Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра ”Автоматизації виробничих процесів“

”Допущено до захисту“
Зав.кафедрою АВП
к.т.н., доцент
_____Дідик О.К.
”____“_____2025р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

” Розробка і дослідження системи автоматичного керування роторно-плівковим апаратом “

“ Development and research of an automatic control system for a rotary film apparatus ”

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи АК-24 М (1,4)
174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
_____ Ніколаєнко О.М.
«___»_____ 2025 р.

Керівник роботи
д.т.н, професор
_____ Мацуй А.М.
«___»_____ 2025 р.

Рецензент
_____
«___»_____ 2025 р.

м. Кропивницький

ЗМІСТ

ВСТУП.....

1 Призначення та область застосування системи керування роторно-плівковим апаратом.....

1.1 Опис технологічної схеми.....

1.2 Апаратурне оформлення установки.....

1.2.1 Апарат випарний роторно-плівковий (вертикальний).....

1.2.2 Ємкості.....

1.3 Принцип дії вертикального роторно-плівкового апарата.....

2 Обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу.....

2.1 Огляд літератури з проблеми концентрування рідких харчових продуктів.....

2.1.1 Обґрунтування вибору апарата.....

2.2 Режими роботи роторно-плівкових апаратів.....

2.3 Постановка задачі.....

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій.....

3.1 Вибір двигуна для приводу ротора РПА та розрахунок його механічних характеристик.....

3.1.1 Вибір двигуна.....

3.1.2 Перевірка вибраного двигуна.....

3.1.3 Вибір тиристорного перетворювача частоти.....

3.1.4 Складання функціональної схеми керування РПА та схеми алгоритму технологічного процесу.....

3.1.5 Аналіз модернізованої САК.....

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи.....

4.1 Експериментальна установка і методика проведення досліджень

4.1.1 Експериментальна установка

4.1.2 Методика обробки експериментальних даних

4.2 Аналіз та узагальнення результатів дослідження

Висновок

Література

Додаток А. Охорона праці

ВСТУП

Головним завданням сучасних технологій переробки харчової продукції є розробка нового та вдосконалення наявного обладнання, що дозволяє одночасно інтенсифікувати процеси та отримувати кінцевий продукт із заданими фізико-хімічними і органолептичними властивостями. Цим вимогам відповідають роторні плівкові апарати (РПА), які застосовуються у різноманітних технологічних процесах: концентруванні, дистиляції, ректифікації, десорбції, сушінні, змішуванні, гомогенізації та інших операціях, що широко використовуються у харчовій промисловості.

Для підвищення ефективності переробки сировини передбачено технічне переоснащення підприємств шляхом оснащення їх сучасним, надійним і продуктивним обладнанням. Воно забезпечує потокову організацію технологічних процесів, скорочує час обробки та підтримує низькотемпературні умови, що значно зменшує втрати та псування продуктів під час термічної обробки. Такий підхід дозволяє одночасно підвищити якість продукції та оптимізувати витрати ресурсів підприємства.

За умов реалізації зазначених технологічних процесів ротаційні пилкоподібні апарати (РПА) демонструють низку суттєвих переваг у порівнянні з апаратами інших типів: скорочений час обробки (як правило, десятки секунд), підвищена інтенсивність термообробки продуктів, компактні габарити, можливість інтеграції кількох технологічних операцій в одному апараті (наприклад, випарювання та сушка, масообмін і хімічні перетворення), а також економічна ефективність. Ці переваги зазвичай проявляються одночасно, що робить застосування РПА для обробки харчових продуктів особливо доцільним, оскільки дозволяє значно покращити техніко-економічні показники виробництва.

У консервній промисловості використання РПА для концентрування фруктових пюре з рослинної сировини дозволяє суттєво інтенсифікувати процес і досягати необхідного рівня концентрації продукту за один прохід апарата протягом декількох секунд. При згущенні плодових соків з яблук,

абрикосів, вишні, винограду, персиків до 10-16% сухих речовин (СР) і концентруванні до 40-60% СР у РПА практично виключаються необоротні зміни якісних характеристик продукту, зберігаються вітаміни, а енергетичні витрати на процес значно знижуються. Традиційне випарювання проводиться за залишкового тиску 8-21 кПа і температури 60-70 ºС.

РПА також ефективні для виробництва повидла, оскільки дозволяють концентрувати м'якоть плодів, змішану з цукром та пектином, яка має низьку текучість і для якої процес концентрування в апаратах інших типів є малоефективним або взагалі неможливим. Завдяки цьому РПА забезпечують інтенсивну обробку, зберігають якість продукту та скорочують час технологічного циклу.

Під час виробництва фруктових порошків здійснюється максимальна концентрація соків у випарних апаратах, після чого їх піддають сушінню в розпилювальних, барабанних або інших типах сушарок. Для процесу концентрації продукту за один прохід доцільно використовувати РПА, які забезпечують високий ступінь концентрування. Крім того, для виготовлення фруктових порошків ефективні РПА комбінованого типу з вертикальними та горизонтальними секціями, що дозволяє довести соки до сухого залишку та підвищити продуктивність обладнання.

Окрім процесів концентрування харчових продуктів, масообмінних і масообмінно-реакційних процесів, РПА застосовують для різних технологічних операцій, зокрема для змішування інгредієнтів у харчовій промисловості.

Наприклад, у кондитерському виробництві РПА можуть використовувати для приготування помадки холодним способом за кімнатної температури шляхом рівномірного перемішування дрібнокристалічної цукрової пудри з водою, патокою, сиропом та ароматизаторами. При цьому відпадає необхідність у попередньому приготуванні сиропів, їх уварюванні та охолодженні, що значно спрощує технологічний процес і скорочує час виробництва.

Завдяки інтенсивній роботі лопатей роторно-плівкового апарату (РПА) ці пристрої ефективно застосовуються для приготування кондитерської піни з яєчного білка шляхом насичення його бульбашками повітря, що подається у корпус апарату. Тривалість цього процесу становить лише кілька десятків секунд, у той час як у традиційних збивальних машинах на отримання піни витрачається 35-45 хвилин.

РПА також доцільно використовувати у кондитерському виробництві для приготування збитих начинок карамелі на основі увареного цукрово-паточного сиропу та білка. У такому випадку апарат поєднує процеси змішування сиропу з білком та збивання отриманої маси, забезпечуючи однорідність і необхідну текстуру продукту.

Висока здатність РПА до інтенсивного змішування робить його придатним для виробництва борошняних кондитерських виробів та маргаринів, де він забезпечує формування стабільних емульсій типу вода-жир. Таким чином, роторно-плівкові апарати мають широку сферу застосування і відіграють важливу роль у харчовій промисловості.

Проте нині РПА використовуються значно менше, ніж їх потенціал дозволяє. Обмежене промислове застосування пояснюється конструктивними особливостями нестандартних апаратів, недостатньою автоматизацією технологічних процесів і відсутністю систематизованих даних щодо обробки харчових продуктів у РПА.

Впровадження автоматизованих систем керування дозволяє усунути ці обмеження. Автоматизація забезпечує роботу апарату в оптимальних режимах, покращує якість продукції, підвищує зручність експлуатації та дає змогу постійно контролювати концентрацію та сушіння продукту під час виробництва.

Дана випускна кваліфікаційна робота присвячена дослідженню технологічного процесу РПА та оптимізації його роботи шляхом застосування системи автоматичного керування, що підвищує ефективність виробничого процесу та якість кінцевої продукції.

1 Призначення та область застосування системи керування роторно-плівковим апаратом

1.1. Опис технологічної схеми

Процес концентрування томатного соку здійснюється наступним чином. Початковий розчин томатного соку з температурою 50 °С та масовою часткою сухих речовин 4 % надходить у ємність початкового продукту Е1 (рис. 1.1).

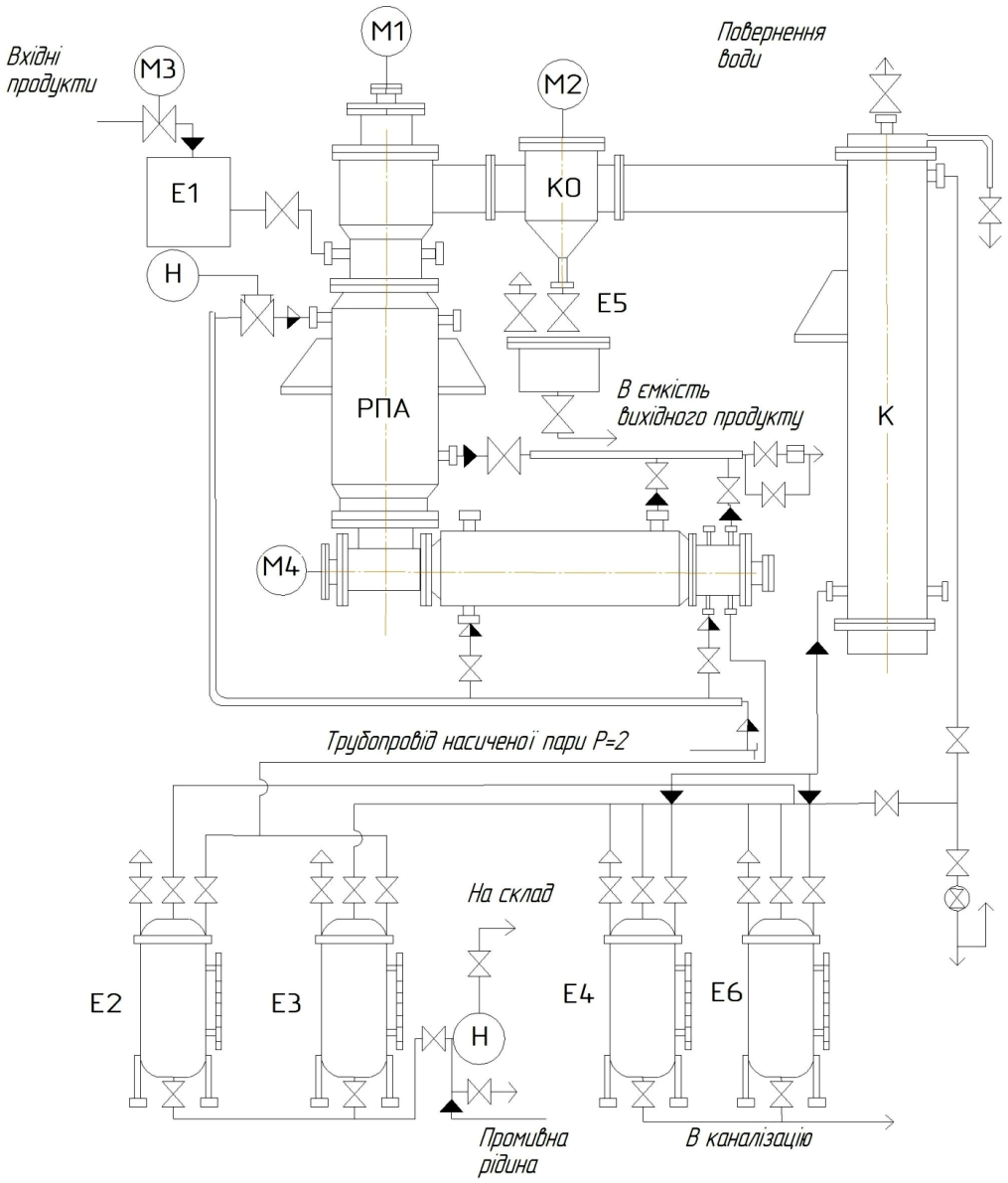


Рисунок 1.1 – Технологічна схема установки переробки томатного соку в пасту

З ємності Е1 розчин самопливом через систему регулювання подається у вертикальний РПА. Під час проходження через вертикальний апарат при обробці 1200 кг розчину відділяється 1063 кг води, після чого напівфабрикат переходить у горизонтальний апарат, де відбувається остаточне концентрування продукту. На виході з горизонтального апарату початковий продукт досягає концентрації сухих речовин 70 %.

Цей процес концентрації ефективно здійснюється за умов обертання роторів і подачі теплоносія у сорочку апарату при температурі 105 °С, що забезпечує необхідний тепловий режим для випаровування води та отримання висококонцентрованого томатного соку.

Кубовий залишок самопливом надходить у місткості Е2 та Е3. Пари дистиляту проходять через вертикальні та горизонтальні апарати і потрапляють у краплевідбійник, де відбувається їх очищення від крапель продукту, після чого пари спрямовуються в конденсатор К. У конденсаторі відбувається конденсація за рахунок підведення охолоджуючої води, а утворений конденсат надходить у місткості дистиляту Е4 та Е6.

Отриманий товарний продукт насосом подається на склад. Під час розвантаження місткостей дистиляту та кубового осаду одночасно здійснюється напрацювання продукту в інші парні ємності. Перемикання процесів між різним устаткуванням або місткостями виконується шляхом підключення або відключення атмосфери та вакууму, що забезпечує безперервність технологічного циклу.

Після завершення технологічного процесу концентрації проводиться дезактивація обладнання:

1. Технологічна лінія та устаткування промиваються 10%-им розчином NaOH, який подається через насос Н1 для ефективного видалення залишків продукту.

2. Після проведеної дезактивації здійснюється промивка лінії та обладнання чистою питною водою для повного видалення залишків лужного розчину та забезпечення безпечної експлуатації.

1.2 Апаратурне оформлення установки

У створеній установці в якості основного обладнання використано РПА зі стікаючою плівкою. До допоміжного обладнання віднесено збірки, вакуумний конденсатор, насоси, а також інші типові пристрої та арматуру.

Нижче наведено опис апаратів разом із поясненням принципу їх роботи.

1.2.1 Апарат випарний роторно-плівковий (вертикальний)

Апарат включає циліндричний корпус із секційною сорочкою для обігріву парою та ротор із центральним валом, на якому шарнірно закріплені лопаті через диски. До складу апарату входять чотири теплообмінні царги, кришка з приводом та сепаруючі пристрої. Вал ротора обертається електромотором через редуктор. Верхня частина корпусу виконує функцію сепаратора, відділяючи бризки продукту разом із вторинною парою. Верхній кінець валу закріплений у підшипниковому вузлі, змонтованому на стійці приводу на кришці апарату. Підшипниковий вузол виноситься за межі зони теплообміну і розташовується на торцевих ущільненнях. Підшипник є радіально-наполегливим.

Вакуумний вертикальний конденсатор призначений для конденсації вторинної пари, що надходить із сепаратора вертикального роторно-плівкового апарату, забезпечуючи ефективне відведення пари та підвищення продуктивності системи.

1.2.2 Ємкості

1) Ємкість Е1.

Ємність Е1 використовується для тимчасового накопичення початкового розчину томатного соку. Конструктивно вона виконана у вигляді вертикальної судини з конічними днищами зверху та знизу і оснащена необхідними технологічними штуцерами для підключення трубопроводів та контролю параметрів рідини.

2) Ємкість Е2, Е3.

Призначений для тимчасового зберігання концентрованого розчину томатної пасти.

Конструктивно виконаний як вертикальна ємність із плоскою верхньою кришкою та конічним нижнім днищем. Оснащений технологічними штуцерами для подачі томатного соку, води та повітря, а також для відведення готового розчину.

3) Ємкість Е4,Е6.

Служить для накопичення дистиляту, що надходить із вертикального вакуумного конденсатора.

Конструктивно виконана у вигляді вертикальної ємності з двома плоскими днищами, оснащеної необхідними технологічними патрубками для підключення до обладнання та контролю процесу.

1.3 Принцип дії вертикального роторно-плівкового апарата

Апарат роторно-плівковий складається з вертикального та горизонтального модулів, з'єднаних між собою перехідним елементом (рис. 1.2).

Кожна царга апаратів обладнана штуцерами для подачі теплоносія та продування сорочки. Вертикальний модуль оснащений сепаратором, верхня кришка якого включає привід ротора та сальникове ущільнення торця. Горизонтальний апарат має дві кришки з сальниковими або торцевими ущільненнями, при цьому привід розташовано на правій кришці.

Ротори апаратів відрізняються за функціональним призначенням. Ротор вертикального апарату обладнано шарнірними лопатками, які під дією відцентрової сили притискаються до стінок корпусу, що сприяє інтенсивному перемішуванню рідкої плівки та високій ефективності теплообміну.

Ротор горизонтального апарату має жорстку конструкцію з скребковими елементами, що переміщують продукт уздовж апарату, а також шарнірно закріплені ножі для видалення твердих нальотів із стінок корпусу. Крім того, горизонтальний ротор оснащено навитою гвинтовою смугою, яка

сприяє просуванню оброблюваної маси і встановлюється в зоні вхідного та вихідного штуцерів апарату.

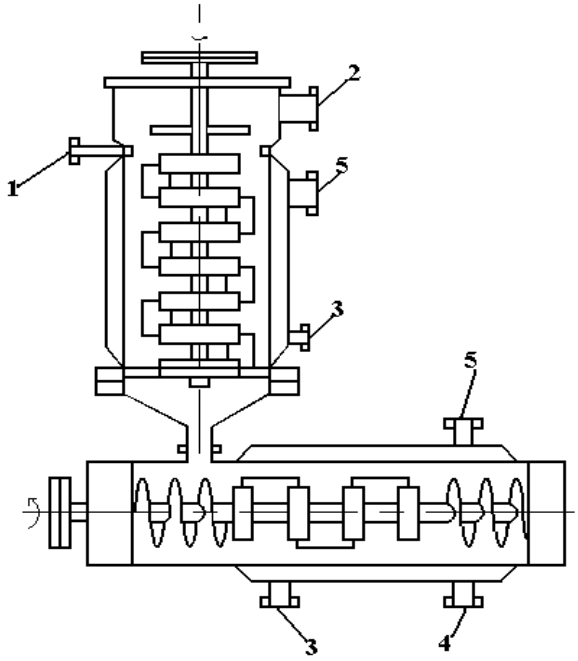


Рис.1.2. Принципова схема установки.

1-введення вихідного продукту; 2-вивід вторинної пари; 3- вивід теплоносія; 4- вивід готового продукту; 5-введення теплоносія.

Концентрований продукт, переміщаючись через вертикальні та горизонтальні апарати, зазнає фазового переходу від рідкої форми до пари та пастоподібного стану.

Технологічна конструкція апарата передбачає використання типових і стандартних вузлів та деталей, що забезпечує надійність і зручність обслуговування.

Апарат може транспортуватися залізничним, автотранспортом або водним транспортом. Його слід зберігати в умовах, що захищають від механічних пошкоджень та атмосферної корозії. Вертикальний апарат встановлюється у вертикальному положенні за допомогою опори, а горизонтальний – на рамі.

Пристрій забезпечує безпечне ведення технологічного процесу: він герметичний, а всі обертові деталі захищені кожухами. Конструкція виконана

з урахуванням правил захисту від статичної електрики, санітарних норм проектування промислових об’єктів та загальних гігієнічних вимог.

