

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.АКП -79.00.00.000 ПЗ

група АКП -22-1

Олександр Яцків

2026 рік

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Яцків Олександр Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.515
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Розроблення системи контролю якості процесу полімеризації
(назва роботи)

полівінілхлориду-Е

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва освітньої програми)

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Нормоконтроль

доцент О. В. Кучмистенко
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент Л. І. Фешанич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКП-22-1 О. В. Яцків
(шифр групи) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Науковий керівник

асистент Г. Г. Зварич
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Допущено до захисту Завідуючий кафедри

доцент А. І. Лагойда
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет Автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень перший (бакалаврський)

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКТ

А.І. Лагойда.

« » 20 року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Яцківу Олександру Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Розробка системи контролю якості процесу полімеризації полівінілхлориду-Е.**

керівник роботи Зварич Галина Григорівна.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «29» квітня 2026 року № 192/7

2. Строк подання студентом роботи 14.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: матеріали переддипломої практики,
технічна література, інтернет-ресурс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Обґрунтування розробки методу контролю якості
полівінілхлориду-Е. 2. Розробка енергетичного методу оцінювання якості у
виробництві емульсійного ПВХ-Е. 3. Математична обробка результатів
експерименту. Загальні висновки. Перелік посилань на джерела.

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

1. БР.АКТ-79.00.00.001 – Технологічна схема виробництва емульсійного полівінілхлориду.

2. БР.АКТ-79.00.00.002 – Узагальнена модель процесу полімеризації вінілхлориду як
об'єкта контролю. 3. БР.АКТ-79.00.00.003 – Графік зміни потужності електродвигуна
приводу мішалки за результатами обробки експериментальних даних в програмі Matlab.

4. БР.АКТ-79.00.00.004 – Графічне зображення автокореляційної функції досліджуваного
процесу зміни параметру K_{ϕ} . 5. БР.АКТ-79.00.00.005 – Кореляційні функції в програмі
Curve- Expert для знаходження їх передавальних функцій.

6. БР.АКТ-79.00.00.006 – Узагальнена структурна схема системи контролю параметру K_{ϕ} .

7. БР.АКТ-79.00.00.007 – Функціональна схема пристрою контролю навантаження на валі
мішалки реактора полімеризації ПВХ-Е. 8. БР.АКТ-79.00.00.008 – Дослідженням динамічних
властивостей вимірювального каналу контролю параметра K_{ϕ}

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 06.11.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування розробки методу контролю якості полівінілхлориду -Е	23.04.2026	
2	Розробка енергетичного методу оцінювання якості у виробництві емульсійного ПВХ-Е	03.05.2026	
3	Математична обробка результатів експерименту	30.05.2026	
4	Оформлення бакалаврської роботи	13.06.2026	

Студент _____
(підпис)

О. В. Яцків _____
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Г. Г. Зварич _____
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська робота містить: 60 сторінок, 23 рисунків, 1 таблицю, 7 літературних джерел.

Тема: «Розробка системи контролю якості процесу полімеризації полівінілхлориду-Е».

Метою роботи розробка системи неперервного контролю комплексного показника якості К для роботи в умовах функціонування реактора полімеризації вінілхлориду.

Об'єктом дослідження є процес полімеризації полівінілхлориду емульсійного у реакторі полімеризації.

Предмет дослідження: методи та засоби контролю параметрів процесу полімеризації, а також забезпечення стабільності показників якості продукції.

Результати роботи. Робота спрямована на розроблення сучасного методу та системи контролю якості полівінілхлориду (ПВХ) безпосередньо під час технологічного процесу його отримання. В основу дослідження покладено аналіз динамічних характеристик процесу полімеризації, статистичних параметрів технологічного режиму та закономірностей зміни робочих параметрів реактора. У ході роботи запропоновано підхід до безперервного контролю комплексного показника якості ПВХ, який базується на аналізі потужності, що споживається приводом мішалки реактора емульсійної полімеризації. На основі експериментальних і теоретичних досліджень взаємозв'язку між параметрами процесу полімеризації та потужністю електропривода мішалки було сформовано інформаційну модель оцінювання показника якості ПВХ.

Ключові слова: полівінілхлорид-Е, полімеризація, система контролю якості, автоматизація, технологічний процес, математична модель, реактор полімеризації, система керування.

ANNOTATION

Bachelor's thesis contains: 60 pages, 23 figures, 1 tables, 7 sources.

Topic: "Development of a quality control system for the polymerization process of polyvinyl chloride-E".

The purpose of the work is to study the technological process of polymerization of polyvinyl chloride-E, build a mathematical model and develop a quality control system to increase the efficiency of production and stability of the parameters of the finished product.

The object of the study is the polymerization process of emulsion polyvinyl chloride in a polymerization reactor.

Subject of the study: methods and means of controlling the parameters of the polymerization process, as well as ensuring the stability of product quality indicators.

Results of the work. The work is aimed at developing a modern method and system for controlling the quality of polyvinyl chloride (PVC) directly during the technological process of its production. The study is based on an analysis of the dynamic characteristics of the polymerization process, statistical parameters of the technological regime and patterns of changes in the operating parameters of the reactor. In the course of the work, an approach to continuous control of the complex quality indicator of PVC is proposed, which is based on the analysis of the power consumed by the mixer drive of the emulsion polymerization reactor. Based on experimental and theoretical studies of the relationship between the parameters of the polymerization process and the power of the mixer drive, an information model for assessing the quality indicator of PVC was formed.

Keywords: polyvinyl chloride-E, polymerization, quality control system, automation, technological process, mathematical model, polymerization reactor, control system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ	
ЯКОСТІ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ -Е	9
1.1 Дослідження масообмінних явищ при перемішуванні сировини з подальшим вибором адекватних математичних моделей	9
1.2 Дослідження умов контролю процесу полімеризації ПВХ та його вихідних показників якості	18
Висновок до розділу.....	24
2 РОЗРОБКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ У ВИРОБНИЦТВІ ЕМУЛЬСІЙНОГО ПВХ	26
2. Розроблення методу автоматичного контролю параметру K_f як показника молекулярної маси.....	26
2.2 Створення узагальненої структурної схеми системи контролю	30
2.3 Функціональної схеми системи контролю в'язкісно-молекулярного параметру K_f	33
2.4 Оцінка динамічних властивостей каналу вимірювання та визначення кроку дискретизації первинних вимірювальних перетворювачів	34
Висновки до розділу.....	46
3 МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ	47
3.1 Дослідження закономірностей та статистичних властивостей зміни споживаної потужності на валу перемішуючого пристрою реактора полімеризації ПВХ-Е	47

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Яцків О.В.			Розробка системи контролю якості процесу полімеризації полівінілхлориду-Е			Літ.	Арк.	Акрушів	
Перевір.		Зварич Г.Г.								6	60
Реценз.		Фешанич Л.І.						ІФНТУНГ АКП-22-1			
Н. Контр.		Кучмистенко О.В.									
Затверд.		Лагойда А.І.									

3.1.1	Визначення автокореляційної функції для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки	49
3.1.2	Визначення автокореляційної функції для параметру K_{ϕ}	51
3.1.3	Визначення спектральної густини для параметру K_{ϕ}	52
3.2	Визначення взаємних кореляційних функцій для в'язкісно-молекулярного параметру та для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки.....	53
3.3	Розрахунок передавальної функції системи	55
	Висновки до розділу.....	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....		58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....		60

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АКС – алгоритм кумулятивних сум.

ВК – вимірювальний канал.

ВН – відцентровий насос.

ВПАП – вимірювальний перетворювач активної потужності.

ВТН – вимірювальний трансформатор напруги.

ЕВН – електричний відцентровий насос.

K_{ϕ} – в'язкісно-молекулярний параметр.

К – комплексний показник якості.

ПВХ – полівінілхлорид.

ПВХ-Е – полівінілхлорид емульсійний.

ПККП– пристрій контролю комплексного показника.

ПО – пульт оператора.

ФМС – фізико-механічної системи

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ВСТУП

Актуальність теми бакалаврської роботи. На сучасних підприємствах хімічної промисловості контроль показників якості полівінілхлориду здійснюється переважно лабораторними методами шляхом періодичного відбору проб із подальшим визначенням числа в'язкості та розрахунок в'язкісно-молекулярного параметру (K_{ϕ}). Розрахунок комплексного показника якості виконується вже після завершення основних стадій технологічного процесу, що не дозволяє проводити безперервний моніторинг параметрів полімеризації у реальному часі.

Існуючі методи контролю не забезпечують оперативного отримання інформації про зміну властивостей ПВХ безпосередньо в реакторі полімеризації. Особливо це стосується режимів, що характеризуються температурами 40–50 °С та тиском до 0,8 МПа, які є типовими для процесу виробництва емульсійного полівінілхлориду. У зв'язку з цим актуальним є створення сучасних методів автоматизованого контролю, які дозволять здійснювати безперервне визначення параметрів процесу полімеризації та оперативно оцінювати якість ПВХ під час виробництва.

Метою роботи розробка системи неперервного контролю комплексного показника якості K для роботи в умовах функціонування реактора полімеризації вінілхлориду, використання якої дозволить підвищити якість виробництва ПВХ та попередити виникнення аварійних ситуацій.

Об'єктом дослідження є процес полімеризації полівінілхлориду емульсійного у реакторі полімеризації.

Предмет дослідження: методи та засоби контролю параметрів процесу полімеризації, а також забезпечення стабільності показників якості продукції.

Методи дослідження: аналіз існуючих технологічних рішень, методи теорії автоматичного керування, а також апарат нечітких множин для побудови інтелектуальних систем керування.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ-Е

1.1 Дослідження масообмінних явищ при перемішуванні з подальшим вибором адекватних математичних моделей

Процес перемішування сировини є складним фізико-механічним явищем, у якому беруть участь частинки різних розмірів і властивостей. Під час взаємодії між собою та з навколишнім середовищем вони формують багатокomпонентну систему, характеристики якої змінюються у часі. На перебіг процесу впливають механічні, гідродинамічні та інші зовнішні фактори [1].

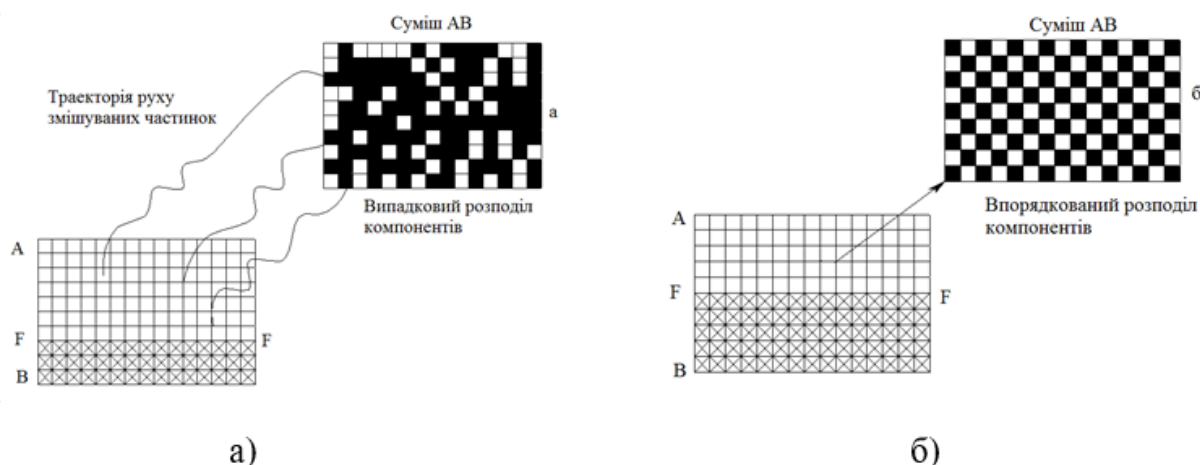
Під час аналізу змішування доцільно розглядати два рівні опису процесу. Перший рівень характеризує явища, що відбуваються в локальних об'ємах робочої камери змішувача, де міститься значна кількість частинок. Другий рівень охоплює процес у межах усього робочого об'єму апарата. Змішування належить до випадкових процесів, оскільки розподіл частинок у суміші має статистичний характер. У результаті переміщення матеріалу відбувається поступове вирівнювання концентрації компонентів у різних ділянках робочого простору. Основною рушійною силою цього процесу є хаотичні пульсації швидкостей частинок, які виникають під впливом зовнішніх дій.

Для сипучих матеріалів характерним є випадковий тип змішування, при якому компоненти розподіляються нерівномірно, але з часом ступінь неоднорідності зменшується. У деяких технологічних системах застосовують впорядкований спосіб змішування, що передбачає систематичне розміщення частинок одного компонента відносно іншого. Такий підхід використовується переважно у високов'язких середовищах або в спеціалізованих ротаційних змішувачах [1,5].

Якість отриманої суміші оцінюють за статистичними показниками розподілу компонентів. Найчастіше для аналізу використовують так званий

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ключовий компонент, концентрацію якого визначають у різних точках робочого об'єму. Одним із основних критеріїв однорідності суміші є дисперсія концентрації. Процес перерозподілу компонентів при перемішуванні наведений на рис.1.1.



а – випадковий розподіл; б – впорядкований розподіл

Рисунок 1.1 – Процес перерозподілу компонентів при перемішування компонентів

В первинний момент має місце максимальна статистична неоднорідність - сипучі матеріали А і В стикаються тільки через поверхню F - F. Пройшовши певний шлях і взаємодіючи один з одним, частинки матеріалів А і В займуть інше положення, відповідне поняттю суміші. Схема упорядкованого процесу змішування наведена на рис.1.1, б), згідно з якою на статистичне поле сипучого матеріалу А в певному порядку наносяться частинки сипучого матеріалу В.

Найважливішою кількісною характеристикою процесу перемішування сировини є швидкість процесу [4,5], під якою розуміють кількість часток N будь-якого компонента, що надходить в процес змішуванні за одиницю часу. При постійному об'ємі частинок, що змішуються, швидкість дорівнює:

$$W_c = \frac{1}{V} \frac{dN}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{N}{V} \right) = \frac{dc}{dt},$$

де с - концентрація компонента; V - робочий об'єм змішувача.

Оскільки перерозподіл компонентів у робочому об'ємі змішувача в результаті повинен привести до отримання математично очікуваної концентрації $m = N'/V$ компонента, то швидкість процесу змішування характеризуватиметься різницею концентрації c і математичним очікуванням m , тобто

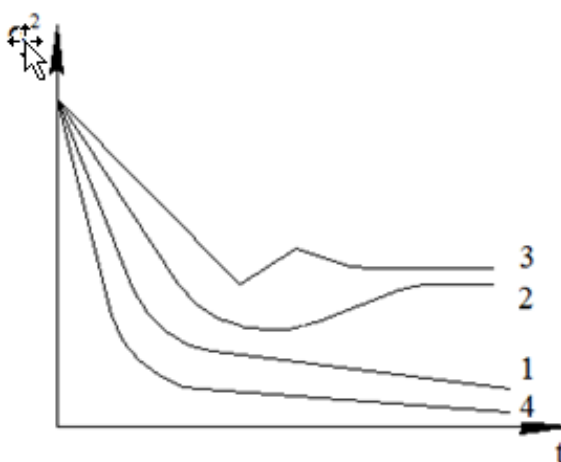
$$W_c = \frac{1}{V} \frac{d(N - N')}{dt} = \frac{d}{dt}(c - m),$$

де N' - число частинок в об'ємі, що відповідає математичному очікуванню. Як випливає з викладеного вище, оцінка якості суміші проводиться з використанням вибірових статистик, для розрахунку яких необхідна інформація про значення абсолютних відхилень $|c - m|$ у n точках.

Швидкість процесу може бути оцінена через зміну дисперсії σ^2 або середньоквадратичного відхилення σ [1-4]:

$$W_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} \frac{d\sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i - m)^2}}{n}.$$

Можливе вираження швидкості процесу через величини, функціонально пов'язані з дисперсією розподілу концентрації компонента.



