на базі крокового двигуна.

2.2.2. Розрахунок основних характеристик крокового двигуна

При проектуванні використовуємо наступні вихідні дані :

- число фаз і число тактів комутації: $m=4$; $n=4$
- одиничний крок: $\alpha_m=22,5^\circ$
- момент навантаження на валу: $M_H=28,63 \text{ Н}\cdot\text{м}$
- момент інерції навантаження: $J=7,8\cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$
- частота приємистості: $f_{\text{тр}}=350 \text{ Гц}$
- напруга живлення: $U=12\pm 1 \text{ В}$.

Розрахунок проводився по методиці, яка наведена у [11].

Число пар полюсів двигуна:

$$p = \frac{360}{\alpha_m n}; \quad (2.34)$$

$$p = \frac{360}{22,5 \cdot 4} = 4.$$

Нормалізовані параметри привода χ (постійна часу) і δ (коефіцієнт внутрішнього демпфування) повинні бути попередньо вибрані, виходячи із діапазонів їх змін і відношення між ними, що обчислюється по формулі:

$$\frac{\delta}{\chi} = \frac{1}{k_U} \left(\frac{\delta}{\chi} \right)_{\text{опт}}, \quad (2.35)$$

де: $\left(\frac{\chi}{\delta} \right)_{\text{опт}}$ – відношення для оптимальної прямої вороття, що

визначається із [3];

k_U - коефіцієнт, що враховує зміну напруги живлення і температури обмотки статора у процесі експлуатації; визначається по формулі:

$$k_U = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} \left[\frac{k_\phi - 1}{k_\phi} + \frac{\rho_{\min}}{k_\phi \rho_{\max}} \right], \quad (2.36)$$

де: U_{\min} - мінімальна по технічному завданню напруга живлення, В;

U_{\max} - максимальна по технічному завданню напруга живлення, В;

$\rho_{\min} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м - питомий електричний опір міді, що приведений до мінімальної по технічному завданню температури оточуючого середовища;

$$\rho_{\max} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{20}(t - 20)) = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,8 \cdot 10^{-3}(100 - 20)) = 2,243 \cdot 10^{-8} \text{ Ом·м} \quad (2.37)$$

- питомий електричний опір міді, що приведений до максимальної (по умовам експлуатації) робочої температури обмотки, тобто для $+100^\circ\text{C}$, Ом·м.

Відношенням D_r/δ_{sr} і необхідним коефіцієнтом форсування k_ϕ треба попередньо задатися, а надалі уточнити ці значення по результатам наступного розрахунку.

Величину нормалізованої постійної часу попередньо приймаємо: $\chi = 0,3$. Відношення $(\chi/\delta)_{\text{опт}}$ для сплаву магніту КР5пАПП67 і відношення $D_r/\delta_{sr} = 200$ знаходимо по [3]:

$$\left(\frac{\chi}{\delta} \right)_{\text{опт}} = 1,6.$$

Значення коефіцієнта форсування попередньо приймаємо $k_\phi = 2,4$.

Таким чином:

$$k_U = \frac{11}{13} \left[\frac{2,4 - 1}{2,4} + \frac{1,72 \cdot 10^{-8}}{2,4 \cdot 2,243 \cdot 10^{-8}} \right] = 0,764.$$

Отже:

$$\delta = \frac{\chi}{k_U} \left(\frac{\delta}{\chi} \right)_{\text{опт}} = \frac{0,3}{0,764} \cdot 1,6 = 0,628.$$

Коефіцієнт використання магніту для оптимальної прямої вороття ξ :

$$\xi = k_U \cdot \xi_{\text{опт}}, \quad (2.38)$$

де: $\xi_{\text{опт}} = 0,09$ – коефіцієнт використання магніту при оптимальній н.с. статора, що визначається по [3] для прийнятого відношення $D_r/\delta_{sr} = 200$ при коефіцієнті полюсної дуги $\alpha_r = 0,5$.

$$\xi = 0,628 \cdot 0,09 = 0,0565.$$

Безрозмірна частота приємистості:

$$f_{\text{пр}^*} = f_{x.x^*} \cdot k_{\chi\delta} \cdot \mu_n. \quad (2.39)$$

Значення $f_{x.x^*}$ і $k_{\chi\delta}$ визначаються для $m = 4$ і чотирьохтактної парної комутації по [3], для прийнятих значень χ і δ ; відносний момент навантаження μ_n попередньо треба вибрати в діапазоні $0,1 \dots 0,4$; отже:

$$f_{x.x^*} = 0,85,$$

$$k_{\chi\delta} = 0,85,$$

$$\mu_n = 0,4,$$

$$f_{\text{пр}^*} = 0,85 - 0,85 \cdot 0,4 = 0,51.$$

Діаметр ротора D_r обчислюється згідно із формулою:

$$D_r = p \sqrt{\frac{k_M \xi}{\gamma} B_r H_c \left[\frac{f_{\text{пр}^*}^2}{f_{\text{пр}}} - \frac{\mu_n J_n}{p M_n} \right]}, \quad (2.40)$$

$$\text{де } k_M = k_m k_1 k_{\text{ск1}} \sin \frac{\pi \alpha_r}{2}, \quad (2.41)$$

тут $k_m = \sqrt{2}$ - коефіцієнт результуючої н.с. статора при $m = 4$ і при чотирьохтактній парній комутації;

$k_1 = 4/\pi$ - коефіцієнт при першій гармоніці розкладу в ряд Фур'є просторового розподілу н.с. фази для зосереджених обмоток (приймаємо $q = 0,5$);

$$k_{\text{ск1}} = \frac{\sin\left(\pi \frac{p}{z} \varphi\right)}{\pi \frac{p}{z} \varphi} - \text{коефіцієнт скосу пазів статора для першої гармоніки}$$

моменту;

$$z_s = 2pmq = 2 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 0,5 = 16 - \text{число пазів статора};$$

$\varphi_{\text{ск}}$ – скіс пазів у частках зубцового ділення статора приймаємо рівним $\varphi_{\text{ск}} = 0,5$

$$k_{\text{ск1}} = \frac{\sin\left(\pi \frac{4}{16} \cdot 0,5\right)}{\pi \frac{4}{16} \cdot 0,5} = 0,9745; \quad (2.42)$$

$$k_M = \sqrt{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot 0,9745 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 0,5}{2} = 1,2408;$$

γ - коефіцієнт, що характеризує якість виготовлення; згідно з дослідними даними приймається в межах $6 \dots 7 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3$;

Властивості постійних магнітів зі сплаву КР5пАПП67:

$B_r = 1,28 \text{ Тл}$; $H_c = 62000 \text{ А/м}$.

Отже, діаметр ротора:

$$D_r = 4 \cdot \sqrt{\frac{1,2408 \cdot 0,0565}{7 \cdot 10^2} \cdot 1,28 \cdot 62000 \cdot \left[\frac{0,51^2}{350^2} - \frac{0,4 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 28,63} \right]} = 0,164 \text{ м}$$

Величину повітряного зазору прийmemo $\delta_{\text{sr}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, при цьому одержимо відношення $D_r/\delta_{\text{sr}} = 205$, що незначно відхиляється від раніше значення. А $D_r/\delta_{\text{sr}} = 200$, отже уточнення розрахунку не потребує.

Довжина ротора обчислюється за формулою:

$$I_r = \frac{\gamma M_H}{p^3 (k_M \xi B_r H_c)^2 \mu_H \left[\frac{f_{\text{np}^*}^2}{f_{\text{np}}^2} - \frac{\mu_n J_n}{p M_n} \right]}; \quad (2.43)$$

$$I_r = \frac{7 \cdot 10^2 \cdot 28,63}{4^3 (1,2408 \cdot 0,0565 \cdot 1,28 \cdot 62000)^2 \cdot 0,4 \cdot \left[\frac{0,51^2}{350^2} - \frac{0,4 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 28,63} \right]} = 0,115 \text{ м.}$$

Довжина магнітної лінії на полюс магніту I_M попередньо розраховується за наступною формулою:

$$I_M = (0,375 - 0,025 p) \cdot D_r, \quad (2.44)$$

$$I_M = (0,375 - 0,025 \cdot 4) \cdot 0,115 = 0,0316 \text{ м.}$$

Оптимальна н.с. статора (попередньо)

$$F'_{\text{опт}} = k_F H_c I_M, \quad (2.45)$$

де $k_F = 0,64$ – коефіцієнт використання магніту при роботі на оптимальній н.с. статора.

$$F'_{\text{опт}} = 0,64 \cdot 62000 \cdot 0,0316 = 1254,88 \text{ А.}$$

Н.с. статора при номінальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмотки:

$$F'_{\text{мін}} = k_u \cdot F'_{\text{опт}}, \quad (2.46)$$

$$F'_{\text{мін}} = 0,764 \cdot 1254,88 = 958,73 \text{ А.}$$

Допустима щільність струму в обмотці статора в режимі фіксованої зупинки під струмом (що відповідає мінімальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмотки):

$$\Delta = (2,3\dots 2,5) \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{I_r}{I_\omega}\right)^2 \cdot \frac{m}{p} \cdot \frac{P_s^2}{k_{Cu} F'_{\text{мін}} \rho_{\text{макс}}}} \quad (2.47)$$

де I_ω - середня довжина витка обмотки статора, м, вона попередньо визначається по наближеній формулі:

$$I_\omega = 2I_r + \frac{12}{p} D_r, \quad (2.48)$$

$$I_\omega = 2 \cdot 0,115 + \frac{12}{4} \cdot 0,164 = 0,722 \text{ м;}$$

$k_{Cu} = 0,26$ – коефіцієнт заповнення паза міддю для обмотувальних дротів типу ПЭТВ діаметром до 0,2 мм;

p_s – питомий тепловий потік з поверхні пакету статора при мінімальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмотки Вт/м^2 , визначається в залежності від допустимого перегріву обмотки:

$$p_s = \left(\frac{U_{\text{мін}}}{U_{\text{макс}}}\right)^2 \cdot \frac{\Delta t^0}{1,05\dots 1,15} \cdot \alpha_v \cdot \frac{S_K}{S_s} \quad (2.49)$$

$$p_s = \left(\frac{11}{13}\right)^2 \cdot \frac{80}{1,1} \cdot 14 \cdot 3,5 = 2551 \text{ Вт/м}^2;$$

$\alpha_v = 13\dots 16 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{C}^0$ – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні корпусу для двигунів закритого виконання з природнім охолодженням;

$S_k/S_s = 3...4$ – відношення зовнішньої поверхні корпусу до зовнішньої поверхні пакета статора (цим значенням попередньо слід задатися).

Отже:

$$\Delta = 2,3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{0,115}{0,722}\right)^2 \cdot \frac{4}{4} \cdot \frac{2551^2}{0,26 \cdot 958,73 \cdot 2,2429 \cdot 10^{-8}}} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ A/M}^2.$$

Зовнішній діаметр пакета статора D_{se} визначається як:

$$D_{se} = \sqrt{\frac{(5,1...6,4) p m F'_{min}}{\Delta \cdot k_{Cu}} + D_r^2}, \quad (2.50)$$

$$D_{se} = \sqrt{\frac{5,1 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 958,73}{3,3 \cdot 10^6 \cdot 0,26} + 0,164^2} = 0,34 \text{ м.}$$

Потужність, що виділяється в міді двигуна в статичному режимі при мінімальній напрузі живлення і максимальній температурі обмотки при $m = 4$ і чотирьохтактній парній комутації:

$$P_{Cu} = 2 \rho_{max} p \Delta l_{\omega} F'_{min}, \quad (2.51)$$

$$P_{Cu} = 2 \cdot 2,2429 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 3,3 \cdot 10^6 \cdot 0,722 \cdot 958,73 = 409,8 \text{ Вт.}$$

Довжина лобової частини одного піввитка:

$$l_l = k_d \frac{\pi (D_r + D_{se})}{4p}, \quad (2.52)$$

Де $k_d = 1,5$ – коефіцієнт для виспних обмоток при $p = 4$.

$$l_l = 1,5 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,164 + 0,34)}{4 \cdot 4} = 0,148 \text{ м.}$$