Апарат укомплектований стандартними редукторами з електродвигуном і іншими необхідними комплектуючими. Ротори вертикального та горизонтального апарату можуть легко вийматися частинами, що дозволяє оперативно усувати несправності та проводити технічне обслуговування без тривалих простоїв.

Принципова особливість роторно-плівкових апаратів (РПА), що забезпечує їхню високу продуктивність, полягає у формуванні плівкового потоку продукту та його інтенсивній турбулізації під дією лопатей, закріплених на обертовому валу ротора. Завдяки цьому гідродинамічні властивості перебігу оброблюваного продукту значно активніші, а швидкість теплообміну та масообміну перевищує показники плівкових апаратів інших конструкцій.

РПА здобули широке застосування у харчовій промисловості, де потрібна ефективна обробка рідких продуктів. Лопатеві роторно-плівкові апарати належать до класу апаратів з механічним введенням енергії, коли обертання ротора створює на робочій поверхні плівковий потік рідини. Вільна поверхня плівки продукту взаємодіє з парогазовою фазою, розташованою всередині корпусу апарату. У зв’язку з цим, згідно з класифікацією академіка В.У. Кафарова, РПА відносяться до апаратів із фіксованою поверхнею рідини та парогазової фази, що визначає їхню специфіку тепло- та масообмінних процесів.

На рис. 1.3 представлена принципова схема роторно-плівкового апарату із зазначенням напрямку руху матеріальних потоків. Апарат має вертикальний корпус 3, оснащений сорочкою для обігріву або охолодження 1, вал ротора 2 із закріпленими на ньому лопатками 13, камеру краплевідділення (сепаратор) 6 та камеру розвантаження 17. У камері краплевідділення на валу розташований краплевідбійник 5, призначений для сепарації вторинної пари, що надходить із корпусу в камеру сепарації.

Підшипникові вузли 7 і 16 забезпечують обертання вала ротора навколо його вертикальної осі.

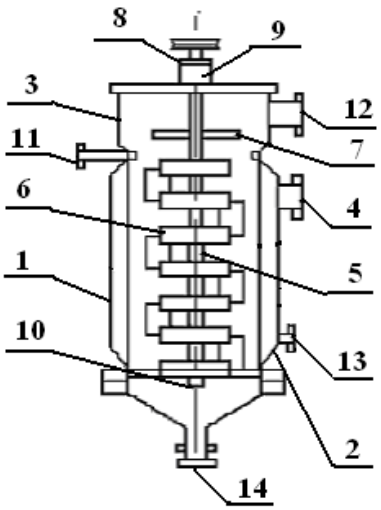


Рис.1.3. Вертикальний РПА.

1-корпус; 2-рубашка для теплоносія; 3-сепаратор; 4- штуцер граючої пари; 5-ротор;6-лопатки; 7-відцентровий відбійник; 8-верхній підшипник; 9-сальник;10-нижній підшипник;11-штуцер для підведення продукту; 12-штуцер вторинної пари; 13-штуцер конденсату; 14-штуцер концентрату.

Привід ротора зазвичай реалізується через клинопасову передачу 8 або за допомогою редуктора електродвигуна. Вихідний продукт, що надходить на обробку, подається в апарат через патрубок 4 і розподільний пристрій 10. При виході продукт захоплюється обертовими лопатками і рівномірно розподіляється по робочій поверхні корпусу 3 у вигляді тонкої плівки. Течія плівки по поверхні апарату відбувається під дією сили тяжіння та впливом лопатей, тому в першому наближенні рух матеріалу можна розглядати як траєкторію, схожу на гвинтову лінію.

Такий принцип роботи забезпечує ефективне розподілення оброблюваного продукту і рівномірне формування плівки на поверхні корпуса, що є критично важливим для стабільності технологічного процесу та якості кінцевого продукту.

Завдяки обертанню лопатей досягається не лише рівномірне зрошування робочої поверхні продуктом, але й інтенсивне перемішування

плівки, що сприяє постійному оновленню її вільної поверхні та зменшенню товщини в’язкого шару всередині оброблюваної плівки. Така динаміка створює оптимальні умови для процесів тепломасопереносу на межі контактної поверхні корпусу та плівки продукту, усередині самої плівки, а також на границі вільної поверхні з парогазовою фазою. Внаслідок цього теплофізична обробка матеріалу в роторно-плівковому апараті відбувається максимально ефективно та швидко.

Вторинні пари, що виникають у процесі роботи, спрямовуються з корпусу апарату в камеру краплевідділення, а потім відводяться через патрубок 9. Оброблений продукт переміщується з робочої зони корпусу в камеру розвантаження 17 і далі через патрубок 15 виводиться з апарату. Залежно від технологічних вимог до теплофізичної обробки продукту, теплоносій подається в сорочку 1 через патрубок 11, а відпрацьований теплоносій виводиться через патрубок 14. У деяких режимах для досягнення максимального ступеня концентрації продукту доцільно вводити рідкий теплоносій через патрубок 14, а виведення здійснювати через патрубок 11.

Під час роботи апарату, зображеного на рис. 1.3, оброблюваний продукт і вторинна пара рухаються всередині корпусу у протитечії один до одного, що забезпечує ефективний теплообмін і масоперенос. Апарат може експлуатуватися як при атмосферному тиску, так і під вакуумом. У випадку роботи під розрідженням патрубок відведення вторинної пари 9 підключається до вакуумної лінії для підтримання необхідного тиску всередині корпусу.

Розподіл початкового продукту на вході в РПА може здійснюватися не лише за допомогою стаціонарних розподільників або розподільників, встановлених безпосередньо на корпусі апарату (як показано на рис. 1.3), а й із використанням інших типів, наприклад, обертових розподільників, закріплених на валу ротора. Важливо відзначити, що наявність окремого розподільника для подачі початкового продукту не завжди є необхідною. У деяких випадках для стабільної роботи РПА достатньо розташувати патрубок

введення матеріалу тангенціально щодо робочої поверхні корпусу або забезпечити апарат кількома патрубками для подачі початкового продукту, що дозволяє рівномірно розподіляти матеріал по робочій зоні.

Завдяки активній турбулізації продукту лопатями РПА коефіцієнт теплопередачі під час термообробки харчових продуктів може перевищувати 3000 Вт/(м²·К), при цьому середній час перебування матеріалу в апараті складає всього кілька десятків секунд. Однією з ключових переваг РПА є можливість обробки високов'язких продуктів з в'язкістю до 1000 Па·с без утворення накипу або відкладень на внутрішніх поверхнях корпусу, що досягається за рахунок високих градієнтів швидкості в плівці продукту, які зазвичай варіюють у межах 5000-15000 1/с.

Ще однією характерною особливістю РПА є низький гідравлічний опір каналу вторинної пари, яке порівнянне або навіть менше за опір апаратів з вільно падаючою плівкою, а також відсутність гідростатичного стовпа продукту, що запобігає гідростатичній депресії під час концентрації і знижує ризик перегрівання матеріалу.

Підключення апарату до вакуумної лінії дозволяє проводити термообробку під зниженим тиском, що забезпечує високий ступінь концентрації продукту у співвідношенні 1:5-1:50 (відношення витрат готового та вихідного продукту). Водночас вакуумний режим сприяє ефективній відгонці легколетучих компонентів, завдяки зниженню температури процесу та оперативному видаленню вторинної пари, що утворюється під час термообробки.

Ці особливості роблять роторно-плівкові апарати ефективними для швидкої та якісної термообробки різноманітних харчових продуктів із мінімальними втратами та високим рівнем стабільності процесу.

Зазначені характеристики визначають широкі можливості використання РПА для термообробки харчових продуктів із максимальним збереженням їх якісних властивостей. РПА ефективні при випаровуванні, сушінні, дистиляції, десорбції, ректифікації, дезодорації, проведенні хімічних

реакцій з рідкими реагентами, нагріванні та охолодженні, що робить їх популярними в різних переробних галузях агропромислового комплексу.

Рис.1.3 демонструє загальні принципи побудови РПА як багатоцільової апаратурно-технологічної системи для реалізації перерахованих теплофізичних процесів харчової промисловості. Водночас РПА мають численні конструктивні варіанти, що відрізняються способом кріплення лопатей на роторі, виконанням корпусу, ротора та підшипникових вузлів, формою лопатей, напрямком руху продукту щодо парогазової фази, а також низкою інших параметрів.

Різноманіття конструкцій зумовлено тим, що основні елементи РПА проєктуються з урахуванням конкретних завдань термообробки, забезпечення оптимальної щільності зрошення робочої поверхні, адгезійних властивостей продукту, технологічних вимог до готового виробу, зручності монтажу та обслуговування, а також інших експлуатаційних факторів. Урахування цих численних умов обумовлює індивідуальні особливості багатьох існуючих моделей РПА.

2 Обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1 Огляд літератури з проблеми концентрування рідких харчових продуктів

2.1.1 Обґрунтування вибору апарата

Даний апарат призначений для концентрації томатної пасти з продуктивністю від 2 до 33 тонн пасти за зміну, використовуючи свіжі зрілі томати або томатний сік як напівфабрикат.

Для забезпечення потреб населення у високоякісних харчових продуктах необхідно підвищувати ефективність виробництва консервованих продуктів, що отримуються методом випаровування та обезводнення. Досягнення цієї мети передбачає широке впровадження сучасних високоефективних технологій та обладнання для виробництва концентрованих і порошкоподібних харчових продуктів. При цьому технологічні процеси повинні здійснюватися при мінімально можливих температурах та скороченій тривалості термообробки для збереження харчових властивостей сировини.

У зв’язку з цим РПА є оптимальним рішенням для концентрації харчових продуктів, що пояснює їх широке використання в різних галузях харчової промисловості: цукровій, крохмалопатоковій, олієекстракційній, кондитерській та інших. Крім того, РПА застосовують у спиртовій промисловості для ректифікації спиртових сумішей, що підтверджує універсальність та ефективність цього типу обладнання.

РПА характеризуються значними перевагами порівняно з іншими видами апаратури, що робить їх використання економічно та технологічно доцільним у процесі концентрації соків і паст. Завдяки цим властивостям вони знайшли широке застосування в консервній промисловості, де здійснюється різноманітна обробка харчової сировини. Процес уварювання соків і паст зазвичай проводиться при залишковому тиску 8-21 кПа та температурі 60-95 °С, що дозволяє отримувати продукти високої якості.

Безперервний режим уварювання в таких умовах та при скороченій тривалості процесу ефективно реалізується саме в РПА.

Короткочасність обробки томатних соків у РПА сприяє збереженню їхніх органолептичних властивостей, мінімізації необоротних змін якості, збереженню вітамінів та зниженню енерговитрат на проведення процесу.

Згущування плодових соків і паст із концентрацією 10-16 % та 15-70 % відповідно, а також концентрованих соків із вмістом сухих речовин 40-60 % здійснюється з яблук, абрикосів, томатів, персиків та іншої харчової сировини. Використання РПА дозволяє практично повністю уникати погіршення якості готових продуктів на етапі термообробки. У таких апаратах можна концентрувати як відфільтровані й дефектовані, так і каламутні соки, що забезпечує високу гнучкість технологічного процесу та збереження корисних властивостей сировини.

РПА широко застосовуються у виробництві повидла для випаровування м’якоті плодів, змішаної з цукром та пектином, оскільки через низьку текучість цієї суміші процес випаровування в апаратах інших типів проходить мало ефективно або взагалі неможливий, зокрема в апаратах з природною циркуляцією. РПА також використовують при виготовленні фруктових порошків, де необхідна максимальна концентрація соків у випарних пристроях.

Широке коло промислових застосувань обумовило популярність РПА на підприємствах харчової промисловості.

При виробництві томатної пасти з свіжих томатів або томатного соку доцільно використовувати РПА, які мають суттєві переваги перед апаратами інших типів. До них належать: значно скорочена тривалість процесу (зазвичай декілька десятків секунд), підвищена інтенсивність термообробки продукту, можливість одночасного виконання декількох технологічних операцій у одному апараті (наприклад, випаровування і сушка, масообмін і хімічні перетворення) та підвищена економічність.

Ці переваги, як правило, реалізуються одночасно, що дозволяє застосування РПА забезпечувати суттєве підвищення техніко-економічних показників виробництва у порівнянні з іншими апаратами, широко використовуваними на консервних підприємствах.

У зв'язку з наведеним, при розробці технічного проекту обрано роторно-плівковий апарат із шарнірними лопатками. Такий вибір зумовлений тим, що запропонована конструкція забезпечує підвищену продуктивність томатної пасти завдяки інтенсивній термообробці та суттєвому скороченню часу перебування продукту в зоні випаровування.

Тонкоплівкові роторні апарати дедалі ширше використовуються у хімічній промисловості та суміжних галузях. Вивченню процесів теплопередачі в таких установках присвячено численні наукові роботи.

Одним із перших досліджень є робота Шнайдера [1], де наведено залежність коефіцієнта теплопередачі від фізико-хімічних властивостей продукту та описано передбачувану зміну цього коефіцієнта вздовж апарату. Встановлено, що при збільшенні в'язкості випаровуваного продукту коефіцієнт теплопередачі знижується до нижньої частини апарату, тоді як температура рідини підвищується, наближаючись до температури гріючої пари. Факт досягнення максимальної температури лише в нижній зоні, де концентрується найбільша частка продукту, є важливою перевагою тонкоплівкового апарату порівняно з трубчастими конструкціями, забезпечуючи більш ефективне нагрівання та контроль процесу випаровування.

Киршбаум і Дітер [2], досліджуючи випаровування однокомпонентних рідин, встановили, що в апаратах із шарнірно закріпленими лопатками коефіцієнт теплопередачі практично не залежить від теплового навантаження на поверхню теплообміну та різниці температур між кипінням продукту і стінкою апарату. Водночас він зростає зі збільшенням щільності зрошування і досягає максимуму при певному значенні цього параметра.

На підставі цих спостережень автори дійшли висновку, що випаровування переважно відбувається з вільної поверхні плівки рідини. Якби кипіння відбувалося в усьому об’ємі стікаючого шару, слід було б очікувати збільшення коефіцієнта теплопередачі при підвищенні теплового навантаження.

Незалежність інтенсивності теплопередачі від щільності зрошування в певних межах автори пояснюють явищем «носової хвилі», що формується перед передньою гранню лопатки, яка впливає на розподіл рідини по поверхні теплообміну і сприяє стабілізації процесу.

Завдяки безперервному оновленню та поповненню рідини в плівці за рахунок маси хвилі товщина плівки залишається стабільною, що забезпечує незалежність інтенсивності теплопередачі від щільності зрошування. Якщо щільність зрошення зменшується, маси продукту в хвилі стає недостатньо для компенсації випаровування плівки, що призводить до появи ділянок на нижній частині апарату, де гріюча поверхня залишаються відкритими. Оскільки коефіцієнт теплопередачі розраховується на всю робочу поверхню теплообміну, такі умови викликають зниження його значення.

При низькій частоті обертання ротора, коли окружна швидкість наближається до швидкості стікання вільно падаючої плівки, можливе погіршення зрошення через утворення парових бульбашок безпосередньо на гріючій поверхні апарату.

Розглядаючи рух рідини всередині апарату як ламінарний та спираючись на гідродинамічну теорію змащування, Киршбаум і Дітер [2] запропонували формулу для визначення коефіцієнта теплопередачі внутрішньої поверхні апарата, що виражається в ккал/м²·°С. Формула дозволяє враховувати параметри потоку рідини, геометрію апарату та умови зрошення для точного розрахунку теплопередачі.

$$\alpha = 110\lambda(n/\eta)^{1/3} \quad , \qquad (2.1)$$

де λ – питома теплопровідність; n – число обертів ротора; η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Розраховані авторами значення коефіцієнта α для випаровуваної води за даною формулою добре узгоджуються з результатами експериментів.

Киршбаум і Дітер підкреслюють, що матеріал корпусу апарату істотно впливає на величину загального коефіцієнта теплопередачі. Дослідження показали, що при випаровуванні води в апараті з корпусом із хромонікелевої сталі до 75 % загального температурного перепаду поглинається термічним опором стінки. У діапазоні малих теплових навантажень спостерігається зростання інтенсивності теплопередачі через зменшення термічного опору плівки конденсату гріючої пари.

При роботі з розчинами, в’язкість яких значно змінюється, із підвищенням теплового навантаження спостерігається поступове зниження інтенсивності теплопередачі. Це пояснюється одночасним збільшенням в’язкості розчину та товщини плівки, що перешкоджає ефективному переносу тепла.

Бресслер [3] у своїх дослідженнях зосередив увагу на процесі змочування поверхні теплообміну апарату. Він підкреслював, що коефіцієнти теплопередачі, отримані на моделях апаратів, не відображають реальні характеристики теплообміну. Для точнішої оцінки він запропонував поняття критерію продуктивності, що визначається як добуток коефіцієнта теплопередачі на реальну площу теплообмінної поверхні. Дослідження показали, що при постійній щільності зрошування значення цього критерію зменшується зі зростанням різниці температур між стінкою та киплячою рідиною.

При незмінній різниці температур величина критерію підвищується із збільшенням щільності зрошення і досягає максимуму, що відповідає коефіцієнту теплопередачі 2300 ккал/м²·град.

Застосовуючи формулу В. Лінке [4], виведену на основі теорії плівкової конденсації Нуссельта для визначення коефіцієнта теплопередачі

та товщини плівки при випаровуванні, Бресслер обґрунтував передбачувані значення коефіцієнтів теплопередачі в тонкоплівковому роторному апараті. Він встановив взаємозв'язок між цими коефіцієнтами та ступенем використання теплообмінної поверхні, вираженої в ккал/м²·град, що дозволяє точніше прогнозувати ефективність роботи апарату та оптимізувати його конструкцію.

$$\alpha = \frac{r\rho^2 q\left(\delta_1^3 - \delta^3\right)}{3\eta\left(t_W - t_F\right)h} \tag{2.2}$$

Вірогідні значення α, обчислені за наведеною формулою, збільшуються зі зростанням щільності зрошування до моменту повного змочування поверхні теплообміну. При подальшому підвищенні щільності зрошення фактична інтенсивність теплопередачі починає знижуватися через збільшення товщини плівки. Розбіжності між розрахунковими значеннями та експериментальними даними за Бресслером складають приблизно 30%.

Кибрік[5] досліджував процеси випаровування води та упарювання цукрових розчинів і розчинів NaCl в апаратах із шарнірними лопатками, порівнюючи їх із апаратами, де утворюється падаюча плівка. Експерименти з дистильованою водою показали, що збільшення теплового потоку спричиняє підвищення коефіцієнта теплопередачі у всіх режимах роботи апарата. Збільшення кількості лопатей також посилювало інтенсивність теплопередачі, зберігаючи характер закономірності. Для апаратів із вільно стікаючою плівкою Кибрік отримав залежність аналогічного виду $\alpha \approx q^{0.32}$, що дозволяє оцінити ефективність теплообміну за різних режимів роботи.

