ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
_____О.К. Дідик
“___“ _____2024 р.

# ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему:

# «Система автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери»

# «System of automatic stabilisation of the technological parameter of the refrigerating chamber»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи АК-23М-2
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп’ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
_____С.П. Руссу
«____»_____2024 р.

Керівник роботи
доц, канд.техн.наук
_____Д.В. Трушаков
«_____»_____2024 р.

Рецензент
доц. каф. ЕТС та ЕМ, к.т.н

_____
«_____»_____2024 р.

м. Кропивницький

**Зміст**

Вступ 5

1 Призначення та область застосування системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери 7

1.1 Фізичний принцип роботи холодильного обладнання 7

1.2 Типи холодильних установок та їх особливості 9

1.3 Узагальнені завдання автоматизації холодильників 14

2 Огляд рішень та обґрунтування принципу побудови системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери 15

2.1 Основна задача автоматизації холодильної установки 15

2.2 Статична характеристика холодильника 15

2.3 Методи рішення основної задачі автоматизації холодильної установки 18

2.4 Способи вдосконалення систем автоматизації холодильників 21

3 Обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій 28

3.1 Вибір підходу підтримування температури в об’єкті охолодження 28

3.2 Проектування системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери 32

3.3 Ступінь і об’єм автоматизації холодильної установки 33

3.4 Розробка схеми електричної принципової, вибір засобів автоматизації 35

3.5 Обґрунтування способу зміни продуктивності компресора 38

3.5.1 Зміна продуктивності компресора шляхом зміни частоти обертання приводу 39

3.5.2 Порівняння підходів зміни продуктивності компресора 43

3.6 Вибір та обґрунтування компресора 44

3.6.1 Характеристика електромеханічних систем 45

3.6.2 Обґрунтування використання частотного перетворювача 46

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи 48

4.1 Опис системи стабілізації технологічного параметра холодильної камери 49

4.2 Математична модель об’єкта керування 50

4.2.1 Методи опису об'єктів керування 50

4.2.2 Обробка експериментальних даних 51

4.2.3 Визначення коефіцієнта підсилення об’єкта 53

4.2.4 Побудова моделі типової ланки геометричним методом 53

4.2.5 Побудова методом площ математичної моделі ланки другого порядку 55

4.2.6 Вибір апроксимуючої моделі 57

4.3 Дослідження залежності сигналу датчика від температури повітря в камері для використання в системі стабілізації технологічного параметра 58

4.3.1 Визначення виду лінії регресії 59

4.3.2 Визначення коефіцієнта кореляції 62

4.3.3 Оцінка істотності коефіцієнта кореляції та лінії регресії 62

4.4 Синтез коректуючого пристрою системи 64

4.4.1 Визначення передаточних функцій системи 64

4.4.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова 66

4.4.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра 68

4.4.4 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи 69

4.4.5 Побудова перехідного процесу замкнутої системи 71

4.4.6 Побудова бажаної ЛАЧХ системи 72

4.4.7 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками 74
4.4.8 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР та визначення прямих показників якості 75
5 Опис організації робіт, що пов’язані із застосуванням системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери 77
5.1 Експлуатація холодильного устаткування 77
5.2 Експлуатація та організація обслуговування пристроїв холодильної автоматики 78
5.3 Уставки приладів автоматичного захисту 81
Висновки 82
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів 84
Список літератури 85
Додатки 87

# ВСТУП

Холодильники – це споруди, призначені для охолодження, заморожування та зберігання продуктів. У приміщеннях (камерах) холодильника підтримується стабільно низька температура (+12–40°С) при високій відносній вологості (85–95 %). До приміщень холодильника висуваються підвищені санітарні вимоги. У цій роботі розглядається холодильна камера типового маслосиркомбінату, схема виробництва та зберігання масла якого наведена на слайді 01.00.

Невід'ємною умовою збереження харчових продуктів високої якості є створення безперервного холодильного ланцюга, який забезпечує вплив низьких температур на продукти протягом усього періоду — від виробництва чи заготівлі до моменту споживання. Холодильники, що розташовані в різних регіонах країни, складають ланки цього ланцюга, а їх з'єднання здійснюється за допомогою холодильного транспорту. Штучний холод використовується в різних галузях народного господарства для досягнення температур, нижчих за температуру навколишнього середовища. Особливе значення штучний холод має для збереження продуктів, що швидко псуються.

Зі збільшенням холодильної місткості активно розвиваються холодильне машинобудування та приладобудування. Сучасні холодильні машини виготовляються здебільшого у вигляді автоматизованих агрегатів, що дозволяють значно підвищити ефективність та зручність експлуатації. Особливу увагу приділяють проектуванню та виготовленню компактних автоматизованих холодильних установок, які здатні забезпечити високу продуктивність при обмежених розмірах і знижених витратах енергії. Такий підхід дозволяє задовольнити зростаючі потреби у збереженні продуктів на різних етапах виробництва та зберігання, зокрема в обмежених просторах та в умовах змінних навантажень.

Малі холодильні машини знайшли широке застосування в торгівлі та громадському харчуванні (холодильні шафи, камери, прилавки, вітрини, охолоджувані торговельні автомати), а також у побуті (холодильники, кондиціонери), на транспорті, в сільському господарстві, медицині та інших

секторах народного господарства. В галузях торгівлі та громадського харчування загальна кількість малих холодильних установок перевищує 2 мільйони одиниць, а в побуті використовуються десятки мільйонів холодильників, що підкреслює їх широке поширення та важливу роль у повсякденному житті.

Для збереження та обробки зростаючого обсягу харчових продуктів необхідно збільшити масштаби та прискорити темпи будівництва холодильних установок і обладнання, а також модернізувати технічний рівень вже існуючих холодильних підприємств. У найближчі роки планується суттєве розширення місткості холодильників у харчовій, м'ясній та молочній промисловості. Окрім того, збільшуватимуться холодильні потужності в торгівлі та сільському господарстві. Всі ці об'єкти мають бути оснащені сучасним холодильним обладнанням з високим рівнем заводської готовності, автоматизації та механізації виробничих процесів, що підтверджує актуальність цієї магістерської роботи.

У цій роботі запропоновано вирішення актуальної задачі вдосконалення системи стабілізації температурного режиму промислового холодильника. Однак варто зазначити, що досягнення високої якості продукту та зменшення кількості бракованих виробів неможливе без урахування особливостей роботи цього агрегату.

*Об'єктом дослідження* є стабілізація температури в об’ємі промислового холодильника.

*Предмет дослідження* – система автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери.

У роботі основну увагу слід зосередити на стабілізації технологічного параметра, для чого необхідно оцінити важливість його підтримки, розглянути підходи до реалізації подібних систем і вибрати оптимальний. Треба розробити функціональну та структурну схеми системи, визначити її показники якості, побудувати перехідний процес, а у разі невідповідності заданим значенням здійснити синтез коректуючого пристрою. Крім того, необхідно приділити увагу питанням охорони праці та дотримання техніки безпеки при роботі з цим обладнанням.

# 1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПАРАМЕТРА ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ

## 1.1 Фізичний принцип роботи холодильного обладнання

Охолодження – це процес зниження температури тіла шляхом зменшення його внутрішньої енергії. Для штучного охолодження створюють умови, при яких тепло відводиться від охолоджуваного тіла і поглинається холоднішим тілом. Для тривалого охолодження важливо, щоб тепло сприймалося охолоджувальним тілом без підвищення його температури, інакше охолодження припиниться. Таку властивість мають тіла, наприклад, тверді – під час плавлення, а рідкі – під час випаровування чи кипіння. [1-3].

Сучасні промислові методи охолодження базуються на процесах випарювання, кипіння, плавлення та сублімації, які супроводжуються поглинанням тепла з навколишнього середовища. Під час плавлення або танення тепло йде на зміну зв'язків між молекулами. При випаровуванні чи кипінні тепло витрачається на подолання молекулярного зчеплення та розширення рідини. При сублімації тепло витрачається на подолання сил зчеплення молекул і зовнішнього тиску, що перешкоджає переходу в газоподібний стан.

Охолодження льодом і льодосоляними сумішами базується на властивості тіл поглинати тепло при плавленні. Охолодження за допомогою кипіння летких рідин здійснюють холодильні машини. Властивість тіл поглинати тепло при сублімації використовується для охолодження сухим льодом. Найбільш поширеним методом є охолодження холодильними машинами.

Одним з найпростіших способів машинного охолодження є дроселювання стислих газів. Піддаючи газ сильному стискуванню при температурі довкілля, а потім здійснюючи адіабатичне розширення при різкому зниженні тиску, можна знизити його температуру і використовувати як охолоджувач. Однак цей метод вимагає значних енергетичних витрат для досягнення низьких температур [4, 5].

Один із способів машинного охолодження — це охолодження вихровим ефектом, який здійснюється у вихровій трубці Ранка. Це циліндрична трубка з діафрагмою, що розділяє її на дві порожнини. Стисле повітря подається через сопло, спрямоване по дотичній до внутрішнього діаметру труби. Завихрення повітря створює розрідження в центрі труби, що знижує температуру. Холодне повітря виводиться через отвір діафрагми в охолоджуване середовище.

Частина кінетичної енергії завихрення повітря витрачається на тертя в його зовнішніх шарах, що призводить до їх нагрівання. Це гаряче повітря виходить через регулювальний дросельний вентиль. Температура холодного і гарячого повітря залежить від конструкції трубки, параметрів вхідного повітря (вологості, температури, тиску) та співвідношення мас потоків, що регулюються вентилем. При роботі на сухому повітрі з тиском 0,5 мН/м² і температурою 20°С температура холодного потоку може досягати 50°С. Однак, через низьку економічність термодинамічних процесів у вихровій трубці, що спричиняє значні втрати на тертя, її застосування в холодильниках обмежене.

Найбільше поширення в холодильній техніці мають парові холодильні машини компресійної та абсорбційної дії, в яких використовуються рідини, що киплять при низьких температурах. Принцип роботи полягає в тому, що теплота охолоджуваної рідини передається холодоагенту, що випаровується при низькій температурі. Пари холодоагенту віддають тепло в теплообміннику, перетворюючись на рідину, після чого рідкий холодоагент повертається в охолоджуване середовище, і процес повторюється.

У цих холодильних машинах робоча речовина не витрачається, а лише циркулює в герметичній системі, змінюючи агрегатний стан. Це дозволяє досягти необхідного охолодження при мінімальній кількості робочої речовини. Основна різниця між компресійними і абсорбційними холодильними машинами полягає в тому, що в компресійних машинах циркуляція здійснюється за допомогою компресора, а в абсорбційних — завдяки абсорбції і роботі термонасоса.

Термоелектричне охолодження, засноване на явищі Пельтьє, набуває все більшого поширення. Це явище полягає в тому, що при проходженні постійного

струму через термоелементи, одна частина охолоджується, поглинаючи тепло, а інша — нагрівається, віддаючи тепло довкіллю. В термоелектричному холодильнику електричний струм переносить тепло від холодних спаїв до гарячих. Простота процесу та конструкції таких холодильників робить цей метод перспективним для побутового використання.

## 1.2 Типи холодильних установок та їх особливості

Залежно від призначення, холодильники поділяються на виробничі, заготівельні, розподільні, базові, перевалочні, торгові та транспортні.

Виробничі холодильники зазвичай встановлюються на харчових підприємствах (м'ясокомбінатах, рибозаводах, молочних заводах тощо). Вони призначені для первинної обробки (охолодження, заморожування) та короткочасного зберігання сировини і готової продукції (10-20 днів). Особливістю таких холодильників є висока продуктивність охолоджувальних і заморожувальних установок та порівняно невелика ємність для зберігання. Найпоширеніші виробничі холодильники мають місткість 500-5000 т і продуктивність морозильних камер 20-100 т на добу.

Заготівельні холодильники будують в районах заготівлі харчових продуктів (яєць, фруктів). В них проводять сортування, первинну обробку (охолодження, заморожування) і короткочасне зберігання (10-20 днів) продуктів до їх відправки. Як і виробничі, вони оснащені потужними холодильними установками і є першою ланкою безперервного холодильного ланцюга.

Розподільні холодильники забезпечують постачання продуктів харчування до населення протягом року та розміщуються в містах і промислових центрах. Під час сезону заготівель вони створюють резервні запаси продуктів. Продукти надходять з виробничих і заготівельних холодильників в охолодженому або замороженому вигляді, тому на розподільних холодильниках здебільшого зберігають вантажі. Товари можуть зберігатися до 3-6 місяців або більше. Для вантажів, що відтаяли в дорозі, є камери для доохолоджування та доморожування.

Місткість таких холодильників варіюється від 500 до 15 000 т, в окремих випадках до 30 000-35 000 т.

Розподільні холодильники бувають універсальними та спеціалізованими (для м'яса, риби, фруктів тощо). Вони часто включають цехи для виробництва морозива, льоду, фасування та заморожування фруктів, овочів, масла і м'яса. Такі підприємства називають холодокомбінатами. Окрім них, існують базисні холодильники ємністю 2000-15000 т для тривалого зберігання охолоджених та заморожених продуктів.

Перевалочні холодильники використовуються для тимчасового зберігання продуктів при перевантаженні з одного виду транспорту на інший. Вони розташовуються в морських і річкових портах, а також на залізничних і шосейних транспортних вузлах. Портові холодильники часто виконують функції розподільних холодильників для місцевих районів чи міст.

Торговельні холодильники використовуються для короткочасного зберігання продуктів, що надходять до торговельної мережі з розподільних холодильників. Вони бувають різних типів: холодильники продовольчих баз (10-500 т) та підприємств торгівлі і громадського харчування (до 10 т). Продукти на базах зберігаються до 10-20 днів, а в холодильниках для торгівлі та харчування — на 1-5 днів. Вони зберігають різноманітні продукти в обмежених кількостях.

Основний показник холодильника — його місткість, яка визначається масою вантажу, що можна одночасно зберігати в камерах. Для зручності, місткість виражається умовною місткістю, що визначається як маса вантажу (мороженого м'яса I категорії) у камерах холодильника при нормі завантаження 1 м³ = 0,35 т. За умовною місткістю холодильники поділяються на: дрібні (до 10 т), малі (до 500 т), середні (до 5000 т), великі (понад 5000 т). Для домашніх холодильників місткість визначається об'ємом шафи в літрах і становить 80-240 л.

У камерах середніх і великих холодильників рекомендується підтримувати такі температури: -30-35°С у морозильних камерах, -20°С у камерах для зберігання морожених вантажів і близько 0°С у камерах охолодження. У невеликих холодильниках, де вантажі зберігаються коротший час, температура

для морожених вантажів може бути вищою (-12-15°С). У холодильниках торговельних підприємств для короткострокового зберігання продуктів температура в камерах зазвичай підтримується близько 0°С.

Обгороджування холодильників має таку конструкцію, що запобігає проникненню тепла і вологи в приміщення, де температура нижча за температуру навколишнього середовища. Всі зовнішні обгородження (стін, підлог, стель) містять шари ефективних тепло- і вологоізоляційних матеріалів. Охолоджувані приміщення зазвичай не мають вікон.

Залежно від об'ємно-планувальних рішень, холодильники поділяються на одно- та багатоповерхові.

Одноповерхові холодильники (рис. 1.1) мають просту конструкцію, оскільки основне навантаження від продуктів передається безпосередньо на ґрунт, а колони підтримують лише невелике навантаження від верхнього покриття та продуктів на підвісних шляхах. Це дозволяє збільшити норму навантаження на 1 м² підлоги до 5000 кг, що дає змогу підвищити висоту камер.

В Україні зараз будують одноповерхові холодильники висотою 4,8-6 м до низу балки покриття. Завдяки використанню сучасніших механізмів для укладання вантажів, висоту камер таких холодильників можна збільшити до 7-9 м. За кордоном зустрічаються одноповерхові холодильники висотою 8-10 м. У невеликих холодильниках, де виконуються обмежені вантажні операції, висота камер становить 3-4 м.

Стіни холодильника можуть бути самонесучими або підвісними, і, окрім власної маси, не сприймають додаткових навантажень. Вони виготовляються із збірних залізобетонних плит, цегли або профільованих металевих листів з тепловою ізоляцією. Стіни можуть спиратися на окремий фундамент або фундаментну балку, розташовану на виступах колонних фундаментів. Якщо використовуються профільовані металеві листи, стіни та перегородки виконуються підвісними, навішуючись на колони.

Підлога холодильника піднята на 1,4 м над рівнем голівки залізничної рейки, якщо така є. Під низькотемпературними камерами одноповерхових холодильників грунт штучно підігрівають, щоб уникнути його промерзання і

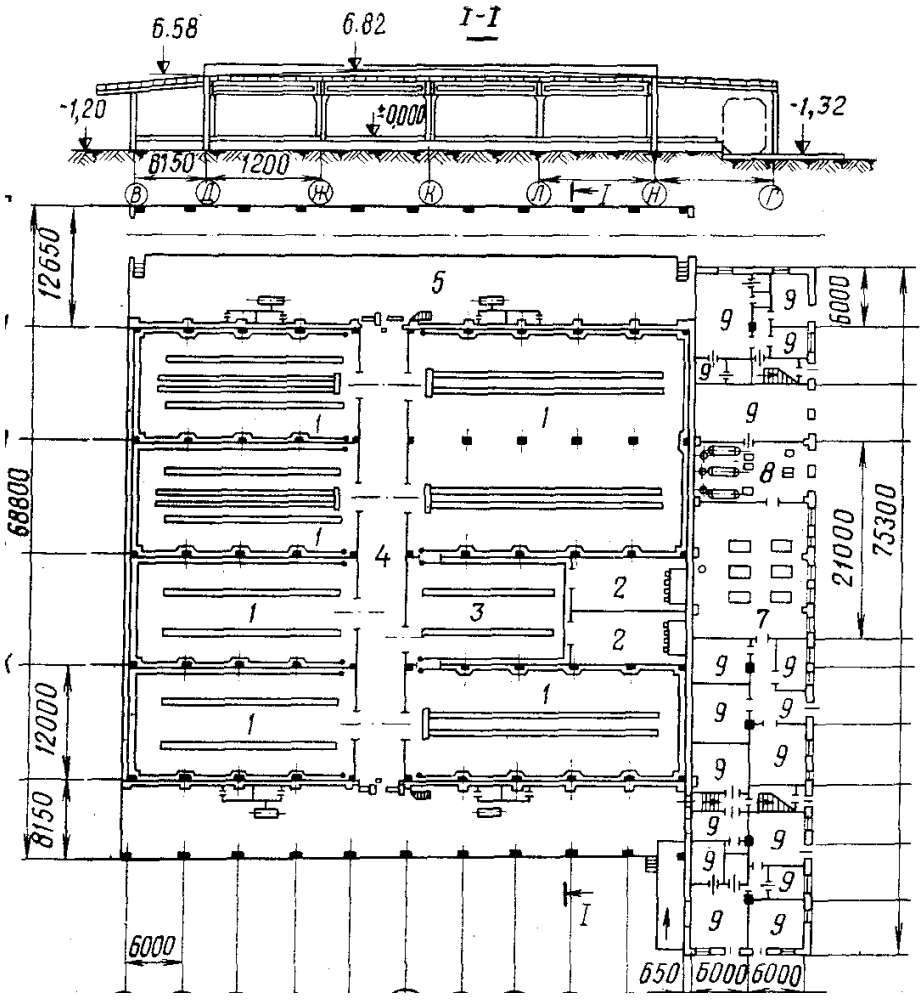


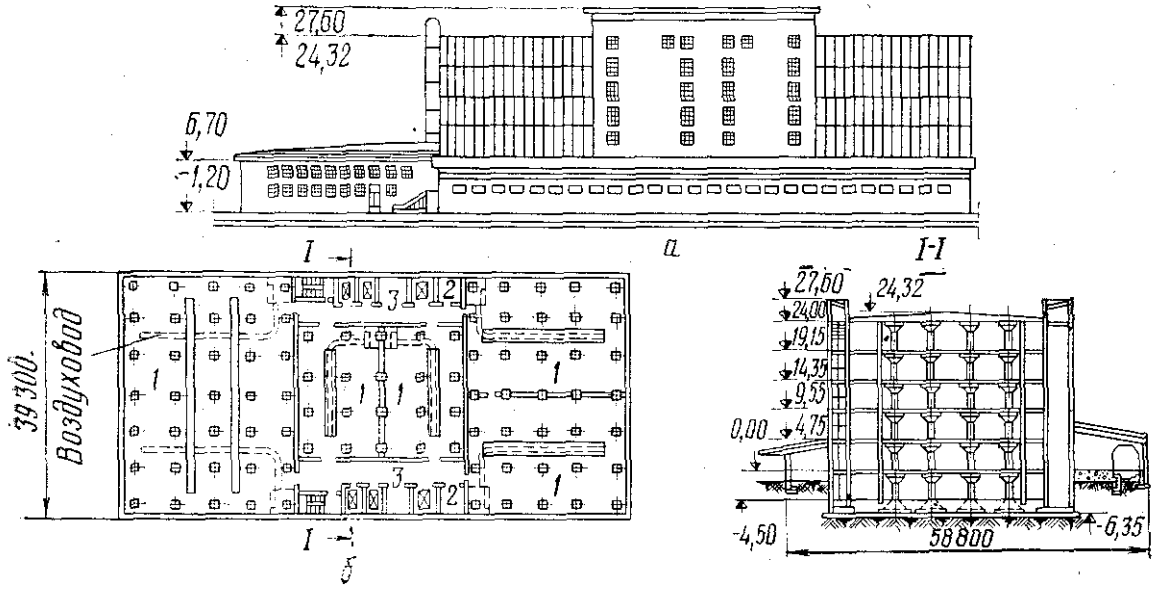

Рисунок 1.1 – Одноповерховий холодильник (3000 т):
1 – холодильна камера; 2 – морозилка; 3 – накопичувально-розвантажувальна; 4 – коридор; 5, 6 – автомобільні платформи; 7 – машинне відділення; 8 – апаратна; 9 – допоміжне і побутове приміщення

спучення. У деяких випадках одноповерхові холодильники будують з підвалами, де температура не опускається нижче 0° С. Покриття холодильників плоске з тепловою ізоляцією, а зовнішні обгороджування (стіни, підлога, стеля) мають безперервний шар теплової ізоляції.

Переваги одноповерхових холодильників включають великий фронт вантажних робіт і можливість ефективного використання механізації для навантаження та розвантаження. Вони найкраще підходять для зберігання затарених і пакетованих продуктів. Недоліки таких холодильників – велика площа земельної ділянки та велика поверхня зовнішніх обгороджувань (особливо покриття), що спричиняють підвищений тепловий потік. Використовуючи сучасні

механізми для укладання вантажів, можна збільшити висоту будівлі, зменшити займану площу та знизити площу обгороджувань.

Багатоповерхові холодильники (5-6 поверхів) можуть мати підвальні приміщення або бути без них. Будівля складається з залізобетонного каркасу з колон, міжповерхових перекриттів і покриття. Зовні каркас обшивається самонесучими стінами з шаром теплової ізоляції. Навантаження від продуктів та перекриттів передається через колони на фундамент і ґрунт. Висота поверхів зазвичай становить 4,8-6,0 м, а підвальний поверх має висоту не менше 3,6 м. Розрахункове корисне навантаження на перекриття – 2000-3000 кгс/м². Перше перекриття піднято на 1,4 м від рівня залізничної рейки.




а) фасад; б) план типових поверхів

Рисунок 1.2 – Багатоповерховий холодильник:

1 – камера зберігання на 3, 4, 5-му поверхах; 2 – підсобні приміщення; 3 – вестибулі

У багатоповерхових холодильниках будівництво міжповерхових перекриттів вимагає додаткових витрат на бетон, а також подовжує терміни будівництва. Загальна вартість будівельних робіт таких холодильників є вищою порівняно з одноповерховими. Тому одноповерхові холодильники, з місткістю до 10 000 умовних тонн, зазвичай мають перевагу. Для місткості понад 10 000 умовних тонн проектуються багатоповерхові холодильники.

## 1.3 Узагальнені завдання автоматизації холодильників

Під час удосконалення холодильної установки необхідно вирішити низку ключових завдань:

- - Забезпечення високих теплозахисних характеристик конструкцій шляхом використання сучасних теплоізоляційних матеріалів, герметизації стиків панелей, дверей, а також введень труб і кабелів, що дозволить мінімізувати теплові втрати. Важливим аспектом є також використання багатошарових ізоляційних конструкцій, які знижують теплопередачу між внутрішнім і зовнішнім середовищем. Окрім того, необхідно забезпечити оптимальну герметизацію всіх з'єднань, щоб уникнути потрапляння тепла та вологи, що значно знижує енергоефективність системи. Встановлення додаткових герметизуючих елементів, таких як ущільнювачі на дверях і вікнах, а також використання інноваційних матеріалів для ізоляції трубопроводів, допомагає досягти високих показників енергозбереження і покращує експлуатаційні характеристики холодильної установки.
- - Розробка та впровадження передових технологій холодильної обробки, зберігання та транспортування продуктів, що забезпечує точне регулювання температури та вологості. Це досягається через оптимальний вибір енергозберігаючих систем та інженерного обладнання, включаючи використання мікропроцесорної техніки для автоматизації процесів.
- - Досягнення мінімального питомого об'єму камер (3,5-4,5 м³/т) шляхом вдосконалення планувальних та конструктивних рішень, що дозволяє максимально ефективно використовувати площу та знизити енергоспоживання.
- - Використання принципу формування холодильних установок і комплексів на основі блокових автономних будівельно-технологічних секцій (модулів) комплектного постачання, що спрощує проектування, знижує витрати на будівництво і дозволяє швидше вводити об'єкти в експлуатацію.

# 2 ОГЛЯД РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПАРАМЕТРА ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ

## 2.1 Основна задача автоматизації холодильної установки

Системи автоматизації виконують низку завдань для управління роботою холодильної машини чи установки, розподілених на основні та допоміжні. Основне завдання автоматизації полягає в підтримці заданої температури в охолоджуваному об'єкті або температури холодоносія, що здійснюється за допомогою автоматичного регулювання температури.

