

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Дідик О.К.

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

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

на тему

"Система автоматичного керування повітряним охолодженням газу"

"Automatic control system for air cooling of gas"

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-22мб

ОПП «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології»

\_\_\_\_\_ Андрій ДЄДКОВ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

Керівник роботи

професор, канд. техн.наук

\_\_\_\_\_ Віктор КАЛІЧ

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025р.

Рецензент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	1
Призначення та область застосування системи керування .....	
1.1. Загальний аналіз технології повітряного охолодження газу.....	
1.2. Аналіз вихідного технологічного обладнання.....	
1.3. Постановка задачі.....	
2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....	
2.1 Вибір блоку вхідного фільтра.....	
2.2 Вибір блоку вихідного фільтру.....	
2.3 Розрахунок та вибір елементів інвертора.....	
2.4 Розрахунок згладжуючого фільтра.....	
2.5 Розрахунок параметрів стабілізації швидкості в електроприводі з частотним керуванням АД КЗР.....	
2.6 Побудова структурної схеми електропривода.....	
3 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи.....	
3.1 Синтез ПД-регулятора.....	
3.2 Дослідження якості перехідних і частотних характеристик.....	
3.3 Розрахунок втрат потужності в ЕП.....	
Висновок.....	
Література.....	

## ВСТУП

Газокомпресорна станція забезпечує функціонування магістрального газопроводу «Союз». Основне завдання цієї станції полягає в підтримці необхідного тиску природного газу в трубопроводі для його безперебійного транспортування на великі відстані:

- 1) Підтримання постійного тиску газу у газопроводі.
- 2) Підтримання постійної температури газу, 40 °С.

Обладнання станції поділяється на дві групи за своїм призначенням:

- 1) Реактивні турбіни, які і підтримують тиск.
- 2) Установка автоматичного повітряного охолодження (АПО) газу.

Обладнання газокомпресорної станції та технологічні засоби охолодження природного газу були розроблені понад чотири десятиліття тому, тому на сьогодні вони морально й технічно застаріли. Вони вже не відповідають поточному рівню розвитку електроприводних систем та сучасним стандартам енергоефективності, що пред'являються до охолоджувального обладнання.

До основних недоліків існуючої системи повітряного охолодження газу належать:

- значна кількість встановлених електродвигунів – усього 28 асинхронних машин із короткозамкненими роторами, що функціонують із коефіцієнтом корисної дії близько 88%, але в сумі спричиняють суттєві енергетичні втрати. До того ж, їх обслуговування та ремонт ускладнені через розміщення на висоті понад 3,5 метра;

- відсутність можливості плавного регулювання швидкості – вентилятори функціонують лише на постійних обертах, без адаптації до змінних умов, а охолодження газу відбувається на незмінну величину;

- споживання електроенергії здійснюється не від турбінного генератора, як інше обладнання, а безпосередньо з внутрішньої мережі підприємства, що призводить до надмірного навантаження – до 70–85% усієї електричної енергії споживається саме на охолодження.

Ключові шляхи оновлення обладнання включають:

- зменшення загальної кількості двигунів шляхом встановлення меншої кількості потужніших агрегатів із підвищеним коефіцієнтом корисної дії;
- перехід на сучасну систему регулювання з використанням частотних перетворювачів для забезпечення адаптивного управління швидкістю вентиляторів;
- інтеграція інноваційних технологій, орієнтованих на зниження енергоспоживання і підвищення ефективності роботи.

Реалізація цих заходів дозволить значно покращити енергетичну ефективність станції, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити її відповідність сучасним вимогам до надійності та екологічності.

# 1 Призначення та область застосування системи керування

## 1.1. Загальний аналіз технології повітряного охолодження газу

Головною функцією газокompресорної станції є забезпечення безперервного транспортування природного газу на визначеному відрізьку магістралі «Союз». Основне завдання полягає в стабілізації тиску газового потоку в межах нормативних значень, а також у контролі температурного режиму – зокрема, утриманні температури газу нижче 40 °С. Це необхідно для збереження цілісності трубопровідних стінок і попередження порушень у теплоізоляційному покритті.

Гарантування ефективної, стабільної та безпечної роботи, а також своєчасного технічного обслуговування й ремонту електрообладнання, теплотехнічних систем, водопровідно-каналізаційних, вентиляційних і санітарно-технічних установок з метою постійного забезпечення виробничих майданчиків електроенергією, тепловими ресурсами та водою для безперебійного функціонування процесу транспортування природного газу.

Ведення обліку споживання енергоресурсів, розробка та впровадження технічних і організаційних заходів, спрямованих на раціональне використання електричної та теплової енергії, водних ресурсів, а також на підвищення енергоефективності обладнання, зокрема коефіцієнта потужності електроустановок і коефіцієнта корисної дії теплових систем.

Модернізація та розширення енергетичної інфраструктури у відповідності до зростання обсягів виробничих потреб та потужностей

**Технічне оснащення підприємства.** На проммайданчиках КС:

- трансформаторні підстанції 110-35-10-6-0,4 кВ;
- відкриті та закриті розподільчі пристрої, пункти 35-10-6-0,4 кВ;
- силові та освітлювальні щити, зборки 0,4-0,23 кВ;

- щити постійного струму;
- повітряні та кабельні ЛЕП 10-6-0,4-0,23 кВ;
- електропроводки, що забезпечують живлення силових агрегатів та систем освітлення;
- кабелі керування, що забезпечують функціонування систем автоматики, релейного захисту та диспетчеризації в енергопостачанні;
- комплекси пристроїв релейного захисту та автоматизованого керування електропостачанням компресорних станцій;
- акумуляторні батареї стаціонарного типу з номінальною напругою 110 В і 24 В;
- елементи електронного обладнання в енергосистемах та автоматизації – зарядні блоки, інвертори, джерела безперебійного живлення, перетворювачі частоти, системи збудження синхронних машин, стабілізатори напруги тощо;
- електротехнічна апаратура: автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, контактори, вимикачі, пускові кнопки;
- апаратура керування в електросхемах технологічного обладнання – реле, тумблери, пускові пристрої та інше обладнання;
- система зовнішнього і внутрішнього освітлення з установленими світлотехнічними пристроями у всіх приміщеннях;
- пристрої для компенсації реактивної енергії;
- синхронні двигуни (потужністю 12,5 і 25 МВт), які приводять у дію ГПА, разом із системами керування, силовими модулями, захистами та автоматикою;
- генератори змінного струму, що приводяться в дію газоперекачувальними агрегатами;
- електродвигуни змінного та постійного струму, що працюють у складі обладнання компресорних станцій, промислових механізмів та агрегатів, за винятком вузькоспеціалізованих приводів контрольно-вимірювальних систем;

- електротехнічна частина резервних електростанцій – генератори, системи збудження, вузли синхронізації, стабілізатори, автоматичний захист та релейні пристрої;
- силові ланки електропостачання систем вентиляції, калориферних установок, компресорних станцій, підйомних механізмів;
- системи захисту від блискавок для будівель та споруд;
- захисне заземлення та заземлюючі контури електроустановок;
- мобільні електротехнічні комплекси (включаючи установки ЦС РЗА ВН ЕТО), випробувальні модулі та лабораторії;
- котельні установки для опалення і відповідна теплова інфраструктура;
- електронагрівальні установки для гарячого водопостачання;
- газопроводи низького тиску, що живлять котельні, а також газове обладнання, задіяне в роботі цих котелень;
- водозабірні вузли, артезіанські свердловини, установки для очищення води, системи автоматичного наповнення, а також мережі для побутового та питного водопостачання;
- пожежогасильні трубопроводи та пов'язані з ними інженерні системи;
- каналізаційні господарсько-фекальні мережі, станції перекачування стічних вод і споруди біологічної очистки;
- системи вентиляції і санітарно-гігієнічного призначення, які не входять до складу аварійного або технологічного обладнання.

#### **Характеристика основного електрообладнання цеху.**

Газокомпресорна станція оснащена сімома реактивними турбінами, основною функцією яких є стабілізація тиску всередині магістрального газопроводу. Кожна турбіна розміщується в окремому технічному блоці, спеціально облаштованому для безпечної та ефективної експлуатації.

У межах кожного з таких ізольованих приміщень розташовуються наступні елементи:

а) Чотири вентилятори відповідають за безперервний рух повітря всередині приміщення, однак у разі спрацювання температурних або ультрафіолетових сенсорів їхня робота автоматично припиняється.

б) Система охолодження турбіни включає в себе два насоси – основний і резервний, які відповідають за створення необхідного тиску антифризу в контурі. Робоча рідина проходить крізь радіатори, що охолоджуються паром вентиляторів: головним та додатковим. Після цього охолоджений антифриз надходить до теплообмінника, де він використовується для зниження температури мастила, що змащує ущільнення. Окремий насос відповідає за подачу ущільнювального масла під тиском, завдяки чому забезпечується стабільна робота плаваючих підшипників ротора. Це мастило також запобігає прориву робочого газу між валом і корпусом під час запуску або зупинки агрегату. Коли турбіна досягає приблизно 95% від своєї номінальної частоти обертання, функцію допоміжного масляного насоса перебирає вбудований турбінний насос, який і підтримує циркуляцію в подальшій роботі.

в) Генератор, змонтований на осі турбіни, забезпечує її перехід у режим самозабезпечення енергією при досягненні приблизно 95% від заданої номінальної частоти обертання. Саме на цьому етапі система починає функціонувати автономно, не потребуючи зовнішнього джерела живлення.

г) Антіайсінг – це система, призначена для запобігання обмерзанню повітря, що подається до турбореактивного двигуна. Для ефективної роботи силової установки температура вхідного повітря повинна залишатися в межах допустимих значень. З цією метою у зоні повітрязабору розміщено спеціальні теплообмінні елементи (батареї), крізь які пропускається нагрітий газ, отриманий із вихлопної частини турбіни.

Об'єм гарячого газу, що направляється до цих батарей, регулюється трьома заслінками, керованими за допомогою електроприводів. Кут їх відкриття змінюється залежно від необхідного рівня нагріву – чим більший кут, тим інтенсивніше подається тепло. Такий механізм дозволяє точно

підтримувати потрібну температуру повітря, запобігаючи утворенню криги на внутрішніх поверхнях. Система активується виключно у холодну пору року, коли існує загроза зниження температури повітря нижче критичного рівня. Вона є критично важливою для безпечної та стабільної роботи двигуна в зимових умовах.

д) Система пожежної безпеки включає в себе температурні сенсори та ультрафіолетові детектори, встановлені як безпосередньо в приміщенні, де розміщено турбіну, так і всередині самої турбіни – загалом передбачено 15 окремих точок контролю. У випадку активації будь-якого з датчиків, вмикається електромагнітний механізм, що вивільняє спеціальний вантаж. Падіння вантажу призводить до автоматичного відкриття заслінок на балонах, заповнених вуглекислим газом і хладоном. CO<sub>2</sub> направляється до внутрішнього простору турбінного відсіку, а хладон – у приміщення, де розташована турбіна, забезпечуючи оперативне реагування на загрозу загоряння та ефективне локалізування можливого осередку пожежі.

є) мостовий кран, який призначений для монтажу різних деталей та елементів турбіни при ремонті.

Також у конструкції передбачена система охолодження газоподібного середовища, до складу якої входять 28 асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, що виконують функцію вентиляторів, та розміщені під ними радіатори. Завдяки злагодженій роботі цих елементів здійснюється зниження температури газу до приблизно 40 °С, що є необхідним для стабільної та безпечної роботи обладнання.

На площі газокompресорної станції функціонує котельне обладнання, до складу якого входять також насосні агрегати з електродвигунами. Вони забезпечують подачу води як для господарсько-побутових потреб у будівлі, так і для протипожежного захисту у разі надзвичайної ситуації.

На об'єкті встановлено два генератори, які забезпечують можливість автономного електропостачання газокompресорної станції (ГКС) у разі знеструмлення основної мережі.

Передбачено також систему резервного живлення – акумуляторну установку оперативного струму. Постійно заряджувані акумуляторні батареї автоматично активуються при зникненні зовнішнього живлення і підтримують роботу систем автоматики ГКС у штатному режимі.

Крім того, комплекс обладнано стійками керування, що передбачають як дистанційний контроль, так і локальне ручне управління технологічними процесами. До складу системи входять також шафи живлення станції, а також елементи розподільчого обладнання, що забезпечують стабільну подачу електроенергії до окремих вузлів.

**Загальні технологічні відомості.** Газ надходить по головній магістралі №1 (при цьому кран А відкритий, а кран 30 перекритий) і спрямовується до вхідної лінії компресорної станції №9, далі прямує до скрубєрів №2 (крани бр і 19 перекриті, а кран 7 відкритий). Конструкція скрубєрів забезпечує формування турбулентного потоку всередині, завдяки чому дрібні тверді частинки, залишки мастил та інші домішки осідають і виводяться – таким чином здійснюється первинне очищення газового потоку. Очищений газ далі розподіляється на два напрямки. Одна частина спрямовується через вхідну магістраль №4 до турбінних агрегатів ТА №1...7, де він використовується як основне середовище для транспортування. Інша частина виконує функцію енергоресурсу для роботи самих турбін. Спершу цей газ проходить через підігрівач, де досягає необхідної температури, далі надходить до редукуючого блоку ST, де тиск знижується до рівня 17 кг/см<sup>2</sup>, після чого подається до турбоагрегатів. На початковому етапі запуску агрегату використовується пусковий газ (позиція 12), при цьому пальники в камерах згоряння залишаються вимкненими. Завдяки тиску в 17 кг/см<sup>2</sup> турбіна набирає приблизно 30% від номінальної швидкості обертання. Після цього активуються форсунки в камері згоряння,

і подається основна порція робочого газу. Процес триває до моменту досягнення 60% від номінальних обертів, після чого подача пускового газу припиняється.