Під час упарювання водних розчинів цукру з початковими концентраціями 18, 40 та 60 % спостерігалося зростання інтенсивності теплообміну, яке підпорядковувалося аналогічній залежності $\alpha \approx q^{0.16}$. Подібна закономірність була виявлена й для розчинів NaCl з концентраціями 5, 10 та 20 %. Це дозволяє зробити висновок, що при зміні теплофізичних

властивостей розчину механізм перенесення тепла в плівці під час кипіння в цілому зберігається без суттєвих змін.

Результати Кибріка відрізняються від даних, отриманих Киршбаумом, який не виявив впливу теплового потоку на інтенсивність теплообміну. За спостереженнями Киршбаума, швидкість випаровування у роторному випарнику визначається переважно окружною швидкістю обертання ротора $\alpha \approx v^{0.33}$. У дослідженнях Кибріка ця залежність $\alpha \approx v^{0.24}$ проявляється через коефіцієнт тепловіддачі, який зростає лише до певного значення, що відповідає оптимальному режиму роботи. При подальшому збільшенні окружної швидкості інтенсивність теплообміну практично не змінюється, що вказує на насичення процесу і встановлення граничного режиму теплопереносу.

Зміна теплофізичних властивостей рідини, що випаровується, впливає на взаємозв’язок між швидкістю обертання ротора та інтенсивністю процесу випаровування. Зокрема, при підвищенні в’язкості продукту збільшення коефіцієнта теплопередачі відбувається більш плавно та рівномірно.

Кибрік зазначає, що ефект роторного пристрою стає більш помітним для випаровування в’язких рідин. Так, при зростанні числа лопаток ротора найвище збільшення коефіцієнта теплопередачі спостерігалося під час упарювання 60%-го цукрового розчину, тоді як для 18%-го розчину вплив кількості лопаток був практично незначним і мало відображався на динаміці процесу.

На основі цих спостережень Кибрік сформулював результати у вигляді критерійної залежності, що дозволяє прогнозувати вплив параметрів ротора на тепловий обмін та інтенсивність випаровування для рідин різної в’язкості.

$$Nu = 0.095 Крот.^{-0,24} Pe^{0,32} \mathrm{Re}^{0.43} \mathrm{Pr}^{0.4} m^{0.1}, \qquad (2.3)$$

де Крот – швидкісний критерій; m – коефіцієнт, що враховує вплив конструкції ротора.

Проаналізувавши наведені дослідження, можна зазначити, що найбільш актуальними та наближеними до практичних умов є процеси, описані у роботах Киршбаума та Дітера.

Проведені експерименти підтвердили придатність розроблених методів розрахунку РПА для широкого спектру рідин, таких як розчини цукру та гліцерину, а також для здійснення хімічних реакцій, ректифікаційних процесів, сушки та інших технологічних операцій. Проте у науковій літературі відсутні практичні експериментальні дані, що підтверджують застосування традиційних методів розрахунку РПА саме для концентрації томатної пасти.

Мета дослідження полягає у визначенні впливу ключових параметрів на ефективність процесу концентрації томатного соку (з початкової концентрації 4% до кінцевої 35%) та томатної пасти (від 35% до 70%). Результати цього дослідження дозволять встановити оптимальні режими роботи РПА та забезпечити його інтеграцію з системою автоматичного керування, яка контролюватиме параметри апарату для підтримки необхідних умов процесу.

Оскільки фізично-хімічні властивості води і томатного соку ($\rho_{води}$= 1000 кг/м^3, $t_{води}$= 100 ^{0}C; $\rho_{т.соку}$ = 1025 кг/м^3, $t_{т.соку}$ = 90 ^{0}C), 60%-го розчину гліцерину і томатної пасти ($\rho_{гліц.}$= 1260 кг/м^3, $t_{гліц.}$ = 290 ^{0}C; $\rho_{т.пасти}$ = 1230 кг/м^3, $t_{т.пасти}$ = 280 ^{0}C) схожі, то як модельні рідини застосовуються вода і 60%-й розчин гліцерину.

2.2 Режими роботи роторно-плівкових апаратів

Ефективність обробки харчових продуктів у РПА значною мірою визначається специфікою взаємодії продукту з лопатями та робочою поверхнею корпусу. Ці особливості суттєво відрізняють РПА від апаратів із вільно падаючою плівкою.

У РПА з жорстко закріпленими лопатями розрізняють три основні режими формування плівки та переміщення продукту: доосновний, основний

і післяосновний. Доосновний режим спостерігається при низькій щільності зрошування робочої поверхні продуктом, коли середня товщина плівки (d) менша за зазор (l) між кінцями лопатей і корпусом. Щільність зрошування визначається як кількість продукту на одиницю довжини кола корпусу або на одиницю площі робочої поверхні, приведену до одиниці часу.

У доосновному режимі лопаті не контактують безпосередньо з плівкою продукту і не турбулізують її прямо; їх дія здійснюється через парогазовий шар, що утворюється між кінцями лопатей та вільною поверхнею плівки. При цьому робоча поверхня частково змочена продуктом, а основна функція лопатей полягає у відкиданні надходячого продукту на робочу поверхню після його надходження через вхідний патрубок або розподільний пристрій, а також у формуванні плівки продукту на початковій ділянці його руху всередині апарата.

Таке конструювання дозволяє забезпечити рівномірне покриття робочої поверхні і створює умови для подальшого переходу продукту до основного режиму, де відбувається більш інтенсивна турбулізація та стабілізація товщини плівки.

Аналіз даних, наведених у різних літературних джерелах, свідчить, що доосновний режим роботи є оптимальним для масообмінних процесів у випадках, коли основний опір переносу речовини зосереджений у парогазовій фазі.

Водночас обробка високов’язких харчових термолабільних продуктів у доосновному режимі є небажаною, оскільки може призводити до неприпустимого перегріву, псування продукції та утворення пригорілого нальоту на робочих поверхнях обладнання.

Основний режим роботи встановлюється при вищій щільності зрошування порівняно з доосновним режимом. Після переходу з доосновного в основний відбувається повне змочування робочої поверхні продуктом, а перед лопастями формується сильно турбулізована плівка, товщина якої наближається до зазору між кінцями лопастей і стінкою корпусу.

Якщо в основному режимі продукт змочує лише фронтальну частину лопастей, орієнтовану в бік носових хвиль, то в післяосновному режимі змочування охоплює як передню, так і тильну поверхню лопастей. Післяосновний режим характеризується ще більшою щільністю зрошування робочої поверхні, ніж основний режим плівкоутворення. Це призводить до збільшення розмірів носових хвиль та формування плівки продукту, товщина якої перевищує зазор між кінцями лопастей і стінкою корпусу.

У післяосновному режимі оброблюваний матеріал може обертатися навколо осі ротора разом із лопастями у стані, близькому до відносної рівноваги відносно них, подібно до автомодельного режиму, відомого у класичних механічних мішалках.

Межу між основним та післяосновним плівкоутворенням визначають за зміною інтенсивності тепло- та масопереносу: під час збільшення щільності зрошування в основному режимі інтенсивність росте, тоді як із завершенням цього режиму й настанням післяосновного процесу вона починає зменшуватися.

Зі зростанням щільності зрошування перехід від підвищення інтенсивності тепло- та масопереносу в основному режимі до її зниження в післяосновному пояснюється тим, що у післяосновному режимі кінці лопастей, хоч і створюють турбулізацію глибоких (пристінних) шарів плівки продукту, генерована турбулентність гаситься поверхневими шарами, що рухаються слідом за лопастями.

Крім того, у основному режимі дисипація енергії вихрового руху позаду лопастей відбувається у більш тонкій плівці, що забезпечує вищу інтенсивність термообробки продукту порівняно з післяосновним режимом. Така особливість пояснює більшу ефективність тепло- та масопереносу під час основного плівкоутворення.

Одночасно зі збільшенням щільності зрошування робочої поверхні спостерігається, що початок переходу з основного до післяосновного режиму супроводжується помітним зменшенням темпу зростання потужності,

необхідної для обертання ротора. Це явище може розглядатися як додаткова ознака настання післяосновного режиму плівкоутворення. Для обробки харчових продуктів у РПА допускається застосування обох режимів, проте з точки зору ефективності процесу (ступінь концентрації, коефіцієнти теплового та масопереносу тощо) переважніше використовувати основний режим плівкоутворення.

Особливістю РПА з жорстко закріпленими лопатями є виникнення значного динамічного тиску, який створюється лопатями на носові хвилі продукту. Наприклад, при лінійній швидкості кінців лопатей 12 м/с та щільності оброблюваної речовини 900-1200 кг/м³ динамічний тиск досягає 65-80 кПа, що істотно впливає на гідродинаміку шару та умови плівкоутворення.

З іншого боку, РПА відзначаються тим, що відцентрове прискорення, яке виникає в оброблюваному матеріалі під дією обертових лопатей, перевищує прискорення вільного падіння у десятки, а іноді й сотні разів. Через це основний вплив на формування плівки в РПА має не гравітаційна складова швидкості переміщення продукту, а окружна швидкість обертання лопатей, яка визначає кінетику процесу.

У роторах РПА з шарнірно закріпленими лопатями виділяють три основні режими роботи: доосновний, основний та післяосновний. На відміну від аналогічних режимів у РПА з жорстко закріпленими лопатями, доосновний режим має характерну особливість: практично весь оброблюваний матеріал концентрується в носових хвилях перед лопатями, а робоча поверхня позаду них покрита лише тонким шаром продукту у западинах мікрошероховатостей, тобто більша частина поверхні залишається відкритою. У цьому режимі кінці лопатей ковзають по поверхні, а перемішування продукту здійснюється переважно в носових хвилях перед лопатями.

Доосновний режим виникає при низькій щільності зрошування робочої поверхні, коли сила тяжіння лопатей перевищує гідравлічний опір продукту,

що створює умови випаровування лопатей. Зі збільшенням щільності зрошування встановлюється основний режим, а при подальшому підвищенні щільності формується післяосновний режим плівкоутворення. Перехід між режимами відбувається за аналогічних умов, як у РПА з жорстким кріпленням лопатей.

Для РПА з шарнірними лопатями в основному режимі плівкоутворення розміри носових хвиль перед лопатями більші, ніж у доосновному режимі. Це дозволяє силі опору хвиль врівноважувати притискну силу лопатей, в результаті чого кінці лопатей віддаляються від поверхні, утворюючи самоустановлюваний зазор. Швидкість переходу з доосновного в основний режим зростає при більшій щільності зрошування та меншій силі тяжіння, що діє на лопаті.

У післяосновному режимі товщина плівки позаду лопатей перевищує таку в основному режимі, тому кінці лопатей здійснюють турбулізацію лише поверхневих шарів продукту, аналогічно основному режиму плівкоутворення. Основний та післяосновний режими відповідають умовам плавлення лопатей та забезпечують стабільну роботу РПА при різних експлуатаційних режимах.

При обробці харчових продуктів найбільш ефективним є основний режим плівкоутворення в РПА зі шарнірно закріпленими лопатями. Така конструкція дозволяє уникнути навіть короткочасного оголення робочої поверхні та забезпечує можливість проведення технологічних процесів одночасно з максимальною продуктивністю як по вихідному, так і по готовому продукту.

Слід враховувати, що при обробці продуктів із підвищеною адгезією (наприклад, фруктові начинки, карамельні маси тощо) виникає потреба у стабільному та надійному самоочищенні робочих поверхонь. У таких випадках доцільно використовувати рухомі лопаті РПА у доосновному режимі роботи. Для зменшення зносу кінці лопатей виготовляють із накладок

з антифрикційного матеріалу, наприклад фторопласту, що підвищує довговічність та ефективність апарата.

Особливо актуальним є питання порівняльної оцінки інтенсивності теплофізичних процесів у РПА залежно від типу кріплення лопатей на роторі: жорсткі, шарнірні, маятникові. Це дозволяє визначити оптимальні режими обробки продукту та підвищити ефективність теплової обробки.

РПА відзначаються вузьким спектром часу перебування продукту всередині, що забезпечує однорідність готового харчового продукту та збереження встановлених якісних показників. Такий розподіл часу дозволяє з допустимим наближенням розглядати РПА як апарати ідеального витіснення, що гарантує стабільність технологічного процесу та високу якість кінцевого продукту.

Особливості обробки продуктів у РПА визначаються поєднанням двох ефективних чинників у структурі їх течії: інтенсивного радіального перемішування матеріалу в зоні кінців лопастей через формування поворотних потоків та переміщення продукту вздовж осі корпусу в режимі, близькому до ідеального витіснення. Така специфіка течії забезпечує швидку та рівномірну обробку харчових матеріалів, зменшуючи ризик погіршення їх якості.

2.3 Постановка задачі

Відповідно до визначеної мети, затверджено наступний план робіт:

1. Дослідження впливу ключових параметрів процесу – обсягу рідини, швидкості обертання ротора та температурного градієнта – на ефективність теплопередачі в роторному плівковому апараті, який виконує функції підігрівача та випарника;

2. Аналіз фізичних умов на поверхні теплообміну з метою визначення оптимального режиму роботи та розробки системи автоматичного керування для його підтримки та контролю.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

3.1 Вибір двигуна для приводу ротора РПА та розрахунок його механічних характеристик

3.1.1 Вибір двигуна

Основним елементом установки, що підлягає автоматизації, є привод ротора вертикального РПА, у якому необхідно здійснювати контроль швидкості обертання робочого органу. Від правильного підбору електродвигуна залежить надійність та стабільність роботи електроприводу, а також точність виконання технологічного процесу.

Сучасні дослідження та розробки спрямовані на модернізацію існуючих моделей і створення нових конструкцій електродвигунів як постійного, так і змінного струму. Важливою вимогою до привідного двигуна РПА є забезпечення регулювання швидкості в широкому діапазоні, що дозволяє адаптувати роботу системи до різних режимів.

Крім того, електродвигуни повинні витримувати короткочасні перевантаження, демонструвати високу динамічну реакцію привода, мати компактні розміри та малу масу, а також легко інтегруватися у конструкцію механізмів машин, забезпечуючи ефективну і безпечну експлуатацію установки.

Потужність електродвигуна завжди прив’язується до конкретного режиму його роботи. При проєктуванні приводу зазвичай визначають зовнішній опір та характер експлуатації двигуна. Розрізняють три основні номінальні режими: довготривалий, короткотривалий і повторно-короткотривалий.

У довготривалому режимі двигун досягає сталого теплового стану, на відміну від короткотривалого, де нагрівання не встигає розвинутись. Для повторно-короткотривалого режиму характерні часті пуски та зупинки, а нагрівання та можливість реалізації номінальної потужності залежать від

тривалості включення відносно часу циклу, який прийнято рівним 10 хв. Режим вважається довготривалим, якщо тривалість одного робочого циклу перевищує 10 хвилин.

З цього випливає, що приводний двигун РПА експлуатуватиметься в довготривалому режимі, що забезпечує стабільну роботу та досягнення заданих характеристик потужності під час безперервного функціонування.

Обраний електродвигун повинен забезпечувати обертальний момент, достатній для розгону механізму, при цьому під час роботи в заданому режимі він не повинен піддаватися тривалим перевантаженням, які можуть спричинити перегрів. Для приводів загального призначення, що працюють у режимі тривалого або мало змінного навантаження, перевірка двигунів на нагрівання є необов'язковою, оскільки виробник вже здійснив такі випробування для відповідних умов та гарантує стабільну роботу при номінальних параметрах.

Найбільш поширеними є трифазні асинхронні двигуни завдяки низці переваг порівняно з іншими типами: простоті конструкції, економічності, високій надійності та довговічності експлуатації.

При проєктуванні приводів загального призначення, таких як верстати, конвеєри, транспортери, ескалатори, вентиляційне та компресорне обладнання, а також приводів багатьох інших машин, застосовують загальнопромислові асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором серії АІР. Ці двигуни замінили попередні серії 4А та 4АМ, що вироблялися раніше. Завдяки простій конструкції, відсутності рухомих контактів, високій ремонтопридатності та відносно невисокій вартості вони знайшли широке застосування у промисловості та сільському господарстві.

Трифазні асинхронні електродвигуни серії АІР випускають потужністю від 0,06 до 400 кВт та висотою осі обертання від 50 до 355 мм. Вони використовуються у приводах механізмів, які не висувають особливих вимог до пускових характеристик і ковзання, і можуть експлуатуватися при температурі навколишнього повітря від -35 до +40 °С. Таке поєднання

надійності, універсальності та доступності робить серію АІР оптимальним вибором для більшості стандартних приводних установок.

Отже, з урахуванням особливостей режиму роботи РПА та переваг асинхронних електродвигунів, для приводу механізмів цієї машини обирається з каталогу найближчий типорозмір двигуна з номінальною потужністю, яка задовольняє умову: номінальна потужність обраного двигуна повинна бути не меншою за потужність, необхідну для приводу робочого органу та забезпечення його роботи у номінальному режимі.

Розрахункова потужність, необхідна для приведення в дію ротора запропонованої моделі РПА ИСР-8.0, становить 580 Вт, з яких враховані наступні складові:

- Потужність що витрачається на тертя лопаток по сухому корпусу

$$P1=260 \text{ Вт};$$

- Потужність що витрачається на тертя в двох торцевих ущільненнях

$$P2=296 \text{ Вт};$$

- Потужність що витрачається на тертя в підшипниках

$$P3=24 \text{ Вт}.$$

$$P_{рпа} = P1+P2+P3 = 260+296+24=580 \text{ Вт}$$

Виходячи з цього, слід підбирати двигун, у якого потужність Р не менша за $P_{рпа}$. З доступного каталогу обрано трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором АИР71А2, який характеризується такими технічними параметрами:

- Потужність $P_{ном} = 0,75$ кВт;
- Швидкість обертання $n_1 = 3000$ об/хв.;
- Номінальна частота обертання ротора n = 2820 об./хв.;
- ККДном $\eta = 78,5\%$;
- $\cos\varphi = 0,83$;
- Кратність пускового струму К = 6;
- Ммакс/Мном, $\mu_к = 2,2$;
- Мпуск/Мном, $\mu_п = 2,1$;

- Момент інерції $J = 0{,}97 \cdot 10^{-3}$ кг·м^2;
- Ковзання $S_{ном} = 0{,}06$
- Двигун працює при лінійній напрузі $U_л = 380$В і промисловій частоті $f = 50$Гц.
- Маса, $m = 8{,}5$ кг;
- Кліматичне виконання - У3;
- Клас захисту пристрою, IP - 54

Обертальний рух з валу електродвигуна передається на вал робочого органу РПА за допомогою редуктора. Асинхронні трифазні електродвигуни з короткозамкненим ротором типу AIP71A2 широко використовуються в промисловості, зокрема для електроприводів різних машин, механізмів та технологічних установок.