До допоміжних завдань автоматизації належать подача рідкого холодильного агента до випарників, підтримка тиску конденсації та інші функції. Основне завдання автоматизації тісно пов'язане з статичною характеристикою холодильної установки.

## 2.2 Статична характеристика холодильника

Розглянемо спрощену установку (рис. 2.1, а), що складається з охолоджуваного об'єкта Об, випарника И, розташованого в ньому, компресора Км, конденсатора Кд та регулюючого вентиля РВ. Установка призначена для підтримки заданої температури $t_в$ в об'єкті, який піддається впливу зовнішнього чинника – навколишньої температури $t_н$. Як видно з схеми, робота установки залежить від багатьох термодинамічних і конструктивних параметрів: температур холодоагенту в різних точках, температури охолоджуваного середовища, витрат середовища, розмірів і характеристик теплопередаючих поверхонь.

Для спрощення припустимо, що добуток $k_и F_и = const$ для випарника, а температура конденсації $t_к = const$. Обидва ці припущення можна легко реалізувати на практиці: перше – за допомогою автоматичних регулюючих вентилів, які змінюють витрату холодоагенту $G_а$ і забезпечують стабільне

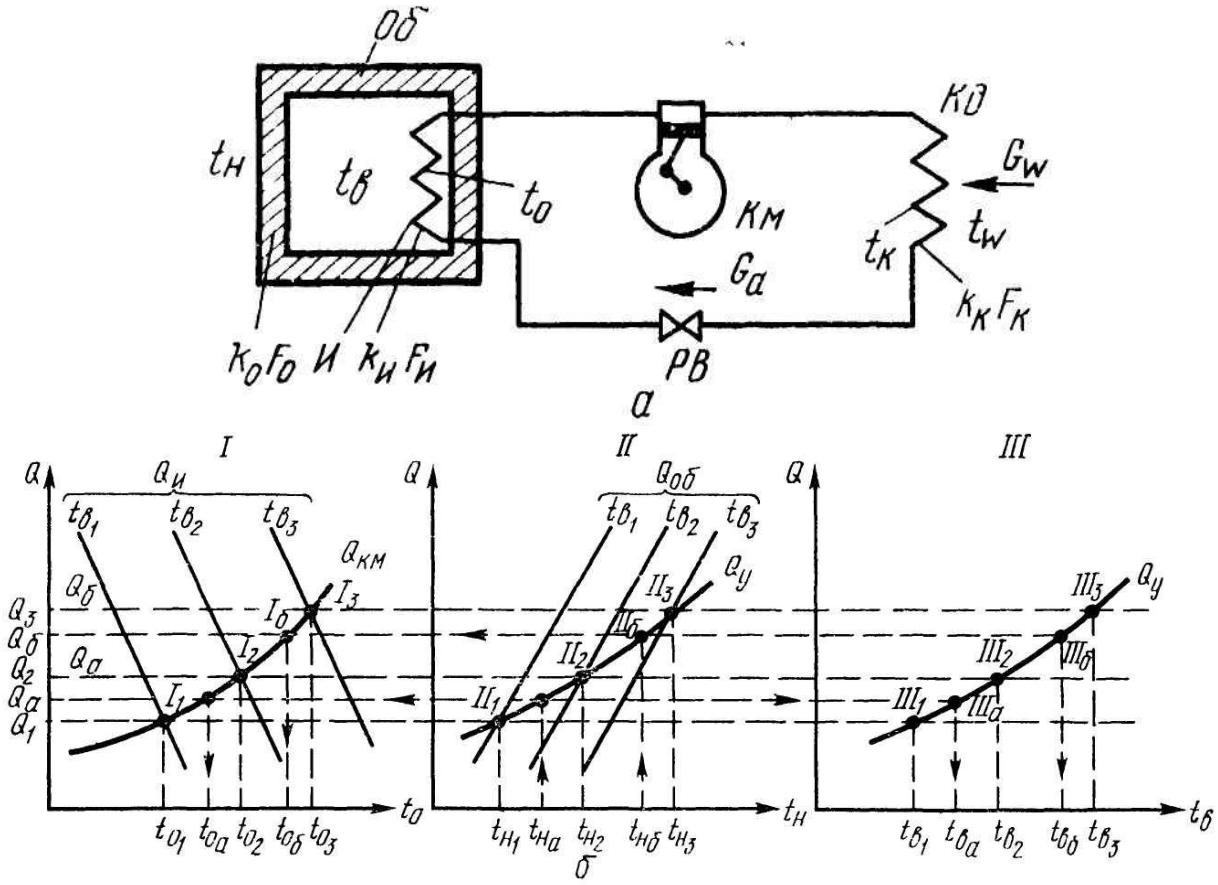



Рисунок 2.1 – Статичні характеристики холодильної установки:
а – схема; б – побудова суміщених графіків

заповнення випарника, друге – за допомогою автоматичного регулятора, що регулює витрату охолоджуваного середовища $G_w$ і підтримує температуру конденсації tк на сталому рівні.

Тепловий стан об'єкта в стаціонарному процесі можна описати за допомогою системи з трьох рівнянь:

$$Q_{об} = k_о F_о (t_н - t_в), \tag{2.1}$$

$$Q_и = k_и F_и (t_в - t_0) \tag{2.2}$$

$$Q_{км} = f(t_0). \tag{2.3}$$

У цих рівняннях $Q_{об}$ і $Q_и$ – кількість теплоти, що проходить в одиницю часу через обгороджування об'єкту та через теплопередаючу поверхню випарника; $Q_{км}$ – холодопродуктивність компресора; $k_о F_о$ – величина, що визначає теплопередачу через обгороджування об'єкту.

Рівняння (2.3) є характеристикою типового компресора, отримується експериментальним шляхом.

Слід зазначити, що в сталому стані $Q_{об} = Q_и = Q_{км}$.

Давайте визначимо, які значення матиме температура tв при різних значеннях tн та безперервно працюючому компресорі. Для цього побудуємо три взаємопов'язані графіки (рис. 2.1, б).

На графіку *I* ми поєднаємо характеристики компресора $Q_{км} = f(t_0)$ та випарника $Q_и = f(t_0)$ (остання побудована для трьох значень температури $t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{в3}$). Точки $I_1$, $I_2$ і $I_3$ відповідають робочим режимам для обраних значень tв. На графіку II побудуємо характеристику $Q_{об} = f(t_н)$ за рівнянням (2.1) для тих самих значень tв. Згідно з умовою усталеного стану $Q_{об} = Q_и = Q_{км}$, точки $II_1$, $II_2$ и $II_3$ також відповідатимуть цим трьом сталим режимам. З'єднавши ці точки плавною кривою, отримаємо статичну характеристику установки $Q_у = f(t_н)$, що дозволяє визначити фактичне теплове навантаження на об'єкт при різних значеннях зовнішньої температури $t_н$.

Графік *III* є допоміжним. Точки $III_1$, $III_2$ и $III_3$ знайдені для значень $t_{в1}$, $t_{в2}$ і $t_{в3}$ і навантажень $Q_1$, $Q_2$ і $Q_3$ і положення цих точок належать статичній характеристиці установки $Q_у = f(t_в)$.

З наведеного можна зробити такі висновки. Холодильна установка є системою з самовирівнюванням, що означає, що для кожного значення навантаження, в даному випадку зовнішньої температури, існує певне усталене значення, яке характеризується набором параметрів. У межах значних коливань навантаження установка здатна підтримувати свою працездатність. Якщо температурні коливання в об'єкті є допустимими згідно з вимогами, то така установка не потребує додаткового регулювання.

Однак у більшості випадків технологічні процеси, що використовують холодильні машини, мають суворі вимоги до стабільності температури охолоджуваного середовища. Описані статичні характеристики дозволяють оцінити, як зміни навантаження впливають на вихідну величину, зокрема температуру повітря в камері, і визначити, чи потрібно регулювання (ручне або автоматичне).

## 2.3 Методи рішення основної задачі автоматизації холодильної установки

Завдання підтримки температури виникає, коли на об'єкт впливають зовнішні фактори, що змінюються з часом. Температура в об'єкті $t_в$ має тенденцію змінюватися разом із зміною зовнішньої температури $t_н$. Отже, основне завдання полягає в компенсації цих змін та досягненні стабільності температури $t_в$.

Приймаючи ті ж спрощуючі умови, що й у попередньому тексті, додатково припустимо, що $t_в = t_{вз} = const$, тобто основне завдання вирішене (де $t_{вз}$ — задане значення). Для опису поведінки установки використовуємо ту саму систему рівнянь (2.1 - 2.3). Очевидно, графіки цих функцій спростяться і матимуть вигляд, показаний на рисунку 2.2. Елементи установки вибираємо так, щоб при максимальному навантаженні $Q_2$ робоча точка $I_2$ знаходилася на перетині характеристик $Q_{км}$ і $Q_и$. Таким чином, при менших навантаженнях для підтримки умови $t_в = t_{вз}$ необхідно вжити спеціальних заходів для забезпечення рівності $Q_{об} = Q_и = Q_{км}$. Це можна досягти двома способами: штучним збільшенням теплового навантаження на об'єкт або зменшенням холодопродуктивності холодильної машини.

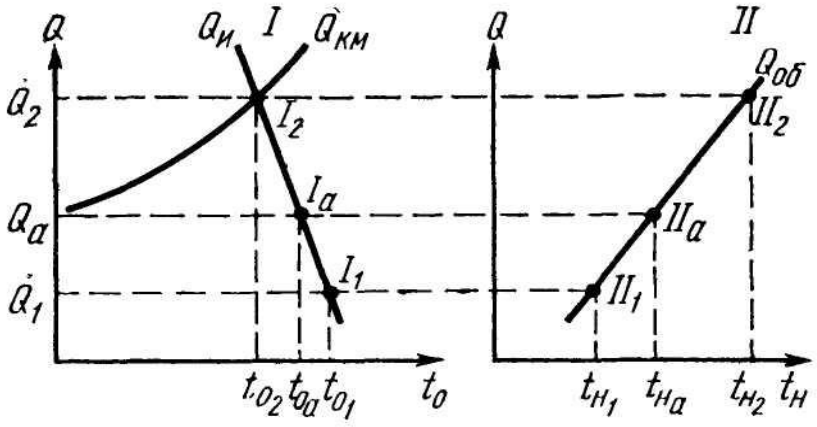



Рисунок 2.2 – Спрощені статичні характеристики

Суть першого способу полягає в тому, що в об'єкт вводиться керований нагрівач. Якщо зовнішня температура tва нижча за граничну $t_{н2}$, то кількість тепла, що надходить ззовні ($Q_{об} = Q_a < Q_2$), є недостатньою. Недостаючу кількість тепла $Q_T = Q_2 - Q_a$ має забезпечити нагрівач. Оскільки цей метод призводить до значних енергетичних втрат, його застосування обмежене, тому в даній роботі він не розглядається.

Суть другого способу полягає в тому, що робоча точка характеристики холодильної машини змінюється відповідно до навантаження на об'єкт, причому це переміщення відбувається по лінії $Q_u$, яка залишається незмінною за умови $k_u F_u = const$. Таким чином, при зовнішній температурі tна режим роботи холодильної машини визначається робочою точкою $I_a$. Завдання буде вирішене, якщо характеристика компресора $Q_{км}$ зміниться так, що точка її перетину з $Q_u$ співпаде з $I_a$. Отже, в цьому випадку основне завдання вирішується за допомогою зміни характеристики компресора, який є регульованим елементом установки. Цей спосіб є більш енергетично ефективним, оскільки в загальному випадку для виробництва меншої кількості холоду компресор витрачає менше енергії.

Ці міркування також стосуються некомпресійних холодильних установок, таких як абсорбційні, де регульованим є генератор — основний енергоспоживаючий елемент. Існують дві основні системи зміни холодопродуктивності: плавна та позиційна (ступінчаста). Плавна система дозволяє змінювати холодопродуктивність на будь-якому рівні між максимумом і мінімумом, тоді як позиційна система змінює її стрибками, з можливістю дво-, три- або багатопозиційних налаштувань.

Також існує позиційне регулювання, яке за своїми властивостями наближається до плавного. Це відбувається, коли коливання мають малий розмах і високу частоту. Плавне регулювання холодопродуктивності в компресійних установках можна реалізувати за допомогою як зовнішніх, так і вбудованих пристроїв.

До зовнішніх регулюючих пристроїв належать, зокрема, клапани, що встановлюються на всмоктуючій лінії компресора або на лінії перепускання між нагнітальним і всмоктуючим боками. Клапани на всмоктуючій лінії дроселюють пару перед компресором, зменшуючи його масову продуктивність, а перепускні або байпасні клапани повертають частину стислої пари на всмоктування, тим самим знижуючи кількість пари, що всмоктується з випарника. До зовнішніх пристроїв також відносяться плавно регульовані приводи компресорів, такі як регульовані електродвигуни (постійного або змінного струму), парові або газові турбіни тощо.

Вбудовані пристрої змінюють внутрішні параметри роботи компресора. У поршневих компресорах можуть використовуватися золотники, які з'єднують порожнину циліндра з всмоктуючою камерою та плавно змінюють хід стискування, а також пристрої для регулювання мертвого об'єму циліндрів. У гвинтових компресорах регулюючі золотники змінюють хід стискування гвинтів. Відцентрові компресори оснащуються регульованим вхідним направляючим апаратом.

У тепловикористовуючих установках для плавного регулювання холодопродуктивності використовуються лише регулюючі клапани, які змінюють витрату гріючих або охолоджуючих середовищ. Наприклад, в абсорбційних установках такі клапани встановлюються на лінії подачі пари або іншого гріючого середовища до генератора.

Позиційне регулювання холодопродуктивності зазвичай використовується в установках з поршневими компресорами. Найбільш розповсюдженим методом є "пуск-зупинка" компресора. Якщо в установці встановлений один компресор, застосовується двопозиційне регулювання, а якщо кілька – багатопозиційне.

Значне поширення має метод зміни холодопродуктивності шляхом відключення частини циліндрів у багатоциліндрових компресорах. В залежності від кількості циліндрів цей метод дозволяє створювати системи з трьома, чотирма та більше ступенями холодопродуктивності. Якщо перемикання циліндрів відбувається з високою частотою, така позиційна система наближається за своїми властивостями до плавного регулювання.

Один з варіантів — це використання багатошвидкісних електродвигунів разом з відповідними системами управління.

Реалізація основного завдання автоматизації полягає у виборі способу регулювання холодопродуктивності та створенні відповідних систем управління. При цьому враховуються різні техніко-економічні фактори, що характеризують холодильні установки, зокрема первісна вартість, довговічність, простота, надійність в експлуатації, витрати на обслуговування та ремонт, енергетична ефективність тощо.

## 2.4 Способи вдосконалення систем автоматизації холодильників

Подальше вдосконалення автоматизації промислових холодильних установок спрямоване на підвищення економічної ефективності через зниження первісних витрат на автоматизацію та скорочення експлуатаційних витрат. Це може бути досягнуто за рахунок здешевлення компонентів, спрощення систем і використання індустріальних методів монтажу та наладки.

Основне джерело зниження вартості приладів і засобів автоматизації полягає в удосконаленні конструкції, технології виробництва та збільшенні кількості використовуваних елементів. Важливим фактором є уніфікація вузлів і деталей різних приладів, тому при проектуванні автоматизації варто зменшувати кількість типів використовуваних приладів.

Ключовим чинником зниження витрат є спрощення автоматичних систем. При проектуванні потрібно уникати зайвих приладів, дублювання та непотрібних зв'язків чи блокувань в електричних схемах. Таким вимогам відповідає система, що розглядається в цій роботі (слайд 03.00).

Важливим є впровадження індустріалізації монтажу та наладки. Якщо раніше всі роботи виконували на місці, то тепер більшість систем, зокрема електричні схеми управління, монтують на спеціалізованих підприємствах. У майбутньому обладнання, зокрема компресори, агрегати та інші пристрої, будуть поставлятися вже укомплектованими приладами, засобами автоматизації та електричними схемами управління. Монтаж на місці обмежиться лише з'єднанням окремих вузлів, що спростить наладку систем.

Вказані заходи дозволяють суттєвоо скоротити первинні витрати.

Економія на експлуатаційних витратах досягається через кілька підходів. Один із них – підвищення надійності окремих елементів та автоматичних систем загалом. Високонадійні системи зменшують витрати на обслуговування та ремонт приладів і засобів автоматизації, а також скорочують амортизаційні відрахування завдяки збільшенню терміну служби.

Економія експлуатаційних витрат досягається також при роботі установки в оптимальному режимі, що знижує енергоспоживання для виробництва холоду, покращує якість продуктів і зменшує їх втрати під час зберігання. Хоча ці показники важливі, вони складні для об'єктивної оцінки. Зазвичай вважається, що якість продуктів зберігається при точному дотриманні технологічних режимів, а втрати знижуються завдяки зменшенню температурних коливань між повітрям і охолоджуваними поверхнями.

Розглянемо питання економії електроенергії. В управлінні багатооб'єктною установкою основне завдання — це узгодження продуктивності холодильної машини з фактичним тепловим навантаженням, що досягається автоматичним підтриманням заданої температури кипіння холодильного агента або розсолу. Відхилення температур використовують як непрямі показники теплового навантаження. Температуру кипіння задають на основі максимальних теплових навантажень, що трапляються рідко. При правильному виборі охолоджувальних поверхонь розрахункова різниця температур може бути надмірною. Це призводить до перевищення продуктивності охолоджувальних пристроїв, що вимагає періодичного відключення батарей, зупиняючи подачу рідини або відсмоктування пари, що викликає додаткові енергетичні втрати через неповне використання поверхонь.

Продуктивність охолоджувальних пристроїв для камери при їх постійній роботі:

$$Q_{oy.max} = kF(t_B - t_0) \qquad (2.4)$$

де $kF$ – добуток коефіцієнта теплопередачі на поверхню;

$t_B$ і $t_0$ – відповідно температури повітря і кипіння.

При циклічній роботі продуктивність зменшується тобто:

$$Q_{oy} = bkF(t_B - t_0) \qquad (2.5)$$

де $b < 1$ – коефіцієнт робочого часу. Якщо у рівнянні (2.4) температура $t_0$ змінюється в залежності від обставин, то у рівнянні (2.5) припускається, що $t_0$ = const і $t_B$ = const (з урахуванням амплітуди коливань при позиційному регулюванні). Постійність $t_0$ досягається через автоматичний регулятор, який контролює роботу компресорів або регулює температуру кипіння шляхом

дроселювання. Постійність $t_B$ забезпечується регулятором температури в камері, який змінює значення $t_B$ відповідно до навантаження. Рівняння (2.5) показує, що коефіцієнт $t_B$ зменшує ефективну поверхню, що веде до зниження енергетичних показників.

Аналіз показує, що через зменшення поверхонь енергетичні втрати можуть становити від 10 до 25 %. На рис. 2.3 зображені додаткові енергетичні втрати $\varepsilon$ при $t_B$ – 0° і температурі конденсації $t_K$ = 30° для системи, що обслуговується компресором АУ-200. Втрати були розраховані для двопозиційного регулювання в об'єкті першого порядку. Таким чином, можна зробити два висновки.

1. З формули (2.5) видно, що найкраща енергетична ефективність досягається при $b$ = 1, що можливо лише за умови безперервної роботи охолоджувального пристрою, продуктивність якого визначається продуктивністю компресора. Для багатооб'єктних установок це означає необхідність автономних холодильних машин для кожного об'єкта. Децентралізоване охолодження зручно для повної автоматизації і активно використовується за кордоном, зокрема в холодильних системах. Однією з переваг такої системи є висока енергетична ефективність.

2. Оптимальне управління центральною установкою полягає в підтримці максимально високого значення $t_0$, яке компенсує теплопритоки при заданому тепловому навантаженні. Для цього запропоновано кілька способів управління багатооб'єктними установками. Наприклад, один із методів передбачає підтримку температури кипіння, достатньої для найбільш навантаженого об'єкта. Однак визначення цього об'єкта є складним і потребує застосування спеціальних обчислювальних пристроїв. У Франції, на холодильнику у Витрі-на-Сені, для управління компресорами використовується електронний моделюючий пристрій, який здійснює управління за фактичними температурами в камерах.

Оптимальне управління також можна реалізувати за допомогою "зворотної" ступінчастої системи, яку запропонував автор [9].

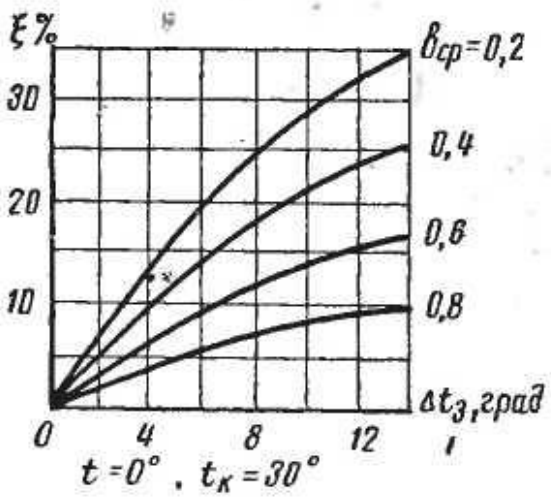



Рисунок 2.3 – Додаткові втрати енергії при відключенні батарей

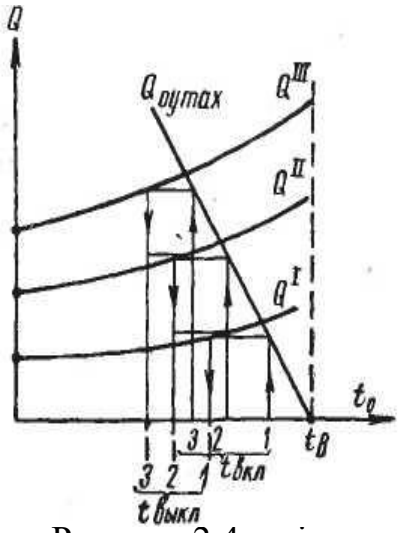



Рисунок 2.4 – діаграма налаштувань зворотної ступінчастої системи

Ідея такої системи ілюструється діаграмою, на рис. 2.4. У координатах ($Q$, $t_0$) проведена пряма $Q_{oy.max}$ побудована за виразом:

$$Q_{oy.max} = \sum_{i=1}^{n} (kF\Delta t). \qquad (2.6)$$

Якщо вважати, що об'єкти установки працюють у подібних теплових режимах, то лінія $Q_{oy.max}$ відображає потрібну температуру кипіння при різних навантаженнях.

У випадку, коли випарна система обслуговується трьома компресорами (чи одним компресором з трьома ступенями продуктивності), одному працюючому компресору відповідає характеристика $Q^{I}$, двом компресорам, що одночасно працюють – $Q^{II}$ і трьом – $Q^{III}$. Якщо припустити, що кожним ступенем управляє власне реле, що сприймає температуру $t_0$.

У випадку, коли випарна система обслуговується трьома компресорами (або одним компресором з трьома ступенями продуктивності), характеристика $Q^{I}$ відповідає одному працюючому компресору, $Q^{II}$ — двом працюючим компресорам одночасно, а $Q^{III}$ — трьом компресорам. При цьому можна припустити, що кожним ступенем управляє окреме реле, яке регулює температуру $t_0$.

Типовою особливістю "зворотної" системи являється те, що

$$\left.\begin{aligned} t_{вкл.1} > t_{вкл.2} > t_{вкл.3} \\ t_{викл.1} > t_{викл.2} > t_{викл.3} \end{aligned}\right\} \qquad (2.7)$$

З виразу (2.7) випливає, що в такій системі при зростанні навантаження середня температура кипіння знижується, на відміну від статичної системи, де вона підвищується. Якщо реле налаштувати так, щоб робоча точка завжди знаходилася зліва від лінії $Q_{oy.max}$, система буде оптимальною. Реалізація такої системи не складна, оскільки зміна теплового навантаження в двопозиційних системах відбувається через зміну тривалості робочих і неробочих циклів, що дозволяє легко управляти компресорами.

Один з варіантів схеми, показаний на рис. 2.5, ґрунтується на контролі тривалості обох частин циклу. При малому навантаженні працює лише перший компресор, а два інших вимкнені, незалежно від їх температурних реле. При збільшенні навантаження перший компресор переходить на безперервну роботу, а другий починає працювати циклічно за сигналом свого реле. При великому навантаженні працюють перший і другий компресори безперервно, а третій — циклічно. Зменшення навантаження викликає зворотний процес.

Розглянемо роботу електричної схеми (рис. 2.5), яка складається з контактів трьох температурних реле – *1РТ*, *2РТ* і *3РТ*, що керують відповідно першим, другим і третім компресорами; чотирьох реле витримки часу – *1РВ*, *2РВ*, *3РВ* і *4РВ*; а також проміжних реле – *1РП* і *2РП*. Схема управляє електроприводами компресорів через пускову апаратуру, позначену як *1П*, *2П* і *3П*.

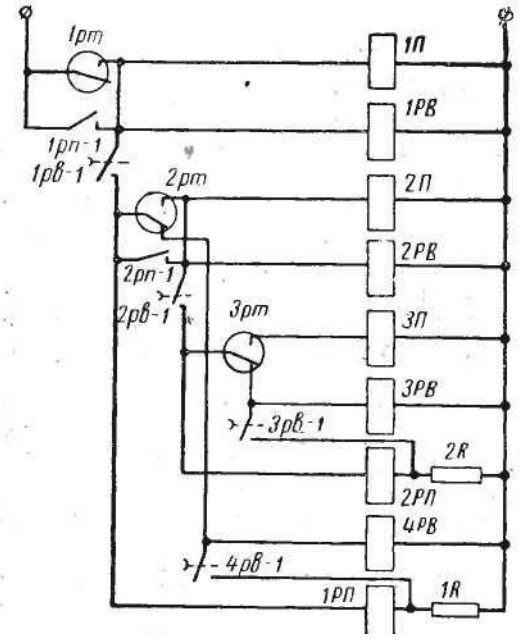



Рисунок 2.5 – Електрична схема зворотної ступінчатої системи.