Середня довжина витка може бути обрахована як:

$$l_{\omega} = 2(l_r + l_l), \quad (2.53)$$

$$l_{\omega} = 2 \cdot (0,115 + 0,148) = 0,526 \text{ м.}$$

Потужність, що споживається двигуном і додатковим опором в статичному режимі при мінімальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмотки P_1 , визначається відповідно до формули:

$$P_1 = \frac{\pi}{8} \omega_0 \frac{k_L k_1^2 k_{ck}^1}{\chi} \cdot \frac{D_r l_r}{I_M} \cdot \frac{\Lambda_0 (\Lambda_M + \Lambda_{\sigma M})}{\Lambda_0 + \Lambda_M + \Lambda_{\sigma M}} \frac{B_r}{H_c} F'_{min}{}^2 \quad (2.54)$$

Де $k_L = 3,6$ – коефіцієнт, що визначається з [3, с.480] в залежності від сплаву магніту, числа пар полюсів і відношення D_r/δ_{sr} ;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{p \cdot \frac{M_n}{\mu_n}}{J_r + J_n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{28,63}{0,4}}{58,23 \cdot 10^{-3} + 7,8 \cdot 10^{-6}}} = 70,0 \text{ c}^{-1}; \quad (2.55)$$

$$J_r = \gamma D_r^4 l_r = 7 \cdot 10^2 \cdot 0,164^4 \cdot 0,115 = 58,23 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Провідність повітряного зазору у відносних одиницях попередньо визначається за формулою:

$$\Lambda'_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_M}{\delta_{sr} k_\delta} \cdot \frac{H_c}{B_r} \quad (2.56)$$

$$\Lambda'_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,0316}{0,58 \cdot 10^{-4} \cdot 1,25} \cdot \frac{62000}{1,28} = 2,698;$$

$k_\delta = 1,2 \dots 1,3$ – коефіцієнт повітряного зазору при попередніх розрахунках;

Провідність розсіювання магніту у відносних одиницях для сплаву типу КР5пАПП67, що використовується:

$$\Lambda'_{\sigma M} = 0,85 p^2 (1 - 0,067 p) \cdot 10^{-2}, \quad (2.57)$$

$$\Lambda'_{\sigma M} = 0,85 \cdot 4^2 \cdot (1 - 0,067 \cdot 4) \cdot 10^{-2} = 0,0996;$$

$\Lambda'_M = 0,1$ – відносний коефіцієнт повернення для магніту зі сплаву КР5пАПП67.

Отже:

$$P_1 = \frac{\pi}{8} \cdot 70 \cdot \frac{3,6 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^2 \cdot 0,9745^2}{0,3} \cdot \frac{0,164 \cdot 0,115}{0,0316} \cdot \frac{2,698 \cdot (0,1 + 0,0996)}{2,698 + 0,1 + 0,0996} \times \\ \times \frac{1,28}{62000} \cdot 958,73^2 = 159,8 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт форсування визначається у відповідності з виразом

$$k_\phi = \frac{\pi}{8} \omega_0 \frac{k_L k_1^2 k_{ck}^1}{\chi \Delta \rho \rho_{\max}} \cdot \frac{D_r l_r}{l_M l_\omega} \cdot \frac{\Lambda'_0 (\Lambda'_M + \Lambda'_{\sigma M})}{\Lambda'_0 + \Lambda'_M + \Lambda'_{\sigma M}} \frac{B_r}{H_c} F'_{\min}. \quad (2.58)$$

$$k_{\phi} = \frac{\pi}{8} \cdot 70 \cdot \frac{3,6 \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot 0,9745^2}{0,3 \cdot 3,3 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 2,24 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{0,164 \cdot 0,115}{0,0316 \cdot 0,526} \times$$

$$\times \frac{2,698 \cdot (0,1 + 0,0996)}{2,698 + 0,1 + 0,0996} \cdot \frac{1,28}{62000} \cdot 958,73 = 2,086.$$

З урахуванням того, що коефіцієнт незначно відрізняється від прийнятого на початку розрахунку, уточнення розрахунку не потрібне.

Маса активних матеріалів попередньо визначається за формулами:

маса ротора:

$$G_r = (2,5 \dots 3,1) \cdot D_r^2 l_r \cdot 10^6, \quad (2.59)$$

$$G_r = 2,5 \cdot 0,164^2 \cdot 0,115 \cdot 10^6 = 7,73 \text{ кг.}$$

маса сталі статора:

$$G_{cm} = (1,5 \dots 2,7) \cdot (D_{se}^2 - D_r^2) l_r \cdot 10^6, \quad (2.60)$$

$$G_{cm} = 1,8 \cdot (0,34^2 - 0,164^2) \cdot 0,0346 \cdot 10^6 = 5,52 \text{ кг.}$$

маса міді статора:

$$G_{Cu} = 0,1 \frac{p m l_{\omega}}{\Delta} F'_{min} \cdot 10^8, \quad (2.61)$$

$$G_{Cu} = 0,1 \cdot \frac{4 \cdot 4 \cdot 0,526}{3,3 \cdot 10^6} \cdot 958 \cdot 10^8 = 2,75 \text{ кг.}$$

де: $f_{\text{Фопт}} = 0,65$ – за [3, с. 495].

Н.с. статора при мінімальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмотки:

$$F_{\text{мін}} = k_{\text{ц}} F_{\text{опт}}, \quad (2.62)$$

$$F_{\text{мін}} = 0,764 \cdot 1254,5 = 958,4 \text{ А.}$$

Фактична внутрішня н.с. магніту для оптимальної прямої вороття:

$$F'_c = \frac{b_2}{\Lambda'_M} H_c l_M \quad (2.63)$$

$$F'_c = \frac{0,66}{0,1} \cdot 62000 \cdot 0,0316 = 12930,72 \text{ А.}$$

де: $b_2 = 0,66$ – взяте з [3, с. 495].

2.2.3. Розрахунок параметрів обмотки статора

Струм в фазі КД в статичному режимі при мінімальній напрузі і максимальній робочій температурі обмотки:

$$I_{\phi.\text{мін.}} = \frac{P_1}{2U_{\text{мін}}} , \quad (2.64)$$

$$I_{\phi.\text{мін}} = \frac{159,8}{2 \cdot 11} = 7,26 \text{ А.}$$

Число ефективних провідників в пазу статора

$$\omega_n = \frac{F_{\text{мін}}}{q \cdot I_{\phi.\text{мін.}}} , \quad (2.65)$$

$$\omega_n = \frac{958,4}{0,5 \cdot 7,26} = 263,3.$$

Переріз провідника обмотки статора (попередньо)

$$q_{Cu} = \frac{I_{\phi.\text{мін.}}}{\Delta \cdot a} , \quad (2.66)$$

де: $a = 1$ – число паралельних гілок в обмотці.

$$q_{Cu} = \frac{7,26}{3,3 \cdot 10^6 \cdot 1} = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Вибираємо дрiт марки ПЭТВ діаметром $d = 0,4$ мм з намотуванням у два паралельних дроти, його сумарний переріз:

$$q_{Cu} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot 2 = \frac{\pi \cdot (0,4 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 2 = 25,13 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2.$$

Опір фази, що приведена до робочої температури обмотки:

$$R_{\phi.\text{макс}} = \rho_{\text{макс}} \frac{pq\omega_n l_\omega}{q_{Cu} a^2} , \quad (2.67)$$

$$R_{\phi.\text{макс}} = 2,24 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 263,3 \cdot 0,526}{25,13 \cdot 10^{-8} \cdot 1^2} = 24,69 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт форсування:

$$k_\phi = \frac{U_{\text{мін}}}{R_{\phi.\text{макс}} \cdot I_{\phi.\text{мін}}} , \quad (2.68)$$

$$k_{\phi} = \frac{11}{24,69 \cdot 7.26} = 0,061.$$

Індуктивність фази, що обумовлена головним потокозчепленням:

$$L_{\delta} = \frac{\pi}{8} k_1^2 k_{ck1}^2 \cdot \left(\frac{q\omega_n}{a} \right) \cdot \frac{D_r l_r}{I_M} \cdot \frac{\Lambda'_0 (\Lambda'_M + \Lambda'_{\sigma M})}{\Lambda'_0 + \Lambda'_M + \Lambda'_{\sigma M}} \frac{B_r}{H_c}, \quad (2.69)$$

$$L_{\delta} = \frac{\pi}{8} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \cdot 0,9745^2 \cdot \left(\frac{0,5 \cdot 263}{1} \right) \cdot \frac{0,164 \cdot 0,115}{0,0316} \cdot \frac{2,698 \cdot (0,1 + 0,0996)}{2,698 + 0,1 + 0,0996} \times \\ \times \frac{1,28}{62000} = 0,095 \text{ Гн.}$$

Індуктивність фази, що обумовлена потокозчепленням розсіювання (для величини $q = 0,5$):

$$L_{\sigma} = 1,25 p q \left(\frac{\omega_n}{a} \right)^2 \cdot l_r (G_n + G_l), \quad (2.70)$$

$$L_{\sigma} = 1,25 \cdot 4 \cdot 0,5 \cdot \left(\frac{263}{1} \right)^2 \cdot 0,115 \cdot (2,63 \cdot 10^{-6} + 0,13 \cdot 10^{-6}) = 0,309 \text{ Гн,}$$

де: $G_n = 2,63 \cdot 10^{-6}$ – питома магнітна провідність пазового розсіювання;

$G_l = 0,13 \cdot 10^{-6}$ – питома магнітна провідність розсіювання лобових частин.

Індуктивність фази обмотки статора:

$$L = L_{\delta} + L_{\sigma}, \quad (2.71)$$

$$L = 0,095 + 0,309 = 0,404 \text{ Гн.}$$

Постійна часу обмотки статора

$$T = \frac{L}{k_{\phi} R_{\phi, \text{макс}}} \quad (2.72)$$

$$T = \frac{0,404}{0,061 \cdot 24,69} = 26,68 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Додатковий опір, що вмикається у ланцюг фази:

$$R_{\text{доб}} = (k_{\phi} - 1) R_{\phi, \text{макс}}, \quad (2.73)$$

$$R_{\text{доб}} = (0,061 - 1) \cdot 24,69 = 23,18 \text{ Ом.}$$

2.2.4. Розрахунок динамічних характеристик

Максимальний статичний синхронізуючий момент при мінімальній напрузі живлення і максимальній робочій температурі обмоток визначається у відповідності з формулою:

$$M_{\max} = k_M p F_{\min} B_{\delta_{cp}} D_r l_r , \quad (2.74)$$

де $F_{\min} = q \omega_n I_{\phi.\min} = 0,5 \cdot 263 \cdot 7,26 = 954,69$ А – уточнене значення;

$B_{\delta_{cp}} = b_{cp} B_r = 0,58 \cdot 1,28 = 0,74$ Тл – індукція у повітряному зазорі;

$b_{cp} = 0,58$ – знайдено по [3, с. 495].

$$M_{\max} = 1,24 \cdot 4 \cdot 954,69 \cdot 0,74 \cdot 0,164 \cdot 0,115 = 66 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Колова частота власних коливань ротора:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{p M_{\max}}{J_n + J_r}} , \quad (2.75)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 66}{7,8 \cdot 10^{-6} + 58,23 \cdot 10^{-3}}} = 453,3 \text{ Гц}.$$

Нормалізована постійна часу при $m = 4$ з шунтуванням обмоток діодами

$$\chi = 2 \omega_0 T , \quad (2.76)$$

$$\chi = 2 \cdot 453,3 \cdot 26,68 \cdot 10^{-4} = 2,41.$$

Коефіцієнт внутрішнього демпфірування для $m = 4$ з шунтуванням обмоток діодами:

$$\delta = \omega_0 \frac{M_{\max}}{p I_{\phi.\min}^2 R_{\phi.\max} k_{\phi}} ,$$

$$(2.77)$$

$$\delta = 453,3 \cdot \frac{66}{4 \cdot 7,26^2 \cdot 24,69 \cdot 0,61} = 9,42.$$

Відносний момент навантаження:

$$\mu_n = \frac{M_n}{M_{\max}} , \quad (2.78)$$

$$\mu_n = \frac{28,63}{66} = 0,43.$$

Частота приємистості:

$$f_{np} = \omega_0 f'_{np} , \quad (2.79)$$

$$f_{\text{пр}} = 453,3 \cdot 0,51 = 888,8 \text{ Гц.}$$

Оскільки частота приємності вийшла більшою від заданої у вихідних даних, то перерахунок робити не потрібно.