Газоподібна речовина, що транспортується, виходить із турбін під тиском 74 кгс/см<sup>2</sup> і надходить до установки повітряного охолодження (АПО), яка розділена на два окремі блоки. Потоки з турбінних агрегатів №1, №2 та №3 спрямовуються у перший блок АВО газу (позиція 8), тоді як потоки з агрегатів №4, №5, №6 і №7 подаються у другий блок охолоджувальної системи (позиція 7). У кожному з двох функціональних модулів встановлено по 14 вентиляторів, що забезпечують зниження температури газу до 50 °С. Після проходження етапу охолодження, газ направляється через вихідну лінію компресорної станції до основного трубопроводу, який є частиною магістральної системи транспортування.

У разі виникнення аварійної ситуації або вимушеного припинення роботи компресорної станції автоматично перекриваються крани №27 і №30. Однак миттєве відкриття крана №30 не допускається, оскільки на його вході та виході спостерігається значна різниця тиску. Якщо проігнорувати цей фактор, відкривання призведе до гідравлічного удару, що може спричинити руйнування трубопроводу.

Для поступового вирівнювання тиску в системі використовується кран бр, який має значно менший діаметр порівняно з основною лінією. Після стабілізації тиску кран №30 відкривається, а допоміжні крани №48, №47 і бр – закриваються.

Залишки газу в компресорній станції видаляються через свічки №18 і №19. Газ, що залишився безпосередньо в турбінному обладнанні, стравлюється окремо через свічку №40. Така процедура проводиться під час підготовки турбіни до капітального ремонту – при цьому крани №28, №29, №11 і №12 залишаються в закритому положенні, а відкритим залишається лише кран №40, що забезпечує локалізоване стравлювання газу з турбіни.

## 1.2. Аналіз вихідного технологічного обладнання

### Технологічний процес і механічне обладнання одного з механізмів.

Система АВО газу призначена для стабільного зниження температури газового потоку, що виходить із реактивних турбін, де він розігрівається до 80 °С. Завданням цієї установки є зниження температури до 50 °С, що є критично необхідним для забезпечення довготривалої експлуатації газопровідних систем. Недостатнє охолодження спричиняє небезпечне перевантаження металевих елементів трубопроводів, що може призвести до утворення мікроскопічних тріщин, деградації ізоляційного шару, прискореного зносу стінок труб і, зрештою, до проривів і корозії магістралі.

Охолоджувальна установка включає в себе 28 асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором, кожен потужністю 35 кВт. Крутний момент із валів електродвигунів передається вентиляторам через пасову передачу. Вентилятори, в свою чергу, встановлені над радіаторними секціями, по яких циркулює газ. Така конструкція забезпечує ефективний теплообмін і стабілізацію температури в заданому діапазоні, що відіграє ключову роль у підтримці працездатності всієї газотранспортної системи.

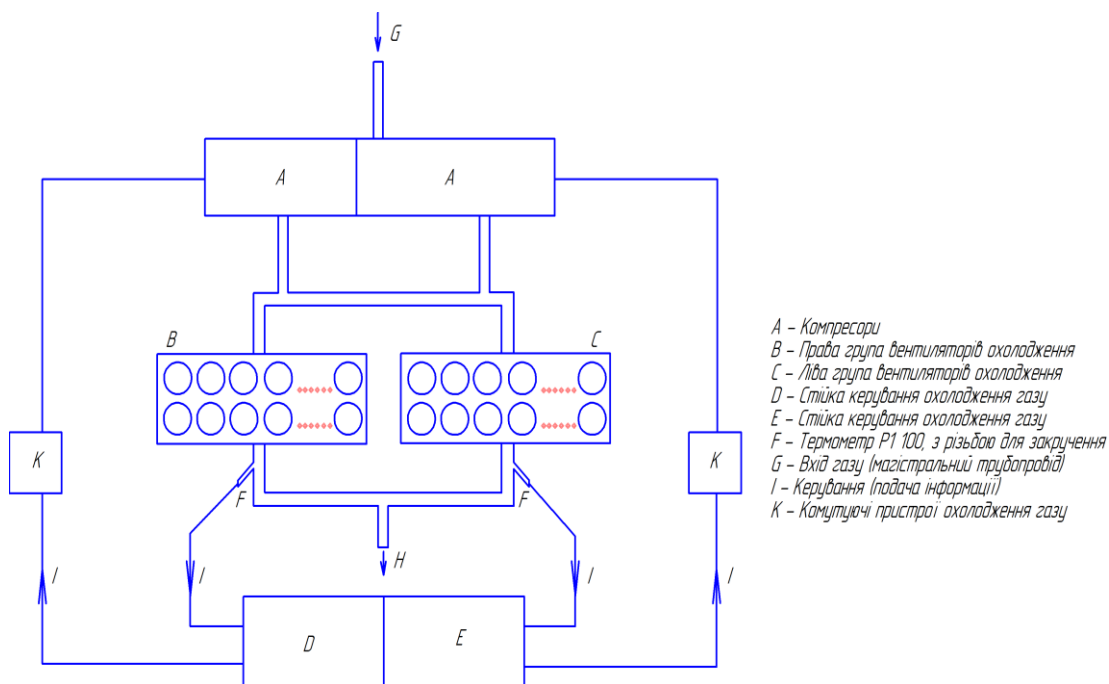


Рисунок 1.1 – Кінематична схема



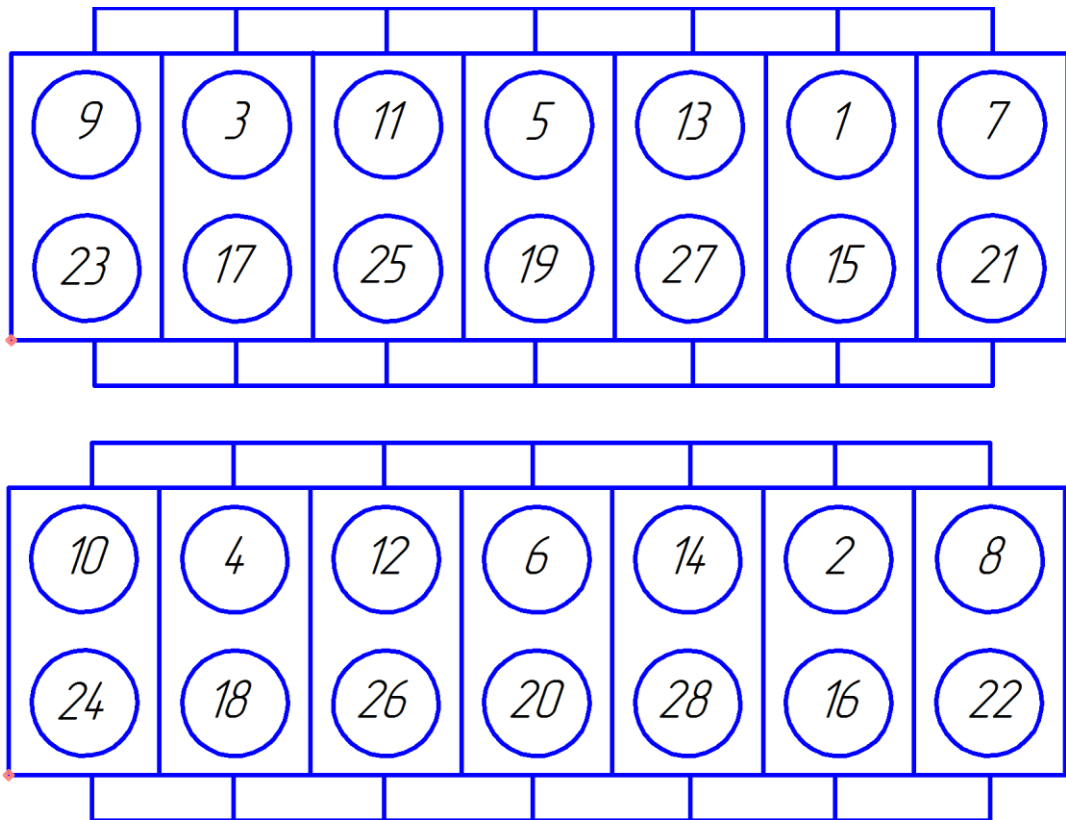


Рисунок 1.4 – Нумерація двигунів установки АВО газу

При відємному відхиленні температури:

У випадку зниження температури газу нижче допустимого порогу (менше 40 °С), поступово здійснюється зупинка працюючих на той момент двигунів у зворотній послідовності. Вимкнення виконується поетапно з часовим інтервалом у 14 секунд між кожною дією. Цей процес триває доти, доки показник температури не досягне встановленого номінального значення. Такий алгоритм дозволяє уникнути перевантаження системи та забезпечує стабільну роботу обладнання за умов змін зовнішнього середовища.

**Контроль напруги живлення.** Якщо живлення в мережі зникає, система автоматичного керування припиняє роботу всіх електродвигунів вентиляторних установок. Після відновлення електропостачання відбувається повторний запуск обладнання відповідно до визначеної послідовності включення, що забезпечує стабільність та безпечність функціонування системи.

***Відключення автоматики.*** Система автоматики може бути деактивована за допомогою кулачкового перемикача, що знаходиться на панелі керування газового охолоджувача. При цьому припиняється лише вплив регулятора ЕК на процес керування, тоді як електродвигуни, що вже були запущені до моменту вимкнення, продовжують функціонувати, і керування переходить у ручний режим.

Запуск або зупинка вентиляторів здійснюється не безпосередньо через саму шафу керування охолоджувача. Вона виконує лише функцію перемикання живлення силових вимикачів, які, в свою чергу, активують або вимикають відповідні двигуни. Таким чином, керування здійснюється через ланцюг живлення, а не шляхом прямого втручання в роботу силового обладнання.

**Технічні дані вентилятора.**

Витрати газу через один блок – 186 т/год

Витрати повітря через один вентилятор – 122,6 м<sup>3</sup>/сек

Розрахункова температура газу на вході і виході АВО:

- вхід – 80 °С;
- вихід – 40 °С.

Граничне значення температури зовнішнього середовища, при якому гарантовано підтримується заданий діапазон охолодження, становить 35 °С.

Найбільший допустимий тиск, при якому може функціонувати технологічний газ у системі, сягає 76,6 кг/см<sup>2</sup>.

Розрахована кількість тепла, яка відводиться від одного функціонального модуля, становить 3 515 572 калорій за годину.

Граничне температурне навантаження, при якому теплообмінники можуть працювати без ризику порушення технічних характеристик, визначається як допустима робоча температура і залежить від конкретного типу обладнання, матеріалів та умов експлуатації.

- максимальна – 120 °С;
- мінімальна – 45 °С.

### Паспортні дані електричних машин пристрою.

Тип: DAM 225-SV-4-D3-Q3-Exd3-NG5-IP54

Оберти: 1500 об/хв.

Потужність: 35 кВт

Напруга: 380 В

Частота: 50 Гц

Тип конструкції: V5

Тип захисту: IP54

Клас I; Група D.

### **1.3 Постановка задачі**

- Проблеми установки. Серед головних технічних труднощів, які супроводжують роботу установки АВО газу, можна виділити наступні:

- Відсутність плавного регулювання продуктивності. Наразі електродвигуни, що обертають вентилятори, функціонують лише на фіксованій швидкості – 1500 обертів за хвилину. Це унеможливує гнучке коригування температури газового потоку, оскільки кожен вентилятор здатен знижувати температуру лише на сталу, незмінну величину.

- Надмірна кількість електроприводів. У системі використовуються 28 асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Незважаючи на досить високий ККД (88%), сукупні втрати енергії залишаються значними. Додатково ускладнює ситуацію велика кількість електромагнітних пускачів – для кожного двигуна окремо, що знижує загальну надійність обладнання.

- Істотне енергоспоживання. У середньому, установка споживає близько 100 000 кВт електроенергії щомісяця. У період літньої спеки споживання зростає до 160 000–180 000 кВт. Через підвищену вартість промислового тарифу (в 2–3 рази вищу за побутовий), витрати на електроенергію стають вагомим фінансовим тягарем.

- Механічні проблеми приводу. З'єднання між вентилятором і двигуном здійснюється за допомогою пасової передачі, яка є вразливою до

поломок. Часто трапляються випадки, коли ремені спадають або рвуться. Відсутність системи виявлення зниження навантаження на вал призводить до того, що двигуни продовжують обертатися в холосту. В результаті температура газу не зменшується, автоматично активуються додаткові агрегати, що ще більше підвищує енергоспоживання.

Для вирішення вищезазначених проблем доцільним є впровадження частотного регулювання, автоматизованих систем контролю навантаження та діагностики технічного стану обладнання, що суттєво зменшить витрати енергії, підвищить надійність і ефективність роботи установки.

### **Труднощі:**

- Через те, що електродвигуни розміщені на висоті понад 3,5 метра, а їхня загальна кількість становить 28 одиниць, виникають значні складнощі під час виконання технічного обслуговування та ремонтних робіт.

- Кут нахилу лопатей вентилятора регулюється вручну, що ускладнює процес налаштування, оскільки потребує фізичного втручання кожного разу при зміні режиму роботи.

- Після детального вивчення конструкції установки, її експлуатаційних недоліків і оцінки економічної доцільності модернізації, яке я провів разом із керівником дипломного проєкту, було прийнято рішення:

- зменшити загальну кількість двигунів з 28 до 7, замінивши їх потужнішими моделями з вищим коефіцієнтом корисної дії, що дозволить підвищити енергоефективність і знизити витрати на обслуговування;

- впровадити частотне регулювання швидкості обертання вентиляторів замість двоступеневого режиму «ввімкнено/вимкнено», що забезпечить плавне керування температурними параметрами газового потоку та знизить енергоспоживання;

- застосувати єдиний частотний перетворювач для керування лише одним електродвигуном, адже при паспортних втратах потужності на рівні 2% така схема є економічно доцільнішою, ніж використання кількох окремих перетворювачів для кожного двигуна.

Після запуску газокompресорної станції газова суміш надходить у нашу систему. На вихідному етапі встановлено температурний сенсор з граничним значенням у 40 °С. У разі перевищення встановленої температурної межі, сенсор генерує сигнал, який передається в систему автоматичного керування. У відповідь на це активується електродвигун.

Регулювання швидкості обертання вентилятора здійснюється за допомогою частотного перетворювача, який отримує дані з температурного датчика, розміщеного після виходу з установки. Таким чином забезпечується стабілізація температури шляхом динамічного коригування швидкості обертання відповідно до отриманих параметрів.