1 - найбільш розповсюджений вид; 2 - при сепараційних ефектах; 3 - при зміні агрегатного стану; 4 - при перемішуванні, що супроводжується хімічною реакцією

Рисунок 1.2 – Кінетичні криві процесу перемішування

Для опису швидкості перемішування застосовують залежність:

$$N=cV$$

де c – концентрація компонента; V – робочий об'єм змішувача.

На рис. 1.2 наведено вид кінетичних кривих процесів змішування. Вивчення процесу в часі дозволяє визначити оптимальний час змішування і відкриває шляхи удосконалення змішувальних машин і методів змішування.

В дослідженнях процесу перемішування широко використовується графічний метод зображення залежності. Крива, що відображає зміну дисперсії концентрації чи якоїсь іншої змінної в часі величини, називається кінетичною кривою.

Процес перемішування компонентів A і B (рис. 1.1) та утворення двокомпонентної суміші можна представити у вигляді $A+B \rightarrow AB$ (суміш), в якій з двох еквівалентних об'єднань A і B утворюється найменший можливий асоціат суміші AB . При рівності числа частинок двох сортів в суміші в об'єднанні A і в об'єднанні B містяться по одній частинці, при нерівній кількості частинок, що перемішуються, в суміші в A і B входить відповідне число часток, але їх сума є найменшим числом частинок сортів A та B , з яких можна утворити асоціат суміші AB . На підставі сказаного можна стверджувати, що схема, наведена вище, відповідає змішуванню при будь-яких співвідношеннях компонентів у суміші.

Позначимо через $X_1(t)$ і $X_2(t)$ випадкові величини, що характеризуються відповідно кількістю об'єднань з частинок A та кількістю об'єднань з частинок B , а через $X_3(t)$ - випадкову величину, що характеризує кількість асоціатів суміші AB в момент часу t в об'ємі змішувача. Позначимо через $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ ($x_i \geq 1$) ті цілочисельні значення, які ці випадкові величини можуть приймати. Значення $X_1(t) = x_1(0)$, $X_2(t) = x_2(0)$, і $X_3(t) = x_3(0)$, тоді відповідно до схеми перемішування $X_3(0) = X_1(0) - X_1(t) = X_2(0) - X_2(t)$ або $x_3(0) = x_1(0) - x_1(t) = x_2(0) - x_2(t)$.

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Розглянемо поведінку випадкової величини $X_1(t)$. Для цього позначимо через $P_{x_1}(t)$ ймовірність того, що цілочисельна випадкова величина $X_1(t)$

прийме значення x_1 , тобто $P_{x_1}(t) = P\{X_1(t) = x_1\}$, де $x_1 = 1, 2, \dots, x^*(t)$, $x^*(t)$ - максимальне число об'єднань частинок сорту А, яке до моменту часу t не ввійшло в асоціати суміші АВ.

Припускаємо, що розглянута вище схема утворень суміші відповідає марківському процесу розпаду популяції (числа) об'єднань частинок А і В, згідно з яким ймовірність переходу зі стану X_1 в стан $X_1 - 1$ за час $t, t + \Delta t$ пропорційна добутку чисел об'єднань у момент часу t , рівному $h_{x_1} = x_1(t) \cdot x_2(t)$, з коефіцієнтом пропорційності μ .

Відповідно до постулатів розривного марківського процесу розпаду популяції можна записати співвідношення

$$P_{x_1}(t + \Delta t) = [1 - \mu h_{x_1} \Delta t] P_{x_1}(t) + \mu h_{x_1+1} \Delta t P_{x_1+1}(t) + o(\Delta t),$$

в якому перший параметр правої частини означає, що в інтервалі $t, t + \Delta t$ не відбудуться зміни в системі, другий – дорівнює ймовірності, що розпадеться одне об'єднання часток А і утвориться один асоціат суміші АВ, а третій - більше одного. При $\Delta t \rightarrow 0$ отримаємо систему диференціально-різницевих рівнянь, що описують розпад популяції об'єднань частинок компонента А, у вигляді:

$$\frac{dP_{x_1+1}(t)}{dt} = \mu [h_{x_1+1} P_{x_1+1}(t) - h_{x_1} P_{x_1}(t)],$$

де $x_1 = 1, 2, \dots, x^*$.

При оцінці роботи перемішувача найбільший інтерес представляє зміна моментів розподілу, через які виражається якість суміші, зокрема, математичного сподівання і дисперсії концентрації компонентів. Тому здається доцільним рівняння системи помножити на x_1 у відповідному стані, а потім ліві і праві частини просумувати по $x_1 = 1, 2, \dots, x^*$, тоді одержимо:

$$\frac{d \sum_{x_1=1}^{x^*} x_1 P_{x_1}(t)}{dt} = \mu \sum_{x_1=1}^{x^*} [x_1 h_{x_1+1} P_{x_1+1}(t) - x_1 h_{x_1} P_{x_1}(t)].$$

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Перетворимо суму в правій частині рівняння, розкривши суму по x_1 [8]

$$\begin{aligned} \sum_{x_1=1}^{x^*} [x_1 h_{x_1+1} P_{x_1+1}(t) - x_1 h_{x_1} P_{x_1}(t)] &= h_2 P_2(t) - h_1 P_1(t) + 2h_3 P_3(t) - \\ &2h_2 P_2(t) + 3h_4 P_4(t) - 3h_3 P_3(t) + \dots + (x^* - 1)h_{x^*} P_{x^*}(t) - \\ &-(x^* - 1)h_{x^*-1} P_{x^*-1}(t) + x^* h_{x^*-1} P_{x^*-1}(t) - x^* h_{x^*} P_{x^*}(t) \end{aligned}$$

Тут ймовірність $P_{x^*+1}(t) = 0$, тоді, провівши очевидні перетворення, отримаємо [3]:

$$\sum_{x_1=1}^{x^*} [x_1 h_{x_1+1} P_{x_1+1}(t) - x_1 h_{x_1} P_{x_1}(t)] = -\sum_{x_1=1}^{x^*} h_{x_1} P_{x_1}(t).$$

Підставивши це рівняння отримаємо:

$$\frac{d}{dt} \sum_{x_1=1}^{x^*} x_1 h_{x_1} P_{x_1}(t) = -\mu \sum_{x_1=1}^{x^*} h_{x_1} P_{x_1}(t). \quad (1.1)$$

У рівнянні (1.1) сума в лівій частині це математичне сподівання дискретної випадкової величини $x_1(t)$ - числа об'єднань частинок А, тобто:

$$\sum_{x_1=1}^{x^*} x_1 P_{x_1}(t) = -m_{x_1}(t). \quad (1.2)$$

Враховуючи, що за визначенням, $h_{x_1} = x_1 x_2$ і випадкові величини $x_1(t)$ і $x_2(t)$ у відповідності зі схемою процесу характеризуються одним законом розподілу ймовірностей, перетворимо суму в правій частині рівняння (1.1), причому підсумовування будемо робити по x_1 та x_2 :

$$\sum_{x_1=1}^{x^*} h_{x_1} P_{x_1}(t) = \sum_{x_1, x_2=1}^{x^*} x_1 x_2 P_{x_1}(t) = m_{x_1 x_2}(t),$$

де $m_{x_1 x_2}(t)$ – математичне сподівання спільного розподілу двох дискретних випадкових величин $x_1(t)$ та $x_2(t)$.

Перший початковий момент $m_{x_1 x_2}(t)$ можна виразити через математичне очікування $m_{x_1}(t)$, $m_{x_2}(t)$ і кореляційний момент (змішаний момент другого порядку) $x_1(t)$ та $x_2(t)$ за формулою:

$$k_{x_1(t)x_2(t)} = \text{cov}\{x_1(t)x_2(t)\} = m_{x_1 x_2}(t) - m_{x_1}(t)m_{x_2}(t),$$

звідси

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

$$m_{x_1 x_2} = \text{cov}\{x_1(t)x_2(t)\} + m_{x_1}(t)m_{x_2}(t). \quad (1.3)$$

Підставляючи вирази (1.2) і (1.3) у рівняння (1.1) отримаємо:

$$\frac{dm_{x_1}(t)}{dt} = -\mu m_{x_1}(t)m_{x_2}(t) - \mu \text{cov}\{x_1(t)x_2(t)\}, \quad (1.4)$$

де $m_{x_1}(t)$ і $m_{x_2}(t)$ - математичні очікування числа об'єднань частинок А і числа об'єднань частинок В в суміші, а

$$\text{cov}\{x_1(t)x_2(t)\} = \sum_{x_1 x_2=1}^{x^*} [m_{x_1}(t) - x_1(t)][m_{x_2}(t) - x_2(t)]P_{x_1}(t) \quad - \quad \text{кореляційний момент}$$

(коваріація) x_1 і x_2 , що характеризує їх спільний розподіл в момент часу t .

Перейдемо в рівнянні (1.4) до концентрацій. Для цього помножимо обидві частини рівняння (1.4) на величину $a'b'/(N_A a' + N_B b')^2$, де $a' = a\gamma_A V_A$; $b' = b\gamma_B V_B$; a і b - число часток, що входять в об'єднання А і В; V_A та V_B - об'єми частинок сорту А і В; γ_A та γ_B - питомі ваги матеріалів частинок А і В; N_A і N_B - число об'єднань А і В. Тоді отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{b'}{N_A a' + N_B b'} \frac{d}{dt} \left[\frac{a' m_{x_1}(t)}{N_A a' + N_B b'} \right] &= -\mu \left[\frac{a' m_{x_1}(t)}{N_A a' + N_B b'} \right] \times \\ &\times \left[\frac{b' m_{x_2}(t)}{N_A a' + N_B b'} \right] - \mu \frac{a' b'}{(N_A a' + N_B b')^2} \text{cov}\{x_1(t)x_2(t)\} \end{aligned} \quad (1.5)$$

де $a' m_{x_1}(t)/(N_A a' + N_B b') = c_A^0$, $b' m_{x_1}(t)/(N_A a' + N_B b') = c_B^0$ - вагові концентрації компонентів незмішаних об'єднань А та В; m_A і m_B - математичні очікування концентрацій компонентів А і В, що відповідають рецептурному значенню концентрації в суміші.

Вважаючи $k = \mu(N_A a' + N_B b')/b'$, одержимо рівняння (1.5) у вигляді [3]:

$$d(c_A - m_A)/dt = -k(c_A - m_A)(c_B - m_B) - k \cdot \text{cov}(c_A c_B), \quad (1.6)$$

де $\text{cov}(c_A c_B)$ - кореляційний момент розподілу концентрацій компонентів, який з урахуванням нормування $c_A + c_B = 1$ перетворюється в дисперсію D_A , при цьому перед ним міняється знак.

Враховуючи це запишемо рівняння (1.6) в закінченому вигляді:

$$d(c_A - m_A)/dt = -k(c_A - m_A)^2 + kD_A. \quad (1.7)$$

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Аналогічне рівняння можна отримати для розпаду об'єднань частинок компонента В:

$$d(c_B - m_B)/dt = -k(c_B - m_B)^2 + kD_B. \quad (1.8)$$

Рівняння (1.7) і (1.8) характеризують зміну концентрації компонентів А і В у всьому об'ємі змішувача.

Викладений вище підхід може бути використаний для опису змішування багатокомпонентних композицій. Тоді рівняння (1.7) для будь-якого з компонентів можна записати у вигляді

$$d(c_i - m_i)/dt = -k_i(c_i - m_i) \sum_{j=1}^n (c_j - m_j) + k_i D_{c_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.9)$$

де n - число компонентів, що змішуються; c_i, m_i - відповідно концентрація і математичне очікування і-го компонента; D_{c_i} - дисперсія концентрації і-го компонента. Для двокомпонентної суміші ($n = 2$) рівняння (1.9) перетворюється на (1.7).

Для трьох компонентів ($n = 3$) маємо систему рівнянь

$$d(c_1 - m_1)/dt = -k_1[(c_1 - m_1)(c_1 - m_1) + (c_1 - m_1)(c_3 - m_3)] + k_1 D_{c_1};$$

$$d(c_2 - m_2)/dt = -k_2[(c_1 - m_1)(c_2 - m_2) + (c_2 - m_2)(c_3 - m_3)] + k_2 D_{c_2};$$

$$d(c_3 - m_3)/dt = -k_3[(c_3 - m_3)(c_2 - m_2) + (c_3 - m_3)(c_2 - m_2)] + k_3 D_{c_3}.$$

У межах фізико-механічної системи (ФМС) вектор вхідних змінних u (вихідна функція розподілу часток, що змішуються, по розмірам, концентрація, швидкість, температура, щільність, в'язкість та ін, частинок і несучого середовища на вході в апарат) зазнає спрямоване фізико-механічне перетворення в вектор вихідних змінних y (гранулометричний склад готового продукту, якість суміші - дисперсія концентрації частинок по об'єму апарату та ін.), або, іншими словами, вектор u під дією технологічного оператора $T_{\text{ФМС}}$ фізико-механічної системи перетворимо в вектор вихідних змінних y .

Математичний опис процесу змішування базується на системі диференціальних рівнянь, які враховують концентрацію компонентів, параметри середовища та фізико-механічні властивості частинок. У загальному

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

випадку модель технологічного процесу може бути подана у вигляді функціональної залежності між вхідними та вихідними параметрами системи:

$$y = T_{\Phi MC}(u),$$

де u – вектор вхідних параметрів; y – вектор вихідних характеристик; $T_{\Phi MC}$ – оператор фізико-механічної системи.

Поняття технологічного оператора ФМС формалізує відображення простору змінних входу в простір змінних виходу, що відповідає реальному процесу змішування.

Відображенню (1.10) відповідає його математична модель

$$\hat{y} = \Phi_{\Phi MC}(u, x, a), \quad (1.11)$$

у формі функціонального оператора $\Phi MC(\Phi_{\Phi MC})$, що відображає функціональні простори вхідних змінних $\{u\}$, змінних стану ФМС $\{x\}$ і параметрів математичної моделі $\{a\}$ в функціональний простір оцінок вихідних змінних $\{y\}$.

Математична модель (1.10) є ідеалізацією реального відображення (1.11). Вектор дійсних вихідних змінних y не збігається з вектором оцінок вихідних змінних $\hat{y}$ математичної моделі (1.11), так як функціональний оператор $\Phi_{\Phi MC}$ є наближеною характеристикою технологічного оператора $T_{\Phi MC}$. Необхідною ознакою тотожності операторів $T_{\Phi MC}$ і $\Phi_{\Phi MC}$ є близькість y і $\hat{y}$ в розумінні тієї чи іншої норми.

Математична модель процесу перемішування (1.11) є замкнутою системою диференціальних, інтегральних, інтегродиференціальних рівнянь, співвідношень емпіричного характеру, доповнену необхідними початковими умовами.

До формальних способів побудови моделей належать експериментально-статистичні методи, що базуються на аналізі інформації про вхідні та вихідні параметри системи за принципом «чорного ящика». У такому випадку математичний опис формується шляхом статистичної обробки результатів експериментальних досліджень.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Неформальні методи моделювання передбачають використання фізичних закономірностей та особливостей перебігу процесу змішування. До них належать:

а) поетапне та обґрунтоване спрощення узагальненого математичного опису процесу, сформованого під час якісного аналізу явищ у локальному об'ємі апарата на першому рівні ієрархії фізико-механічної системи;

б) адаптація математичних моделей до конкретного типу змішувального обладнання на основі аналізу процесів у межах усього робочого об'єму апарата, що відповідає другому рівню ієрархічної структури ФМС;

в) застосування модельних уявлень щодо гідродинамічної структури потоку частинок і несучого середовища всередині змішувального апарата.