Проводимо вибір двигуна. Даному розрахунку найбільш відповідає КД марки ДВШ200-16-4096 - ИАРК.525652.001 з наступними характеристиками:

- кутовий крок –	1,5 ⁰ ;
-напруга живлення –	12В;
-струм фази –	10 А;
-опір фази –	25 Ом;
-індуктивність фази –	0,12 Гн;
-обертальний момент –	40 Н·м;
-кількість виводів –	6;
-момент інерції ротора –	1,5·10 ⁻⁵ кг·м ²
-вага –	16 кг;
-похибка кутового кроку –	±5%;
-похибка опору –	±10%;
-підвищення температури –	80 ⁰ С (max);
-опір ізоляції –	100 Мом.

3. МОДЕРНІЗАЦІЯ СХЕМИ СИСТЕМИ ОБЛІКУ ГАЗУ

3.1 Розрахунок силового транзисторного ключа

Проведемо розрахунок силового транзисторного ключа (рис. 3.1); блок драйверів складається з 4 таких ключів, ввімкнених в ланцюг керування обмоткою крокового двигуна КД. Вихідними даними для розрахунку транзисторного ключа є:

- номінальний струм фази крокового двигуна, А; $I_{н.ф.} = 1,25$ А
- номінальна напруга живлення фази крокового двигуна, В; $U_{н.ф.} = 12$ В;
- мінімальна вхідна керуюча напруга, В; $U_{в.мін.} = 5$ В.

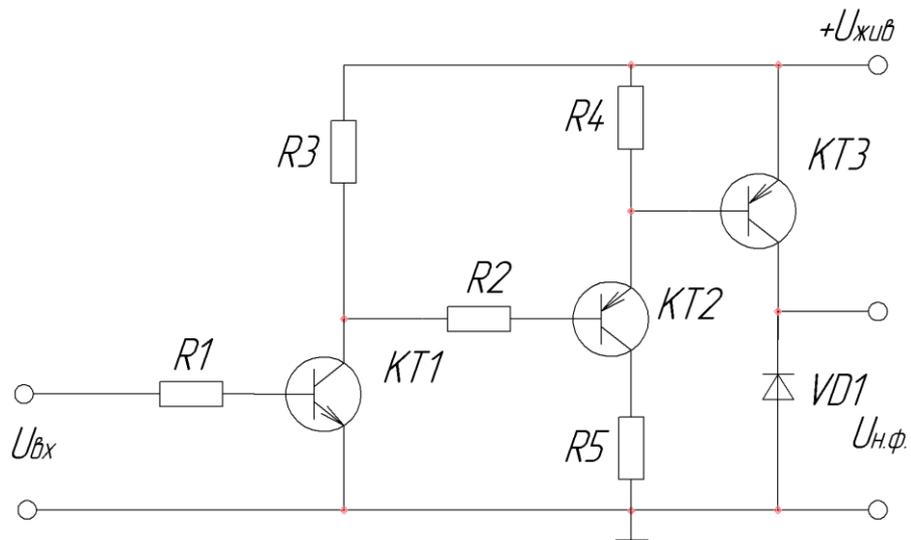


Рисунок 3.1 - Схема принципова транзисторного ключа

Відповідно до [4] вибираємо в якості KT3 транзистор типу КТ816Б, для якого:

- максимально допустимий постійний струм колектора $I_{к.макс} = 3$ А;
- максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{ке макс} = 50$ В;
- коефіцієнт передачі по струму $h_{21e} \geq 20$.

Визначаємо струм бази транзистора KT3 за формулою:

$$I_{\sigma i} = S_i \frac{I_{ki}}{h_{21ei}} \quad (3.1)$$

де S_i – коефіцієнт для надійного насичення транзистора в потрібному температурному діапазоні;

I_{ki} – струм колектора транзистора; h_{21ei} – коефіцієнт передачі по струму;

Приймаючи коефіцієнт запасу $S_3 = 1,5$ та $I_{к.з.} = I_{н.ф.} = 1,25$ А; маємо:

$$I_{\beta 3} = 1,5 \frac{1,25}{20} = 0,09375 \text{ A.}$$

Для транзистора КТ3 за вольтамперними характеристиками з [4], для отриманих струмів бази та колектора, знаходимо падіння напруги на переходах колектор-емітер та база-емітер:

$$U_{KE3} = 0,9 \text{ В}; \quad U_{BE3} = 1,7 \text{ В};$$

Транзистор КТ2 вибираємо з [4] типу КТ814Б з наступними характеристиками:

- максимально допустимий постійний струм колектора $I_{K.MAX} = 1,5 \text{ А};$
- максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{KE.MAX} = 50 \text{ В};$
- коефіцієнт передачі по струму $h_{21e} \geq 40.$

За формулою (3.1), враховуючи, що $S_2 = 1,5$ та $I_{E2} = I_{\beta 3}$, знаходимо струм бази транзистора КТ2:

$$I_{\beta 2} = 1,5 \frac{0,09375}{40} = 0,0035 \text{ A.}$$

Для транзистора КТ2 за ВАХ, для отриманих струмів бази та емітера, знаходимо :

$$U_{KE2} = 0,55 \text{ В}; \quad U_{BE} = 1,37 \text{ В.}$$

Транзистор КТ1 вибираємо типу КТ316В для якого:

- максимально допустимий постійний струм колектора $I_{K.MAX} = 0,03 \text{ А};$
- максимально допустима напруга колектор-емітер $U_{KE.MAX} = 15 \text{ В};$
- коефіцієнт передачі по струму $h_{21e} \geq 40..120.$

Для надійного відкривання транзистора КТ2 струм бази приймаємо рівним $I_{\beta 2} = 0,05 \text{ А.}$ Тоді за формулою (3.1), враховуючи $S = 1,5$ та $I_{E1} = I_{\beta 2}$ знаходимо струм бази транзистора КТ1:

$$I_{\beta 1} = 1,5 \frac{0,05}{40} = 1,875 \text{ mA.}$$

Для транзистора КТ1 по ВАХ, для отриманих значень струмів бази та емітера, знаходимо :

$$U_{KE1} = 0,42 \text{ В}; \quad U_{BE1} = 1,2 \text{ В};$$

Опір резистора R1 знаходимо, виходячи із вхідної напруги $U_{BX} = U_1 = 5 \text{ В};$ та падіння напруги на переході база-емітер транзистора КТ1, за формулою:

$$R_1 = \frac{U_{BX} - U_{BE1}}{I_{B1}} \quad (3.2)$$

$$R_1 = \frac{5 - 1,1}{1,875 \cdot 10^{-3}} = 2080 \text{ Ом.}$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення опору резистора $R_1 = 2 \text{ кОм}$. Опір резистора R_5 вибираємо виходячи із струму колектора КТ2 та падіння напруги на переходах транзисторів, за формулою:

$$R_5 = \frac{10 - 1,7 - 0,55}{0,1875} = 41,33 \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення опору резистора $R_5 = 40 \text{ Ом}$.

Опір резистора R_2 знаходимо виходячи із струму бази КТ2 і падіння напруги на переходах транзисторів, за формулою :

$$R_2 = \frac{U_{жив} - U_{be3} - U_{be2} - U_{ке1}}{I_{be2}} \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{10 - 1,7 - 1,37 - 0,55}{0,05} = 127,6 \text{ Ом.}$$

Вибираємо найближче за рядом номінальне значення опору резистора $R_2 = 130 \text{ Ом}$.

Резистори R_3 , R_4 призначені для завдання транзисторам КТ2, КТ3 запірною напруги. Опори цих резисторів вибираємо набагато більшими від опорів резисторів R_2 , R_5 для запобігання їх впливу при відкритих транзисторах КТ2, КТ3. При цьому значення повинно бути більшим за значення R_4 . Вибираємо згідно ряду номінальних значень резисторів $R_3 = 2,4 \text{ кОм}$, $R_4 = 1,1 \text{ кОм}$.

Діод VD1 призначений для шунтування від'ємної напруги на обмотці крокового двигуна, яка з'являється при комутаціях. Від'ємний струм комутації набагато менший номінального значення струму у фазній обмотці двигуна, тому вибираємо діод VD1 типу КД 109Б, для якого: максимально допустимий

середній прями́й струм $I_{\text{ср.пр.}} = 0,3 \text{ А}$; максимально допустима постійна зворотна напруга $U_{\text{зв.мах}} = 300 \text{ В}$.

Всі комутації виконує зовнішній контролер. Для керування кроковим двигуном у повнокроковому режимі потрібні всього два сигнали, зсунуті по фазі на 90° . Напрямок обертання залежить від того, яка фаза випереджає і визначається потенціалом на 17 виводі DD1. Швидкість визначається частотою проходження імпульсів на вивід 18 мікросхеми блока контролерів DD1. У напівкроковому режимі все трохи складніше й потрібно вже мінімум 3 сигнали (позитивний потенціал на 19 виводі). Всі сигнали керування кроковим двигуном можна сформувати програмно, однак це може викликати перевантаження мікроконтролера. Тому ми застосовуємо спеціальні мікросхеми драйверів крокового двигуна (DD1 на DD2), що реалізують ШИМ-стабілізацію струму. Разом з блоком мостового драйвера вони утворюють закінчену систему керування для крокового двигуна, що зменшує кількість необхідних від процесора динамічних сигналів.

Ці мікросхеми вимагають від мікропроцесорного блоку тактову частоту, що є частотою повторення кроків і статичний сигнал, що задає напрямок. Ще є наявною можливість подачі сигналу на включення напівкрокового режиму. При роботі у мікрокроковому режимі, потрібна більша кількість сигналів, крок визначатиметься частотою надходження імпульсів на вивід 11 DD1.

3.2. Розрахунок фільтра-випрямляча

Розрахуємо основні параметри елементів принципової схеми із урахуванням параметрів навантаження. Згідно технічної документації на вимірювальний комплекс $U_{\text{н}} = 12 \text{ В}$, $I_{\text{н}} = 4 \text{ А}$, (загальна потужність навантаження 48 Вт). Вхідний фільтр-випрямляч приведений на плакаті креслення схеми електричної принципової.

Діоди вхідного випрямляча обираються виходячи із умови, що зворотна напруга на діоді повинна бути більша за амплітудне значення напруги мережі, яка розраховується за наступним виразом:

$$U_{\text{іЗвор}}^{\text{мах}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{мер}} = \sqrt{2} \cdot 220 = 310 \text{ В.} \quad (3.5)$$

Ці діоди працюють в умовах низькочастотних струмів, тому обираємо широкоживані вітчизняні діоди типу КД226Г, які мають наступні параметри:

$$U_{\text{звор}}^{\text{д}} = 600 \text{ В}, \quad i_{\text{пр}} = 1,7 \text{ А}, \quad i_{\text{пр.і}} = 50 \text{ А (при } \tau_{\text{и}} \leq 10 \text{ мс)}.$$

Задля обмеження струму, що тече крізь діоди при вмиканні блока живлення до мережі, вводимо резистор R1 (цей елемент погіршує ККД, але відмова від нього погіршує показники надійності). Технічні вимоги на діоди типу КД226Г дозволяють у разі роботи на ємнісне навантаження збільшувати однократний імпульс струму $i_{\text{пр.і}}$ в 1,57 рази.

У нашому випадку $i_{\text{пр.і}} = 78,5 \text{ А (при } \tau_{\text{и}} \leq 10 \text{ мс)}$.

Обираємо із запасом опір резистора: $R1 = 4,7 \text{ Ом}$. Перевіримо початковий імпульсний струм крізь діоди:

$$i_{\text{поч}} = \frac{U_{\text{ізвор}}^{\text{max}}}{R1} = \frac{310}{4,7} = 66 \text{ А.} \quad (3.6)$$

Як бачимо, даний режим доцільно застосовувати для нашого випадку. Ємність конденсатора у фільтрі визначаємо у загальному вигляді за виразом:

$$C = \left(\frac{1}{m} + \frac{\Theta}{\pi} \right) \frac{1}{2K_n f_n R_n}, \quad (3.7)$$

де m – число фаз випрямляча (для діодного випрямляча $m=2$),

Θ – кут відсічення діодів (наближено задамось $\Theta=0^\circ$),

K_n – коефіцієнт пульсацій напруги,

f_n – частота живлячої мережі ($f_n = 50 \text{ Гц}$).

Визначимо ємність конденсатора через потужність перетворювача:

$$C = \frac{P_n}{200K_n \cdot U_n^2} \quad (3.8)$$

Оскільки напруга живлення може знижуватись від 310 В до 284 В, а коефіцієнт пульсацій K_p приймаємо 2%, маємо ємність конденсатора:

$$C = \frac{50}{200 \cdot 0,02 \cdot (248)^2} \approx 200 \text{ мкФ}$$

Отже, обираємо значення ємності конденсатора зі стандартного ряду 220 мкФ. Допустима напруга у нього повинна бути більша за максимальне амплітудне значення у мережі, тобто вища за 340 В.