Якщо частотний перетворювач розігнав електродвигун, а датчик зафіксував підвищення температури, система перемикає двигун на живлення безпосередньо від мережі. У цей час автоматика разом із ЧП переходять на керування іншим вентилятором. Наприклад, три вентилятори вже працюють на максимальних обертах, а четвертий разом із частотним перетворювачем підтримують температуру на рівні близько 40 °С.

## 2 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

### 2.1 Вибір блоку вхідного фільтра

Блок БФ1, що входить до складу вхідного фільтра, виконує функцію зменшення рівня кондуктивних електромагнітних завад, які виникають під час роботи силового перетворювача електропривода типу «Ератон-4М» у місці підключення до трифазної мережі 380 В, 50 Гц. Його застосування є доцільним на об'єктах, де використовуються електроприводи в поєднанні з автоматизованими системами, чутливими до промислових високочастотних завад.

Вхідний фільтрувальний блок – це трифазний П-подібний фільтр типу С-L-С, що працює в широкому частотному діапазоні від 0,15 до 30 МГц. Його конструкція виконана у вигляді навісної компактної шафи з кріпленням на задній стінці та знімною передньою панеллю для зручного доступу до внутрішніх компонентів. Основу конструкції становить задня стінка, яка виконує функцію несучого елемента. У верхній і нижній частинах розміщено шини, призначені для підключення силових кабелів на вході та виході. Для введення кабелів у верхній кришці та дні передбачено спеціальні технологічні отвори.

Базове виконання блоку БФ1 має ступінь захисту IP21.

Заземлювати корпус блоку та корпус шафи електропривода необхідно різними проводами.

Таблиця 2.1. Параметри фільтра.

Виконання	In, А	Потужність, кВт	Розміри, мм				Маса, кг
			А	а	В	Н	
БФ-1-03	250	132	320	42,5	405	160	20

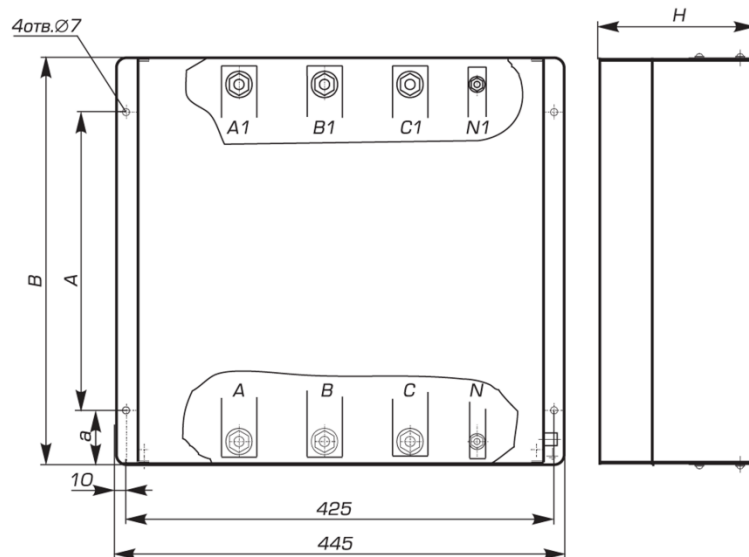


Рис. 2.1. Габаритні розміри блоку вхідного фільтру БФ-1-03

## 2.2 Вибір блоку вихідного фільтру

Пристрій БФ2М використовується для зниження перенапруги на клеммах двигуна, а також для захисту обмоток від пробоя ізоляції та передчасного зносу, що може виникати при підключенні до шафи керування Ератон-4М через довгий кабель.

Блок БФ2М монтується на відстані не більше одного метра від електродвигуна. Перевантаження, що виникають на його клеммах, пов'язані з хвильовими процесами в кабелі під час проходження імпульсів із різкими фронтами (тривалістю до 100 нс), які генерує транзисторний перетворювач типу IGBT.

Блок належить до слабострумівих пристроїв паралельного підключення та містить резисторно-ємнісні елементи, що запобігають перевантаженню як кабельної лінії, так і обмотки електродвигуна. Його конструкція представлена у вигляді невеликої шафи з легко знімною лицьовою панеллю. Основу корпусу становить задня частина, обладнана монтажними скобами з отворами для кріплення. Ступінь захисту блоку відповідає класу IP21.

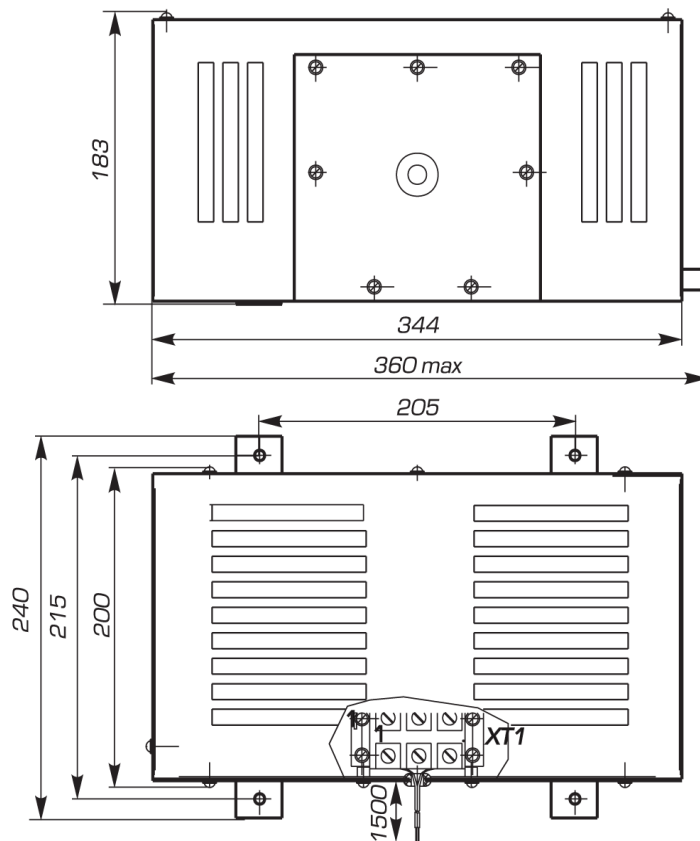


Рис. 2.2. Габаритні розміри блоку вихідного фільтру БФ2М.

### 2.3. Розрахунок та вибір елементів інвертора

Виконаємо обчислення співвідношення, що описує взаємозв'язок між електричними струмами у всіх елементах силового кола електроприводу та дає можливість визначити їх числові значення

$$I_d = 1,35 \cdot I_{1н} \cdot \cos \varphi ; \quad (2.1)$$

$$I_d = 1,35 \cdot 289,23 \cdot 0,9 = 351,41 \text{ А.}$$

Розрахунок струмів транзистору та діоду інвертору у двигунному режимі:

– середній струм транзистору  $I_{TSP(ДВ)}$ , А

$$I_{TSP(ДВ)} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{\pi - \varphi_2} \sqrt{2} \cdot I_{1н} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega t = I_{1н} \cdot \frac{1 + \cos \varphi}{\sqrt{2} \cdot \pi} , \quad (2.2)$$

$$I_{TSP(ДВ)} = 289,23 \cdot \frac{1 + 0,9}{\sqrt{2} \cdot \pi} = 124,12 \text{ А.}$$

– середній струм діоду  $I_{ДСР(ДВ)}$ , А

$$I_{ДСР(ДВ)} = I_{1н} \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{\sqrt{2} \cdot \pi}, \quad (2.3)$$

$$I_{ДСР(ДВ)} = 289,23 \cdot \frac{1 - 0,9}{\sqrt{2} \cdot \pi} = 6,533 \text{ А.}$$

Розрахунок струмів транзистору та діоду інвертору в гальмівному режимі:

– середній струм транзистору  $I_{ТСР(з)}$ , А

$$I_{ТСР(з)} = I_{1н} \cdot \frac{1 - \cos \varphi}{\sqrt{2} \cdot \pi}, \quad (2.4)$$

$$I_{ТСР(з)} = 289,23 \cdot \frac{1 - 0,9}{\sqrt{2} \cdot \pi} = 6,533 \text{ А.}$$

– середній струм діоду  $I_{ДСР(з)}$ , А

$$I_{ДСР(з)} = I_{1н} \cdot \frac{1 + \cos \varphi}{\sqrt{2} \cdot \pi}, \quad (2.5)$$

$$I_{ДСР(з)} = 289,23 \cdot \frac{1 + 0,9}{\sqrt{2} \cdot \pi} = 124,12 \text{ А.}$$

Оптимальним вибором для ключових елементів інвертора є IGBT-модулі компанії Semikron, зокрема блоки типу SKiiP. Вони забезпечують паралельне з'єднання транзисторів із низькою індуктивністю, мають інтегровані драйвери, вбудовані системи захисту та охолодження, що значно спрощує конструкцію і підвищує надійність пристрою.

Для запобігання впливу зворотної полярності застосовують діодні елементи у складі вхідного випрямляча. Вибір відповідних діодів здійснюється залежно від величини струму, який вони повинні проводити.

$$I_d = 351,41 \text{ А, } U_d = 500 \text{ В.}$$

В якості діодних елементів обрано модуль SKKE 500/22E – 6 одиниць. Кожен із них розрахований на середній струм 500 А. Тепловий опір між корпусом і радіатором становить 0,038 °С/Вт, а між переходом і корпусом – 0,09 °С/Вт. Робочий струм одного діода – 351,41 А.

Обрано гальмівний ключ моделі SKM 200GAL173D з такими характеристиками: напруга колектор-емітер  $V_{ces} = 1700$  В, номінальний струм  $I_{cn} = 200$  А, температура навколишнього середовища  $- 40$  °С. Тепловий опір між кристалом і радіатором становить  $R_{thjh} = 0,038$  °С/Вт, між корпусом і охолоджувачем  $- R_{thhc} = 0,09$  °С/Вт. Напруга насичення  $V_{ce(sat)}$  дорівнює 3,8 В.

В якості головного елемента для комутації струму обрано модуль транзистора SkiiP592GB170-271CTV, що характеризується наступними технічними показниками: напруга колектор-емітер становить 1700 В, а номінальний струм  $- 500$  А. Тепловий опір між кристалом і радіатором дорівнює  $0,035$  °С/Вт, а між радіатором і навколишнім середовищем  $- 0,036$  °С/Вт.

Напруга відкриття дорівнює 1,9 В, а втрати енергії при комутації  $- 413$  мДж під час включення та 207 мДж під час вимкнення (за умов  $V_{ces} = 1200$  В і  $I_c = 700$  А). Насичена напруга колектор-емітер складає 2,0 В.

## 2.4 Розрахунок згладжуючого фільтра

Вихідна напруга випрямляча характеризується наявністю пульсацій. Гармонійні складові з'являються в кратному до кількості фаз порядку, тобто  $n = k \cdot m$ , де  $m$   $-$  число фаз (для мостової трифазної схеми  $- m$  дорівнює 6).

Рівень пульсацій напруги, зумовлений першою гармонікою, яка має найбільший вплив на якість вихідного сигналу випрямляча, обчислюється за наступним виразом:

$$K_n = \frac{2}{m^2 - 1} \quad (2.6)$$

$$K_n = \frac{2}{6^2 - 1} = 0,057$$

Для зменшення коливань випрямленого струму й напруги застосовуються спеціальні фільтрувальні пристрої. Їхні параметри визначаються здебільшого з урахуванням основної гармоніки сигналу.

Застосуємо Г-подібний фільтр.

Параметри компонентів Г-подібного фільтра підбираються так, щоб елементи, з'єднані послідовно з джерелом живлення, мали високу реактивність для змінної складової струму і низьку – для постійної. У цій ролі можуть застосовуватись індуктивності або коливальні контури, що включають паралельне з'єднання котушки та конденсатора. Елементи, які підключаються паралельно до навантаження, навпаки, повинні добре проводити змінний струм і майже не реагувати на постійний – для цього підійде конденсатор або контур із послідовно з'єднаних котушки й ємності. У даному випадку обрано найпростішу конфігурацію – дросель у послідовному ланцюзі та конденсатор, підключений паралельно до споживача.

Коефіцієнт фільтрації LC-фільтра можна розрахувати за формулою

$$K_{\phi} = 1 - m^2 \cdot \omega^2 \cdot LC \quad (2.7)$$

де  $\omega = 314,16 \text{ рад/с}$  – колова частота живлячої мережі.

Якщо позначити ємність конденсатора в мікрофарадах, а індуктивність – у генрі, тоді отримаємо таке співвідношення

$$LC \approx \frac{10 \cdot |K_{\phi}|}{m^2} \quad (2.8)$$

Приймемо необхідний коефіцієнт пульсації на виході фільтра  $K_{nn} = 0,01$ , тоді коефіцієнт фільтрації

$$K_{\phi} = \frac{0,057}{0,01} = 5,7 \quad (2.9)$$

Індуктивність дроселя LC-фільтра визначається з умови неперервності струму

$$I_m < I_d, \quad (2.10)$$

де амплітуда основної гармоніки струму в дроселі

$$I_m = \frac{U_m}{m \cdot \omega \cdot L}, \quad (2.11)$$

а амплітуда першої гармоніки наруги знаходиться за формулою

$$U_m = K_n \cdot U_d = 0,057 \cdot 380 = 21,66 \text{ В.} \quad (2.12)$$

Постійну складову струму умовно вважаємо такою, що дорівнює ефективному значенню номінального струму електродвигуна

$$I_d = I_{\text{ном}} = 289,23 \text{ А.} \quad (2.13)$$

Враховуючі вирази вище, отримаємо

$$L > \frac{U_m}{I_d \cdot m \cdot \omega}. \quad (2.14)$$

$$L > \frac{21,66}{289,23 \cdot 6 \cdot 314,16} = 0,04 \text{ мГн.}$$

Приймаємо для дроселя - номінальний струм 300 А, індуктивність 0,1 мГн.

