

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет автоматики та енергетики
Кафедра «ЕТС та ЕМ»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Плешков П.Г.
«__» _____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

**«Комплекс електрообладнання для енергозберігаючих
режимів пневмотранспортування зерна на
борошномельних підприємствах»**

**«Complex of electrical equipment for energy-saving modes of
pneumatic transportation of grain at flour mills»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу
групи ЕЕ-20 М
141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

_____Гришко Є.О.
«__» _____ 2021 р.

Керівник роботи
к.т.н, професор

_____Віхрова Л.Г.
«__» _____ 2021 р.

Рецензент

_____Пархоменко Ю.М.
«__» _____ 2021 р.

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики

Кафедра ЕТС та ЕМ

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електротехнічні системи електроспоживання»

ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Плешков П.Г.

“ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ
(МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА**

Гришко Євген Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Комплекс електрообладнання для енергозберігаючих режимів пневмотранспортування зерна на борошномельних підприємствах

2. Керівник роботи Віхрова Л.Г., канд. техн. наук, професор

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 1.12.2021 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи Зробити аналіз схем пневмотранспортування та технологій пневмотранспортування зерна та продуктів його розмолу. Розглянути режими роботи пневмотранспортної установки і обґрунтувати енергоощадний спосіб транспортування. Обґрунтування параметрів та режимів роботи регульованого електроприводу пневмотранспортних установок. Обґрунтувати спосіб регулювання продуктивності пневмосистеми. Розглянути заходи з охорони праці та техніко-економічні розрахунки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>Савеленко Г.В.</i>		
<i>Техніко-економічні</i>	<i>Журило І.В.</i>		
<i>розрахунки</i>			

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз схем пневмотранспортування	3.09.21	
2.	Режими роботи пневмотранспортної установки	1.10.21	
	і обґрунтування енергоощадного способу транспортування		
3.	Обґрунтування способу регулювання	29.10.2021	
	продуктивності пневмосистеми		
4.	Оформлення пояснювальної записки	28.11.21	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2021 р.

Керівник роботи _____

Віхрова Л. Г.

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2021 р.

Здобувач _____

Гришко Є.О.

АНОТАЦІЯ

Метою магістерської роботи є зменшення енергоємності пневмотранспортування аеросуміші борошномельних підприємств шляхом регулювання швидкості її руху, і режимів роботи електрообладнання, для досягнення якої вирішувались наступні задачі:

- проаналізовані режими роботи і визначені залежності гідравлічних опорів пневмотранспортних установок від навантаження і швидкості руху сумішей;
- обґрунтований спосіб зменшення енергоємності процесів пневмотранспортування;
- обґрунтовані параметри і структура комплекту електрообладнання пневмотранспортних установок;
- розроблені заходи з охорони праці та техніки безпеки на борошномельному виробництві при транспортуванні аеросумішей;
- проведене техніко-економічне обґрунтування системи.

ANNOTATION

The purpose of the master's work is to reduce the energy consumption of pneumatic transport of the air mixture of flour mills by regulating the speed of its movement and modes of operation of electrical equipment, to achieve which the following tasks were solved:

- the operating modes are analyzed and the dependences of hydraulic resistances of pneumatic transport units on the load and speed of mixtures are determined;
- a reasonable way to reduce the energy intensity of pneumatic transport processes;
- substantiated parameters and structure of the set of electrical equipment of pneumatic transport installations;
- developed measures for labor protection and safety in the flour production industry during the transportation of air mixtures;
- feasibility study of the system was carried out.

ЗМІСТ

Вступ	2
Розділ 1. Аналіз схем пневмотранспортування	4
1.1 технологія пневмотранспортування зерна та продуктів його розмолу	4
1.2. Математичні моделі пневмотранспортування сумішей	13
1.3. Способи і технічні засоби регулювання швидкості повітря в пневмопродуктопроводах	23
Розділ 2. Режим роботи пневмотранспортної установки і обґрунтування енергоощадного способу транспортування	30
2.1. Технологічна схема виробництва борошна і розрахунок кількісно-якісного балансу процесу розмолу зерна	30
2.2. Дослідження статичних режимів процесу транспортування зерна і продуктів його розмолу	31
2.3. Обґрунтування способів зменшення енергоємності пневмотранспортних установок борошномельних підприємств	39
2.3.1. Зменшення витрат електричної енергії на пневмотранспортування шляхом зниження швидкості руху пневмосуміші	39
2.3.2. Способи зменшення енергоємності	44
Розділ 3. Обґрунтування параметрів та режимів роботи регульованого електроприводу пневмотранспортних установок	49
3.1. Обґрунтування способу регулювання продуктивності пневмосистеми	50
Висновки	71
Література	72
Додатки	
Додаток А. Охорона праці	75
Додаток Б Техніко-економічні розрахунки	93

ВСТУП

Одним з прогресивних технічних напрямів у борошномельній промисловості є впровадження пневмотранспорту.

Пневматичний транспорт у порівнянні з іншими є більш досконалим способом переміщення зерна і продуктів його розмолу, відкриває новий, більш високий етап в розвитку техніки борошномельного, круп'яного та комбікормового виробництва.

Заміна механічного транспорту на діючих млинах більш прогресивним пневматичним, а також будівництво нових млинів на пневматичному транспорті дозволяє значно покращити використання виробничих площ, умови праці і ведення технологічного процесу.

Перевага пневматичного транспорту перед механічним зростає, якщо ліквідувати наступні найбільш вагомні недоліки [1]:

- при переводі млинів на пневматичний транспорт питомі витрати енергії на 1 тону продукції зростають інколи на 50 і більше відсотків;
- коефіцієнти корисної дії вентиляторів високого тиску не перевищують 0,5, а кращих закордонних аналогів 0,7;
- не створені адекватні автоматичні системи та конструкції для контролю і автоматичного керування пневмотранспортними установками.

Досвід експлуатації пневмотранспортних установок у борошномельній промисловості свідчить, що їх енергетичні показники на різних підприємствах змінюються у великих межах. Питомі витрати електроенергії на окремих підприємствах перевищують середній для борошномельної промисловості показник 95 кВт·год/т. Витрати електроенергії тільки на пневмотранспортування становлять в межах від 20 до 44 кВт·год/т. Доля витрат електроенергії, що споживається пневмотранспортними установками, в загальних витратах енергії на виробництво 1 тони борошна складає 21-37 відсотків. ККД пневмотранспортних установок борошномельних заводів не

перевищує 10%, тому зменшення витрат енергії на пневмотранспорт є важливим фактором підвищення ефективності виробництва.

Загальні показники енергоємності пневмотранспортних установок недостатні для виявлення шляхів економії електроенергії при використанні пневмотранспорту. У цьому випадку потрібні дані про структуру енерговитрат по окремих елементах установки. В основному гідравлічну потужність, яку розвиває повітродувна машина, споживають пневмотранспортери – до 90 % . Отже зменшення енергоємності цього елемента установок набуває особливо важливого значення. Основна умова зменшення витрат енергії – реалізація оптимальних в енергетичному відношенні режимів транспортування в межах реальних практичних діапазонів навантаження, діаметрів і довжин матеріалопроводів, характерних для пневмотранспортних установок борошномельних підприємств. Аналіз режимів їх роботи свідчить, що зменшення робочих швидкостей повітря в матеріалопроводах до величин, мінімально допустимих при забезпеченні стійкості процесу переміщення продуктів.

Однак робота при мінімальних швидкостях повітря вимагає більш точного налаштування пневмотранспортної установки на прийнятий оптимальний режим. Забезпечення достатніх для транспортування продуктів швидкостей повітря в матеріалопроводах, об'єднаних загальним колектором, при зміні в них навантаження стає практично неможливим без автоматичних пристроїв, або без значних резервів швидкостей при ручному регулюванні. Коливання навантаження в будь-якому з матеріалопроводів змінює гідравлічний опір і призводить до перерозподілу витрат повітря в інших пневмотранспортерах. При роботі з мінімальними швидкостями повітря (без запасу) перерозподіл витрат може викликати порушення стійкості транспортування (завал) в окремих матеріалопроводах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СХЕМ ПНЕВМОТРАНСПОРТУВАННЯ

1.1 Технологія пневмотранспортування зерна та продуктів його розмолу

Сьогодні в нашій країні і за кордоном пневмотранспорт знаходить все ширше застосування на різних підприємствах, де виникає необхідність транспортування зерна і продуктів його розмолу, піску, цементу, вугілля, вогнетривкої глини та інших матеріалів. Продуктивність сучасних пристроїв пневматичного транспорту досягає 300 т/год, дальність транспортування (однією установкою без перевантаження) до 2 км., висота підйому вантажу – до 100 м. [1]. Це визначило найбільш широке застосування в харчовій, будівельній, вугільній промисловості, де його питома вага в ряді випадків досягає 70...80%. У пневматичному транспорті використано дію транспортуючого газу на рух матеріалу. Найбільш розповсюдженим на сьогодні транспортуючим агентом є повітря.

До переваг пневмотранспорту, що сприяє розширенню області його застосування відносяться: герметичність системи; відсутність втрат вантажу, а відповідно, й запобігання впливу зовнішнього середовища на вантаж; можливість переміщення вантажів за складною трасою; полегшує спряження горизонтальних, вертикальних і похилих ділянок; зосередження машинного обладнання в одному місці і відсутність потреби в складному технічному обслуговуванні по всій трасі; можливість шляхом використання розгалужених трубопроводів переміщати вантажі з декількох місць в одно або навпаки з одного місця в декілька; можливість поєднувати процес транспортування з іншими технологічними операціями (сушіння, охолодження, очищення від домішок і т.д.); дозволяє повністю забезпечити комплексну механізацію й автоматизацію завантажувально-розвантажувальних робіт із сипучими матеріалами. При переміщенні багатьох шкідливих для здоров'я хімічних

продуктів, гостропахнучих матеріалів, пневмотранспорт створює найбільш гігієнічні та безпечні умови для обслуговуючого персоналу.

До основних недоліків пневматичного транспорту відносяться високі питомі витрати енергії, інтенсивне зношування трубопроводів (особливо на поворотних ділянках) та інших частинах установки, які входять в зіткнення з потоком вантажу.

Установки трубопровідного пневмотранспорту можуть конструктивно відрізнятися одна від одної, але загальними елементами їх є повітрорудна машина, трубопровід, пристрої для завантаження вантажу (живильники) в систему та відокремлення його від повітря, контрольно – вимірювальна апаратура [2] .

Основою роботи будь якої пневмотранспортної установки є наявність перепаду тиску на початку та в кінці трубопроводу. В залежності від способу створення перепаду тиску та його величини, пневмотранспортні установки поділяються на всмоктуючі, нагнітаючі та змішані (всмоктуючо – нагнітаючі), на установки низького (до 5×10^3 Па), середнього (від 5×10^3 до 10^4 Па) й високого (вище 10^4 Па) тиску [3] .

Однією з переваг всмоктуючих пневмотранспортних установок є можливість забирати матеріал одночасно з декількох місць. Крім цього, оскільки у всмоктуючих установках матеріалопровід постійно знаходиться під вакуумом, завантажувальні пристрої не створюють пилу та відрізняються простотою конструкції. У всмоктуючих установках (рис. 1.1 а) повітря висмоктується повітрорудною машиною із системи, в якій створюється розрідження. Внаслідок цього повітря з атмосфери попадає у завантажувальний пристрій 1 і проходячи через шар вантажу або зустрічаючи на своєму шляху вантаж, що надходить до трубопроводу, підхоплює його і переміщає по матеріалопроводу 2 в розвантажувач 3. З нього вантаж виводиться за допомогою шлюзового затвору, а повітря поступає в повітропровід 4.

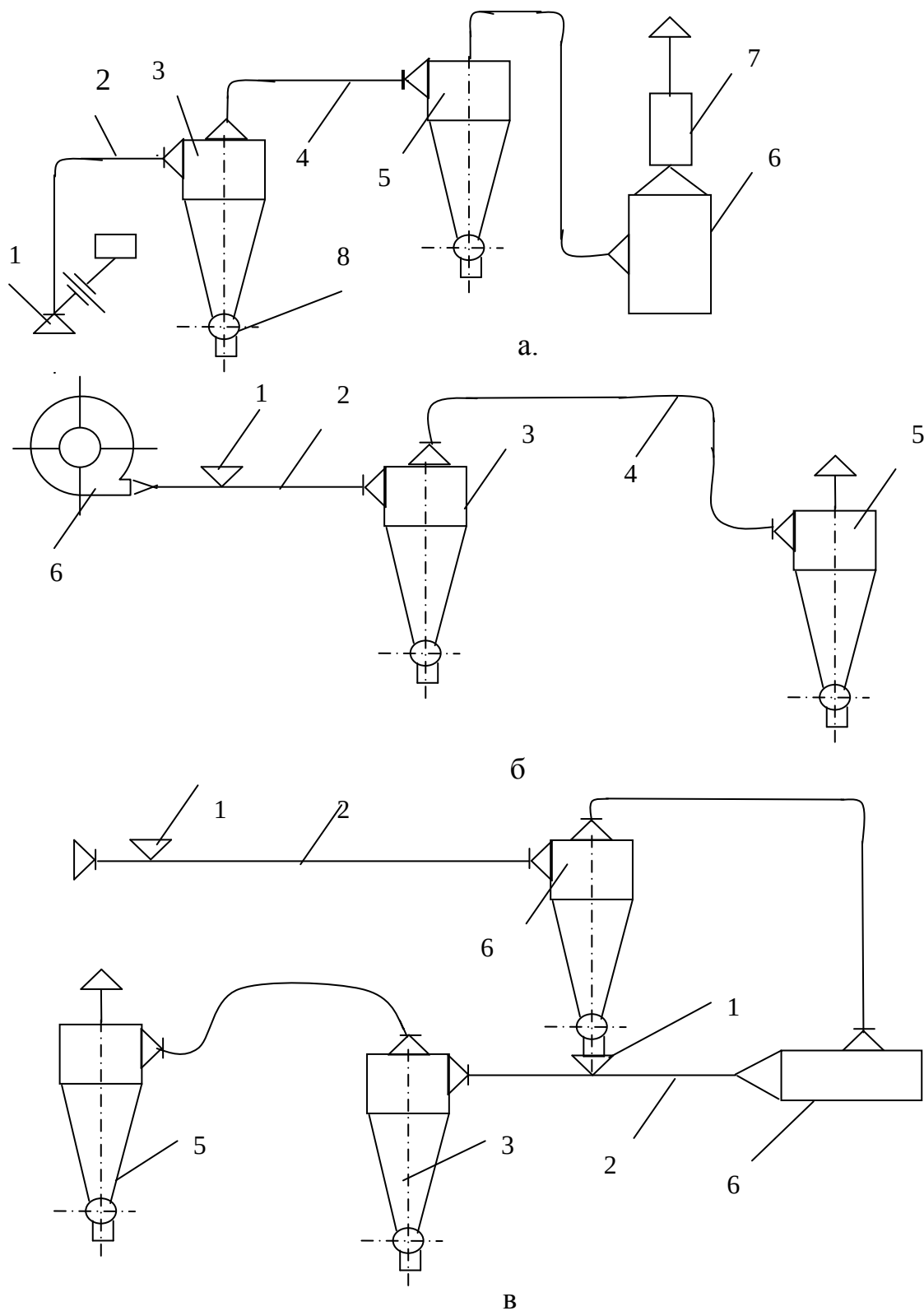


Рис. 1.1. Схеми пневмотранспортних установок:

а – всмоктуючі; б – нагнітаючі; в – всмоктуючи – нагнітаючі: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – матеріалопровід; 3 – розвантажувач; 4 – повітропровід; 5 – пиловідокремлювач; 6 – повітродувна машина; 7 – глушник; 8 – шлюзовий затвор.