При малому навантаженні, коли температура підвищується, замкнеться контакт *1рт*, що включить перший компресор (*1П*). Одночасно обмотка реле *1РВ* отримує живлення, і реле починає відлік тривалості $\tau_{р1}$ робочої частини циклу. Якщо навантаження мале, тривалість $\tau_{р1}$ буде меншою за налаштування *1РВ*, і після

зниження температури кипіння до$t_{викл}$ контакт *1рт* розімкнеться. Це призводить до зупинки першого компресора і повернення реле *1РВ* в початкове положення. Такий цикл буде повторюватися в подальшому.

Із зростанням навантаження тривалість $\tau_{р1}$ збільшується і, нарешті, при деякому навантаженні стане рівною або більшою, ніж уставка *1РВ*. Останнє спрацює і замкне свій контакт *1рв-1*. Це, у свою чергу, викличе спрацьовування реле *1РП*, яке контактом *1рп-1* надалі утримуватиметься і, крім того, живитиме безперервно пусковий ланцюг *1П* і реле *1РВ*. Контакт *1рв-1* підключає в роботу реле *2РТ*, яке управляє приводом *2П* другого компресора. Таким чином, підвищення навантаження викликало автоматичне переведення першого компресора на безперервний режим і включення другого компресора в циклічну роботу.

Зі збільшенням навантаження тривалість $\tau_{р1}$ зростає і, при досягненні певного рівня навантаження, стає рівною або більшою за налаштування *1РВ*. Це викликає спрацьовування реле *1РВ*, яке замкне контакт 1РВ-1. У результаті спрацьовує реле *1РП*, яке контактом *1рп-1* утримується, живлячи безперервно пусковий ланцюг *1П* і реле *1РВ*. Контакт *1рв-1* активує реле *2РТ*, що керує приводом *2П* другого компресора. Таким чином, з підвищенням навантаження перший компресор переходить на безперервний режим роботи, а другий – на циклічний.

Режим роботи другого компресора контролюється двома реле часу: *2РВ,* яке вимірює тривалість $\tau_{р2}$ робочої частини циклів, і 4РВ, що контролює тривалість $\tau_{н2}$ неробочої частини. При подальшому зростанні навантаження спрацьовує *2РВ*, що через реле *2РП* переводить другий компресор на безперервний режим, а третій — на циклічний. Якщо ж навантаження зменшується, то в одному з циклів спрацьовує *4РВ*, яке своїм контактом *4РВ-1* накладає шунт на обмотку *1РП*, що дозволяє повернути схему в початкове положення, при якому перший компресор працює циклічно, а другий і третій — вимкнені. При подальшому зростанні навантаження перший і другий компресори працюють безперервно, а третій — циклічно.

Розглянута схема може забезпечити оптимальну роботу системи, якщо об'єкти мають схожі характеристики та теплові режими.

Перспективним є впровадження обліково-інформаційних машин на холодильниках для управління роботою камер відповідно до фактичних теплових припливів. Це дозволяє, наприклад, при відсутності вантажів управляти компресорами за принципом зворотної ступінчастої системи. При надходженні вантажу в камеру система визначає кількість тепла, що поступила з продуктом. Якщо цей обсяг перевищує допустимий, машина дає сигнал для зниження температури кипіння, щоб за визначений час привести вантаж до нормальної температури.

Для підвищення економічності автоматичних систем необхідно регулярно очищати охолоджуючі пристрої та їх теплопередаючі поверхні від інею, масла та бруду. Відмова від батарейного охолодження та перехід до повітроохолоджувачів і кондиціонерів дозволить автоматизувати не лише підтримку температури та вологості, а й процеси відтавання та очищення охолоджуючих пристроїв.

Децентралізація холодильного устаткування може спростити експлуатацію камерних кондиціонерів. Індивідуальні автоматизовані машини можна легко перевести в режим теплового насоса для обігріву камери та відтавання інею.

Підвищенню продуктивності праці обслуговуючого персоналу значною мірою сприяє раціональне розміщення приладів, засобів автоматики та сигналізації. Основним способом компонування є місцевий, тоді як центральний пристрій обмежується компактним сигнальним щитком у компресорному цеху. Відмова від великих і дорогих центральних щитів, розташованих у спеціальних приміщеннях, не лише знижує первинні витрати, а й покращує зручність для обслуговуючого персоналу.

# 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ТА КОНСТРУКЦІЙ

## 3.1 Вибір підходу підтримування температури в об’єкті охолодження

Схема автоматичного регулювання температури визначається призначенням та технологічними характеристиками холодильної установки. Розглянемо кілька найбільш поширених схем, які використовуються в автоматизації компресійних холодильних установок.

У однооб'єктній установці (рис. 3.1) температура робочого середовища (повітря або рідини) регулюється шляхом випаровування холодоагенту в охолоджуючому пристрої — випарнику *И*. Така схема часто використовується в установках, де об'єктами *Об* є камери для зберігання продуктів, випробувальні камери та інші приміщення, де потрібно підтримувати стабільну температуру повітря.

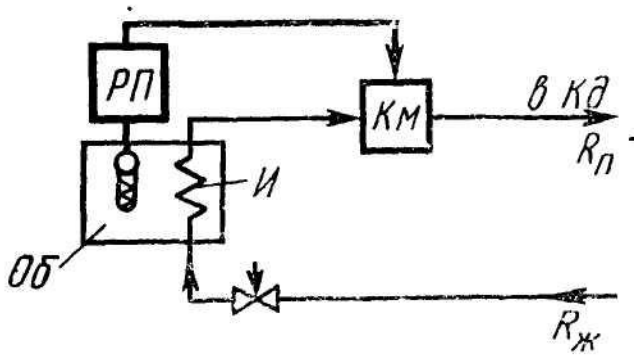



Рисунок 3.1 – Схема підтримування температури в однооб’єктній установці

При виборі системи регулювання необхідно враховувати теплову місткість об'єкта, допустимі коливання температури від заданого значення, а також тип компресора. Якщо можна застосувати метод "пуск-зупинка", то це буде оптимальним рішенням. У такому випадку регулюючий прилад з двопозиційною характеристикою, чутливий елемент якого розташований в об'єкті, через відповідні пристрої керує включенням і вимиканням електродвигуна компресора $К_м$.

Якщо метод "пуск-зупинка" неможливий, використовують багатопозиційне або плавне регулювання. У таких випадках регулюючий прилад повинен мати багатопозиційну або плавну характеристику та керувати пристроями регулювання компресора.

На схемі (рис. 3.2) зображена установка, де до компресора (або групи компресорів) підключено кілька об'єктів, в кожному з яких підтримується задана температура. Такі випарні системи широко використовуються на холодильниках з великою кількістю камер зберігання. У кожному об'єкті температура повітря регулюється за допомогою окремого приладу (*РП*$_1$, *РП*$_2$, *РП*$_3$), зазвичай двопозиційного типу. Ці прилади керують регулюючими органами, які контролюють подачу холодоагенту до відповідних випарників.

Для регулювання холодопродуктивності компресора використовуються додаткові пристрої. Найпростіше управління здійснюється за допомогою приладів *РП*$_1$, *РП*$_2$, *РП*$_3$. Коли один із приладів подає сигнал на відкриття регулюючого органу, компресор включається, і зупиняється, коли температура в останній камері знижується, а подача холодоагенту закривається. Однак такий спосіб має недолік — один компресор обслуговує всі камери одночасно, що може призвести до коливань температури кипіння, погіршуючи енергоефективність і умови зберігання продуктів.

Доцільніше використовувати компресор або групу компресорів із змінною

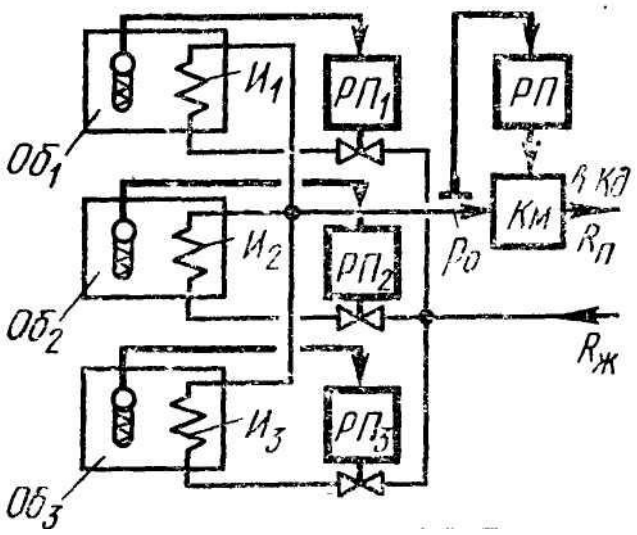



Рисунок 3.2 – Схема підтримування температури в установці з кількома об'єктами

холодопродуктивністю, для чого необхідна додаткова система регулювання, наприклад, по температурі або тиску кипіння. Завдання цієї системи з приладом *РП* — підтримка необхідної температури кипіння (чи тиску $p_o$, рис. 3.2), тоді як основні системи регулюють температуру в камерах, відкриваючи або закриваючи подачу холодоагенту у випарники.

Додаткова система може бути дво-, багатопозиційною або плавною. Двопозиційне регулювання підходить, коли в системі достатньо холодоагенту для уникнення частих пусків і зупинок компресора. В інших випадках використовують більш досконалі системи — багатопозиційні або плавні.

На схемі (рис. 3.3) показана установка, де контролюється температура холодоносія, що виходить з випарника. Використання методу "пуск-зупинка" не дає бажаних результатів, тому необхідні інші способи, які не залучають включення та вимикання компресора.

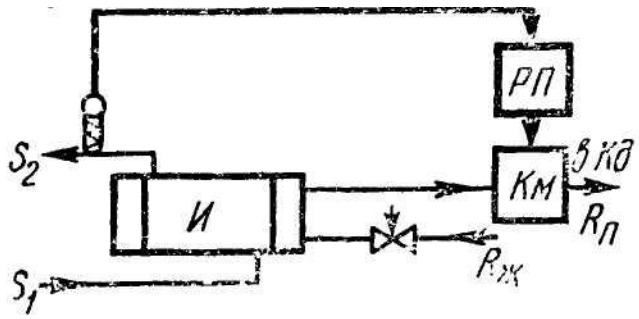



Рисунок 3.3 – Схема підтримування температури холодоносія, який виходить з випарника

Якщо замість регулювання температури холодоносія, що виходить з випарника, здійснювати контроль температури на його вході (рис. 3.4), і при цьому на стороні споживання є достатня місткість холодоносія, то завдання підтримки температури спрощується, і можна застосувати двопозиційне регулювання.

У холодильних установках з проміжним холодоносієм (рис. 3.5) регулювання температури здійснюється так само, як у багатооб'єктних установках безпосереднього випару. Для кожного об'єкта (*Об₁*, *Об₂*, *Об₃*) створюються окремі

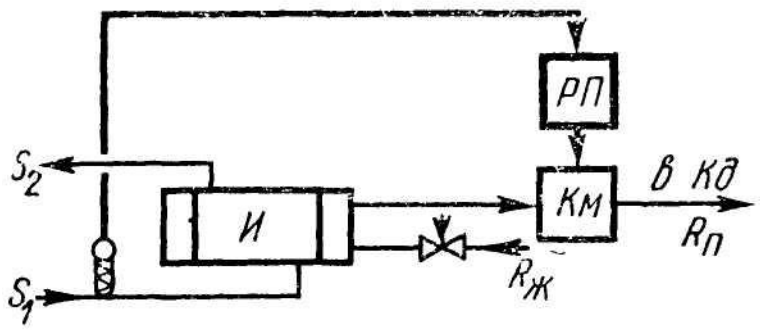



Рисунок 3.4 – Схема підтримування температури холодоносія, що входить у випарник

системи регулювання, де за допомогою двопозиційних приладів $РП_1$, $РП_2$, $РП_3$ підтримується температура шляхом відкриття та закриття подачі холодоносія в охолоджувальні пристрої. Додаткова система з регулюючим приладом підтримує температуру холодоносія. Якщо в системі є бак Б з достатньою місткістю, можна застосовувати регулювання за допомогою "пуск-зупинка" компресорів. Відсутність бака або його мала місткість вимагають використання інших методів регулювання.

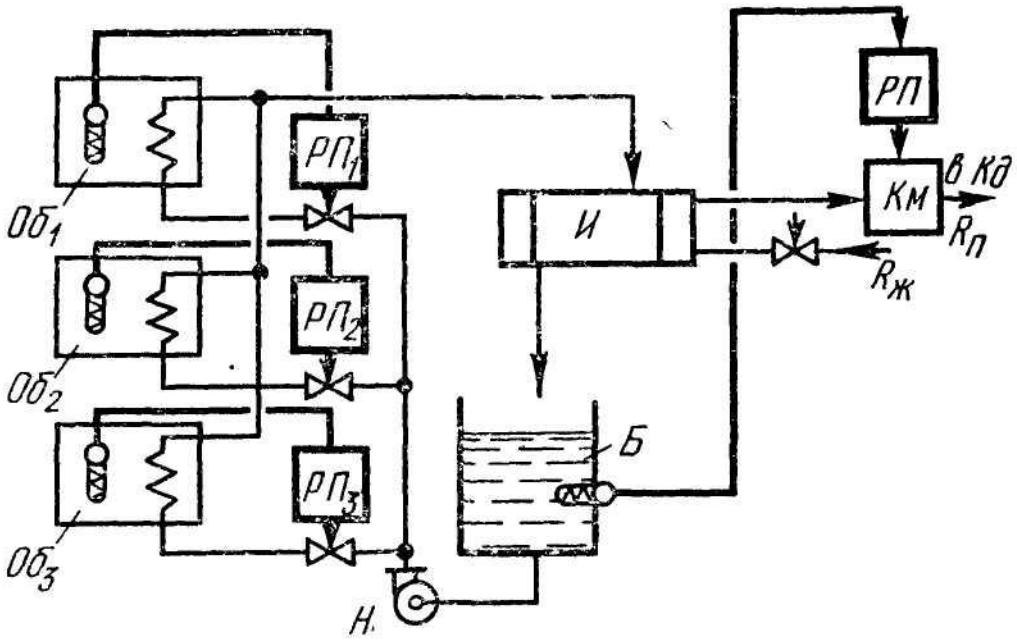



Рисунок 3.5 – Схема підтримування температури в установці з декількома об'єктами при охолодженні холодоносієм

## 3.2 Проектування системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери

Проектування є ключовим етапом автоматизації холодильних установок. Під час проектування визначають оптимальні схеми, вибирають прилади та засоби автоматизації, а також вирішують питання компонування автоматичних пристроїв. Проект автоматизації холодильних установок для нових підприємств є частиною загального проекту установки. При розробці проекту враховуються вимоги до системи автоматизації, техніко-економічне обґрунтування, а також характеристики установки та особливі вимоги.

Характеристика установки включає інформацію про систему охолодження, типи споживачів холоду, технологічні вимоги до їх роботи та основні режими, список основного обладнання, технічні характеристики компресорів, насосів та інших апаратів з електроприводами, а також необхідні плани приміщень і принципову схему установки. Основні вимоги визначають об'єкти автоматичного управління і захисту, регульовані параметри, точність їх підтримки, рекомендовані методи управління обладнанням, кількість обслуговуючого персоналу, ступінь автоматизації, а також науково-дослідні роботи, на основі яких здійснюється проектування.

Техніко-економічне обґрунтування базується на досвіді автоматизації інших підприємств або орієнтовних розрахунках. В ньому визначають термін окупності капітальних витрат і очікувану річну економію. Особливі вимоги враховують умови пожежо- і вибухонебезпечності, кліматичні умови, вібростійкість приладів тощо. Для автоматизації діючої установки завдання складається після вивчення об'єкта з урахуванням умов експлуатації. Проектування проходить у дві стадії: розробка проектного завдання та створення робочих креслень.

Проектне завдання включає принципові схеми автоматизації устаткування: холодильних камер, випарних систем, компресорів та агрегатів, з вказівкою приладів, датчиків, виконавчих механізмів і регулюючих органів. До схем

додаються специфікації приладів. Також у завдання включають основні електричні схеми управління, захисту і регулювання рівнів у посудинах. Передбачаються креслення щитів, пультів, мнемосхем і нестандартного устаткування, що виготовляється на заводі або на місці монтажу.

На планах холодного складу та машинного відділення вказуються місця для приладів автоматизації, місцевих і головних щитів, а також орієнтовні траси для кабелів і трубопроводів. До проектного завдання додаються специфікація на устаткування, кошторис і розрахунок економічної ефективності. У пояснювальній записці наводяться розрахунки і обґрунтування. Робочі креслення розробляються після затвердження проекту та включають всі зміни, виявлені під час розгляду проектного завдання. Вони служать основою для монтажу та налагодження.

На стадії робочого проектування розробляються монтажні схеми, зовнішні з'єднання вузлів, креслення первинних приладів, реле-датчиків захисту та автоматичних регулюючих органів. Підготовлюються деталі прокладання кабелів, установки розподільних і клемних коробок, а також розміщення щитів, пультів та вторинних приладів у щитових приміщеннях.

## 3.3 Ступінь і об’єм автоматизації холодильної установки

Ступінь і об'єм автоматизації визначаються в завданні на проектування. Холодильні установки можуть бути частково або комплексно автоматизованими, залежно від вимог і складу устаткування. При частковій автоматизації автоматика контролює лише деякі операції, інші виконує персонал.

При комплексній автоматизації персонал лише контролює роботу автоматичних пристроїв та виконує допоміжні операції (поповнення масла в компресорах, очищення батарей від інею тощо). Також він займається профілактичним обслуговуванням та ремонтом основного устаткування і автоматики. Ця система є основною в даній магістерській роботі.

Для частково автоматизованих установок передбачається мінімальний об'єм автоматизації, що включає:

- автоматичне поповнення охолоджуючих пристроїв, випарних систем, розсільних випарників та проміжних посудин рідким холодильним агентом для забезпечення стабільної роботи системи;

- захист компресорів, апаратів та інших елементів від небезпечних режимів роботи та аварій, таких як перевищення температури чи тиску, що дозволяє уникнути пошкоджень обладнання;

- вимірювання та моніторинг основних технологічних параметрів, таких як температура, тиск, рівень та витрата холодоагенту;

- підтримка та коригування заданих температур у холодильних камерах, виробничих охолоджувачах, а також автоматичне регулювання відносної вологості повітря в камерах, якщо це необхідно для забезпечення оптимальних умов зберігання продуктів;

- випуск повітря з системи для усунення надлишкового тиску чи газів, що можуть вплинути на ефективність роботи установки;

- наявність робочої та аварійної сигналізації для оперативного реагування на зміни в режимах роботи або виникнення несправностей.

Передбачається інтеграція системи управління для оптимізації роботи установки, зменшення необхідності постійного втручання персоналу та забезпечення безпечної експлуатації. Частково автоматизовані установки вимагають цілодобового чергування обслуговуючого персоналу.

У комплексно автоматизованих установках, окрім вищезгаданого обсягу автоматизації, передбачають управління пуском і зупинкою компресорів, регулювання їх продуктивності (виключення циліндрів, зміна швидкості двигунів або дроселювання на всмоктуванні), відтавання повітроохолоджувачів і управління насосами. Автоматизація розрахована з урахуванням режиму роботи персоналу (цілодобово або частково). У деяких випадках комплексно автоматизовані установки обслуговують тільки в денний час, що є доцільним для резервних і розподільних холодильників у періоди зниження навантаження.

## 3.4 Розробка схеми електричної принципової, вибір засобів автоматизації

При розробці проекту на стадії проектного завдання створюють принципові схеми автоматизації. Принципова схема автоматизації відображає установку з зазначенням місць підключення приладів і засобів автоматизації. На схемі показано основне обладнання, що підлягає автоматизації, та трубопроводи. Схема зазвичай поділяється на дві частини: одна відображає автоматизацію компресорного та апаратного відділень, інша – холодильних камер та інших споживачів холоду.

На схемі компресорного та апаратного відділень позначають прилади автоматичного регулювання, управління та захисту для компресорів, агрегатів, проміжних посудин, конденсаторів, випарників, ресіверів і насосів. Для споживачів холоду показують автоматику холодильних і морозильних камер, батарей, повітроохолоджувачів, а також інших охолоджувачів (наприклад, фризерів і пастеризаторів). Якщо установка має кілька однакових пристроїв, зокрема компресорів чи камер, на схемі зображують автоматизацію одного з них, зазначаючи, що інші об'єкти автоматизовані аналогічно.

Технологічне устаткування зображують спрощеними умовними позначеннями, які відображають конструкцію, принцип дії та процеси, що відбуваються в обладнанні. Трубопроводи мають чітко відмінні позначення: рідинну аміачну лінію показують тонкою суцільною лінією, парову — товстою суцільною, воду — штриховою. Для трубопроводів доцільно використовувати стрілки, що вказують напрямок руху рідини або пари.

При нанесенні приладів і засобів автоматизації показують чутливий елемент (датчик), автоматичний прилад, виконавчий механізм і регулюючий орган, а також зв'язки між ними. Ці зв'язки зображують в однолінійному вигляді, незалежно від виду зв'язку: електричний, пневматичний, гідравлічний чи механічний.

У складних схемах прилади не наносять безпосередньо на основну схему, щоб не ускладнювати її використання. Замість цього зображують тільки чутливі елементи

та виконавчі механізми з регулюючими органами. Регулюючі прилади та сигналізатори виносять до нижньої частини креслення у вигляді таблиці, де зазначають їх найменування, тип, функціонування та місце установки. Зв'язки між елементами показують лініями, які можуть бути розірвані та пронумеровані. Умовні позначення виконуються згідно з вимогами ГОСТ.

Принципову технологічну схему доповнюють специфікацією на прилади та засоби автоматизації, де зазначають точні найменування, марки або шифри приладів, а також їх кількість.

Швидкий розвиток мікропроцесорних технологій призвів до їх широкого використання в різних галузях. Завдяки функціональній гнучкості, високій надійності, компактним розмірам та низькій вартості, мікропроцесорні засоби стали незамінними в автоматичних системах управління. Сучасна цифрова техніка дає можливість створювати цифрові регулятори з програмною реалізацією в реальному часі на базі мікропроцесорів. Зокрема, мікроконтролери, які об'єднують мікропроцесор, пам'ять і програмовані інтерфейси, забезпечують високу ефективність при низьких витратах, малих габаритах і низькому енергоспоживанні.

Структура, набір команд та апаратно-програмні засоби вводу/виводу мікроконтролерів оптимально підходять для задач керування та регулювання в автоматичних системах. При проектуванні мікропроцесорних САК важливо враховувати кілька факторів: забезпечення необхідної якості управління, ефективний розподіл функцій між апаратними та програмними засобами, а також інтеграцію цифрової та аналогової частин системи.

Показники якості керування, такі як динаміка, точність та надійність виконання функцій, залежить від особливостей цифрової реалізації алгоритмів у мікроконтролерах. Дискретизація процесів у часі та квантування по рівню, що використовуються при цифровому представленні інформації, ставлять вимоги до швидкодії МК і можуть призводити до шумів квантування.

Розподіл функцій САК між апаратною та програмною частинами вимагає аналізу кількох факторів, зокрема структури системи, способу представлення

вхідної та вихідної інформації, а також особливостей цифрових алгоритмів обробки. Для інтеграції аналогових та цифрових частин САК використовують АЦП та ЦАП, до яких ставляться вимоги щодо швидкодії, точності та лінійності. При цьому, завдяки розвитку мікроконтролерів з вбудованими АЦП високої розрядності, стало можливим уникати додаткових мікросхем, що спрощує проектування. Таким вимогам відповідає однокристальний мікроконтролер AT90S4433.

Регулятори з програмною реалізацією менш швидкодіючі, ніж апаратні, але вони універсальніші, легше переналаштовуються та мають кращі масогабаритні характеристики. Мікропроцесорні системи автоматичного керування відзначаються більшою надійністю порівняно з системами на інших елементних базах. ЦАП перетворює цифровий сигнал у аналоговий, а АЦП забезпечує зворотний процес — перетворення аналогового сигналу в цифровий код. Основною вимогою до АЦП і ЦАП є їх сумісність з мікропроцесором, що включає узгодження логічних рівнів, форматів даних і програмну сумісність. Мікроконтролер AT90S4433 має вбудовані ЦАП і АЦП.

У системі автоматичного регулювання (САР) частоти обертання двигуна компресора можна виділити дві основні частини: слабкострумову (керуючу) та силову (енергетичну). Реалізація слабкострумової частини на мікропроцесорі підвищує надійність і універсальність системи, спрощуючи реалізацію керуючих алгоритмів. Оскільки інформація про регулювання передається через цифровий сигнал, який не залежить від енергії, вона менш чутлива до перешкод і викривлень.

Слабкострумова частина мікропроцесорної САР виконує функції програмної реалізації цифрового регулятора та формування кодових послідовностей для керування силовою частиною, що забезпечує управління приводом заслінки. Принципова схема цієї частини представлена на слайді 07.03. Вона включає мікроконтролер AT90S4433, що реалізує алгоритм керування, датчик тиску, масштабуючий пристрій для приведення вхідних сигналів до рівня, що сприймається МК, мультиплексор DD1 (AD7890), демультиплексор DD2

(К530 ИД7) та рідкокристалічний індикатор. Мікросхема DD3 (AT90S4433) є мікроконтролером з вбудованим тактовим генератором G1, частота якого визначається зовнішнім кварцовим резонатором на 12 МГц. Мікроконтролер має такі характеристики: 131 операція за один такт, 32 регістри загального призначення, машинний такт = двом машинним циклам, можливість підключення до 64 кБайт розширеної пам'яті, два 8-бітних таймера з окремими режимами, вмонтований аналоговий компаратор, 35 програмованих входів/виходів та корпуси PDIP (40 контактів) або TQFP (44 контакти). Напруга живлення – від 2,8 до 5,5 В.