Ємність фільтрувального конденсатора С підбирають, виходячи з потреби зменшення коливань напруги  $U_d$ , що виникають через пульсації струму АІН. Рівень цих коливань зазвичай обмежується характеристиками самого елемента, зокрема електролітичного типу, який найчастіше застосовується в таких схемах.

Сила струму на вході АІН утворюється з окремих фрагментів синусоїдального струму, характерного для фаз електродвигуна.

$$I_d = I_H + I_C \quad (2.15)$$

де  $I_C$  – змінний струм конденсатора фільтру, А.

Вид кривої струму визначається значенням фазового зсуву навантаження, а саме коефіцієнтом потужності двигуна ( $\cos\phi$ ) [6]

$$I_H = \sqrt{2} \cdot I_{1H} \cdot \sin \omega t \begin{cases} \frac{2\pi}{3} - \varphi_2 \\ \frac{\pi}{3} - \varphi_2 \end{cases} \quad (2.16)$$

Максимальний розмах кривої струму  $I_H$  (відносно амплітуди  $I_{1H}$ ) має місце при  $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$  ( $\cos\varphi = 0$ ) та становить  $\sqrt{2} \cdot I_{1H}$ . Амплітуда пульсації струму при цьому  $\frac{I_{1H}}{\sqrt{2}}$ . Але це режим ідеального холостого ходу.

При реальних, близьких до номінальних, значеннях  $\cos\varphi = 0,89$ ,  $\varphi_2 = \frac{\pi}{6}$  амплітуда пульсацій,  $I_{CM}$ , А:

$$I_{CM} = \frac{I_{1H}}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (2.17)$$

Точніші параметри пульсацій струму ІН можна отримати шляхом представлення його у вигляді ряду Фур'є [7]. При цьому основна складова має частоту  $6\omega$ , де  $\omega$  – це частота на виході. Аналогічно до гармонічного аналізу вихідної напруги в керованому випрямлячі, можна сформулювати наступне співвідношення

$$I_H = I_d + \sum_{K=1}^{\infty} I_{6Km} \cdot \sin 6K\omega t \cdot d\omega t \quad ; \quad (2.18)$$

$$I_{6Km} = \frac{6 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1H}}{\pi(36K^2 - 1)} \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + 36 \cdot K^2 \cdot \sin^2 \varphi} \quad . \quad (2.19)$$

Для розрахунку достатньо врахувати лише основну гармоніку струму

$$I_{6m} = \frac{6 \cdot \sqrt{2}}{35 \cdot \pi} \cdot I_{1H} \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + 36 \cdot \sin^2 \varphi} \quad ; \quad (2.20)$$

Для значень  $\cos\varphi = 0,89$ ,  $\varphi = \frac{\pi}{6}$

$I_{6m} = 0,242 \cdot I_{1H}$  – амплітудне значення;

$I_6 = \frac{I_{6m}}{\sqrt{2}} \approx 0,172 \cdot I_{1H}$  – діюче значення:

$$I_6 = 0,172 \cdot 289,23 = 49,75 \text{ А.} \quad (2.21)$$

Струм, що проходить через конденсатор, є розрахунковим показником. Його величина зростає при коефіцієнті потужності менше ніж 0,89, а при значеннях  $\cos\phi$ , що перевищують 0,89, спостерігається незначне зменшення цього струму.

Для вибору ємності фільтру  $c$ , мкФ, необхідно задатися припустимими значеннями  $\Delta U$  пульсацій. Приймаємо значення  $\Delta U = 2,5$  В:

$$c = \frac{I_C}{6 \cdot \omega \cdot \Delta U}; \quad (2.22)$$

$$\tilde{n} = \frac{49,75}{6 \cdot 314 \cdot 2,5} = 1056 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо з конструктивних міркувань 1 гілку конденсаторів, сумарною ємністю 3300 мкФ [8].

## 2.5 Розрахунок параметрів стабілізації швидкості в електроприводі з частотним керуванням АД КЗР

Ліва та права секції АВО газу встановлені досить близько одна до одної, що дає змогу оптимізувати конструкцію: замість 28 менш потужних двигунів використано лише 7, кожен з яких обслуговує по чотири вентилятори завдяки підвищеній потужності.

Вибираємо двигуни серії 4АН280М4У3 з паспортними даними [1]:

$$P_{2н} = 160 \text{ кВт}, \quad n_0 = 1500 \text{ об/хв}, \quad U = 380 \text{ В}, \quad \frac{M_{max}}{M_{ном}} = 2, \quad \frac{M_{п}}{M_{ном}} = 1,2,$$

$$\frac{M_{min}}{M_{ном}} = 1, \quad \frac{I_{п}}{I_{ном}} = 2, \quad J_{дв} = 2,13 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad R_1' = 0,023 \text{ Ом}, \quad X_1' = 0,11 \text{ Ом},$$

$$R_2'' = 0,018 \text{ Ом}, \quad X_2'' = 0,15 \text{ Ом}.$$

Таблиця 2.1. Енергетичні показники двигуна

Тип двигуна	Енергетичні показники									
	ККД, %; при $P_2/P_{2ном}$ , %					$\cos\phi$ , %; при $P_2/P_{2ном}$ , %				
4АН280М4У3	25	50	75	100	125	25	50	75	100	125

	93	94,5	94	93,5	92	0,79	0,89	0,9	0,9	0,87
--	----	------	----	------	----	------	------	-----	-----	------

### Загальний момент інерції механічної частини вентиляторів

У процесі розрахунку визначаються моменти інерції валу, вентилятора та електродвигуна, що необхідні для аналізу динаміки системи

$$J_M = n \cdot (J_{\text{валу}} + J_{\text{вент}}) + J_{\text{дв}}; \quad (2.23)$$

де  $J_M$  – момент інерції механіки;  $J_{\text{валу}}$  – момент інерції валу вентилятора;  $n$  – кількість вентиляторів;  $J_{\text{вент}}$  – момент інерції самого вентилятора.

Спочатку розрахуємо момент інерції валу вентилятора

$$J_{\text{валу}} = \frac{m \cdot R^2}{2}; \quad (2.24)$$

де  $m$  – маса валу;  $R$  – радіус вала.

Маса валу нам невідома, але нам відомий матеріал з якого він зроблений (залізо) густина якого  $\rho = 7870 \text{ кг/м}^3$ , довжина валу  $l = 2,35 \text{ м}$  і радіус валу  $R = 0,0375 \text{ м}$ . Виходячи з цих даних маса валу буде

$$m = l \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho = 2,35 \cdot 3,14 \cdot 0,0375^2 \cdot 7870 = 81,65 \text{ кг} \quad (2.25)$$

Тоді

$$J_{\text{валу}} = \frac{81,65 \cdot 0,0375^2}{2} = 0,0574 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.26)$$

Обчислення моменту інерції вентилятора полягає у визначенні моментів інерції окремих пластин. Оскільки шість лопастей розміщені попарно одна навпроти одної, їх доцільно розглядати як три окремі пластини. У такому випадку сумарний момент інерції визначається шляхом додавання моментів кожної з трьох пластин

$$J_{\text{вент}} = J_{\text{пласт1}} + J_{\text{пласт2}} + J_{\text{пласт3}} \quad (2.26)$$

Момент інерції однієї пластини рівний

$$J_{\text{пласт}} = \frac{m \cdot l^2}{12}; \quad (2.27)$$

Тому момент інерції вентилятора

$$J_{\text{вент}} = 3 \cdot J_{\text{пласт}} = \frac{m \cdot l^2}{4} = \frac{120 \cdot 4,31^2}{4} = 557,28 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.28)$$

Момент інерції механіки

$$J_{\text{м}} = 4 \cdot (0,0574 + 557,28) = 2229,36 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.29)$$

Загальний момент інерції механіки і двигуна знаходиться за формулою

$$J_{\text{загал}} = \frac{J_{\text{м}}}{i^2} + J_{\text{дв}} = \frac{2229,36}{6,68^2} + 2,13 = 52,093 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (2.30)$$

де  $i$  – передаточне число пасової передачі, яке дорівнює  $i = \frac{1470}{220} = 6,68$ ;  $J_{\text{дв}}$

– момент інерції двигуна.

Система має забезпечувати астатичну характеристику, тобто стабільно підтримувати задану швидкість обертання, навіть при періодичних змінах навантаження в діапазоні від нуля до номінального значення.

Для реалізації цього завдання слід підібрати відповідний частотний перетворювач, розробити структурну схему, визначити її основні параметри та виконати синтез регулятора швидкості.

Доцільно застосувати перетворювач частоти, призначений для загальнопромислового обладнання, що працює на основі автономного інвертора напруги.

**Параметри перетворювача.** На рис. 2.3 наведено основні параметри електроприводів з частотним регулюванням типу "ЕРАТОН".

Переваги змінного струму над постійним підтвержені як розрахунками, так і практичним досвідом. Часто виникає потреба застосування змінного струму з нестандартними характеристиками. Хоча трансформатори дозволяють регулювати рівень напруги, вони не впливають на частоту. Саме для її зміни й застосовують інвертори, які забезпечують необхідні параметри струму в різних умовах.

Інвертор – це пристрій, що здійснює перетворення постійної електроенергії у змінну. Його вихідний сигнал може мати практично будь-які задані характеристики – напругу, частоту, амплітуду. При цьому параметри струму на вході не впливають безпосередньо на характеристики виходу.

Завдяки можливості гнучкого керування, інвертори дозволяють змінювати вихідні значення у широкому діапазоні – від нульового рівня до максимально допустимого, що робить їх універсальними у застосуванні.



Рис.2.3. Технічні характеристики частотно-регульованих електроприводів

Суть роботи інвертора, якщо пояснити простими словами, полягає у використанні трансформатора з первинною обмоткою, до якої під'єднані два тиристори. Вони працюють по чергові: коли відкривається один, інший залишається закритим. Таким чином, активується то одна, то інша частина обмотки, що має протилежні напрямки. Це призводить до появи змінного струму у вторинній обмотці – чергуються позитивні та негативні півхвилі.

Хоча на виході формується не ідеальна синусоїда, а її наближене східчасте відтворення, для більшості побутових пристроїв така форма сигналу є цілком прийнятною. Основною складністю в побудові інверторів є не стільки електрична схема, скільки необхідність узгодженої взаємодії всіх елементів у часі. Перетворення включає кілька ключових етапів: спадання струму до нуля, затримка перед подачею наступної напруги, а також поступове зростання струму в іншому тиристорі. Ці стадії можуть як накладатися, так і слідувати одна за одною.

ККД при номінальному навантаженні не менш 0,98.

Діапазон регулювання вихідної частоти перетворювача, Гц:

- із постійністю моменту 1...50 Гц;

- із постійністю потужності 50...100 Гц

$U_{вих} = 0...380$  В.

Керуюча напруга, за якої забезпечується частота живлення 50 Гц, становить 5 В. Часова стала  $\tau$  частотного перетворювача з урахуванням фільтрації дорівнює 0,2 с.

Під час синтезу системи важливо враховувати, що пристрій має функціонувати в зоні сталої потужності, тобто в режимі, що дозволяє зберігати здатність двигуна до перевантаження.

***Виконаємо розрахунок параметрів лінеаризованої структурної схеми електропривода з асинхронним двигуном.***

Під час аналізу електропривода з асинхронним двигуном доцільно використовувати лінеаризовану структурну модель [2]. Водночас важливо, щоб параметри дослідження залишались у межах робочої ділянки механічної характеристики, а жорсткість цієї характеристики необхідно уточнювати окремо для кожної розглянутої зони (рис. 2.4).

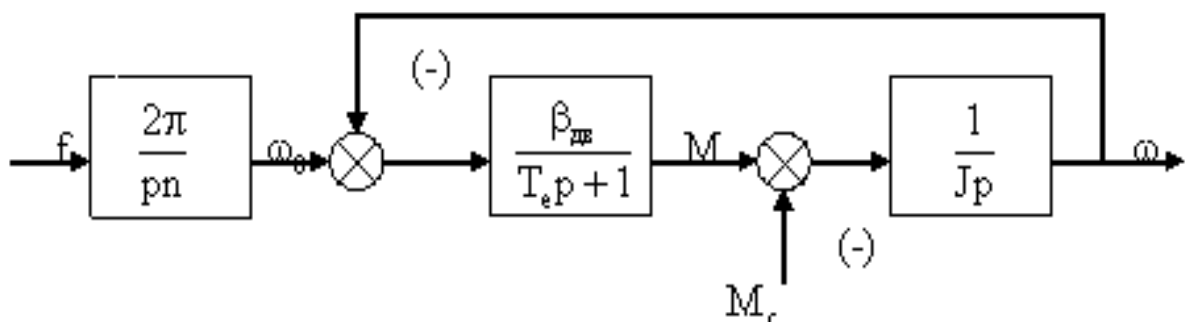


Рис.2.4. Лінеаризована структурна схема асинхронного двигуна

Опори слід виразити в абсолютних величинах замість відносних [6], для цього визначимо коефіцієнт перерахунку опорів  $K_{np}$

$$K_{np} = \frac{U_H}{I_H}; \quad (2.31)$$

$$I_H = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos\varphi}; \quad (2.32)$$

$$I_H = \frac{160 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,9 \cdot 0,935} = 289,23 \text{ A}; \quad (2.33)$$

$$K_{np} = \frac{220}{289,23} = 0,76755; \quad (2.34)$$

де  $I_H$  – номінальний струм статора.

Знайдемо абсолютні значення опорів

$$R_1 = R_1' \cdot K_{np}; \quad (2.35)$$

$$R_1 = 0,046 \cdot 0,76755 = 0,035308 \text{ Ом}; \quad (2.36)$$

де  $R_1'$  - приведений активний опір фази статора;  $R_1$  - активний опір фази статора.

$$R_2' = R_2'' \cdot K_{np}; \quad (2.37)$$

$$R_2' = 0,018 \cdot 0,76755 = 0,013816 \text{ Ом}; \quad (2.38)$$

де  $R_2''$  - приведений активний опір фази ротора;  $R_2'$  - активний опір фази ротора.

$$X_1 = X_1' \cdot K_{np}; \quad (2.39)$$

$$X_1 = 0,11 \cdot 0,76755 = 0,084431 \text{ Ом}; \quad (2.40)$$

де  $X_1'$  - приведений реактивний опір фази статора;  $X_1$  - реактивний опір фази статора.

$$X_2' = X_2'' \cdot K_{np}; \quad (2.41)$$

$$X_2' = 0,15 \cdot 0,76755 = 0,115133 \text{ Ом}; \quad (2.42)$$

де  $X_2''$  - приведений реактивний опір фази ротора;  $X_2'$  - реактивний опір фази ротора.