1.2 Дослідження умов контролю процесу полімеризації ПВХ та його вихідних показників якості

Тривалий час основним способом одержання ПВХ була емульсійна полімеризація. Незважаючи на розвиток суспензійної технології, емульсійний полівінілхлорид і сьогодні залишається важливим матеріалом для виробництва пластизолів та спеціальних полімерних композицій. Це пояснюється тим, що суспензійний ПВХ без додаткової обробки не забезпечує необхідних властивостей для виготовлення широкого асортименту пастоподібних матеріалів [1].

Одним із перспективних напрямків є виробництво емульсійного полівінілхлориду на підприємствах хлорорганічного синтезу. Зростання попиту на вінілхлорид та продукти його переробки обумовлює необхідність удосконалення технологічних процесів і підвищення стабільності якості готової продукції.

Вихідною сировиною для синтезу вінілхлориду є 1,2-дихлоретан, який у процесі термічного піролізу перетворюється у вінілхлорид. Надалі вінілхлорид

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

використовується як основний компонент у процесі емульсійної полімеризації з подальшим отриманням латексу ПВХ.

Технологічний процес одержання емульсійного полівінілхлориду (ПВХ) охоплює низку послідовних стадій (рис. 1.5), серед яких підготовка емульсійної води та розчину ініціатора, проведення процесу полімеризації вінілхлориду, дегазація латексу, а також сушіння і виділення готового порошкоподібного продукту ПВХ.

Процес полімеризації реалізується у реакторах безперервної дії спеціальної конструкції. У реактор здійснюється подача вінілхлориду та емульсійної води з заданими значеннями температури і тиску. Для забезпечення однорідності реакційного середовища та інтенсифікації масообмінних процесів застосовується механічне перемішування за допомогою лопатевої мішалки.

Полімеризаційний процес у реакторі умовно поділяється на дві основні стадії. На початковому етапі відбувається інтенсивне перемішування компонентів реакційної суміші та ініціювання реакції полімеризації. У нижній зоні реактора забезпечується подальше протікання реакції до досягнення необхідного ступеня конверсії мономеру з утворенням латексу полівінілхлориду.

Емульсійна полімеризація вінілхлориду відбувається через стадію колоїдного розчинення мономеру в міцелах емульгатора. Під впливом водорозчинного ініціатора здійснюються реакції росту та обриву полімерних ланцюгів. Умови перебігу зазначених процесів суттєво впливають на фізико-хімічні характеристики отриманого полімерного матеріалу.

Температурний режим полімеризації, як правило, підтримується в межах 40–60 °С, при цьому тиск у реакторі не перевищує 0,9 МПа. Для стабілізації температури процесу використовується система охолодження з циркуляцією охолодженої знесоленої води. Ефективне відведення тепла реакції є однією з основних умов забезпечення стійкого та безпечного перебігу процесу полімеризації.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Після завершення процесу полімеризації отриманий латекс спрямовується у дегазаційні апарати, де здійснюється видалення непрореагованого вінілхлориду. Відокремлений мономер повертається у технологічний цикл для повторного використання, тоді як латекс подається на подальшу стадію сушіння з отриманням порошкоподібного полівінілхлориду.

Одним із важливих технологічних параметрів функціонування реактора є стабілізація рівня латексу. Автоматичне підтримання заданого рівня забезпечує надійну та безпечну роботу обладнання, а також мінімізує ймовірність виникнення аварійних режимів.

Якість готового полівінілхлориду оцінюється комплексом фізико-хімічних характеристик, серед яких найбільш значущими є відносна в'язкість, густина латексу, здатність до утворення паст, водопоглинання та в'язкісно-молекулярний параметр. Процес полімеризації належить до складних багатофакторних процесів, для яких характерна наявність значної кількості взаємозалежних параметрів. Формування властивостей кінцевого продукту залежить від температурного та тискового режимів, витрати реагентів, характеристик емульсійної води, потужності приводу мішалки та інших чинників. З позиції автоматизації реактор полімеризації доцільно розглядати як складний багатопараметричний об'єкт керування.

Параметрами, що характеризують фізико-хімічний стан середовища, є водневий показник рН, концентрація ініціатора, твердість води та вміст розчиненого кисню.

Основними характеристиками латексу, які використовуються для оцінювання його якості, виступають густина, концентрація та відносна в'язкість. На основі цих показників визначається інтегральний показник якості — в'язкісно-молекулярний параметр (константа Фікентчера).

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

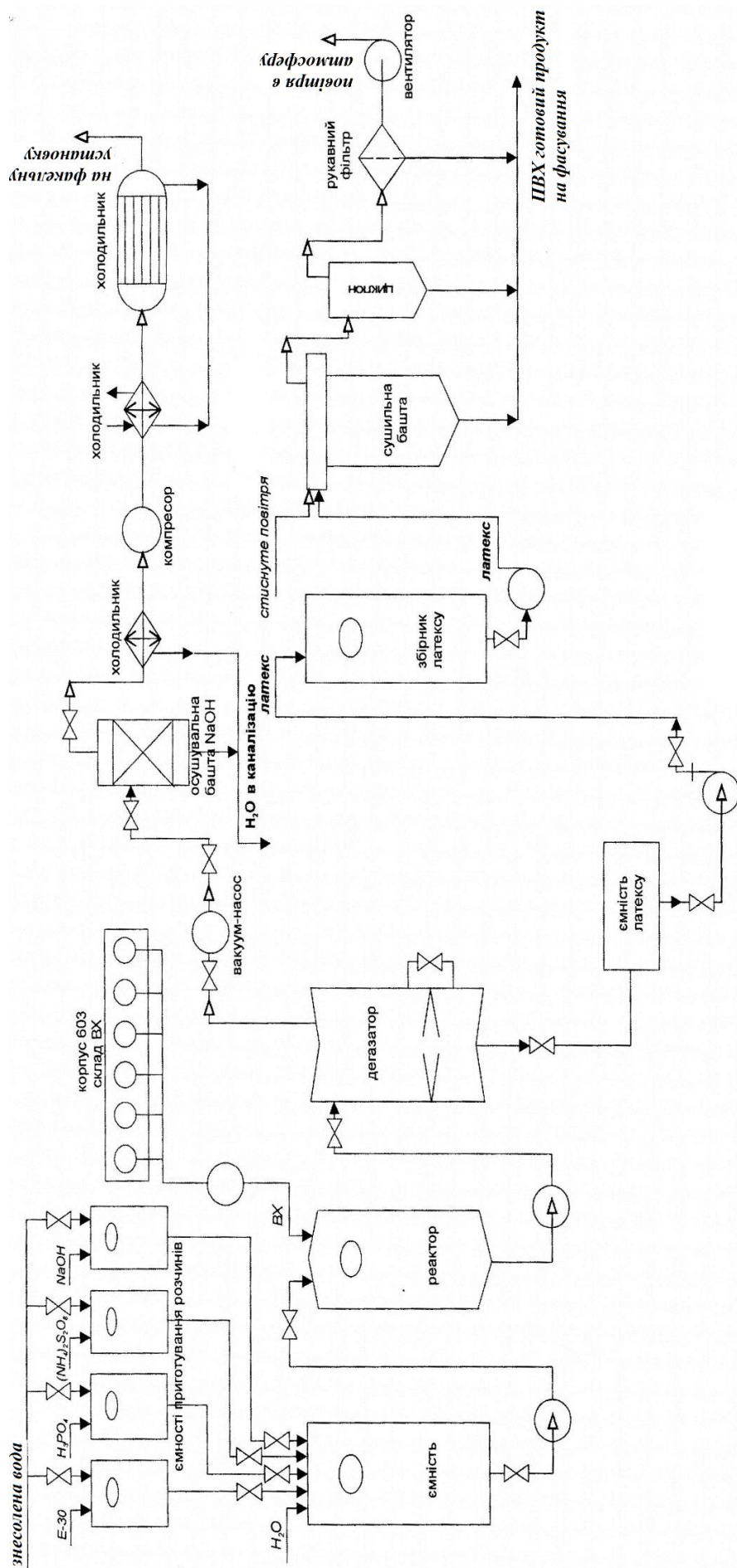


Рисунок 1.5 – Технологічна схема виробництва емульсійного полівінілхлориду

Режим полімеризації визначається необхідною маркою полівінілхлориду та характеристиками використовуваної сировини. Зазвичай процес відбувається при температурі 40–60 °С, тоді як тиск у реакторі не перевищує 0,9 МПа. Тепло, що виділяється під час реакції полімеризації, відводиться за допомогою охолодженої знесоленої та знекисненої води. Для забезпечення ефективного теплообміну вода безперервно циркулює через сорочку реактора по замкненому контуру за допомогою відцентрового насоса. Така схема дозволяє підтримувати стабільні температурні умови в зоні протікання реакції.

Необхідний температурний режим у реакторі забезпечується подачею в систему охолодження води з температурою до 10 °С. Охолоджувальна рідина надходить у циркуляційний контур оболонки реактора, що дає можливість підтримувати задані параметри процесу полімеризації.

Після завершення реакції отриманий латекс ПВХ разом із залишками непрореагованого вінілхлориду відводиться з нижньої частини реактора до дегазаційних колон. У дегазаторах здійснюється відокремлення вінілхлориду, який далі повертається у технологічний цикл для повторного використання.

Рівень латексу всередині реактора автоматично підтримується у встановлених межах — від 6,35 до 6,55 м. Регулювання виконується таким чином, щоб у верхній частині апарата залишався вільний газовий об'єм близько 1 м³, необхідний для забезпечення вибухобезпеки технологічного процесу.

Якість готового полівінілхлориду визначається сукупністю технологічних та фізико-хімічних характеристик, серед яких важливими є водопоглинання, здатність до пастоутворення та інші показники. Водночас сам процес полімеризації залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів: властивостей емульсійної води, параметрів вінілхлориду, інтенсивності перемішування, енергетичних витрат та інших умов. Багато з цих параметрів змінюються випадковим чином і залежать від додаткових зовнішніх впливів, що значно ускладнює оцінювання впливу кожного окремого фактора на якість кінцевого продукту.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Тому для аналізу та дослідження процес полімеризації вінілхлориду доцільно описати за допомогою моделі об'єкта керування (рис.1.6):

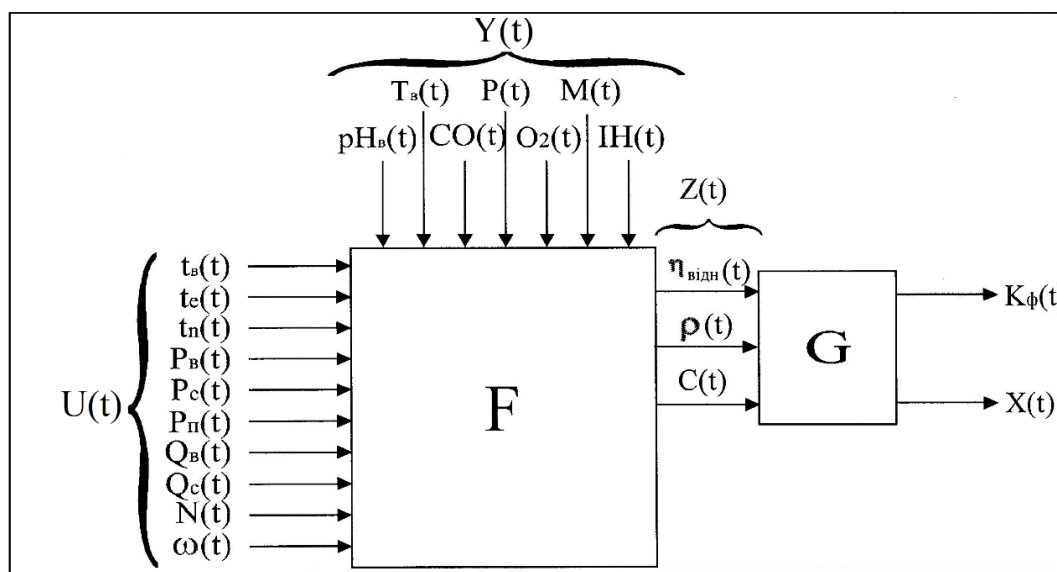


Рисунок 1.6 – Модель процесу полімеризації вінілхлориду як об'єкта керування

Параметри і показники, що зумовлюють процес полімеризації вінілхлориду, в залежності від їх впливу, можна поділити на такі групи:

1. Вхідні параметри $U(t)$ режиму полімеризації: температура вінілхлориду t_b , емульсійної води t_e , температура в реакторі полімеризації t_n ; тиск вінілхлориду P_v , емульсійної води P_e , в реакторі полімеризації P_n ; витрата вінілхлориду Q_v , емульсійної води Q_e ; потужність на валі електродвигуна мішалки N і частота його обертання ω :

$$U(t) = [t_b(t), t_e(t), t_n(t), P_v(t), P_e(t), P_n(t), Q_v(t), Q_e(t), N(t), \omega(t)].$$

2. Вхідні параметри $Y(t)$, що характеризують фізико-хімічні властивості емульсійної води; водневий показник pH_b , вміст ініціатора IH , CO , вміст буферної суміші-титру (числа P і M), твердість води T_b , вміст кисню O_2 :

$$Y(t) = [pH_b(t), IH(t), CO(t), P(t), M(t), T_b(t), O_2(t)].$$

3. Показники $Z(t)$ якості режиму полімеризації вінілхлориду: відносна в'язкість $\eta_{відн}$ концентрація C , густина $\rho(t)$, які використовуються для

розрахунку комплексного показника якості латексу ПВХ-Е – $K_{\phi}(t) = G[\eta_{\text{відн}}(t), C(t), \rho(t)]$ і коефіцієнта в'язкості $X(t)$.

Аналіз результатів експериментальних досліджень процесу полімеризації показує, що він описується сукупністю випадкових процесів $c(t)$, $\rho(t)$, $K(t)$, $\eta_{\text{відн}}(t)$, $pH_{\text{в}}(t)$, $t_{\text{в}}(t)$, $P_{\text{в}}(t)$, $Q_{\text{в}}(t)$, $N(t)$ та ін., які стохастично зв'язані між собою.

Параметри $Z_i(t)$, які характеризують якість латексу, пов'язані з вхідними параметрами режиму полімеризації $U(t)$, параметрами $Y(t)$, що характеризують фізико-хімічні властивості емульсійної води, залежністю:

$$Z_i(t) = F_i[U(t), Y(t)], i = 1, 2, \dots, n.$$

$$K_{\phi}(t) = G\{\eta_{\text{відн}}(t), C(t)\}.$$

В'язкісно-молекулярний параметр K_{ϕ} є досить зручною характеристикою і дає достатнє для практичної мети наближення. Для різних видів ПВХ вона має різні значення:

емульсійний ПВХ	$K_{\phi \text{ е}} = 54 - 77,$
суспензійний ПВХ	$K_{\phi \text{ с}} = 47 - 76,$
ПВХ в масі	$K_{\phi \text{ м}} = 56 - 72.$

Отримані результати підтверджують доцільність застосування сучасних методів автоматизованого контролю та математичного моделювання для підвищення ефективності процесу полімеризації, стабілізації режимів роботи обладнання та покращення якості готового полівінілхлориду.

Висновок до розділу

Технологічний процес отримання ПВХ (зокрема, стадія полімеризації) є періодичним (або безперервним) процесом із високим ступенем параметричної невизначеності, значною інерційністю та нелінійною кінетикою виділення тепла. Основними критеріями ефективного функціонування системи є підтримання оптимального теплового балансу та тиску в реакційній зоні, оскільки вони визначають швидкість реакції та кінцеві властивості продукту.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Якість отриманого полімеру оцінюється комплексом фізико-хімічних властивостей (молекулярна маса, щільність, здатність до поглинання пластифікатора), які формуються безпосередньо під час проходження реакції. Отримані дані підтверджують необхідність створення системи автоматичного контролю, яка б базувалася на безперервному моніторингу супутніх параметрів процесу та дозволяла вчасно компенсувати збурення до того, як вони призведуть до появи бракованої продукції чи аварійної ситуації.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

2 РОЗРОБКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ У ВИРОБНИЦТВІ ЕМУЛЬСІЙНОГО ПВХ

2.1 Розроблення методу автоматичного контролю параметру K_Φ як показника молекулярної маси

Метою контролю в'язкісно-молекулярного параметру K_Φ є встановлення того факту, що в реакторі полімеризації ПВХ-С виробляється якісний латекс. Для цього вимірюється запропонований показник – навантаження (потужність) на валі мішалки P_{BO} і отримані оцінки порівнюються з допусками.