Вхідні масштабуючі підсилювачі, що перетворюють сигнали від датчика та задавача до рівня, який сприймається мікропроцесорною системою, реалізовані на елементах DA3 та DA4 (операційний підсилювач К140УД17). Цей підсилювач забезпечує підсилення сигналів без викривлень, подавляє синфазний сигнал, має малу напругу зміщення нуля, низький дрейф і низький рівень шумів, а також великий вхідний опір. Зміна масштабу досягається регулюванням коефіцієнта підсилення операційного підсилювача. Керуючий сигнал з портів PB1 і PB2 мікроконтролера через демультиплексор DD2 передається на роз’єм, з якого надходить на засоби регулювання частоти обертання двигуна компресора.

## 3.5 Обґрунтування способу зміни продуктивності компресора

Зміна холодопродуктивності компресора є важливою частиною автоматизації для підтримання заданої температури в охолоджуваних об'єктах. Існують різні способи регулювання холодопродуктивності, які можуть бути реалізовані як за допомогою зовнішніх пристроїв, так і через спеціальні вузли, вбудовані безпосередньо в компресори. У цьому випадку розглядаються методи зміни продуктивності поршневих компресорів, оскільки вони найбільш поширені разом з гвинтовими та відцентровими компресорами, а також використовуються на досліджуваному підприємстві без потреби в конструктивних змінах.

Широкий діапазон холодопродуктивності поршневих компресорів (від ват до сотень кіловат) та різні вимоги до установок обумовлюють застосування кількох методів регулювання продуктивності. Основними є: "пуск-зупинка", зміна числа працюючих циліндрів, зміна частоти обертання валу, дроселювання всмоктуваної пари та байпасування стисненої пари. У цій роботі акцент зроблений на плавному регулюванні холодопродуктивності, а з аналізу літератури можна зробити висновок, що оптимальним методом є зміна частоти обертання валу компресора. Далі розглядаються різні підходи до реалізації цього методу.

### 3.5.1 Зміна продуктивності компресора шляхом зміни частоти обертання приводу

Цей метод зміни холодопродуктивності вимагає наявності регульованого приводу, який дозволяє змінювати частоту обертання валу компресора. Поршневі компресори зазвичай приводяться в дію асинхронними електродвигунами змінного струму, тому далі розглядатимуться схеми зміни частоти обертання для таких приводів. В залежності від типу електроприводу, розрізняють позиційну та плавну зміну частоти обертання валу компресора.

Позиційну зміну частоти обертання здійснюють за допомогою дво- або багатошвидкісних асинхронних електродвигунів. Зазвичай використовуються двигуни з не більше ніж чотирма швидкостями. При заданій частоті живлячого струму, частота обертання залежить від числа пар полюсів електродвигуна. Синхронну частоту обертання для різного числа пар полюсів можна легко розрахувати при частоті живлячого струму 50 Гц.

| $p$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_c$, *об/хв.* | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 | 429 | 375 | 333 | 300 |

Якщо припустити, що холодопродуктивність компресора лінійно залежить від частоти обертання валу електродвигуна, то вибір ступенів регулювання зводиться до підбору електродвигуна з відповідною кількістю пар полюсів. Наприклад, чотиришвидкісний електродвигун з синхронними обертами 1500,

1000, 750 і 500 об/хв забезпечує рівні продуктивності 1, 2/3, 1/2 та 1/3 від максимальної.

Принципова схема управління трьохшвидкісним електродвигуном показана на рис. 3.6. Перемикання між швидкостями відбувається через зміну з'єднання обмоток статора електродвигуна, а комутація здійснюється за допомогою пускачів $П_1$, $П_2$ і $П_3$, кількість яких зазвичай відповідає числу регулювальних ступенів. Якщо ключ управління *КУ* встановлений в режим "Автоматика", то управління пускачами відбувається за сигналами від приладу *РП*, що регулює температуру в об'єкті охолодження. Цей прилад має релейну реверсивну (трипозиційну) характеристику, або може бути використана група двопозиційних приладів.

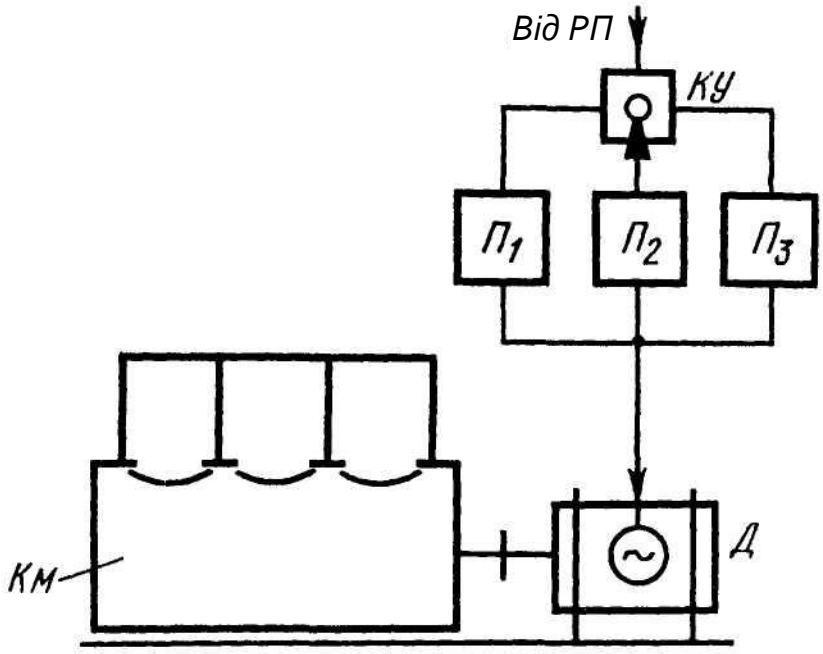



Рисунок 3.6 – Система керування трьохшвидкісним електродвигуном

Ключ управління має декілька положень для ручного перемикання частоти обертання. Однак із збільшенням кількості східців ускладнюється конструкція електродвигуна: зростає кількість обмоток для комутації, пускачів, а також розміри та маса двигуна. Це ускладнює схеми управління і погіршує енергетичні характеристики. Крім того, частота перемикань східців обмежена через знос комутаційного обладнання та додатковий нагрів двигуна.

Для плавної зміни частоти обертання асинхронного електродвигуна використовують три методи: введення додаткового опору в ланцюг ротора, зміну частоти живлячої напруги та введення керованої е.р.с. У першому та третьому випадках потрібен асинхронний двигун з фазним ротором (контактні кільця), а в другому – можна застосувати двигун з короткозамкнутим ротором.

Схема зміни частоти обертання за допомогою змінного опору в ланцюзі ротора показана на рис. 3.7. Компресор *Км* приводиться електродвигуном *Д*, пуск і зупинка якого здійснюються вручну за допомогою кнопок *КнУ* через пускач *П* (можна реалізувати і автоматичне управління). У ланцюг ротора включений реостат *Рт*, положення рухомої частини якого регулюється виконавчим механізмом *ИМ*, що отримує сигнали від регулюючого приладу *РП*. При зниженні частоти обертання опір збільшується, а при підвищенні — зменшується. Цей метод обмежено використовується через значні енергетичні втрати, які зростають при зменшенні частоти обертання.

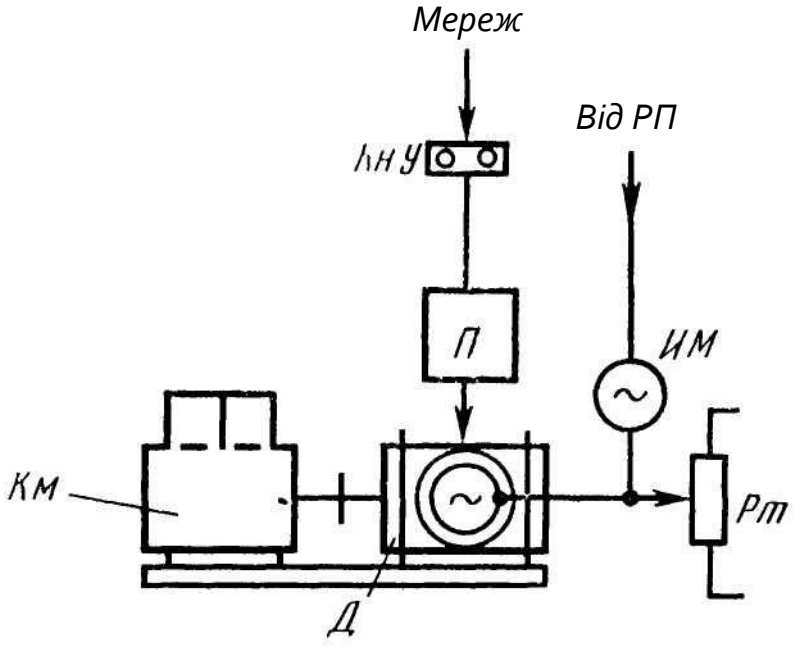



Рисунок 3.7 – Плавна зміна частоти обертання за допомогою змінних опорів в ланцюзі ротора

Схема зміни частоти живлячого струму представлена на рис. 3.8. Ключовим елементом є перетворювач частоти (*ПЧ*), який отримує енергію від мережі з промисловою частотою і, під впливом управляючого сигналу, змінює

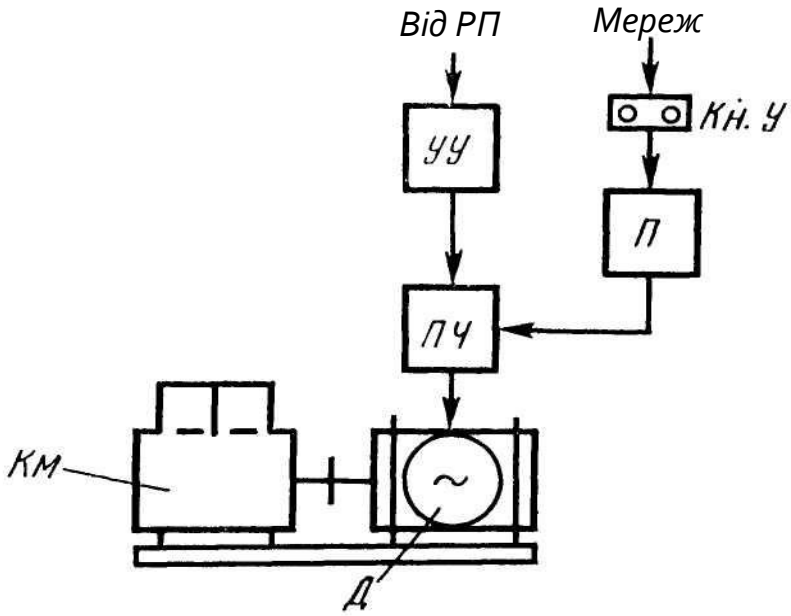



Рисунок 3.8 – Плавна зміна частоти обертання зміною частоти живлячого струму

частоту на виході в заданих межах. Перетворювач живить обмотку статора електродвигуна. Згідно з формулою $nc = 60f/p$, частота обертання пропорційна частоті струму (де $f$ — частота струму в Гц, p — кількість пар полюсів двигуна). Живлення здійснюється через пускач *П* і кнопку *КнУ*, а управляючий сигнал від приладу *РП* передається через пристрій *УУ*. Використання напівпровідникових елементів у перетворювачі частоти та управляючому пристрої дозволяє забезпечити їх компактні розміри та малу масу.

На рис. 3.9 показана схема, в якій е.р.с. *ер*, що наводиться в роторі, компенсується опорною е.р.с., яка діє як додатковий опір. Особливість цієї схеми полягає в тому, що частина енергії, відведена з ланцюга ротора, повертається в живлячу мережу. Для цього струм ротора випрямляється випрямлячем В в постійний і подається на інвертор *Ин*. Інвертор, під керівництвом пристрою *УУ*, перетворює постійний струм в трифазний, який повертається в мережу. Цей процес називається рекуперацією енергії. Чим більше енергії рекуперується, тим нижча частота обертання електродвигуна. Така схема дозволяє змінювати частоту обертання в широких межах, з високими енергетичними показниками завдяки рекуперації. Вона є складною, тому застосовується, коли важлива плавна зміна холодопродуктивності.

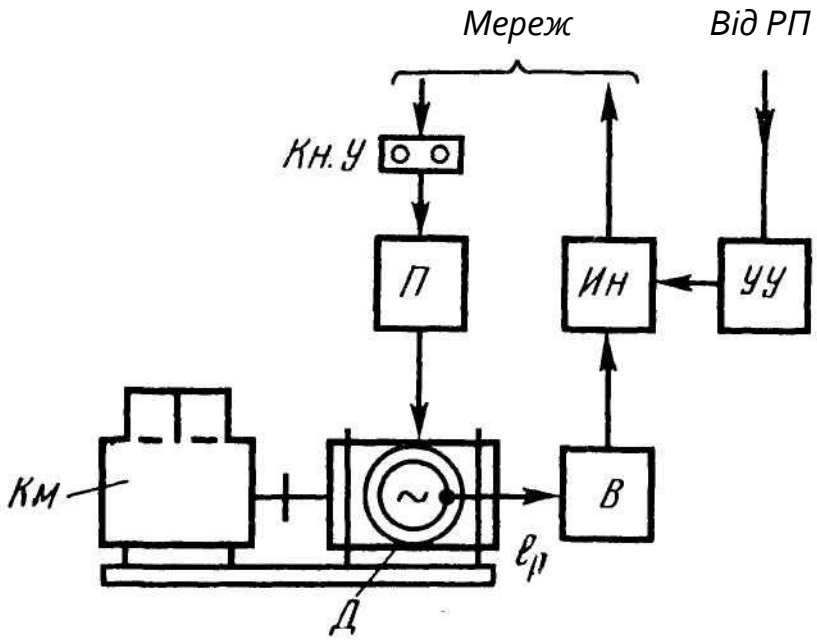



Рисунок 3.9 – Плавна зміна частоти обертання зміною частоти живлячого струму

3.5.2 Порівняння підходів зміни продуктивності компресора

Основним критерієм порівняння різних способів є техніко-економічна ефективність, яка оцінюється на основі початкових і експлуатаційних витрат.

До первинних витрат відносяться вартість обладнання для регулювання холодопродуктивності та його монтаж. Ці витрати переважно залежать від складності обраної системи. За величиною первинних витрат різні способи можна розташувати в наступному порядку (від найменших до найбільших витрат): "пуск-зупинка", дроселювання всмоктуваної пари, байпасування стислого газу на всмоктуючу сторону, зміна числа працюючих циліндрів, зміна частоти обертання.

Експлуатаційні витрати включають вартість споживаної енергії, витрати на обслуговування та ремонт, а також інші фактори. За величиною експлуатаційних витрат різні способи можна розташувати в такій послідовності (від найменших до найбільших витрат): "пуск-зупинка", зміна числа працюючих циліндрів, зміна частоти обертання, дроселювання, байпасування.

## 3.6 Вибір та обґрунтування компресора

Компресори — це пристрої для створення потоку речовини під тиском. Вони широко використовуються в холодильних системах, пневматичних пристроях та контрольно-вимірювальній апаратурі. Компресорні установки зазвичай складаються з електродвигуна або приводу, нагнітаючої установки, резервуарів для стисненого газу, а також труб і шлангів для з'єднань. Для приводів компресорів використовуються електродвигуни постійного та змінного струму, при цьому двигуни змінного струму поділяються на синхронні та асинхронні. Асинхронні двигуни, в свою чергу, бувають з короткозамкнутим і фазним ротором.

Нагнітаючі пристрої — це механізми, які за допомогою сили, переданої від приводу, нагнітають газ у спеціальні резервуари, здатні витримувати тиск, що створюється компресором. Компресор є важливим елементом, який застосовується в різних сферах — від побутових систем (наприклад, охолодження холодильників) до високотехнологічних застосувань, таких як охолодження рідинних прискорювачів ракетоносіїв у космічній техніці.

### 3.6.1 Характеристика існуючих електромеханічних систем

Система, що складається з певним чином з'єднаних електричних і механічних ланок, називається електромеханічною системою (ЕМС). Електродвигуни, які є складовими частинами ЕМС, класифікуються за типом струму на двигуни змінного (однофазні та трифазні) та постійного струму. Двигуни змінного струму, у свою чергу, діляться на синхронні, асинхронні та лінійні.

Серед асинхронних двигунів найбільш поширені моделі з короткозамкнутим ротором завдяки їх високій надійності. Однак вони мають значні недоліки, такі як великий пусковий струм (5-7 разів більший за номінальний) та малий пусковий момент. Двигуни з фазним ротором використовуються в умовах малопотужних мереж або в компресорних установках з великим маховиком, оскільки вони забезпечують високий пусковий момент при

низькому пусковому струмі. Проте такі двигуни складніші в виготовленні, дорожчі і менш надійні.

Для ЕМС великої потужності (понад 100 кВт) зазвичай використовують синхронні електродвигуни. Вони забезпечують постійну частоту обертання (при допустимих навантаженнях), мають високий коефіцієнт потужності (cosϕ = 1), а також можуть компенсувати реактивну потужність у мережі при певному перезбудженні. Однак, незважаючи на їхні переваги, синхронні двигуни значно дорожчі за асинхронні та мають ті ж недоліки при пуску, що й АД з короткозамкнутим ротором.

Системи з лінійним електроприводом мають високі показники ефективності. За принципом дії ці електродвигуни поділяються на електромагнітні, електродинамічні, магнітоелектричні та індукційні. Найбільш поширені в приводах компресорів і насосів перші два типи. Незважаючи на низький ККД, ЕМС з лінійним електроприводом є ефективними завдяки відсутності кривошипно-шатунового механізму та відповідних втрат на тертя.

### 3.6.1 Характеристика електромеханічних систем

Переваги АД реалізуються лише при правильному виборі електродвигуна. Від правильного підбору потужності залежить надійність роботи ЕМС і енергетичні показники в експлуатації. Використання двигуна з надлишковою потужністю призводить до збільшення габаритів, маси та вартості системи, а також погіршення енергетичних характеристик. Встановлення двигуна з надмірною продуктивністю збільшує втрати та час виходу на робочий режим. Тому потужність двигуна має точно відповідати режиму роботи і навантаженню.

При розрахунку потужності часто отримана величина не є стандартною, тому потрібно вибирати двигун з найближчим більшим значенням. Метою вибору електродвигуна є визначення його технічної придатності та знаходження найкращого варіанту серед доступних, враховуючи тип струму, напругу, конструкцію, рівень шуму, вібрації та режим роботи.

### 3.6.2 Обґрунтування використання частотного перетворювача

Частотний перетворювач (частотно-регульований електропривод) – це пристрій для зміни швидкості обертання асинхронних електродвигунів змінного струму. Асинхронні двигуни, завдяки простоті конструкції та зручності в обслуговуванні, мають значні переваги перед двигунами постійного струму, що обумовлює їх широке застосування в промисловості, енергетиці та АПК.

Швидкість обертання виконавчого механізму можна регулювати за допомогою різних пристроїв, які відрізняються за складом та принципом дії. До найбільш відомих і поширених належать:

1. Гідравлічні пристрої – зокрема, гідравлічна муфта.

2. Механічні пристрої – наприклад, механічний варіатор.

3. Електричні пристрої: електромеханічний перетворювач частоти (системи генератор-двигун), введення додаткового опору в статор або фазний ротор, статичний перетворювач частоти.

Використання частотних перетворювачів усуває недоліки інших пристроїв, зокрема: низьку якість регулювання, обмежений діапазон, низьку економічність, складність у застосуванні та обслуговуванні. У цьому випадку регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна відбувається шляхом зміни частоти та напруги живлення. ККД такого перетворення дуже високий — близько 98 %, при цьому з мережі споживається лише активна складова струму навантаження.

Мікропроцесорна система управління гарантує високу точність керування електродвигуном та моніторить численні його параметри, що дозволяє запобігти аварійним ситуаціям.

Склад силової частини такого перетворювача представлений на рис. 3.10.

Частотний перетворювач сприяє економії енергоресурсів, знижує витрати на ремонти та капітальні відновлення, подовжує термін служби обладнання і дозволяє ефективно керувати технологічними процесами. Економія електроенергії досягається при регулюванні технологічних параметрів, таких як зміна холодопродуктивності. У промислово розвинутих країнах частотні перетворювачі стали стандартом для асинхронних електродвигунів.

Хоча сучасні перетворювачі мають високу початкову вартість, їх окупність за рахунок економії енергоресурсів та інших факторів складає в середньому 1,5 роки. Це реальний термін, і з урахуванням тривалого ресурсу техніки можна легко оцінити економію на багато років вперед і прийняти обґрунтоване рішення.

Використання частотного перетворювача відкриває низку технічних можливостей: плавний розгін і гальмування, збільшення терміну служби як механічних, так і електричних компонентів, звільнення частини обладнання, регулювання швидкості від нуля до номінальної та навіть вище, обмеження пускового струму до номінального рівня в різних режимах (пускових, робочих і аварійних), а також можливість монтажу перетворювача в стандартні осередки розподільчих пристроїв без необхідності переносу основного обладнання.

У разі збільшення площі холодильника можна використовувати наявне обладнання. Для підвищення холодопродуктивності можна збільшити кількість одноступінчастих компресорів, однак більш доцільним є застосування двох двоступінчастих компресорів ДАУ50 замість трьох компресорів NF-611, що дозволить знизити витрати електроенергії завдяки їх вищій ефективності. Габаритні креслення аміачного компресора ДАУ50 та основні технічні характеристики наведені на слайді 04.00.

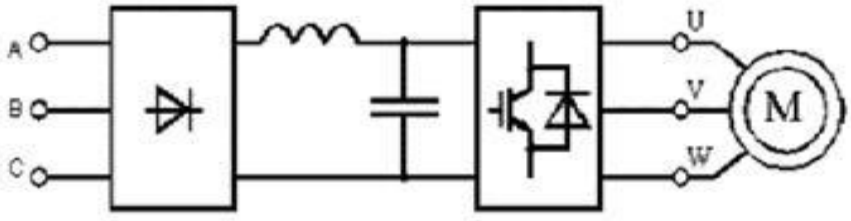



Рисунок 3.10 – Склад силової частини такого перетворювача:
- вхідний некерований випрямляч;
- ланка постійного струму з LC –фільтром;
- автономний інвертор напруги з ШИМ.

# 4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ СИСТЕМИ

Сучасна теорія автоматичного керування базується на багаторічних дослідженнях і застосовується до різних класів багатовимірних систем, зокрема до систем, описаних нелінійними та лінійними диференціальними рівняннями, рівняннями з частковими похідними, інтегральними та диференційно-різницевими рівняннями з післядією. Окремо виділяється теорія оптимального керування, яка дозволяє розробляти системи, що оптимізують певний критерій якості (мінімізуючи чи максимізуючи його).

Автоматичне регулювання широко використовується в електротермії для підтримки температури середовища на певному рівні. Одним із таких об'єктів є холодильна установка, де необхідно автоматично регулювати частоту обертання двигуна компресора для підтримки заданої температури. Для цього в установці використовуються автоматичні регулятори, які стабілізують її роботу та забезпечують точне підтримання температури.

Без автоматизації деякі електротермічні процеси не можуть бути виконані в промислових масштабах. В інших випадках автоматизація знижує брак, покращує якість продукції, підвищує продуктивність праці та полегшує умови роботи персоналу. В досліджуваному об'єкті автоматичне регулювання температури дозволить підвищити ефективність роботи холодильного обладнання. Основна задача таких пристроїв — підтримання температури на заданому рівні з необхідною точністю, яка може змінюватися в широких межах.

Під час досліджень потрібно отримати математичну модель об'єкта управління у вигляді передаточної функції та вибрати параметри налаштування регулятора, щоб система відповідала вимогам щодо точності та якості.

## 4.1 Опис системи стабілізації технологічного параметра холодильної камери

Автоматичне регулювання температури здійснюється за допомогою систем керування зі зворотним зв'язком, які генерують керуючі впливи на основі величини відхилення регульованого параметра від заданого значення.

Система автоматичного регулювання температури промислового холодильника повинна включати задаючий пристрій, вимірювальний блок, мікроконтролер, підсилювач потужності, сам об'єкт регулювання та датчик температури. Її функціональна схема показана на рис. 4.1 (слайд 06.01). Сигнал від датчика температури надходить до елемента порівняння, що є частиною вимірювального блоку. В елементі порівняння формується сигнал помилки, який є різницею між сигналом задавача та сигналом датчика температури.

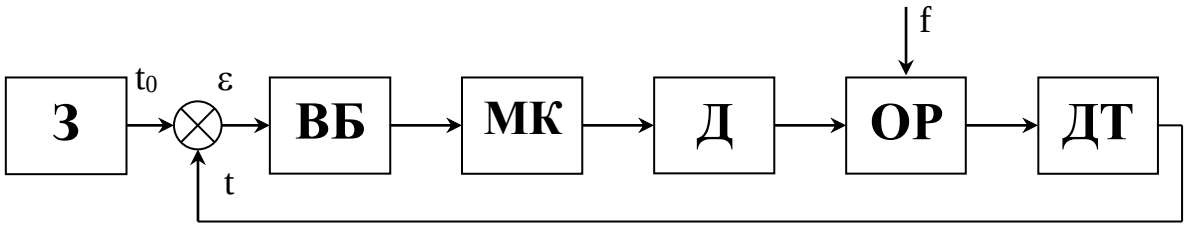



Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи стабілізації температурного режиму промислового холодильника:
З – задаючий пристрій; ВБ – вимірювальний блок;
МК – мікроконтролер; Д – двигун; ОР – об’єкт регулювання;
ДТ – датчик температури .