Знайдемо реактивний опір короткого зімкнення

$$X_k = X_1 + X_2'; \quad (2.43)$$

$$X_k = 0,084431 + 0,115133 = 0,199564 \text{ Ом}; \quad (2.44)$$

Знайдемо кутові швидкості

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с}; \quad (2.45)$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}; \quad (2.46)$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1470}{30} = 153,86 \text{ рад/с}; \quad (2.47)$$

де  $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість обертання поля статора;  $\omega_n$  - номінальна кутова швидкість обертання валу двигуна;  $n_0$  - синхронна частота обертання поля статора;  $n_n$  - номінальна частота обертання валу двигуна.

Електромагнітна постійна часу  $T_e$

$$T_e = \frac{X_k}{\omega_0 \cdot R_2'}; \quad (2.48)$$

$$T_e = \frac{0,199564}{157 \cdot 0,041} = 9,1341 \cdot 10^{-2} \text{ с}; \quad (2.49)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad (2.50)$$

$$M_n = \frac{160 \cdot 10^3}{153,86} = 1039,9 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.51)$$

де  $M_n$  - номінальний момент двигуна.

Середній показник модуля статичної жорсткості механічної характеристики визначається для випадків, коли навантаження не перевищує допустимих (номінальних) меж.

$$|\beta_{\text{де}}| \approx \frac{M_n}{\omega_0 - \omega_n}; \quad (2.52)$$

$$|\beta_{\text{де}}| = \frac{1039,9}{157 - 153,86} = 331,2; \quad (2.53)$$

Електромеханічна постійна часу електропривода

$$T_M = \frac{J_{заг}}{|\beta_{\partial\theta}|}; \quad (2.54)$$

$$T_M = \frac{52,093}{331,2} = 0,157 \text{ с}; \quad (2.55)$$

## 2.6 Побудова структурної схеми електропривода

Середній показник модуля статичної жорсткості механічної характеристики за умов навантажень, які не перевищують номінальних.

Передаточна функція перетворювача частоти

$$W_{пч} = \frac{K_{пч}}{1 + \tau p} \quad (2.56)$$

де  $\tau$  - постійна часу перетворювача частоти.

Передаточна функція за керуючою дією (на вході напруга, що подається на якірне коло, на виході – кутова швидкість)

$$W_1 = \frac{K_d}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} \quad (2.57)$$

де  $T_e$ ,  $T_M$  - електромагнітна та електромеханічна постійні часу відповідно.

Запишу передаточну функцію за збурюючої дією

$$W_2 = \frac{K_d (1 + T_e p)}{T_M T_e p^2 + T_M p + 1} \quad (2.58)$$

Передаточна функція тахогенератора

$$W_{тр} = K_{зз} = K_{тр} \quad (2.59)$$

Передаточна функція регулятора

$$W_{рег} = K_{рег} \quad (2.60)$$

Загальний вигляд передавальної функції

$$\omega(p) = W_1 U_3(p) - W_2 M_c(p) \quad (2.61)$$

$$\omega(p) = W_{рег} \cdot W_{пч} \cdot W_1 \cdot (U_3(p) - U_{зз}(p) - W_2 \cdot M_c(p)) \quad (2.62)$$

$$U_{зз}(p) = W_{тр} \omega(p) \quad (2.63)$$

Отримаю загальний вираз передаточної функції

$$\omega(p) = \frac{W_{\text{пер}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1}{1 + W_{\text{пер}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1 \cdot W_{\text{тр}}} \cdot U_3(p) - \frac{W_2}{1 + W_{\text{пер}} \cdot W_{\text{пч}} \cdot W_1 \cdot W_{\text{тр}}} \cdot M_c(p) \quad (2.64)$$

Для синтезу регулятора знехтуємо збуренням.

У результаті отримаємо структурну схему, де передбачено негативний зворотний зв'язок за швидкісною характеристикою.

Розрахуємо параметри структурної схеми.

Коефіцієнт підсилення перетворювача частоти

$$K_{\text{пч}} = \frac{f}{U_{\text{кер}}}; \quad (2.65)$$

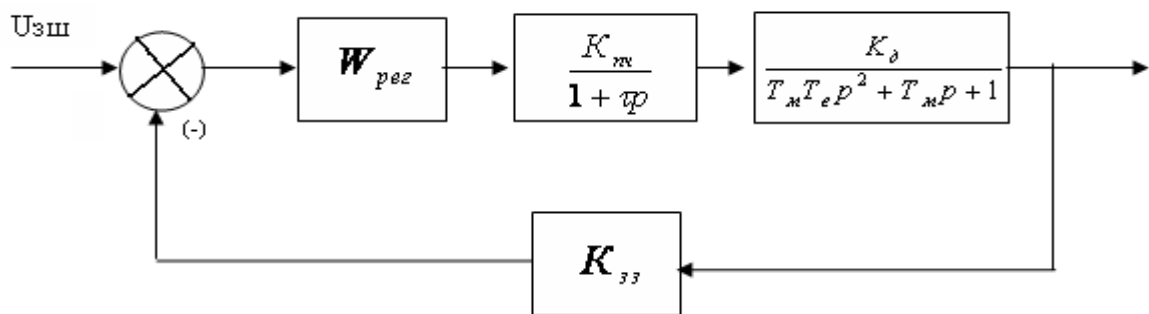


Рис.2.5. Структурна схема електропривода

$$K_{\text{пч}} = \frac{50}{5} = 10; \quad (2.66)$$

де  $f$  – частота напруги мережі;  $U_{\text{кер}}$  – сигнал керування перетворювача частоти.

Коефіцієнт підсилення двигуна

$$K_{\text{дв}} = \frac{\omega_0}{f}; \quad (2.67)$$

$$K_{\text{дв}} = \frac{1500}{50} = 30; \quad (2.68)$$

де  $\omega_0$  - синхронна кутова швидкість обертання поля статора.

Переходимо до етапу розрахунку регулятора. Обрано оптимізацію контуру за критерієм технічного оптимуму, що передбачає компенсацію двох послідовно з'єднаних ланок зі сталими часу  $T_e$  та  $T_m$ . Такий підхід забезпечує наявність інтегральної частини в регуляторі, завдяки чому система набуває властивостей астатизму.

Розрахунок каналу зворотного зв'язку. Тахогенератор розглядається як елемент без інерційної дії. У деяких випадках поряд із ним може знадобитися застосування подільника напруги. Згідно з критерієм [4], необхідність у цьому виникає тоді, коли в усталеному стані напруга на виході зворотного зв'язку перевищує рівень сигналу керування. Зокрема, для обраного типу перетворювача напруга при номінальній швидкості обертання двигуна не має перевищувати 5 В.

Вибираємо тахогенератор з наступними даними:

- максимальна робоча швидкість – 1500 об/хв (157,1 1/с);
- вихідна ЕРС – 230 В.

Коефіцієнт передачі тахогенератора визначається як частка між вихідною напругою та вхідною величиною за умови сталого режиму функціонування

$$K_{ТГ} = \frac{U_{вих}}{\omega_{роб}} ; \quad (2.69)$$

$$K_{ТГ} = \frac{230}{157} = 1,465; \quad (2.70)$$

Потім слід визначити значення подільника напруги, оскільки при частоті обертання тахогенератора, що становить 1500 обертів за хвилину, виникає відповідна електрорушійна сила (ЕРС)

$$E_{ТГ} = \frac{n_n}{n_{ТГ}} \cdot U_{вих} ; \quad (2.71)$$

$$E_{ТГ} = \frac{1470}{1500} \cdot 230 = 225,4 \text{ В}; \quad (2.72)$$

Подавання такого значення на регулятор є неприпустимим. Щоб визначити параметри дільника, слід скористатися формулою загальної передавальної функції оптимізованої системи регулювання швидкості

$$W_{(ГО)прям} = \frac{\omega_{об}(p)}{U_{к}(p)} = \frac{1/K_{ззи}}{2T_{нч}p \cdot (T_{нч}p + 1) + 1} \quad (2.73)$$

Прирівнюємо  $p = 0$  (для статичного режиму)

$$W_{Omt} = \frac{\omega_{об}}{U_{\kappa}} = \frac{1}{K_{ззш}} \quad (2.74)$$

Тоді:

$$K_{ззш} = K_{ТГ} \cdot U_{дільника} = \frac{U_{кер}}{\omega_n}; \quad (2.75)$$

$$K_{ззш} = \frac{5}{157} = 3,1847 \cdot 10^{-2}; \quad (2.76)$$

$$K_{дільника} = \frac{K_{ззш}}{K_{ТГ}}; \quad (2.77)$$

$$K_{дільника} = \frac{3,1847 \cdot 10^{-2}}{1,465} = 2,174 \cdot 10^{-2} = \frac{1}{45,08}; \quad (2.78)$$

Тобто для АД КЗР необхідно в 45,08 разів зменшити напругу з виходу тахогенератора.

### 3 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

#### 3.1 Синтез ПД-регулятора

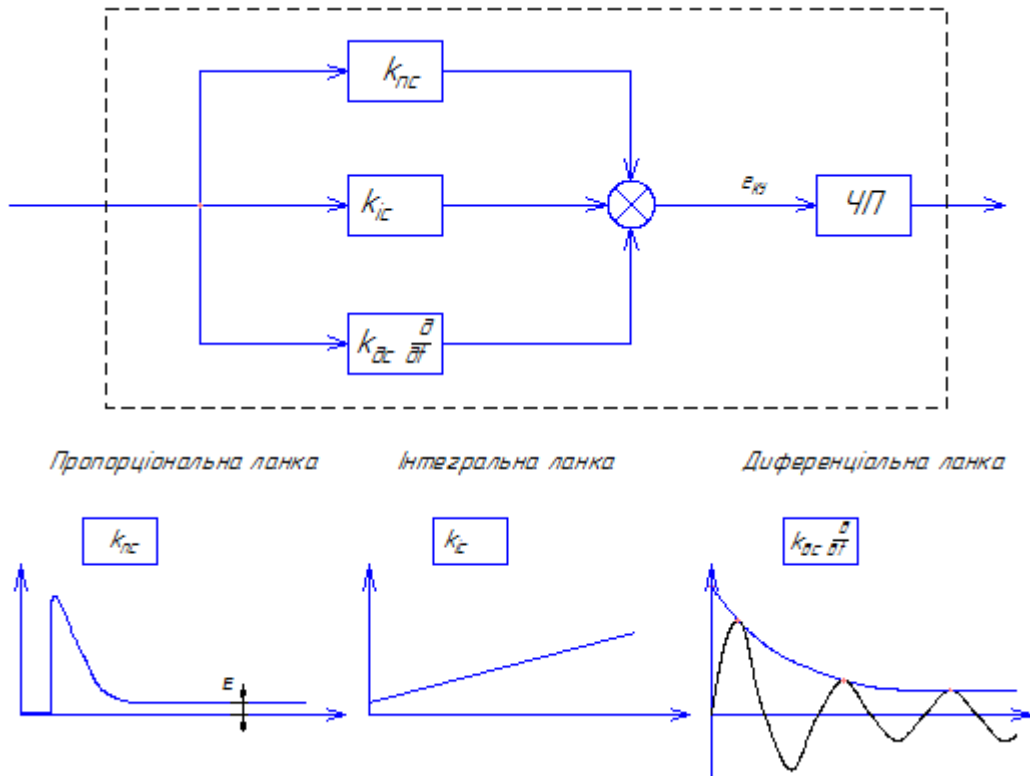


Рис. 3.1. Структурна схема ПД- регулятора

Настроюємо контур регулювання швидкості на технічний оптимум

$$W_{рег} \cdot \frac{K_{\delta} \cdot K_{нч} \cdot K_{мг}}{(1 + T_{нч}p) \cdot (T_e T_M p^2 + T_M p + 1)} = \frac{1}{2T_{\mu}p \cdot (T_{\mu}p + 1)} \quad (3.1)$$

Приймемо  $T_{нч} = T_{\mu}$ , тоді

$$W_{рег} = \frac{(1 + T_{пч}p) \cdot (T_e T_M p^2 + T_M p + 1)}{2T_{пч}p \cdot (T_{пч}p + 1) \cdot K_{\delta} \cdot K_{пч} \cdot K_{тг}} \quad (3.2)$$

Зробимо заміну

$$T_1 = 2 \cdot T_{нч} \cdot K_{\delta} \cdot K_{нч} \cdot K_{зш} \quad (3.3)$$

Тоді

$$W_{\text{рег}} = \frac{T_e T_M p^2 + T_M p + 1}{T_1 p} = \frac{T_e T_M}{T_1} p + \frac{T_M}{T_1} + \frac{1}{T_1 p} \quad (3.4)$$

Підставивши значення і отримаємо складові ПД-регулятора:

$$T_1 = 2 \cdot 0,2 \cdot 3,185 \cdot 10 \cdot 2,17 \cdot 10^{-2} = 0,2764; \quad (3.5)$$

$$W_{\text{рег}} = \frac{9,1341 \cdot 10^{-2} \cdot 0,157}{0,2764} p + \frac{0,157}{0,2764} + \frac{1}{0,2764 \cdot p} =$$

$$= 0,05188p + 0,568 + \frac{1}{0,2764 \cdot p}; \quad (3.6)$$

У даній задачі розглядається нетипова ситуація, оскільки найбільше значення має мала стала часу. Такий підхід до прийняття рішення щодо використання саме цієї сталої без компенсації пояснюється тим, що для нормальної роботи частотного приводу зі скалярним типом керування необхідно застосування елементів, які задають інтенсивність сигналу. У цьому випадку роль такого елемента виконує фільтр енергетичного перетворювача. Для завершення процесу синтезу слід також здійснити перевірку двигуна на відповідність допустимим рівням струму під час перехідних режимів шляхом комп'ютерного моделювання.