3.1.2 Перевірка вибраного двигуна

В асинхронному електродвигуні швидкість обертання ротора n_2 у сталому режимі відрізняється від швидкості обертання магнітного поля статора n_1 на величину ковзання S.

Частота обертання магнітного поля n_1 визначається частотою напруги живлення. При підключенні обмотки статора трифазною напругою з частотою f формується обертове магнітне поле, яке створює крутний момент на роторі. Швидкість обертання цього поля можна визначити за відомою формулою, що враховує кількість пар полюсів двигуна.

Для двигуна з однією парою полюсів частота обертання магнітного поля виражається наступним чином

$$n_1 = \frac{60 f_1}{P} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \ \left(^{об}/_{хв}\right) \qquad (3.1)$$

де f_1 – частота живлячої мережі; p – кількість пар полюсів

Визначимо передаточне число редуктора

$$i = n_1/n_{ppo} = 3000/1500 = 2, \qquad (3.2)$$

де n_1 – швидкість обертання магнітного поля двигуна; $n_{рро}$ – швидкість обертання ротора робочого органу.

Приведений до швидкості обертання валу двигуна момент опору при к.к.д. передачі $\eta_р$=0,9 дорівнює

$$M_c = \frac{M_{с.м}}{\eta_p i} = \frac{4}{0{,}9 \cdot 2} = 2{,}22 \; н \cdot м \; . \tag{3.3}$$

Визначаємо мінімально необхідну потужність двигуна зі співвідношення

$$P_{min} = M_c \omega_н \tag{3.4}$$

$$P_{min} = 2{,}22 \cdot 314 = 697{,}08 \text{ (Вт)}$$

Отже, так як 750 Вт ≥ 697,08 Вт, то умова $P_{ном} \geq P_{min}$ виконана, і вибраний двигун їй відповідає.

Як видно з формули (3.1), швидкість обертання ротора асинхронного двигуна прямо залежить від частоти напруги живлення. Саме це лежить в основі методу частотного регулювання. Для зміни частоти обертання ротора достатньо змінювати частоту на вході двигуна за допомогою перетворювача частоти.

Якщо одночасно з частотою пропорційно регулювати напругу на обмотках статора, це дозволяє підтримувати високий рівень енергетичної ефективності та перевантажувальної здатності двигуна. Ця залежність відображається формулою: Uвих=U1·fвих/f, яка демонструє зв’язок вихідної напруги з частотою обертання та напругою на статорі при незмінному навантажувальному моменті.

Спрощена блок-схема електропривода з частотним регулюванням наведена на рис.3.1, що ілюструє основні компоненти системи та принцип їх взаємодії для забезпечення плавного керування швидкістю ротора.

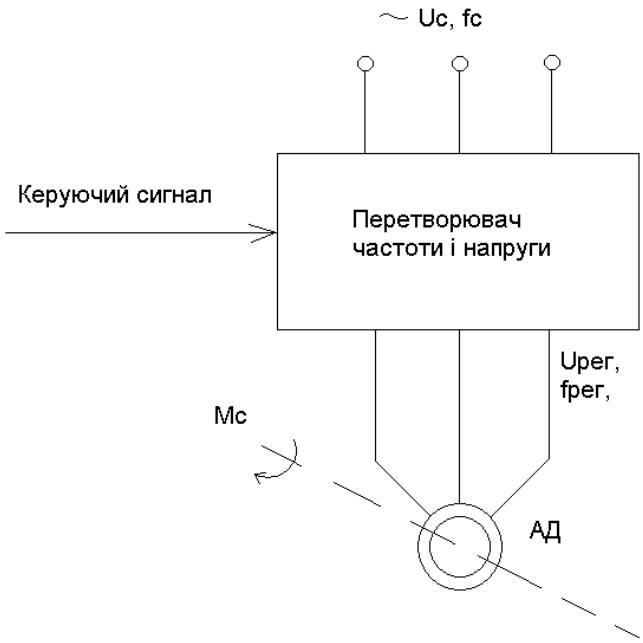


Рисунок 3.1 - Блок-схема частотного асинхронного електропривода

Необхідним елементом приводу є перетворювач частоти та напруги, на який подається стандартна мережна напруга U_c із промисловою частотою f_c, а з його виходу знімається змінна напруга $U_{рег}$ регульованої частоти $f_{рег}$. Величини напруги та частоти перебувають у певному співвідношенні, що визначається типом навантаження M_c. Регулювання вихідних параметрів здійснюється за допомогою керуючого сигналу, зміна якого безпосередньо визначає частоту обертання асинхронного двигуна.

Такий метод забезпечує плавне регулювання в широкому діапазоні, а механічні характеристики системи залишаються високожорсткими. Частотний спосіб має ще одну важливу перевагу: під час зміни частоти обертання асинхронного двигуна не збільшується його ковзання, як це відбувається при реостатному регулюванні. Завдяки цьому втрати на ковзання залишаються мінімальними, що робить частотне регулювання економічно ефективним.

Для досягнення максимальних енергетичних показників роботи двигуна, включаючи коефіцієнти потужності та корисної дії, а також перевантажувальну здатність, необхідно одночасно з корекцією частоти

живлячої напруги змінювати й її амплітуду. Форма закону зміни напруги при цьому визначається характером моменту навантаження, що дозволяє оптимально використовувати ресурс електродвигуна та підтримувати стабільну роботу приводу.

Розглянемо загальні характеристики частотного способу керування асинхронними електродвигунами та можливі сфери його застосування. Частотне регулювання є економічно вигідним, оскільки зміна частоти обертання двигуна не супроводжується значними втратами енергії на ковзання в роторному ланцюзі, що зберігає високий коефіцієнт корисної дії електропривода та номінальну потужність двигуна, усуваючи потребу завищувати розрахункові параметри.

Регулювання частоти обертання у таких системах може виконуватися плавно в широкому діапазоні, як нижче, так і вище природної характеристики двигуна, що дозволяє досягати частоти обертання, перевищуючої номінальну. При цьому регулювальні характеристики зберігають необхідну жорсткість, а двигун демонструє високу перевантажувальну здатність.

Сучасний розвиток напівпровідникової силової електроніки дозволяє реалізувати необхідні перетворювачі частоти з мінімальними витратами матеріалів і забезпечити ефективне та надійне керування асинхронними двигунами в різних промислових процесах.

Жорсткість механічних характеристик на робочій ділянці залишається сталою, оскільки пропорційне збільшення синхронної швидкості супроводжується відповідним зменшенням критичного ковзання. На рис. 3.2 наведено сімейство штучних механічних характеристик.

Робочі точки визначаються як перетин механічних характеристик електродвигуна з характеристиками механізму, що створює статичний момент M_c. Перевагою такого підходу є плавне регулювання швидкості при незмінній жорсткості характеристик. Основний недолік полягає в зменшенні

перевантажувальної здатності двигуна та обмеженні можливості регулювання швидкості лише вище номінального значення.

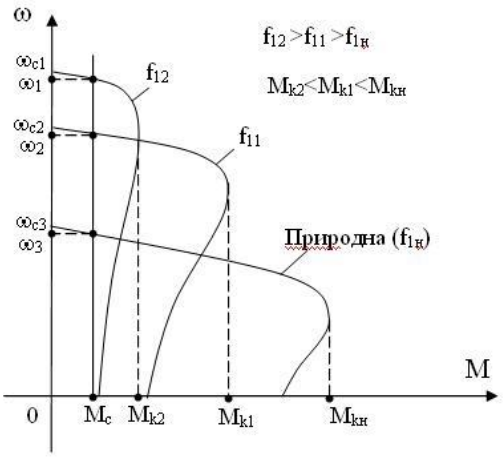


Рис. 3.3 - Механічні характеристики АД при частотному керуванні

При знехтуванні активним опором статора R_1 критичний момент двигуна стає пропорційним квадрату напруги та частоти на статорі, що визначає його динамічні властивості під час роботи

$$M_к = K\frac{U_1^2}{f_1^2} \tag{3.5}$$

де К – коефіцієнт пропорційності.

З цього випливає ключовий принцип частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна, відомий також як закон Костенка

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = const \tag{3.6}$$

Відповідно до цього закону, частота змінюється пропорційно напрузі. Така залежність дозволяє підтримувати постійне значення критичного моменту та стабільний номінальний магнітний потік у широкому діапазоні регулювання швидкості – від нуля до максимальної. Як правило, максимальна швидкість відповідає номінальному значенню, при якому подається номінальна напруга на статор. Підвищення напруги понад номінальне значення обмежується електричною міцністю ізоляції обмотки.

На рис. 3.3 наведено сімейство штучних механічних характеристик, які характеризуються паралельними робочими ділянками та дозволяють оцінювати поведінку приводу при різних режимах роботи.

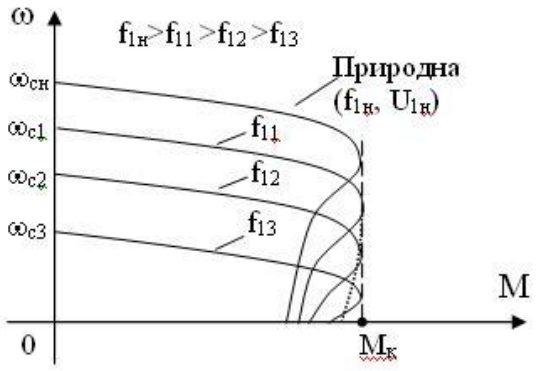


Рисунок 3.3 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному керуванні

На рис.3.4 представлена структурна схема розімкненої системи частотного керування електроприводом змінного струму. З керуючого пристрою КП на перетворювач напруги та частоти (ПНЧ) подаються два сигнали: сигнал Uu надходить на керований випрямляч КВ і визначає величину вихідної напруги, а сигнал Uf спрямовується на керований інвертор КІ та задає частоту змінного струму на його виході.

Окрім розімкнених схем, існують більш складні замкнені системи частотного керування, що включають зворотні зв’язки за напругою, струмом та частотою обертання ротора. Використання зворотного зв’язку за частотою обертання дозволяє досягти максимальної жорсткості механічних характеристик керованого електродвигуна, підвищуючи точність та стабільність регулювання у динамічних режимах роботи.

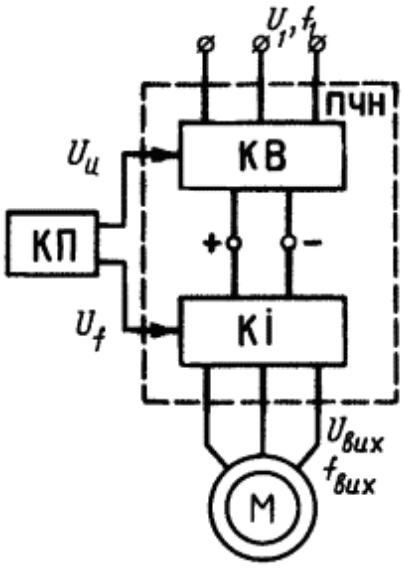


Рисунок 3.4 – Структурна схема розімкненої системи частотного керування

3.1.3 Вибір тиристорного перетворювача частоти

Перетворювач частоти – це пристрій, призначений для трансформації змінного струму або напруги однієї частоти в змінний струм чи напругу іншої частоти.

У сучасних перетворювачах вихідна частота може змінюватися в широкому діапазоні як вище, так і нижче частоти мережевого живлення, що дозволяє адаптувати роботу під різні технологічні вимоги.

Будь-який перетворювач частоти складається з двох основних блоків: силового та керуючого. Силова частина зазвичай реалізована на тиристорах або транзисторах, які функціонують як електронні ключі для передачі потужності. Керуюча частина виконується на цифрових мікропроцесорах і відповідає за управління силовими ключами, а також забезпечує додаткові функції: контроль параметрів, діагностику стану, захист від перевантажень та аварійних режимів.

Таке поєднання силової та цифрової керуючої частини дозволяє досягти високої точності регулювання та стабільності роботи електроприводів.

При виборі моделі частотного перетворювача необхідно спочатку визначити його вихідну потужність та номінальний струм, що можна розрахувати на основі характеристик привідного двигуна. Таким чином, потужність тиристорного перетворювача повинна бути не меншою за потужність двигуна (Рпер ≥ Рном = 0,75 кВт), а вихідний струм – не меншим за номінальний струм двигуна (Іпер ≥ Іном = 1,68 А).

За своєю схемотехнічною структурою статичні частотні перетворювачі подібні до електромашинних перетворювачів і можуть бути класифіковані на два основні типи:

а) з безпосереднім зв'язком;

б) з проміжною ланкою постійного струму.

Перетворювач з прямим зв’язком призначений для перетворення високочастотного сигналу у низькочастотний і складається з 18 тиристорів (рис. 3.5). Його основою є трифазна однополуперіодна схема випрямляння, де кожна фаза містить два зустрічно підключені випрямлячі. Групу трьох вентилів із загальним катодом називають «позитивною» або випрямною, а групу із загальним анодом – «негативною» або інвертованою.

Протягом одного напівперіоду вихідної напруги струм проходить через випрямну групу, а під час іншого – через інвертовану. Частота вихідної напруги визначається тривалістю проміжків часу, коли струм пропускають обидві групи вентилів. Напівхвиля вихідної напруги формується із сегментів напруги живлячої мережі. На рис. 3.6 наведено криву вихідної напруги при незмінному куті відкриття тиристорів $\alpha = 0$.

Фазова комутація вентилів у межах однієї групи, тобто одночасне відкриття одного вентиля та закриття іншого, відбувається аналогічно перемиканню в трифазній однополуперіодній схемі випрямляння без використання комутуючих конденсаторів, що забезпечує плавне чергування струму між елементами схеми.

При перемиканні між різними групами вентилів може виникнути ситуація, коли одночасно вмикаються два вентилі різних груп, підключених

до окремих фаз мережі, що призводить до утворення кола струму через ці вентилі. Для обмеження такого струму застосовують зрівняльні реактори, які одночасно забезпечують згладжування форми кривої вихідної напруги.

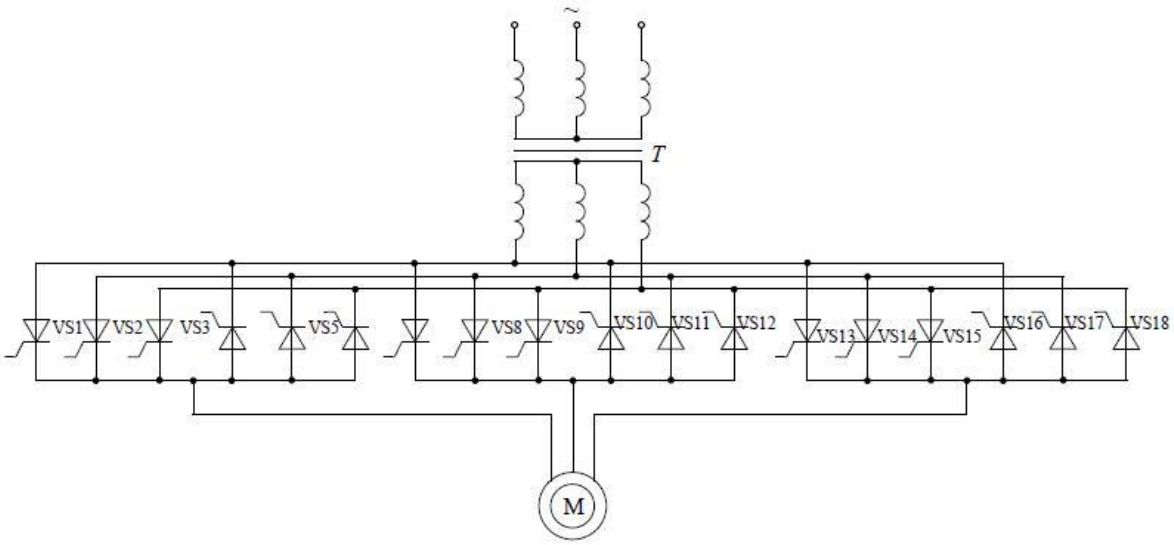


Рисунок 3.5 – Схема статичного перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком

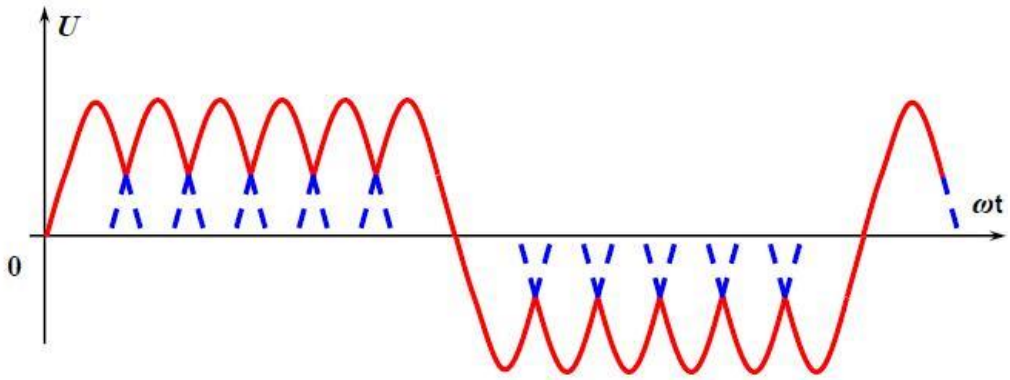


Рисунок 3.6 – Форма вихідної напруги трифазного перетворювача з безпосереднім зв'язком

Існують також перетворювачі частоти з безпосереднім зв’язком, що працюють без зрівняльних реакторів, при цьому використовується роздільна система керування вентильними групами. Щоб отримати вихідну напругу, близьку до синусоїдальної форми, необхідно змінювати кут відкриття вентилів так, щоб середнє значення напруги за напівперіод живлячої мережі змінювалося протягом напівперіоду вихідної напруги за синусоїдальним законом.

Регулювання вихідної напруги перетворювача здійснюється шляхом корекції кута відкриття вентилів. До основних переваг цього типу перетворювачів належать: стабільність вихідної напруги, можливість точного регулювання, зменшення гармонік у мережі, компактність системи та підвищена надійність роботи електрообладнання.

1) однократне перетворення енергії і, отже, високий ККД;

2) можливість проходження реактивної енергії з мережі до двигуна і назад;

3) відсутність комутуючих конденсаторів, оскільки комутація проводиться природним шляхом.