Вирази для розрахунку P_{BH} і верхньої P_{BB} границь допуску можна отримати, користуючись формулами [2]:

$$P_{BB} = P_{B_0} + \frac{U_{q/2} \sigma_p}{\sqrt{L}}, \quad (2.1)$$

$$P_{BH} = P_{B_0} - \frac{U_{q/2} \sigma_p}{\sqrt{L}}. \quad (2.2)$$

Якщо значення номіналу P_{BO} і величини дисперсії σ_p^2 невідомі, то необхідно використати їх оцінки $\overline{P_{BO}}$ і S_p^2 , які отримані в результаті спеціально організованих експериментів. Тоді формули (2.1) і (2.2) будуть мати наступний вигляд

$$P_{BB} = \overline{P_{BO}} + \left(\frac{S_p}{\sqrt{L}} \right) t_{q_{1/2}}; \quad P_{BH} = \overline{P_{BO}} - \left(\frac{S_p}{\sqrt{L}} \right) t_{q_{1/2}}, \quad (2.3)$$

де $t_{q_{1/2}}$ – вибирається для рівня значущості $q = q_{1/2}$.

Аналіз формул (2.1), (2.2) і (2.3) показує, що для розрахунків границь допусків P_{BB} , P_{BH} необхідно знати наступні параметри: P_{BO} – номінальне значення навантаження на валі мішалки; L – об'єм вибірки; q_1 – рівень значущості для перевірки нульової гіпотези $H_0': m_p = P_{BO}$ при альтернативній $H_1': m_p \neq P_{BO}$; q_2 – рівень значущості для перевірки другої гіпотези $H_0': \sigma_p^2 = \sigma^2$ при альтернативній $H_1': \sigma_p^2 \neq \sigma^2$.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Параметри q_1 і q_2 вибирають відповідно до рекомендацій державного стандарту, згідно з яким: $q_1 = 0,03$, що відповідає 3σ -м довірчим границям; $q_2 = 0,02$, що відповідає $0,25\sigma$ -м довірчим границям.

Для $q_1 = 0,03$ і об'єму вибірки $L = 25$ визначили з таблиць [6] $t_{q_1/2} = 2,28$.

Враховуючи, наприклад, що $P_{BO} = 4,4$ кВт, $S_p = 0,115$, отримаємо вирази для верхньої і нижньої границь допуску:

$$P_{BB} = 4,4 + \frac{0,115}{\sqrt{22}} 2,28 = 4,47 \text{ кВт},$$

$$P_{BH} = 4,4 - \frac{0,115}{\sqrt{22}} 2,28 = 4,33 \text{ кВт}.$$

Користуючись моделлю $P_B = f(K)$, визначили границі допуску для показника K , які відповідають визначеним границям допусків для енергетичних витрат електродвигуна приводу мішалки:

$$K_H = \frac{P_{BH} - 2,143}{0,031} = 70,78,$$

$$K_B = \frac{P_{BB} - 2,143}{0,031} = 75,03.$$

При виконанні співвідношень з імовірністю $p_1 = 1 - q_1 = 0,97$ можна стверджувати, що в системі не виникло систематичної похибки, і вона підтримує заданий номінал показника якості P_{BO} . Якщо при цьому дані вибірки $P_1, P_2, \dots, P_L$ з ймовірністю $p_2 = 1 - q_2 = 0,988$ не суперечать і другій нульовій гіпотезі, то це означає, що за інтервал часу, який розділяє початок роботи системи і момент контролю, процес виробництва ПВХ був стабільним, і процент браку не перевищує $q_0 \cdot 100\%$.

Технологічний процес виробництва ПВХ протікає добре, якщо значення енергетичних витрат на валі мішалки P_B і показника K не виходять за межі зони регулювання $P_{BH} \div P_{BB}$ і $K_H \div K_B$. Вихід середніх значень $\overline{P}_B$ і $\overline{K}$ за допустимі межі регулювання сигналізує про порушення нормального ходу процесу полімеризації ПВХ [1].

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Для стабілізації процесу потрібний алгоритм нормальної процедури прийняття рішень “параметр у межах допуску”, “параметр поза межами допуску”. За такі критерії оптимальності прийняли критерій оптимального спостерігача, який для нашої задачі формулюється як мінімум ймовірності прийняття помилкового рішення.

Оскільки можливі лише дві гіпотези – “параметр у межах допуску” і “поза межами допуску”, то задача контролю параметрів P_B або K еквівалентна задачі швидкого виявлення розладнання властивостей випадкових величин [3]. Оптимальна процедура прийняття рішення повинна мати такий вигляд:

$$Y^* = 0, \text{ якщо } \Delta(P_B) \geq 1,$$

$$Y^* = 1, \text{ якщо } \Delta(P_B) < 1,$$

де $Y^* = 0$ – рішення “параметр K у межах допуску”; $Y^* = 1$ - рішення “параметр K поза межами допуску”; $\Delta(P_B)$ - відношення правдоподібності:

$$\Delta(P_B) = \frac{p_1^*(P_B)}{1 - p_1^*(P_B)} = \frac{p^*(P_B)}{p_2^*(P_B)},$$

де $p_1^*(P_B)$ – апостеріорна ймовірність перебування параметра P_B у межах допуску, яка обчислюється за результатами перебування параметра за межами поля допуску.

Рішення “параметр у межах допуску” приймається, якщо оцінка P_B лежить всередині контрольованих допусків, або “параметр поза межами допуску”, якщо його оцінка знаходиться за межами контрольованих допусків.

Отже, виникає завдання виявити момент переходу границі допуску з використанням результатів спостереження за послідовністю значень $\{P_{B,i}\}$, $i = 1, 2, \dots, L$.

Варіаційна постановка завдання швидкого виявлення моменту розладнання така: розшукати правило, яке мінімізує середнє запізнення при виявленні розладнання $\bar{\tau} = M[*](t_a - t_0 / t_a \geq t_0)$ у класі правил, для яких ймовірність випадкового виходу за межі допуску обмежена зверху:

$$p_x(t_a < t_0) \leq \alpha,$$

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

де α – заданий параметр, який треба визначити; $M[*]$ – умовне математичне сподівання; t_a – момент виявлення розладнання; t_0 – момент розладнання.

Для вирішення задачі контролю параметра K_Φ може бути застосований послідовний двосторонній рекурентний алгоритм кумулятивних сум (АКС), що дає змогу виявляти зміни характеристик випадкових величин. Аналіз існуючих варіантів АКС показав, що в умовах виробництва ПВХ-Е доцільним є використання саме такого алгоритму:

$$\begin{aligned} t_a &= \inf \{t : (Q_t^{(-)} \geq R)\}; \\ t_a &= \inf \{t : (Q_t^{(+)} \geq R)\}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} Q_t^{(\pm)} &= Ql_0 = 0; \\ Q_t^{(\pm)} &= (KQl_{t-1} + Ql_t), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $K = \left(\frac{n-1}{n}\right)^{1/2}$; n – кількість спостережених значень параметра P_i ,

$$Ql_t = \frac{(P_i - P_B)^2 - a}{B}, \quad a = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (P_i - P_b)^2, \quad b = \sqrt{2n} \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (P_i - P_b)^2, \quad P_b = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_i \quad (2.13)$$

– оцінка математичного сподівання випадкової величини P_i , Ql_{t-1} – середнє значення функції Q_t .

Цей алгоритм є двостороннім, оскільки може виявляти зміни параметра P_B , як в бік збільшення $P_B > P_{BB}$, так і в бік зменшення $P_B < P_{BB}$.

Правило зупинки при цьому має вигляд:

$$t_a = \inf \{t : |Q_t| \geq R\}, \quad (2.14)$$

де R – вибране значення порогу.

Функція Q_t має особливість: до моменту виникнення розладнання її математичне сподівання залишається нульовим, тоді як після виходу за межі допустимого діапазону воно починає монотонно зростати з часом.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

За оцінку t_a моменту виявлення розладнання приймається значення t (поточного значення часу), для якого використовується умова (2.14).

Оскільки випадкові величини до початку розладнання розподілені нормально з математичним сподіванням 0 і дисперсією 1, то з імовірністю 0,98 усі значення Q_i будуть потрапляти в інтервал $-2,5 \div \pm 2,5$, тобто ймовірності 0,8 відповідає значення порогу $R = 2,5$, що задовільняє вимогам до показника K .

Розладнання процесу полімеризації ПВХ-Е характеризується запізненням виявлення розладнання τ_3 і середнім числом N_x хибних тривог, які подаються до появи розладнання, або ймовірністю $P_x(t_a < t_0)$ хибної тривоги.

Розроблена модель і алгоритм виявлення розладнання в процесі полімеризації ПВХ-Е дозволяють обґрунтовано перейти до розробки структурної схеми системи контролю параметра K_Φ .

2.2 Створення узагальненої структурної схеми системи контролю

Процес контролю якості виробництва ПВХ включає такі основні етапи [1-3]:

- отримання інформації про показник K на основі даних щодо потужності на валу реактора полімеризації ПВХ;
- визначення стану об'єкта шляхом віднесення його до одного з класів: «параметр у межах допустимих значень» або «параметр виходить за межі допуску»;
- формування та надання інформації про поточний стан об'єкта і значення показника K ;
- регулювання процесу полімеризації оператором через зміну витрати води в системі охолодження реактора.

Зазначені операції реалізуються за допомогою системи контролю параметру K , узагальнену структурну схему якої наведено на рис. 2.1.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

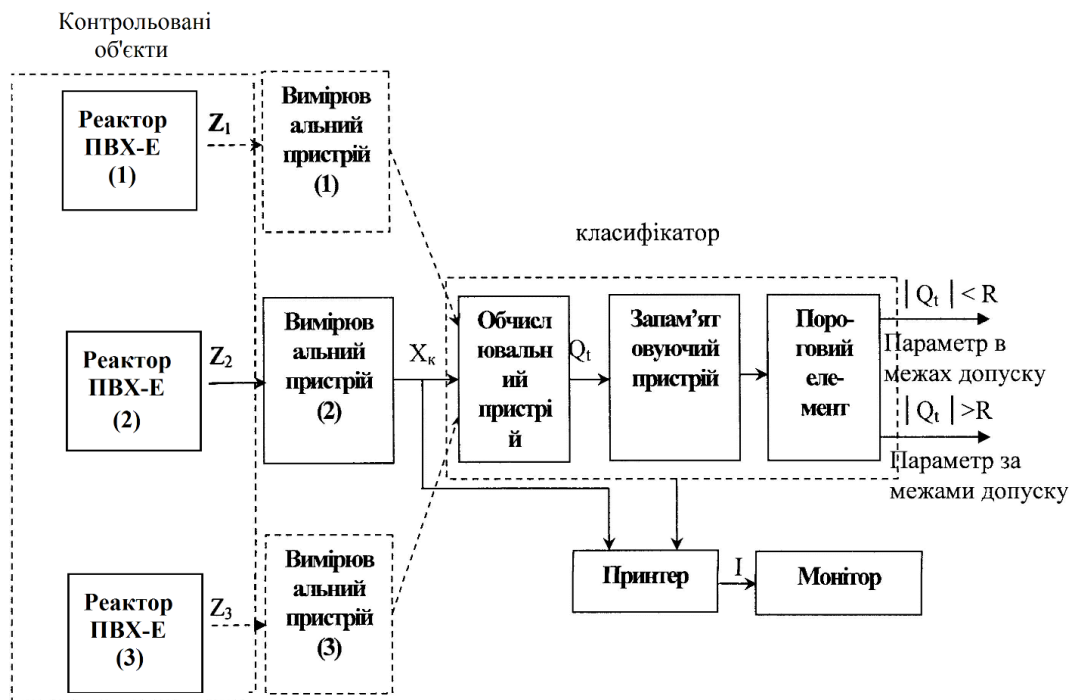


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема системи контролю параметру K_{ϕ}

На рис.2.1 подано функціональну структурну схему системи контролю стану кількох об'єктів (реакторів ПВХ-Е) з класифікацією параметра та видачею сигналів сповіщення. Система складається з трьох основних підсистем: контрольовані об'єкти (Реактор ПВХ-Е (1), (2), (3)); вимірювальні канали (вимірювальні пристрої 1–3); класифікуючий та індикаційний блок.

Кожен реактор ПВХ-Е генерує контрольований параметр Z_1, Z_2, Z_3 , який характеризує стан процесу полімеризації. Сигнали з кожного реактора надходять до відповідних вимірювальних пристроїв (1–3), де здійснюється первинне перетворення фізичної величини у вимірювальний сигнал X_k . Далі інформація надходить до обчислювального пристрою, де формується узагальнений показник Q_t і виконується попередня обробка та нормування даних. Результат класифікації подається на занепокоєчий (сигнальний) пристрій, який формує попереджувальний або аварійний сигнал і пороговий елемент, що забезпечує логічне спрацювання при перевищенні порогу. Інформація про стан системи передається на принтер для документування подій та на монітор для візуального відображення поточного стану.

Ефективність процесу полімеризації ПВХ зв'язана не лише з інформацією системи контролю про наявність або відсутність розладнання, але і з тими повідомленнями, які видаються пристроєм індикації. Класифікатор і пристрій індикації реалізовані на ПК.

Вихідна інформація містить відомості про величини контрольованих параметрів (потужності на валі мішалки P_v , параметра K), їх відхилення від номіналу і т.п. Тому вплив на реактор полімеризації ПВХ-Е з метою повернення його в потрібний стан здійснюється на основі інформації, яка поступає і від класифікатора, і від пристрою індикації. Пристрій індикації на основі прийнятих сигналів X_k і вказівок класифікатора видає повідомлення 1, яке характеризує стан об'єкта.

Враховуючи викладені положення та загальну структуру системи контролю параметра K , можна виділити такі її характерні особливості:

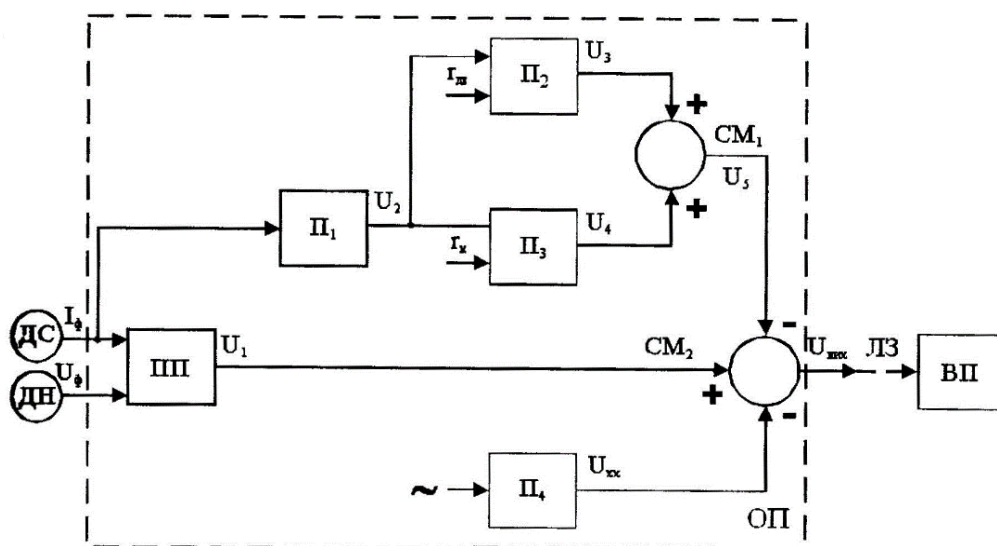
- система функціонує у режимі реального часу, забезпечуючи відображення та фіксацію інформаційних даних;
- здійснюється як якісна (допускова), так і кількісна оцінка параметра K ;
- система є аналогово-цифровою та інформаційно-обчислювальною, оскільки, окрім логічної обробки даних, виконує також арифметичні операції;
- реалізовано двокласову (двохальтернативну) структуру прийняття рішень, що дозволяє розрізняти два стани об'єкта та оцінювати ефективність роботи реактора;
- збір і обробка вимірювальної інформації відбуваються паралельно з кількох реакторів полімеризації, що забезпечує багатоканальний режим роботи системи.