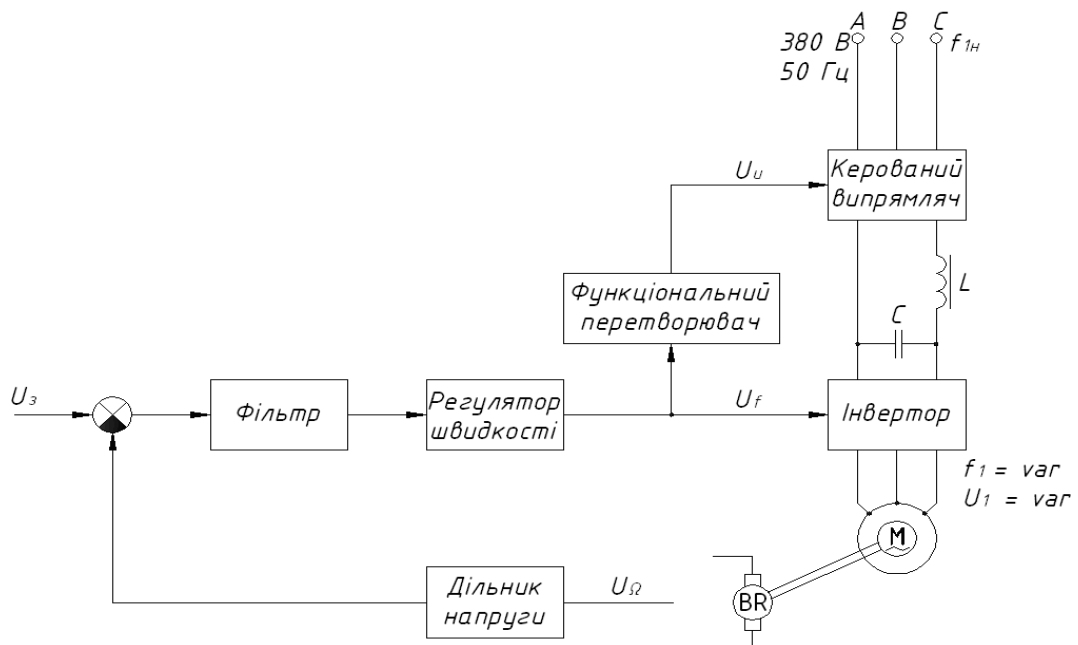


Рис.3.2. Функціональна схема

### 3.2. Дослідження якості перехідних і частотних характеристик

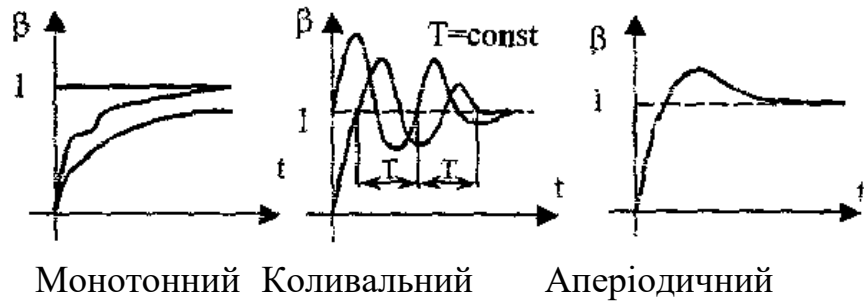
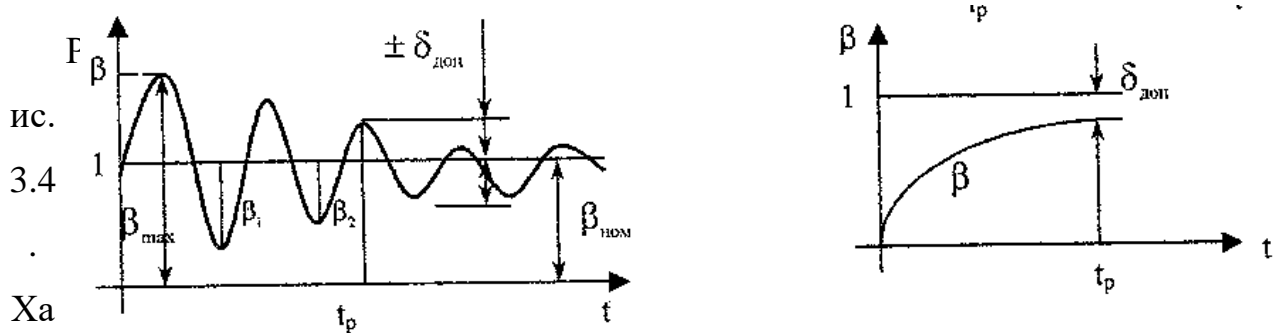


Рис. 3.3 Види перехідних процесів

Монотонний перехідний процес – це такий режим зміни керованого параметра, при якому значення плавно наближається до встановленого без зміни напрямку (тобто без зміни знаку похідної і без перерегулювання).

Коливальний процес виникає тоді, коли величина керування змінюється періодично, з фіксованим значенням періоду  $T = \text{const}$ , що є характерним для лінійних систем автоматичного регулювання.

Аперіодичний перехідний процес супроводжується перерегулюванням – відхиленням від заданого значення, яке може відбуватися як без коливань, так і з такими, що не мають сталої періодичності.



характеристики перехідних процесів

1. Час регулювання (швидкодія)  $t_p$  – час із моменту зміни зовнішньої дії (збурення або завдання) до моменту досягнення керованою величиною  $\delta_{\text{доп}}$  (допустимої похибки). Вона рівна  $0,05 \cdot \beta_{\text{ном}}$ , якщо спеціально не задана.

$$\delta = \frac{\beta_{\max} - \beta_{\text{ном}}}{\beta_{\text{ном}}}$$

2. Перерегулювання

3. Коливальність перехідного процесу:

– число коливань  $nT$  ( $n$  – кількість періодів коливань);

– ступінь затухання  $\frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_1}$  – відносна різниця сусідніх амплітуд

коливального процесу;

– ступінь коливальності перехідного процесу  $\mu = \frac{\omega}{\alpha}$ ,

$S = \alpha \pm j\omega$  – корінь характеристичного рівняння;

– власна частота коливань  $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f_0$  – визначається фізичними параметрами системи.

4. Частотна смуга пропускання розімкненого контуру визначається діапазоном, у межах якого амплітуда вихідного сигналу не падає більш ніж на 30% від початкового значення на вході.

Щоб оцінити параметри якості перехідного процесу, необхідно мати дані про його часову характеристику  $\beta(t)$ . Щоб уникнути складного розв'язання диференціальних рівнянь, застосовують спеціальні критерії оцінювання якості. Найпоширенішими є частотні, кореневі та інтегральні методи, які значно спрощують аналіз динаміки системи.

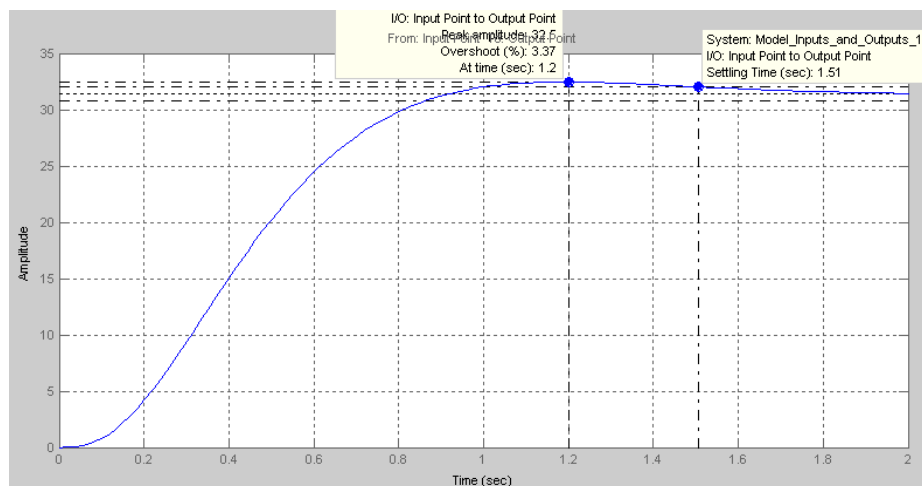


Рис.3.5 Параметри перехідного процесу в електроприводі АПО газу з навантаженням (ПД-регулятор)

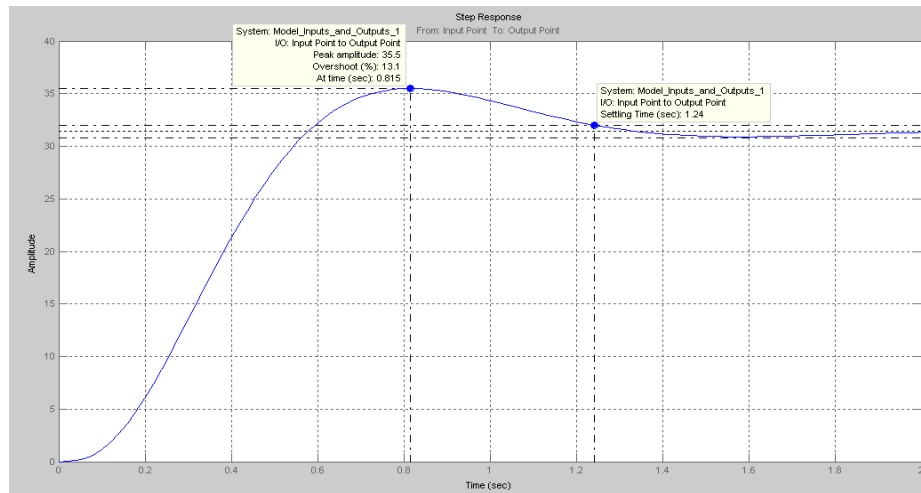


Рис.3.6 Параметри перехідного процесу в електроприводі АПО газу без навантаження (ПД-регулятор).

Було виконано аналіз характеристик перехідного процесу в електроприводі автоматизованого подавання газу з використанням ПД-регулятора – спочатку в режимі холостого ходу, а потім під навантаженням. У першому випадку зафіксовано час перехідного процесу  $T_{ПД} = 1,24$  с при перерегулюванні 4,19 %, а при наявності навантаження –  $T_{ПД} = 1,51$  с та  $\delta_{ПД} = 2,13$  %. Це дозволяє зробити висновок, що вплив навантаження на динамічні показники системи не є суттєвим і може бути проігнорований у більшості практичних задач.

У цій слідкуючій системі спостерігається невисока швидкодія, тому використання диференціальної (Д) складової в регуляторі є недоцільним. Такий елемент характерний для систем, що потребують швидкого реагування, однак у нашому випадку він лише ускладнює захист від завад. З огляду на це, доцільним є перехід до ПІ-регулятора, виключивши Д-складову. За допомогою методів автоматичного керування підтверджено, що така заміна є виправданою. У результаті моделювання отримано час перехідного процесу  $T_{ПІ} = 1,51$  с та величину перерегулювання  $\delta_{ПІ} = 2,13$  %, що демонструє покращення динамічних характеристик системи, як видно на рисунку 3.7. Таким чином, ПІ-регулятор забезпечує більш стабільну роботу системи в заданих умовах.

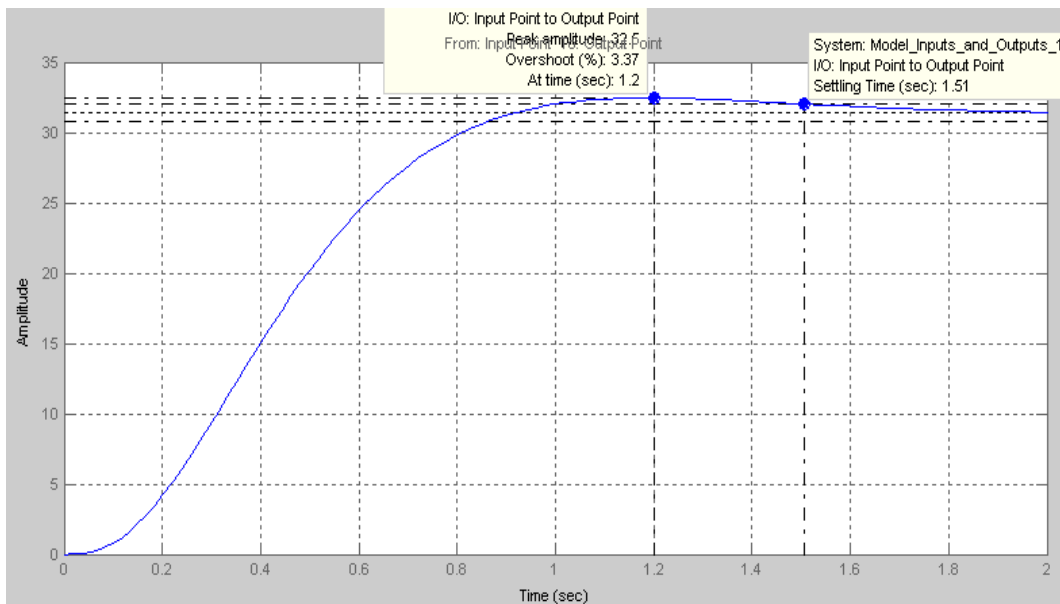


Рис.3.7 Параметри перехідного процесу в електроприводі АПО газу з навантаженням (ПІ-регулятор)

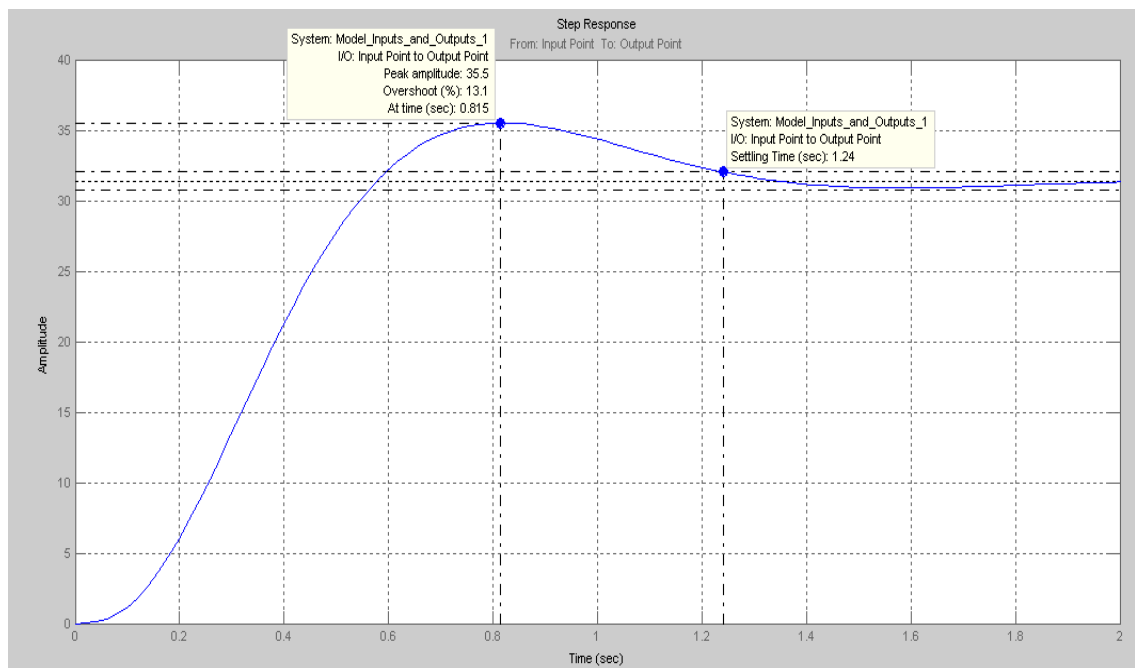


Рис.3.8 Параметри перехідного процесу в електроприводі АПО газу без навантаженням (ПІ-регулятор).