Перевіримо час імпульсу струму через діоди моста

$$\tau_i = R_1 C_1 = 4,7 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ мс} < 10 \text{ мс}. \quad (3.9)$$

Оскільки конденсатор С1 знижує радіоперешкоди до прийняттого рівня, фільтр обираємо стандартної простої конструкції.

3.3 Розрахунок трансформатора

Визначаємо коефіцієнт трансформації виходячи із мінімально можливої амплітуди напруги живлення 248 В:

$$k = \frac{U_n}{U_n^{\min}} = \frac{12}{248} = 0,048 \quad (3.10)$$

Визначаємо необхідну індуктивність первинної обмотки:

$$L = \frac{\gamma \cdot U_n^{\min} (1 - \gamma)}{2i_n \cdot f \cdot k} = \frac{0,5 \cdot 248 \cdot (1 - 0,5)}{2 \cdot 4 \cdot 25 \cdot 0,048 \cdot 10^3} = 6,5 \text{ мГн}, \quad (3.11)$$

де γ - коефіцієнт магнітної проникності.

Визначимо середній струм первинної обмотки:

$$i_n = i_i \cdot k = 4 \cdot 0,048 = 0,2 \text{ А}$$

Обираємо магнітопровід Ш16x20 з фериту 2500НМС1 із основними параметрами:

$$S_0 = 4,18 \text{ см}^2, S_{cp} = 3,2 \text{ см}^2, l_{cp} = 12,3 \text{ см}.$$

Об'єм магнітопроводу:

$$V_M = \left(\frac{S_0 \cdot S_{cp}}{l_{cp}} \right)^{\frac{3}{4}} = \left(\frac{4,18 \cdot 3,2}{12,3} \right)^{\frac{3}{4}} = 32 \text{ см}^3 \quad (3.12)$$

Кількість витків первинної обмотки:

$$w_1 = \frac{\gamma \cdot U_{\min}}{B \cdot S \cdot f} \quad , \quad (3.13)$$

де B – амплітуда вектору магнітної індукції у осерді, S – площа поперечного перерізу осердя.

Отже,

$$w_1 = \frac{0,5 \cdot 248}{0,25 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^3} = 64$$

Необхідна величина магнітного зазору:

$$\delta = \frac{\mu_0 \cdot \omega_1^2 \cdot S}{L} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 64^2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4}}{6,5 \cdot 10^{-3}} = 0,25 \text{ мм} \quad (3.14)$$

Розраховуємо еквівалентну проникність магнітопроводу:

$$\mu_n = \frac{l_{\text{н\ddot{o}}}}{i_i} = \frac{123}{0,2} = 615$$

Перевіримо об'єм магнітопроводу за критерієм припустимого перегрівання:

$$V_M = \left[\frac{5 \times 10^3 \times L \times 10^{-3} \times (i_L^{\max})^2}{\mu_c \times \alpha \times \Delta T} \right]^{\frac{3}{4}} = \left[\frac{5 \times 10^3 \times 6,5 \times 10^{-3} \times 0,2^2}{615 \times 1,2 \times 10^{-3} \times 40} \right]^{\frac{3}{4}} = 0,1 \text{ см}^3 \quad (3.15)$$

де α – температурний коефіцієнт тепловіддачі ($1,2 \cdot 10^3$),

ΔT – температура нагрівання магнітопроводу (40°C).

Число витків вторинної обмотки:

$$\omega_2 = k \cdot w_1 = 0,048 \cdot 64 = 3 \quad (3.16)$$

Обмотка зворотного зв'язку живить мікросхему у робочому режимі, а також є джерелом сигналу зворотного зв'язку для схеми

регулювання напруги і датчиком для детектора нуля. Виходячи із номінальної напруги живлення 12В, число витків цієї обмотки:

$$\omega_3 = \omega_2 = 3$$

Діаметри проволочи для обмоток обираємо виходячи з умови: щільність струму не більша за 5 А/мм^2 , отже

$$d_1 = 0,31 \text{ мм}; \quad d_2 = 1,12 \text{ мм}; \quad d_3 = 0,31 \text{ мм};$$

$$K_3 = 5 \frac{S_{\text{пр}}^1 \omega_1 + S_{\text{пр}}^2 \omega_2 + S_{\text{пр}}^3 \omega_3}{S_0} = 5 \cdot \frac{5,5 + 3 + 0,3}{418} = 0,13 \quad (3.17)$$

3.5 Розрахунок фіксуючого ланцюга

У якості діода VD8 обираємо діод типу MUR460 класу ultra-fast виробництва фірми Motorola (зворотна напруга 600 В, допустимий прямий постійний струм 4 А, час зворотного відновлення 75 нс).

Величина резистору R12:

$$R_{12} = \frac{U_{\text{п}}^2}{0,02 \cdot P_{\text{п}}} = \frac{(312)^2}{0,02 \cdot 50} \approx 100 \text{ кОм} \quad (3.18)$$

Величина конденсатора C7:

$$C_7 = \frac{100}{R \cdot f} = \frac{100}{10^5 \cdot 25 \cdot 10^3} \approx 47 \text{ нФ} \quad (3.19)$$

Допустима напруга для цього конденсатора не менша за 340 В.

3.6 Вихідний випрямляч і фільтр

У якості випрямляючого діоду використаємо діод Шоткі MBR1645. Цей діод встановлюється на радіаторній пластині із розмірами $h=30 \text{ мм}$, $B=30 \text{ мм}$, $n=5 \text{ мм}$.

Конденсатор C9 потрібен для згладжування напруги з $\Theta \neq 0$. Неполарний керамічний конденсатор C8 необхідний для шунтування вищих гармонік вихідної напруги. Опір навантаження, що не вимикається, $R13 = 18 \text{ кОм}$.

3.8 Опис структурної схеми

Структурна схема обчислювача та основних функціональних блоків зображена на відповідному плакаті. Центральною ланкою вимірювальної системи є обчислювач на базі мікропроцесора UltraSPARC T2, який взаємодіє через системний інтерфейс та бар'єр гальванічного розв'язку БИ-3 з двома рівними за функціональністю блоками, що обслуговують вимірювальний перетворювач. Зв'язок між обчислювачем та перетворювачами здійснюється через двосторонній декодер модифікованого HART протоколу. Дані, що надходять в обчислювач, опрацьовуються двома арбітрами системної шини Ш2 та Ш3. Шина Ш2 здійснює адресацію блоків даних, а Ш3 – безпосередньо роботу з ними на частоті 150 МГц. Існують ще два блоки Ш1 (здійснює кешування даних другого рівня L2 на частоті 200 МГц, але в зв'язку з високою продуктивністю мікропроцесора, кеш L2 в роботі застосовується рідко) та Ш4 (працює на частоті 150 МГц, ширина каналу 128 біт, здійснює безпосередню пересилку даних від перетворювачів на системний інтерфейс).

До системного інтерфейсу безпосередньо під'єднанні арифметичні та логічні блоки: АЛ1 – АЛ5. Оброблені в них дані передаються через блок АЛ4 в кеш-пам'ять даних. Паралельно процесор виконує програму обробки даних, що записані в ПЗП. На основі неї формувач команд ФК задає рівень тиску у вимірювальних трубопроводах, достатнього для дотримання заданої точності комерційного обліку.

Дані з кеш-пам'яті проходять подальшу обробку в контролері основної пам'яті: через блок попереднього кешування КШ1, де відбувається структурування, вони направляються на блок тимчасового зберігання БТЗ, де чекають формування повного пакету інформації. Потім по внутрішній 64-бітній шині через кеш-пам'ять переходять у блок зберігання-узагальнення БЗУ, де відбувається їх корекція блоком попереднього запису, що має прямий доступ до кеш-пам'яті по тій же 64-бітній шині. З БЗУ через внутрішню шину процесора дані потрапляють у буфер обміну 2, звідки по шині надходять в блок керування,

який безпосередньо керується мікропроцесором. Дані надходять у буфер обміну 3, де відбувається їх подальша статична обробка згідно програми, закладеної в обчислювач: протягом години інформація з вимірювального трубопроводу зберігається в блоці пам'яті П1, який контролюється незалежним програмованим лічильником Ліч1.

При вичерпанні об'єму пам'яті П1, Ліч1 дає команду на буфер обміну 3, звідки він безпосередньо дає сигнал процесору, який за допомогою блоків АЛ1 – АЛ5 здійснює статистичну обробку з заданою програмою в ППЗП точністю, формує середнє погодинне значення та пересилає його через блок керування та буфер обміну 3 в блок пам'яті П2. Аналогічно, при вичерпанні пам'яті П2, що фіксує середньодобові погодинні значення вимірювальних параметрів, програма формує середнє значення за добу та пересилає його в блок пам'яті П3, що теж контролюється лічильником Ліч3. Цей блок пам'яті найбільш місткий, та системою не передбачено можливості статистичної обробки даних з нього. Це означає, що контрольна перевірка роботи обчислювача (разом зі зняттям інформації для обробки на ПЕОМ) повинна проводитися з певною строгою періодичністю (не рідше одного разу на місяць). Проект модифікації роботи обчислювача не передбачає зміни цієї частини алгоритму.

До блоку керування під'єднанні два автономних запам'ятовуючі комплексу ЗП1 та ЗП2, що фіксують відповідно відхилення від нормальної роботи вимірювального комплексу (вихід параметрів за межі, запрограмовані в ПСП) та втручання оператора в роботу комплексу (зміна програми чи зчитування даних, дата втручання). Обчислювач має такі інтерфейси:

- порт RS-232C та порт USB (запропонований в даному проекті) для зв'язку з ПЕОМ для зчитування даних;

- вбудований модем для зв'язку через dial-up з модемним пулом підприємства з метою оперативного контролю процесу вимірювання;

- лінії керування та зв'язку з ЕП засувки, мають вбудовану логіку для формування сигналів керування кроковим двигуном: P1, СК1, P2, СК2.

Окремою платою передбачений блок живлення з формувачами напруг для різних структурних частин обчислювача, наявністю акумуляторів та блока аварійної сигналізації, безпосередньо реалізованого в компоненті “електронний сторож” обчислювача. Цей момент передбачає подачу сигналу запрограмованим методом при зникненні напруги живлення від мережі.

Два блоки вимірювальних перетворювачів мають аналогічну структуру, вони лише орієнтовані на діапазони вимірювань. Апаратно датчик густини газу та його перетворювач реалізовані в одному блоці, так як і датчик температури, запропонований до модернізації. Таким чином, до вимірювального перетворювача, розташованого у вибухонебезпечній зоні операторської підводяться лише параметри, що стосуються тиску газу, по вимірювальним лініям. Всі інші параметри надходять безпосередньо в цифровій формі від трубопровода. Кодер та декодер модифікованого HART-протоколу дозволяють довести до нуля імовірність помилки при передачі даних.

3.9 Розробка функціональної схеми автоматизації

Система автоматичного керування процесом вимірювання повинна забезпечувати дотримання належного рівня точності та заданої послідовності дій в різних режимах роботи засувки. Умови роботи системи визначаються технологічними режимами експлуатації родовища. Комплексна схема автоматизації складається з наступних окремих частин: двох вимірювальних перетворювачів (багатопараметричних), що контролюють та перетворюють в стандартизований електричний сигнал (HART-протокол, модифікований в даному дипломному проекті згідно потреб точності вимірювань); вимірювальних перетворювачів, що здійснюють вимірювання абсолютного тиску, температури, та перепаду тисків на вимірювальній діафрагмі; обчислювача, що здійснює обробку та збереження електричних сигналів; вихідних інтерфейсів EY, EE, що здійснюють керування чотирма

- вимірювач абсолютного тиску, що передає сигнал в цифровій формі на багатопараметричний перетворювач.

Принцип роботи вимірювального перетворювача витрати газу в перепад тисків полягає у під'єднанні на певній визначеній відстані (50 мм) імпульсних ліній, які передають за допомогою тиску вимірювального середовища (газу) безпосередньо на багатопараметричний перетворювач абсолютні значення тисків до та після діафрагми. Ці значення безпосередньо перетворюються уже в PDT.

Датчик температури встановлюємо цифровим уже на вимірювальному трубопроводі. Заживлюється він через лінію зв'язку з багатопараметричним перетворювачем (PDT) та використовує його лише як інтерфейс для передачі інформації на обчислювач. Вимірювач абсолютного тиску PE апаратно реалізований як манометр з цифровим виходом. Він теж використовує PDT для зв'язку з обчислювачем.