Пройшовши пиловідокремлювач 5, повітря викидається повітрорудною машиною 6 через глушник 7 в атмосферу. В даних установках неможливо створити перепад тиску між початком матеріалопроводу та всмоктуючим патрубком вентилятора більше однієї атмосфери, чим обмежується протяжність траси та величини концентрації суміші. Практично всмоктуючі установки працюють при розрідженні, не більше ніж 5×10^4 Па.

В установках нагнітаючого типу (рис. 1.1 б) повітрорудна машина, як правило, розміщена в безпосередній близькості від завантажувального пристрою. Тиск повітря в матеріалопроводі постійно вище атмосферного, при цьому надлишок тиску у місці прийому матеріалу найбільший, а в місцях розвантаження найменший. Основною перевагою нагнітаючих установок є можливість створення повітрорудною машиною теоретично необмеженої величини надлишкового тиску.

Один з основних недоліків – це труднощі завантаження транспортуючого матеріалу в матеріалопровід, який знаходиться під тиском, оскільки при цьому повинно бути зведено до мінімуму втрати повітря через живильний пристрій й запилення завантажувального матеріалу.

Всмоктуючо – нагнітальні установки (рис. 1.1 в), за звичай, використовують в тих випадках, коли доцільно застосовувати приймальний пристрій всмоктуючого типу, а для основної, найбільш протяжної ділянки траси – принцип нагнітання. Але установки такого типу не можна використовувати для транспортування матеріалів, які утворюють з повітрям вибухонебезпечні суміші. Класифікація пневмотранспортних установок наведена на рис. 1.2.

На борошномельних підприємствах використовують розгалужені пневмоустановки всмоктуючого типу. Так як згідно технології переробки зерна потрібно, щоб зерно і продукт його розмолу одночасно подавався у відповідне технологічне обладнання з декількох місць, а також переміщення матеріалу проходить на невелику відстань, що не вимагає створення великого тиску і відповідно складного обладнання.

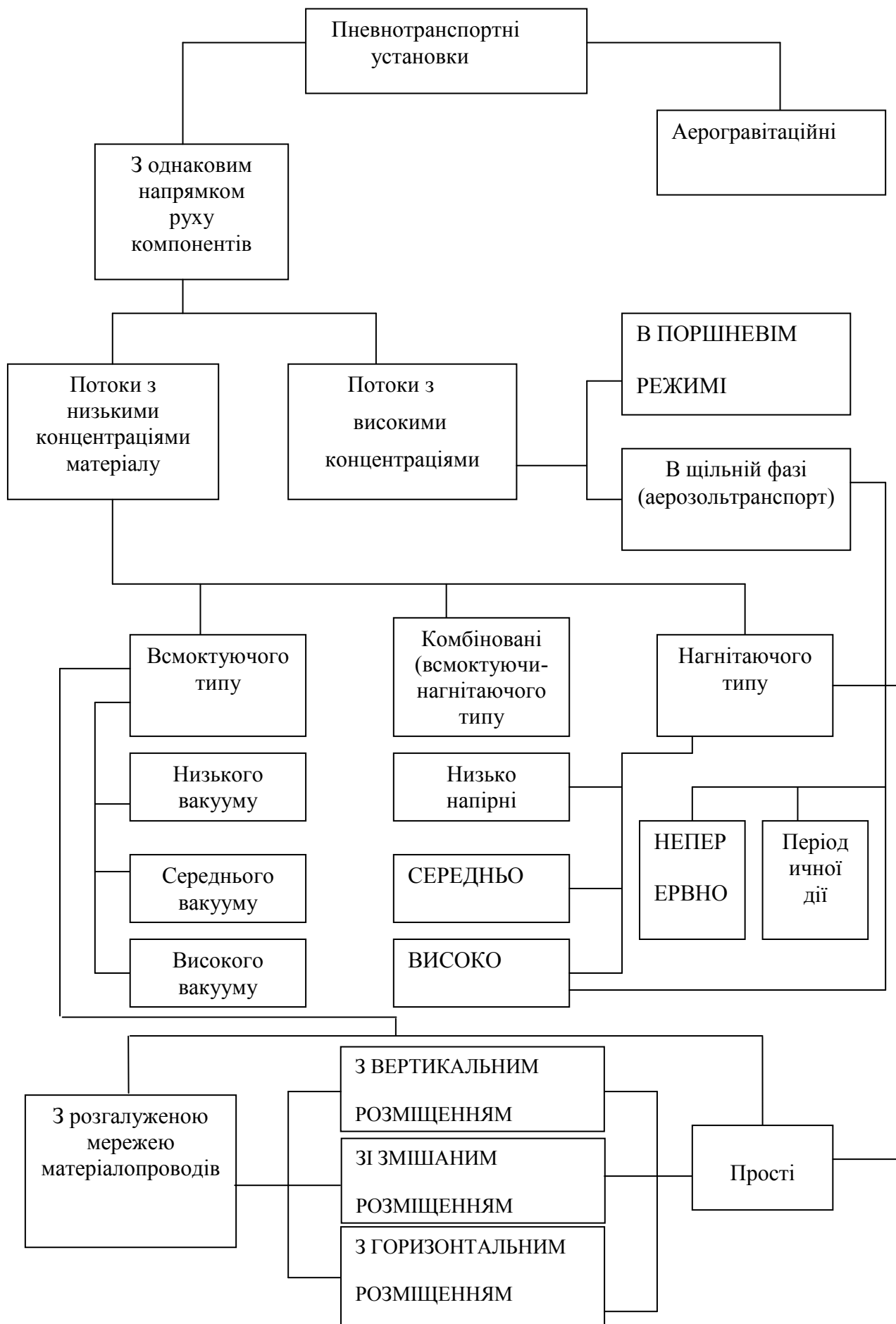


Рис 1.2. Класифікація пневмотранспортних установок

Використання даного типу пневмоустановок дозволяє виключити втрату зерна і продуктів його розмолу при транспортуванні, а також дає можливість одночасно очищати зерно від домішок за допомогою спеціального обладнання (пневмосепаратори) і створює необхідні санітарно – гігієнічні умови для обслуговуючого персоналу.

На млинах типу Р6-АВМ-15 застосовуються пневмотранспортні установки всмоктуючого типу, технологічна схема яких наведена на (рис. 1.3).

Повітря всмоктується вентилятором 1 із системи, в якій створюється розрідження. Внаслідок цього повітря із атмосфери поступає в завантажувальні пристрої (трійники) 15 і з бункера 10 забирається зерно, а з розсіву продукти його розмолу. Повітря підхоплює матеріал і переносить по матеріалопроводах 7 в розвантажувачі 13 та пневмосепаратори 5.

В пневмосепараторі зерно очищується від домішок, які відрізняються від нього аеродинамічними властивостями.

Із розвантажувачів і пневмосепараторів зерно і продукти його розмолу поступають на відповідне технологічне обладнання, а повітря надходить в колектор 16. Проходячи через пиловідокремлювач (циклон) 3, систему повітропроводів 2, повітря викидається вентилятором 1 в атмосферу.

Пневмотранспортна установка млина представляє собою складну розгалужену систему. Режим транспортування в кожній з труб системи залежить від властивостей джерела тиску і від навантаження в інших трубах.

Для забезпечення роботи пневмотранспортної установки в перехідних режимах, передбачається запас розрідження в окремих трубах. Наявність таких запасів і обумовлює підвищену витрату електроенергії.

Друга особливість борошномельних пневмоустановок, полягає у швидкоплинності перехідних процесів. Перехід від одного усталеного стану до іншого проходить на протязі долі секунди. Для забезпечення перехідного процесу в пневмотрубах, необхідно передбачити запас швидкості повітря.

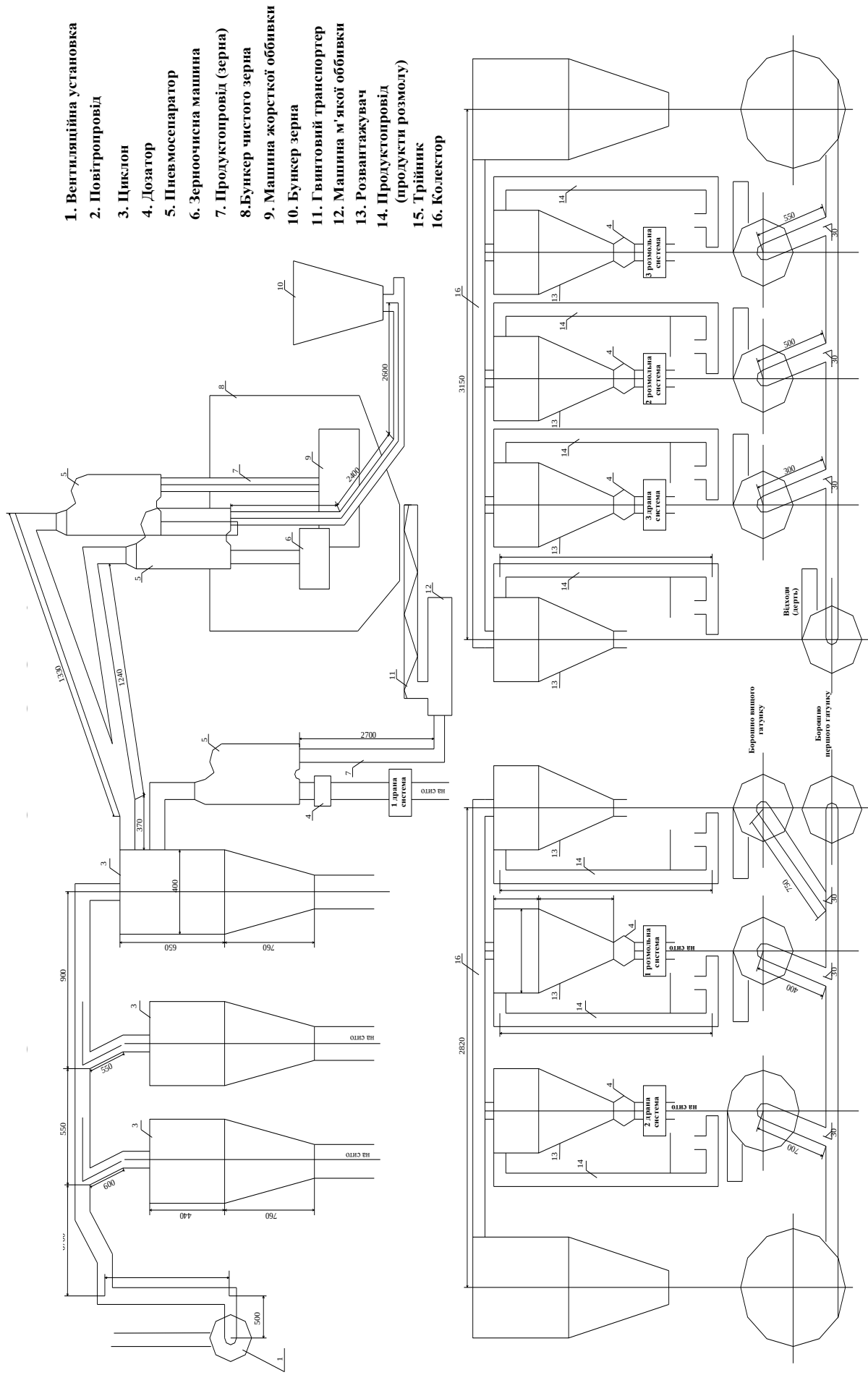


Рис. 1.3. Технологічна схема пневмотранспорту млина

Сумісна характеристика джерела тиску та розгалуженої пневмомережі матимуть вигляд рис. 1.4 тільки у випадку, коли всі пневмогілки мають номінальний режим роботи. При відхиленні режиму від номінального хоча б в одній гілці порушується рівновага у всіх інших та у всій пневмомережі. Наприклад, при зменшенні навантаження на один з матеріалопроводів пневмомережі характеристика цього пневмопроводу переміститься в нове

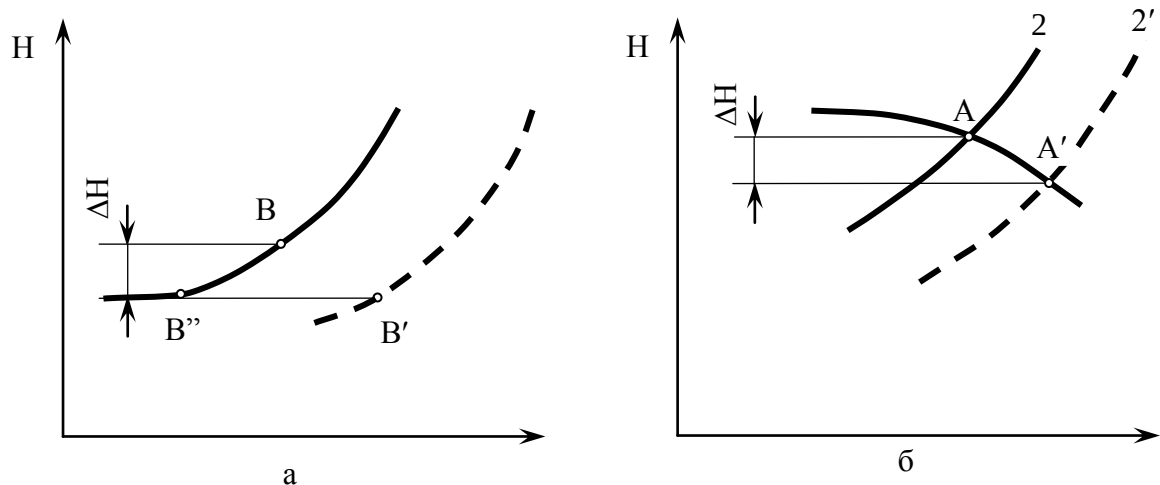


Рис. 1.4. Зміщення характеристик при відхиленні режиму в пневмовітці.