До ключових переваг такої системи контролю параметра K належать: безперервний моніторинг у режимі реального часу; можливість завчасного виявлення відхилень, які складно зафіксувати традиційними методами; а також дистанційний контроль стану реакторного обладнання.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.3 Функціональна схеми системи контролю в'язкісно-молекулярного параметру K_f

Розроблення функціональної схеми системи контролю в'язкісно-молекулярного параметра K_{ϕ} передбачає визначення основних елементів системи, їх взаємозв'язків та принципів обміну інформацією між ними. Функціональна схема відображає структуру системи контролю, до складу якої входять давачі технологічних параметрів, засоби збору та обробки інформації, контролер, а також пристрої відображення та реєстрації даних. Основним призначенням системи є забезпечення безперервного контролю параметра K_{ϕ} у режимі реального часу та формування інформації про якість процесу полімеризації ПВХ. Функціональна блок-схема пристрою контролю навантаження на валі мішалки зображена на рис.2.2 [5].



ДС - давач струму, ДН - давач напруги, СМ₁, СМ₂ – давач напруги,
 ПП - вимірювальний перетворювач активної потужності,
 П₁ – квадратор, П₂, П₃ - пристрої множення, П₄ – компенсатор,
 ОП - обчислювальний пристрій, ВП – вимірювальний пристрій, ЛЗ - лінія
 зв'язку

Рисунок 2.2 – Функціональна схема пристрою контролю навантаження на валі
мішалки реактора полімеризації

У суматорі $СМ_1$ напруги з виходів $П_2$ і $П_3$ додаються, а в суматорі $СМ_2$ ця сума віднімається від сигналу, який пропорційний до виміряної потужності.

Для компенсації напруги, що відповідає потужності холостого ходу електродвигуна, використовується компенсатор $П_4$. Вихідна напруга суматора $СМ_2$ $U_{вих} = b \cdot P$ пропорційна до потужності P_v на валі мішалки, де b – коефіцієнт пропорційності. Цей сигнал обробляється обчислювальним пристроєм ОП, який видає значення K .

Первинний вимірювальний перетворювач активної потужності ДП підключається до мережі електроживлення двигуна мішалки за схемою двох ватметрів або та схемою зі штучною нульовою точкою.

Математичні операції, що виконуються перетворювачами $П_1, П_2, П_3, П_4$ і суматорами $СМ_1$ і $СМ_2$, можуть бути реалізовані за допомогою мікропроцесора.

Запропоновані методи і пристрої контролю потужності на валі мішалки реактора полімеризації ПВХ дають два головних результати: покращення показників продуктивності і можливість керувати процесом на підставі повної інформації про нього. Обидва ці фактори позитивно впливають на собівартість латексу ПВХ-Е і на надійність керування процесом. Але цей метод має певну похибку контролю, яку треба проаналізувати.

2.4 Оцінка динамічних властивостей каналу вимірювання та визначення кроку дискретизації первинних вимірювальних перетворювачів

Для дослідження динамічних властивостей розробленого каналу вимірювання побудовані механічні характеристики електродвигуна КР 132.2/4 ($P=4,4\text{кВт}$, $n_n=1400\text{об/хв}$, $U=380\text{В}$), лопатевої мішалки і сумісна механічна характеристика $n=f(M)$, де n - частота обертання електродвигуна в об/хв.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Механічна характеристика електродвигуна побудована за його паспортними даними. Якщо момент двигуна мішалки $M = 0$, то синхронна частота обертання [5]:

$$n_0 = \frac{60 f}{p} = 1500 \text{ об/хв},$$

де f - частота змінного струму, $f=50$ Гц, p - кількість пар полюсів обмотки електродвигуна, $p=2$.

Номінальний момент M_H електродвигуна розрахований за формулою:

$$M_H = 975 \frac{P_H}{n_H} = 30,057 \text{ Нм}$$

і номінальне ковзання: $S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = 0,04$, де $\omega_0 = \frac{n_0}{9,55}$, $\omega_H = \frac{n_H}{9,55}$ - відповідно синхронна і номінальна кутові швидкості обертання двигуна.

Критичний момент M_K електродвигуна мішалки дорівнює:

$$M_K = \lambda \cdot M_H = 60,11 \text{ Нм},$$

а критична частота обертання:

$$n_K = n_0(1 - S_K) = 1251 \text{ об/хв}.$$

Величина критичного ковзання S_K , при якому електродвигун має максимальний момент, визначена формулою:

$$S_K = S_H [\lambda_M + (\lambda_M^2 - 1)^{1/2}] = 1,166,$$

де $\lambda_M = \frac{M_K}{M_H} = 2$ - кратність максимального моменту.

Нестійку ділянку механічної характеристики побудували, використовуючи спрощену формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}$$

і формулу $n = n_0(1 - s')$.

Для цього задавались значеннями $s' = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0$, а розраховані значення M і n заносили в табл. 2.1.

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для побудови механічної характеристики електродвигуна КР 132,2/4

Назва показника	Значення величини ковзання s				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0
Момент, Нм	59,7	43,34	31,8	24,78	13,27
Частота обертання, об/хв	1200	900	600	300	0

Результати використані для побудови механічної характеристики електродвигуна, лопатевої мішалки і сумісної механічної характеристики, що наведені на рис. 2.3.

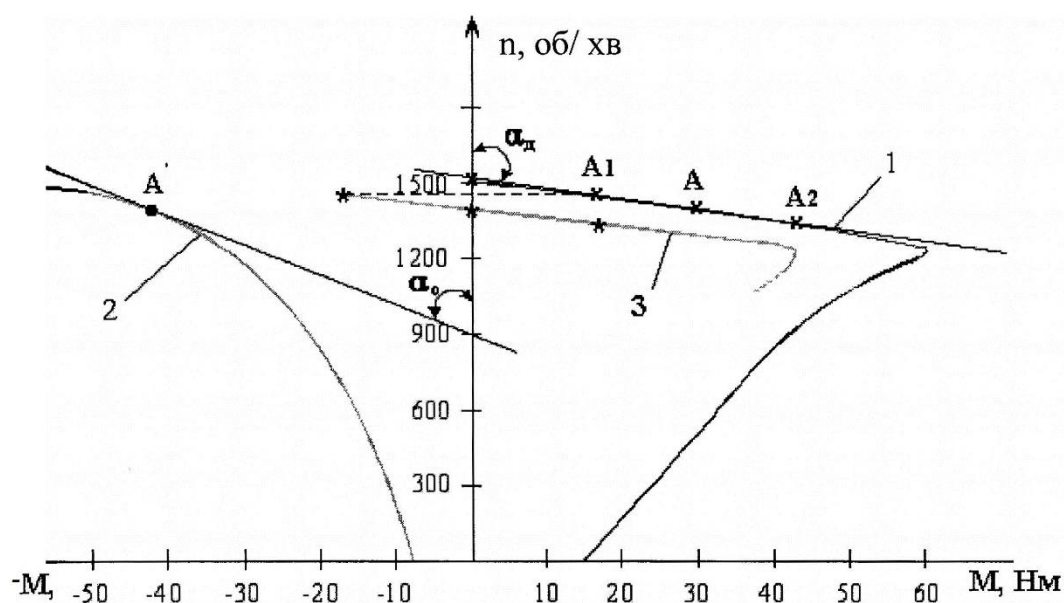


Рисунок 2.3 - Графічна залежність швидкості обертання на валі від крутного моменту для електродвигуна (1), лопатевої мішалки (2) і сумісна механічна характеристика

Із рис. 2.3 видно, що механічна характеристика електродвигуна жорстка в робочій частині, а механічна характеристика лопатевої мішалки належить до категорії нелінійно зростаючої.

Як інформаційну координату електродвигуна лопатевої мішалки приймемо кутову частоту його обертання ω , тоді рівняння руху електроприводу має такий вигляд [5]:

$$M_{\text{д}} - M_0 = J_{\text{д}} \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.15)$$

де $M_{\text{д}}$ - момент на валі електродвигуна; M_0 — момент опору, приведений до валу електродвигуна мішалки; $J_{\text{д}}$ - момент інерції, приведений до валу електродвигуна мішалки.

Момент $M_{\text{д}}$ залежить від швидкості обертання ω і від напруги живлення U :

$$M_{\text{д}} = M_{\text{д}}(U, \omega). \quad (2.16)$$

Момент опору M_0 , приведений до валу електродвигуна мішалки є функцією

$$M_0 = M_0(\omega). \quad (2.17)$$

Враховуючи (2.15) і (2.17) та рівняння (2.4), отримаємо:

$$M_{\text{д}}(U, \omega) - M_0(\omega) = J_{\text{д}} \frac{d\omega}{dt}.$$

Рівняння (2.17) нелінійне, оскільки $M_{\text{д}}(U, \omega)$ і $M_0(\omega)$ є нелінійними функціями U і ω . Враховуючи нелінійність $M_{\text{д}}$ і M_0 , мінімізуємо їх у відносно невеликому діапазоні зміни швидкості обертання $\Delta\omega$ ротора електродвигуна мішалки між точками A_1 і A_2 (рис.2.3).

У тоці А має місце сталий режим роботи приводу, тобто

$$M_{\text{д}} = M_0. \quad (2.18)$$

Розкладаючи (3.16) і (3.17) навколо точки А в ряд Тейлора, матимемо:

$$M_{\text{д}} = M_{\text{д}_0} + \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial U} \right)_0 \Delta U + \frac{1}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 M_{\text{д}}}{\partial U^2} \right)_0 \Delta U^2 + \dots + \left(\frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega + \frac{1}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 M_{\text{д}}}{\partial \omega^2} \right)_0 \Delta \omega^2 + \dots \quad (2.19)$$

де $M_{\text{д}_0}$ – момент електродвигуна при ω_0 і U_0 та

$$M_0 = M_0 + \left(\frac{\partial M_0}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega + \frac{1}{1 \cdot 2} \left(\frac{\partial^2 M_0}{\partial \omega^2} \right)_0 \Delta \omega^2 + \dots, \quad (2.20)$$

де M_0 – момент опору на валі електродвигуна мішалки при швидкості обертання ω_0 .

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Обмежимося розглядом лише лінійних частин механічних характеристик, взявши перших два числа рядів Тейлора (2.19) і (2.20).

Підставимо їх значення в рівняння (2.15)

$$M_{\omega_0} + \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial U} \right)_0 \Delta U + \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega - M_{\omega_0} - \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 \Delta \omega = J_{\omega} \frac{d\Delta \omega}{dt}. \quad (2.21)$$

Враховуючи (2.18), рівняння (2.21) перетворюємо до вигляду

$$J_{\omega} \frac{d\Delta \omega}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 + \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 \right] \Delta \omega = \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial U} \right)_0 \Delta U, \quad (2.22)$$

або

$$J_{\omega} \frac{d \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} \right)}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 \right] \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{U_0}{\omega} \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial U} \right)_0 \frac{\Delta U}{U_0}. \quad (2.23)$$

Величини $\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega}$, $\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega}$, $\frac{\partial M_{\omega}}{\partial U}$ визначені для точки А (рис. 2.3) і розглядаються як постійні у вибраному діапазоні.

У результаті лінеаризації отримано лінійне диференціальне рівняння зі сталими коефіцієнтами:

$$T_{\omega} \frac{\partial v(t)}{\partial t} + v(t) = K_{\omega} \gamma(t), \quad (2.24)$$

де $T_{\omega} = \frac{J_{\omega}}{\left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0}$ - електромеханічна стала часу,

$K_{\omega} = \frac{\frac{U_0}{\omega_0} \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial U} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_{\omega}}{\partial \omega} \right)_0}$ - коефіцієнт передачі, $v = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}$; $\gamma = \frac{\Delta U}{U_0}$.

Застосовавши перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, маємо [2]:

$$(T_{\omega} p + 1) v(p) = K_{\omega} \gamma(p).$$

Звідси функція передачі електродвигуна мішалки

$$W_{\omega}(p) = \frac{v(p)}{\gamma(p)} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}(p) + 1}. \quad (2.25)$$

Оскільки електромагнітна стала часу електродвигуна $T_e=0,002\pm0,004$ є значно менша від електромагнітної сталої T_d , то можна вважати, що функція передачі трифазного асинхронного електродвигуна мішалки має вигляд (2.25). Стала часу і коефіцієнт передачі визначили, користуючись механічними характеристиками і формулами [2]:

$$K_d = \frac{K_M}{\beta_{\partial_0} - \beta_{M_0}}, T_{\partial} = \frac{J}{\beta_{\partial} - \beta_M}, \quad (2.26)$$

де β_{∂} , β_M – жорсткість механічних характеристик електродвигуна і мішалки, Нм·с/рад; K_M – коефіцієнт чутливості електродвигуна по моменту до зміни вхідної величини.

Для оцінки сталої часу T_d скористалися практичними рекомендаціями, які базуються на механічних характеристиках, що зображені на рис.2.3. Для цього проведено дотичні в точках А і А'. Тангенси кутів α_0 і α_d , створених дотичними з віссю ординат, дають значення жорсткості цих характеристик:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \beta_M = 2,74, \operatorname{tg} \alpha_{\partial} = \beta_{\partial} = -12,7. \quad (2.27)$$

У зв'язку з тим, що в паспортних даних електродвигуна відсутня величина моменту інерції, наближене значення його визначали, користуючись формулою:

$$J = 756l^5, \quad (2.28)$$

де l – довжина статора, м.

При $l = 30$ см момент інерції двигуна дорівнює $I = 756 \cdot 0,3^5$ кг·м². Підставляючи значення β_d , β_M з (3.16) та I з (3.17) в (3.15), маємо $T_d = 0,118$ с, тобто функція передачі електродвигуна мішалки:

$$W_d(p) = \frac{K_d}{0,118p + 1}. \quad (2.29)$$

Функцію передачі кабелю довжиною від місця приєднання давача активної потужності до електродвигуна визначимо, виходячи із заступних схем, представлених на рис. 2.4, а саме:

$$Z_1(p) = pL_1 + R_1, \quad (2.30)$$

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

або

$$Z_1(p) = R_1(T_1 p + 1), \quad (2.31)$$

$$Z_2(p) = R_2. \quad (2.32)$$

Функція передачі еквівалентного ланцюга дорівнює

$$W_k(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{Z_{\text{вих}}(p)}{Z_{\text{вх}}(p)} = \frac{Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}. \quad (2.33)$$

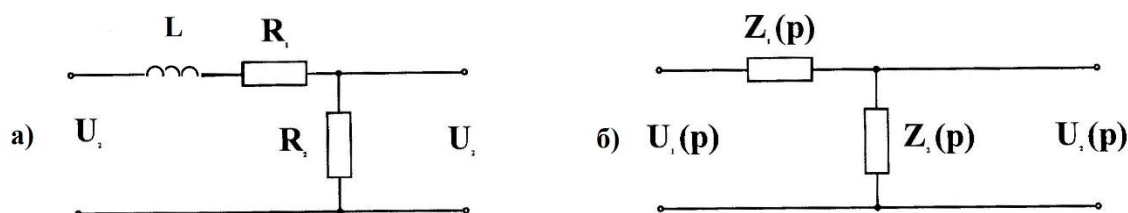


Рисунок 2.4 – Заступна схема кабелю, яким підводять напругу до електродвигуна лопатевої мішалки (а), і еквівалентна заступна схема (б)

Підставляючи значення $Z_1(p)$ з (2.19) і $Z_2(p)$ з (2.20) і (2.21) в (2.25), одержимо

$$W_k(p) = \frac{R_2}{R_1 T_1 p + (R_1 + R_2)}. \quad (2.34)$$

Для кабелю довжиною 50 м і перерізом 6 мм², який використовується для підведення напруги до електродвигуна мішалки: $x_k = 0,07$ Ом/км, $r_k = 3,14$ Ом/км, $L_1 = x_k / 2\pi f = 0,07 / 2\pi \cdot 50 = 0,00022$ Гн, $R_1 = r_k \cdot 0,05 = 0,17$ Ом [14].