На цьому етапі роботи вже можна обґрунтовано говорити про необхідність заміни регулятора. Аналіз частотних характеристик як для окремих електродвигунів, так і для відповідних типів регуляторів, дає змогу ефективно підійти до питання визначення критеріїв стабільності. Ці показники дозволяють оцінити надійність функціонування автоматизованої

системи керування без потреби у розв'язанні повного диференціального рівняння, що її описує.

Поширеними методами є частотні та алгебраїчні критерії. До алгебраїчних належать критерії Гурвіца і Рауса, а до частотних – Найквіста і Михайлова. Критерії Рауса, Гурвіца та Михайлова застосовують як для замкнених, так і для відкритих систем автоматичного керування.

Необхідність забезпечення запасу стійкості:

1. Під час формулювання рівнянь для окремих ланок системи, реальні фізичні процеси подаються в спрощеній формі – нехтують незначними впливами та другорядними параметрами, що практично не впливають на загальну динаміку.

2. Похибки лінеаризації.

3. Параметри системи, такі як маса, момент інерції, опір, ємність, індуктивність і коефіцієнти підсилення, визначаються з похибкою до 10%, що зумовлено особливостями вимірювальних методик і точністю використовуваного обладнання.

4. Похибки експерименту та обробки результатів.

5. Відхилення параметрів елементів системи, що виникають через технологічні допуски у процесі виготовлення.

6. Старіння елементів у процесі експлуатації.

7. Нестабільність параметрів довкілля ( $t^0, P$ ).

8. Достатніми запасами стійкості вважаються значення  $\Delta L(\omega) \geq 6 - 12$  дБ,  $\Delta \psi(\omega) \geq 30^\circ$ .

У зв'язку з імовірністю відхилення фактичних параметрів від розрахункових, доцільно вводити запас стійкості, що дозволяє компенсувати подібні неточності.

У представленій системі автоматичного керування вентиляторне навантаження моделюється передавальною ланкою. Вона сформована на основі дослідження залежності крутного моменту від швидкості обертання

вентилятора. Зазвичай така характеристика має форму параболи, а величина навантаження визначається як тангенс кута нахилу дотичної до цієї кривої.

На основі побудованих логарифмічних амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик розімкненого контуру САК визначаються показники її стійкості. Як показує графік (рис.3.9), при використанні ПД-регулятора система демонструє такі значення запасів за амплітудою та фазою:

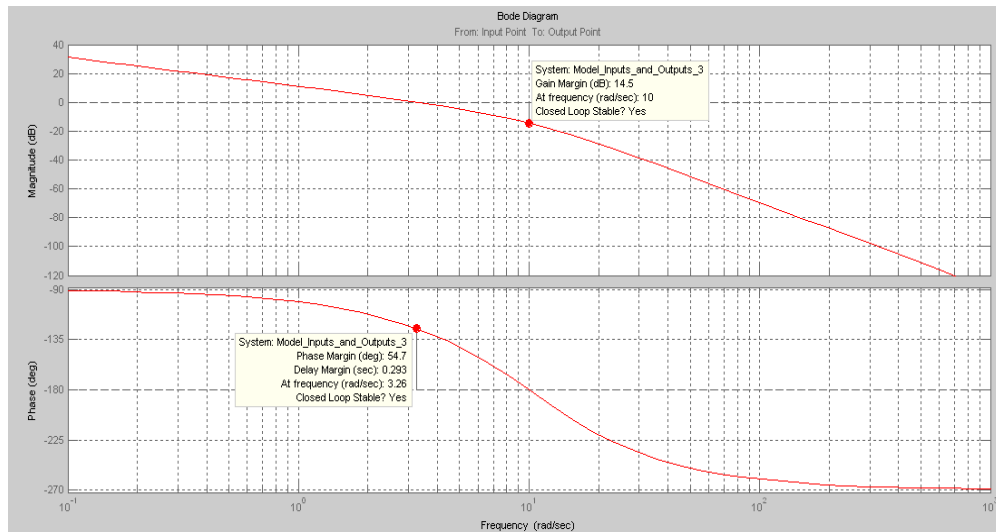


Рис.3.9 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК АПО газу з навантаженням (ПД-регулятор)

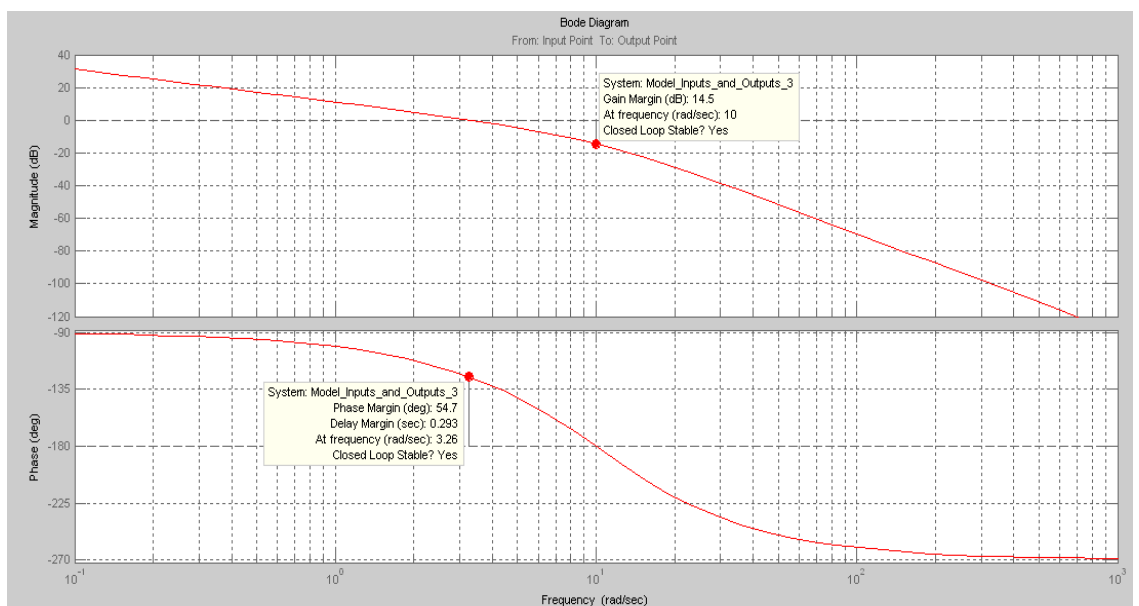


Рис.3.10 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК АПО газу без навантаження (ПД-регулятор).

- запас за фазою без навантаження  $\Delta\psi(\omega)_1 = -180^\circ - (-114,5^\circ) = 63,8^\circ$ ;
  - запас за амплітудою без навантаження  $\Delta L(\omega)_1 = 30,4$  дБ,  $\Delta L(\omega)_2 = 17,7$  дБ;
  - запас за фазою з навантаженням  $\Delta\psi(\omega)_1 = -180^\circ - (-114,5^\circ) = 64,9^\circ$ ;
  - запас за амплітудою з навантаженням  $\Delta L(\omega)_1 = 30,4$  дБ,  $\Delta L(\omega)_2 = 18,1$  дБ.
- Як ми бачимо ЛАЧХ і ЛФЧХ навантаженої системи і ненавантаженої майже не відрізняються.

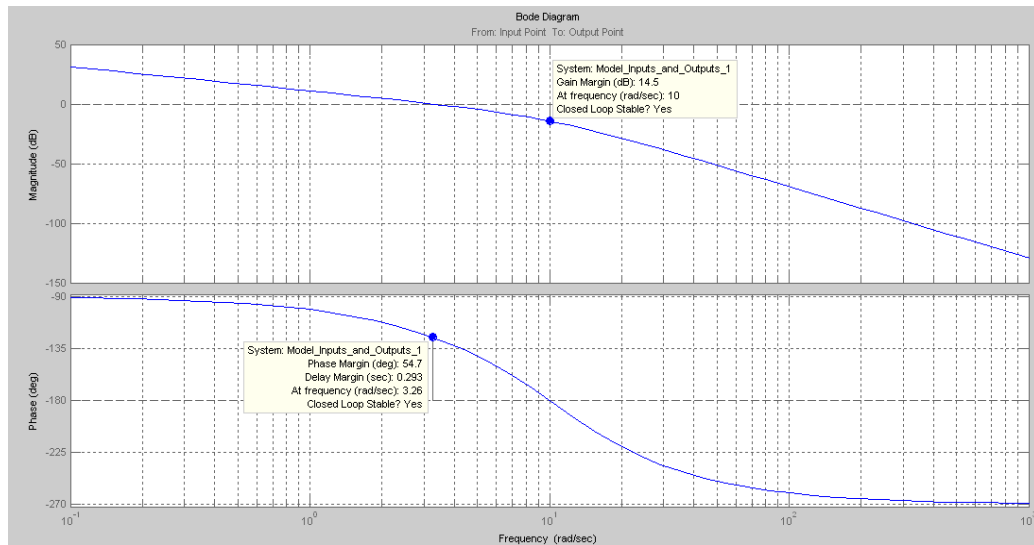


Рис.3.11 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК АПО газу з навантаженням (ПІ-регулятор)

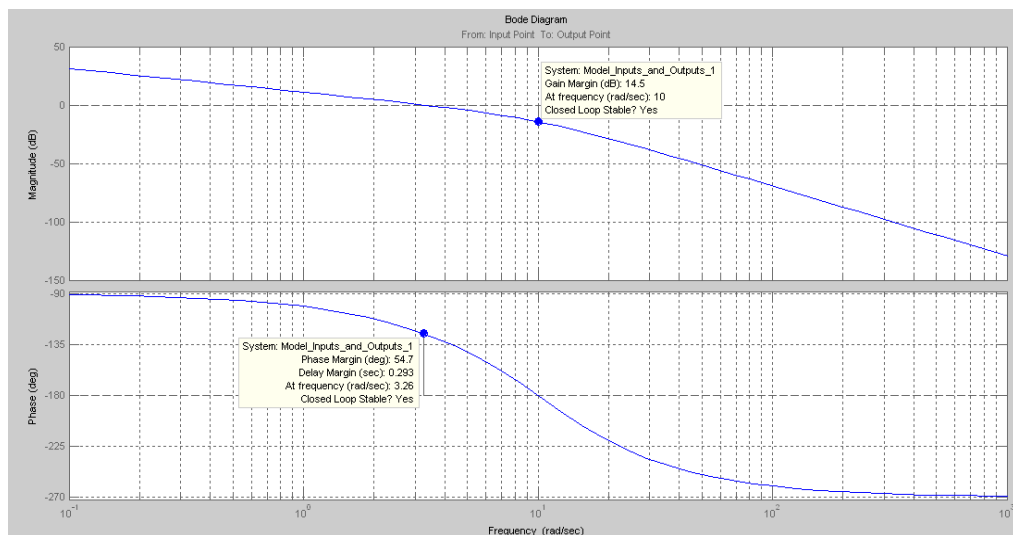


Рис.3.12 ЛАЧХ і ЛФЧХ в САК АПО газу без навантаженням (ПІ-регулятор)

- запас за фазою без навантаження  $\Delta\psi(\omega)_1 = -180^\circ - (-114,5^\circ) = 63,8^\circ$ ;
- запас за амплітудою без навантаження  $\Delta L(\omega)_1 = 30,4$  дБ,  $\Delta L(\omega)_2 = 17,7$  дБ;
- запас за фазою з навантаженням  $\Delta\psi(\omega)_1 = -180^\circ - (-114,5^\circ) = 64,9^\circ$ ;
- запас за амплітудою з навантаженням  $\Delta L(\omega)_1 = 30,4$  дБ,  $\Delta L(\omega)_2 = 18,1$  дБ.

Порівняння результатів, представлених на рисунках, дозволяє дійти висновку: рівень запасу стійкості повністю відповідає вимогам до цієї системи автоматичного керування. Аналіз динамічних процесів і частотних характеристик підтверджує доцільність заміни ПД-регулятора на ПІ-регулятор у даній конфігурації. Така заміна обґрунтована незначною величиною диференціальної складової, яка для електродвигуна, що приводить у дію вентилятор подачі повітря, становить лише  $2,076 \times 10^{-2} p$ . Невелике значення Д-компоненти практично не вплинуло на форму перехідних процесів і частотну характеристику, водночас зберігши необхідні межі стійкості. Це, у свою чергу, дозволяє спростити подальші розрахунки подібних САК, оминаючи громіздкі методичні підходи.