еквідистанційне положення (рис. 1.4, а). Витрати повітря у вентиляційній частині установки збільшаться, що викликає зміщення характеристики установки в положення 2' (рис. 1.4, б). Новий стан системи, що встановився, буде в точці А' (розрідження знизилось на ΔH). Якщо до перехідного процесу в системі номінальні режими транспортування визначались точкою В (рис. 1.4, а), то в новому встановленому режимі в трубі, де навантаження зменшилось, режим буде визначатися точкою В' (витрати повітря підвищились). В інших трубах витрати повітря зменшаться (точка В'').

Із вищенаведеного випливає, що нормальна (без завалів) експлуатація розгалуженої нерегульованої пневмотранспортної установки можлива тільки при визначеному запасі тиску в колекторі, тобто при перевитратах повітря і відповідно електроенергії. Збільшення навантаження в окремій трубі викличе еквідистанційне переміщення вгору характеристик даної вітки і всієї

пневмоустановки. Тиск в колекторі підвищиться на ΔH , що викличе зменшення витрат повітря в трубі, де збільшилось навантаження, і збільшення витрат повітря в інших трубах. У цьому випадку також неможлива нормальна експлуатація пневмоустановки без визначеного запасу витрат повітря.

Звичайно, що вирівнювання режимів роботи окремих продуктопроводів дроселюванням потоків в цих же продуктопроводах особливо в динамічних режимах більш доцільне з погляду зниження часу перехідних процесів при відхиленнях від сталого режиму і встановлення динамічної рівноваги та з погляду енергетичної ефективності в порівнянні з дроселюванням в колекторі. Оскільки зміну швидкості і відповідно збільшення або зменшення витрат повітря пов'язаних із цією зміною в продуктопроводі, викликані зміною його продуктивності, миттєво змінює дросельний пристрій продуктопроводу шляхом введення або виведення додаткового опору. Це дає змогу зменшити або збільшити швидкість повітря таким чином, щоб витрати повітря залишалися приблизно на попередньому рівні. В таких системах потрібен запас за напором, який “гаситься” дросельними пристроями продуктопроводів.

При дроселюванні в продуктопроводах установки повинні мати практично ті ж запаси тиску що і при дроселюванні в колекторі і дещо менші запаси за витратами повітря. В перехідних режимах останнє зменшує витрати електроенергії. Однак це зменшення відноситься тільки до перехідних режимів (пуск, зупинка млина, короточасні зовнішні або внутрішні збурення) і економія енергії несуттєва. В статичних режимах роботи такі системи за якістю регулювання і витратами енергії майже не відрізняються від регулювання дроселюванням в колекторі.

Таким чином, аналіз способів регулювання витрат повітря та тиску в продуктопроводах показує, що найбільш раціональним способом є регулювання швидкості обертання вентилятора і його продуктивності в залежності від розрідження в колекторі. При цьому досягаються найбільш раціональні режими роботи пневмотранспортної установки і мінімум витрат електроенергії.

1.2. Математичні моделі пневмотранспортування сумішей

Сила дії повітряного потоку на поміщену в нього тверду частинку в загальному випадку може бути виражена залежністю [3]:

$$P = fF_1\rho(v-u)^2 + C_x F_m \rho \frac{(v-u)^2}{2}, \quad (1.1)$$

де: f – коефіцієнт тертя повітряного потоку в частинку;

F_1 – величина поверхні тертя;

v – швидкість повітряного потоку;

u – швидкість частинки;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

F_m – площа міделєвого перерізу частинки;

ρ – густина повітря.

Перший член рівняння (1.1) виражає силу, що діє на частинку зі сторони повітряного потоку і яка рівна силі тертя її в повітря; другий визначає втрату кінетичної енергії несучого середовища, яка іде на подолання інерції тіла.

При малих швидкостях повітряного потоку (ламінальний режим) перший член рівняння (1.1) має переважаюче значення в порівнянні з другим. Пневматичне транспортування здійснюється при розвинутому турбулентному режимі повітряного потоку, коли число Рейнольдса $Re = \frac{dv}{\nu} = 10^4 \div 10^6$

(d – характерний розмір частинки, ν – кінематична в'язкість повітря). В цьому випадку переважаюче значення має другий член рівняння (1.1), і нехтуючи значенням першого отримаємо, що

$$P = C_x F_m \rho \frac{(v-u)^2}{2}. \quad (1.2)$$

Рівняння (1.2) виражає силу опору частинки при її русі в повітряному потоці і є рівнодіючою всіх складових нормальних і тангенціальних сил, діючих на поверхню частинки в напрямі відносного обтікання, цю силу називають силою аеродинамічного опору.

Коли частинка буде рухатися у висхідному потоці повітря, то на неї будуть діяти сила тяжіння та сила опору. Рівняння руху частинки у висхідному потоці запишеться у вигляді:

$$m \frac{du}{dt} = C_x F_M \frac{\rho(v-u)^2}{2} - mg. \quad (1.3)$$

Частинка буде підніматися вгору і $\frac{du}{dt} > 0$, якщо сила опору буде більша сили тяжіння, тобто $P > mg$; частинка опускається вниз $\frac{du}{dt} < 0$ при $P < mg$. Частинка рухається з постійною швидкістю або її швидкість рівна нулю, тобто $\frac{du}{dt} = 0$, якщо сила опору повітряного потоку зрівноважує силу тяжіння. Тоді рівняння (1.3) буде мати вигляд:

$$C_x F_M \frac{\rho v_{\text{вир}}^2}{2} - mg = 0. \quad (1.4)$$

Відносну швидкість повітря, при якій частинка знаходиться в стані “витання” біля деякого положення або рівномірно рухатися у висхідному вертикальному потоці, називають швидкістю витання. З рівняння (1.4) отримаємо:

$$v_{\text{вир}} = \sqrt{\frac{2mg}{C_x F_M \rho}}. \quad (1.5)$$

Важливою аеродинамічною характеристикою сипучого матеріалу є швидкість витання. Знаючи її можна вибрати оптимальну швидкість повітря при транспортуванні.

Визначивши з рівняння (1.4) значення коефіцієнта C_x і підставивши його в рівняння (1.3), перепишемо рівняння руху частинки у вигляді:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g}{v_{\text{вир}}^2} [(v-u)^2 - v_{\text{вир}}^2]. \quad (1.6)$$

Розв’язком цього рівняння відносно швидкості частинки при початкових умовах $u = u_n$ і $t_n = 0$, буде вираз:

$$u = v - v_{\text{вум}} \frac{K_0 \exp \frac{2gt}{v_{\text{вум}}} - 1}{K_0 \exp \frac{2gt}{v_{\text{вум}}} + 1}, \quad (1.7)$$

$$\text{де } K_0 = \frac{v_{\text{вум}} - u_n + v}{v_{\text{вум}} + u_n - v}.$$

Аналіз рівняння (1.7) показує, що швидкість частинки у вертикальному турбулентному потоці залежить від її аеродинамічних властивостей, часу перебування частинки в потоці повітря і середньої швидкості повітряного потоку. Межею швидкості частинки буде різниця між швидкістю повітря та швидкістю витання:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u = v - v_{\text{вум}} \quad (1.8)$$

Рівняння руху частинки в горизонтальному матеріалопроводі має вигляд:

$$m \frac{du}{dt} = C_x F_m \frac{\rho(v-u)^2}{2} \quad (1.9)$$

Підставивши в рівняння (1.9) значення C_x з рівняння (1.4) і розв'язавши його відносно u , отримаємо:

$$u = v - \frac{(v - u_n) v_{\text{вум}}^2}{gt(v - u_n) + v_{\text{вум}}^2}. \quad (1.10)$$

З рівняння (1.10) видно, що із збільшенням часу перебування частинки в матеріалопроводі її швидкість збільшується і прямує до межі:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u = v. \quad (1.11)$$

Для опису двокomпонентного потоку використовуємо рівняння руху потоку в напругах, яке для випадку в'язкої течії можна записати у векторній формі:

$$\bar{\rho}_s \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad} \bar{v} \right) + \bar{\rho}_{Ts} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \text{grad} \bar{u} \right) = \text{div} \bar{p}_{ij} + \text{div} \bar{p}_{Tij} + \bar{\rho}_s g + \bar{\rho}_{Ts} g \quad (1.12)$$

де $\bar{\rho}_s \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad} \bar{v} \right)$ - сила інерції несучого середовища;

$\bar{\rho}_{Ts} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \text{grad} \bar{u} \right)$ - сила інерції твердого компонента;

$\bar{p}_{ij}, \bar{p}_{Tij}$ - тензори напруг несучого і твердого компонентів;

$\bar{\rho}_s g, \bar{\rho}_{Ts} g$ - вагові сили;

$\bar{v}, \bar{u}$ - вектори середніх локальних швидкостей несучого середовища і твердого компонента.

Рівняння нерозривності запишуться у вигляді:

для несучого середовища

$$\frac{\partial \bar{\rho}_i}{\partial t} + \text{div} \bar{\rho}_i \bar{v} = 0 \quad ; \quad (1.13)$$

для твердого компонента

$$\frac{\partial \bar{\rho}_{Ts}}{\partial t} + \text{div} \bar{\rho}_{Ts} \bar{u} = 0 \quad (1.14)$$

Оскільки система (1.12) – (1.13) містить невідомих більше числа рівнянь, то для визначення невідомих доцільно записати рівняння руху для кожного компонента.

Рівняння руху несучого середовища можна записати:

$$\bar{\rho}_s \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad} \bar{v} \right] = \text{div} \bar{P}_{ij} + \bar{\rho}_s g - \bar{n}_T \bar{F} \quad , \quad (1.15)$$

де $\bar{n}_T$ - локально середня кількість частинок в одиниці об'єму;

$\bar{F}$ - сила взаємодії між несучим середовищем і частинкою твердого компонента.

В рівнянні (1.12) сили взаємодії відсутні, так як для потоку в цілому вони є внутрішніми.

Для несучого середовища при деяких допущеннях можна вважати, що тензор $\bar{p}_{ij}$ має вигляд тензора напруг ньютонівської рідини:

$$\bar{p}_{ij} = \left[-\bar{p} + \left(\lambda' - \frac{2}{3} \mu_s \right) \bar{\Theta} \right] \delta_{ij} + 2 \mu_s \bar{\varepsilon}_{ij} \quad , \quad (1.16)$$

де: $\bar{p}$ - локально середній тиск в точці;

λ' - другий коефіцієнт вязкості;

$\bar{\Theta}$ - швидкість об'ємної деформації;

$\bar{\varepsilon}_{ij}$ - тензор швидкостей деформації;

δ_{ij} - символ Кронекера.

Якщо $\bar{\rho}_s = const$, тобто несуче середовище нестиснуте, то величина швидкості об'ємної деформації:

$$\bar{\Theta} = \frac{\partial \bar{v}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} = 0 \quad (1.17)$$

і вигляд тензора напруг буде:

$$\bar{p}_{ij} = -\bar{p}\delta_{ij} + 2\mu_s \bar{\varepsilon}_{ij} \quad (1.18)$$

Почленно віднімаємо рівняння (1.15) від рівняння (1.12) і отримаємо рівняння руху твердого компонента:

$$\bar{\rho}_{Ts} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} grad \bar{u} \right] = div \bar{p}_{Tij} + \bar{\rho}_{Ts} g - \bar{n}_T \bar{F}. \quad (1.19)$$

В практиці пневмотранспортування зазвичай використовують двохкомпонентні потоки із сильно розвинутою турбулентністю. Для таких потоків одних просторових середніх параметрів, які характеризують рух, недостатньо і потрібно проводити просторово – часове осереднення. Тоді рівняння осередненого руху двохкомпонентного турбулентного потоку буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_s \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} grad \bar{v} \right) + \bar{\rho}_{Ts} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} grad \bar{u} \right) = \\ div \bar{p}_{ij} + div \bar{p}_{Tij} + \bar{\rho}_s g + \bar{\rho}_{Ts} g - div \bar{\Pi}_{ij} - div \bar{\Pi}_{Tij} \end{aligned}, \quad (1.20)$$

а рівняння нерозривності потоку:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} + div(\bar{\rho}_s \bar{v}) &= 0 \\ \frac{\partial \bar{\rho}_{Ts}}{\partial t} + div(\bar{\rho}_{Ts} \bar{u}) &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1.21)$$

де $\bar{\Pi}_{ij}$ і $\bar{\Pi}_{Tij}$ - тензори осереднених пульсацій напруг несучого середовища і твердого компонента при турбулентній течії.

Тензори пульсацій напруг будуть мати вигляд:

$$\bar{\Pi}_{ij} = \bar{\rho}_s \bar{v}_i \bar{v}_j, \quad \bar{\Pi}_{Tij} = \bar{\rho}_{Ts} \bar{u}_i \bar{u}_j,$$

Де $\dot{v}_i, \dot{v}_j, \dot{u}_i, \dot{u}_j$ - компоненти пульсацій швидкостей.