Серед недоліків аналізованого частотного перетворювача виділяють:

- обмежений діапазон регулювання вихідної частоти, що складає приблизно 0-30% від номінальної частоти мережі;

- значна кількість силових вентилів та ускладнена схема їх керування, що підвищує складність експлуатації та обслуговування системи.

- невисокий коефіцієнт потужності.

Найширше застосування у сучасних частотно-регульованих приводах отримали перетворювачі з явно вираженою ланкою постійного струму (рис.3.7). У пристроях цього типу реалізується подвійне перетворення електричної енергії: вхідна синусоїдна напруга з постійною амплітудою та частотою спочатку випрямляється у випрямлячі, проходить через фільтр для згладжування, а потім за допомогою інвертора перетворюється на змінну напругу з регульованою частотою та амплітудою. Подвійне перетворення дозволяє досягати високої точності керування, проте спричиняє зниження ККД та деяке погіршення масо-габаритних характеристик у порівнянні з перетворювачами безпосереднього зв’язку.

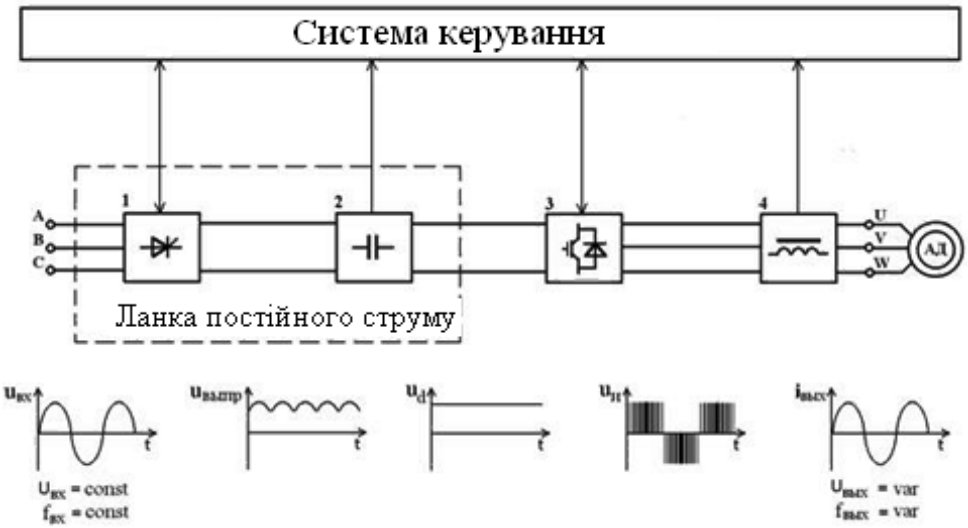


Рисунок 3.7 – Схема перетворювача з явно вираженою ланкою постійного струму

Для генерації синусоїдальної змінної напруги застосовуються автономні інвертори напруги та автономні інвертори струму.

В електронних ключах цих інверторів використовуються запираючі тиристори GTO та їхні вдосконалені модифікації GCT, IGCT і SGCT, а також біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).

Основною перевагою тиристорних частотних перетворювачів, у тому числі з безпосереднім зв’язком, є здатність працювати з високими струмами та напругами, витримуючи тривале навантаження й імпульсні впливи без погіршення характеристик. Їхній коефіцієнт корисної дії може досягати 98%, що дещо перевищує ККД перетворювачів на IGBT (95-98%).

На сьогодні тиристорні частотні перетворювачі займають провідну позицію у високовольтних приводах з потужністю від сотень кіловат до десятків мегават і вихідною напругою 3-10 кВ і більше. Водночас їхня вартість за 1 кВт вихідної потужності залишається найвищою серед високовольтних перетворювачів, що є основним фактором при виборі обладнання для промислових систем.

IGBT відрізняються від тиристорів повною можливістю керування, простою та малоенерговитратною системою управління, а також високою робочою частотою.

Завдяки цим властивостям перетворювачі частоти на базі IGBT забезпечують розширений діапазон регулювання швидкості обертання двигуна та підвищують загальну швидкодію приводу. Для асинхронних електроприводів з векторним керуванням такі перетворювачі дозволяють ефективно працювати на низьких швидкостях навіть без застосування датчика зворотного зв’язку.

У порівнянні з тиристорними аналогами, перетворювачі на IGBT мають менші габарити та масу, підвищену надійність завдяки модульному виконанню електронних ключів, поліпшеному тепловідведенню та меншій кількості конструктивних елементів.

Вони забезпечують більш повний захист від струмових піків та перенапруг, що суттєво зменшує ризик відмов електропривода та пошкоджень його компонентів, підвищуючи стабільність і безпеку роботи всієї системи.

Враховуючи наведені вище аргументи, серед широкого асортименту частотних перетворювачів було обрано пристрій фірми VaconPlc, модель Vacon 20.

Перетворювач частоти Vacon 20 оснащений функціональними можливостями, що забезпечують сучасне керування промисловим обладнанням. Інвертор Vacon 20 поєднує компактні розміри з широким діапазоном потужностей до 18,5 кВт. Вбудований програмований логічний контролер дозволяє адаптувати пристрій до різних завдань і забезпечує значну економію енергоресурсів. Універсальний інвертор підвищує ефективність виробничих процесів і покращує експлуатаційні показники обладнання на підприємствах.

Продуктивність технічних засобів значною мірою залежить від параметрів перетворювача частоти. Вбудований інтерфейс RS485 забезпечує просте та економічно вигідне управління пристроєм. Крім того, використовуючи додаткові модулі, Vacon 20 може бути підключений до польових шин різних систем, включаючи CANOpen, DeviceNet та Profibus

DP, що значно розширює його інтеграційні можливості в сучасних автоматизованих мережах.

Перетворювач частоти Vacon 20 знаходить застосування в різних сферах промисловості та побуту, зокрема для конвеєрів, систем вентиляції та кондиціювання, насосів, компресорів, пральних машин, а також у машинах і механізмах текстильної, харчової, целюлозо-паперової та інших галузей. Він також використовується у житлово-комунальному господарстві для автоматизації обладнання.

Відповідно до каталогу виробника та з урахуванням потужності електродвигуна, напруги живлення, номінального струму та необхідного набору функцій керування роботою привідного двигуна РПА, для даного застосування обрано перетворювач частоти типу VACON0020-3L-0003-4CP (рис. 3.8).

Рисунок 3.8 – Загальний вигляд перетворювача частоти VACON0020-3L-0003-4CP

Перетворювач має ряд функцій, серед них:

- Управління - скалярне U / f і векторне в розімкнутому контурі;
- Вбудований ПІД-регулятор;
- Автоматичне визначення параметрів електродвигуна;
- Управління як АД, так і з постійними магнітами;

- Утримання 100% моменту при нульовій частоті;
- Є вбудований EMC фільтр класу C2;
- Копіювання параметрів без подачі основного харчування;
- Послідовна шина Fieldbus з підтримкою протоколів RS485 (у базовій комплектації), CANopen, DeviceNet, Profibus DP, Modbus;
- Функція «сон / пробудження» для насосів;
- Контроль «сухого ходу» насоса;
- Підігрів двигуна постійним струмом;
- Контроль обриву ременя вентилятора.

Послідовний інтерфейс RS-485 із підтримкою протоколу Modbus забезпечує передачу даних на швидкості до 38 400 бод і оснащений вбудованим лічильником імпульсів від зовнішнього датчика.

Можливе керування перетворювачем як через RS-485, так і за допомогою зовнішнього програмованого логічного контролера, використовуючи спеціально призначений протокол обміну.

Перетворювачі обладнані вбудованим ПІД-регулятором для автоматичного керування технологічним процесом. Для роботи в режимі регулювання потрібен датчик зворотного зв’язку. При цьому перетворювач коригує швидкість обертання двигуна так, щоб підтримувати обраний параметр системи на заданому рівні, забезпечуючи стабільність роботи та точність підтримки процесу.

3.1.4 Складання функціональної схеми керування РПА та схеми алгоритму технологічного процесу

Одним із варіантів схеми автоматичного керування асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором, який управляється через тиристорний перетворювач частоти з автономним інвертором струму, наведено на рис. 3.9. У цій схемі силова частина перетворювача інтегрована зі спрощеним блоком регулювання, що забезпечує необхідний взаємозв’язок між струмом та ковзанням у статичних і динамічних режимах роботи. Блок

реалізовано за принципом підлеглого регулювання, що дозволяє підтримувати стабільність параметрів двигуна під час зміни навантаження.

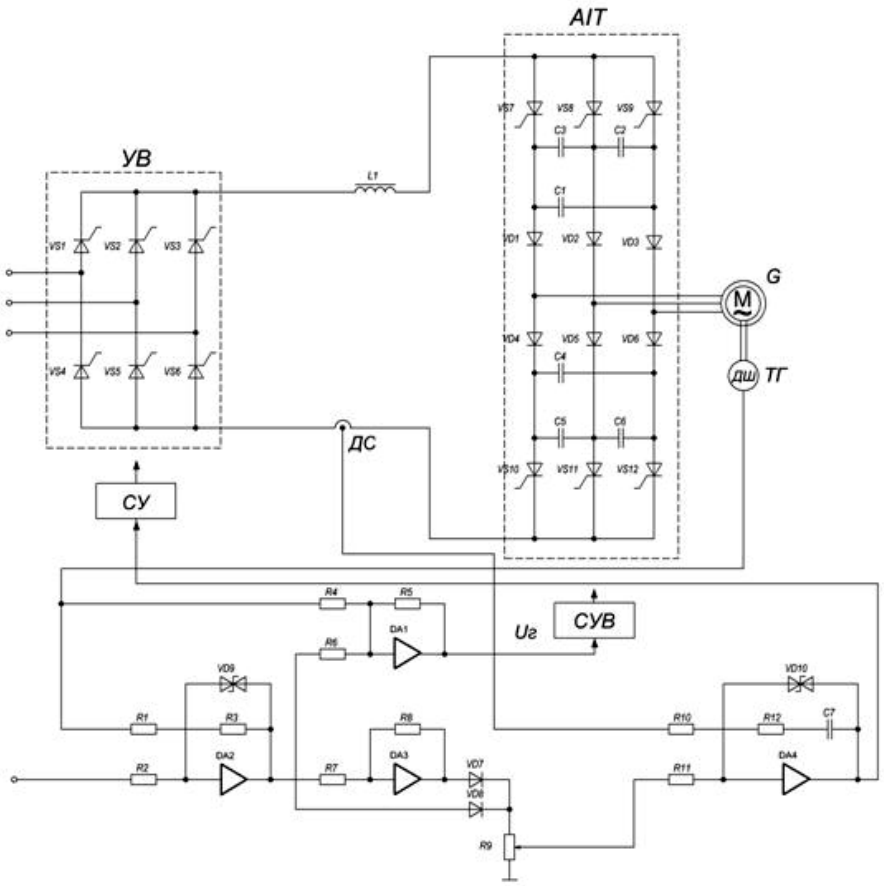


Рисунок 3.9 – Схема автоматичного керування асинхронним двигуном із короткозамкненим ротором, що регулюється перетворювачем на тиристорах із автономним інвертором струму

Вхідні сигнали блоку регулювання включають задаючу напругу $U_З$, яка визначає частоту автономного інвертора струму (АІТ); напругу негативного зворотного зв'язку по випрямленому струму $U_і$, що надходить від датчика струму (ДС) та напругу Uomega з негативного зворотного зв'язку по кутовій швидкості асинхронного двигуна, отриману від датчика швидкості (ДШ).

Блок регулювання реалізований на чотирьох операційних підсилювачах, виконаних на інтегральних мікросхемах. Контроль випрямленого струму, а отже і струму статора двигуна, здійснюється регулювальником струму (РС), який через систему управління випрямлячем (СУВ) впливає на кут включення тиристорів керованого випрямляча (УВ).

РС побудований на операційному підсилювачі за схемою ПІ-регулювальника. На його входи через резистори R10 та R12 подаються сигнали негативного зворотного зв'язку по струму U_i та задаючий сигнал $U_З$, пропорційний модулю ковзання двигуна.

Регулювальник РТ у статичних режимах забезпечує точне відповідність струму статора задаючому сигналу $U_{ЗТ}$, незалежно від вихідної частоти АІТ. За допомогою регулювальника ковзання (РК), який функціонує аналогічно П-регулювальнику швидкості в системах постійного струму, здійснюється віднімання з задаючої напруги $U_З$ сигналу Uomega, пропорційного кутовій швидкості ротора, і посилення різницевого сигналу. В результаті формується сигнал, пропорційний ковзанню двигуна.

Оскільки струм у ланці випрямленої напруги зберігає свій знак незалежно від режиму роботи двигуна, а ковзання може змінювати знак, необхідно підтримувати постійний знак задаючої напруги $U_З$. Виділення модуля напруги U_{beta} виконується за допомогою діодів VD7 та VD8 і інвертора знаку, зібраного на операційному підсилювачі.

Додатково, така схема забезпечує стабільне регулювання струму в широкому діапазоні частот АІТ і гарантує коректну роботу системи при зміні режимів навантаження двигуна, що підвищує надійність та точність автоматичного керування.

На вході регулювальника частоти (РЧ) здійснюється сумування сигналів ковзання з виходу регулювальника струму (РС) та кутової швидкості з датчика ДШ. Напруга Uf з виходу РЧ подається на систему управління автономним інвертором (СУІ), яка керує вихідною частотою АІТ. Таким чином, регулювальники струму РС і частоти РЧ підпорядковані регулювальнику ковзання (РК). Проте вихідний сигнал РС не виступає задаючим для РЧ, оскільки на регулювальник РЧ вводиться позитивний зворотний зв'язок по кутовій швидкості, а не негативний.

Параметри РЧ обрані так, щоб при збільшенні навантаження на вал двигуна в робочій зоні його механічної характеристики частота на виході АІТ

залишалася стабільною. Це досягається за рахунок компенсації зменшення сигналу кутової швидкості відповідним зростанням сигналу ковзання, при цьому струм двигуна пропорційно збільшується.

Коефіцієнт пропорційності підібрано так, щоб жорсткість механічної характеристики системи відповідала природній характеристиці двигуна. При подальшому зростанні моменту навантаження спрацьовує стабілітрон VD9, після чого ковзання, струм та момент залишаються постійними, а вихідна частота АІТ і кутова швидкість двигуна знижуються, що відповідає вертикальній ділянці механічної характеристики.

Для забезпечення коректного функціонування розроблюваної системи управління складено структурну схему всього комплексу, яка наведена на рис. 3.10.

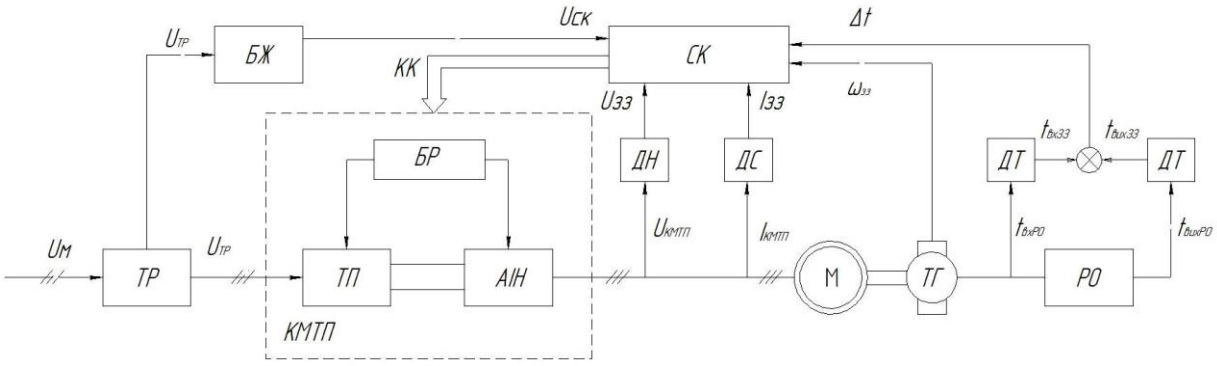


Рисунок 3.10 – Функціональна схема системи керування РПА

На трансформатор (ТР) подається трьохфазна мережна напруга Uм. Після зниження до необхідного рівня напруга надходить на керований мостовий тиристорний перетворювач (КМТП), який формує живлення асинхронного двигуна (М) для роботи у заданому режимі. Керування роботою КМТП здійснює система керування (СК) на основі сигналів зворотного зв’язку.

Швидкість двигуна контролює тахогенератор (ТГ), напругу – датчик напруги (ДН), а струм – датчик струму (ДС). Всі сигнали надходять у блок зворотного зв’язку (БЗЗ) і передаються до системи керування, яка аналізує

отримані дані та поточний стан агрегату, регулюючи роботу КМТП для забезпечення оптимального функціонування всього комплексу.

Блок живлення (БЖ) формує необхідну напругу від трансформатора для роботи системи керування, що забезпечує її стабільну та безперебійну роботу.

На виході трансформатора формується знижена напруга Uтр, яка подається на комплекс мікропроцесорного трансформаторного приводу (КМТП). До складу КМТП входять тиристорний перетворювач (ТП), автономний інвертор напруги (АІН) та блок регулювання (БР). Тиристорний перетворювач перетворює трифазну синусоїдальну напругу на однофазну постійну, яка надходить на АІН, де формується трифазна напруга для живлення асинхронного двигуна. Це забезпечує можливість частотного керування приводом.

Дослідження роботи роторного приводу асинхронного двигуна показало, що одним з ключових факторів, що впливають на ефективність технологічного процесу, є коефіцієнт теплопередачі, який прямо залежить від частоти обертання ротора. Система автоматичного керування повинна контролювати роботу всього комплексу таким чином, щоб обладнання працювало в оптимальному режимі. Для цього передбачено введення зворотного зв’язку по температурі, що дозволяє підтримувати обертання ротора РПА на рівні, при якому коефіцієнт теплопередачі досягає максимального значення, забезпечуючи високу продуктивність та стабільність процесу.

Для контролю коефіцієнта теплопередачі застосовуються два зворотні температурні зв’язки за допомогою датчиків температури (ДТ). Один датчик встановлюється на вході робочого органу (РО), інший – на виході. Сигнали від датчиків надходять на суматор, де обчислюється різниця Δt, яка передається на систему керування. Відстежуючи зміну Δt, система керування генерує коригуючі імпульси до блоку регулювання (БР) для оптимізації роботи всієї системи.

При зміні швидкості обертання Δt змінюється відповідно, і при досягненні певного значення швидкості ротора різниця температур стабілізується. Подальше підвищення швидкості не приносить ефективності. Система автоматичного керування визначає оптимальну швидкість і забезпечує роботу робочого органу апарата в цьому режимі.

Таким чином, для досягнення заданого ефекту система повинна функціонувати відповідно до алгоритму, представленого на рис. 3.11, забезпечуючи стабільне та ефективне регулювання процесу.