Аналізуючи графіки перехідного процесу та частотної характеристики, можна зробити висновок: після заміни пропорційної та інтегральної частин регулятора спостерігається незначне збільшення перерегулювання на 0,07%. Водночас час стабілізації залишився сталим – 1,68 секунди. Оновлена конфігурація регулятора також сприяла підвищенню амплітудного запасу стійкості на 10 дБ. Отримані результати повністю відповідають встановленим вимогам до стійкості електромеханічних систем, а наявність вентиляторного навантаження ще більше укріплює стабільність функціонування системи.

Як видно з рис.3.13, значення частоти перебуває у межах 50–100 Гц, що відповідає допустимому діапазону, заданому для конкретного типу застосованого перетворювача.

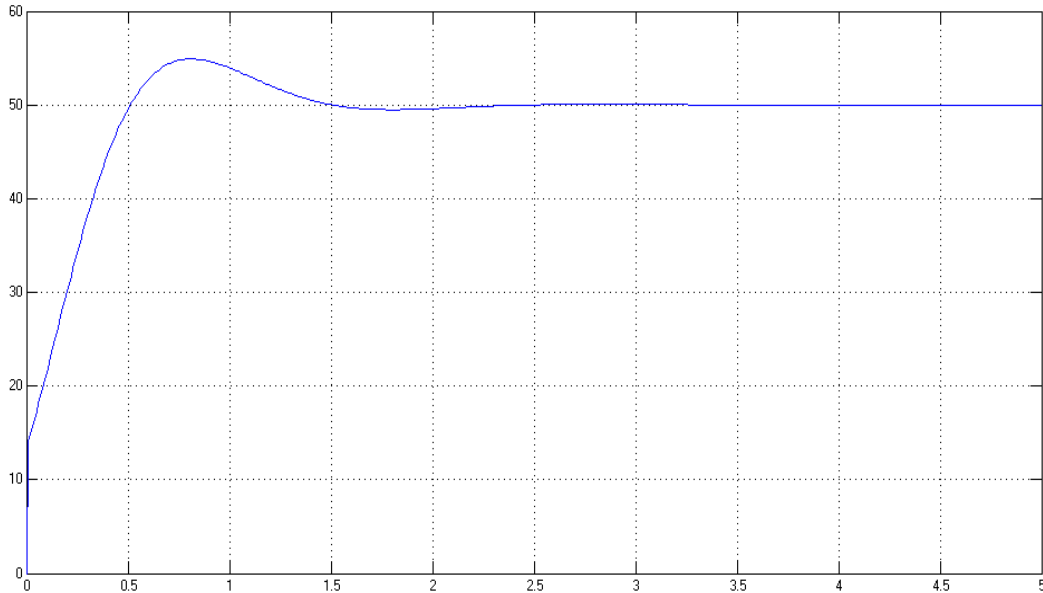


Рис.3.13 Діапазон вихідної частоти перетворювача

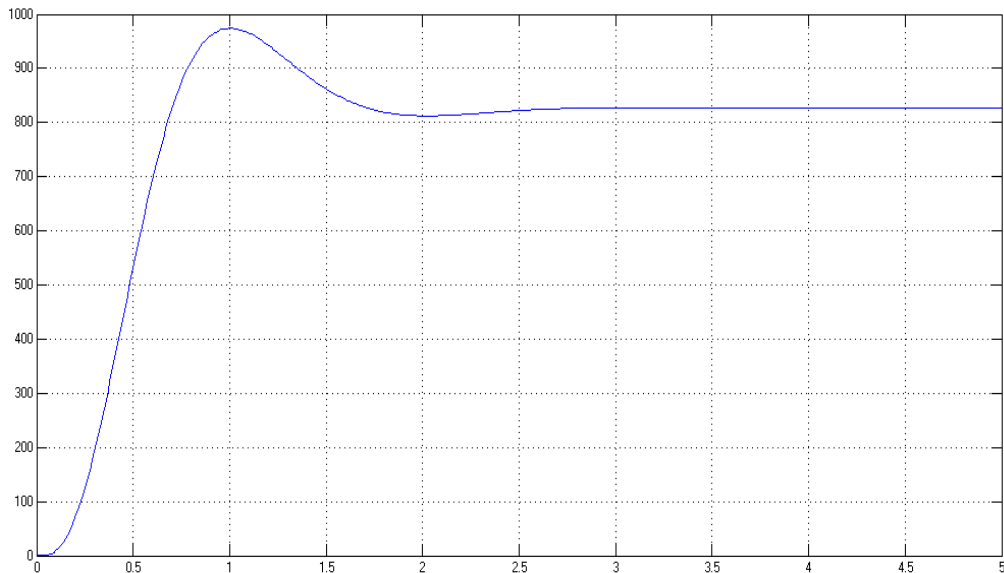


Рис.3.14 Значення моменту системи

З Рис 3.14 видно, що в системі немає значного викиду моменту і він знаходиться у визначеному діапазоні  $M_H = 1039,9$  Н·м і рівне  $M_{дос} = 974$  Н·м.

### 3.3. Розрахунок втрат потужності в ЕП

Електропривод зазвичай отримує необхідну для виконання роботи енергію з електромережі. Передача цієї енергії до виконавчого елемента механізму супроводжується певними втратами на кожному з етапів її перетворення та транспортування в межах системи привода.

Протікання електричного струму в силових та збуджувальних колах двигуна спричиняє втрати енергії на активних опорах. Зміни магнітного поля призводять до втрат у магнітопроводі, зумовлених вихровими струмами та ефектом гістерезису. Додатково, до зниження ефективності роботи двигуна призводять механічні втрати, які виникають через сили тертя, опір руху від самовентиляції, а також втрати у передавальному механізмі кінематичного ланцюга.

Під час проектування та експлуатації механізмів важливо враховувати енергетичні втрати, оскільки саме оцінка нераціонального використання енергії є ключовим показником ефективності. Аналіз таких втрат дозволяє виявити резерви для підвищення енергозбереження і зменшення витрат.

Інше важливе з практичної точки зору завдання полягає в точному визначенні енергетичних втрат при роботі електродвигуна. Це пов'язано з підбором двигуна відповідної потужності під час проектування, а також з оцінкою рівня його завантаження за температурними показниками під час використання.

Інше важливе з практичної точки зору завдання полягає в точному визначенні енергетичних втрат при роботі електродвигуна. Це пов'язано з підбором двигуна відповідної потужності під час проектування, а також з оцінкою рівня його завантаження за температурними показниками під час використання.

**Частотний перетворювач без інерційний, математичний, ідеалізований.**

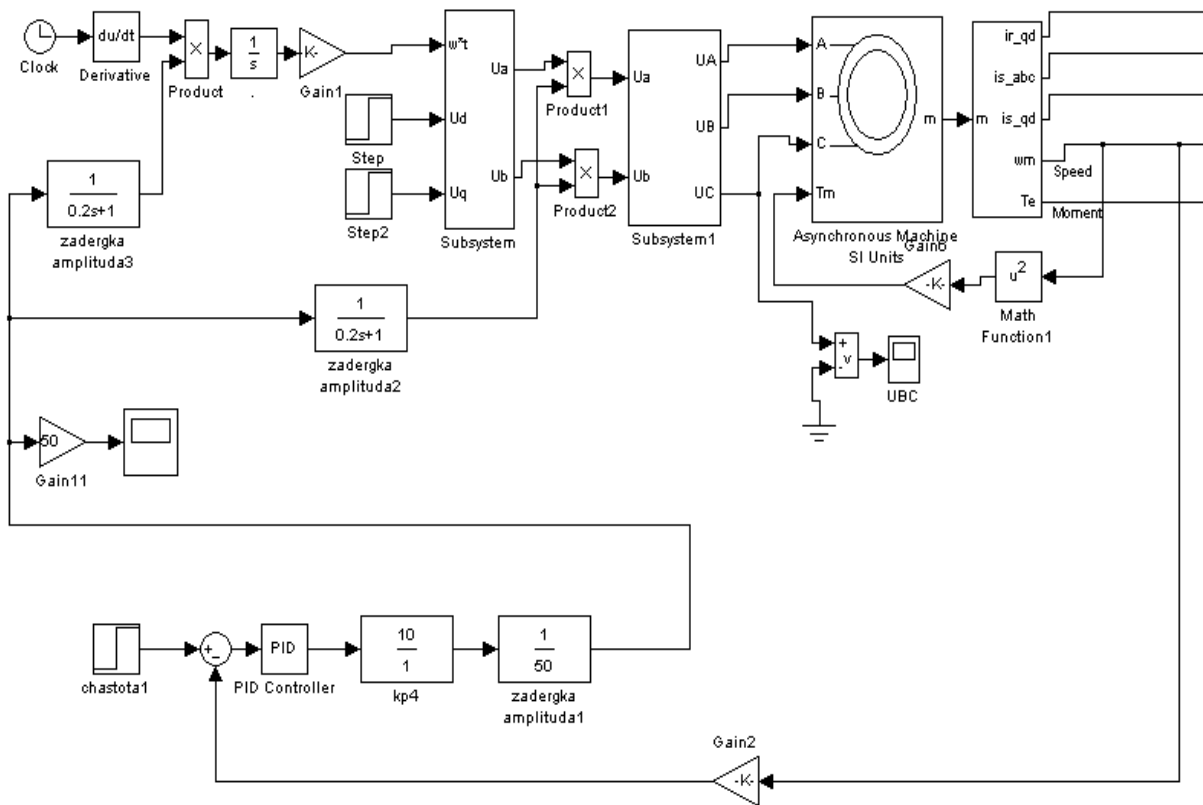


Рис.3.15 Модель асинхронного двигуна з КЗ ротором та ПІ-регулятор

Завдяки моделюванню окремого елемента системи можна оцінити втрати потужності в різних робочих умовах. Побудова моделі здійснюється на основі поданих математичних виразів із використанням таких базових блоків, як суматори, множники та дільники.

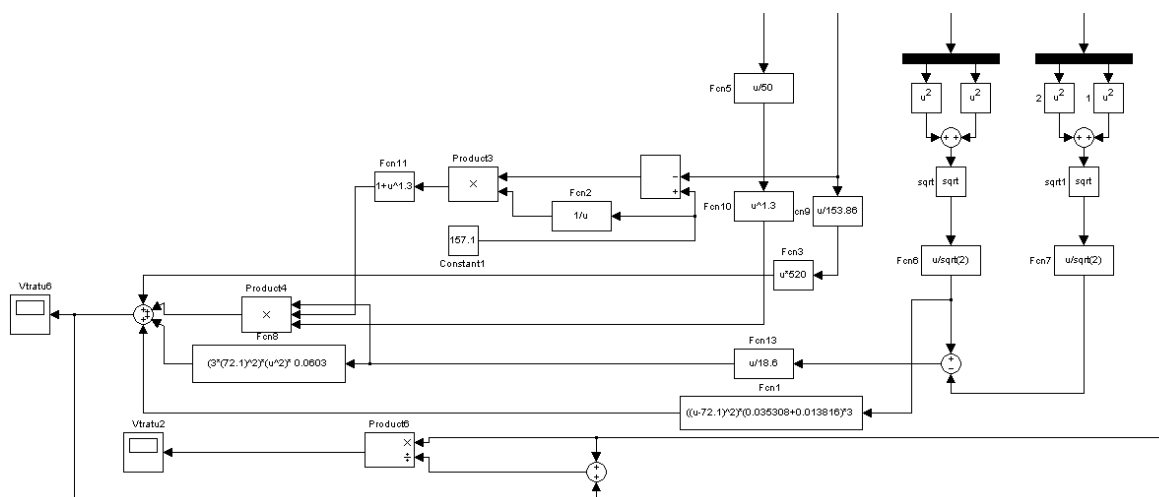


Рис. 3.16 Частина яка враховує втрати потужності в двигуні.

У ході дослідження було виявлено, що коефіцієнт корисної дії у штатному режимі роботи перевищує паспортне значення. Це зумовлено тим,

що двигун обрано із запасом потужності, тому фактичне енергоспоживання менше за номінальне. Як результат, втрати зменшились із розрахункових 11122,99 Вт до експериментально встановлених 8600 Вт, а струм споживання знизився до 229 А. Водночас зменшення навантаження призводить до падіння ККД, що підтверджує роботу двигуна в оптимальній зоні енергетичної характеристики.

Аналізуючи отримані результати, можна стверджувати, що керування здійснюється не лише зміною частоти, а й коригуванням напруги. Такий підхід демонструє вищу ефективність порівняно з раніше розглянутим методом. Навіть при зниженні навантаження до 25 % двигун зберігає високий коефіцієнт корисної дії, що дозволяє помітно скоротити витрати електроенергії у малопотужних режимах роботи.

Було прийнято рішення побудувати графіки струмів, коефіцієнта корисної дії та втрат потужності для двох граничних режимів роботи – при повному (100%) та частковому (25%) навантаженні. Це дозволяє оцінити, як саме змінюються відповідні характеристики залежно від умов експлуатації.

## ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній роботі виконано оновлення електроприводу АПО газу на основі системи з частотним перетворювачем та асинхронним двигуном (ПЧ-АД). Порівняльний аналіз показав, що така система за техніко-економічними параметрами приблизно вдвічі ефективніша за базовий привід аналогічної потужності.

Було обрано оптимальну схему регулювання та аргументовано вибір частотного перетворювача, а також розглянуто альтернативні варіанти частотного керування. Створено функціональну схему електроприводу, а також математичну модель і структурну схему з визначеними параметрами.

Проведено синтез регулятора та функціональних блоків системи, досліджено якість її перехідних і частотних характеристик. На основі теорії автоматичного керування обґрунтовано застосування ПІ-регулятора і вивчено різні режими роботи приводу.

Розроблена автоматизована система керування, яка, згідно з аналізом динаміки, забезпечує необхідні перехідні процеси та стабільне регулювання. Виконано розрахунок схеми випрямляча. Також створено модель для дослідження втрат потужності та комп'ютерну симуляцію роботи електроприводу.

## **ЛІТЕРАТУРА**