Рівняння руху несучого середовища з врахуванням сил опору твердих частин можна записати у вигляді:

$$\bar{\rho}_s \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad} \bar{v} \right] = \text{div} \bar{p}_{Tij} + \bar{\rho}_s g - \bar{n}_T \bar{F} - \text{div} \bar{\Pi}_{Tij} . \quad (1.22)$$

Віднімаючи рівняння (1.22) від рівняння (1.20), отримаємо рівняння твердого компонента

$$\bar{\rho}_{Ts} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \text{grad} \bar{u} \right] = \text{div} \bar{p}_{Tij} + \bar{\rho}_{Ts} g - \bar{n}_T \bar{F} - \text{div} \bar{\Pi}_{Tij} . \quad (1.23)$$

Рівняння (1.20) – (1.23) можуть бути використані для двохкомпонентного потоку будь – якої концентрації.

При дослідженні потоків пневмотранспорту використовують поняття концентрації. Маючи на увазі, що $\mu_\delta = \frac{\bar{\rho}_{Ts}}{\bar{\rho}_s} = \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon \bar{\rho}_s}$, запишемо рівняння (1.22) і (1.23) для двохкомпонентних потоків з низькою концентрацією твердих частинок: рівняння руху несучого середовища

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad} \bar{v} = \frac{1}{\bar{\rho}_s} \text{div} \bar{p}_{Tij} + g - \frac{1}{\bar{\rho}_s} \text{div} \bar{\Pi}_{Tij} - \frac{1}{\bar{\rho}_s} \bar{n}_T \bar{F} ; \quad (1.24)$$

рівняння руху твердого компонента

$$\bar{\mu}_\delta \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \text{grad} \bar{u} \right) = \bar{\mu}_\delta g - \frac{1}{\bar{\rho}_s} \text{div} \bar{\Pi}_{Tij} + \frac{1}{\bar{\rho}_s} \bar{n}_T \bar{F} ; \quad (1.25)$$

рівняння нерозривності потоку

$$\frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} + \text{div}(\bar{\rho}_s \bar{v}) = 0; \quad \frac{\partial \bar{\mu}_\delta}{\partial t} + \text{div}(\bar{\mu}_\delta \bar{u}) = 0 . \quad (1.26)$$

Рівняння (1.24) – (1.26) є частковим випадком рівнянь осередненого руху і нерозривності турбулентного двохкомпонентного потоку.

Втрати тиску в матеріалопроводі залежать від швидкості повітря в ньому.

Втрата тиску на підйом визначають з умови рівності сили тяжіння стовпа матеріалу, що знаходиться в матеріалопроводі, віднесеної до площі поперечного перерізу матеріалопроводу. Якщо секундну продуктивність установки

помножити на час перебування матеріалу в матеріалопроводі, то отримаємо величину сили тяжіння матеріалу, тобто:

$$P_{\Delta} = q\Delta t = \mu\rho v F \frac{L}{\int_0^L \frac{u(x)dx}{L}}, \quad (1.27)$$

де q – продуктивність матеріалопроводу, кг/с;

Δt – час перебування матеріалу в матеріалопроводі, с;

μ – концентрація аеросуміші, кг/кг;

ρ – питома вага повітря, кг/м³;

F – площа поперечного перерізу матеріалопроводу, м²;

L – довжина матеріалопроводу, м;

а втрати тиску на його підйом будуть:

$$H = \mu\rho v \frac{L^2}{\int_0^L u(x)dx}. \quad (1.28)$$

На основі критеріальних рівнянь, втрати тиску на підйом матеріалу будуть:

$$H = Eu_n \rho v^2 = Eu_n (Re, Re_{aum}, Fr, \frac{\rho}{\rho_m}, \frac{D}{d_e}, \mu, \frac{L}{D}, k_n) \frac{\rho v^2}{2}, \quad (1.29)$$

де Eu – число Ейлера;

Fr – число Фруда;

D – діаметр матеріалопроводу, м;

d_e – еквівалентний діаметр частинки, м;

ρ_t – густина твердого компонента, кг/м³.

Очевидно, що з ряду незалежних змінних необхідно виключити k_n , так як його величина не впливає на втрату тиску. Рівняння (1.29) буде мати вигляд:

$$H = Eu_n \rho v^2 = Eu_n (Re, Re_{\text{вум}}, \frac{\rho}{\rho_m}, \frac{D}{d_e}) \mu, Fr, \frac{L}{D}, \frac{\rho v^2}{2} . \quad (1.30)$$

Порівнявши рівняння (1.30) з рівнянням (1.28), отримаємо:

$$\frac{v}{u_{cp}} = \frac{v}{u_{cp}} (Re, Re_{\text{вум}}, \frac{\rho}{\rho_m}, \frac{D}{d_e}). \quad (1.31)$$

Таким чином, вираз для втрат тиску на підйом матеріалу має складну функціональну залежність. При опрацюванні дослідних даних величину втрат тиску у вертикальному матеріалопроводі можна визначати за виразом:

$$H = \rho \mu L . \quad (1.32)$$

Але у вираз (1.32) потрібно підставляти не витратну концентрацію μ , а середню (для всієї довжини транспортування) дійсну концентрацію

$$\mu_o = \mu \frac{v}{u_{cp}} . \quad (1.33)$$

Вона значно більша витратної, так як швидкість повітря більша ніж швидкість частин матеріалу. Тому втрати тиску на підйом матеріалу визначаємо за виразом:

$$H = \rho \mu \frac{v}{u_{cp}} L = \rho \mu \frac{v}{v - v_{\text{вум}}} L . \quad (1.34)$$

Величина втрати тиску на підйом продукту, визначена за виразом (1.34) тим більш реальна, чим більша висота його підйому.

На основі експериментальних даних побудовано залежності втрат тиску при транспортуванні пшениці у вертикальному матеріалопроводі від швидкості повітряного потоку і від концентрації аеросуміші, які приведені на рис. 1.5 і рис. 1.6 [16]. Аналіз графіків показує, що із збільшенням швидкості повітряного потоку і концентрації аеросуміші, втрата тиску зростає. При концентрації аеросуміші $\mu < 1,5$ залежність є лінійною, а при $\mu \geq 1,5$ для режимів роботи

пневмотранспорту умова прямої пропорційності між величиною втрати тиску і концентрації аеросуміші не спостерігається.

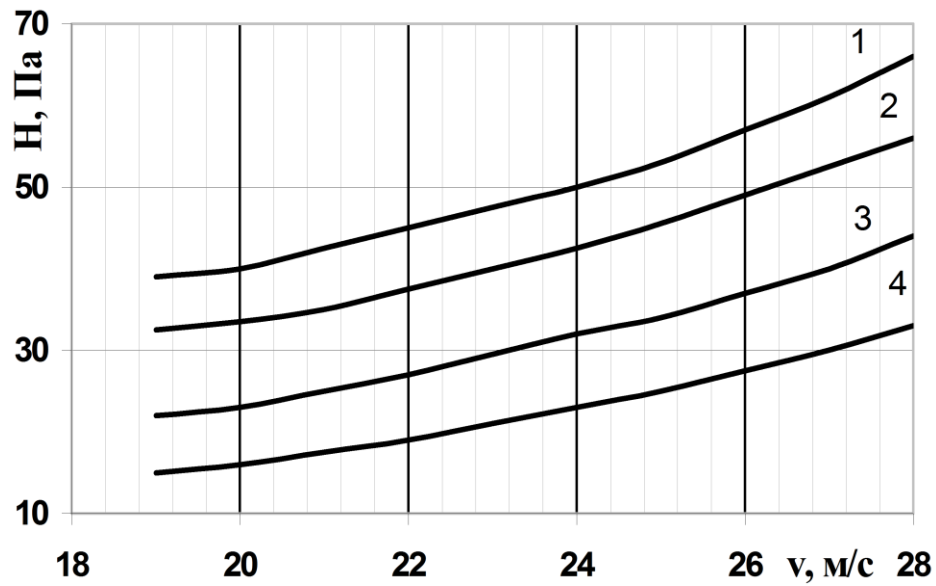


Рис.1.5. Залежність втрат тиску при транспортуванні пшениці у вертикальному матеріалопроводі від швидкості повітряного потоку.

1- $\mu = 2,8$ кг/кг; 2- $\mu = 2,3$ кг/кг; 3- $\mu = 1,6$ кг/кг; 4- $\mu = 1,0$ кг/кг.

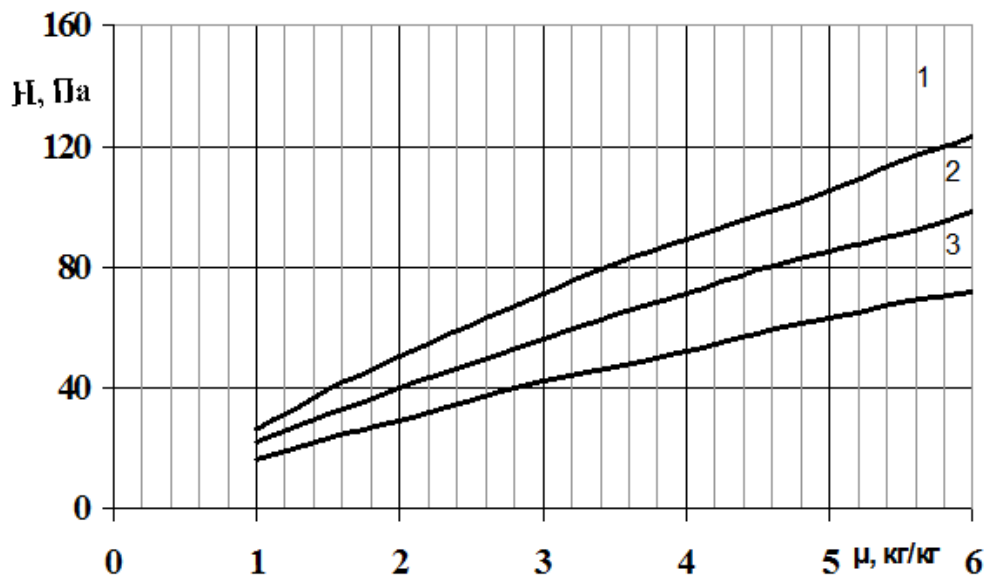


Рис. 1.6. Залежність втрат тиску при транспортуванні матеріалу (пшениці) у вертикальному матеріалопроводі з $D = 0,124$ м від концентрації. 1- $v=28$ м/с; 2- $v=24$ м/с; 3- $v=20$ м/с.

Враховуючи конструкцію пневмовіток, які складаються з матеріалопроводів та технологічного обладнання (пневмоприймачів, розвантажувачів, відводів), загальні втрати тиску в пневмовітці будуть визначатися за формулою:

$$H_z = H_n + H_{м.о.}, \quad (1.35)$$

де H_n – втрата тиску в прямолінійній частині пневмовітки, Па;

$H_{м.о.}$ – втрата тиску в місцевих опорах, Па.

Втрату тиску в прямолінійній частині пневмовітки визначаємо за виразом:

$$H_n = H_o + H'_m, \quad (1.36)$$

де H_o – втрата тиску при транспортуванні чистого повітря, Па;

H'_m – втрата тиску при транспортуванні матеріалу, Па.

Втрата тиску на переміщення повітря визначається за рівнянням Дарсі – Вейсбаха

$$H_o = \lambda \frac{L \rho v^2}{D 2g}, \quad (1.37)$$

де λ – коефіцієнт опору, який залежить від конструкції труби

Втрату тиску при транспортуванні матеріалу визначаємо за формулою :

$$H'_m = H_p + H_{nm} + H_m, \quad (1.38)$$

де H_p – втрата тиску на розгін матеріалу, Па;

H_{nm} – втрата тиску на підтримування матеріалу у зваженому стані, Па;

H_m – втрата тиску на переборювання гальмування матеріалу в матеріалопроводі, Па.

$$H_p = \frac{1.25 G v_m}{g F}, \quad (1.39)$$

$$H_{nm} = \frac{GL}{F v_m}, \quad (1.40)$$

$$H_m = \lambda_m \frac{LG v_m}{DFg}. \quad (1.41)$$

Втрата тиску в місцевих опорах визначається за виразом:

$$H_{\text{м.о.}} = H_{\text{пр.}} + H_{\text{роз.}} + H_{\text{від.}} + H_{\text{рк.}}, \quad (1.42)$$

де $H_{\text{пр.}}$ – втрата тиску у пневмоприймачі, Па;

$H_{\text{роз.}}$ - втрата тиску у розвантажувачі, Па;

$H_{\text{від.}}$ - втрата тиску у відводі, Па;

$H_{\text{рк.}}$ - втрата тиску на ділянці між розвантажувачем і колектором, Па.

Всі місцеві втрати розраховуються за формулою $\xi \frac{\rho v^2}{2g}$

де ξ – відповідний коефіцієнт опору ($\xi_{\text{роз.}}$, $\xi_{\text{пр.}}$, $\xi_{\text{від.}}$, $\xi_{\text{рк.}}$), приведений до діаметру матеріалопроводу.

Таким чином втрата тиску в пневмовітці з врахуванням виразів (1.36 – 1.42) будуть визначатись за виразом:

$$H_{\text{с}} = 0.0013 \frac{Lv^{1.75}}{D^{1.25}} + \frac{1.25Gv_{\text{с}}}{gF} + \frac{GL}{Fv_{\text{с}}} + 0.0037 \frac{LGv_{\text{с}}}{DFg} + (\xi_{\text{роз.}} + \xi_{\text{пр.}} + \xi_{\text{від.}} + \xi_{\text{рк.}}) \frac{\rho v^2}{2g}. \quad (1.43)$$

Швидкість руху матеріалу $v_{\text{м}}$ зв'язана з швидкістю повітря v експериментальною залежністю:

$$v_{\text{м}} = K_1 K_2 v, \quad (1.44)$$

$$\text{де} \quad K_1 = 0.18 \frac{G^{0.067}}{D^{0.317}}; \quad (1.45)$$

$$K_2 = \frac{L^{0.25}}{v_{\text{дм}}^{0.2}}. \quad (1.46)$$

1.3. Способи і технічні засоби регулювання швидкості повітря в пневмопродуктопроводах

Переміщення продуктів у матеріалопроводах проходить частіше всього при швидкостях повітряного потоку, на багато більше мінімально необхідних за умовами стійкого транспортування. Це основна причина підвищених витрат електроенергії при роботі пневмотранспортних установок.