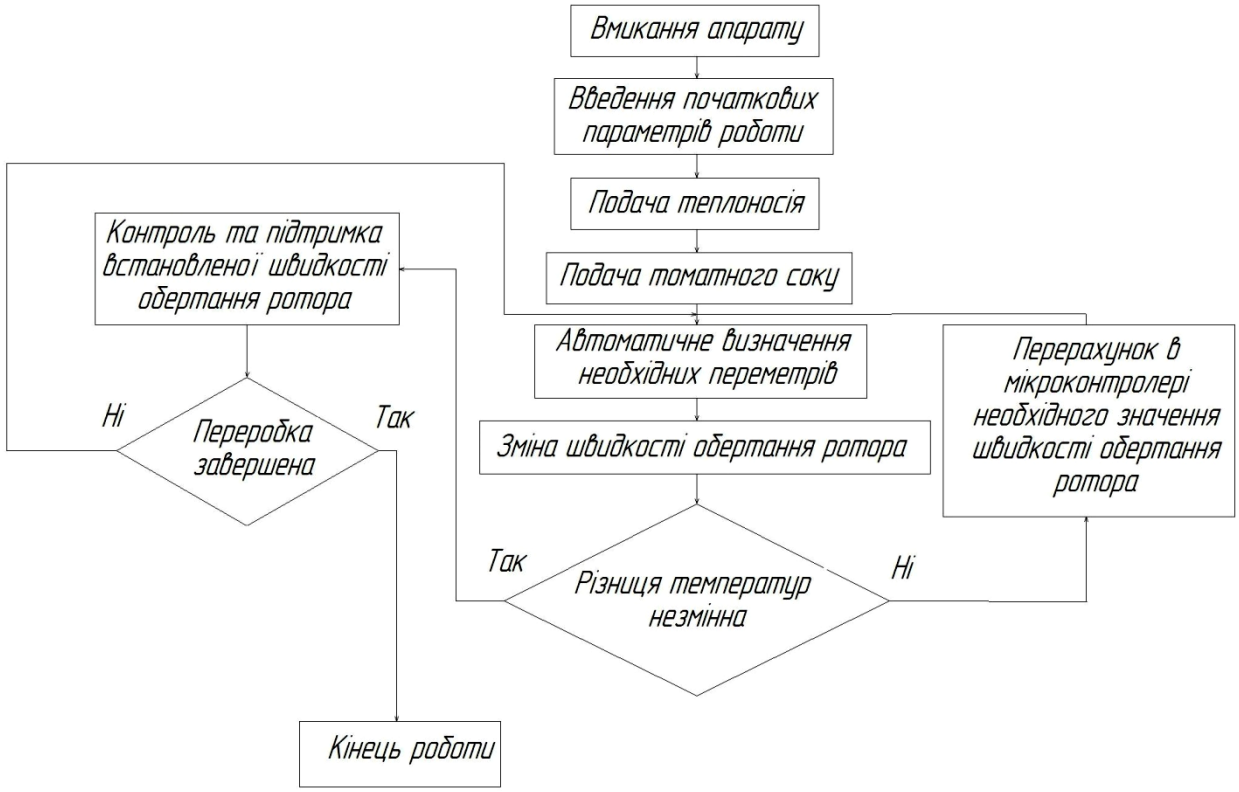


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи системи автоматичного керування РПА

На початковому етапі роботи оператор включає апарат та задає параметри: початкову швидкість обертання ротора, інтенсивність подачі томатного соку в установку та температуру теплоносія. Далі система автоматичного керування підбирає оптимальний режим роботи, зокрема визначає необхідну швидкість обертання ротора для забезпечення ефективної роботи РПА. Це здійснюється шляхом порівняння температури теплоносія на вході та виході апарата.

Якщо під час розгону апарата різниця температур змінюється, система продовжує коригувати режим роботи. Коли ж різниця температур перестає змінюватися при подальшому збільшенні швидкості обертання, система фіксує роботу апарата на встановленій швидкості, одночасно відслідковуючи зміни температурного перепаду. Система продовжує функціонувати до завершення технологічного процесу або до зміни різниці температур. У разі зміни цього параметра система знову підбирає необхідний режим роботи для підтримання оптимальних умов.

Запропонований алгоритм забезпечує стабільне підтримання апарата у найефективнішому режимі, що дозволяє підвищити продуктивність процесу як у кількісному, так і якісному вимірі, зменшуючи енергетичні витрати та оптимізуючи технологічні параметри.

3.1.5 Аналіз модернізованої САК

Однією з ключових вимог до електроприводу є забезпечення мінімального часу протікання перехідних процесів із одночасним обмеженням перерегулювання як при дії керуючого сигналу, так і при впливах з боку збурень. На практиці для оптимізації роботи електроприводу широко застосовують принцип технічного оптимуму, при якому співвідношення T2/T1 дорівнює 2. З точки зору техніки оптимальним вважається процес, коли перерегулювання не перевищує 5%, а час регулювання залишається мінімальним.

Для моделювання роботи системи ПЧ-АД використовуються певні спрощення: якщо асинхронний двигун працює зі статичним моментом менше критичного, можна знехтувати електромагнітними процесами; ланку перетворювача частоти, що вносить затримку, для спрощення розрахунків приймають аперіодичною з постійною часу Тп = 0,01 с. Математичні обчислення зазвичай виконують у відносних одиницях.

В якості базових параметрів беруть номінальний момент електродвигуна Мн, швидкість холостого ходу СООН при номінальній

частоті напруги, а також номінальну частоту живлення fh. Структурна схема розімкненої системи регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна представлена на рис. 3.12.

Для підвищення точності моделювання та оптимізації регулювання доцільно враховувати вплив дискретних елементів системи управління та можливі затримки в датчиках і виконавчих механізмах, що дозволяє більш точно передбачати динаміку процесу й уникати перевищення допустимого перерегулювання.

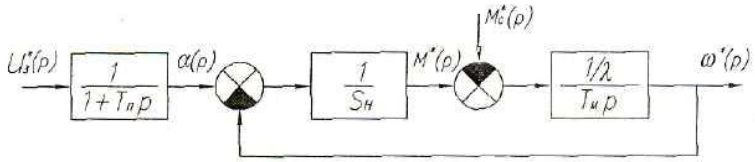
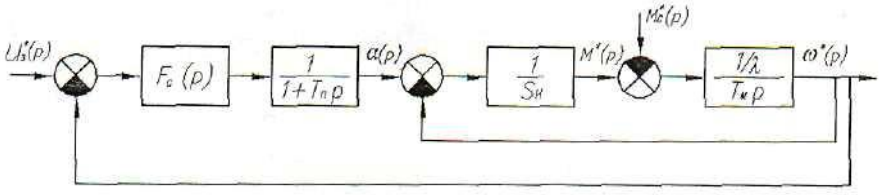


Рисунок 3.12 – Структурна схема відкритої системи регулювання швидкості.

Відповідно до побудованої схеми визначаються такі рівняння

$$\frac{d\omega^*}{dt} = \frac{M^* \cdot M_c^*}{\lambda \cdot T_M};\ M^* = \frac{a - \omega^*}{s_1};\ \frac{da}{dt} = \frac{U_c^* \cdot a}{T_1}, \text{при цьому } T_M = J\frac{\omega}{M_{ст}} \quad (3.7)$$

Постійна часу Тп має невелике значення, тому компенсації підлягає лише велика постійна часу Тт. Це означає, що замкнута система повинна бути одноконтурною та включати один регулятор, який виконує функцію регулювання швидкості.



або

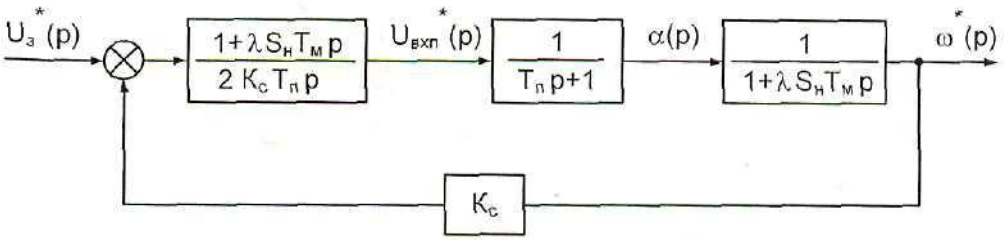


Рисунок 3.13 – Структурна схема замкненої системи керування швидкістю

Коефіцієнт зворотного зв'язку прийнято рівним 1. Передавальна функція регулятора швидкості визначається наступним чином

$$F_c = \frac{1 + \lambda \cdot s_н \cdot T_m p}{2 \cdot T_н} \quad (3.8)$$

Проведемо розрахунки для нашої системи.

Номінальна частота холостого ходу обертання двигуна

$$\omega_{0НОМ} = n \cdot (2\pi/60) \quad (3.9)$$

$$\omega_{0НОМ} = 3000 \cdot (2\pi/60) = 314 \text{ с}^{-1}$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{НОМ} = \omega_{0НОМ} \cdot (1 - s_{НОМ}) \quad (3.10)$$

$$\omega_{НОМ} = 314 \cdot (1 - 0{,}06) = 295{,}16$$

Модуль жорсткості лінеаризованої механічної характеристики АД

$$\beta = (2 \cdot M_К)/(\omega_{0НОМ} \cdot s_К) \quad (3.11)$$

$$\beta = (2 \cdot 5{,}59)/(314 \cdot 0{,}22) = 0{,}162$$

Еквівалентна електромагнітна постійна часу ланцюгів статора і ротора двигуна

$$T_е = 1/(\omega_{0НОМ} \cdot s_К) \quad (3.12)$$

$$T_е = 1/(314 \cdot 0{,}22) = 0{,}014 \text{ с}$$

Параметри перетворювача частоти [8]: $k_{ПЧ}$ =70;$T_{ПЧ}$ = 0,01с.Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості

$$k_{зз} = u_{з.с.ном}/\omega_{ном} = 1/295{,}16 = 0{,}0034 \text{В} \cdot \text{с}.$$

Додаткові постійні часу

$$T_{0_1} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot T_e} \cdot \left(1 + \sqrt{1 \frac{4 \cdot T_e}{T_M}}\right)} \quad (3.13)$$

$$T_{0_2} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot T_e} \cdot \left(1 - \sqrt{1 \frac{4 \cdot T_e}{T_M}}\right)} \quad (3.14)$$

$$T_{0_1} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}014} \cdot \left(1 + \sqrt{1 \frac{4 \cdot 0{,}014}{0{,}13}}\right)} = 0{,}016$$

$$T_{01} = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}014} \cdot \left(1 - \sqrt{1 \frac{4 \cdot 0{,}014}{0{,}13}}\right)} = 0{,}11$$

$$T_\mu = T_{02} + T_{ПЧ} \quad (3.15)$$

$$T_\mu = 0{,}11 + 0{,}01 = 0{,}12 \text{ с}$$

Інтегральний коефіцієнт та передаточна константа пропорційної складової регулятора швидкості були визначені під час налаштування електроприводу на модульний оптимум

$$T_{РШ} = 4 \cdot k_{зз} \cdot k_{ПЧ} \cdot T_\mu \quad (3.16)$$

$$T_{РШ} = 4 \cdot 0{,}0034 \cdot 70 \cdot 0{,}12 = 0{,}11$$

$$K_{РШ} = T_2 / T_{РШ} \quad (3.17)$$

$$K_{РШ} = 0{,}016 / 0{,}11 = 0{,}14.$$

Застосування простих регуляторів доцільне лише тоді, коли об’єкт регулювання можна розбити на окремі блоки, і кожен контур характеризується однією постійною часу, яку необхідно враховувати під час корекції контурів. На рис.3.14 представлено електричну схему пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора, що використовується у досліджуваному електроприводі для керування швидкістю.

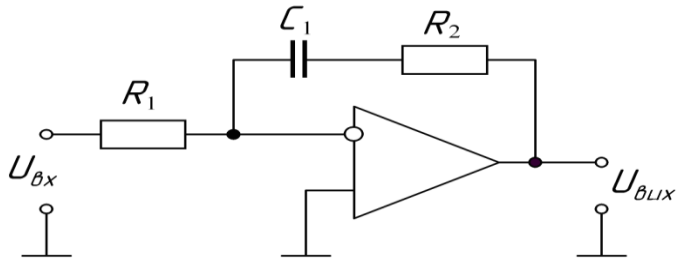


Рисунок 3.14 – Принципова схема ПІ-регулятора швидкості

Його передаточна функція

$$W_{ПІ}(p) = \frac{1 + C_1 R_2 \, p}{C_1 R_1 \, p} = \frac{1 + k_{РШ} T_{РШ} \, p}{T_{РШ} \, p}.$$

Для оцінки роботи системи автоматичного керування, структурна схема якої наведена на рис. 3.15, створено її імітаційну модель рис.3.16. Дослідження характеристик системи проведено із застосуванням

програмного комплексу Matlab 7, що дозволяє отримати точні результати аналізу динамічних показників керування.

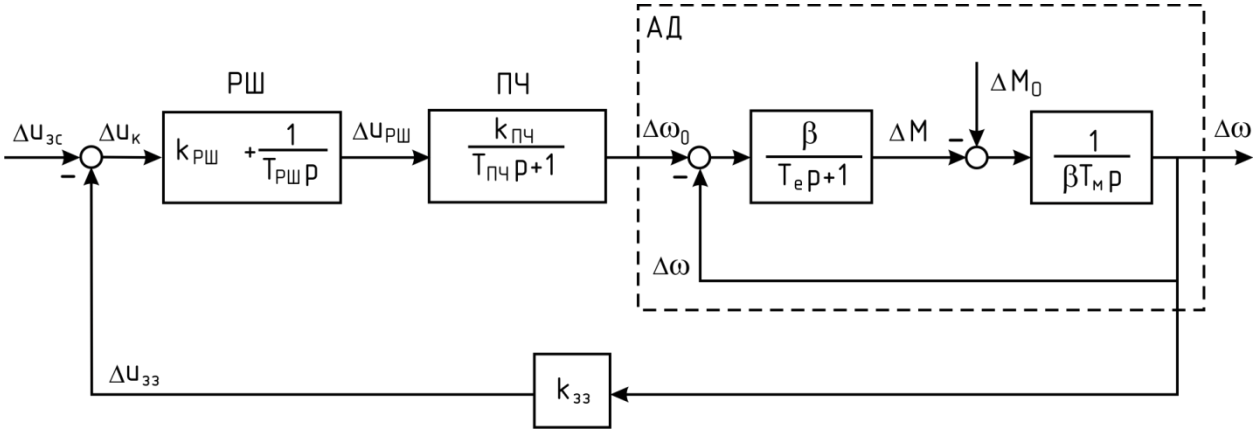


Рисунок 3.15 – Структурна схема системи перетворювач частоти – асинхронний двигун із зворотним зв'язком по швидкості

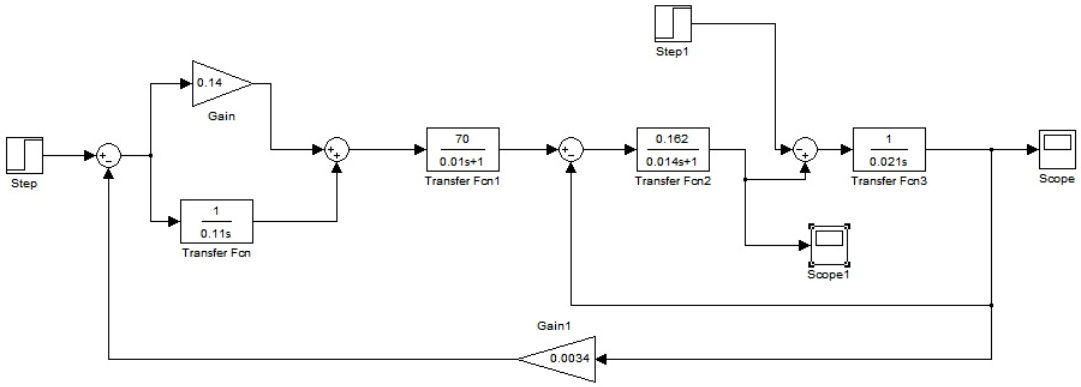
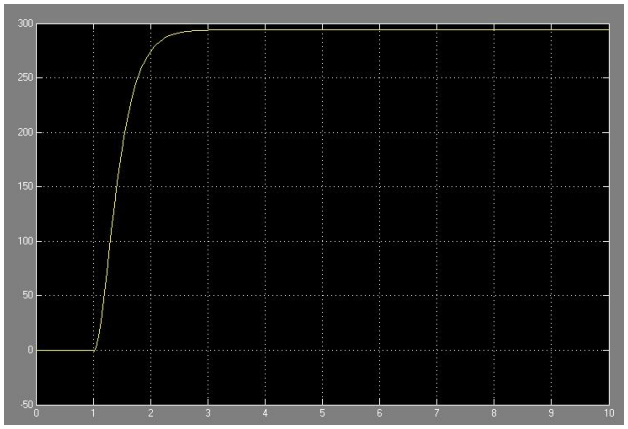
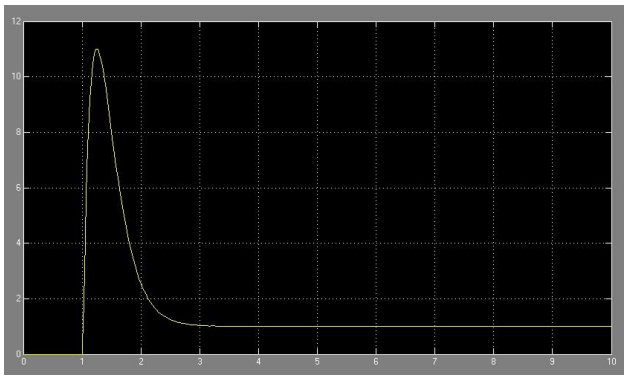


Рисунок 3.16 – Імітаційна схема модернізованої САК

На основі розробленої моделі проведено аналіз перехідних процесів, які наведено на рисунку 3.17 (а, б).



а)



б)

Рисунок 3.17 – Перехідні процеси модернізованої САК

Побудувавши перехідні процеси при варіюванні інтегральної постійної часу регулятора, отримано характеристики, представлені на рисунку 3.18 (а, б).