Обидва PDT (з кожної вимірювальної гілки трубопроводу) через бар'єр БИ-3, що функціонально позначений як FZ, під'єднуються на порти обчислювача UIR, де відбувається обробка інформації та аналіз дій для забезпечення необхідної точності вимірювань. Комутаційний елемент HS забезпечує можливість підключення різних інтерфейсів для зняття інформації чи перепрограмування комплексу. Передбачене підключення модему чи ПЕОМ.

Паралельний вимірювальний перетворювач густини газу (залежить від його складу) встановлюється після точки з'єднання двох гілок ВТП, дозволяє вносити корекцію у вимірювальний процес, врахувати коливання вмісту метану в природному газі. Цей показник є чисто інформаційним, та дозволяє вибрати з таблиці, занесеної в пам'ять обчислювача відповідний коефіцієнт для врахування складу газу, який використовується обчислювачем при підрахунках. Це дозволяє значно зменшити неточність, порівняно з фіксованим занесенням густини газу один раз в місяць в пам'ять обчислювача.

Елементи ЕУ, ЕЕ, що апаратно входять до складу обчислювача, аналізують та приймають рішення, подають сигнал керування засувками. Це відбувається, коли один з показників (тиск чи перепад тиску на діафрагмі) наближується до межі точності, припустимої при комерційному обліку. В даному випадку система вчиняє наступні дії: при малій витраті газу до 1000 м³/год та існуючій тенденції подальшого зниження, повністю закриваються засувки на трубопроводі з Ду = 100 мм (№1), та повністю відкриваються на трубопроводі з Ду = 80 мм (№2). При подальшому зниженні тиску, система буде подавати сигнал на кроковий електропривод трубопровода №2 для поступового закриття засувки. Це дозволить підтримувати тиск у ВТП на належному рівні.

У випадку зростання перепаду тиску у трубопроводі (більше 1000 м³/год), повністю закривається засувка на трубопроводі №2 та відкривається на трубопроводі №1 частково. При подальшому зростанні перепаду тиску обчислювач дає команду на покрокове відкриття засувки та, відповідно, зменшення тиску в трубопроводі №1. При зростанні витрати газу до 3000 м³/год система дає команду на поступове відкриття і засувки на трубопроводі №2. В даному режимі здійснюється вимірювання в кожному з трубопроводів. Обчислювач оперативно реагує на будь-які зміни тиску та можливий перехід в будь-який з розглянутих раніше двох режимів, який відбудеться лише при зниженні витрати газу до 2000 м³/год.

Сигнали про всі режими роботи відображуються на рідинно-кристалічному дисплеї обчислювача в операторській, або на будь-якому з під'єднаних периферійних пристроїв для зчитування інформації.

4. РОЗРАХУНОК САК

4.1 Особливості структурної схеми та визначення передавальної функції САК

4.1.1 Призначення функціональних елементів

Слідкуючу систему автоматичного керування (САК) обліком витрати газу (рис. 3.1.) можна умовно подати так, щоб вона складалася з двох функціональних частин - об'єкта керування з електродвигуном і знижувальним редуктором та пристрою керування. Визначимо призначення всіх вказаних елементів.

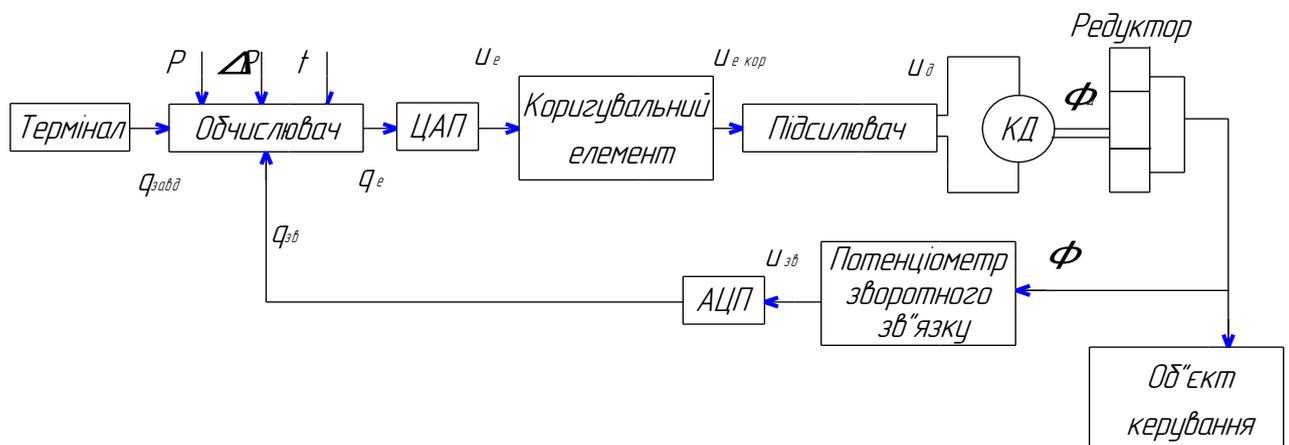


Рисунок 4.1- Спрощена функціональна схема цифро-аналогової мікропроцесорної слідкуючої САК обліком витрати газу

Термінал являє собою пульт оператора, функція якого - введення програми роботи слідкуючої системи.

Обчислювач приймає інформацію завдання у вигляді прямого сигналу і сигналу зворотного зв'язку, обробляє їх і видає отриманий результуючий сигнал.

Дисплей призначений для висвітлення інформації у вигляді знаків або графіків для повідомлення оператора про стан функціонування системи.

ЦАП - перетворювач електричного сигналу, який надходить у дискретній (цифровій) формі, у неперервну (аналогову) форму.

АЦП – являє собою зворотній перетворювач.

Підсилювач - пристрій, який призначений для передачі сигналу з підсиленням його по струму, напрузі або потужності.

Потенціометр - прилад, перетворюючий механічний сигнал в електричний.

Кроковий електродвигун - перетворювач електричної енергії в механічну.

Редуктор - механізм, який складається із змонтованих в окремому корпусі передач зчеплення і призначений для зміни параметрів обертального руху - зменшення кутової швидкості та збільшення обертального моменту.

В якості об'єкта керування виступає механічна засувка, яка призначена для регулювання ефективного перерізу каналу протікання газу. До пристрою керування відносяться всі інші елементи системи.

Структурність побудови системи допускає її декомпозицію в процесі аналізу, тобто дослідження системи повинно протікати як вивчення її функціональних елементів і їх взаємодії між собою та зовнішнім середовищем. Тому, користуючись принципом декомпозиції, пристрій керування слідкуючої системи можна також подати у умовно більш простою системою з власними елементами та зв'язками .

4.1.2 Процес функціонування системи

Технолог з терміналу задає числові значення лінійних координат, які з певною точністю повинні бути відпрацьовані системою і відповідно змінити ефективний діаметр механічної засувки. Дана інформація перетворюється в двійковий код завдання $q_{завд}$ й через контролер зв'язку вводиться в ОЗП системи. Лінійні координати об'єкту керування за допомогою потенціометра зворотного зв'язку перетворюються в напругу постійного струму $U_{зз}$, а з допомогою АЦП - у двійковий код зворотного зв'язку $q_{зз}$, який також поступає в ОЗП мікропроцесорної системи. Під дією команд керуючої програми операційної системи і програми керування мікропроцесор здійснює побайтове порівняння двох кодів $q_{завд}$ й $q_{зз}$, в результаті чого виробляється код похибки розузгодження q_e , який за допомогою ЦАП перетворюється в напругу постійного струму U_e , тобто напругу похибки. Далі ця напруга похибки підсилюється по струму і напрузі в підсилювачі і підводиться до якоря крокового електродвигуна, який починає обертатися та через підвищуючий редуктор зміщує об'єкт керування і

повзунок потенціометра зворотного зв'язку. Коли код зворотного зв'язку $q_{зз}$ буде рівним коду завдання $q_{завд}$, напруга з виходу ЦАП стане рівна нулю й двигун зупиниться. Під дією керуючої програми і раніше введених команд з терміналу почнеться чергове відпрацювання наступного фрагменту програми.

Система буде працювати повністю автоматично з відображенням на екрані дисплею цифрових даних про величину переміщення, цикли роботи, несправності й т.д. Такий режим роботи, що дозволяє людині технологу в будь-який час оцінювати якісні й кількісні характеристики системи, називається інтерактивним. Крім контролю роботи слідкуючої системи в інтерактивному режимі, можна порівняно просто вносити корективи в програму роботи, тобто змінювати параметри руху, час циклів й т.д. Ця особливість інтерактивного режиму широко використовується в гнучких виробничих системах керування різними технологічними обладнаннями.

Для аналізу якісних і кількісних характеристик всієї системи необхідно скласти її математичну модель, тобто електричну схему подати у вигляді з'єднання різних типів ланок з їх передавальними функціями. Для цього проаналізуємо основні виконавчі елементи системи, визначимо їхні передавальні функції та побудуємо амплітудно-частотні характеристики.

4.1.3 Характеристики елементів системи

ЦАП, підсилювач, редуктор і потенціометр зворотного зв'язку $R_{зз}$, можна наближено розглядати як безінерційні, пропорційні, лінійні ланки. Відповідні передавальні коефіцієнти:

$$W_{ЦАП}(p) = K_{ЦАП} = 1,4$$

(взяте з паспортних даних ЦАП, модель FG443T, фірма Allegro).

Коефіцієнт підсилення $K_{п}$ знаходимо як відношення вихідної напруги блока драйверів, що надходить на обмотки крокового двигуна $U_{вих} = 12В$ до вхідної напруги керування ($U_{вх} = 1,46 В$ згідно технічної документації на блок драйверів). Тоді

$$K_{п} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} ; \quad (4.1)$$

$$W_{II}(p) = K_{II} = \frac{12}{1,46} = 8,2;$$

Для редуктора:

$$W_{ред}(p) = K_{ред} = 156;$$

Передавальну функцію потенціометра $W_{Потенц}(p)$ визначаємо з відношення згідно [2]:

$$W_{Потен}(p) = \frac{\pi \cdot \alpha_{КД}}{U_{вх} \cdot 180^\circ}, \quad (4.2)$$

де $\alpha_{КД} = 1,5^0$ - крок КД; $U_{вх} = 12$ мВ - вхідна напруга на потенціометрі. Звідси:

$$W_{Потен}(p) = K_{зз} = 0,014;$$

Але таке припущення справедливе тільки в тому випадку, коли нелінійності статичних характеристик елементів є незначними і не мають суттєвого впливу на величину інструментальної похибки всієї системи, яка породжена зоною нечутливості потенціометру, складає декілька кутових хвилин.

В цифро-аналогових системах квантування сигналу по рівню обумовлено кінцевою розрядністю цифрового подання інформації в обчислювальних пристроях. Для шістнадцятирозрядного ЦАП приріст його вихідної напруги на одиницю молодшого розряду двійкового коду похибки, тобто дискрета (або крок) квантування по рівню, буде визначатися виразом:

$$\Delta U_c = \frac{U_c}{2^n - 1} = \frac{10}{2^{16} - 1} = 0,0001526, \quad (4.3)$$

де U_c - напруга ЦАП.

Якщо статична характеристика підсилювача лінійна, а його коефіцієнт підсилення по напрузі дорівнює 8,2, то напруга однієї ступені ЦАП буде підсилена до рівня $8,2 \cdot 0,0001526 = 0,032$ В, що для більшості крокових електродвигунів знаходиться в межах їх напруги рушання, тобто напруги, необхідної для подолання статичного моменту опору. Дискрета настільки мала, що стрибками можна знехтувати. При малих рівнях квантування

вихідної напруги ЦАП його приблизно можна представити лінійною пропорційною ланкою :

$$W_{\text{ЦАП}}(p) = K_{\text{ЦАП}} = 1,4;$$

Необхідність застосування інтегрального корегувального пристрою з передавальною функцією обумовлюється властивістю усунути статичну та динамічні похибки. Її передавальна функція має вигляд :

$$W_{\text{кор}} = \frac{1}{T_{\text{кор}} \cdot p} = \frac{1}{0,8p}; \quad (4.4)$$

де $T_{\text{кор}}$ – стала часу коригувальної ланки, 0,8 с.