В системах пневмотранспортування можна зменшити витрати енергії на 20-40 %, якщо використовувати матеріалопроводи оптимальних діаметрів і надати повітря в них відповідні оптимальні швидкості.

Так, як перехідні процеси в пневмотранспортних установках проходять протягом долі секунди, то ручне регулювання режимів транспортування практично неможливе і виникає необхідність в технічних засобах автоматизації [3].

На сьогодні відомий ряд систем автоматичного регулювання режимів пневмотранспортування в окремих трубах, які діляться на дві групи [4]: системи стабілізації швидкості повітря; системи стабілізації розрідження в окремій точці матеріалопроводу.

Всі ці системи шляхом дроселювання продукту або повітря і продукту стабілізують розрідження в продуктопроводах, зменшуючи при цьому витрати електроенергії, що витрачається пневмотранспортною установкою.

В регуляторі системи стабілізації швидкості повітря в пневмопродуктопроводі [5] швидкість повітря в пневмотрубі вимірюється спеціальною пневмотрубною, що не забивається. Недоліки цієї системи пов'язані із зношенням пневмометричної трубки та її забиванням продуктами транспортування, що приводить до безперервної зміни динамічних властивостей датчика і погіршення якості регулювання, зниження надійності роботи системи стабілізації швидкості повітря.

Автоматична система стабілізації розрідження в окремій точці матеріалопроводу заснована на принципі вимірювання зміни статичного напору в будь-якій точці продуктопроводу внаслідок зміни режиму пневмотранспортування продукту. Пропорційно зміні напору регулюють подачу повітря. На рис.1.8 показано такий регулятор в якому датчиком служить U – подібний манометр. В якості перетворювача зміни розрідження в електричний сигнал використовується індуктивна котушка. Електричний сигнал з котушки підсилюється і передається на виконавчий механізм – дросельну заслінку.

Регулятор простий, але при деяких значеннях витрати продукту він втрачає чутливість, а в окремих випадках формує невірну регулюючу дію.

Автоматична система регулювання швидкості повітря в пневмотрубах за витратами продукту [4] наведена на рис.1.9. Регулююча заслінка, яка повертається в ту чи іншу сторону в залежності від значення розрідження в продуктопроводі, що подає продукт для подрібнення на вальцьовий станок, розташована між станком і пневмоприймником в трубі самопливу.

Основним недоліком цієї системи є дроселююча дія продукту на регулюючу заслінку, що приводить до адекватної регулюючої дії системи при різних режимах роботи.

Автоматична система регулювання швидкості повітря пневмотранспортної мережі [4] наведена на рис.1.10. Мережа, яка складається із 15 пневмопродуктопроводів і має в кожному із них окремий контур автоматичної стабілізації швидкості повітря, контур регулювання.

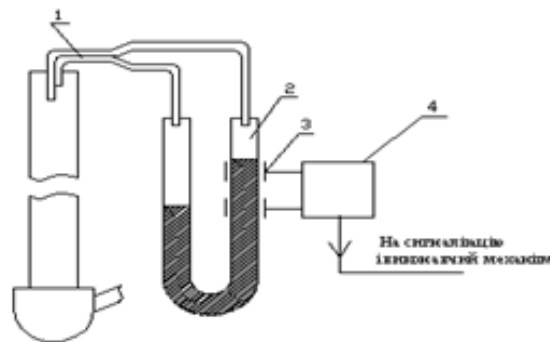


Рис.1.7. Схема регулятора швидкості повітря в пневмотрубі.

1 – пневмометрична трубка; 2 – U – подібний манометр; 3 – ємкісний датчик рівня; 4 – електронний блок.

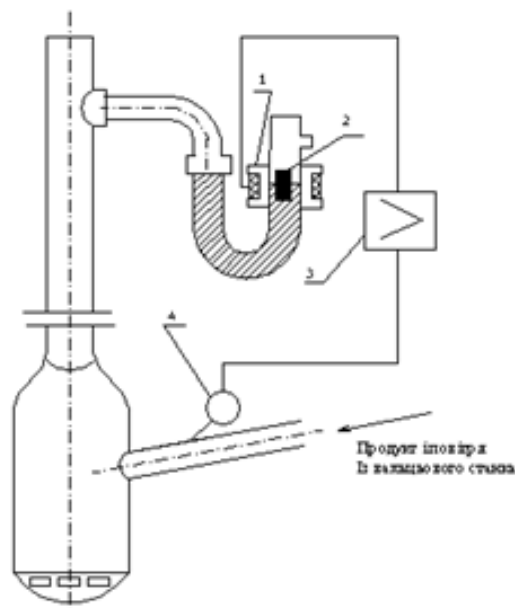


Рис. 1.8. Схема стабілізуючої системи регулювання розрідження в точці матеріалопроводу: 1 – індуктивна котушка; 2 – стальний сердечник; 3 – підсилювач; 4 – виконавчий механізм.

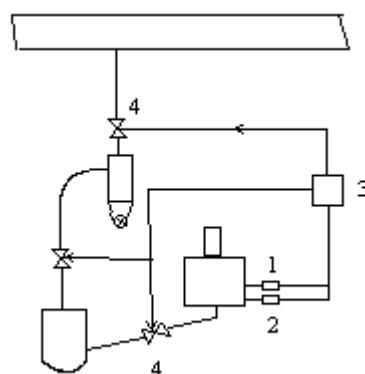


Рис. 1.9. Схема регулювання витрати повітря в пневмотрубах за витратою продукту: 1 – датчик наявності продукту; 2 – датчик витрати продукту; 3 – блок апаратури; 4 – регулюючий орган.

Системи регулювання встановлені в кожному продуктопроводі після розвантажувачів і складаються з вимірювально-регулюючого вузла (вимірювач на основі сопла Вентурі, регулюючий орган - поворотна заслінка в продуктопроводі), датчика – диференціального тягоміру ДТ-2-100 і регулятора.

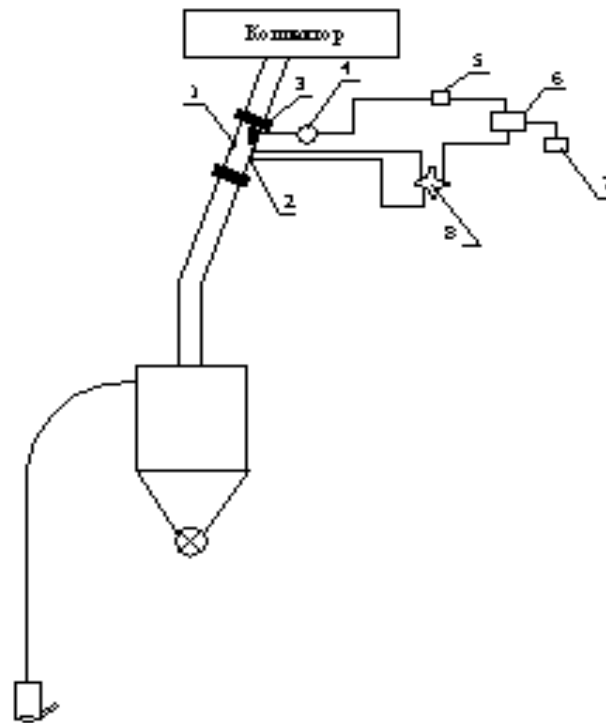


Рис. 1.10. Принципіальна схема САР: 1 – вимірювально – регулюючий орган; 2 – патрубок труби Вентури із штуцером відбору тиску; 3 - регулюючий орган; 4 – виконавчий механізм; 5 – магнітний пускач; 6 – регулятор; 7 – задаючий пристрій; 8 – диференціальний тягомір.

Системи стабілізують швидкість повітря в кожному продуктопроводі в залежності від його навантаження. Не дивлячись на високу якість стабілізації швидкості повітря, ці системи не знайшли широкого розповсюдження завдяки їх високій вартості.

На рис 1.11 приведений спосіб керування процесом завантаження магістрального трубопроводу пневмотранспортної системи всмоктуючого типу, де регулятор визначає витрату повітря в завантажувальних трубопроводах і змінює його для стабілізації витрати повітря в магістральному трубопроводі.

Спосіб покращує процес завантаження магістрального трубопроводу, але система застосовується тільки під час пуску пневмоустановки.

На рис 1.12 наведений спосіб керування аспіраційною установкою в залежності від величини тиску в колекторі із застосуванням датчика тиску і зміни частоти обертання робочого колеса вентилятора за допомогою варіатора. При зміні тиску в колекторі, сигнал із датчика поступає на регулятор, а від нього до

виконавчого механізму, який змінює передаточне відношення клинопасового варіатора швидкості і відповідно й частоту обертання вентилятора.

Цей спосіб дає економію енергії, але надійність і швидкодія системи низька.

Таким чином, огляд основних джерел, присвячених зниженню енергоємності пневмотранспортування продуктів розмолу зерна і аспірації обладнання показує, що основним напрямком зменшення енерговитрат у цих системах є зменшення швидкості руху повітря в продуктопроводах і зниження гідравлічних опорів його елементів. Відомі технічні рішення, направлені на вирішення цих питань, не знайшли широкого застосування на практиці у зв'язку із складністю і недосконалістю. Досягнення силової електроніки останніх років дозволили створити компактні і відносно недорогі перетворювачі частоти, застосування яких робить практично вирішеним питання регулювання швидкості обертання турбомеханізмів з асинхронним двигуном

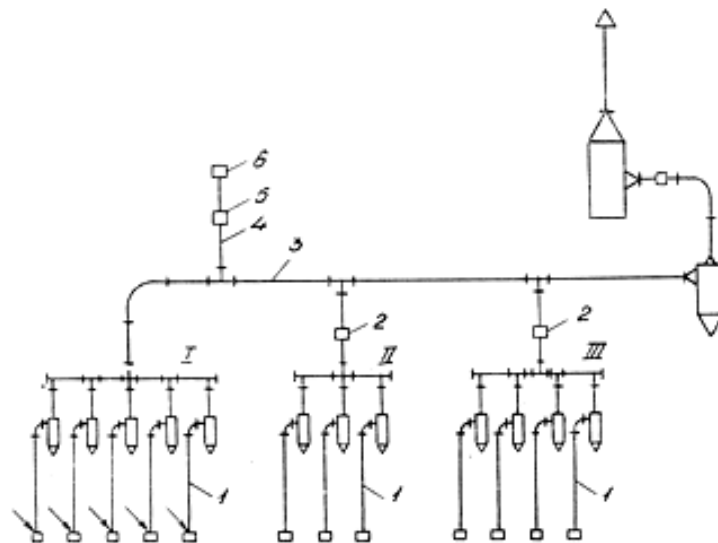


Рис. 1.11. Спосіб керування процесом завантаження магістрального трубопроводу пневмотранспортної системи

1 – стояки; 2 – засувки; 3 – магістральні трубопроводи; 4 – додатковий патрубок;
5 – регулятор витрати повітря; 6 – пристрій витрати повітря.

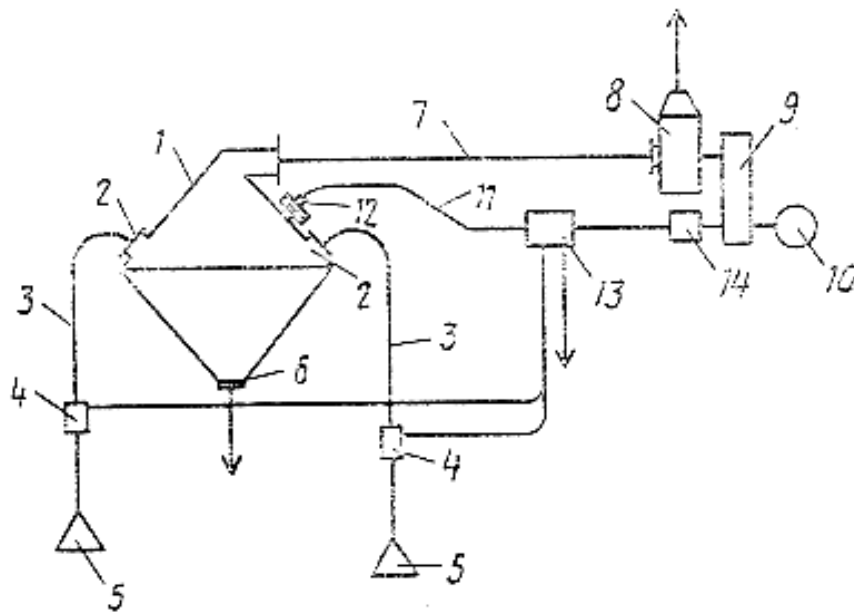


Рис. 1.12. Спосіб керування аспіраційною установкою в залежності від величини тиску в колекторі.

1 – колектор; 2 – патрубки; 3 – повітропроводи; 4 – автоматичні шибери; 5 – приймач; 6 – пиловипускний отвір; 7 – установка відбору повітря; 8 – вентилятор; 9 – клиноремінний варіатор швидкості; 10 – електродвигун; 11 – система автоматичного керування; 12 – датчик тиску; 13 – регулятор; 14 – виконавчий механізм

РОЗДІЛ 2

РЕЖИМИ РОБОТИ ПНЕВМОТРАНСПОРТНОЇ УСТАНОВКИ І ОБГРУНТУВАННЯ ЕНЕРГООЩАДНОГО СПОСОБУ ТРАНСПОРТУВАННЯ.

Для визначення потужності електродвигуна приводу повітродувної машини пневмотранспортної установки потрібно розрахувати такі технологічні параметри пневмомережі, як втрату тиску і витрату повітря на транспортування продукції млина. Щоб визначити ці параметри, потрібно провести дослідження кількісно-якісного балансу процесу розмолу зерна, який вказує на завантаження матеріалопроводів пневмоустановки.

Повітродувна машина в пневмоустановках борошномельних підприємств створює такі значення тиску і відповідно швидкості руху повітря в пневмомережі, які в більшості випадків набагато перевищують потрібні. Тому необхідно дослідити режими роботи пневмоустановки, обґрунтувати способи регулювання технологічних параметрів повітродувної машини з погляду технології виробництва борошна, надійності роботи обладнання і енергоощадних технологій.

2.1. Технологічна схема виробництва борошна і розрахунок кількісно-якісного балансу процесу розмолу зерна

Агрегатний вальцевий млин типу Р6 – АВМ – 15 призначений для переробки зерна в борошно вищого та першого ґатунку.