Тоді електромагнітна стала часу кабелю T_1 дорівнює:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1} = 0,0013 \text{ с.}$$

Очевидно, що таким значенням сталої часу кабелю в порівнянні зі сталою часу електродвигуна мішалки можна знехтувати і вважати, що $T_1 \approx 0$. У цьому випадку функція передачі кабелю має вигляд

$$W_k(s) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,5 \cdot 10^6}{0,17 + 0,5 \cdot 10^6} \approx 1, \quad (2.35)$$

де $R_2 \geq 0,5$ МОм – опір ізоляції кабелю, визначений за експериментальними даними.

Функцію передачі вимірювального каналу формують передачі послідовно з'єднаного пристрою контролю потужності на валі мішалки, до складу якого входять вимірювальні трансформатори струму ВТС₁, ВТС₂, напруги ВТН та вимірювальний перетворювач активної потужності трифазного струму ВПАП і обчислювального блоку ОБ.

Функція передачі пристрою контролю потужності на валі електродвигуна визначена експериментально і має такий вигляд [2]:

$$W_{пк}(s) = \frac{K_{пк}}{0,08s + 1}, \quad (2.36)$$

де $K_{пк}$ – коефіцієнт передачі пристрою контролю потужності на валі електродвигуна.

Обчислювальний пристрій є безінерційною ланкою [8] з функцією передачі:

$$W_{оп}(s) = K_{оп}. \quad (2.37)$$

Враховуючи функції передачі (2.27), (2.33), (2.234) і (2.35), визначено еквівалентну функцію передачі каналу [4]:

$$W_е(s) = \frac{K_е}{0,00944s^2 + 0,198s + 1}, \quad (2.38)$$

де $K_е = K_д \cdot K_{пк} \cdot K_{оп}$ – еквівалентний коефіцієнт передачі.

Для аналізу динамічних властивостей каналу вимірювання потужності на валі електродвигуна мішалки скористаємося характеристичним рівнянням:

$$0,00944s^2 + 0,198s + 1 = 0,$$

яке має два корені $s_1 = -8,47$; $s_2 = -12,5$.

Введемо позначення:

$$s_1 = -\frac{1}{T_3}, \quad s_2 = -\frac{1}{T_4},$$

де T_3, T_4 – деякі умовні сталі часу, $T_3 = 0,118$ с, $T_4 = 0,08$ с.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

Враховуючи, що $T_3 > T_4$, для побудови графіка перехідної характеристики використаємо рівняння перехідної функції у вигляді [4]:

$$h(t) = k \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right) S(t),$$

яка з врахуванням значень сталих часу має вигляд:

$$h(t) = k \left(1 - 3,105 e^{-\frac{t}{0,118}} + 2,1 e^{-\frac{t}{0,08}} \right).$$

Графік нормованої перехідної характеристики $h(t)$ каналу вимірювання, побудованого при зміні часу від 0 до 1 с, має вигляд (рис. 2.5).

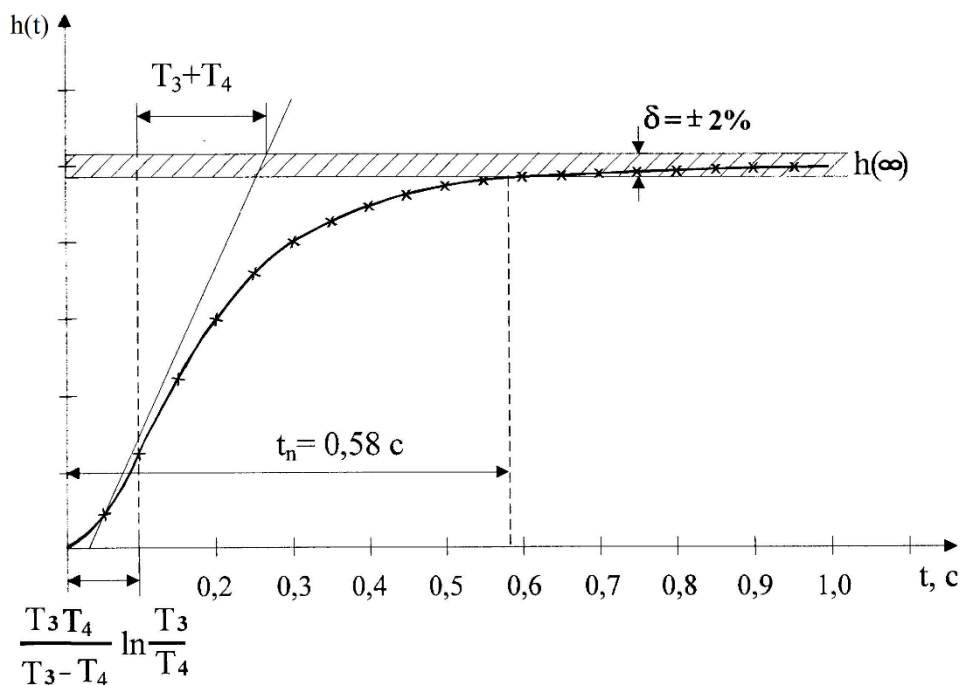


Рисунок 2.5 – Нормована перехідна характеристика параметра K_Φ на основі інформації про потужність на валі електродвигуна мішалки [3]

При заданій величині відхилення $h(t)$ від усталеного значення $h(\infty)$ $\sigma = \pm 2\%$ потужності на валі електродвигуна видно, що тривалість перехідного процесу складає $t_n = 0,58 \text{ с}$, тобто підтверджує його значну швидкодію.

Подамо функцію передачі (2.33), підставивши $K_e = 1$ і $p = j\omega$ у вигляді:

$$W(j\omega) = \frac{1}{0,00944(j\omega)^2 + 0,198(j\omega) + 1},$$

а функцію передачі каналу вимірювання (2.27) у вигляді дійсної та уявної частин,

$$W(j\omega) = \frac{1}{(1 - 0,00944\omega^2)^2 + 0,0392\omega^2} - j \frac{0,198\omega}{(1 - 0,00944\omega^2)^2 + 0,0392\omega^2},$$

що дає можливість визначити його АФЧХ. Вираз для АФЧХ одержуємо, використовуючи формулу:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \frac{1 - 0,00944\omega^2}{\sqrt{(1 - 0,00944\omega^2)^2 + 0,0392\omega^2}}.$$

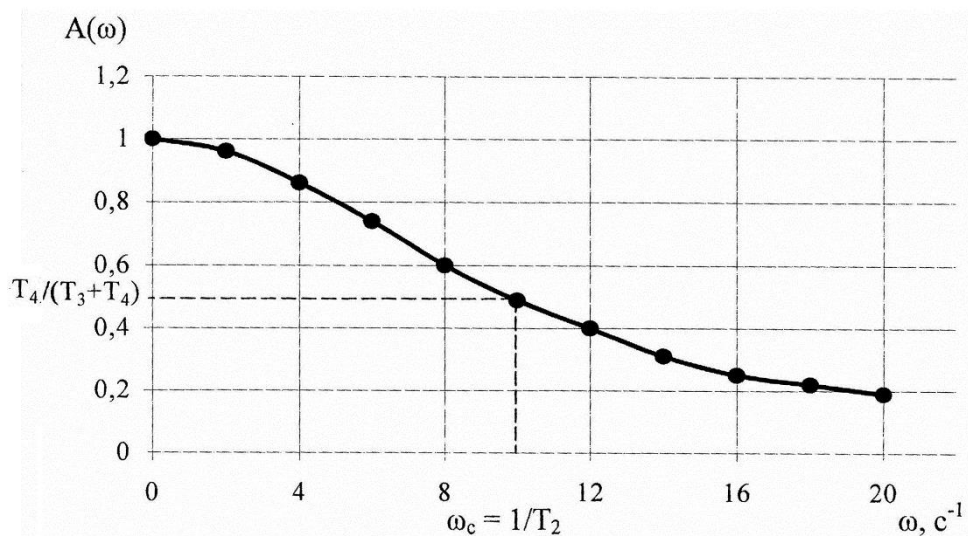


Рисунок 2.6 - Амплітудно-частотна характеристика каналу контролю [4]

З графіку $A(\omega)$ (рис.2.6) видно, що гармонічні сигнали малої частоти $\omega < \omega_c$ добре пропускаються каналом з відношенням амплітуд вихідної та вхідної величин, який близький до коефіцієнта передачі k_e . Сигнали з частотою $\omega > \omega_c$ пропускаються каналом погано: відношення амплітуд суттєво менше від коефіцієнта передачі $k_e (< 0,45)$. Таким чином, розроблений канал вимірювання для контролю К виконує функції фільтра низької частоти.

Фазо-частотну характеристику подаємо так:

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{0,198\omega^2}{1 - 0,00944\omega^2},$$

графік якої приведено на рис.2.7.

З графіка видно, що чим більшою є частота вхідного сигналу, тим більшим буде відставання за фазою вихідної величини від вхідної. При частоті ω_c зсув фаз дорівнює -90° .

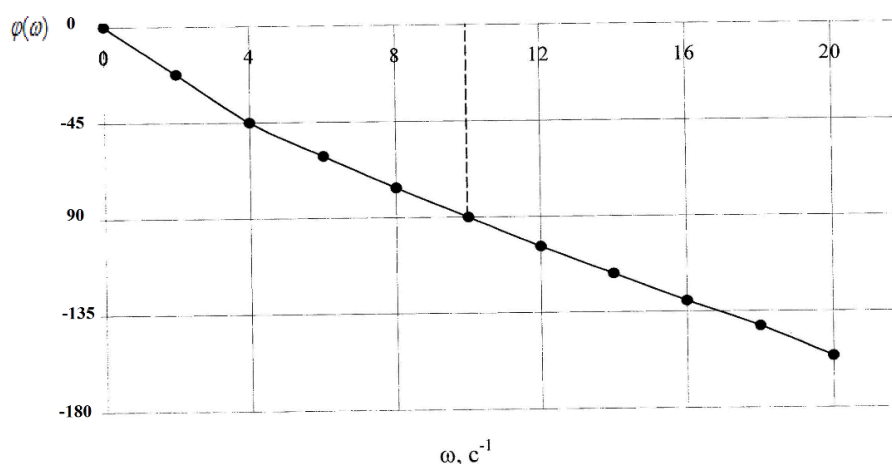


Рисунок 2.7 - Фазо-частотна характеристика каналу контролю [4]

Враховуючи, що контроль параметра K_ϕ здійснюється в системі централізованого контролю, яка охоплює декілька реакторів полімеризації та інших апаратів, виникає необхідність визначення часу опитування давачів.

Оскільки, у системі контролю виробництва ПВХ-Е здійснюється послідовний збір і обробка інформації від десятків давачів, виникає задача визначення періоду опитування давачів з урахуванням додатково приєднаних давачів активної потужності для контролю параметру K_ϕ .

Період опитування давачів потужності на валі мішалки необхідно вибрати з умови, що максимальне відхилення величини $P(t)$ вимірюється в дискретні проміжки часу t_i , $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ з інтервалом $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. У проміжку між вимірюваннями фактичні значення величини $P(t)$ невідомі і тому величину y_c , що спостерігається, можна подати у такому вигляді:

$$y_c(t) = P(t) + \delta(y, t), t_i \leq t \leq t_{i+1},$$

де $\delta(y, t)$ – похибка спостереження.

Величина $\delta(y, t)$ має такі значення:

$$\delta(y, t) = \begin{cases} \Delta P_B, t = t_i \\ \delta_E(p, t), t_1 \leq t \leq t_{i+1} \end{cases},$$

де ΔP_B – похибка вимірювання, $\delta_E(p, t)$ – похибка екстраполяції значень величини $P(t)$ в інтервалі між вимірюваннями:

$$\delta_E(t) = P_E(t) - P(t),$$

де $P_E(t)$ – екстрапольовані значення величини $P(t)$.

Математичним виразом вимог системи контролю до похибки спостережень $\delta(P, t)$ є деякий функціонал $F\{\delta(H, t)\}$ від похибки $\delta(P, t)$, визначений на інтервалі $[t_i, t_{i+1}]$.

Числове значення функціонала для деякої величини визначається похибкою вимірювань ΔP_B , похибкою екстраполяції δ_E та інтервалом часу Δt між вимірюваннями:

$$F\{\delta(P, t)\} = \varepsilon\{\Delta P_B, \delta_E, \Delta t\}.$$

Якщо задаватись допустимим значенням функціонала похибки $\varepsilon_{\text{доп}}$ і розв'язати рівняння

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \varepsilon\{\Delta P_B, \delta_E, \Delta t\}.$$

Відносно Δt , то можна розрахувати шуканий інтервал часу між вимірюваннями.

Враховуючи, що контрольований параметр є стаціонарним з нормальним законом розподілу і оцінкою автокореляційної функції вигляду $R_{pp}(t) = D_p e^{ap|t|}$, розглянемо можливості використання методу ступінчатої екстраполяції. При цьому значення величин $P(t)$ в інтервалі між вимірюваннями приймається рівним значенню в останній момент вимірювання, тобто

$$P_E(t) = P(t_i) + P_B(t_i), \quad t_i \leq t \leq t_{i+1}.$$

У цьому випадку похибка (2.35) і рівняння (3.36) мають такий вигляд

$$\delta_E(P, t) = P(t_i) - P(t) + P_B(t_i);$$

$$\varepsilon_{\text{доп}} = \delta_{E_{\text{MAX}}}(\Delta t) + \Delta P_{B_{\text{MAX}}}, \quad (2.39)$$

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

де $\Delta P_{B_{MAX}}$ - максимальна абсолютна похибка вимірювань; $\delta_{E_{MAX}}(\Delta t)$ - максимальна абсолютна похибка екстраполяції величини $P(t)$ при $\Delta P_e = 0$.

Для визначення похибки представлення функції випадкової складової похибки каналу вимірювання не більше $\pm 5\%$ приймають інтервал, рівний $10\Delta t$:

$$\Delta t = 1/10 f .$$

Оскільки на випадкову складову похибки каналу вимірювання потужності на валі мішалки найбільший вплив здійснюють промислові завади, то за граничну частоту було вибрано частоту $f = 50$ Гц. Тоді $\Delta t = 1/10 \cdot 50 = 0,002 = 2$ мс. Остаточно вибраний інтервал опитування здавачів $\Delta t = 2$ мс.

Враховано, що на корисний сигнал контролю накладається не лише промислова завада з частотою 50 Гц, але й інші промислові завади, що діють на канал передачі інформації від мішалки до вимірювального пристрою.

Висновки до розділу

1. На основі аналізу методів автоматичної корекції похибок вимірювальних пристроїв розроблена блок-схема пристрою контролю для визначення в'язкісно-молекулярного параметру K_ϕ , яка забезпечує автоматичну корекцію похибок, що виникають за рахунок втрат потужності в кабелі та двигуні, а також компенсацію потужності холостого ходу електродвигуна.