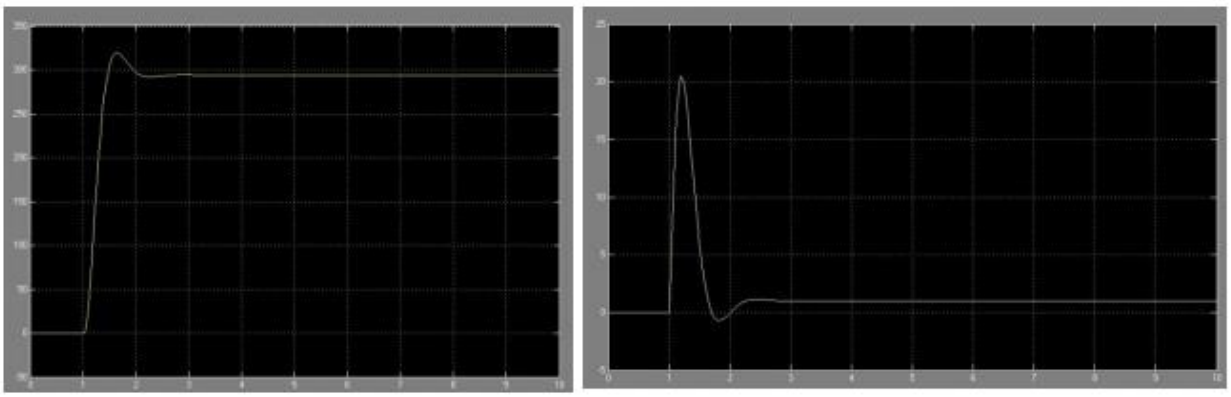


Рисунок 3.18 – а) Перехідні процеси системи за кутовою швидкістю при $k_{РШ}$=0,014, $T_{РШ}$=0,05с.

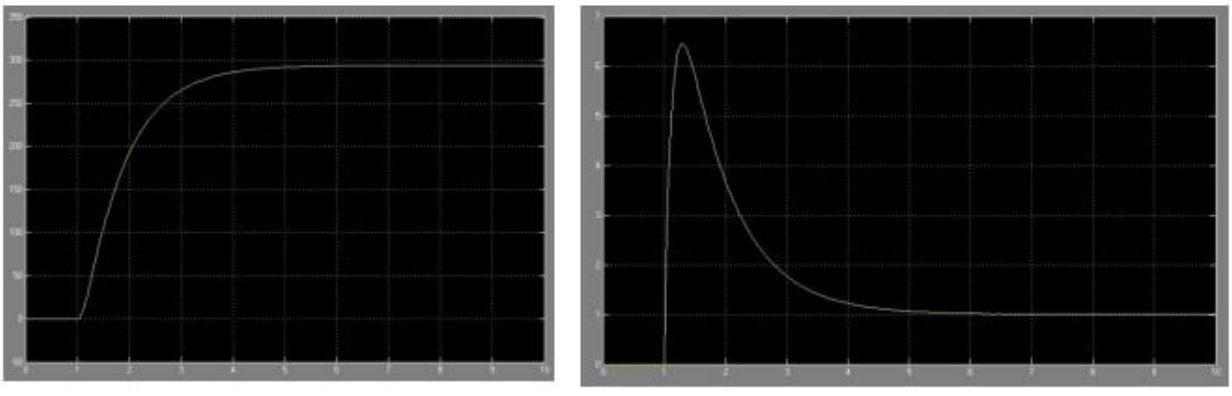


Рисунок 3.18 – б)Перехідні процеси системи за кутовою швидкістю при $k_{РШ}$=0,014, $T_{РШ}$=0,22с.

Спостерігається, що при зменшенні інтегральної константи регулятора тривалість перехідного процесу майже не змінюється, проте при цьому збільшується величина перерегулювання. У свою чергу, при збільшенні інтегральної константи регулятора від 0,11 до 0,22 час перехідного процесу зріс із 3 секунд до 5,25 секунди.

Перевіримо систему автоматичного керування на стійкість.

Стійкість систем автоматичного керування визначається як здатність САК уникати нескінченних відхилень регульованої величини від заданого значення при будь-яких реальних збуреннях у системі.

Забезпечення стійкості замкненої САК є однією з ключових вимог до систем автоматичного регулювання. У стійкої системи автоматичного регулювання регульована величина під час перехідного процесу залишається обмеженою і не відхиляється нескінченно від заданого значення навіть при дії зовнішніх або внутрішніх збурень. Для оцінки стійкості існують різні критерії, серед яких використовують як аналітичні, так і графічні методи.

Одним із ефективних способів аналізу стійкості є побудова логарифмічної амплітудо-фазової частотної характеристики (ЛАФЧХ) системи, що дозволяє оцінити поведінку САК у частотній області та визначити запаси стійкості по фазі та амплітуді.

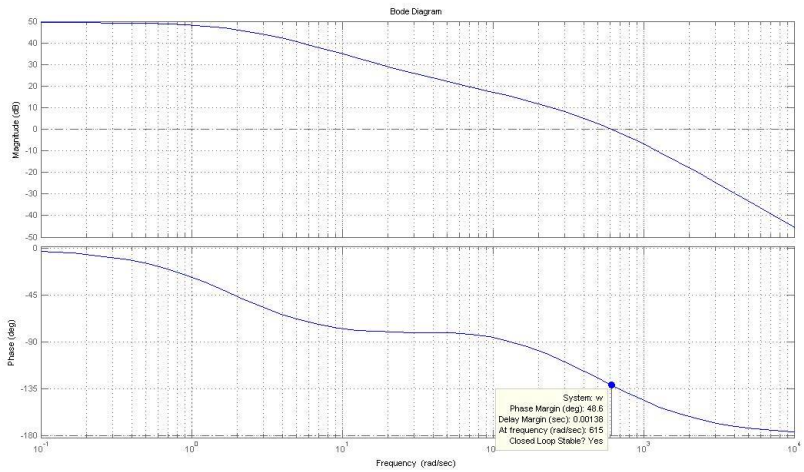


Рисунок 3.19 – ЛАФЧХ

Визначимо полюси і нулі передатної функції системи автоматичного керування (рис. 3.20)

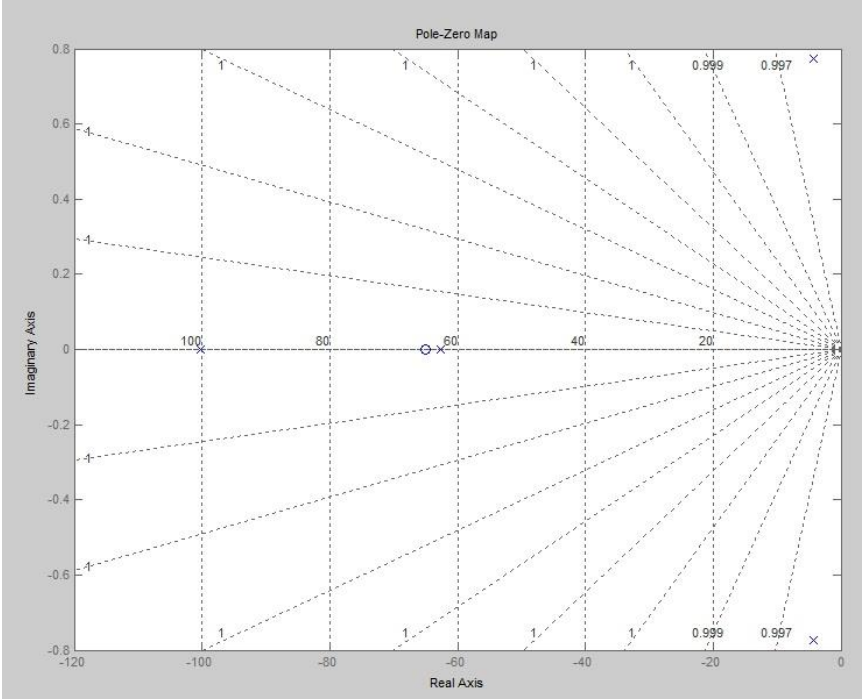


Рисунок 3.20 – Полюси і нулі передатної функції САК

Аналіз отриманих графіків показує, що розроблена система автоматичного керування демонструє високу стійкість і надійність функціонування.

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

4.1 Експериментальна установка і методика проведення досліджень

4.1.1 Експериментальна установка

На рис.4.1 представлена принципова схема експериментальної установки.

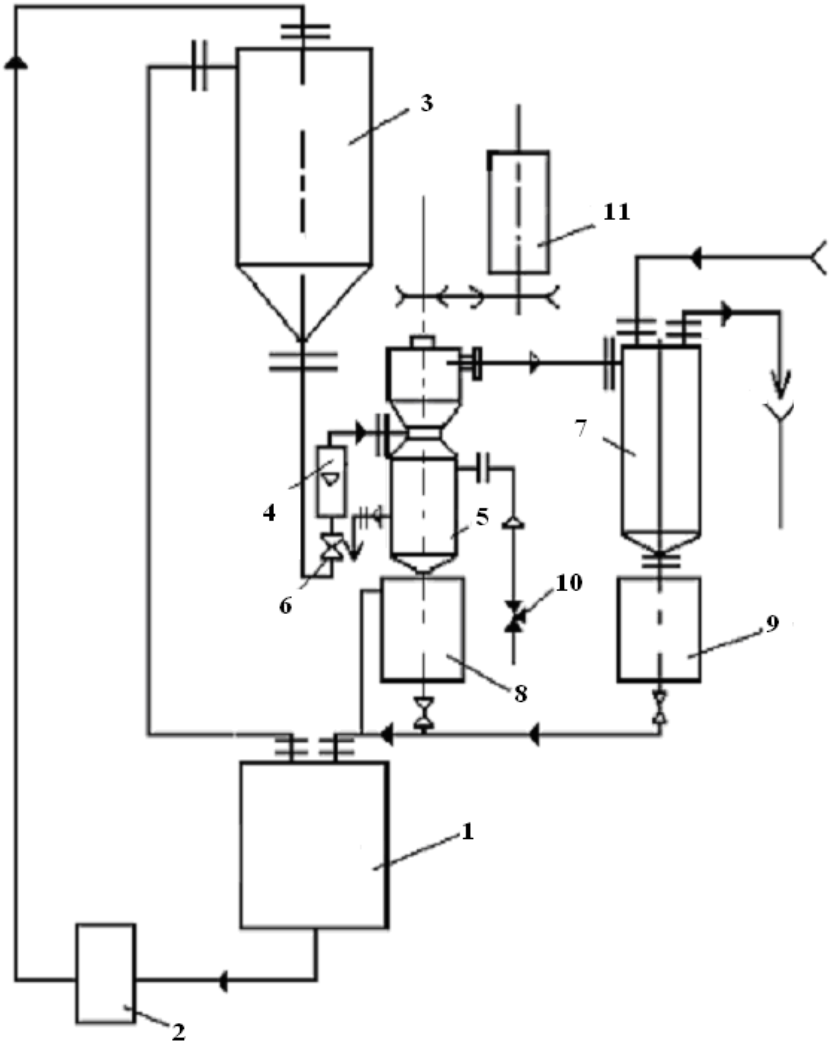


Рисунок 4.1 – Принципова схема експериментальної установки:
1 - резервуар продукту; 2 - насос; 3 - напірний бак; 4 - ротаметр; 5 - випарник; 6 - дозуючий вентиль; 7 - кондесатор; 8,9 - мірники;10 - пневматичний клапан; 11 - електродвигун

Продукт із обігрівного резервуара (1) за допомогою плунжерного насоса НД-160 (2) надходить у напірний бак (3), оснащений переливною трубою для підтримки заданого рівня. Із напірного бака продукт проходить через ротаметр (4) і спрямовується у випарник (5). Регулювання витрати здійснюється за допомогою голчастого вентиля. Пари, що утворюються в випарнику, конденсуються у поверхневому конденсаторі (7), який охолоджується проточною водою. Дистилят із конденсатора та залишок із випарника збираються в мірники (8) та (9), а потім повертаються у резервуар (1) для повторного циклу обробки.

На рис.4.2 зображений лабораторний апарат. Поверхня теплообміну апарату 0,1 м^2.

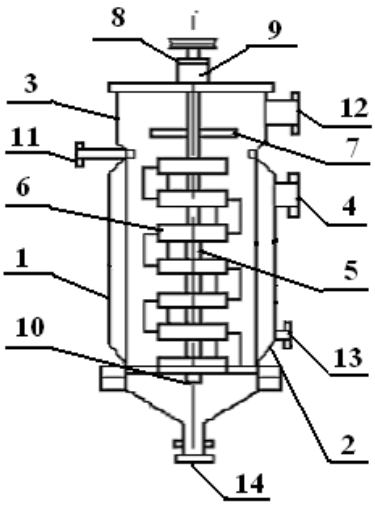


Рисунок 4.2 – Лабораторний апарат1-корпус; 2-сорочка для теплоносія; 3-сепаратор; 4-штуцер гріючої пари; 5-ротор; 6-лопатки; 7-відцентровий відбійник; 8-верхній підшипник; 9-сальник; 10-нижній підшипник; 11-штуцер для підведення продукту; 12-штуцер вторинної пари; 13-штуцер конденсату; 14-штуцер концентрату.

Корпус апарату (1) виготовлено з трубної конструкції та оснащено зовнішньою сорочкою для підігріву (2). Верхня частина корпусу розширена (3) для ефективної сепарації пари, що утворюється всередині апарату.

Всередині апарату розташований ротор (5) із шарнірно підвішеними лопатками (6) та відцентровим відбійником (7). Ротор обертається в двох

підшипниках (8) та (10), а місце виходу валу з апарату герметизовано сальником (9). Продукт подається в апарат через штуцер (11), пари відводяться через штуцер (12), а концентрат – через штуцер (14). На сорочці (2) розміщені штуцера (4) та (13) для підведення гріючої пари та відведення конденсату.

Під час досліджень контролюються такі параметри: подача продукту в апарат; тиск та температура гріючої пари; температура продукту на вході та виході апарату; температура вторинної пари; температура та витрата води, що охолоджує конденсатор; кількість отриманого дистиляту та концентрація концентрату.

Стабільна подача продукту досягається завдяки наявності напірного бака та контролюється ротаметром РС–5.

Тиск гріючої пари в системі встановлюється і підтримується за допомогою манометра МГП–27ОМ у поєднанні з пневматичним клапаном.

Температура в контрольних точках фіксується ртутними термометрами, що забезпечує точний моніторинг теплового режиму.

Привід ротора здійснюється електродвигуном постійного струму потужністю 0,45 кВт, а регулювання числа обертів здійснюється через реостат, що дозволяє змінювати швидкість обертання відповідно до технологічних потреб.

4.1.2 Методика обробки експериментальних даних

Коефіцієнт теплопередачі визначається по формулі, Вт/м^{2}град

$$K = \frac{q}{\Delta t_k} \tag{4.1}$$

Поверхневащільність теплового потоку, Вт/м^2

$$q = \frac{Q}{F}, \tag{4.2}$$

де $\Delta t_к$ – різниця температур, град; Q – кількість тепла, Вт; F – поверхня теплообміну, м.

Кількість теплової енергії, що передається, (Q), розраховується за наступною формулою, вираженою у ватах (Вт)

$$Q = C_{ср} \cdot M \cdot (T_{вих.} - T_{вх}) \quad (4.3)$$

де $C_{ср}$ – теплоємність проукту; М – витрата продукту, кг/год; Твих, Твх – температура вихідна та вхідна відповідно.

Під час випаровування або концентрування продуктів, які подаються в апарат при температурі кипіння, відбувається виділення пари та поступове збільшення концентрації розчинених речовин у залишковій фазі

$$Q = r_i \cdot M_{дист.} \quad (4.4)$$

Де $M_{дист}$ – кількість дистиляту; r_i– теплота паротворення.

Теплоємність Сср продукту визначається для середньої температури нагріваного продукту.

Теплота паротворення r_i береться при температурі кипіння речовини.

Витрата продукту М (кг/год) та обсяг дистиляту $M_{дист}$ (кг/год) розраховуються на основі об'ємної витрати V (м³/год) з урахуванням температури продукту та відповідної щільності (кг/м³), визначеної для конкретного теплового режиму

$$M = V \cdot \rho \quad (4.5)$$

$$M_{сух.в.} = \frac{V_н \rho_н a_н}{100} \quad (4.6)$$

$$V_{куб.} = \frac{M_{сух.в.} 100}{a_к \rho_к} \quad (4.7)$$

$$M_{куб} = V_{куб} \rho_{куб} \quad (4.8)$$

$$V_{дист.} = V_н - V_{куб} \quad (4.9)$$

$$M_{дист.} = V_{дист.} \rho_{дист.} \quad (4.10)$$

Коефіцієнт теплоємності $C_{ср}$ концентрованого розчину розраховується для середнього значення його концентрації $a_{ср}$, вираженого у відсотках

$$a_{ср} = \frac{a_{нач} + a_{кон}}{2} \quad (4.11)$$

Коректність розрахунків Мкуб. і Мдист. контролюється шляхом перевірки збіжності матеріального балансу.

Температурна різниця Δtк, градуси, обчислюється за формулою

при нагріві

$$\Delta t_{\hat{e}} = \frac{\Delta t_{\alpha} - \Delta t_{\mu}}{2,3 \lg \Delta t_{\alpha} / \Delta t_{\mu}} \qquad (4.12)$$

де Δtα і Δtμ – перепади температур між гріючою парою і продуктом відповідно, що нагрівається, на вході і виході з апарату.

При випаровуванні однокомпонентного продукту або розчину з невеликою температурною депресією, який надходить у апарат при температурі, близькій до його точки кипіння, величина температурного перепаду визначається як різниця між температурою нагрівальної пари та температурою кипіння продукту.

4.2 Аналіз та узагальнення результатів дослідження

Рівень зрошування суттєво впливає на ефективність теплопередачі всередині роторного апарату.

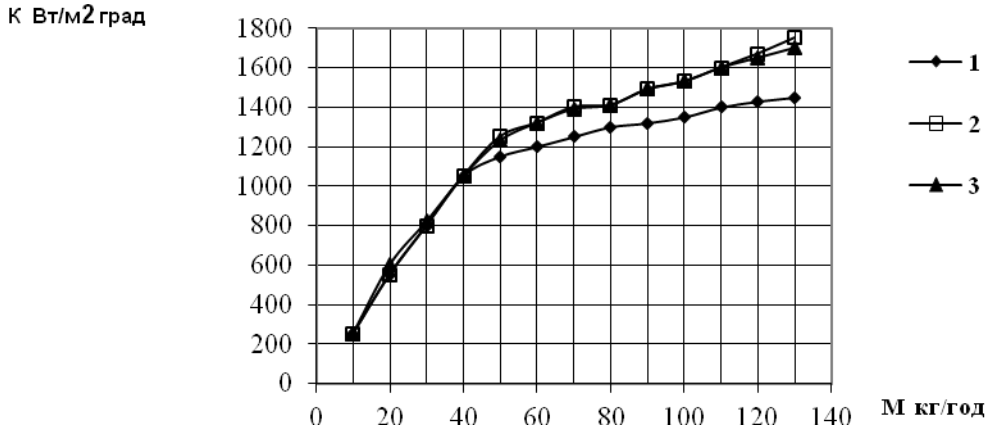


Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від навантаження по рідині при нагріві води: 1-число обертів ротора, рівне 400 в хвилину; 2-число обертів ротора, рівне 700 в хвилину; 3-число обертів ротора, рівне 1000 в хвилину

При цьому було відзначено існування двох ділянок, що відрізняються ступенем впливу щільності зрошування на коефіцієнт теплопередачі (рис. 4.3). На першій ділянці спостерігається майже лінійна залежність коефіцієнта

теплопередачі від щільності зрошування. Після досягнення точки перегину темп зростання коефіцієнта теплопередачі починає знижуватися. Збільшення числа обертів ротора зміщує цю точку перегину до більш високих значень щільності зрошування. Аналогічні закономірності встановлено також при нагріванні 60%-ного розчину гліцерину (рис. 4.4), що підтверджує вплив обертів та властивостей робочого середовища на ефективність теплопередачі.