Принцип роботи млина полягає в послідовному очищенні і переробці зерна на машинах зерноочисного, розмольного, просіючого та вибійного відділень, зв'язаних між собою комунікаціями пневматичного і самоплинного транспорту.

Розмольне відділення складається з драного і розмольного процесів.

Драний процес. Зерно підготовлене до помолу, направляється у вальцевий станок I др. с. (драної системи). Драний процес включає три системи. На II др. с. надходить верхній схід перших чотирьох сит розсіву I др. с., а другий схід наступних чотирьох сит іде на III др. с. Третій схід з останніх чотирьох сит іде на I р. с. (розмольну систему). Продукти розмолу зерна (крупки, дунсти, борошно) послідовно проходять через необхідні робочі машини розмольного відділення після розсіву у відповідності до технологічної схеми. Для більш ефективного сортування продуктів рзмолу з урахуванням кількості і якості фракцій застосовують різні схеми розсіву.

Вимол сходових продуктів драного процесу розпочинається на III др. с.

Крім цього пневмоустановка подає зерно з приймального бункера на зерноочисне обладнання (пневматичний сепаратор, зерновий сепаратор, циліндричний трієр, жорстка обойка тощо).

Розмольний процес в технологічній схемі виробництва борошна являється завершальним етапом. Розмольний процес реалізовується трьома розмольними системами. Мета розмольного процесу заключається в подрібненні крупок і дунстів отриманих в драному процесі.

2.2. Дослідження статичних режимів процесу транспортування зерна і продуктів його розмолу

Аспіраційна і пневмотранспортна установки млина обслуговуються однією вентиляційною установкою, схема приведена на рисунку 1.3. Для переміщення зерна та продуктів його переробки, в процесі підготовки до помолу і підчас помолу використовують дві пневмотранспортні установки.

Пневмотранспортна установка зерноочисного відділення складається з трьох продуктопроводів з приймачами, трьох сепараторів, які виконують роль розвантажувачів.

Пневмотранспортна установка розмольного, просіючого і вибійного відділення складається з восьми продуктопроводів та восьми відцентрових розвантажувачів.

Очищення повітря одноступеневе за допомогою циклонів Ц – 400 . Для визначення втрат тиску необхідно визначити розрахункове навантаження на пневмотранспортери млина. Це розрахункове навантаження оцінюється за допомогою кількісно-якісного балансу з урахуванням коефіцієнта нерівномірності. Вхідні величини процесу розмолу зерна: якісні показники зерна (тип, район вирощування, скловидність, вологість, витрати).

Вихідні величини - вихід і якість борошна за сортами. Збурюючі фактори процесу обумовлені властивостями продукту, особливостями технологічного і транспортного обладнання, зміною мікроклімату у виробничому приміщенні, коливаннями напруги в електромережі тощо. Дія із сторони продукту пояснюється його природою як сипучого матеріалу, що проявляється в нерівномірному розподіленні продукту в подільниках в залежності від його вологості і фізико-механічних параметрів. Зміна гранулометричного складу окремих проміжних продуктів також приводить до коливань витрат продукту в прохідних і східних фракціях.

Внутрішні збурюючі дії зі сторони обладнання обумовлені зміною характеристик робочих органів машин: затупленням рифлів вальців, забиванням сит розсівів, ослаблення натягу привідних пасів машин та інші. Внутрішні дії, обумовлені зміною мікроклімату виробничих приміщень (змінюються температура і відносна вологість повітря), впливають на ступінь зсушення продукту, на характер його подрібнення і просіювання. Наприклад, збільшення відносної вологості від 50 до 65 % зменшує електричний потенціал на ситах від 12000 В до 0. Дії із сторони живильної електромережі пов'язані з коливаннями напруги і частоти електричного струму. Так, допустимі за діючими нормами коливання частоти струму в межах $\pm 0,4 \%$ і напругою на затискачах двигуна від + 5 до – 5 % викличуть зміну частоти обертання асинхронного двигуна в межах $\pm 3 \%$. При цьому ефективність просіювання змінюється на 20 %.

Враховуються ці збурюючі дії за допомогою коефіцієнта нерівномірності a , величина якого приймалась за [6].

Розрахункова швидкість повітря (м/с) в пневмопроводі визначається за формулою [6]:

$$v = K_3 (10,5 + 0,57 v_{\text{вит}}), \quad (2.1)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, який забезпечує транспортування при коливальних навантаженнях на пневмотранспортер $K_3=1,25$;

$v_{\text{вит}}$ – середня швидкість витання продуктів помолу, м/с, визначається із виразу (1.5).

Для стійкої і безперебійної роботи пневмотранспортера, розрахункову швидкість руху повітря в матеріалопроводі приймають більшою на величину K_3 .

Значення K_3 вибирають в залежності від продуктивності установки, діаметра матеріалопровода і аеродинамічних властивостей транспортуемого матеріалу.

Найбільш небезпечним місцем в мережі з точки зору виникнення завалу є відвод, який змінює напрям потоку з горизонталі на вертикаль. Відводи з вертикалі на горизонталь і відводи в горизонтальній площині рівнозначні по відношенні межі завалів [6]. Для відводів з радіусом менше $7D$, значення K_3 більше на $1,05 \div 1,10$ від значення K_3 при радіусі відводів більше $7D$.

Швидкість руху повітряного потоку в продуктопроводах – важливий показник роботи пневмотранспортної установки. Необхідно врахувати, що із збільшенням швидкості повітряного потоку збільшується потужність, що споживається (приблизно в третій степені від швидкості потоку), відбувається подрібнення продукту, що транспортується, збільшується зношення продуктопроводу, відокремлювачів, пневмосепараторів і зменшується ефективність роботи обладнання. Тому бажано, щоб швидкість повітряного потоку при транспортуванні продукту була по можливості меншою. Однак робота пневмотранспортних установок з гранично допустимо малою швидкістю повітря може привести до завалів продуктопроводів.

Розрахункову швидкість повітря в матеріалопроводі з точки зору виникнення завалів не приймають менше 16 м/с.

При розрахунку пневмотранспортерів для зерна розрахункову швидкість руху повітря приймають 22 м/с при концентрації аеросуміші $\mu < 4$ кг/кг і 25 м/с при концентрації аеросуміші $\mu \geq 4$ кг/кг.

Вагова концентрація аеросуміші визначається за формулою [6]:

$$\mu = \frac{G_{роз}}{\rho_{пр} Q}, \quad (2.2)$$

де $\rho_{пр}$ - щільність повітря, яке входить в приймальний пристрій, кг/м³,

приймається рівною 1,2 кг/м³;

Q- розрахункові витрати повітря в матеріалопроводі, м³/год

$$Q = 3600 F v, \quad (2.3)$$

F - площа перерізу матеріалопроводу за внутрішнім діаметром, м².

Розрахунок втрат тиску в матеріалопроводах. Втрати тиску $H_{мп}$ (Па) визначаються за формулою

$$H_{мп} = H_{маш} + H_{пр} + \sum H_z + \sum H_{від} + \sum H_{вер}, \quad (2.4)$$

де $\sum H_{від}$ – сума втрат тиску у відводах, включаючи втрати на розгін після відводу, Па; $\sum H_{вер}$ - сума втрат тиску у вертикальних відрізках матеріалопроводу, Па. $H_{маш}$ - втрати тиску в технологічному обладнанні. Втрати тиску в технологічному обладнанні приймають за [7]. $H_{пр}$ - втрата тиску в приймальному пристрої. Втрати тиску на горизонтальному відрізьку матеріалопроводу H_r (Па) розраховують на основі виразів (1.37 – 1.41) за формулою:

$$H_r = H_{r\bullet\mu} (1 + K_r \mu);$$

$$H_{r\bullet\mu} = 1,2 \cdot 10^{-2} L g^{1,75} D^{-1,25}, \quad (2.5)$$

де $H_{г.ч.}$ – втрати тиску від тертя при русі аеросуміші в прямолінійному відрізку матеріалопроводу чистого повітря; L і D - довжина і діаметри горизонтальних відрізків матеріалопроводу;

$$K_{г.ч.} = \frac{A_{г.ч.} D}{g^{1,25}};$$

$A_{г.ч.} = 135$ для грубих продуктів розмолу,

$A_{г.ч.} = 110$ для м'яких продуктів.

Втрати тиску у відводах $H_{від}$ (Па) на основі виразу (1.42) визначаємо за формулою:

$$H_{від} = H_{від.ч.} (1 + K_{від} \mu) + \beta K_p \frac{\rho g^2}{2} \mu ; \quad (2.6)$$

$$H_{від.ч.} = \Delta_{від} \xi_{від} \frac{\rho g^2}{2} , \quad (2.7)$$

де K_p , $K_{від}$, β , $\Delta_{від}$, $\xi_{від}$ - експериментальні коефіцієнти [6].

Втрати тиску на вертикальному відрізку матеріалопровода $H_{вер}$ (Па) визначаємо за формулою:

$$H_{вер} = H_{ч.} + H_{м.} = 1,2 \cdot 10^{-2} L g^{1,25} D^{-1,25} + G x \\ x (1,59 v_m D^{-2} + 12,5 L D^{-2} v_m^{-1} + 5,35 \cdot 10^{-3} L v_m D^{-3}), \quad (2.8)$$

де $H_{ч.}$ - втрати тиску при переміщенні чистого повітря, Па;

$H_{м.}$ – втрати тиску при переміщенні матеріалу, Па; G - розрахункові витрати матеріалу, кг/с; v_m - середня швидкість частинок матеріалу, м/с, визначається за виразом (1.43).

Втрати тиску в циклоні – розвантажувачі (кПа) відносяться до втрат $H_{мах}$ і визначаються за формулою:

$$H_{ц.р.} = Q^2 D_{ц.р.}^{-3} , \quad (2.9)$$

де Q – витрати повітря, м³/с, при густині, $\rho = 1,2$ кг/м³; $D_{ц.р.}$ - діаметр циклона розвантажувача, м.

Оскільки один вентилятор обслуговує пневмотранспортну установку і аспіраційну систему, то для визначення потужності вентилятора і відповідно приводного двигуна, потрібно розрахувати вентиляційну мережу.

Витрати повітря і величини аеродинамічного опору обладнання приймалися за даними [6].

Найбільш розповсюдженим методом розрахунку аспіраційних мереж є метод повних тисків [6]. В основу методу повних тисків покладений принцип сумування всіх втрат тиску, що виникають при переміщенні повітря по магістральному напрямку, враховуючи втрати, які виникають при надходженні і виводі повітря з будівлі.

Розрахунковий тиск вентилятора за методом повних тисків визначається за формулою:

$$H_p = H_a + \sum_{i=1}^{i=n} \left(l_i \frac{\lambda_i}{D_i} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho g^2}{2} + H_{ns} + H_y + H_{\text{вуд}} \quad , \quad (2.10)$$

де H_a – розрідження в укрітті (опір машини), Па;

$\sum_{i=1}^{i=n} \left(l_i \frac{\lambda_i}{D_i} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho g^2}{2} = H$ - сума втрат тиску на переміщення повітря по

магістральному напрямку, Па;

H_{ns} – втрати тиску в пиловідокремлювачі, Па;

H_y – втрати тиску на виході повітря в атмосферу, Па;

$H_{\text{вуд}}$ – опір входу повітря в будівлю, Па.

За цим методом втрати тиску на тертя і на місцеві опори, як слідує з виразу, визначаються в долях динамічного (швидкісного) опору. У виразі

$$H = \sum_{i=1}^{i=n} \left(l_i \frac{\lambda_i}{D_i} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho g^2}{2} ,$$

де λ - безрозмірний коефіцієнт опору;

$\sum \xi$ - сума коефіцієнтів місцевих опорів;

n – число відрізків повітропроводів по магістральному напрямку, включно з повітропроводами до і після вентилятора.

Втрати тиску на виході повітря в атмосферу розраховуються за формулою:

$$H_y = \xi_y \frac{\rho g^2}{2} ,$$

де ξ_y - коефіцієнт опору на неочікуване розширення, звично $\xi = 1$.

Розміри вихлопного патрубку вибирають так, щоб швидкість повітря була не більше 6 м/с.

Опір входу повітря в будівлю $H_{\text{буд}}$ не повинен перевищувати 30-50 Па, ця величина приймається для розрахунку тиску в аспіраційній мережі.

Витрати повітря, що переміщується вентилятором, включає витрати повітря Q_a , аспіровані від обладнання, і присоси через нещільності в мережі і в пиловідокремлювачах.

Витрати повітря ($\text{м}^3/\text{с}$) визначаються за формулою:

$$Q = 1,05 \sum Q_a + \Delta Q_{\text{пв}}, \quad (2.11)$$

де 1,05 – коефіцієнт, що враховує присоси в мережі;

$\sum Q_a$ - сума витрат повітря, аспірованого від укриттів, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta Q_{\text{пв}}$ - присоси повітря в пиловідокремлювачі, $\text{м}^3/\text{м}$.

Розрахунок відгалужень аспіраційної мережі при відомих їх перерізах полягає у визначенні втрат тиску. Втрати тиску в магістральному повітропроводі і відгалуженнях повинні бути рівними. Вирівнювання опорів відгалужень з магістраллю проводяться або послідовним підбором швидкості повітря і діаметру повітропроводу, або установкою дросельних пристроїв (діафрагм). Відгалуження з магістраллю з'єднуються за допомогою трійника. Трійники, що застосовуються, виготовляються з умов

$$F_0 = F_{\text{п}} + F_6, \quad (2.12)$$

де F_0 – площа поперечного перерізу збірного (загального) повітропроводу, м^2 ;

$F_{\text{п}}$ – площа поперечного перерізу по проході (магістральних напрямків), м^2 ;

F_6 – площа поперечного перерізу відгалуження, м^2 .

Враховуючи, що витрати повітря в загальному перерізі трійника рівні сумі витрат по проході і відгалуженні, можна записати у вигляді:

$$\vartheta_o D_o^2 = \vartheta_n D_n^2 + \vartheta_6 D_6^2,$$

звідки

$$\vartheta_o = \vartheta_n \cdot \frac{1 + C_n}{1 + n} = m \vartheta_n, \quad (2.13)$$

$$\text{де} \quad C_n = \frac{\vartheta_6}{\vartheta_n} \quad \text{і} \quad n = \frac{D_6^2}{D_n^2}.$$

Цей вираз свідчить, що швидкість повітря в кожному наступному відрізку магістралі повинна бути більшою, ніж в попередньому відрізку, так як при правильному виборі магістрального напрямку $C > 1$.