Посилений сигнал помилки передається на вхід регулятора, де можуть бути реалізовані пропорційний (П), пропорційно-інтегральний (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закони регулювання. Реалізація цих законів здійснюється на основі операційного підсилювача з використанням спеціально підібраних резисторів та конденсаторів, які підключені до виконавчого пристрою - тиристорного підсилювача потужності. Збурення в системі можуть бути двох типів. Перший тип - це збурення, що виникають через зміни внутрішніх параметрів холодильної камери, наприклад, через коливання кількості та обсягів зберіганої продукції. Другий тип - збурення, пов'язані з впливом зовнішнього середовища, тобто зміни кліматичних умов протягом дня або на більш тривалий період.

Розроблювана система призначена для точного регулювання температури та може бути використана в різних галузях промисловості, таких як електротехнічна, електронна та теплоенергетична. Її принцип дії полягає в наступному: вимірювальний блок являє собою захищений підсилювач із задатчиком, де компенсується ЕРС термопари та сигнал від задатчика. Разом з термопарою і регулюючим пристроєм цей блок використовується для високоточних температурних регулювань. Різниця між сигналами термопари та задатчика підсилюється попереднім підсилювачем.

Посилений сигнал неузгодженості з вимірювального блоку надходить на регулятор, який формує закон регулювання та перетворює його в сигнал постійного струму 0-5 мА для використання в тиристорних перетворювачах або інших пристроях для регулювання частоти обертання асинхронного двигуна. Регулятор на мікропроцесорі дозволяє додавати індикатори, органи динамічного налаштування та перемикач для ручного керування.

У цій роботі обрано мікропроцесор з аналоговим виходом, що дозволяє створити аналоговий регулюючий пристрій для реалізації пропорційного (П), пропорційно-диференціального (ПД), пропорційно-інтегрального (ПІ) або пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання.

## 4.2 Математична модель об’єкта керування

### 4.2.1 Методи опису об'єктів керування

Для створення ефективної системи керування необхідно мати математичну модель об'єкта керування. Коли відсутня залежність змінних стану та керування від просторових координат (для лінійних багатомірних систем з зосередженими параметрами), використовуються лінійні звичайні диференціальні рівняння або їх зображення в області Лапласа. Розглянемо багатомірну лінійну систему з m керуваннями, l збуреннями та k входами. Модель такої системи в часовій області можна записати у вигляді:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Df(t) \qquad x(0) = x_0$$
$$y(t) = Cx(t) \tag{4.1}$$

де *y(t)* – вектор виходів, $y \in R^k$;*x(t)* – вектор стану системи, $x \in R^n$ ; *u(t)* – вектор керувань (входів), $u \in R^m$ ; *A* – матриця розмірності *n* × *n*; *D* – матриця розмірності *n* × l; *f(t)* – вектор збурювань, $f \in R^l$ ; *B* – матриця розмірності *n* × *m*; *C* – матриця розмірності *k* × *n*.

Застосувавши перетворення Лапласа до системи, можна отримати її еквівалентну модель у комплексній області:

$$y(s) = C\Phi(s)x_0 + C\Phi(s)Bu(s) + C\Phi(s)Df(s) \quad \text{або}$$
$$y(s) = W_{y0}(s)x_0 + W_{yu}(s)u(s) + W_{yf}(s)f(s) \tag{4.2}$$

Часове чи частотне представлення вибираються залежно від зручності, оскільки для постійних матриць A, B, C і D вони еквівалентні. Для побудови моделей можна використовувати два підходи: застосування фізичних законів збереження (речовини, енергії) або відновлення параметрів за емпіричними даними, причому другий метод використовується частіше на практиці.

### 4.2.2 Обробка експериментальних даних

Для побудови математичної моделі об'єкта керування використовувався метод відновлення параметрів за емпіричними даними. Експериментальні дані, отримані за допомогою лабораторної установки, були апроксимовані в середовищі MatLab, що дозволило побудувати графік перехідного процесу (рис. 4.2). На рис. 4.2 по осі ординат показана температура в °С, а по осі абсцис — час у секундах (слайд 05.01). Експериментальні точки, отримані в дискретні моменти часу, позначені кружечками на графіку. Нормований перехідний процес зображений на рис. 4.3.

Структура апроксимаційного виразу для передаточної функції об'єкта може бути визначена в загальному випадку як:

$$W_{\text{O}}(s) = \frac{K_{\text{O}} e^{-s\tau}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)^q} \tag{4.3}$$

Коефіцієнт підсилення об'єкта керування $K_0$ можна визначити за графіком перехідного процесу. Постійні часу передаточної функції визначаються за допомогою методу площ або геометричного методу.

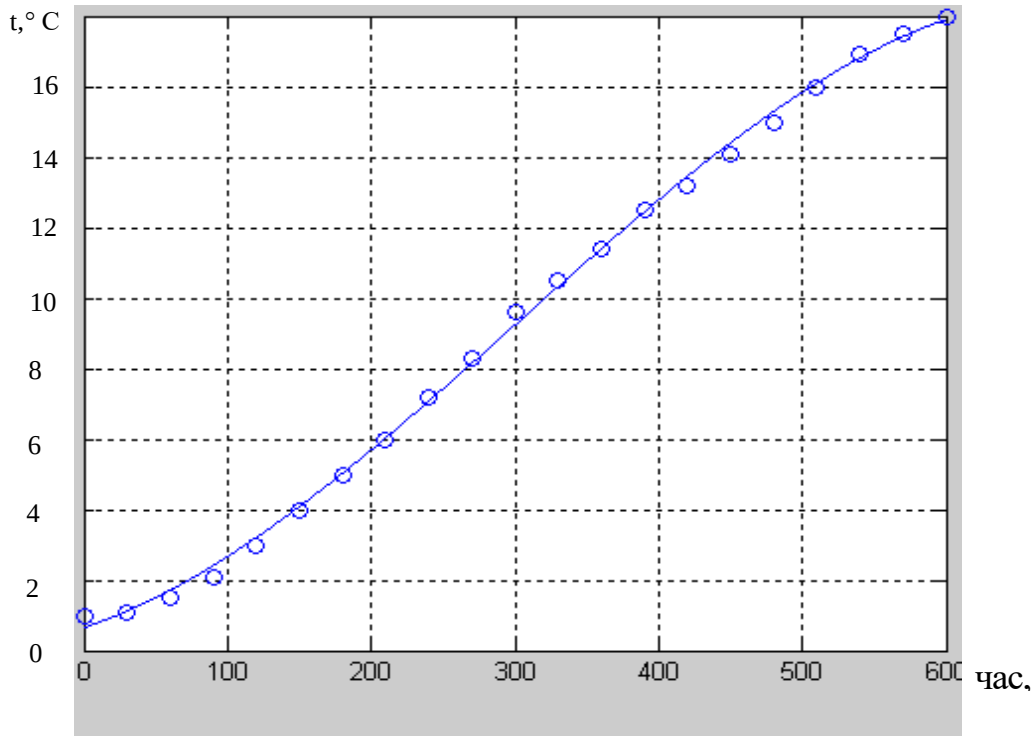



Рисунок 4.2 – Експериментальний перехідний процес

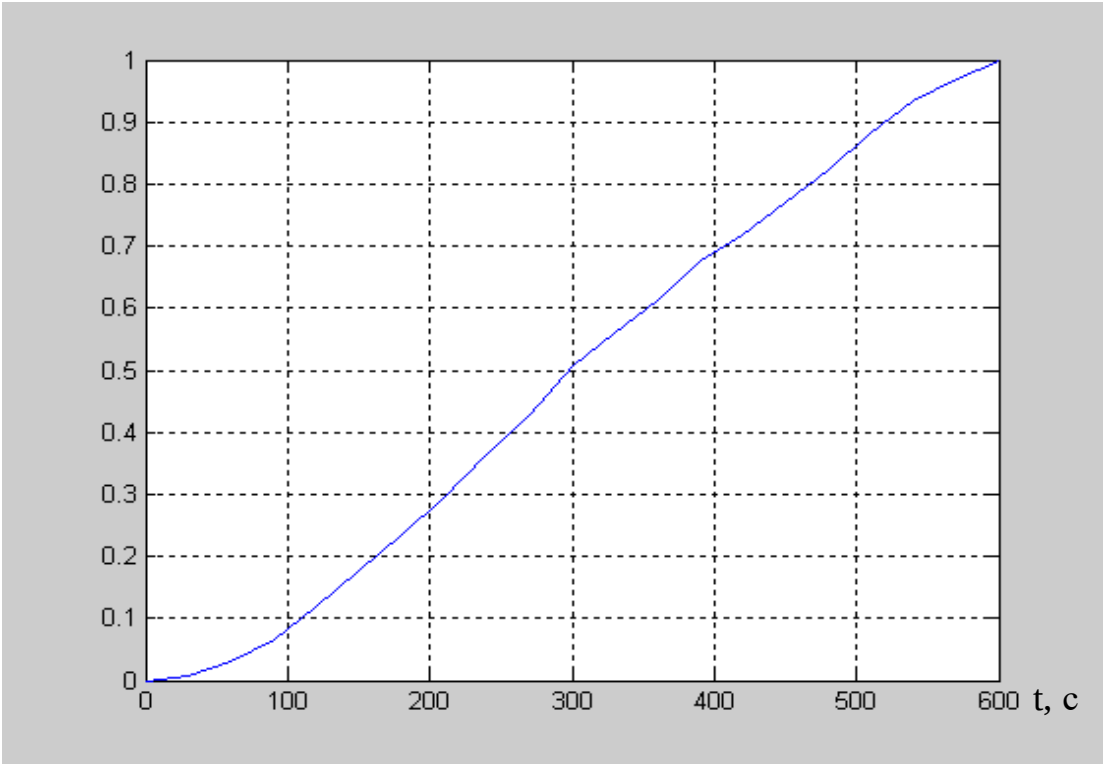



Рисунок 4.3 – Нормований перехідний процес

4.2.3 Визначення коефіцієнта підсилення об’єкта

Коефіцієнт підсилення можна визначити за таким співвідношенням:

$y_\infty(t) = k \cdot c, \quad де\ c = 0{,}35(мА),\ а\ y_\infty(t)$ – усталене значення виходу (температури).

Звідси одержуємо, $k = \dfrac{18}{0{,}35} = 51{,}43 \dfrac{^\circ C}{мА}$.

4.2.4 Побудова моделі типової ланки геометричним методом

Ланка першого порядку з запізнюванням має наступний вигляд:

$$W(s) = \frac{K\ e^{-s\tau}}{T\,s + 1} \tag{4.4}$$

Для визначення запізнювання і постійної часу звернемося до графіка перехідного процесу (рис. 4.2). Постійну часу можна знайти, провівши пряму, яка перетинає графік на рівні 0,63kc паралельно осі абсцис (рис. 4.4).

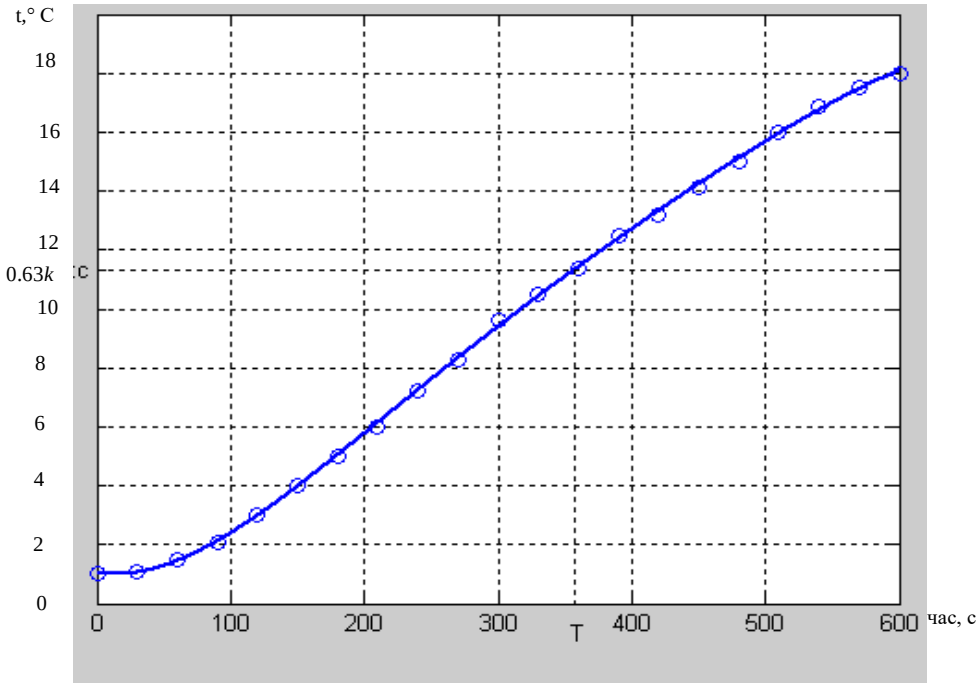



Рисунок 4.4 – Визначення постійної часу
по графіку перехідного процесу

Стала часу $T$ = 360,53 (с). $T_1 = T - \tau,\ де\ \tau = 30c \Rightarrow T_1 = 330.53c$. Побудувавши перехідний процес для ланки, визначимо, як він збігається з експериментальним.

Схема моделі в середовищі MatLab подана на рис. 4.5.

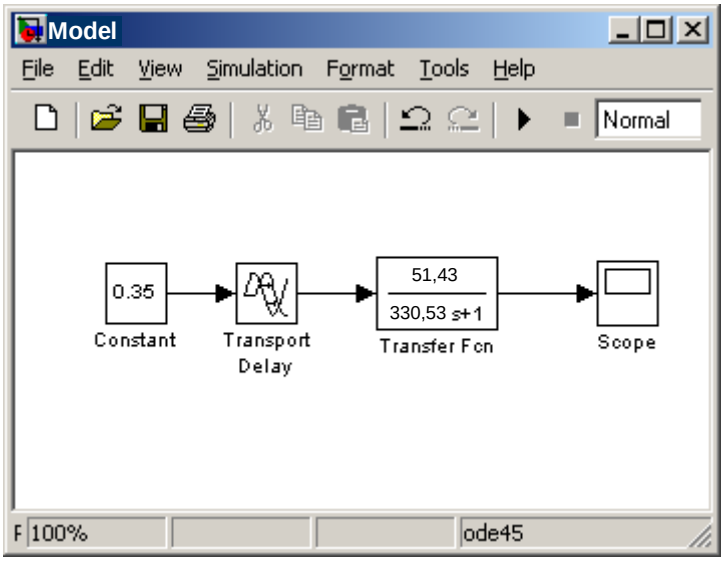



Рисунок 4.5 – Схема моделі в середовищі MatLab

Отриманий перехідний процес показано на рис. 4.6. (слайд 05.02).

Отже, передаточна функція об’єкта має наступний вигляд:

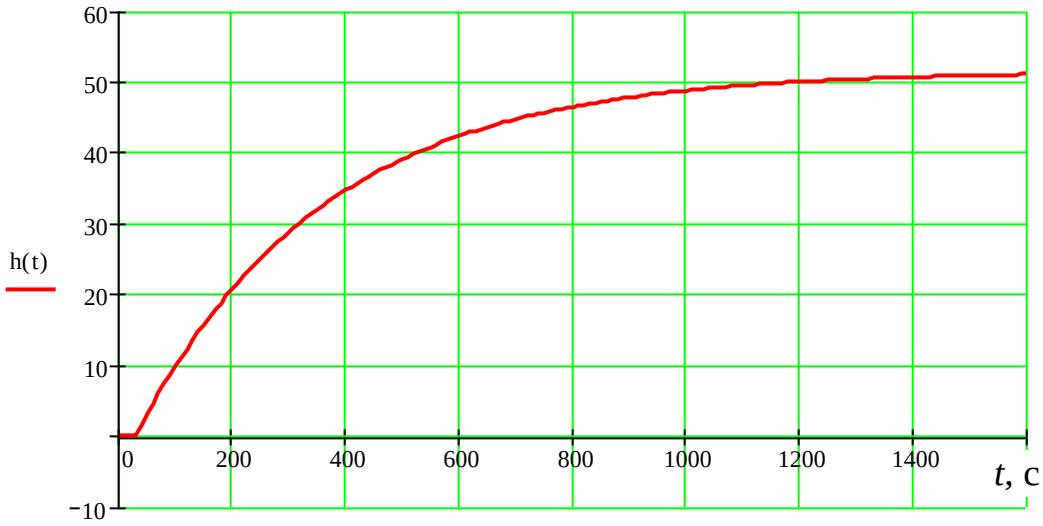



Рисунок 4.6 – Перехідний процес, отриманий за передаточною функцією аперіодичної ланки першого порядку

$$W(s) = \frac{51{,}43\, e^{-30S}}{330.53s + 1} \qquad (4.5)$$

4.2.5 Побудова методом площ математичної моделі ланки другого порядку

При $q = 1$ і $\tau = 0$ матимемо об'єкт другого порядку. Розрахуємо сталі часу $T_1$ і $T_2$ методом площ:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \tag{4.6}$$

Для визначення параметрів передаточної функції методом площ побудуємо графіки функцій:

1) $\delta(t) = 1 - h(t);$

2) $\delta_2(t) = t \cdot \delta(t).$, де *h(t)* – значення з графіка рис. 4.3.

Можна визначити площі під графіками даних функцій (відповідно S1 і S2). Результати розрахунків представлені нижче.

S1 = 309.8824;  S2 = 5.9162e+004

Графіки даних функцій показані на рисунках 4.7 і 4.8 відповідно.

Тепер слід перевірити співвідношення $\frac{S_2}{S_1^2}$. Якщо $(S_2 / S_1^2) < 0.75$, то метод площ застосовувати не можна, слід використовувати метод грубих площ. У нашому випадку $\frac{S_2}{S_1^2} = 0.6161$. Таким чином, застосуємо метод грубих площ.

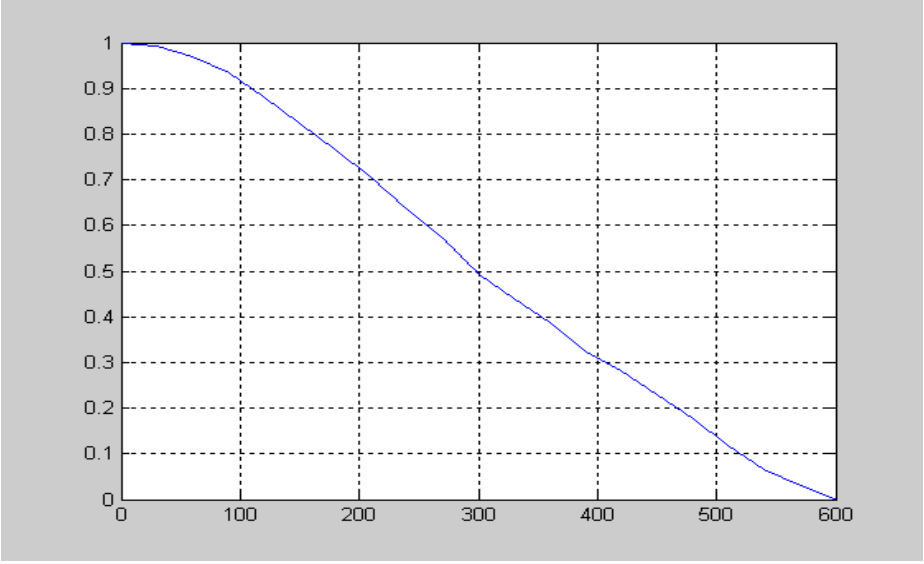



Рисунок 4.7 – Графік функції δ(t)

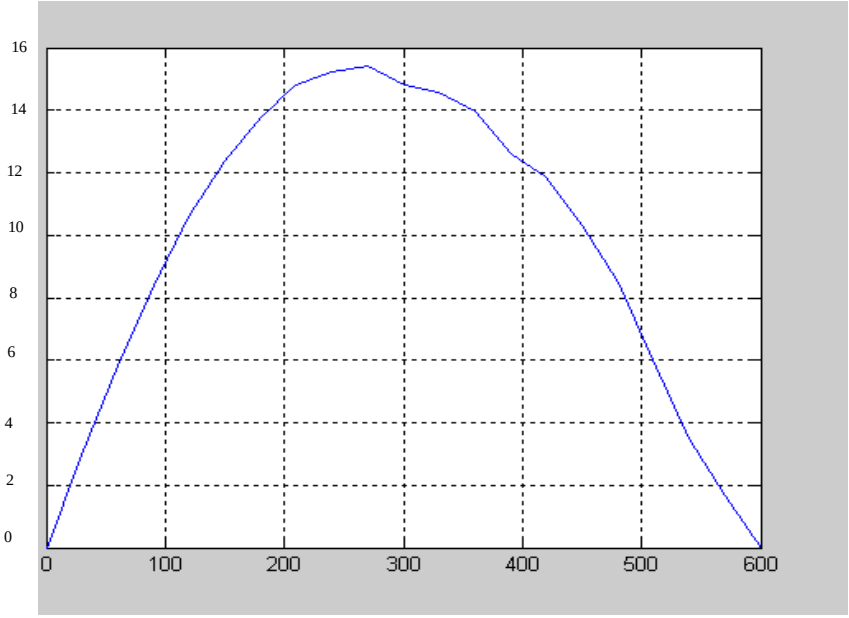



Рисунок 4.8 – Графік функції $\delta_2(t)$

В даному випадку потрібно знайти точку перегину графіка перехідного процесу. Точка перегину має координати: $t$ = 90 с, $y(t_n)$ = 0,09.

Візьмемо точку $t$ правіше точки перегину ($t > t_n$), використаємо формулу:

$$T1 = \varepsilon(t)^{-1} \int_t^{\infty} \varepsilon(\tau) d\tau \quad , \tag{4.7}$$

де $I_n = \int_t^{\infty} \varepsilon(\tau) d\tau$, площа кривої після точки перегину (межі інтегрування: від 90($t_n$) до 600(∞)), причому, $\varepsilon(\tau) = k \cdot \delta(t)$, де $\delta(t) = 1 - h(t)$, отже: $T1 = \frac{1}{k \cdot \delta(t_n)} \cdot I_n$.

Отже, реалізуючи даний алгоритм, отримаємо наступні результати:

$T_1$ = 237,2624

$T_2$ = 72,6200

Отримаємо передаточну функцію

$$W_o(S) = \frac{51{,}43}{(237{,}2624S + 1)(72{,}62S + 1)} \tag{4.8}$$

Графік перехідного процесу для такої ланки представлено на рис. 4.9 (слайд 05.02).

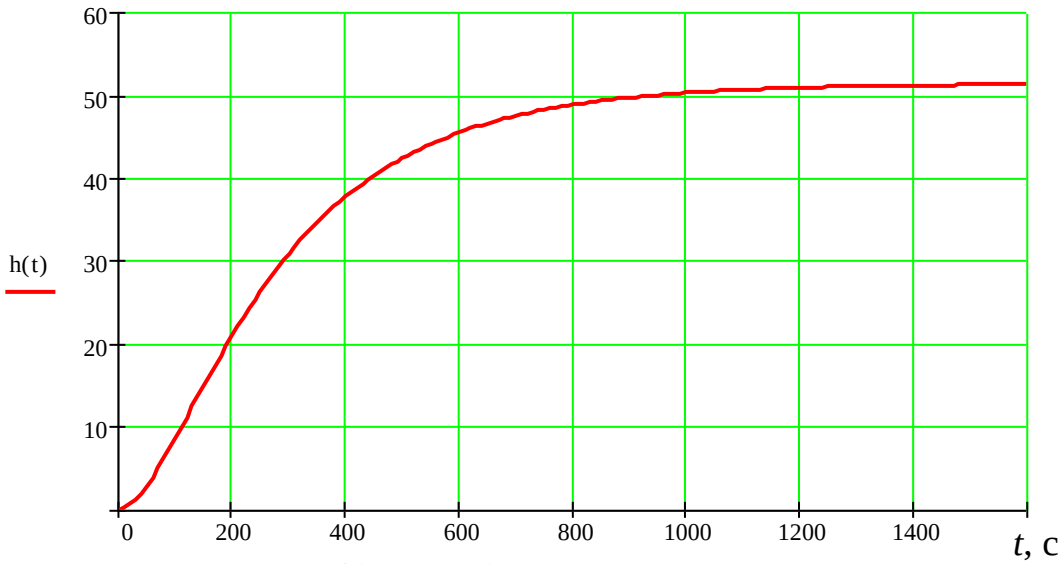



Рисунок 4.9 – Графік перехідного процесу для ланки другого порядку, розрахований за методом площ

4.2.6 Вибір апроксимуючої моделі

Для вибору найкращої апроксимуючої моделі об'єкта керування серед отриманих варіантів порівняємо теоретичні та експериментальні перехідні процеси. Для оцінки якості передаточних функцій, що описують об'єкт керування, обчислимо критерій χ2 за такою формулою:

$$\chi^2 = \frac{1}{k}\sqrt{\sum_1^6 (yi - yi_real)^2} \tag{4.9}$$

Проведений розрахунок дає такі результати:

Розрахунок погрішностей

*k* = 51,43;

*y*_real = [24,44 60 93,33 125,5 154,44 180];

*y1* = [32 72 101 122 136 146];

*y2* = [31,1 73,3 106,67 131,11 148,89 160];

tmp = 0;

for i = 1:6

tmp = tmp + (*y*_real(*i*) – *y1*(*i*))2;

end

*x1* = sqrt(tmp)/k

tmp = 0;

for *i* = 1:6

tmp = tmp + (*y*_real(*i*) – *y2*(*i*))2;

end

*x2* = sqrt(tmp)/*k*

*x1* = 0,0818

*x2* = 0,0571

*x1* – відповідає оцінці ланки з запізнюванням; *x2* – відповідає аперіодичній ланці другого порядку, розрахованій методом площ.

Оскільки найменше значення χ2 було отримано для аперіодичної ланки другого порядку, розрахованої за інтегральним методом, саме цю ланку обрано як модель розроблюваної системи. Передаточна функція об'єкта керування має наступний вигляд:

$$W_o(s) = \frac{51{,}43}{(237{,}2624s + 1)(72{,}62s + 1)} \qquad (4.10)$$

4.3 Дослідження залежності сигналу датчика від температури повітря в камері для використання в системі стабілізації технологічного параметра

Для використання системи автоматичного стабілізації температурного режиму промислового холодильника необхідно визначити залежність вихідного сигналу датчика від температури повітря. Для цього слід знайти аналітичний вираз, який описує взаємозв'язок між цими параметрами. Для отримання такої математичної залежності були проведені експериментальні дослідження, під час яких датчик підключали до мережі живлення, фіксували значення його вихідного сигналу та вимірювали температуру термометром. Усього було виконано 50 вимірювань.