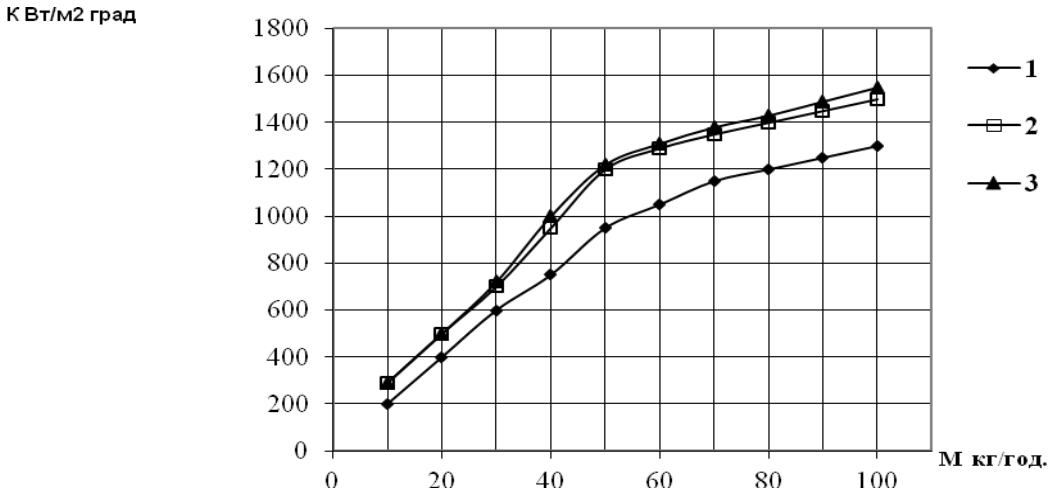


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від навантаження по рідині при нагріві 60%-го гліцерину: 1-число обертів ротора, рівне 400 в хвилину; 2-число обертів ротора, рівне 700 в хвилину; 3-число обертів ротора, рівне 1000 в хвилину.

Дослідження процесу випаровування води в роторному апараті зі шарнірними лопатками показало, що підвищення щільності зрошування призводить до безперервного зростання коефіцієнта тепловіддачі. Максимальні значення цього параметра спостерігалися при щільності зрошування 80-90 кг/м·год (рис. 4.5).

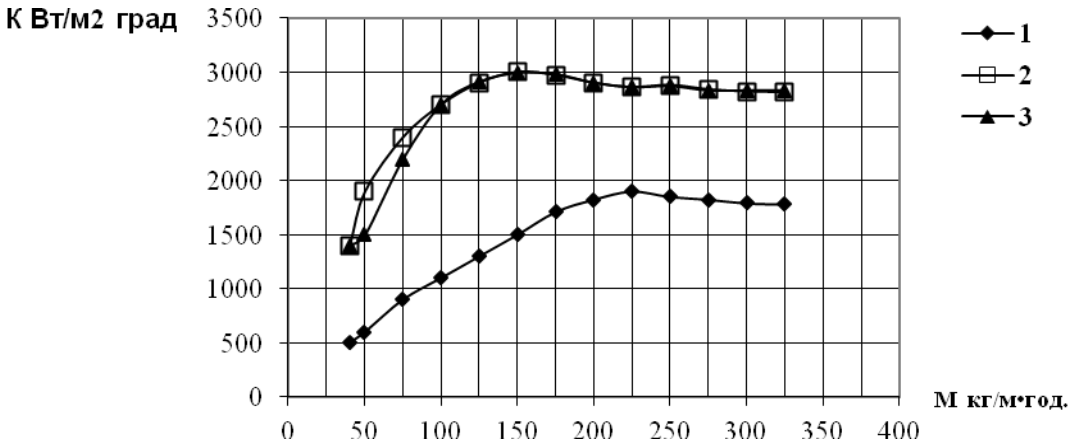


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від навантаження по рідині при випаровуванні води при різних окружних швидкостях ротора: 1-окружна швидкість, рівна 0,82 м/с; 2-окружная швидкість, рівна 1,36 м/с; 3-окружна швидкість, рівна 2,45 м/с

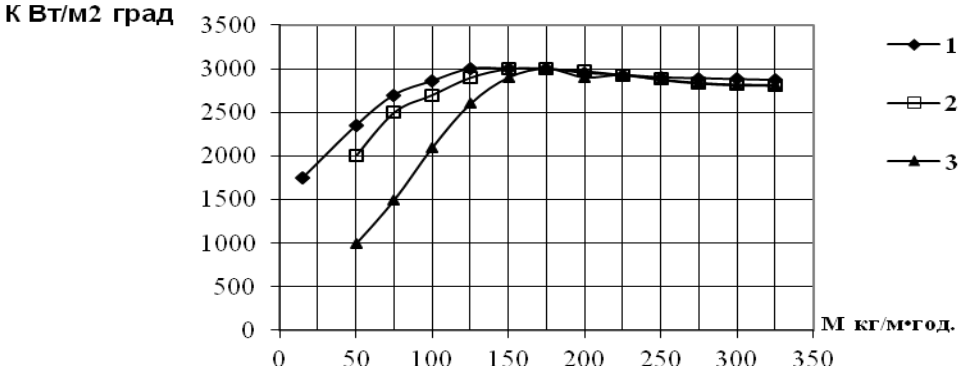


Рисунок 4.6 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від навантаження по рідині при випаровуванні води при різних температурних перепадах: 1-$\Delta t = 16\ ^0C$; 2- $\Delta t = 35^0C$; 3- $\Delta t = 55^0C$.

Подальше підвищення щільності зрошування не впливало на інтенсивність теплопередачі. Зміни температурного перепаду між парою, що нагріває, та киплячим продуктом не змінювали тепловий потік, а лише визначали значення щільності зрошування, при якому досягався максимум ефективності.

Зі збільшенням температурного перепаду точка перегину кривої переміщувалася в напрямку більшої щільності зрошування (рис. 4.6).

Для водних розчинів гліцерину з початковими концентраціями 15, 36 та 60 % у апараті зі шарнірними лопатками при підвищенні щільності зрошування від 50 до 200 кг/м·год спостерігалося зростання інтенсивності

теплопередачі (рис. 4.7), що свідчить про прямий вплив щільності на ефективність теплообміну в таких умовах.

Таке співвідношення параметрів пояснюється тим, що при збільшенні щільності зрошування за незмінного температурного перепаду знижується середня в'язкість концентрованого розчину, що сприяє інтенсифікації процесу теплопередачі.

При цьому характер зміни коефіцієнта теплопередачі залишається незалежним від початкової концентрації розчину, тоді як абсолютне значення коефіцієнта зменшується із зростанням початкової концентрації.

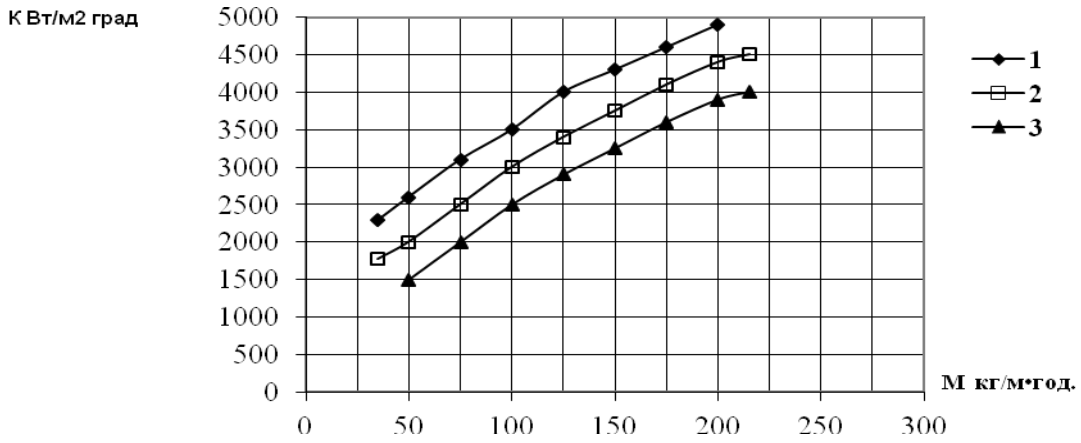


Рисунок 4.7 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від навантаження по рідині при концентруванні водногліцеринових розчинів:
1-5%; 2- 30%; 3- 60%

Під час нагрівання води в апараті з шарнірним ротором у зоні низької щільності зрошування інтенсивність теплопередачі практично не змінюється при зміні окружної швидкості обертання ротора (рис. 4.3).

Зі збільшенням окружної швидкості інтенсивність теплопередачі зростала, проте залежність цього процесу поступово зменшувалася. Під час нагріву в'язких продуктів ефект окружної швидкості проявлявся навіть при низькій щільності зрошування (рис. 4.4).

З ростом окружної швидкості момент віджимання лопаток від поверхні теплообміну зміщувався в сторону меншої щільності зрошування, що впливало на рівномірність теплопередачі.

При випаровуванні води, що надходить у апарат при температурі кипіння, підвищення числа обертів ротора призводило до деякого зростання інтенсивності процесу. Однак при окружних швидкостях 0,6-1 м/с процес стабілізувався, і подальше збільшення обертів ротора майже не впливало на коефіцієнт теплопередачі (рис. 4.8).

Підвищення температури теплоносія зміщувало точку досягнення максимального значення коефіцієнта теплопередачі у область більших окружних швидкостей, що свідчить про взаємозв'язок температури і динаміки шару.

При використанні водних розчинів гліцерину, що подаються в апарат близько температури кипіння початкової концентрації, збільшення концентрації продукту зменшувало інтенсивність теплопередачі. Водночас підвищення окружної швидкості обертання ротора сприяло збільшенню коефіцієнта теплопередачі, компенсуючи частково вплив високої концентрації.

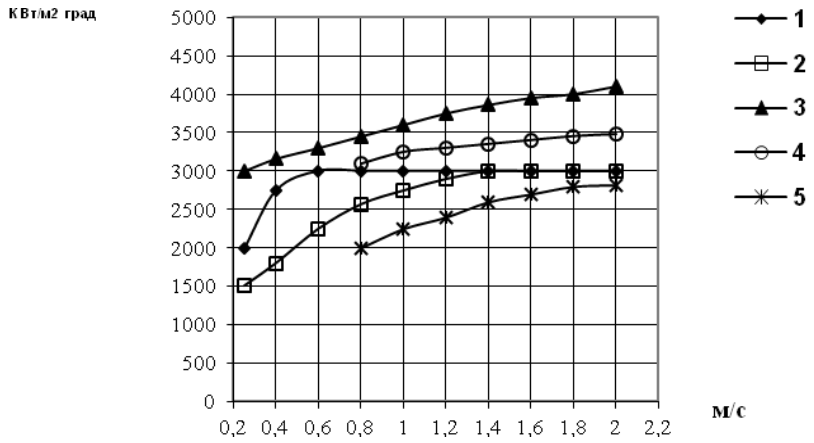


Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від окружної швидкості ротора: 1-$\Delta t = 20^0$C; М=105 кг/м•год., вода; 2- $\Delta t = 40^0$C; М=105 кг/м• год.,вода; 3-гліцерин 15%, $\Delta t = 40^0$C, М=105 кг/м•год.; 4-гліцерин 40%, $\Delta t=40^0$C, М=105 кг/м•год.; 5-гліцерин 60%, $\Delta t=40^0$C

Зміна інтенсивності теплового потоку забезпечувалася шляхом підвищення температури гріючої пари. Встановлено, що збільшення щільності потоку не впливає на ефективність теплопередачі під час випаровування води в роторному апараті зі шарнірними лопатками (рис. 4.9).

Отриманий ефект вказує на те, що процес випаровування відбувається головним чином з поверхні тонкої плівки рідини.

Після досягнення певного рівня температурного перепаду починало проявлятися явище розпилення поверхні теплообміну, що призводило до зниження величини коефіцієнта теплопередачі. Інтенсивність цього зниження зростає при меншій щільності зрошування.

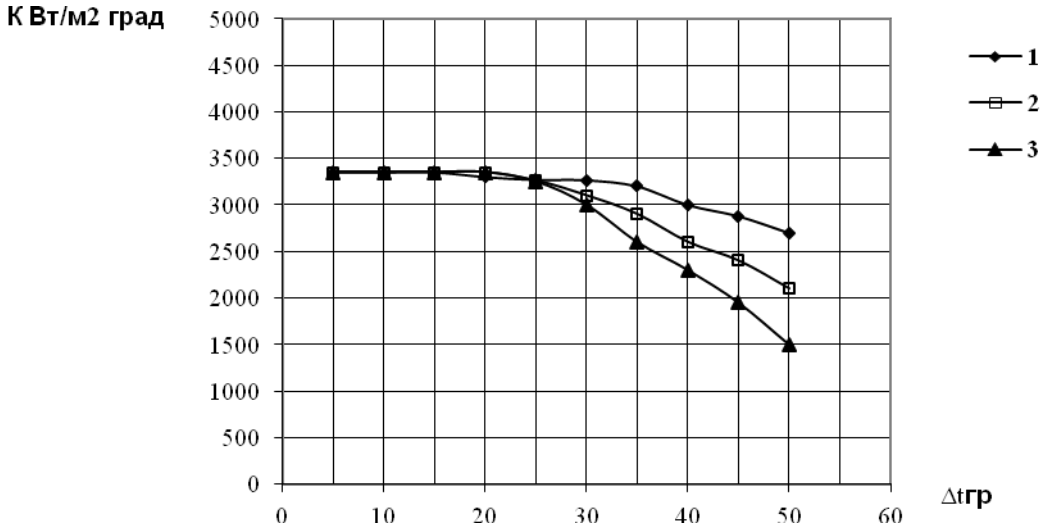


Рисунок 4.9 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від температурного перепаду при випаровуванні води:
1-М=370 кг/м•год.; 2- М=190 кг/м•год.; 3- М=75 кг/м•год.

У випадку продуктів, які під час концентрації змінюють свою в’язкість, спостерігалося зменшення коефіцієнта теплопередачі з підвищенням температурного перепаду. Це пояснюється збільшенням в’язкості продукту в процесі концентрації, що негативно впливає на ефективність теплообміну (рис. 4.10).

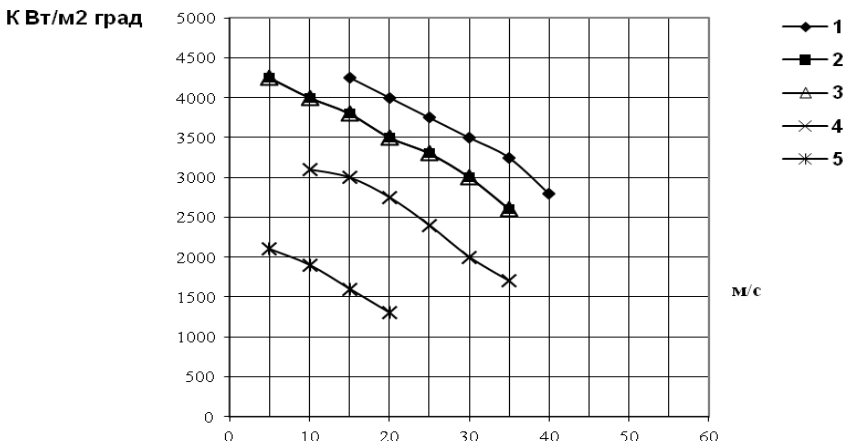


Рисунок 4.10 – Залежність коефіцієнта теплопередачі від температурного перепаду при концентруванні водногліцеринових розчинів:
1-М=120 кг/м• год.,15%; 2-М=105 кг/м •год.,вода,30%; 3-М=140 кг/м•год.; 30%;
4-М=140 кг/м•год.;60%; 5-М=75 кг/м•год.;60%

ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота присвячена автоматизації технологічного процесу роторно-плівкового апарату. У ході досліджень проведено аналіз роботи апарату та запропоновано рішення, спрямоване на підвищення його продуктивності та точності регулювання.

Проаналізовано технологічний процес апарату ИСР-8.0 і виявлено низку недоліків, серед яких головним є недостатній рівень автоматизації. Для усунення цього дефекту запропоновано створення системи автоматичного керування РПА.

Запропонована САК забезпечує підтримку апарату в оптимальному режимі роботи. Ефективність функціонування безпосередньо залежить від коефіцієнта теплопередачі в апараті, який регулюється зміною швидкості обертання ротора. Саме цей механізм регулювання покладено в основу роботи автоматизованої системи, що дозволяє підвищити стабільність та точність технологічного процесу.

Для впровадження автоматизації технологічного процесу роботи РПА було обрано відповідне обладнання. Запропоновано використати асинхронний електропривод із регулюванням частоти обертання, який забезпечує обертання ротора апарату. Для контролю зміни коефіцієнта теплопередачі додатково встановлено два температурні датчики, яких раніше не було: один на вході теплоносія, інший на виході апарату. Система автоматичного керування використовує різницю показників цих датчиків для визначення максимального коефіцієнта теплопередачі.

На підставі проведених досліджень і технологічних вимог розроблено функціональну та принципову схеми системи керування РПА, складено алгоритм її роботи та створено імітаційну модель за допомогою програмного пакета Matlab.

Аналіз запропонованої системи автоматичного керування показав її стабільність і працездатність. Система функціонує без перерегулювання,

забезпечує малий час перехідного процесу, а показники динаміки досягають оптимальних значень при підібраних інтегральних постійних часу регулятора.

Розроблена система автоматичного керування підвищує ефективність роботи апарату як за кількісними, так і за якісними показниками продукції. Її впровадження дозволяє оптимізувати роботу РПА ИСР-8.0, виводячи його на рівень, при якому він здатен конкурувати з сучасними автоматизованими установками.

У розділі з охорони праці виконано розрахунок системи штучної вентиляції у виробничому приміщенні, де відбувається експлуатація роторно-плівкового апарату та системи автоматичного керування ним.