При постійних витратах повітря, що відсмоктується від машини, підключеної до відгалуження, швидкість повітря можна змінити тільки зменшенням або збільшенням діаметру відгалуження. Його потрібно підбирати так, щоб втрати тиску до кінця відгалуження були рівними втратам тиску по магістральному напрямку, до якого під'єднане відгалуження. Однак вирівнювання опорів магістралі і відгалуження в результаті зменшення діаметру відгалуження не завжди можливе. У цьому випадку втрати тиску вирівнюються за допомогою діафрагми. Цей метод особливо доцільний у зв'язку з використанням стандартних діаметрів повітропроводів і неточністю їх промислового виготовлення.

Визначаємо розрахунковий вакуум, який необхідний для пневматичного транспортування:

$$H_{\text{роз.}} = H_{\text{пт.}} + H_{\text{кол.}} + H_{\text{в.}} + H_{\text{нев.в.}}, \quad (2.14)$$

де : $H_{\text{пт.}}$ – опір пневмотранспортера (найбільшого) , Па;

$H_{\text{кол.}}$ – опір колектора , $H_{\text{кол.}} = 50$ Па (приймається за даними [6]);

$H_{\text{в.}}$ – опір вентиляційної мережі, Па;

$H_{\text{нев.в.}}$ – невраховані опори в установці , $H_{\text{нев.в.}} = 25$ Па (приймається за даними [6]) ;

$$H_{\text{роз.}} = 3647 + 50 + 723 + 25 = 4445 \text{ Па}$$

Визначаємо необхідну потужність для приводу вентилятора за виразом:

$$P_s = \frac{H_{роз} \cdot Q_{роз}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_s \cdot \eta_n \cdot \eta_{mid}} = \frac{4445 \cdot 3588}{3600 \cdot 1000 \cdot 0,65 \cdot 0,95 \cdot 0,98} = 7,1 \text{ кВт} \quad , \quad (2.15)$$

де: $Q_{роз}$ – кількість повітря, що поступає у вентилятор, м³/год.

η_s - коефіцієнт корисної дії вентилятора;

η_n - коефіцієнт корисної дії передачі;

η_{mid} - коефіцієнт, який враховує втрату енергії в підшипниках.

Оскільки завантаження пневмомережі може змінюватись стохастично в межах (від 80% до 120%) [7], то для нормальної роботи матеріалопроводів потрібно забезпечити в системі відповідні значення тиску і витрат повітря.

2.3. Обґрунтування способів зменшення енергоємності пневмотransпортних установок борошномельних підприємств

2.3.1. Зменшення витрат електричної енергії на пневмотранспортування шляхом зниження швидкості руху пневмосуміші

Швидкість руху продуктів розмолу є визначальною при оцінці втрат тиску в продуктопроводах. Чим більше швидкість продуктів помолу, тим більші втрати тиску, тим більшу потужність потрібно розвинути електродвигуну вентилятора, щоб компенсувати ці втрати.

Однак на практиці розрахункова швидкість повітря в матеріалопроводі приймається в 1,5...1,7 разів більшою, ніж критичне значення. Такий запас за швидкістю технологічно виправданий в нерегульованій пневмотранспортній установці, коли при зміні продуктивності розмольного відділення млина або при виникненні зовнішніх чи внутрішніх збурень збільшується навантаження як окремих продуктопроводів, так і пневмотранспортної установки в цілому. При цьому зростають втрати тиску, різко зменшується швидкість транспортування, щоб уникнути завалів необхідний запас за швидкістю, що зумовлює вибір вентиляційних установок із значним запасом за напором і відповідно за потужністю. І якщо в цьому випадку при перевантаженні пневмоустановки питомі витрати енергії на транспортування продуктів помолу навіть

зменшуються, то при номінальному або меншому від номінального навантаження ці витрати значно зростають.

На рис. 2.1 приведені аеродинамічна характеристика вентиляційної установки ЦП - 30 і пневмотранспортної установки за результатами досліджень підрозділу 2.2. Точка Г відповідає необхідній розрахунковій швидкості пневмосуміші в матеріалопроводах, необхідній за технологічними рекомендаціями [6] 25 м/с, точка Б – зменшеній на 2 м/с швидкості в порівнянні з рекомендованою, а точка Е – зменшеній на 4 м/с. Точка В відповідає швидкості, яка більша розрахункової на 4 м/с. Точка А відповідає режиму пневмотранспортної установки при нерегульованому розрідженні в колекторі. Відповідно цим режимам на рисунку 2.2 приведені розрахункові дані необхідної потужності на валу електродвигуна і споживаної з мережі. Розрахунки потужності (кВт) на валу двигуна проводились за формулою (2.15), а величина споживаної потужності з мережі досліджувалась при ККД електродвигуна рівному 0,9 при номінальному і більших навантаженнях і рівному 0,8 при навантаженнях менших за номінальне [2].

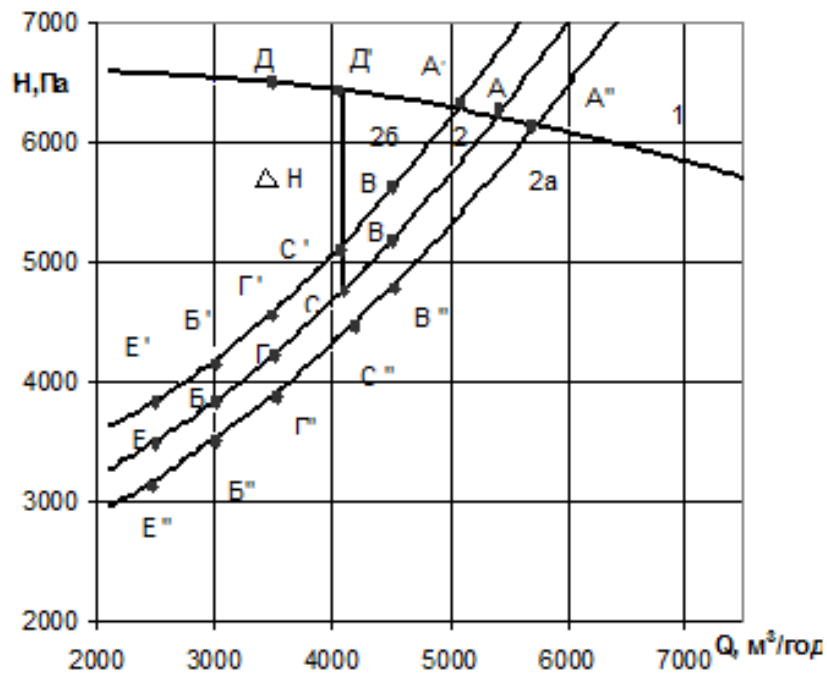


Рис. 2.1. Аеродинамічні характеристики вентиляційної установки (1) і пневмомережі (2) при регулюванні продуктивності вентилятора шляхом дроселювання повітряного потоку в колекторі.

Крива 2 відповідає номінальному навантаженню, 2а – 0,80 номінального, а 2б – 1,20 номінального навантаження (рис. 2.5).

При цьому графіки ілюструють найбільш раціональні режими роботи пневмотранспортної установки. Під цією назвою будемо розуміти режими, при яких кількість електроенергії, що споживається пневмотранспортною установкою з урахуванням ККД електродвигуна, точно відповідає потрібній потужності на його валу для приводу відцентрового вентилятора при різних заданих швидкостях руху суміші в продуктопроводах (точки Г, Б, Е). Ці значення потужності розраховуються за формулою (2.15) при величинах Q і H , які взяті для відповідних точок. Вентилятор не може мати меншої потужності для виконання роботи по транспортуванні зерна і продуктів розмолу в конкретній точці, тому ці дані приймаються як базові (оптимальні) і з ними в подальшому будуть порівнюватися різні методи зменшення енергоємності пневмотранспортної установки.

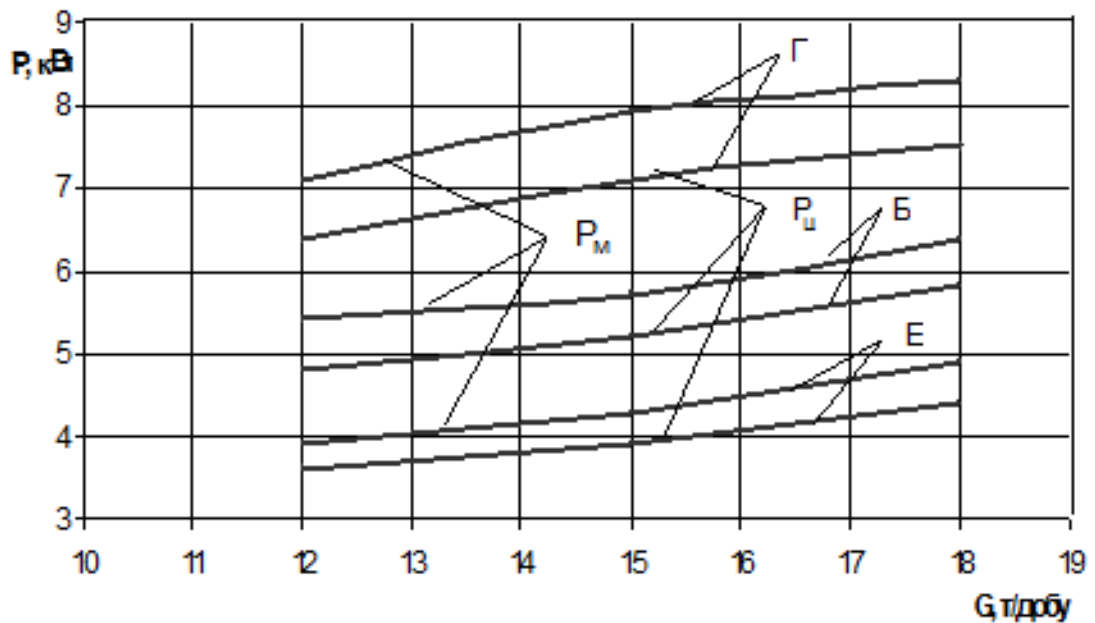


Рис. 2.2. Залежність споживаної потужності від завантаження пневмотранспортної установки при заданих швидкостях руху пневмосуміші.
 P_m - потужність споживана двигуном, $P_{\text{ц}}$ - потужність вентиляційної установки.

При повному нерегульованому процесі пневмотранспортування у зв'язку з високим запасом за потужністю вентиляційної установки ми виходимо на режим аеродинамічної установки в точку А – при номінальному завантаженні помольного відділення, в точку А' – при перевантаженні на 20 % і в точку А'' – при недовантаженні на 20 %.

Оцінка зміни питомих витрат енергії проводилась за виразом:

$$K = \frac{P G_n}{P_n G}, \quad (2.16)$$

де G_n і P_n – відповідно, паспортна (номінальна) продуктивність млина (у нашому випадку 15 т/добу) і споживана при цьому електродвигуном вентилятора з мережі потужність;

G і P – реальна продуктивність млина і споживана з мережі вентиляційними установками потужність.

Таким чином, при тих запасах за напором і продуктивністю вентиляційної установки, які мають місце в пневмотранспортній установці на млині, з точки зору енергетичної ефективності при нерегульованих режимах розрідження, краще працювати з перевантаженням, якщо при цьому є задовільною якість переробки продукції. При цьому завали в пневмотранспортерах виключені, так як при перевантаженні на 20 % (робота в точці А') швидкість руху аеросуміші на 6 м/с вища, ніж розрахункова. Нерегульовані режими розрідження пневмотранспортної установки (точка А) в енергетичному відношенні неефективні, оскільки витрати енергії на транспортування продукції на 106-162 % вищі, в порівнянні з розрахунковим оптимальним режимом (точка Г).

Для зменшення витрат електроенергії на пневмотранспортування продуктів розмолу зерна переходять на регульований режим розрідження в залежності від навантаження продуктопроводів. Розглянемо цей процес. При цьому будемо розрізняти два режими пневмотранспортної установки: статичний і динамічний. Статичний режим роботи пневмотранспортної установки – це такий режим, при якому навантаження окремих пневмопродуктопроводів відповідає процентному співвідношенню Зміна навантаження при цьому в цілому розмольного відділення змінює навантаження окремих продуктопроводів але процентне співвідношення їх навантаження між собою не змінюється.

Динамічний режим пневмотранспортної установки виникає внаслідок дії внутрішніх або зовнішніх флуктуацій параметрів, збурень і приводить до зміни навантаження окремих продуктопроводів, залишаючи навантаження інших приблизно на попередньому рівні.

Розглянемо енергетичну ефективність різних способів регулювання швидкості руху повітря і матеріалів по трубах пневмотранспортера в згаданих вище режимах.

2.3.2.Способи зменшення енергоємності.

2.3.2.1. Регулювання швидкості повітря в колекторі шляхом дроселювання. Швидкість повітря можна регулювати при відомому напорі вентилятора шляхом створення додаткового опору, зменшуючи таким чином розрідження після цього опору і відповідно швидкість повітря. Такими додатковими опорами змінної величини служать різної конструкції заслінки, які називаються дроселями, а спосіб регулювання швидкості – дроселюванням. У вентиляційних установках типу ЦП - 30 дросельна заслінка відхиляється завдяки пружині, а величина відхилення регулюється типовим диференціальним тягоміром .

За розрахунками у відповідності до рекомендованого значення швидкості в повітропроводах пневмоустановки і номінальному навантаженні розмольного відділення оптимальний режим пневмоустановки (мінімум витрат електроенергії) знаходиться в точці Г. Надлишок тиску дорівнює ГД'. Дросель знижує величину тиску на ΔH і робота пневмоустановки переміщується в точку С. Коефіцієнт дроселювання при цьому дорівнює

$$K_d = \frac{H_{\partial'} - H_c}{H_{\partial} - H_c} . \quad (2.17)$$

Для даної конкретної установки у відповідності до кількісних даних $K_d = 0,84$. Змінивши уставку диференціального тягоміра можна працювати в режимах точки Б і Е з деяким перевищенням тиску. При перевантаженнях і недовантаженнях на 20 % згідно кількісного значення коефіцієнта дроселювання установка буде працювати, відповідно в точках С' і С''.