Кроковий електродвигун слідкуючої системи має нелінійну статичну характеристику з зоною нечутливості (напруга рушання) й зоною насичення. При достатньому коефіцієнті підсилення підсилювача зона нечутливості електродвигуна може бути зведена до мінімуму. Враховують, що за вхідну величину електродвигуна прийнятий кут повороту його ротора, в динаміці двигун подають інтегрувальною ланкою, а з врахуванням електромеханічної і електромагнітної постійних часу електродвигун описується ланкою – двома аперіодичними (інерційними) .

$$W_{\text{КД}}(p) = \frac{K_{\text{КД}}}{(T_E \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot p + 1)}; \quad (4.5)$$

Значення передавального коефіцієнта $K_{\text{КД}}$ та постійних часу T_E і T_M розраховуємо з паспортних даних вибраного двигуна :

$$K_{\text{КД}} = 2,38583 \approx 2,386 \text{ рад/В}; \quad T_E = 8,24 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad T_M = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ с}.$$

Отримуємо :

$$W_{\text{КД}}(p) = \frac{K_{\text{КД}}}{(T_E \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot p + 1)} = \frac{2,386}{(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1) \cdot (1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)} \quad (4.6)$$

Використання мікропроцесорів в якості обчислювальних пристроїв цифро-аналогових систем породжує деякі проблеми, властиві методам обробки цифрової інформації. Мікропроцесори перших поколінь, які переважно

використовуються в промислових слідкуючих системах як найбільш дешеві, є "повільними" обчислювальними пристроями, а працювати їм доводиться в режимі реального часу, тому часові затримки, пов'язані з обробкою інформації, мають значний вплив на характеристики всієї системи. Часові затримки визначаються з аналізу програми, що реалізує алгоритм роботи. Час виконання конкретної команди прямо пропорційний загальному числу машинних станів, через які повинен пройти мікропроцесор при виконанні цієї команди. Для реалізації програми порівняння двох кодів й вироблення коду похибки цьому мікропроцесору необхідно затратити від 0,2 до 0,6 мс. Як наслідок цього, в динаміці обчислювальний пристрій можна подати комбінованою ланкою - пропорційною та ланкою чистого запізнювання, враховуючи, що для нашої обчислювальної системи запізнення $\tau = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ н (с)}$:

$$W_{оп}(p) = K_{оп} \cdot e^{-\tau p} = e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}; \quad (4.7)$$

Підвищуючий редуктор має нелінійну характеристику через наявність люфта. Але оскільки його інструментальна похибка мала, то передавальна функція наближено така:

$$W_{ред}(p) = K_{ред} = 156;$$

Для перетворення напруги похибки U_{33} в цифровий двійковий код сигналу зворотного зв'язку використовується АЦП, що використовує принцип подвійного інтегрування. Він володіє інерційним запізненням, величина якого залежить від кількості розрядів АЦП. Тому АЦП в динаміці можна наближено подати аперіодичною (інерційною) ланкою першого порядку.

$$W_{АЦП}(p) = \frac{K_{АЦП}}{T_{АЦП} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,018p + 1}. \quad (4.8)$$

4.2 Визначення передавальної функції системи

4.2.1 Передавальні функції в операторній формі

Визначимо передавальну функцію системи.

Для розімкненого каналу передавальна функція (ПФ) визначається як добуток передавальних функцій ланок:

$$W_{роз}(p) = W_{ОП}(p) \cdot W_{ЦАП}(p) \cdot W_{Кор}(p) \cdot W_{ПП}(p) \cdot W_{КД}(p) \cdot W_{ред}(p) \cdot W_{Потенц}(p) \cdot W_{АЦП}(p) \quad (4.9)$$

$$W_{роз}(p) = \frac{K_{ОП} K_{ЦАП} K_{Кор} K_{ПП} K_{КД} K_{ред} K_{зз} K_{АЦП}}{T_{кор} p (T_E p + 1) (T_M p + 1) (T_{АЦП} p + 1)} e^{-\tau p}, \quad (4.10)$$

де :

$$W_{ОП}(p) = K_{ОП} \cdot e^{-\tau p} = 1 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}; \quad - \text{ПФ обчислювального пристрою};$$

$$W_{ЦАП}(p) = K_{ЦАП} = 1,4; \quad - \text{ПФ ЦАП};$$

$$W_{Кор} = \frac{1}{T_{кор} \cdot p} = \frac{1}{0,8 p}; \quad - \text{ПФ коригувального пристрою};$$

$$W_{ПП}(p) = K_{ПП} = 8,2; \quad - \text{ПФ підсилювача};$$

$$W_{КД}(p) = \frac{K_{КД}}{(T_E \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot p + 1)} = \frac{2,386}{(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1) \cdot (1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)};$$

-ПФ крокового двигуна;

$$W_{ред}(p) = K_{ред} = 156; \quad - \text{ПФ редуктора};$$

$$W_{Потен}(p) = K_{зз} = 0,014; \quad - \text{ПФ потенціометра 33};$$

$$W_{АЦП}(p) = \frac{K_{АЦП}}{T_{АЦП} \cdot p + 1} = \frac{1}{0,018 p + 1}; \quad - \text{ПФ АЦП}.$$

Таким чином для розімкненої системи передавальна функція має вигляд :

$$W_{роз}(p) = \frac{74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}{p (8,24 \cdot 10^{-3} p + 1) (1,33 \cdot 10^{-2} p + 1) (0,018 \cdot p + 1)},$$

$$\text{де } K = \frac{K_{ОП} K_{ЦАП} K_{Кор} K_{ПП} K_{КД} K_{ред} K_{зз} K_{АЦП}}{T_{кор}} =$$

$$= 1 \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot 8,2 \cdot 2,386 \cdot 156 \cdot 0,014 \cdot 1 / 0,8 = 74,78$$

Для замкненої системи :

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{роз.кан.}(p)}{1 + W_{роз}(p)} = \frac{Ke^{-\tau p}}{p(T_E p + 1)(T_M p + 1)(T_{АЦП} p + 1) + Ke^{-\tau p}}, \quad (4.11)$$

Після підстановки раніше отриманих результатів, маємо:

$$W_{зам}(p) = \frac{74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}.$$

Для замкненої системи відносно похибки:

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1 + W_{роз}(p)} = \frac{p(T_E p + 1)(T_M p + 1)(T_{АЦП} p + 1)}{p(T_E p + 1)(T_M p + 1)(T_{АЦП} p + 1) + Ke^{-\tau p}}. \quad (4.12)$$

$$W_{\varepsilon}(p) = \frac{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1)}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}.$$

4.2.2 Z-перетворення передавальних функцій

Для того, щоб виконати z-перетворення передавальної функції системи, необхідно розкласти її на прості дроби. Оскільки система має у своєму складі запізнювальну ланку - $W_{ОП}(p) = 1 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}$, то для виконання її z-перетворення, необхідно розкласти її у степеневий ряд. При розкладанні можна отримати нескінченну кількість коренів, які будуть прямувати до нуля, тому достатньо обмежитися максимальним показником ступеня нашої передавальної функції – 4. Отже для здійснення z-перетворення ПФ розімкненої системи використовуємо функцію :

$$W_{роз}(p) = \frac{74,78}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1)};$$

Перетворимо дану передаточну функцію на суму простих дроби.

З властивостей z-перетворення випливає необхідність аналізу функції

$$\frac{W_{роз}(p)}{p} = \frac{74,78}{p^2(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1)},$$

тому сума простих дроби матиме вигляд :

$$\frac{A}{(0,00824p+1)} + \frac{B}{(0,0133p+1)} + \frac{C}{(0,018p+1)} + \frac{D}{p^2} + \frac{E}{p},$$

Зводячи до загального знаменника, отримаємо наступне співвідношення, за методом невизначених коефіцієнтів:

$$\frac{R(p)}{p^2(0,00824p+1)(0,0133p+1)(0,018p+1)},$$

$$R(p) = A(0,0133p+1)(0,018p+1)p^2 + B(0,018p+1)(0,00824p+1)p^2 +$$

$$+ C(0,00824p+1)(0,0133p+1)p^2 + D(0,00824p+1)(0,0133p+1)(0,018p+1) +$$

$$+ E(0,00824p+1)(0,0133p+1)(0,018p+1)p = 74,78.$$

Відкривши дужки, отримаємо:

$$A(2,4 \cdot 10^{-4}p^4 + 0,0313p^3 + p^2) + B(1,5 \cdot 10^{-4}p^4 + 0,0026p^3 + p^2) +$$

$$+ C(1,1 \cdot 10^{-4}p^4 + 0,022p^3 + p^2) + D(1,97 \cdot 10^{-6}p^3 + 4,97 \cdot 10^{-4}p^2 + 0,0395p + 1) +$$

$$+ E(1,97 \cdot 10^{-6}p^4 + 4,97 \cdot 10^{-4}p^3 + 0,0395p^2 + p) = 74,78.$$

На підставі цього рівняння складемо систему рівнянь, прирівнявши відповідні коефіцієнти при степенях p :

$$\begin{cases} p^4 & \left\{ \begin{array}{l} 2,4 \cdot 10^{-4}A + 1,5 \cdot 10^{-4}B + 1,1 \cdot 10^{-4}C + 1,97 \cdot 10^{-6}E = 0 \\ p^3 & \left\{ \begin{array}{l} 0,0313A + 0,0026B + 0,022C + 1,97 \cdot 10^{-6}D + 4,97 \cdot 10^{-4}E = 0 \\ p^2 & \left\{ \begin{array}{l} A + B + C + 4,97 \cdot 10^{-4}D + 0,0629E = 0 \\ p^1 & \left\{ \begin{array}{l} 0,0395D + E = 0 \\ p^0 & \left\{ \begin{array}{l} D = 78,74 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right.$$

За допомогою системи MathCad отримуємо наступні значення коефіцієнтів після розрахунку системи:

$$A = 6,98 \cdot 10^{-3}; \quad B = -0,098; \quad C = 0,171;$$

$$D = 74,78; \quad E = -2,957.$$

На основі цього наше рівняння прийме наступний вигляд:

$$W_{\text{дт}} = \frac{6,98 \cdot 10^{-3}}{(0,00824p+1)} + \frac{-0,098}{(0,0133p+1)} + \frac{0,171}{(0,018p+1)} + \frac{74,78}{p^2} + \frac{-2,957}{p}.$$

Задамося значенням $\gamma=1$, тоді $\varepsilon=1-\gamma=1-1=0$. Таким чином, отримаємо дискретну передаточну функцію розімкненої системи за наступною формулою :

$$W(z) = \frac{z-1}{z} z \left\{ \frac{W_p(z)}{p} \right\}. \quad (4.13)$$

В цьому випадку імпульсний елемент є екстраполятором нульового порядку.

Використавши таблицю z-перетворень отримаємо :

$$W_p(z) = \frac{z-1}{z} \left[\frac{0,847z}{(z-0,00857)} + \frac{-7,398z}{(z-0,052)} + \frac{9,507z}{(z-0,113)} + \frac{2,933z}{(z-1)^2} + \frac{-2,957z}{z-1} \right].$$

Спростивши вираз, отримаємо:

$$W_p(z) = \frac{0,671z^3 + 1,55z^2 + 0,22z + 0,00182}{(z-0,00857)(z-0,052)(z-0,113)(z-1)}.$$

Визначимо дискретну передавальну функцію замкненої системи.

$$\Phi(z) = z \left\{ \frac{W_n(p)}{1 + W_n(p) \cdot W_{33}(p)} \right\} = \frac{W_n(z)}{1 + W(z)}. \quad (4.14)$$

Для цього нам спочатку потрібно знайти ПФ неперервної частини, тобто привести її до можливості z-перетворення.