2. Дослідженням динамічних властивостей вимірювального каналу контролю параметра K_ϕ встановлено, що електродвигун мішалки є аперіодичною ланкою першого порядку зі сталою часу 0,118 с, кабель є безінерційною ланкою зі сталою часу 0,0013 с, пристрій контролю потужності на валі електродвигуна мішалки реактора полімеризації ПВХ-Е є інерційною ланкою 1-го порядку із сталою часу 0,08 с.

					БР.АКП-79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

3 МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

3.1 Дослідження закономірностей та статистичних властивостей зміни споживаної потужності на валу перемішуючого пристрою реактора полімеризації ПВХ-Е

Статистичні характеристики коливань споживаної потужності електродвигуна мішалки досліджувалися на основі діаграми (рис. 3.1) зміни потужності від часу $P(t)$, яку отримали за допомогою реєструючого приладу КСП-2, кл.0,5 і вимірювального перетворювача споживаної потужності трифазного струму Е849/7-М1.

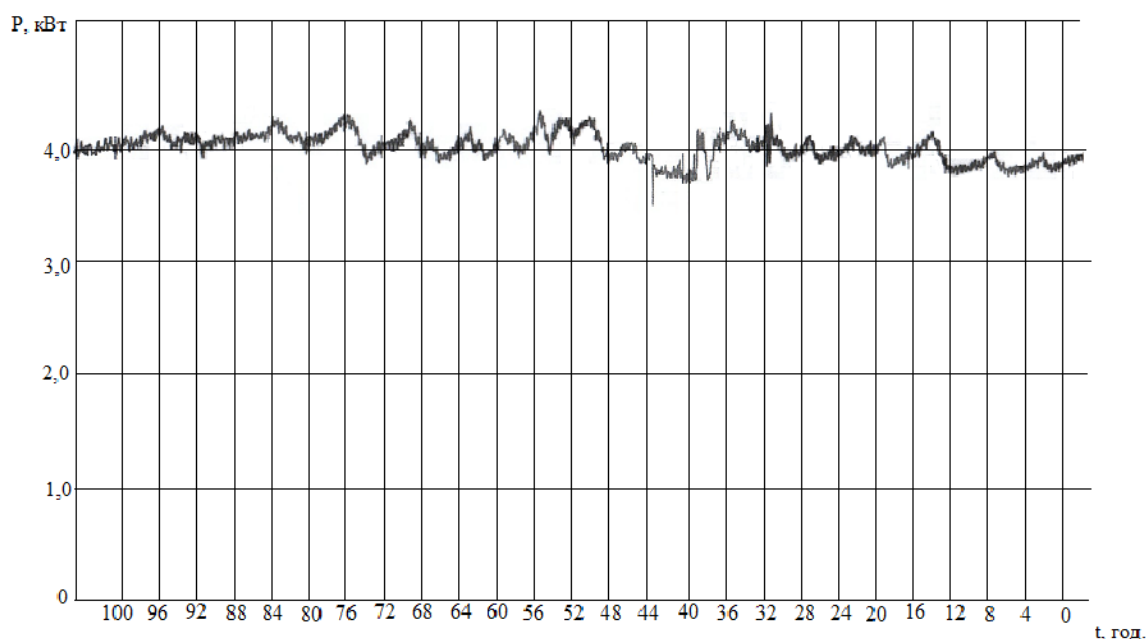


Рисунок 3.1 – Графік коливань споживаної потужності електродвигуна приводу
мішалки в часі

З метою перевірки отриманих результатів обробимо експериментальні дані за допомогою програми Mathlab (додаток 1).

У результаті отриманий графік зображено нижче на рис.3. 2 [6].

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

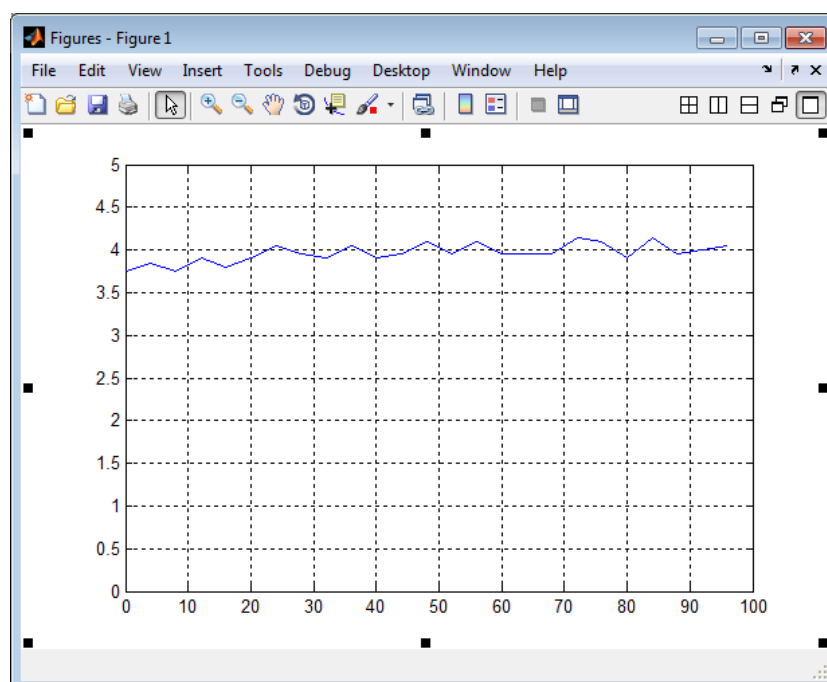
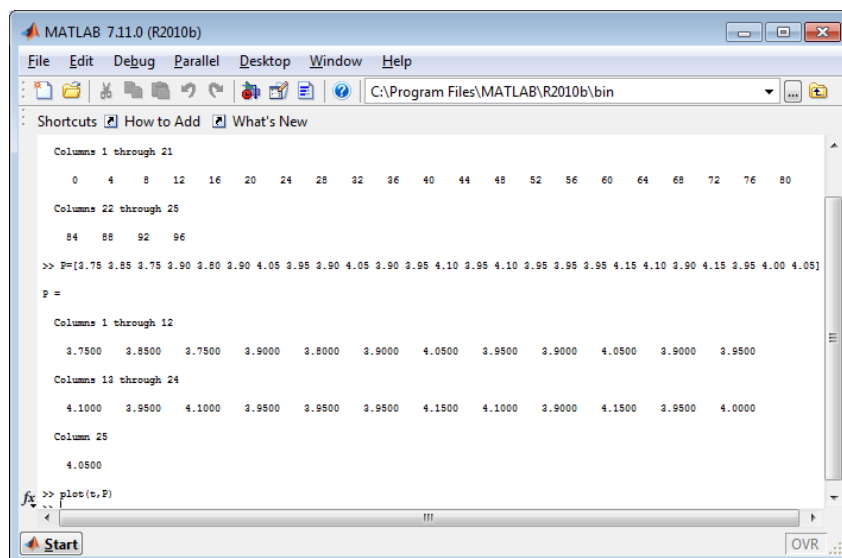


Рисунок 3.2 – Графік коливань споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки, отриманий в результаті обробки експериментальних даних в програмі Matlab

Для визначення оцінок математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення для потужності електродвигуна приводу мішалки скористаємося програмою MathCad [6]. Оцінка математичного сподівання функції P – це середньоарифметичне значення нескінченної кількості реалізацій; це така не випадкова функція $M(x)$, навколо якої групуються всі реалізації даного випадкового процесу і яка повністю

визначається одномірним законом розподілу.

Далі визначимо дисперсію функції P . Це не випадкова і невід’ємна функція $D(t)$, що представляє собою середнє значення квадрату різниці між випадковою функцією і її середнім значенням, або ж середнє значення квадрату відхилення випадкової функції від її середнього значення. Вона характеризує інтенсивність відхилень відносно середнього значення і також визначається одномірним законом розподілу.

Також знаходимо величини коефіцієнтів ексцесу і асиметрії досліджуваного процесу. Коефіцієнт асиметрії є числовою характеристикою розподілу ймовірностей дійсної випадкової величини. Коефіцієнт ексцесу — числова характеристика розподілу ймовірностей дійсної випадкової величини. Коефіцієнт ексцесу характеризує «крутість», тобто, стрімкість підвищення кривої розподілу у порівнянні з нормальною кривою. Отож, ми отримали оцінку математичного сподівання, дисперсію та середньоквадратичне відхилення. Оцінка математичного сподівання процесу P в загальному вигляді представляє собою деяку середню криву, навколо якої розподіляються всі можливі окремі реалізації даного процесу. Дисперсія $D(x)$ і середньоквадратичне відхилення $\sigma(x)$ характеризують розсіювання окремих можливих реалізацій навколо цієї середньої кривої. Ці характеристики для кожного конкретного моменту є середніми з множини. Вони визначаються одномірним законом розподілу.

3.1.1 Визначення автокореляційної функції для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки

Для випадкової функції одномірний розподіл імовірності і отримані на основі нього характеристики, такі як оцінка математичного сподівання та дисперсія, ще не є достатніми для оцінки характеру протікання випадкового процесу в часі. Необхідно ще встановити зв’язок між значеннями випадкового процесу в різні моменти часу. Це можна зробити за допомогою двохмірної

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

функції розподілу. Інтенсивність зміни випадкового сигналу в часі можна охарактеризувати за допомогою однієї з функцій – автокореляційної функції або функції спектральної густини.

Математичне сподівання похідних значень центрованої випадкової функції, взятих при двох моментах часу t_1 та t_2 називають автокореляційною функцією. Вона визначається за формулою [4]:

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) d\tau,$$

де τ – кореляційний зсув.

Іншими словами, автокореляція – це кореляція ряду з самим собою, з затримкою на τ спостережень. Якщо ж реалізація являє собою сукупність дискретних значень сигналу, отриманих через рівні проміжки Δt , то інтеграл наближено замінюють сумою:

$$R_x(\tau) = R(k\Delta t) \approx \frac{1}{n-k} \sum_{i=0}^{n-k} x^0(i\Delta t) x^0(i\Delta t + k\Delta t),$$

де $x^0(t) = x(t) - m_x$ – центровані значення.

Визначення автокореляційної функції [4]

```
Rxx=xcorr(x,x,'none');
```

```
Rxx=Rxx/max(Rxx);
```

```
tt=-96:4:96;
```

```
figure
```

```
plot(tt,Rxx),grid
```

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

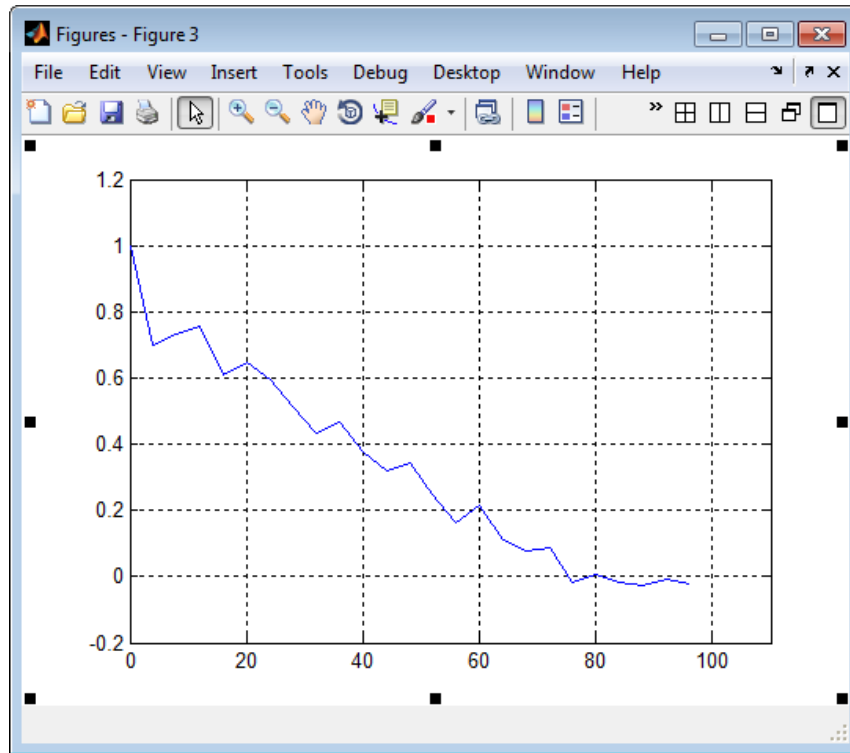


Рисунок 3.3 - Графічне зображення автокореляційної функції для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки у програмі Matlab

Графік отриманої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес $P(t)$ є стаціонарним і ергодичним.

3.1.2 Визначення автокореляційної функції для параметру K_{ϕ}

Визначати автокореляційну функцію будемо аналогічно до того, як визначали для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки.

Визначення автокореляційної функції

```
Rxx=xcorr(K-60,'biased');
```

```
Rxx=Rxx/max(Rxx);
```

```
tt=-96:4:96;
```

```
figure
```

```
plot(tt,Rxx),grid
```

```
xlim([0 96])
```

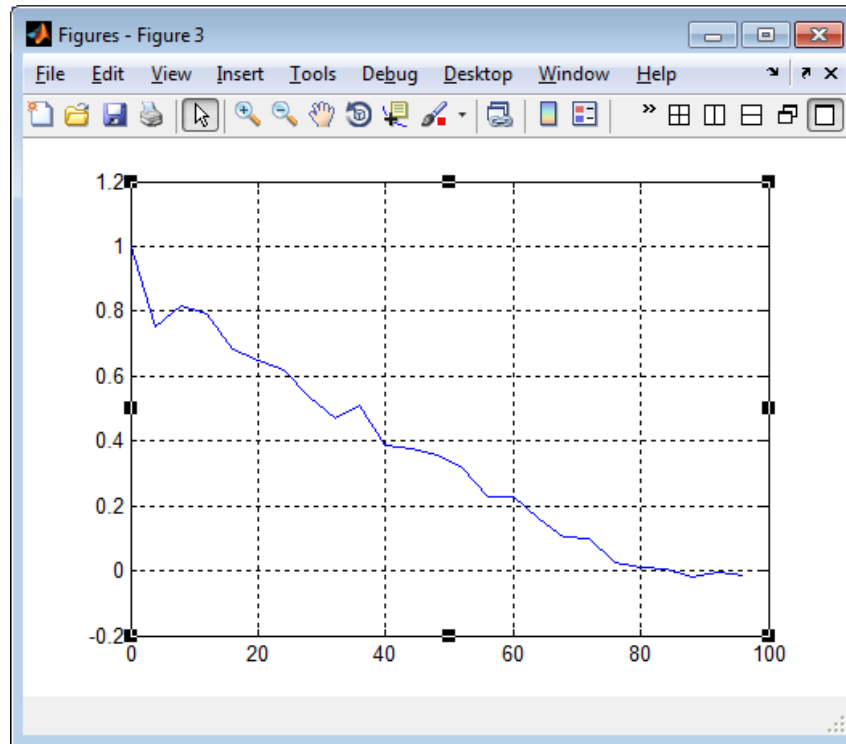


Рисунок 3.4 - Графічне зображення автокореляційної функції досліджуваного процесу зміни коефіцієнта Фікентчера в програмі Matlab

Графік отриманої автокореляційної функції підтверджує, що досліджуваний процес $K(t)$ є стаціонарним і ергодичним.

3.1.3 Визначення спектральної густини для параметру K_Φ

Застосовуючи до кореляційної функції $R(\tau) = D e^{-\alpha(\tau)}$ перетворення, можна визначити спектральну густину за формулою [4]:

$$S(\omega) = 2 \int_0^{\omega} D e^{-\alpha(\tau)} \cos \omega \tau d\omega = \frac{2D\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}.$$

Підставивши наші дані в це рівняння отримаємо:

$$S(\omega) = -\frac{0,047}{0,000484 + \omega^2}.$$

Визначимо спектральну густину, використовуючи програму MathCad. По отриманих даних побудуємо залежність S від ω . Так ми отримуємо графік спектральної густини $S(\omega)$.