Результати експериментальних досліджень, представлені на рис. 4.10 (слайд 05.02), показують координати точок на площині. По осі Y відкладено експериментально отримані значення вихідного сигналу датчика, а по осі X — температури повітря у холодильній камері. Дані свідчать, що існує певна функціональна залежність, ймовірно лінійна, між вихідним сигналом датчика і

температурою повітря. Однак спостерігається певний розкид значень, що потребує додаткового уточнення та вивчення.

Отже, можна зробити висновок, що вихідний сигнал датчика пропорційний температурі повітря в холодильній камері. Однак цей факт потребує точного уточнення для кожного конкретного випадку. Важливо враховувати як кількісні, так і якісні характеристики цієї залежності для конкретного типу холодильної установки.

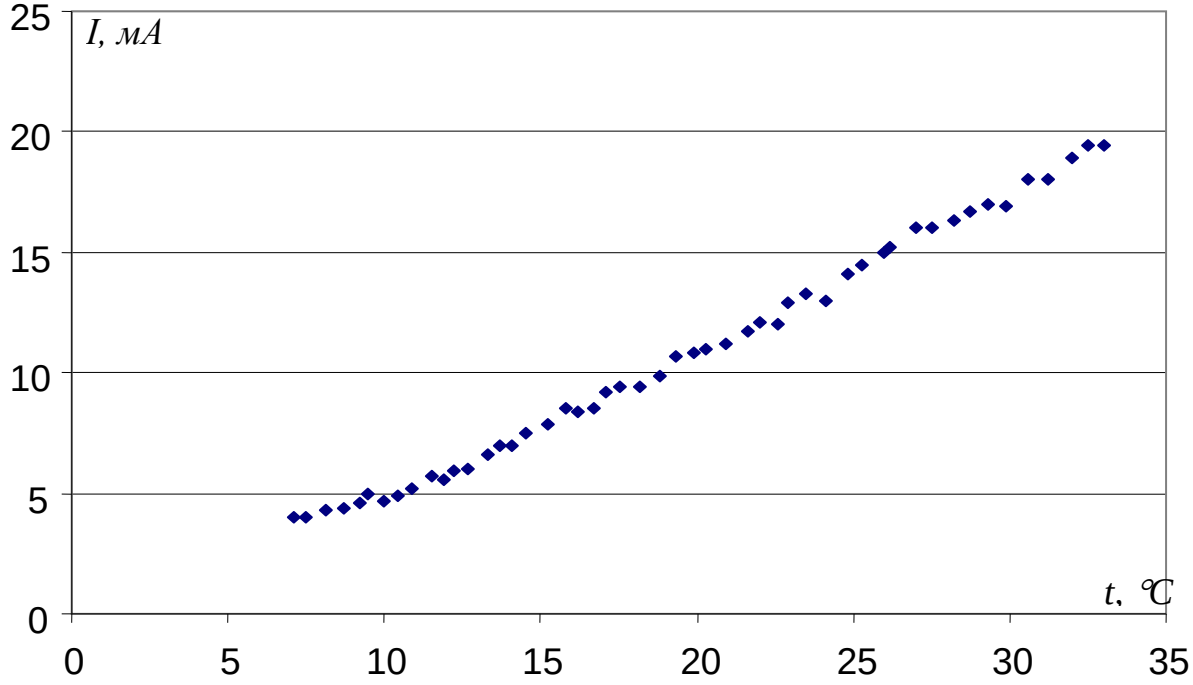



Рисунок 4.10 – Експериментально отримані значення вихідного сигналу датчика від температури повітря у холодильній камері

4.3.1 Визначення виду лінії регресії

Розміщення точок на графіку рис. 4.10 свідчить про можливість використання лінійного рівняння:

$$y = b_0 + b_1 x \tag{4.11}$$

Для визначення коефіцієнтів регресії $b_0$ та $b_1$ за формулами

$$b_0 = \frac{\Sigma y \cdot \Sigma x^2 - \Sigma(x \cdot y) \cdot \Sigma x}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}, \tag{4.12}$$

$$b_1 = \frac{n\Sigma(x \cdot y) - \Sigma x \cdot \Sigma y}{n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}. \tag{4.13}$$

Дані обчислень заносимо до табл. 4.1

Таблиця 4.1 – Методика обчислень коефіцієнтів регресії

| експ. | , °C | , *мА* | $^2$ | $^2$ | $\cdot y$ | $+ y$ | $x + y)^2$ | $- \bar{x}$ | $- \bar{y}$ | $x - \bar{x})^2$ | $y - \bar{y})^2$ | $x - \bar{x})\times$ $(y - \bar{y})$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7,1 | 4 | 50,41 | 16 | 28,4 | 11,1 | 123,21 | -12,302 | -6,674 | 151,3392 | 44,54228 | 82,10355 |
| 2 | 7,5 | 4 | 56,25 | 16 | 30 | 11,5 | 132,25 | -11,902 | -6,674 | 141,6576 | 44,54228 | 79,43395 |
| 3 | 8,1 | 4,3 | 65,61 | 18,49 | 34,83 | 12,4 | 153,76 | -11,302 | -6,374 | 127,7352 | 40,62788 | 72,03895 |
| 4 | 8,7 | 4,4 | 75,69 | 19,36 | 38,28 | 13,1 | 171,61 | -10,702 | -6,274 | 114,5328 | 39,36308 | 67,14435 |
| 5 | 9,2 | 4,6 | 84,64 | 21,16 | 42,32 | 13,8 | 190,44 | -10,202 | -6,074 | 104,0808 | 36,89348 | 61,96695 |
| 6 | 9,5 | 5 | 90,25 | 25 | 47,5 | 14,5 | 210,25 | -9,902 | -5,674 | 98,0496 | 32,19428 | 56,18395 |
| 7 | 10 | 4,7 | 100 | 22,09 | 47 | 14,7 | 216,09 | -9,402 | -5,974 | 88,3976 | 35,68868 | 56,16755 |
| 8 | 10,4 | 4,9 | 108,16 | 24,01 | 50,96 | 15,3 | 234,09 | -9,002 | -5,774 | 81,036 | 33,33908 | 51,97755 |
| 9 | 10,9 | 5,2 | 118,81 | 27,04 | 56,68 | 16,1 | 259,21 | -8,502 | -5,474 | 72,284 | 29,96468 | 46,53995 |
| 10 | 11,5 | 5,7 | 132,25 | 32,49 | 65,55 | 17,2 | 295,84 | -7,902 | -4,974 | 62,4416 | 24,74068 | 39,30455 |
| 11 | 11,9 | 5,6 | 141,61 | 31,36 | 66,64 | 17,5 | 306,25 | -7,502 | -5,074 | 56,28 | 25,74548 | 38,06515 |
| 12 | 12,2 | 5,9 | 148,84 | 34,81 | 71,98 | 18,1 | 327,61 | -7,202 | -4,774 | 51,8688 | 22,79108 | 34,38235 |
| 13 | 12,7 | 6 | 161,29 | 36 | 76,2 | 18,7 | 349,69 | -6,702 | -4,674 | 44,9168 | 21,84628 | 31,32515 |
| 14 | 13,3 | 6,6 | 176,89 | 43,56 | 87,78 | 19,9 | 396,01 | -6,102 | -4,074 | 37,2344 | 16,59748 | 24,85955 |
| 15 | 13,7 | 7 | 187,69 | 49 | 95,9 | 20,7 | 428,49 | -5,702 | -3,674 | 32,5128 | 13,49828 | 20,94915 |
| 16 | 14,1 | 7 | 198,81 | 49 | 98,7 | 21,1 | 445,21 | -5,302 | -3,674 | 28,1112 | 13,49828 | 19,47955 |
| 17 | 14,5 | 7,5 | 210,25 | 56,25 | 108,75 | 22 | 484 | -4,902 | -3,174 | 24,0296 | 10,07428 | 15,55895 |
| 18 | 15,2 | 7,9 | 231,04 | 62,41 | 120,08 | 23,1 | 533,61 | -4,202 | -2,774 | 17,6568 | 7,695076 | 11,65635 |
| 19 | 15,8 | 8,5 | 249,64 | 72,25 | 134,3 | 24,3 | 590,49 | -3,602 | -2,174 | 12,9744 | 4,726276 | 7,830748 |
| 20 | 16,2 | 8,4 | 262,44 | 70,56 | 136,08 | 24,6 | 605,16 | -3,202 | -2,274 | 10,2528 | 5,171076 | 7,281348 |
| 21 | 16,7 | 8,5 | 278,89 | 72,25 | 141,95 | 25,2 | 635,04 | -2,702 | -2,174 | 7,300804 | 4,726276 | 5,874148 |
| 22 | 17,1 | 9,2 | 292,41 | 84,64 | 157,32 | 26,3 | 691,69 | -2,302 | -1,474 | 5,299204 | 2,172676 | 3,393148 |
| 23 | 17,5 | 9,4 | 306,25 | 88,36 | 164,5 | 26,9 | 723,61 | -1,902 | -1,274 | 3,617604 | 1,623076 | 2,423148 |
| 24 | 18,2 | 9,4 | 331,24 | 88,36 | 171,08 | 27,6 | 761,76 | -1,202 | -1,274 | 1,444804 | 1,623076 | 1,531348 |
| 25 | 18,8 | 9,9 | 353,44 | 98,01 | 186,12 | 28,7 | 823,69 | -0,602 | -0,774 | 0,362404 | 0,599076 | 0,465948 |
| 26 | 19,3 | 10,7 | 372,49 | 114,49 | 206,51 | 30 | 900 | -0,102 | 0,026 | 0,010404 | 0,000676 | -0,00265 |
| 27 | 19,9 | 10,8 | 396,01 | 116,64 | 214,92 | 30,7 | 942,49 | 0,498 | 0,126 | 0,248004 | 0,015876 | 0,062748 |
| 28 | 20,3 | 11 | 412,09 | 121 | 223,3 | 31,3 | 979,69 | 0,898 | 0,326 | 0,806404 | 0,106276 | 0,292748 |
| 29 | 20,9 | 11,2 | 436,81 | 125,44 | 234,08 | 32,1 | 1030,41 | 1,498 | 0,526 | 2,244004 | 0,276676 | 0,787948 |
| 30 | 21,6 | 11,7 | 466,56 | 136,89 | 252,72 | 33,3 | 1108,89 | 2,198 | 1,026 | 4,831204 | 1,052676 | 2,255148 |
| 31 | 22 | 12,1 | 484 | 146,41 | 266,2 | 34,1 | 1162,81 | 2,598 | 1,426 | 6,749604 | 2,033476 | 3,704748 |
| 32 | 22,6 | 12 | 510,76 | 144 | 271,2 | 34,6 | 1197,16 | 3,198 | 1,326 | 10,2272 | 1,758276 | 4,240548 |
| 33 | 22,9 | 12,9 | 524,41 | 166,41 | 295,41 | 35,8 | 1281,64 | 3,498 | 2,226 | 12,236 | 4,955076 | 7,786548 |
| 34 | 23,5 | 13,3 | 552,25 | 176,89 | 312,55 | 36,8 | 1354,24 | 4,098 | 2,626 | 16,7936 | 6,895876 | 10,76135 |
| 35 | 24,1 | 13 | 580,81 | 169 | 313,3 | 37,1 | 1376,41 | 4,698 | 2,326 | 22,0712 | 5,410276 | 10,92755 |
| 36 | 24,8 | 14,1 | 615,04 | 198,81 | 349,68 | 38,9 | 1513,21 | 5,398 | 3,426 | 29,1384 | 11,73748 | 18,49355 |
| 37 | 25,3 | 14,5 | 640,09 | 210,25 | 366,85 | 39,8 | 1584,04 | 5,898 | 3,826 | 34,7864 | 14,63828 | 22,56575 |
| 38 | 26 | 15 | 676 | 225 | 390 | 41 | 1681 | 6,598 | 4,326 | 43,5336 | 18,71428 | 28,54295 |
| 39 | 26,2 | 15,2 | 686,44 | 231,04 | 398,24 | 41,4 | 1713,96 | 6,798 | 4,526 | 46,2128 | 20,48468 | 30,76775 |
| 40 | 27 | 16 | 729 | 256 | 432 | 43 | 1849 | 7,598 | 5,326 | 57,7296 | 28,36628 | 40,46695 |
| 41 | 27,5 | 16 | 756,25 | 256 | 440 | 43,5 | 1892,25 | 8,098 | 5,326 | 65,5776 | 28,36628 | 43,12995 |
| 42 | 28,2 | 16,3 | 795,24 | 265,69 | 459,66 | 44,5 | 1980,25 | 8,798 | 5,626 | 77,4048 | 31,65188 | 49,49755 |
| 43 | 28,7 | 16,7 | 823,69 | 278,89 | 479,29 | 45,4 | 2061,16 | 9,298 | 6,026 | 86,4528 | 36,31268 | 56,02975 |
| 44 | 29,3 | 17 | 858,49 | 289 | 498,1 | 46,3 | 2143,69 | 9,898 | 6,326 | 97,9704 | 40,01828 | 62,61475 |
| 45 | 29,9 | 16,9 | 894,01 | 285,61 | 505,31 | 46,8 | 2190,24 | 10,498 | 6,226 | 110,208 | 38,76308 | 65,36055 |
| 46 | 30,6 | 18 | 936,36 | 324 | 550,8 | 48,6 | 2361,96 | 11,198 | 7,326 | 125,3952 | 53,67028 | 82,03655 |
| 47 | 31,2 | 18 | 973,44 | 324 | 561,6 | 49,2 | 2420,64 | 11,798 | 7,326 | 139,1928 | 53,67028 | 86,43215 |
| 48 | 32 | 18,9 | 1024 | 357,21 | 604,8 | 50,9 | 2590,81 | 12,598 | 8,226 | 158,7096 | 67,66708 | 103,6311 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 32,5 | 19,4 | 1056,25 | 376,36 | 630,5 | 51,9 | 2693,61 | 13,098 | 8,726 | 171,5576 | 76,14308 | 114,2931 |
| 50 | 33 | 19,4 | 1089 | 376,36 | 640,2 | 52,4 | 2745,76 | 13,598 | 8,726 | 184,9056 | 76,14308 | 118,6561 |
| Σ | 970,1 | 533,7 | 21702,29 | 6829,85 | 12156,12 | 1503,8 | 52844,38 | 0 | -2,1E-14 | 2880,41 | 1133,136 | 1801,273 |

За табл. 4.1 визначаємо середні значення ознак $x$ та $y$

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{n} = \frac{970,1}{50} = 19,402\,,\ \bar{y} = \frac{\Sigma y_i}{n} = \frac{533,7}{50} = 10,674\,.$$

Зробимо перевірку згідно рівняння

$$\sum_{i=1}^{50}(x_i + y_i)^2 = \sum_{i=1}^{50} x_i^{\,2} + 2\sum_{i=1}^{50} x_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^{50} y_i^{\,2}\,. \qquad (4.14)$$

$$\sum_{i=1}^{50}(x_i + y_i)^2 = 52844,38\,,$$

$$\sum_{i=1}^{50} x_i^{\,2} + 2\sum_{i=1}^{50} x_i \cdot y_i + \sum_{i=1}^{50} y_i^{\,2} = 21702,29 + 2\cdot 12156,12 + 6829,85 = 52844,38.$$

Таким чином, табличні обчислення зроблено вірно.

В формули коефіцієнтів регресії (4.15) та (4.16) підставляємо відповідні значення з табл. 4.1:

$$b_0 = \frac{533,7 \cdot 21702,29 - 12156,12 \cdot 970,1}{50 \cdot 21702,29 - 970,1^2} = -1,459\,,\ b_1 = \frac{50 \cdot 12156,12 - 970,1 \cdot 533,7}{50 \cdot 21702,29 - 970,1^2} = 0,625\,.$$

Рівняння регресії, що визначає апроксимуючу лінійну функцію для експериментальних даних (рис. 4.11) має вигляд

$$y = -1,459 + 0,625x. \qquad (4.15)$$

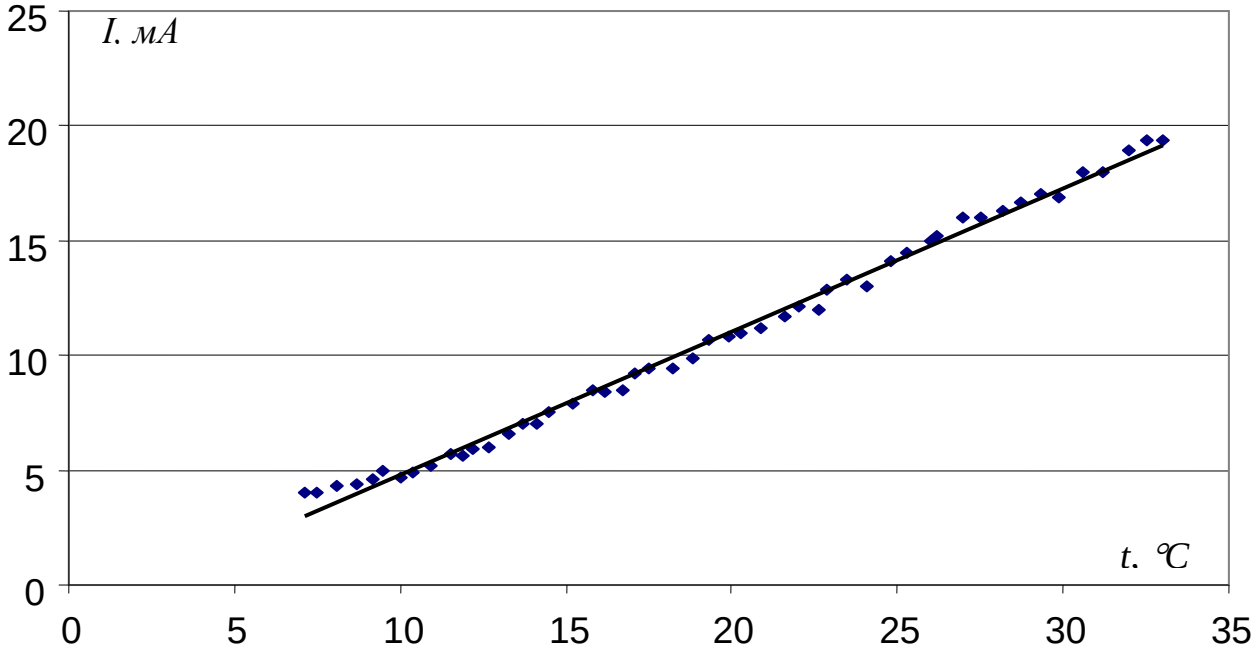



Рисунок 4.11 – Зображення лінії регресії

4.3.2 Визначення коефіцієнта кореляції

Коефіцієнт кореляції визначимо за формулою

$$r = \frac{\Sigma(x \cdot y) - (1/n) \cdot \Sigma x \cdot \Sigma y}{\sqrt{\left(\Sigma x^2 - (1/n) \cdot (\Sigma x)^2\right) \cdot \left(\Sigma y^2 - (1/n) \cdot (\Sigma y)^2\right)}}. \quad (4.16)$$

Підставивши відповідні значення з табл. 4.1, отримаємо

$$r = \frac{12156{,}12 - (1/50) \cdot 970{,}1 \cdot 533{,}7}{\sqrt{\left(21702{,}29 - (1/50) \cdot 970{,}1^2\right) \cdot \left(6829{,}85 - (1/50) \cdot 533{,}7^2\right)}} = 0{,}997.$$

Значення коефіцієнта кореляції показує, що змінні $x$ та $y$ мають прямий і тісний зв'язок.

4.3.3 Оцінка істотності коефіцієнта кореляції та лінії регресії

Для оцінки значущості коефіцієнта кореляції, тобто його статистичної значущості, використаємо критерій Стьюдента, значення якого обчислюємо за допомогою формули.

$$t_{теор} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \quad (4.17)$$

Підставивши відповідні значення, отримаємо

$$t_{теор} = \frac{0{,}997 \cdot \sqrt{50-2}}{\sqrt{1-0{,}997^2}} = 89{,}241.$$

За таблицями квантелів розподілу Стьюдента знайдемо за найбільш розповсюдженим в техніці рівнем значимості $\alpha = 0{,}05$ і числу ступенів свободи $k = n - 2 = 50 - 2 = 48$ квантиль $t_{\alpha/2;n-2} = t_{0.025;48} = 2{,}02$. Оскільки $t_{теор} = 89{,}241 > 2{,}02$, то вибірковий коефіцієнт кореляції значимо відрізняється від нуля. А це свідчить про те, що лінійна регресійна модель $y = b_0 + b_1 x$ вибрана вірно, тобто вона узгоджується з експериментальними даними.

Визначимо значимість рівняння регресії, використовуючи критерій Фішера. При цьому необхідно визначити загальну дисперсію за виразом

$$\sigma_y^2 = \frac{\Sigma y^2 - (1/n)(\Sigma y)^2}{n-1} \quad (4.18)$$

та залишкову дисперсію – за виразом

$$\sigma_{уз}^2 = \frac{\Sigma(y-\bar{y})^2}{n-2}. \qquad (4.19)$$

Фактичне значення критерію Фішера визначається виразом

$$\hat{F} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{уз}^2} = \frac{\Sigma y^2 - (1/n)(\Sigma y)^2}{\Sigma(y-\bar{y})^2} \cdot \frac{n-2}{n-1}. \qquad (4.20)$$

Дані для обчислення залишкової дисперсії зводимо до табл. 4.2

Таблиця 4.2 – Дані для обчислення залишкової дисперсії з використанням виразу $y = -1{,}459 + 0{,}625x$

| № експ. | $T_x$, °C | $I_y$, мА | $\hat{y} = -1{,}459 + 0{,}625x$ | $y - \hat{y}$ | $(y - \hat{y})^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7,1 | 4 | 2,9785 | 1,0215 | 1,043462 |
| 2 | 7,5 | 4 | 3,2285 | 0,7715 | 0,595212 |
| 3 | 8,1 | 4,3 | 3,6035 | 0,6965 | 0,485112 |
| 4 | 8,7 | 4,4 | 3,9785 | 0,4215 | 0,177662 |
| 5 | 9,2 | 4,6 | 4,291 | 0,309 | 0,095481 |
| 6 | 9,5 | 5 | 4,4785 | 0,5215 | 0,271962 |
| 7 | 10 | 4,7 | 4,791 | -0,091 | 0,008281 |
| 8 | 10,4 | 4,9 | 5,041 | -0,141 | 0,019881 |
| 9 | 10,9 | 5,2 | 5,3535 | -0,1535 | 0,023562 |
| 10 | 11,5 | 5,7 | 5,7285 | -0,0285 | 0,000812 |
| 11 | 11,9 | 5,6 | 5,9785 | -0,3785 | 0,143262 |
| 12 | 12,2 | 5,9 | 6,166 | -0,266 | 0,070756 |
| 13 | 12,7 | 6 | 6,4785 | -0,4785 | 0,228962 |
| 14 | 13,3 | 6,6 | 6,8535 | -0,2535 | 0,064262 |
| 15 | 13,7 | 7 | 7,1035 | -0,1035 | 0,010712 |
| 16 | 14,1 | 7 | 7,3535 | -0,3535 | 0,124962 |
| 17 | 14,5 | 7,5 | 7,6035 | -0,1035 | 0,010712 |
| 18 | 15,2 | 7,9 | 8,041 | -0,141 | 0,019881 |
| 19 | 15,8 | 8,5 | 8,416 | 0,084 | 0,007056 |
| 20 | 16,2 | 8,4 | 8,666 | -0,266 | 0,070756 |
| 21 | 16,7 | 8,5 | 8,9785 | -0,4785 | 0,228962 |
| 22 | 17,1 | 9,2 | 9,2285 | -0,0285 | 0,000812 |
| 23 | 17,5 | 9,4 | 9,4785 | -0,0785 | 0,006162 |
| 24 | 18,2 | 9,4 | 9,916 | -0,516 | 0,266256 |
| 25 | 18,8 | 9,9 | 10,291 | -0,391 | 0,152881 |
| 26 | 19,3 | 10,7 | 10,6035 | 0,0965 | 0,009312 |
| 27 | 19,9 | 10,8 | 10,9785 | -0,1785 | 0,031862 |
| 28 | 20,3 | 11 | 11,2285 | -0,2285 | 0,052212 |
| 29 | 20,9 | 11,2 | 11,6035 | -0,4035 | 0,162812 |
| 30 | 21,6 | 11,7 | 12,041 | -0,341 | 0,116281 |
| 31 | 22 | 12,1 | 12,291 | -0,191 | 0,036481 |
| 32 | 22,6 | 12 | 12,666 | -0,666 | 0,443556 |
| 33 | 22,9 | 12,9 | 12,8535 | 0,0465 | 0,002162 |
| 34 | 23,5 | 13,3 | 13,2285 | 0,0715 | 0,005112 |
| 35 | 24,1 | 13 | 13,6035 | -0,6035 | 0,364212 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 36 | 24,8 | 14,1 | 14,041 | 0,059 | 0,003481 |
| 37 | 25,3 | 14,5 | 14,3535 | 0,1465 | 0,021462 |
| 38 | 26 | 15 | 14,791 | 0,209 | 0,043681 |
| 39 | 26,2 | 15,2 | 14,916 | 0,284 | 0,080656 |
| 40 | 27 | 16 | 15,416 | 0,584 | 0,341056 |
| 41 | 27,5 | 16 | 15,7285 | 0,2715 | 0,073712 |
| 42 | 28,2 | 16,3 | 16,166 | 0,134 | 0,017956 |
| 43 | 28,7 | 16,7 | 16,4785 | 0,2215 | 0,049062 |
| 44 | 29,3 | 17 | 16,8535 | 0,1465 | 0,021462 |
| 45 | 29,9 | 16,9 | 17,2285 | -0,3285 | 0,107912 |
| 46 | 30,6 | 18 | 17,666 | 0,334 | 0,111556 |
| 47 | 31,2 | 18 | 18,041 | -0,041 | 0,001681 |
| 48 | 32 | 18,9 | 18,541 | 0,359 | 0,128881 |
| 49 | 32,5 | 19,4 | 18,8535 | 0,5465 | 0,298662 |
| 50 | 33 | 19,4 | 19,166 | 0,234 | 0,054756 |
| Σ | 970,1 | 533,7 | | | 6,707806 |

Підставляючи у формули (4.19), (4.20) значення із табл. 4.1 та табл. 4.2, матимемо

$$\sigma_y^2 = \frac{6829{,}85 - (1/50)(533{,}7)^2}{50-1} = 23{,}125,\ \sigma_{уз}^2 = \frac{6{,}707806}{50-2} = 0{,}14,$$

$$\hat{F} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{уз}^2} = \frac{23{,}125}{0{,}14} = 165{,}179.$$

Табличне значення критерію Фішера $F^T_{49;48;0.005}$ = 1,5 на 5 % рівні значущості менше фактичного значення. А це означає, що рівняння регресії адекватно відображає результати експерименту, а значить його необхідно використовувати в процесі зчитування показань датчика температури. Порядок визначення вказаних вище показників і рівняння наведено на слайді 05.04.