Передавальна функція неперервної частини має вид :

$$W_n(p) = \frac{74,78}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)}. \quad (4.15)$$

З властивостей z-перетворення впливає необхідність аналізу функції :

$$\frac{W_n(p)}{p} = \frac{74,78}{p^2(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)}. \quad (4.16)$$

Знову використовуємо метод невизначених коефіцієнтів :

$$\frac{A}{(0,00824 p + 1)} + \frac{B}{(0,0133 p + 1)} + \frac{C}{p^2} + \frac{D}{p},$$

$$\frac{R2(p)}{p^2(0,00824p+1)(0,0133p+1)}$$

$$R(p) = A(0,0133p^3+p^2) + B(0,00824p^3+p^2) + C(1,1 \cdot 10^{-4}p^2 + 0,022p+1) +$$

$$+ D(1,1 \cdot 10^{-4}p^3 + 0,022p^2+p) = 74,78.$$

Складемо систему рівнянь і визначимо коефіцієнти :

$$\begin{cases} p^3 & \left\{ \begin{array}{l} 0,0133A+0,00824B+0,00011D = 0 \\ A+B+0,00011C+0,022D = 0 \\ D+0,022C = 0 \\ C = 74,78 \end{array} \right. \\ p^2 \\ p^1 \\ p^0 \end{cases}$$

З розв'язку даної системи рівнянь отримаємо значення коефіцієнтів :

$$\begin{aligned} A &= 0,035; & B &= 0,00827; \\ C &= 78,74; & D &= -1,611. \end{aligned}$$

Тоді отримаємо передавальну функцію:

$$W_{\text{вф}} = \frac{0,035}{(0,00824p+1)} + \frac{0,00827}{(0,0133p+1)} + \frac{78,74}{p^2} + \frac{-1,611}{p}.$$

Використавши таблицю z-перетворень отримаємо :

$$W_n(z) = \frac{z-1}{z} \left[\frac{4,22z}{(z-0,00857)} + \frac{-0,622z}{(z-0,052)} + \frac{2,933z}{(z-1)^2} + \frac{-1,611z}{z-1} \right] =$$

$$= \frac{1,987z^3 - 2,77z^2 + 3,752z - 0,214}{(z-0,00857)(z-0,052)(z-1)}. \quad (4.16)$$

Визначимо ПФ каналу зворотного зв'язку :

$$W_{\text{зз}}(p) = W_{\text{Потенц}}(p) \cdot W_{\text{АЦП}}(p) = \frac{0,014}{0,018p+1}. \quad (4.17)$$

Тоді z-перетворення буде мати вигляд :

$$W_{33}(z) = \frac{0,778z}{z - 0,113}; \quad (4.18)$$

z-перетворення ПФ замкненої системи визначається так :

$$W_H(z) \cdot W_{33}(z) = \frac{1,987z^3 - 2,77z^2 + 3,752z - 0,214}{(z - 0,00857)(z - 0,052)(z - 1)} \cdot \frac{0,778z}{(z - 0,113)},$$

$$W_{зам}(z) = \frac{1,539z^4 - 2,155z^3 + 2,919z^2 - 0,164z}{(z - 0,00857)(z - 0,052)(z - 1)(z - 0,113)}. \quad (4.19)$$

Таким чином, отримаємо результат z-перетворення ПФ замкненої системи:

$$W_{зам}(z) = \frac{1,539z^4 - 2,155z^3 + 2,919z^2 - 0,164z}{z^4 - 1,174z^3 + 0,181z^2 - 0,00734z + 5,036 \cdot 10^{-5}}. \quad (4.20)$$

4.3 Визначення стійкості системи

4.3.1 Критерій Гурвіца

Для оцінки стійкості системи необхідно дослідити коефіцієнт характеристичного рівняння та мінори визначника Гурвіца.

Передавальна функція замкненої системи має вигляд :

$$W_{зам}(p) = \frac{74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}. \quad (4.21)$$

Для отримання характеристичного рівняння, розкладемо ПФ запізнювальної ланки у степеневий ряд, обчисливши три перших доданки :

$$74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p} = 74,78 \cdot (1 - 5,2 \cdot 10^{-4} p + 1,352 \cdot 10^{-7} p^2 - 2,343 \cdot 10^{-11} p^3);$$

Поліном знаменника $W_{зам}$ має обчислюється виразом:

$$\begin{aligned} p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p} = \\ = p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + \end{aligned}$$

$$+ 74,78 \cdot (1 - 5,2 \cdot 10^{-4} p + 1,352 \cdot 10^{-7} p^2 - 2,343 \cdot 10^{-11} p^3);$$

Тоді характеристичне рівняння системи приймає вигляд :

$$1,973 \cdot 10^{-6} p^4 + 4,973 \cdot 10^{-4} p^3 + 0,03955 p^2 + 0,961 p + 74,78 = 0.$$

Позначимо :

$$a_0 = 1,973 \cdot 10^{-6}; \quad a_1 = 4,973 \cdot 10^{-4}; \quad a_2 = 0,03955;$$

$$a_3 = 0,961; \quad a_4 = 74,78;$$

Перша умова критерію Гурвіца, як бачимо виконується, тобто

$a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0$, тому перевіряємо другу умову.

Запишемо визначник Гурвіца :

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 4,973 \cdot 10^{-4} & 0,961 & 0 & 0 \\ 1,973 \cdot 10^{-6} & 0,03955 & 74,78 & 0 \\ 0 & 4,973 \cdot 10^{-4} & 0,961 & 0 \\ 0 & 1,973 \cdot 10^{-6} & 0,03955 & 74,78 \end{vmatrix}.$$

Після розрахунку на ЕОМ в програмі MathCad отримаємо :

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = 1,056 \cdot 10^{-4} \geq 0, \text{ а інші діагональні мінори}$$

$$|4,973 \cdot 10^{-4}| \geq 0.$$

$$\begin{vmatrix} 4,973 \cdot 10^{-4} & 0,961 \\ 1,973 \cdot 10^{-6} & 0,03955 \end{vmatrix} \geq 0.$$

$$\begin{vmatrix} 4,973 \cdot 10^{-4} & 0,961 & 0 \\ 1,973 \cdot 10^{-6} & 0,03955 & 74,78 \\ 0 & 4,973 \cdot 10^{-4} & 0,961 \end{vmatrix} \geq 0.$$

На підставі того, що перший коефіцієнт і всі діагональні мінори більші нуля, робимо висновок, що система стійка за критерієм Гурвіца.

4.3. 2 Критерій Найквіста

Для стійкості замкненої системи необхідно і достатньо, щоб при зміні частоти амплітудо-фазова характеристика (АФХ) розімкненої системи $W_p(i\omega)$ не охоплювала критичну точку $(-1, j0)$, інакше кажучи, при зміні частоти різниця між кількістю додатних та від'ємних переходів АФХ через відрізок

$(-\infty, -1)$ дійсної вісі дорівнювала нулеві.

Про стійкість розімкненої імпульсної системи можна судити за стійкістю її неперервної частини. Тобто неперервна та розімкнена система або стійкі, або неперервні, або нестійкі разом.

Оскільки в нашому випадку система має запізнювальну ланку, то наявність запізнення не впливає на стійкість розімкненої системи.

Передавальна функція неперервної частини розімкненої системи без урахування чистого запізнення на $e^{-tP} = e^{-0,00052p}$ має вид :

$$W_{роз}(p) = \frac{74,78}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1)}. \quad (4.22)$$

Підставивши замість $p \rightarrow j\omega$ отримуємо вираз:

$$\begin{aligned} W_{роз}(j\omega) &= \frac{74,78}{(1,973 \cdot 10^{-6} \omega^4 + 0,03955 \omega^2) + j(4,973 \cdot 10^{-4} \omega^3 + \omega)} = \\ &= \frac{74,78 \cdot (1,973 \cdot 10^{-6} \omega^4 + 0,03955 \omega^2)}{(1,973 \cdot 10^{-6} \omega^4 + 0,03955 \omega^2)^2 + (4,973 \cdot 10^{-4} \omega^3 + \omega)^2} + \\ &+ \frac{-74,78 \cdot (4,973 \cdot 10^{-4} \omega^3 + \omega)}{(1,973 \cdot 10^{-6} \omega^4 + 0,03955 \omega^2)^2 + (4,973 \cdot 10^{-4} \omega^3 + \omega)^2} j \end{aligned}$$

Будуємо АФХ розімкненої системи :

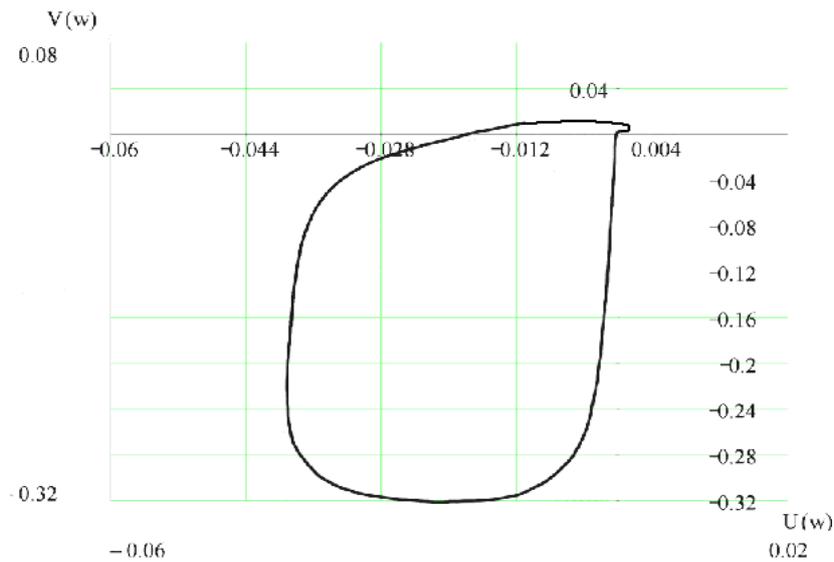


Рисунок 4.2 – АФХ розімкненої системи

На підставі одержаної характеристики робимо висновок: АФХ не охоплює точку $(-1, j0)$, тому система стійка за критерієм Найквіста.

З використанням програмного пакету Mathcad побудуємо також логарифмічні частотні характеристики - амплітудно-частотну (ЛАЧХ) та фазо-частотну (ЛФЧХ).

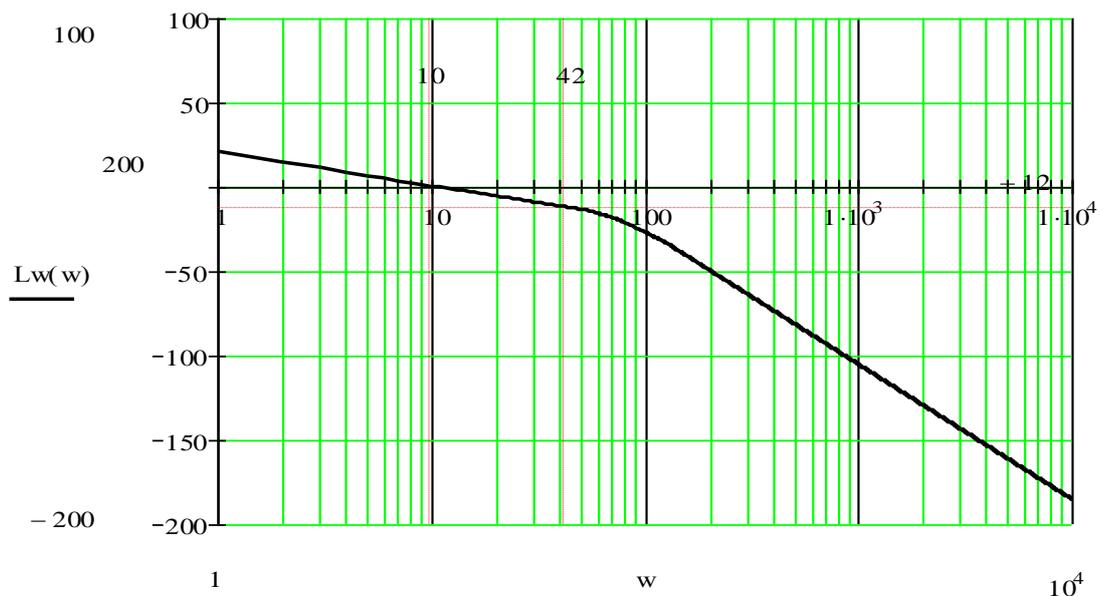


Рисунок 4.3 – ЛАЧХ розімкненої системи

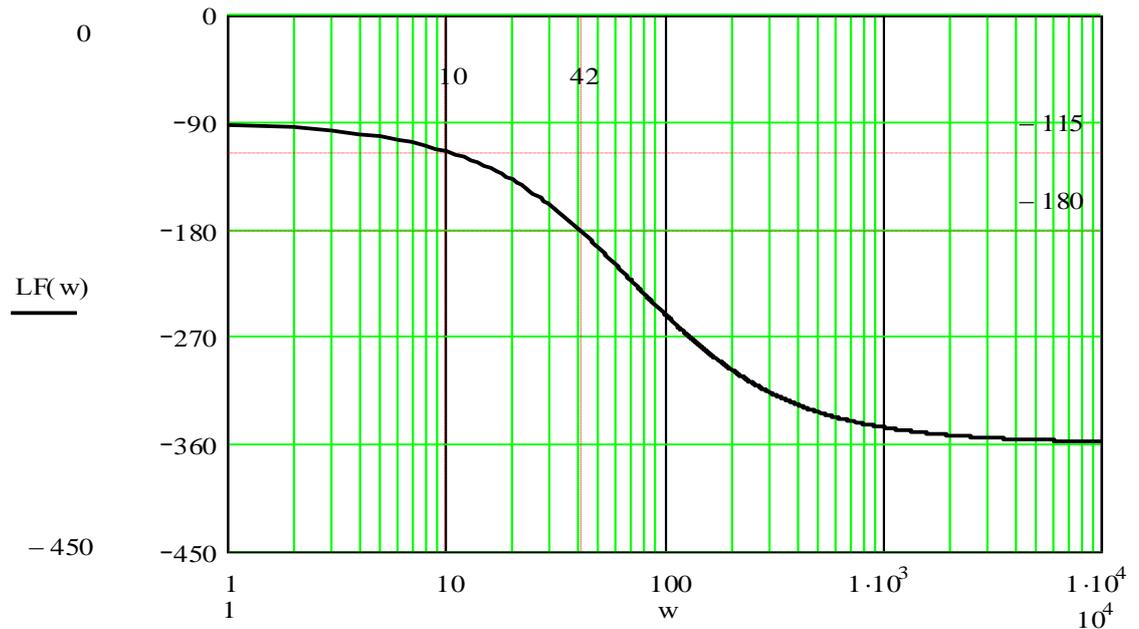


Рисунок 4.4 – ЛФЧХ розімкненої системи

Як бачимо з відповідних графіків ЛАЧХ і ФЧХ:

- запас за амплітудою $\Delta L = 24$ дБ ;
- запас за фазою $\Delta\varphi = |(-180^\circ - (-115^\circ))| = 65^\circ$.