Модуль значення спектральної густини визначає амплітудно-частотну характеристику сигналу, а її аргумент називають фазо-частотною характеристикою. АЧХ сигналу являється парною функцією, а ФЧХ – непарною. Загалом зміст $S(\omega)$ визначається як амплітуда сигналу, що припадає на 1 Гц в нескінченно вузькій полосі частот, яка включає в себе розглянуту частоту ω .

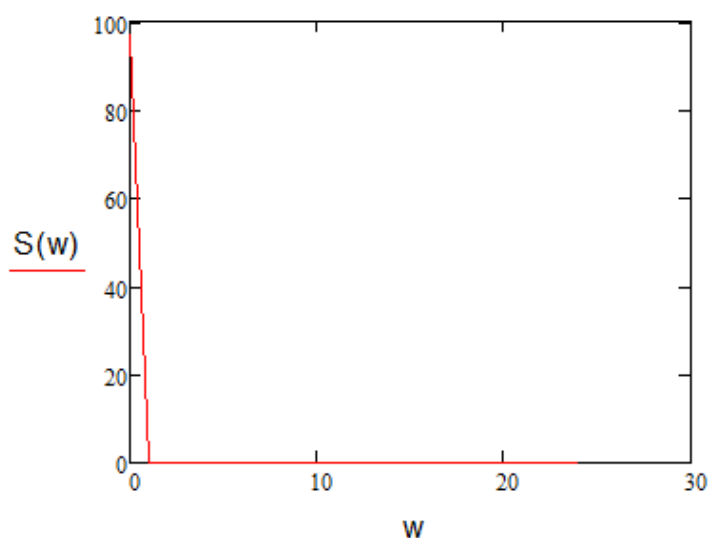


Рисунок 3.5 – Графічне зображення спектральної густини для параметра K_{ϕ} у програмному середовищі Mathcad

3.2 Визначення взаємних кореляційних функцій для в'язкісно-молекулярного параметру та для споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки

Визначаємо кореляційні функції за допомогою програмного середовища Matlab [6].

```
Визначення кореляційної функції
Rxx=xcorr((x-3.7), ( K-60),'biased');
Rxx=Rxx/max(Rxx);
tt=-96:4:96;
figure
plot(tt,Rxx),grid
```

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

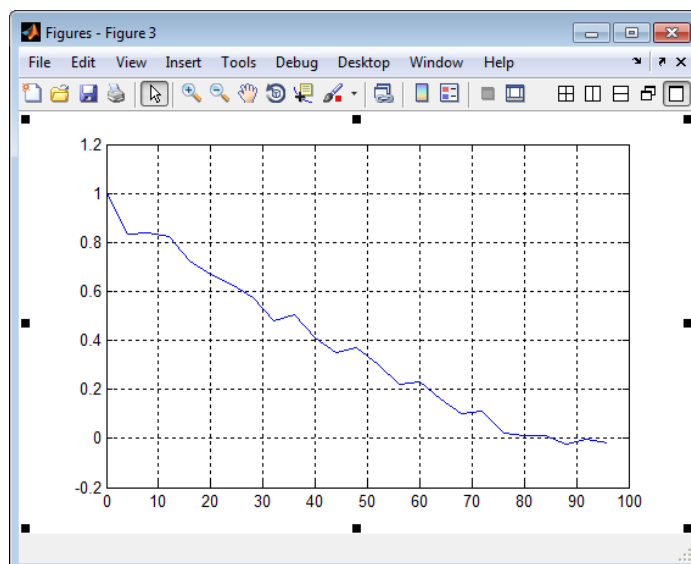


Рисунок 3.6 - Графічне зображення кореляційної функції $R_{PK}(t)$

Визначення кореляційної функції

```
Rxx=xcorr(( K-60.3),(x-3.7), 'biased');
```

```
Rxx=Rxx/max(Rxx);
```

```
tt=-96:4:96;
```

```
figure
```

```
plot(tt,Rxx),grid
```

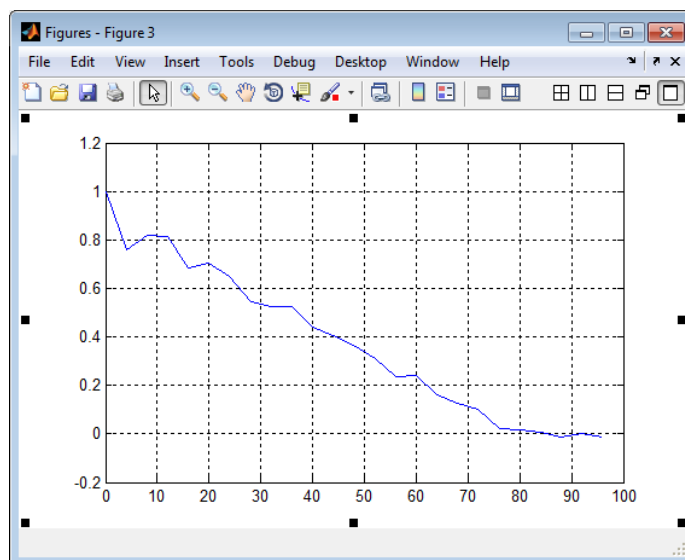


Рисунок 3.7 - Графічне зображення кореляційної функції $R_{KP}(t)$

За допомогою програми Matlab визначаємо коефіцієнт кореляції Пірсона між потужністю електродвигуна приводу мішалки та параметру K_{ϕ} :

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$\text{corr}(x, y) = 0,916.$$

Коефіцієнт кореляції показує, що існує істотна залежність між потужністю електродвигуна приводу мішалки та параметром K_ϕ :

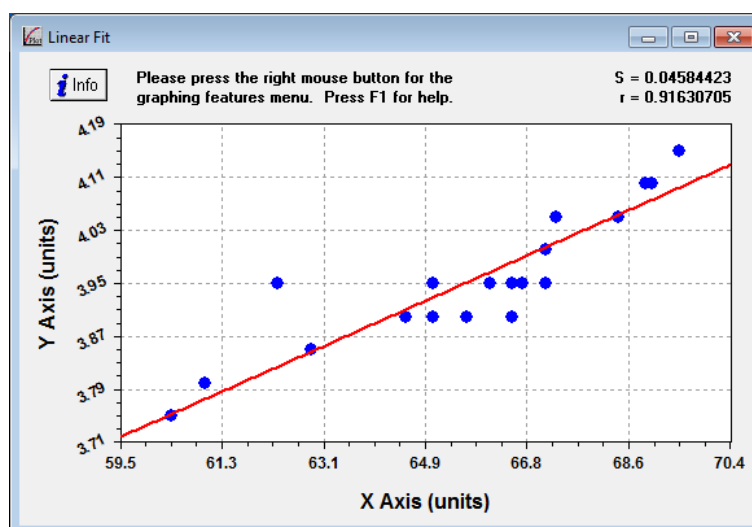


Рисунок 3.8 - Кореляційне поле залежності споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки від параметру K_ϕ

Рівняння регресії (кореляційне рівняння), яке виражає зв'язок між в'язкісно-молекулярним параметром K_ϕ та споживаною потужністю електродвигуна приводу мішалки буде мати вигляд:

$$P = 1,480 + 0,038 \cdot K.$$

3.3 Розрахунок передавальної функції системи

Оскільки, для нашої системи $R_{KK}(p)$ — вхідний сигнал системи, а $R_{KP}(p)$ — її вихідний сигнал, то передавальну функцію такої системи запишемо у вигляді:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{R_{uy}(p)}{R_u(p)} = \frac{R_{KP}(p)}{R_{KK}(p)}, \quad (3.1)$$

де $U(p)$ і $Y(p)$ — перетворення Лапласа для сигналів $u(p)$ і $y(p)$ відповідно.

Відтворимо кореляційні функції у програмі Curve Expert для знаходження їх передавальних функцій [7]. Ввівши значення, які були

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

розраховані вручну, отримуємо різні рівняння різної ступені регресії. Проаналізувавши всі рівняння, вибираємо найоптимальніше:

$$R_{xx}(k) = a + bx,$$

де для автокореляційної функції $R_{xx}(t)$: $a = 0,941$; $b = 0,01$; для кореляційної функції $R_{KP}(p)$: $a = 0,968$; $b = 0,011$.

Побудуємо графіки функцій, що описується даним рівнянням (рис. 3.8, рис. 3.9). Як бачимо, графіки повністю відтворюють вище наведені кореляційні функції.

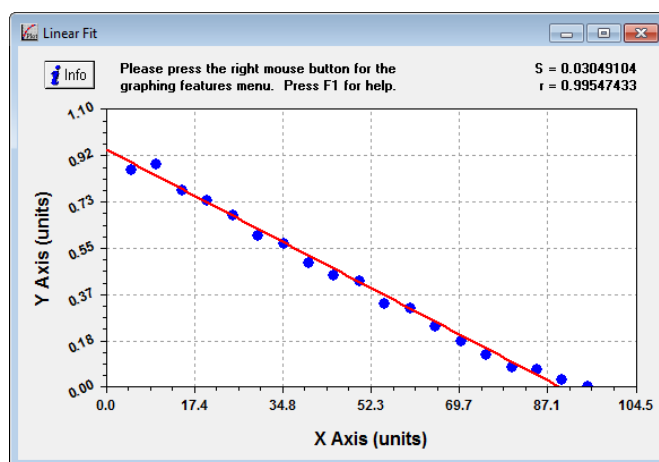


Рисунок 3.9 – Графічне зображення автокореляційної функції $R_{KK}(t)$ у програмі Curve Expert

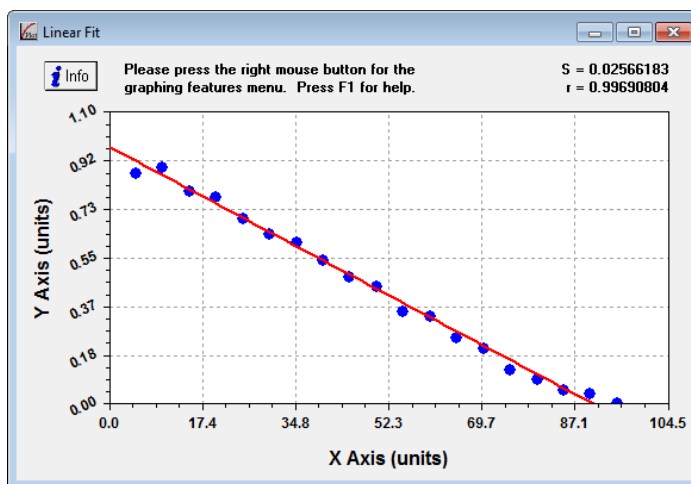


Рисунок 3.10 – Графічне зображення кореляційної функції $R_{KP}(t)$ у програмі Curve Expert

Застосовуючи до рівняння (3.1) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, матимемо кінцкву функцію перелачі:

$$W(p) = \frac{K}{0,01p^2 + 0,177p + 1}.$$

Отримана передавальна функція характеризує динамічні властивості системи та встановлює зв'язок між вхідним і вихідним сигналами в операторній формі.

Висновки до розділу

1. На основі аналізу оцінок автокореляційних функцій в'язкісно-молекулярного параметру K_ϕ та активного навантаження електродвигуна приводу мішалки встановлено, що вони відносяться до стаціонарних ергодичних випадкових процесів. Встановлено, що розподіли параметра K_ϕ та потужності електродвигуна приводу мішалки підпорядковуються нормальному закону.

3. Встановлено, що між в'язкісно-молекулярним параметром K_ϕ і активним навантаженням електродвигуна приводу мішалки існує кореляційний зв'язок. Коефіцієнт кореляції дорівнює $\text{corr}(x, y) = 0,916$. Коефіцієнт кореляції показує, що існує істотна залежність між споживаною потужністю електродвигуна приводу мішалки та параметром K_ϕ .

4. Побудовано кореляційне поле залежності споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки від параметра K_ϕ .

5. Визначено кореляційне рівняння яке виражає лінійний зв'язок між параметром K_ϕ і навантаженням електродвигуна приводу мішалки $P = 1,480 + 0,038 \cdot K$.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу, а саме розроблено метод неперервного непрямого контролю константи K_{ϕ} , яка є базовим в'язкісно-молекулярним параметром, що визначає ступінь полімеризації та якість емульсійного полівінілхлориду (ПВХ-Е). Практична реалізація отриманих результатів має істотне значення для нафтохімічної промисловості, оскільки забезпечує підвищення ефективності управління процесом синтезу ПВХ та стабілізацію якісних показників готової продукції.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють сформулювати такі наукові та практичні висновки:

1. На основі аналізу сучасного стану проблеми моніторингу якісних характеристик полівінілхлоридних смол виявлено, що існуючі методи та технічні засоби вимірювання параметра K_{ϕ} , не забезпечують отримання неперервної та вірогідної інформації про динаміку процесу в реальному часі. Обґрунтовано доцільність оцінювання цього комплексного показника якості непрямим методом, тобто шляхом реєстрації та аналізу активної потужності на валу перемішуючого пристрою реактора-полімеризатора.

2. Сформовано узагальнену математичну модель об'єкта контролю параметра K_{ϕ} з використанням комплексного аналітико-статистичного підходу. Модель враховує специфіку гідродинамічних та фізико-хімічних явищ при полімеризації ПВХ-Е, що дозволило класифікувати процедуру контролю як задачу ідентифікації технологічного стану (визначення події) в умовах параметричної невизначеності.

3. За результатами аналізу оцінок автокореляційних функцій параметра K_{ϕ} та споживаної потужності електродвигуна приводу мішалки доведено, що ці параметри є стаціонарними ергодичними випадковими процесами. Статистична перевірка гіпотез підтвердила, що закони розподілу ймовірностей досліджуваного параметра K_{ϕ} та споживаної потужності приводу мішалки підпорядковуються нормальному (Гауссовому) закону.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

4. Встановлено наявність стійкого стохастичного зв'язку між в'язкісно-молекулярним параметром K_{ϕ} та споживаною потужністю електроприводу. Розраховане значення коефіцієнта кореляції свідчить про істотну залежність між споживаною потужністю мішалки та параметром K_{ϕ} . Побудовано кореляційне поле досліджуваної залежності та отримано лінійне рівняння регресії, яке формалізує зв'язок між параметром K_{ϕ} і споживаною потужністю електродвигуна.

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ПЕРЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Постійний технологійний регламент виробництва емульсійного полівінілхлориду цеху з виробництва полівінілхлоридної смоли. - №В-59-97. – ВАТ “Оріана”, Калуш, 1997. – 297 с.

2. Горбійчук М.І. Теорія автоматичного керування: [консп.лекцій] / М.І. Горбійчук: ІФНТУНГ, 2021. – 78 с.

3. Когуч Я.Р., Лещій Р.М., Чигур І.І, Шавранський М.В. Класифікація алгоритмів визначення зміни властивостей випадкових величин / Я.Р.Когуч, Р.М.Лещій, І.І.Чигур, М.В.Шавранський // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об’єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 2010. Вип.34 (6). – С. 68 – 79.

4. Семенцов Г. Н. Автоматизація неперервних технологічних процесів. Регулятори: [навч.посібн.] / Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. – 201 с.

5. Чигур І.І. Аналіз методів контролю моменту на валі механізмів з електричним приводом / І.І.Чигур, Р.М.Лещій, В.М.Кикляк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електрифікація об’єктів паливно-енергетичного комплексу. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. – 1999. Вип.36 (8). – С.177 – 186.

6. Програмування у середовищі Matlab. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-mapreduce-hadoop.html>

7. Програмування у середовищі CurveExpert. Режим доступу: <https://curveexpert-professional.software.informer.com/>

					БР.АКП–79.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60