## 4.4 Синтез коректуючого пристрою системи

### 4.4.1 Визначення передаточних функцій системи

Для того щоб система відповідала заданим вимогам по точності і якості (час регулювання t $\leq$ 420 с, перерегулювання σ $\leq$ 5 %), необхідно у вихідну систему ввести коректуючий пристрій послідовний.

Передусім потрібно визначити передаточні функції для вихідної розімкнутої та замкнутої систем. Для цього, звернувшись до літературних

джерел, оберемо передаточні функції елементів системи відповідно до функціональної схеми стабілізації температурного режиму промислового холодильника (рис. 4.1). На основі цього сформуємо структурну схему, яка зображена на рис. 4.14.

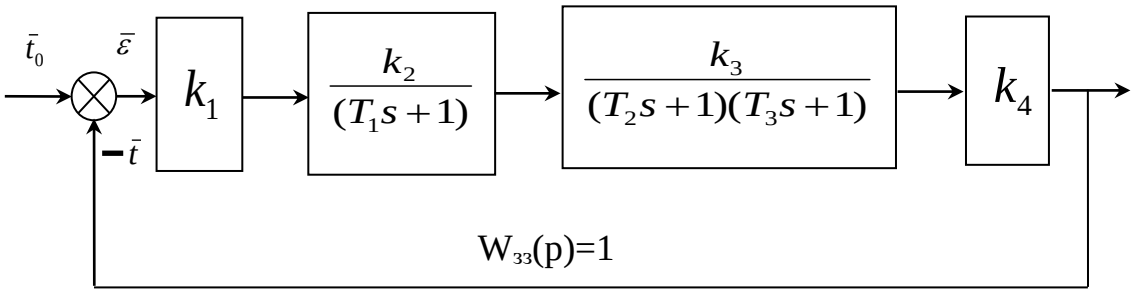



Рисунок 4.14 – Структурна схема системи стабілізації технологічного параметра холодильної камери

Знайдемо передаточну функцію розімкнутої системи. Оскільки всі елементи з'єднані послідовно, передаточна функція розімкнутої системи буде дорівнювати добутку передаточних функцій складових ланок. Таким чином, отримаємо:

$$W_p(s) = W_{ВБ}(s) \cdot W_Д(s) \cdot W_O(s) \cdot W_{ДТ}(s) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)(T_3 s+1)} \qquad (4.24)$$

де $W_{ВБ}(s) = k1 = 0{,}08$ – передаточна функція вимірювального блока, в цей вираз включено і передаточну функцію мікроконтролера $W_{МК}(s) = 1$;

$W_Д(s) = \frac{k_2}{(T_1 s+1)} = \frac{10}{(0{,}5s+1)}$ – передаточна функція двигуна;

$W_O(s) = \frac{k_0}{(T_2 s+1)(T_3 s+1)} = \frac{51{,}43}{(237{,}2624s+1)(72{,}62s+1)}$ – передаточна функція об’єкта керування;

$W_{ДТ}(s) = k_4 = 0{,}625$ – передаточна функція датчика температури.

Підставивши відповідні значення коефіцієнтів підсилення елементів системи, визначимо загальний коефіцієнт підсилення розімкнутої системи:

$$k = k_1 k_2 k_3 k_4 = 0{,}08 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 51{,}43 \cdot 0{,}625 = 25{,}72 \qquad (4.25)$$

Передаточна функція розімкнутої системи має вигляд:

$$W_p(s) = \frac{25{,}72}{(0{,}5s+1)(237{,}2624s+1)(72{,}62s+1)} \qquad (4.26)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що $W_{зз}(s) = 1$, розраховується за формулою

$$W_з(s) = \frac{W_p(s)}{1+W_p(s)} = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)+k}. \qquad (4.27)$$

Вставивши відповідні значення коефіцієнтів підсилення та постійних часів елементів системи, отримаємо:

$$W_з(s) = \frac{25{,}72}{(0{,}5s+1)(237{,}2624s+1)(72{,}62s+1)+25{,}72}. \qquad (4.28)$$

Характеристичне рівняння системи має вигляд:

$$T_1T_2T_3s^3 + (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)s^2 + s(T_1 + T_2 + T_3) + 1 + k = 0. \qquad (4.29)$$

Підставивши відповідні значення коефіцієнтів підсилення та сталих часу для елементів системи, отримаємо:

$$8615s^3 + 17384{,}94s^2 + s310{,}38 + 26{,}72 = 0. \qquad (4.30)$$

На слайді 05.02 наведені вище структурна схема, характеристичне рівняння та передаточні функції розімкнутої, замкнутої системи.

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

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання оцінюється за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише з динамічних ланок, що мають стійкі характеристики (і не більше однієї інтегруючої ланки). Якщо розімкнута система є стійкою, то для забезпечення стійкості замкнутої системи необхідною та

достатньою умовою є те, щоб її амплітудно-фазова частотна характеристика не проходила через точку з координатами (-1, j0) при зміні частоти від 0 до ∞.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну $s = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, $\omega$ - частота), виділити дійсну $P(\omega)$і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до ∝, відкласти відповідні значення. Провівши вказані перетворення, за допомогою засобів математичного редактора Matcad отримаємо наступний графік амплітудно-фазової частотної характеристики (рис. 4.15). Далі збільшивши ділянку в околі точки з координатами [-1; j0] та накресливши коло одиничного радіусу, визначимо запаси стійкості за модулем і фазою (рис. 4.16). З рисунка 4.15 видно, що абсолютне значення запасу за модулем складає $З_м = 0{,}9$, а запас по фазі $З_ф = 17°$.

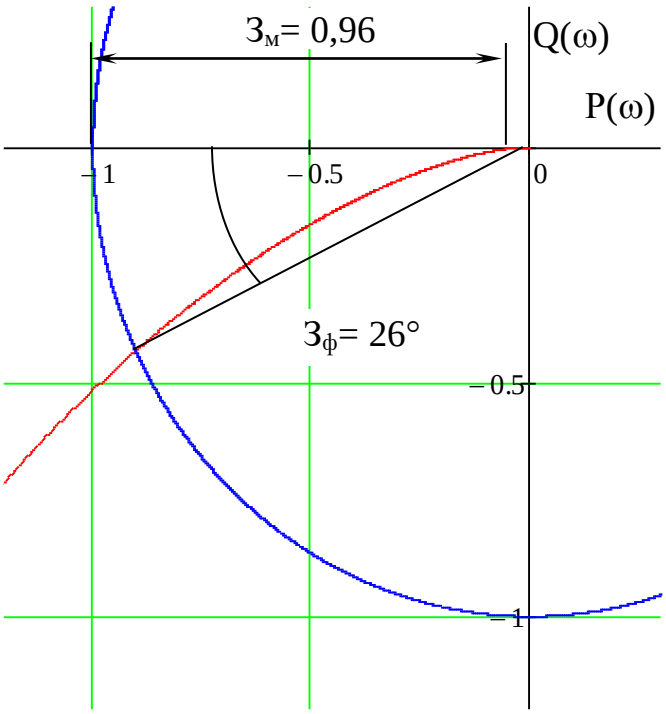



Рисунок 4.16 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

4.4.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра

Побудуємо область стійкості системи в площині параметра $k_1$, оскільки цей параметр зручно змінювати, варіюючи коефіцієнт підсилення підсилювача вимірювального блоку. Використовуючи характеристичне рівняння системи, виразимо його через $k_1$ і отримаємо:

$$K(s) = -\frac{\left(T_1T_2T_3s^3 + (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)s^2 + s(T_1 + T_2 + T_3) + 1\right)}{k_2k_3k_4}. \qquad (4.31)$$

Підставивши $s = j\omega$ та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = -\frac{-jT_1T_2T_3\omega^3 - (T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)\omega^2 + j\omega(T_1 + T_2 + T_3) + 1}{k_2k_3k_4}, \qquad (4.32)$$

$$P(\omega) = \frac{(T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3)\omega^2 + 1}{k_2k_3k_4}; \qquad Q(\omega) = \frac{\left(T_1T_2T_3\omega^3 - \omega(T_1 + T_2 + T_3)\right)}{k_2k_3k_4}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру $k_1$ при зміні частоти від - ∞ до + ∞ (рис. 4.17) (слайд 06.03).

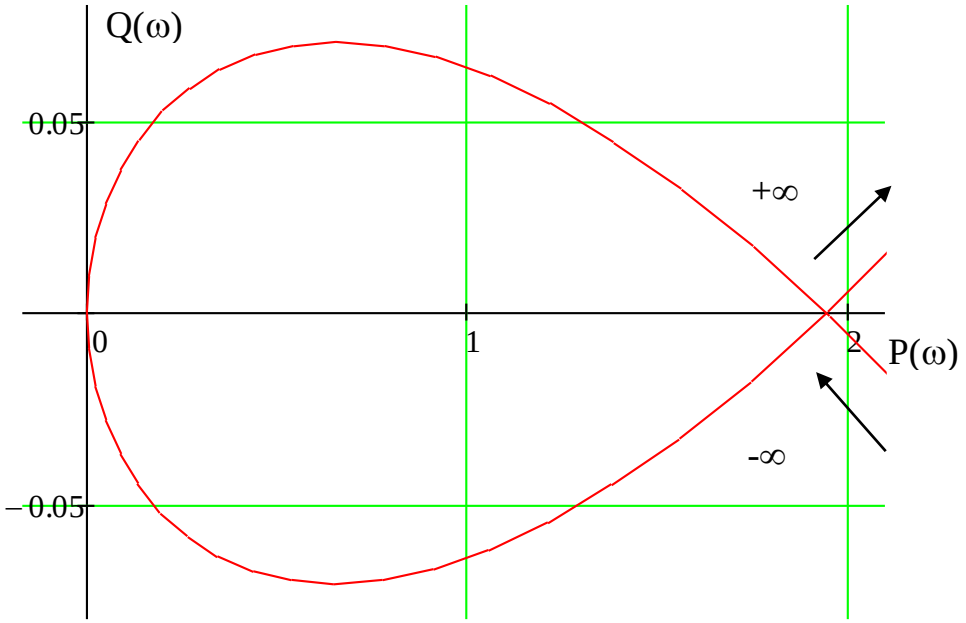



Рисунок 4.17 – D-розбиття в площині параметра $k_3$.

Оскільки в стійкій системі всі корені знаходяться ліворуч від уявної осі, при обході її від -∞ до +∞ область стійкості також буде розташована ліворуч від побудованої кривої. Для зручності пошуку ділянки стійкості можна нанести на криву (рис. 4.17) штриховку зліва при русі від -∞ до +∞. З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта $k_1$, яке в даному випадку дорівнює $k_{1кр}$ = 1,95. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення $k_1$ = 0,08 потрапляє в зону стійкості. Однак для подальших розрахунків можна збільшити це значення, тому виберемо $k_1$ = 0,128.

4.4.4 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

Для побудови ЛАЧХ за асимптотичним методом спершу необхідно визначити спрягаючі частоти, використовуючи сталу часу динамічних ланок:

$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,5} = 2$ с$^{-1}$, належить аперіодичній ланці;

$\omega_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{237,2624} = 0,004215$ с$^{-1}$, належить аперіодичній ланці;

$\omega_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{72,62} = 0,014$ с$^{-1}$, належить аперіодичній ланці.

Знайдені спрягаючі частоти відображаємо на осі частот у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_1$ є прямою з нахилом 0 дБ/дек, оскільки система не має інтегруючих динамічних ланок. Ця пряма, або її продовження при $\omega = 1$, повинна мати ординату, що дорівнює 20lg k = 32,29 дБ ($k$ = 41,14 — коефіцієнт підсилення розімкнутої системи). Після кожної з спрягаючих частот нахил характеристики змінюється на -20 дБ/дек, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших за \(\omega_0\), має нахил -60 дБ/дек.

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи визначається шляхом простого складання ординат фазових характеристик типових ланок, що входять до складу системи:

$$\phi(\omega) = \left(-arctg(\omega T_1) - arctg(\omega T_2) - arctg(\omega T_3)\right) \cdot \frac{180}{\pi}. \qquad (4.33)$$

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає в визначенні запасу стійкості (як за модулем, так і за фазою) та частоти зрізу. Для обчислення цих величин будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи, виконуючи їх взаємне розміщення (слайд 06.04).

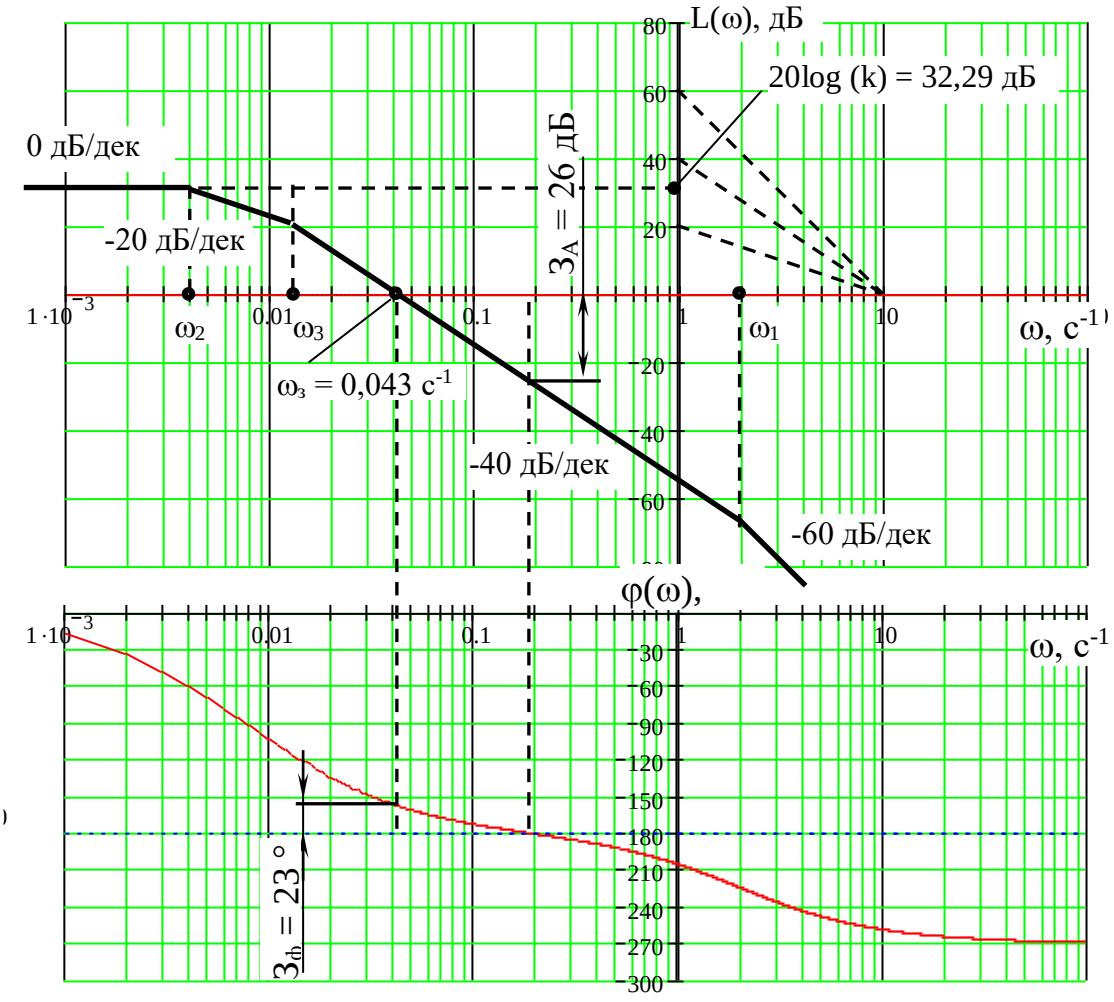



Рисунок 4.18 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_з = 0{,}043$ с$^{-1}$, запас стійкості по амплітуді $з_м \approx 26$ дБ; запас стійкості по фазі $з_ф \approx 23°$.

4.4.5 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Часова залежність регульованої величини при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого впливу описується рівнянням:

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} Pз(\omega)\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega \quad . \tag{4.34}$$

За цією залежністю за допомогою математичного редактора Matcad виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої системи та побудуємо криву перехідного процесу (рис. 4.19, слайд 07.02). З графіка можна зробити висновок, що перехідний процес є коливальним, з постійним періодом коливань і затухаючим. Також можна визначити наступні основні показники якості САР:

- час регулювання $t_p \approx 722$ с — це період від початку дії вхідного впливу до того моменту, коли система входить в зону $2\Delta$ ($\Delta = 3...5$ % від усталеного значення). Цей час залежить від швидкодії динамічних ланок та їх кількості в головному контурі. Оскільки до системи пред'являються жорсткі вимоги, цей параметр, як вимога до САР для синтезу коректуючого пристрою, необхідно

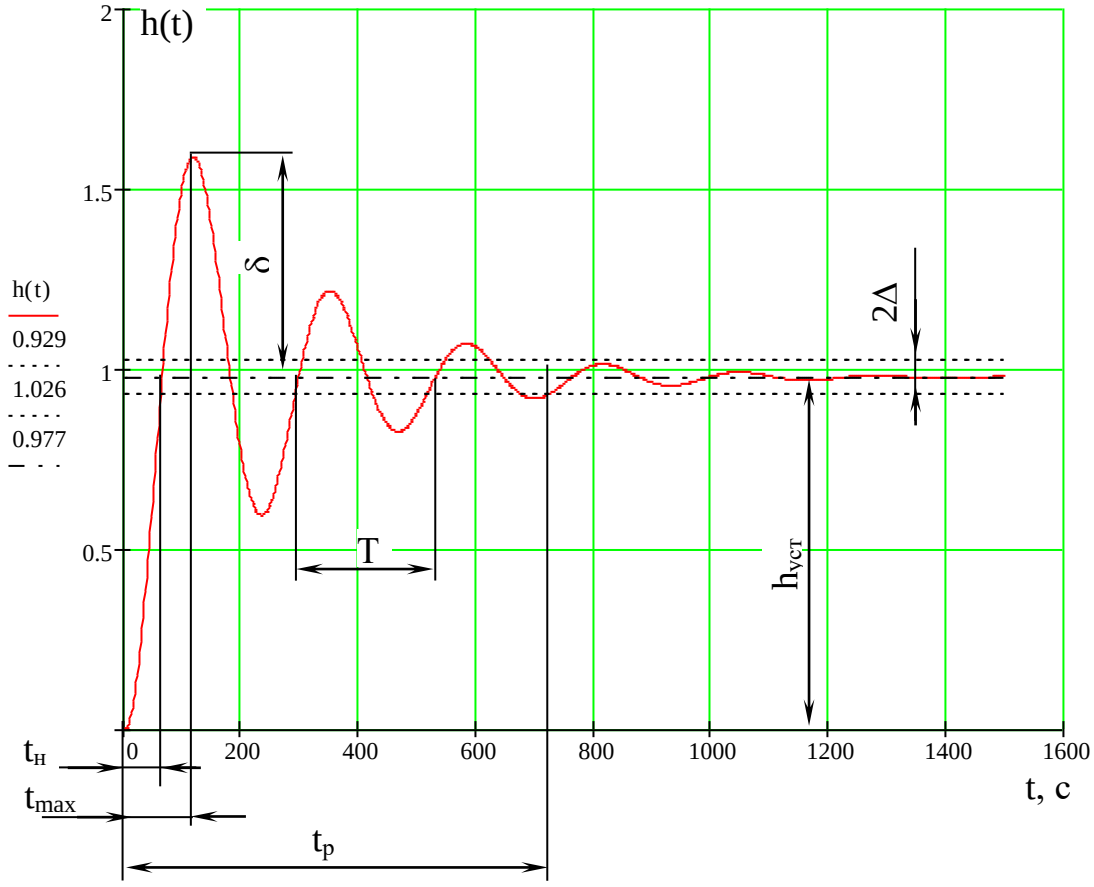



Рисунок 4.19 – Графік перехідного процесу вихідної системи

зменшити на 25 %. Тому приймаємо:$t_р$ = 540 с;

- перерегулювання δ = 58,9 %;

- частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 0{,}0044$ $с^{-1}$, де Т = 230 с – період коливань;

- час досягнення першого максимуму $t_{max}$ = 116 с;

- кількість коливань перехідного процесу k = 2;

- час наростання перехідного процесу $t_н$ = 64 с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;

- декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань d = 2,73.

4.4.6 Побудова бажаної ЛАЧХ системи

Вимоги до синтезованої САР: час регулювання $t_р$ = 540 с; максимальне перерегулювання δ = 15%; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30°. Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою. Побудова бажаної ЛАЧХ здійснюється в кілька етапів (рис. 4.20, слайд 07.01).

Побудова в області низьких частот аналогічна побудові ЛАЧХ для незмінної системи. Тобто, асимптота з нахилом 0 дБ/дек проводиться через точку з координатами 20 lg k = 32,29 дБ.

Побудова в області середніх частот є найбільш відповідальним етапом для асимптоти. В цьому діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перегулювання та тривалістю перехідного процесу. З урахуванням наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ обирається рівним -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу $\omega_з$ (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) здійснюється на основі нерівності $\omega_{з\min} \le \omega_з \le \omega_{з.опт}$. Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб $\omega_з$ була меншою за частоту зрізу $\omega_{зопт}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати та величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того, частота $\omega_з$ повинна бути більшою за $\omega_{зmin}$, яку обирають на основі заданого значення максимального перерегулювання $\delta_м$ та тривалості регулювання $t_р$.

За заданим значенням $\delta_m$ за допомогою кривої $\delta = f(P_{з.max})$ з номограми визначаємо відповідне значення $P_{з.max}$. Потім, використовуючи значення $P_{з.max}$, за допомогою кривої $t_р = f(P_{з.max})$ визначаємо значення $2\pi/t_р$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення $t_р$ = 540 с і, розв'язавши рівняння, отримуємо частоту зрізу $\omega_{з.min} = 0{,}012$ с$^{-1}$. Для побудови використовуємо трохи збільшене значення частоти зрізу $\omega_з = 0{,}02$ с$^{-1}$ і наносимо його на графік. Далі будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку $\omega_з$ на осі абсцис та з нахилом -20 дБ/дек.

Знаходимо мінімальне значення $P_{зmin}$, використовуючи відоме значення $P_{зmax}$ = 1,2 для дійсної частотної характеристики, за допомогою наближеного співвідношення $P_{зmin} = 1 - P_{зmax} = -0{,}2$.

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи за амплітудою та фазою потрібно продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості визначають за допомогою номограм L(ω) = f(φ), коли $P_з$ є сталою — це колові діаграми, де $P_з$ — значення дійсної частотної

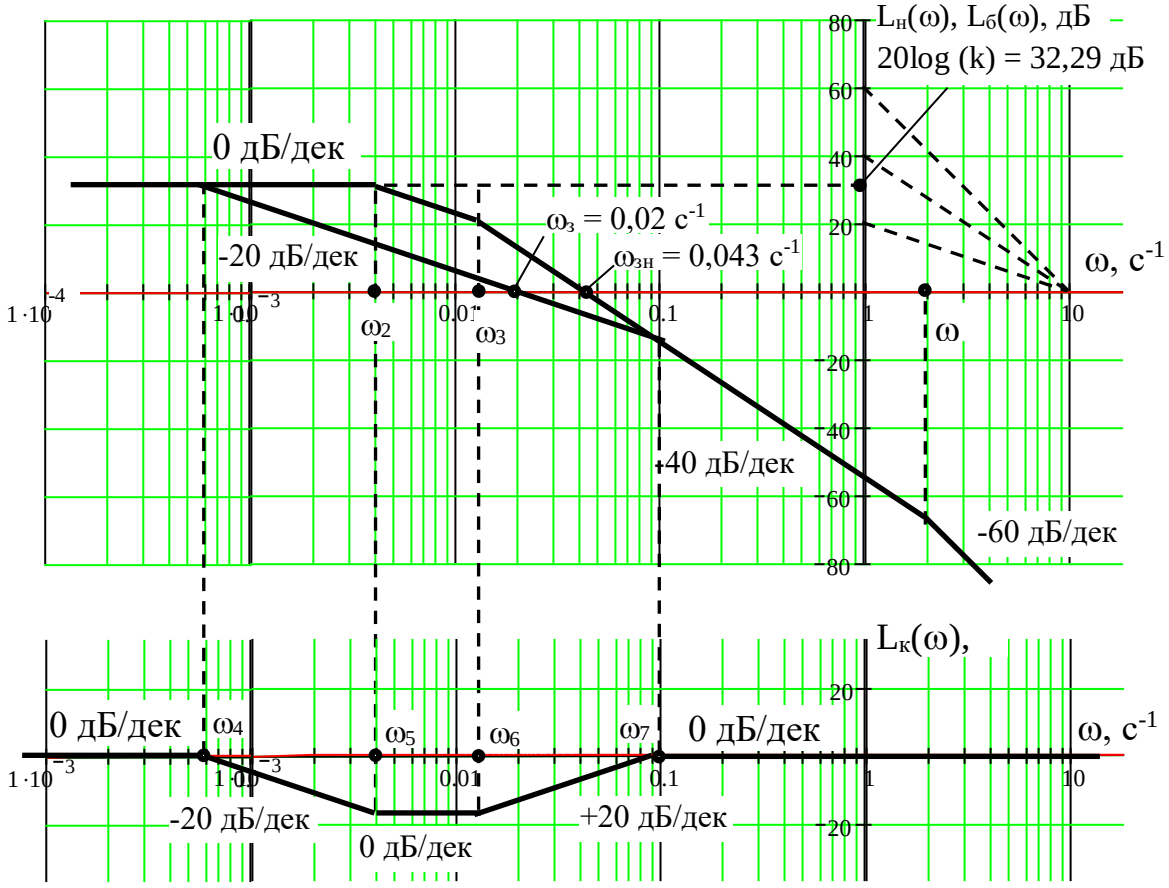



Рисунок 4.20 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коректуючого пристрою

характеристики замкнутої системи. За цією номограмою знаходяться лінії, що відповідають $P_{зmax}$ = 1,2 і $P_{зmin}$ = - 0,2. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді визначається за допомогою горизонтальних дотичних, проведених до цих кривих, і відповіді зчитуються на осі ординат: $L_1$ = 15 дБ, $L_2$ = = -15 дБ. Тому середньочастотну асимптоту слід продовжити ліворуч і праворуч до ординат L1 та L2, а потім спрягати з сусідніми ділянками.