4.3.3 Розрахунок перехідних процесів системи

Визначимо закон зміни вихідної величини $h(t)$ замкненої системи при ступінчастій задаючій функції $I(t)$ і нульових початкових умовах.

ПФ замкненої системи :

$$W_{зам}(p) = \frac{74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}} \quad (4.23)$$

Визначимо корені знаменника за допомогою програми MathCad:

$$p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1) + 74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p} = 0.$$

$$\begin{aligned} \text{Корені : } p_1 &= -126,95 - 48,43i & p_2 &= -126,95 + 48,43i \\ p_3 &= -3,92 - 8,16i & p_4 &= -3,92 + 8,16i. \end{aligned}$$

Для переходу до оригіналу скористуємося теоремою розгортки, тобто другою теоремою Хевісайда, суть якої полягає в наступному: якщо зображення $W_{\text{роз}}(p)$ передавальної функції розімкненої системи має вигляд

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{p \cdot F_2(p)} = \frac{74,78 \cdot e^{-5,2 \cdot 10^{-4} p}}{p(8,24 \cdot 10^{-3} p + 1)(1,33 \cdot 10^{-2} p + 1)(0,018 \cdot p + 1)}; \quad (4.24)$$

то її оригінал дорівнює

$$h(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^4 \frac{F_1(p_k)}{p_k \cdot F_2(p_k)} \cdot e^{p_k t}.$$

Виконуючи необхідні розрахунки отримаємо :

$$h(t) = 1 + 5,98 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-126,95t} \sin(48,43t + 117^\circ) - 0,9832 \cdot e^{-3,92t} \cos(8,16t + 21^\circ);$$

Будуємо графік перехідної характеристики :

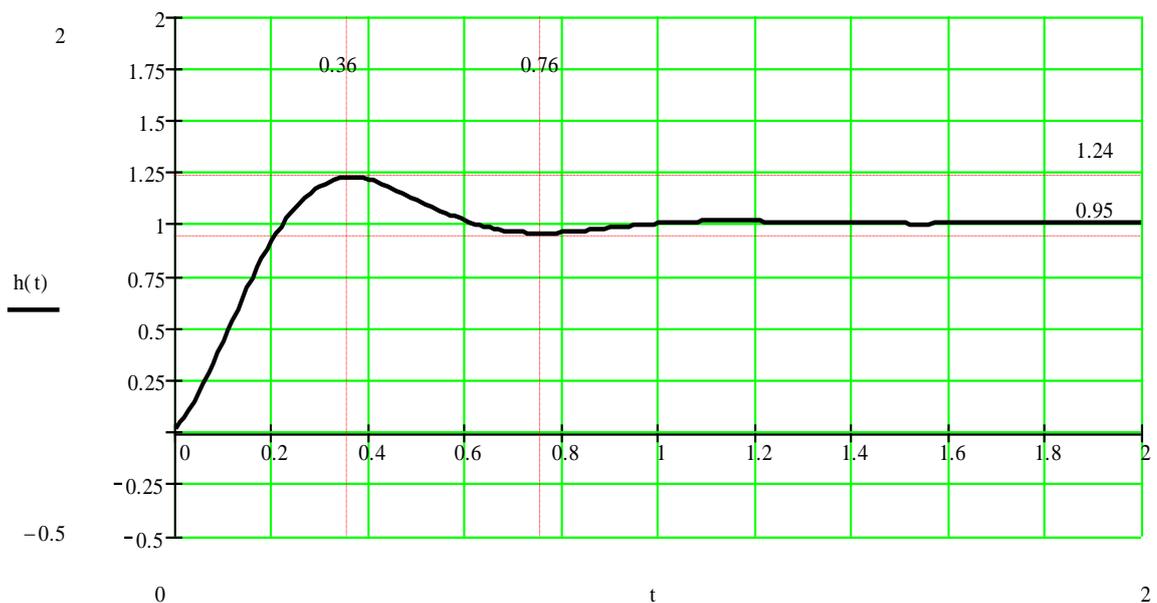


Рисунок 4.5 – Графік перехідної характеристики системи

4.3.4. Визначення якісних показників перехідного процесу

По вигляду графіку можна зробити наступні висновки:

Перехідний процес має характер затухаючих коливань.

Перерегулювання, тобто відношення різниці максимального значення перехідної функції і її встановленого значення до встановленого значення дорівнює :

$$\sigma = \frac{h_{max} - h_H}{h_H} = \frac{1,24 - 1}{1} = 0,24 = 24\%. \quad (4.25)$$

Допущене значення відхилення вибираємо $\delta_{доп} = 0,05 \cdot \beta_{ном} = 0,05$, тоді час регулювання складає $t_p = 0,76$ с.

4.4. Інструментальна похибка слідкуючої системи

Інструментальна похибка слідкуючої системи зумовлена нелінійностями статичних характеристик її функціональних елементів. Основними джерелами її появи в цифро-аналоговій системі є: потенціометр зворотного зв'язку, АЦП і підвищуючий редуктор.

Із паспортних даних отримуємо інструментальні похибки потенціометра зворотного зв'язку, АЦП і підвищуючого редуктора.

Максимальна інструментальна похибка :

$$\varepsilon_{max} = \left| \varepsilon_{нзз} \right| + \left| \varepsilon_{ацп} \right| + \left| \varepsilon_{зр} \right| = (1,82 + 4,14 + 3,47) \cdot 10^{-3} = 0,00943 \text{ рад}. \quad (4.26)$$

Середньоквадратична інструментальна похибка :

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\varepsilon_{нзз}^2 + \varepsilon_{ацп}^2 + \varepsilon_{зр}^2} = \sqrt{(1,82 \cdot 10^{-3})^2 + (4,14 \cdot 10^{-3})^2 + (3,47 \cdot 10^{-3})^2} =$$

$$= 0,0057 \text{ рад.} \quad (4.27)$$

Висновок: розрахована система є стійкою, що ми бачимо з побудованих ЛАЧХ та ЛФЧХ. Запас за амплітудою - 24 дБ, запас за фазою - 65° , АФХ не охоплює і не перетинає точку з координатами (-1; 0). Розраховані діагональні мінори визначника Гурвіца більші нуля. Перехідний процес має перерегулювання, яке дорівнює 24%, що є незначним для реальних імпульсних цифрових систем; час регулювання 0,76 с, що відповідає ustalеним нормам. Згідно обрахованої інструментальної похибки впливає, що система є ще й достатньо точною.

ВИСНОВКИ

Проведена модернізація автоматизованої системи обліку газу дозволяє значно покращити точність та надійність цього процесу. Встановлена завданням допустима статична похибка вимірювального комплексу не більше 1% при вимірюванні витрати газу не змінюється, але практично усувається (до 0,5%) час роботи вимірювальних перетворювачів за межами допустимих параметрів, що, згідно практичних спостережень, складає від 3 до 7% загального часу роботи. Це досягається шляхом використання електропривода для перемикання засувки і, таким чином, зміни ефективного перерізу вимірювального трубопроводу відповідно до обсягів споживання (витрати) газу. Для приводу засувки запропоновано комбінацію планетарного редуктора як оптимального за енергетичними та габаритними показниками та крокового двигуна для забезпечення простоти визначення положення засувки та точності зміни її робочого перерізу.

Введення алгоритму корекції помилок до протоколу передачі даних від вимірювальних перетворювачів до обчислювача дозволяє усунути вагому складову комутаційних похибок та підвищити точність обробки інформації.

Аналіз в режимі реального часу складу газу у ВТП дозволяє враховувати відхилення в хімічному складі та здійснювати моніторинг облікових параметрів для оптимізації комерційних розрахунків. Запропоновано використання імпульсного блока живлення для покращення енергозберігаючих показників, враховуючи те, що комплекс споживає електроенергію цілодобово.

Дослідження модернізованої САК показали, що система стійка за критеріями Михайлова і Гурвіца. Про це також свідчать і логарифмічні частотні характеристики (запас по амплітуді становить 24 Дб, а по фазі - 65°). Отже система корегування не потребує.

Робота має практичну цінність і її результати після більш детальної доробки можуть бути розглянуті для використання в газотранспортній системі України.

Використана література

1. Єрмілова Н.В., Бороздін М.К. Курс лекцій з дисципліни «Основи автоматизації виробничих процесів» для студентів денної та заочної форми навчання напряму підготовки 6.050304 Нафтогазова справа /Н.В. Єрмілова, М.К. Бороздін. – Полтава, ПолтНТУ, 2013. – 92 с.
2. Соколов М.М., Рубцов В.П. Дискретный электропривод механизмов электротермических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.-120с.
3. Кудрявцев В.Н., Кирдяшева Ю.Н. Планетарные передачи. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1977. – 784 с.
4. Бунін С.Г., Яйленко Л.П. Справочник радиолюбителя. – К.:Техніка, 1984. – 264 с.
5. Таненбаум Е. Компьютерные сети. –СПб.:Питер, 2002. –848с.:ил.
6. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Кенио Т., пер. с англ., 1987. – 200с.
7. Технічна документація по кроковим двигунам. – www.electroprivod.ru/torque.htm
8. Б.Ю. Семёнов Силовая электроника для любителей и профессионалов. – М.:Энергия, 2004. –135с.: ил.
9. Технічна документація по вимірювальним перетворювачам. – <http://laborant.ru>
10. Плотников В.М., Подрешетников В.А., Гончаров В.У. Средства контроля и автоматизации объектов транспорта газа. –Л.: Недра, 1985. –216 с.
11. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971.
12. Камаразе А.Н., Фитерман М.Я. Контрольно-измерительные приборы и автоматика. –Л.: Химия.1988. 224 с.: ил.
13. Автоматизированный электропривод / Под ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-544с.

14. Созонник Г.Д., Стеклов В.К. Цифровые системы управления. – К.: Техника, 1991.-190с.
15. Технічна документація по газовим датчикам. – <http://www.captur.demon.co.uk>
16. Технічна документація по газовим датчикам. – <http://wgc.chem.pu.ru/personal/htk/histart.htm>
17. Бесекерский В.А., Изранцев В.В. Системы автоматического управления с микроЭВМ. – М.: Наука, 1987.-318с.
18. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы. – М.: Наука, 1976.-575с.
19. Цифровые системы управления электроприводами / Под ред. А.А. Батоврина, П.Г. Дашевского, В.Д. Лебедева и др. – Л.: Энергия, 1977.-256с.
20. Сборник задач по теории автоматического регулирования / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Наука, 1978.-510с.
21. Зубов В.И. Математические методы исследования систем автоматического регулирования. – Л.: Машиностроение, 1974.
22. Исмаилов Ш.Ю. Автоматические системы и приборы с шаговыми двигателями. – М.: Энергия, 1968.-136с.