Запас стійкості по фазі γ знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих $P_{зmax}$ = 1,2 і $P_{зmin}$ = - 0,2 і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії -180°. В даному випадку γ = 45° [18].

4.4.7 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

ЛАЧХ коректуючого пристрою знайдемо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ $L_к$ = $L_б(ω)$- $L_н(ω)$ (рис. 4.20). Обираємо схему коректуючого пристрою за виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою (рис. 4.21) [17]:

Передаточна функція у загальному вигляді такого чотириполюсника:

$$W_{кп}(s) = \frac{(T_5 s + 1)(T_6 s + 1)}{(T_4 s + 1)(T_7 s + 1)} = \frac{(T_5 s + 1)(T_6 s + 1)}{a_0 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (4.35)$$

де $a_0 = R_1R_2C_1C_2$; $a_1 = R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2$;

$T_5 = R_1C_1$; $T_6 = R_2C_2$.

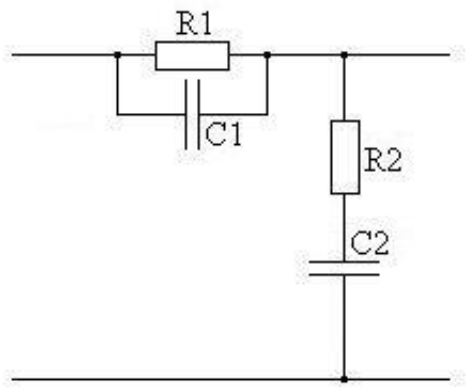



Рисунок 4.21 – Схема коректуючого пристрою

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу, отримаємо

$ω_4 = 0{,}0006\ c^{-1} \Rightarrow T_4 = 1/ω_4 = 1667$ с;

$ω_5 = 0{,}004215\ c^{-1} \Rightarrow T_5 = 1/ω_5 = 237{,}2624$ с;

$ω_6 = 0{,}014\ c^{-1} \Rightarrow T_6 = 1/ ω_6 = 72{,}62$ с;

$ω_7 = 0{,}1\ c^{-1} \Rightarrow T_7 = 1/ ω_7 = 10$ с.

Отже, передаточна функція коректуючого пристрою:

$$W_{кп}(s) = \frac{(237{,}2624s + 1)(72{,}62s + 1)}{(1667s + 1)(10s + 1)} \quad (4.36)$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавшись $C_1 = C_2 = 1000 \times 10^{-6} = 1000$ мкФ, отримаємо наступні значення опорів:

R1 = 237262,4 Ом; $R_2$ = 72620 Ом.

З шкали номінальних опорів виберемо номінали опорів резисторів для постійного опору, отримаємо: R1 – 270 кОм, $R_2$ – 75 кОм.

4.4.8 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР та визначення прямих показників якості

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(s) = \frac{k(T_5 s + 1)(T_6 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1) \cdot (T_4 s + 1)(T_7 s + 1) + k \cdot (T_5 s + 1)(T_6 s + 1)} . \quad (4.37)$$

За допомогою математичного редактора Matcad виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скоригованої системи та побудуємо криву перехідного процесу (рис. 4.22, слайд 07.02). З отриманого графіка можна зробити висновок, що перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням. Також на графіку можна визначити наступні основні показники якості САР:

- час регулювання $t_р$ = 434 с;
- перерегулювання $\delta \approx 14{,}9$ %;
- час досягнення першого максимуму $t_{max}$ = 272 с;
- час наростання $t_н$ = 162 с.

Отже, в процесі проектування за експериментальними даними була визначена передаточна функція об'єкта. Вона була отримана трьома різними способами. Одна з функцій описує аперіодичну ланку першого порядку, а два інших методи дозволяють визначити параметри аперіодичної ланки другого порядку. Саме така передаточна функція найбільш точно відображає реальний об'єкт, в якому протікають теплообмінні процеси — вулик. На основі цієї передаточної функції було розроблено коректуючий пристрій, який дозволив зменшити час регулювання з 722 с до 434 с, а перерегулювання — з 58,9 % до 14,9 %. Система виявилася стійкою, і перехідний процес, який був коливальним та затухаючим, став аперіодичним з перерегулюванням.

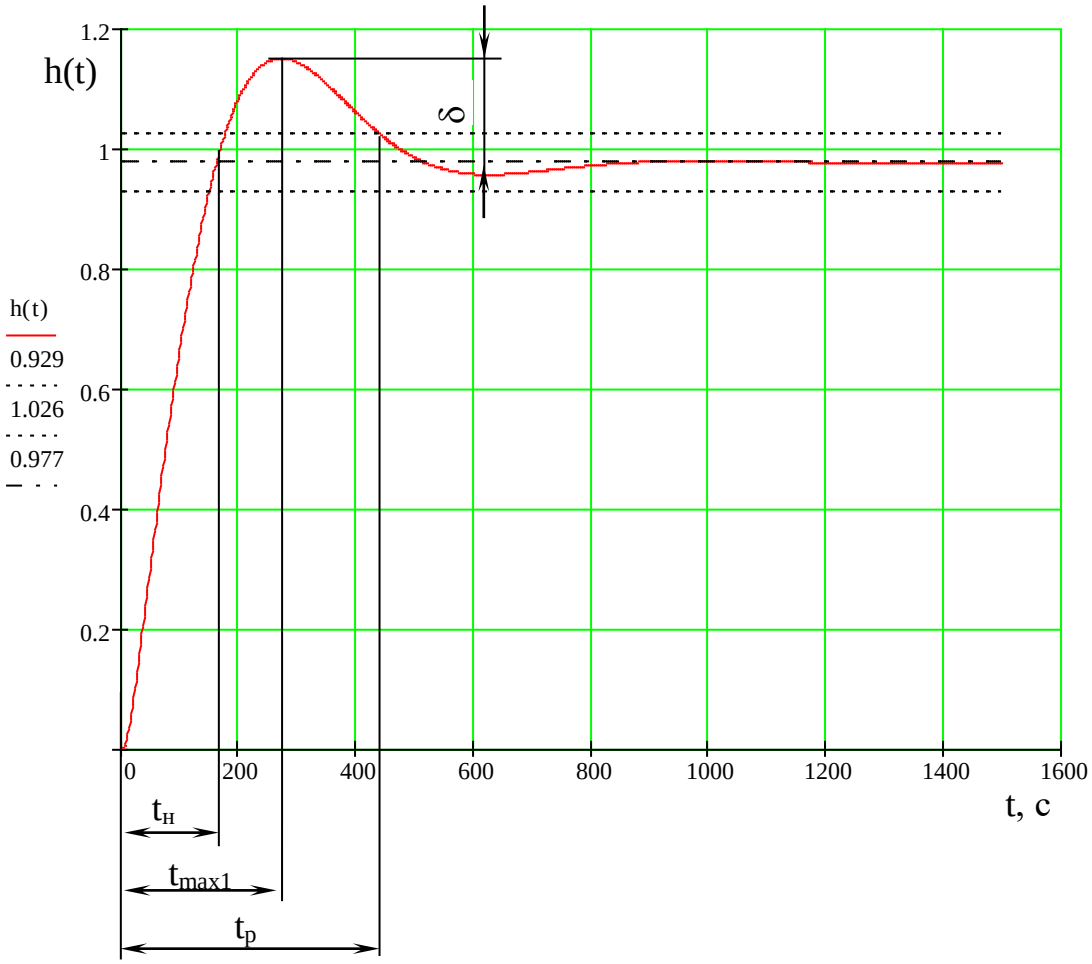



Рисунок 4.22 – Графік перехідного процесу системи, розробленої шляхом синтезу

# 5 ОПИС ОРГАНІЗАЦІЇ РОБІТ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПАРАМЕТРА ХОЛОДИЛЬНОЇ КАМЕРИ

## 5.1 Експлуатація холодильного устаткування

Метою технічної експлуатації холодильної установки є забезпечення підтримки заданих температурно-вологісних режимів в охолоджуваних приміщеннях. Основним завданням є гарантування надійної, безаварійної та безпечної роботи всього холодильного обладнання при мінімальних витратах на виробництво штучного холоду. Організація технічної експлуатації повинна відповідати вимогам надійності, довговічності, безпеки та безаварійності роботи. Витрати на виробництво холоду, пов'язані з економією електроенергії, робочої сили, води та експлуатаційних матеріалів, повинні бути мінімальними.

Ключовою умовою ефективної експлуатації холодильної установки є наявність кваліфікованого персоналу. Обслуговуючий персонал повинен орієнтуватися на технічну документацію щодо холодильного обладнання, а також дотримуватися виробничих інструкцій з обслуговування всієї установки в цілому, а також окремих її агрегатів і компонентів.

Для економічної та безпечної експлуатації холодильної установки необхідно забезпечити оптимальні умови її роботи, оснащення контрольно-вимірювальними приладами, а також пристроями автоматичного регулювання та захисту. Важливо правильно заправити систему холодильним агентом, підтримувати чистоту поверхонь теплообмінників конденсаторів і випарників, своєчасно проводити планово-профілактичне обслуговування холодильного обладнання, вести добовий журнал експлуатації установки та складати технічну звітність.

На підприємствах торгівлі та громадського харчування обслуговування холодильного обладнання здійснюють механіки, які працюють на спеціалізованих комбінатах холодильного устаткування. Технічне обслуговування включає огляди, що проводяться щомісяця, з виконанням профілактичних робіт і дрібного

ремонту, усуненням можливих несправностей та щоденною перевіркою працездатності холодильної установки. Обсяг технічного обслуговування залежить від типу машин, схеми установки та рівня її автоматизації.

## 5.2 Експлуатація та організація обслуговування пристроїв холодильної автоматики

Система автоматизації складається з двох груп елементів: одні функціонують безперервно протягом тривалого часу, а інші активуються лише за необхідності.

Перша група включає автоматичні регулятори технологічних параметрів, пристрої програмного управління та інші елементи, які не потребують частих перевірок. Їх обслуговування обмежується регулярним поточним ремонтом і усуненням виникаючих несправностей. Роботу цих пристроїв автоматики можна легко контролювати без спеціальних перевірок, а випадковий вихід з ладу зазвичай не має серйозних наслідків. Залежно від стану та якості автоматичних регуляторів, встановлених на холодильній установці, персонал складає план поточних ремонтів цих пристроїв. Систему централізованого контролю і регулювання температур в камерах слід перевіряти не рідше ніж один раз на шість місяців, а поплавкові камери регуляторів рівня — очищати від масла і бруду раз на місяць. Періодичність профілактичних робіт визначається в залежності від місцевих умов.

До другої групи належать пристрої аварійної сигналізації та захисту. Вони не спрацьовують під час нормальної роботи установки, і їх справність важко контролювати. Вихід з ладу таких приладів неприпустимий, оскільки це може призвести до серйозних наслідків. Тому для цих пристроїв необхідно розробити систему перевірок і контролю, яка гарантуватиме відсутність відмов і аварій.

Ідеальним варіантом у цьому випадку була б система з безперервним самоконтролем. Частково таку функцію виконують окремі схеми. Наприклад, включення реле зупинки компресора через нормально замкнуті контакти датчиків захисту значною мірою знижує ризик аварій. Така схема подає аварійний сигнал

при розриві ланцюга, що може бути викликано погіршенням стану контактів, випадковим обривом проводів, поломкою обмотки реле тощо. Однак цей контроль не є повним, оскільки не охоплює стан механічних частин датчиків, чистоту підвідних труб та інші аспекти. У більшості приладів самоконтроль відсутній. Тому в профілактичне обслуговування захисних приладів повинні входити обов'язкові періодичні перевірки, а їх частота залежатиме від призначення приладу та його надійності.

У компресорних цехах розподільних і виробничих холодильників перевірку приладів захисту здійснюють заступник начальника цеху з автоматики або механік з автоматики. Для контролю за проведенням перевірок ведеться спеціальний журнал профілактичних і ремонтних робіт, де фіксуються результати виконаних завдань. Не рідше одного разу на місяць цей журнал подається на затвердження головному інженеру холодильника. Для зручності користування на початку журналу розміщується затверджений графік проведення профілактичних робіт.

Перевірку реле рівня, які захищають компресори від гідравлічних ударів, проводять за допомогою спеціальних перевірочних ліній і вентилів. Під час перевірки також перевіряють, чи не забиті трубопроводи, через які прилади підключені до посудин.

Захисні реле, що контролюють тиск у системі мастила, перевіряються за допомогою байпасних вентилів, які встановлені на масляних насосах компресорів. Під час перевірки байпас поступово відкривають, спостерігаючи за показниками масляного манометра. При зупинці компресора фіксують тиск масла та тиск у картері компресора. Для більшості типів компресорів різниця між цими тисками повинна бути не менше 0,5 кгс/см².

Захисні реле, які контролюють тиск всмоктування і нагнітання, перевіряються під час роботи компресорів шляхом плавного і поступового закриття всмоктуючого та нагнітального вентилів. При цьому слід стежити за показами відповідних манометрів і фіксувати тиски, при яких спрацьовують захисні реле. Особливу обережність потрібно проявляти при випробуваннях через нагнітальний вентиль, щоб не допустити підвищення тиску вище за червону риску на манометрі.

Сигналізатори, що вимірюють температуру нагнітання та мастильного масла в картері, встановлюються в гільзах. Для перевірки їх чутливих елементів ці компоненти виймають з гільз і поміщають у спеціальну посудину або термостат. Температуру масла в посудині повільно підвищують до рівня спрацьовування реле. Після перевірки прилади встановлюють на свої місця, при цьому перевіряють, щоб гільзи були заповнені маслом. Реле, що контролюють протікання води, перевіряються за допомогою водяного вентиля, який розташований на підвідній лінії.

Під час планово-запобіжних ремонтів основного обладнання також проводиться необхідний поточний ремонт приладів. Ті прилади, які не підлягають ремонту на місці, відправляють до спеціалізованих майстерень.

Для електричних контактів в схемах управління холодильною установкою необхідно організувати плановий огляд. Під час перевірки визначають найбільш зношені контакти і періодично їх чистять. Якщо контакт не має наплавів чи глибоких ерозій, а лише покривається нагаром, його очищають жорсткою щіткою, змоченою в спирті або авіаційному бензині. Використовувати для чищення ацетон, дихлоретан чи інші розчинники забороняється. Також не рекомендується застосовувати щітки з синтетичним волокном. У випадку, якщо на контакті є наплави або раковини, їх слід попередньо зачищати оксамитовим надфілем.

Під час експлуатації важливо контролювати правильну установку плавких запобіжників. Перевищення струму плавлення може призвести до пошкодження контактів та монтажу при виникненні коротких замикань. Незважаючи на належну організацію профілактичних заходів, іноді можуть виникати відмови приладів та засобів автоматики. Для їх подальшого аналізу необхідно ретельно фіксувати відмови, зазначаючи причини, ознаки та умови, за яких вони сталися.

Вищезазначені заходи з організації обслуговування пристроїв автоматики не покривають усіх можливих ситуацій. Їх необхідно коригувати в залежності від конкретної установки. У даному випадку для розміщення мікропроцесорного блоку та іншого обладнання доцільно передбачити монтаж у компоновочній шафі, габарити якої наведено на слайді 08.01.

## 5.3 Уставки приладів автоматичного захисту

Налаштування приладів захисту проводяться перед введенням установки в експлуатацію, після чого уставки регулярно перевіряються та коригуються. Усі величини, що контролюються приладами захисту, мають робочі та гранично допустимі значення. Робочі значення відповідають нормальним умовам експлуатації і можуть змінюватися в певних межах. Гранично допустимі значення визначаються відповідно до вимог техніки безпеки.

Уставки приладів захисту можуть бути встановлені між робочими та гранично допустимими значеннями контрольованих величин. Для швидшого виявлення потенційних несправностей доцільно наближати уставки захисних приладів до робочих значень контрольованих параметрів. Оскільки робочі значення можуть змінюватися протягом року, маючи сезонні або навіть більш часті коливання, рекомендується проводити коригування уставок не менше двох разів на рік.

Для захисних датчиків рівня, які захищають компресори від гідравлічних ударів, висоту граничного рівня визначають, враховуючи призначення та конструкцію посудини або апарату. Під час пробної експлуатації обов'язково перевіряється, чи відповідають встановлені граничні рівні вимогам безпеки; при необхідності здійснюється коригування положення датчиків. Перевірку проводять шляхом дво- або тричіразового штучного заповнення посудини до граничного рівня. При цьому слід дотримуватися максимальної обережності і бути готовими у будь-який момент зупинити обладнання.

# ВИСНОВКИ

Сучасні технології виробництва холодильних установок досягли високого рівня розвитку. Використання холодильних систем з комп'ютерним управлінням значно полегшує їх експлуатацію, економить час, а комп'ютерний моніторинг стану вузлів агрегатів забезпечує їх більш надійну і безпечну роботу протягом тривалого періоду. Це підвищує ефективність виробництва, дозволяє здійснювати точний контроль температури, що гарантує надійне збереження сировини і мінімізує її втрати.

Основним недоліком таких установок є складність і висока вартість ремонту електронних компонентів комп'ютерного управління. Крім того, ці компоненти потребують спеціальних умов експлуатації. Ще одним мінусом є висока ціна холодильних установок з комп'ютерним управлінням, але економія на мінімальних втратах сировини під час зберігання в процесі виробництва повністю компенсує витрати на придбання таких агрегатів.

У ході досліджень були розглянуті фізичні принципи роботи холодильного обладнання, різні типи холодильників та їх особливості, а також визначені загальні завдання автоматизації холодильних установок. У другому розділі конкретизовано основне завдання автоматизації холодильної установки та запропоновані способи його вирішення.

У третьому розділі було проведено вибір оптимальної схеми підтримки температурного режиму в об'єкті охолодження, розроблені принципові схеми, а також здійснений підбір приладів і засобів автоматизації для ефективного управління процесом. Окрім того, обґрунтовано підхід до регулювання холодопродуктивності компресора, що дозволяє забезпечити стабільну роботу системи при змінних умовах експлуатації. На основі цього був здійснений вибір компресора, що відповідає технічним вимогам та потребам системи охолодження, забезпечуючи оптимальний баланс між енергоефективністю та надійністю роботи установки.

Четвертий розділ містить розрахункові та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність розробленої системи. Зокрема, в ньому представлено функціональну та структурну схеми системи стабілізації температурного режиму промислового холодильника, а також побудована математична модель об'єкта керування. Для цього було використано різні методи математичного опису об'єктів керування, а також розглянуті експериментально отримані дані, зокрема визначено коефіцієнт підсилення. Математичну модель об'єкта побудовано за допомогою геометричного методу та методу площ, після чого вибрана найбільш точна апроксимуюча модель. У цьому розділі також проведено дослідження стійкості системи, а також здійснено синтез коректуючого пристрою, послідовне введення якого в головний контур регулювання дозволить значно покращити показники якості системи.

У п’ятому розділі здійснено опис організації робіт, що пов’язані із застосуванням системи автоматичної стабілізації технологічного параметра холодильної камери.

У розділі також розглянуті заходи з охорони праці, зокрема проаналізовано законодавчу та нормативну базу України у сфері охорони праці. Оцінено умови праці, визначено небезпечні та шкідливі виробничі чинники, а також виконано розрахунок штучного освітлення.

Не можна не відзначити ще одну важливу проблему — нестачу кваліфікованих фахівців для обслуговування комп'ютерної техніки. Однак більшість українських підприємств змушені залучати спеціалістів з-за кордону для обслуговування імпортних холодильних установок, оскільки значна частина холодильників з цифровим управлінням поставляється саме з-за кордону. В Україні виробляється мало таких холодильників, і зазвичай вони виготовляються за ліцензією міжнародних компаній, тому ці агрегати надходять на ринок під брендами закордонних виробників. Для того щоб забезпечити конкурентоспроможність українських холодильних установок на світовому ринку, необхідно розвивати вітчизняні розробки та виробництво холодильників і холодильних систем з цифровим управлінням, а також створювати нові технології їх виробництва.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

КВП – контрольно-вимірювальні прилади;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБ – вимірювальний блок;

ПП – підсилювач потужності;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

САК – система автоматичного керування;

ТУ – технічні умови;

ДНАОП – державні нормативні акти про охорону праці;

БНіП – будівельні норми і правила;

НДДКР – науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи;

САР – система автоматичного регулювання;

ЛСА – локальна система автоматики;

КОК – контрольно-обчислювальний блок;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

ОР – об’єкт регулювання;

ДТ – датчик температури;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

ЛФЧХ – логарифмічна фазова-частотна характеристика;

ІМС – інтегральна мікросхема;

РЕА – радіоелектронна апаратура;

САННіП – санітарні норми і права;

ПУЕ – правила улаштування електроустановок.

Список літератури

1. Семенюк Д.П., Петренко О.В. Холодильне обладнання Підручник. – Харків: Харківський державний університет харчування та торгівлі (ХДУХТ), 2017. – 600 с.

2. Тітлов О.С., Горикін С.Ф. Холодильне обладнання підприємств харчової промисловості Навчальний посібник. — Львів: Новий Світ-2000, 2012. — 286 с.

3. Датьков В.П., Шевченко П.И., Коновал А.С., Процеси та устаткування для холодильної обробки харчових продуктів, торговельне устаткування Навчальний посібник. — Донецьк: Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган - Барановського (ДонНУЕТ), 2009. — 140 с.

4. Степанов Д.В., Степанова Н.Д. Холодильна техніка та технологія Навчальний посібник, Вінниця: ВНТУ. - 2008, 95 с.

5. Датьков В.П., Шевченко П.І., Коновал Г.С. Холодильне устаткування у галузі Навчальний посібник. — Донецьк: Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган - Барановського (ДонНУЕТ), 2011. — 163 с.

6. Мелейчук С.С., Арсеньєв В.М. Монтаж, експлуатація, обслуговування холодильних і теплонасосних установок Навчальний посібник.-Суми: Сумський державний університет, 2011.-183 с.

7. Мнацаканов Г.К. Холодильна техніка і технология. Навчальний посібник. Частина 1 Навчальний посібник (конспект лекцій) для студентів спеціальності 7.090520 «Холодильні машини і установки». ОДАХ, Одесса, 2008 р., 128 стор.

8. Масліков М.М. Кріогенна техніка і технологія Навчальний посібник. - К.: НУХТ, 2010. - 178 с.

9. Горін О.М. та ін. Монтаж, діагностика і ремонт обладнання галузі Навчальний посібник. — Донецьк: Донецький національний університет

економіки і торгівлі імені Михайла Туган - Барановського (ДонНУЕТ), 2013. — 71 с.

10. Мнацаканов Г.К. Основи проектування холодильників Одесса: ОДАХ, 2004. — 71 стор.

11. Черевко О.І., Кіптела Л.В., Михайлов В.М., Загорулько О.Є. Автоматизація виробничих процесів Підручник. – Харків: ХДУХТ, 2014. – 186 с.

12. Бойко Н.П., Стеклов В.К. Системы автоматического управления на базе микро-ЭВМ. – К.: Техніка, 1989. – 182 с.

13. Огородник К.В., Книш Б.П. Мікропроцесорна техніка Навчальний посібник. — Вінниця: ВНТУ, 2018. — 106 с.

14. Будіщев М.С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка Підручник. – Львів: Афіша, 2001. – 424 с.

15. Ткачов В.В., Грулер Г., Нойбергер Н., Проценко С.М., Козарь М.В. Мікропроцесорна техніка Навчальний посібник. — Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. — 192 с.

16. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Вид. 3-є, перероб і доп. / В. Ц. Жидецький. – Львів: УАД, 2006. – 336 с.

17. Практикум з охорони праці. / [Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І.]. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.

18. Босов Є. П. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва: Навчальний посібник. / Є. П. Босов, Р. В. Жесан, В. М. Каліч. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 112 с.

19. Конституція України. – К.: Вид-во Паливода А. В., 2019. – 76 с.

20. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12.

21. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80.

21. Грибан В. Г. Охорона праці: підручник. / В. Г. Грибан. – К.: ЦУЛ, 2011. – 352 с.