Проаналізуємо енергоємність транспортування продуктів помолу в цих точках (режимах).

Величини потужностей, які споживаються електродвигуном з мережі з урахуванням ККД і навантаження двигуна визначалися за виразом (2.15) і ілюструють графіки які приведені на рисунку 2.3.

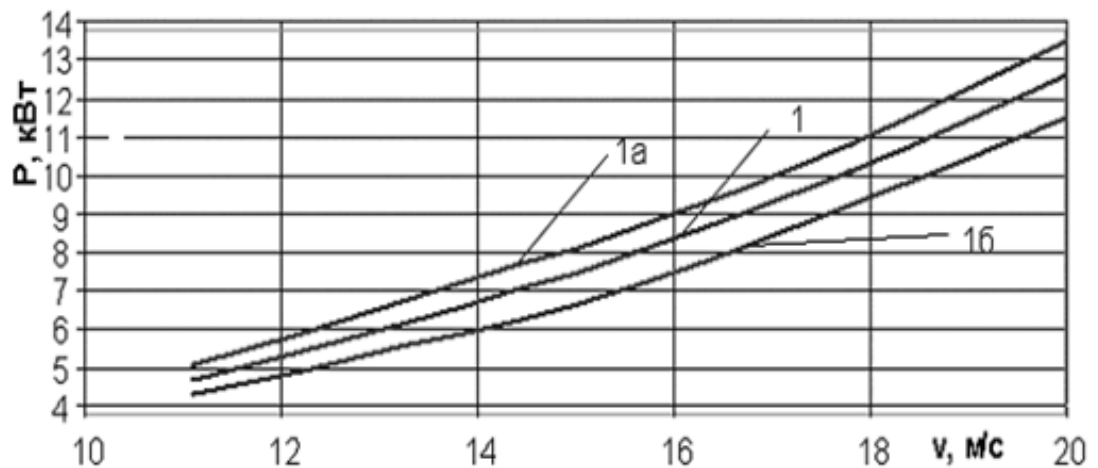


Рис. 2.3. Залежність споживаної потужності пневмоустановкою від швидкості руху пневмосуміші при дроселюванні і завантаженні: 1 - 100%; 1a - 120%; 16 - 80%

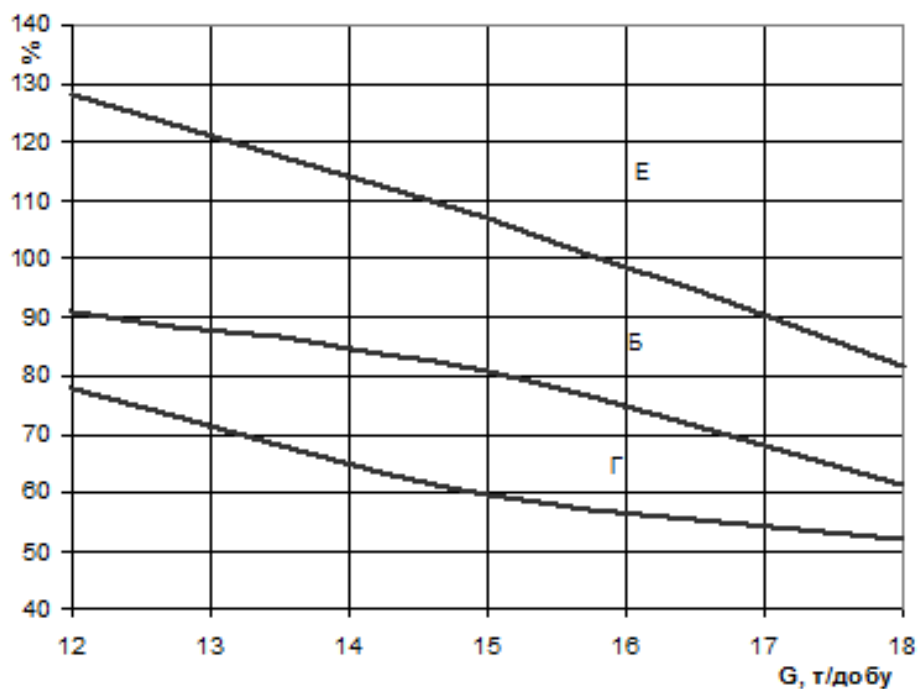


Рис. 2.4. Зміна енергоємності (%) транспортування продуктів помолу по відношенні до раціонального режиму роботи пневмотранспортної установки при навантаженнях

Аналіз даних цієї позиції показує, що регулювання дросельною заслінкою (точка С) в порівнянні з нерегульованим розрідженням (точка А) дозволяє: при номінальному навантаженні знизити електроємність продукції на 17 %. Однак

при дроселюванні, як видно з графіків рисунок 2.4, питомі витрати електроенергії в порівнянні з оптимальним режимом на 51,8-128 відсотків більші.

2.3.2.2. Регулювання швидкості повітря в колекторі шляхом регулювання частоти обертання вентилятора. Для регулювання частоти обертання асинхронного електродвигуна сьогодні випускається широкий спектр частотних перетворювачів напруги, за допомогою яких швидкість електродвигунів можна регулювати від нуля до номінальної величини.

Якщо величини x і y зв'язані функціональною залежністю $y = f(x)$ і потрібно визначити її вигляд за даними експерименту, то використовують метод найменших квадратів. При цьому найкраще рівняння регресії дає та функція із класу який розглядається, для якого сума квадратів відхилень

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2 = \min. \quad (2.18)$$

Задача загального вигляду вирішується наступним чином. Запишемо y як функцію не тільки аргументу x , але і деяких невідомих параметрів b_i ($i = 0, 1, 2, \dots$), тобто $y = f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)$. Потрібно вибрати коефіцієнти b_i ($i = 0, 1, 2, \dots$) так, щоб виконувалось наступне:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)]^2 = \min. \quad (2.19)$$

Необхідною умовою мінімуму функції $\Phi(b_0, b_1, b_2, \dots)$ являється виконання рівностей:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial b_0} = \frac{\partial \Phi}{\partial b_1} = \frac{\partial \Phi}{\partial b_2} = \dots = 0, \quad (2.20)$$

або

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_0} &= 0 \\ \sum_{i=1}^n 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_1} &= 0 \\ \sum_{i=1}^n 2[y_i - f(x_i, b_0, b_1, b_2, \dots)] \frac{\partial f(x_i)}{\partial b_2} &= 0\end{aligned}\tag{2.21}$$

Система рівнянь (2.21) має стільки рівнянь скільки невідомих коефіцієнтів $b_0, b_1, b_2, \dots$. Розв'язати систему (2.21), яка називається системою нормальних рівнянь, в загальному вигляді не можна, для цього потрібно задати конкретний вигляд функції y . Величина $\Phi \geq 0$ при любых $b_0, b_1, b_2, \dots$, існує хоча б один мінімум. Тому, якщо система нормальних рівнянь має єдиний розв'язок, то він і є мінімумом для величини Φ . На практиці найбільш часто зустрічається три випадки: коли функція f лінійна, коли вона виражається поліномом другої степені (параболою) і у вигляді множинної регресії [7].

Характеристика вентилятора визначається наступним аналітичним виразом:

$$H_{\text{в}} = -a_{\text{в}} Q^2 + b_{\text{в}} n_{\text{в}} Q + c_{\text{в}} n_{\text{в}}^2, \tag{2.22}$$

де: $a_{\text{в}}, b_{\text{в}}, c_{\text{в}}$ – постійні коефіцієнти, які залежать від конструкції вентилятора;

$n_{\text{в}}$ – частота обертання робочого колеса вентилятора об/хв;

$H_{\text{в}}$ – напір вентилятора Па;

Q – розхід повітря, м³/с.

Вентиляційна установка створює завишені значення тиску і витрати повітря і відповідно споживає більше електроенергії, ніж потрібно для виконання технологічного процесу. Тому з міркувань енергозаощадження заміняємо вентилятор типу ЦП – 30 на вентилятор високого тиску типу ВД №4 з приводним електродвигуном потужністю 7.5 кВт, попередній вентилятор приводив в рух електродвигун потужністю 11 кВт.

Оскільки при частотному регулюванні можна добитися ККД електродвигуна рівним 0.9, то таке регулювання відповідає найбільш раціональним режимам роботи вентиляційної установки .

РОЗДІЛ 3

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПНЕВМОТРАНСПОРТНИХ УСТАНОВОК.

На сьогоднішній день, як показано в розділі 1, датчики тиску в системах автоматичного керування вентиляційною установкою в пневмотранспортних мережах є ненадійними і не достатньо точними в роботі. Тому в даній роботі розглядається система автоматичного керування вентилятором пневмоустановки млина без зовнішніх датчиків технологічних параметрів. Про величини технологічних параметрів пневмомережі отримуємо із значення електричних величин електродвигуна, які визначаються за його моделлю та напірної характеристики вентиляційної установки. Частотний перетворювач подає електричну енергію на електродвигун таких параметрів, які б забезпечили роботу електродвигуна приводу вентилятора у відповідності до вимог роботи пневмомережі в раціональному режимі.

Для регулювання частоти обертання робочого колеса вентиляційної установки можна використовувати закони першого рівня, при яких підтримується постійними відношення величини і частоти напруги від якої живиться електродвигун. Але ці закони можна використовувати тоді коли відомо наперед, яка частота обертання вентилятора потрібна в певні моменти часу. Навантаження пневмомережі змінюється стохастично і значення його визначається електромагнітним моментом електродвигуна, тому в системі регулювання частоти обертання вентилятора потрібно використовувати закони другого рівня. До них відносяться закони при яких забезпечуються постійні значення різних магнітних потокозчеплень асинхронного двигуна: статора ψ_1 , повітряного зазору ψ_0 , ротора ψ_2 . Для регулювання частоти обертання вентиляційної установки будемо використовувати останній закон, тому, що він дозволяє безпосереднє керування моментом електродвигуна і при цьому якість керування суттєво підвищується в порівнянні з іншими законами [8].

3.1. Обґрунтування способу регулювання продуктивності пневмосистеми

Вимоги до електроприводу пневмотранспортерів борошномельних підприємств носять різнобічний характер. Це пов'язано з важкими умовами експлуатації, невисокою точністю підтримки параметрів на виході агрегату, низькою кваліфікацією обслуговуючого персоналу. В таких умовах проблемною є надійна експлуатація давачів технологічних процесів в пневмережах — продуктивності та тиску. Тому виникає необхідність у побудові систем регулювання без давачів технологічних параметрів, але з використанням технічних рішень, адекватних за своїми функціональними можливостями і сумісних з частотнорегульованим електроприводом.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що в способі керування технологічними параметрами вентилятора для реалізації алгоритму, сигнали надходять безпосередньо з перетворювача частоти з векторним керуванням, принцип роботи якого передбачає отримання електромеханічних параметрів електроприводу (електромагнітний момент та швидкість електродвигуна), з допомогою яких здійснюється обчислення за заданим алгоритмом за абсолютними значеннями.

Функціональна схема системи регулювання такого способу зображена на рис. 3.1

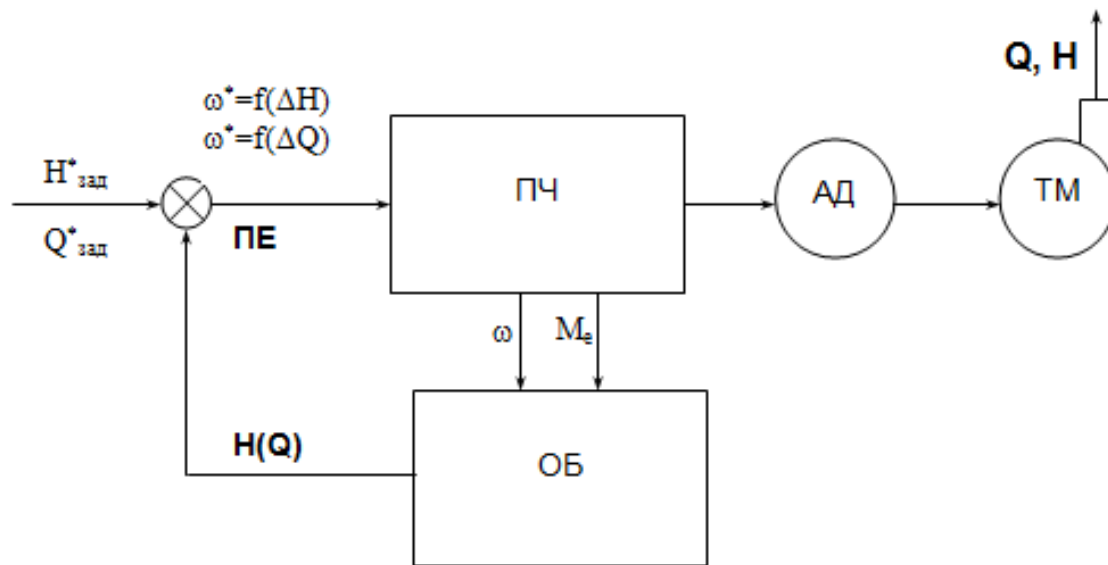


Рис 3.1. Функціональна схема системи регулювання режимів роботи пневмомережі без давачів технологічних параметрів.

Спосіб керування технологічними параметрами вентиляторів пневмотранспортерів з регульованим електроприводом реалізовується наступним чином. При зміні режимів роботи вентилятора згідно з вимогами технологічного процесу змінюються електроенергетичні параметри асинхронного електродвигуна (АД), які, в свою чергу, контролюються частотним перетворювачем з векторним керуванням і за їхніми значеннями обчислюються величини електромагнітного моменту M_e і кутової швидкості ω , які поступають в обчислювальний блок (ОБ), де реалізований алгоритм на основі виразу:

$$(M_e - M_m) \cdot \omega = \frac{H \cdot Q}{\eta_n \cdot \eta_m \cdot 3600 \cdot 102}, \quad (3.1)$$

де H – напір вентилятора, Па;

Q – витрата повітря, м³/год.;

η_m – коефіцієнт корисної дії вентилятора;

η_n – коефіцієнт корисної дії передачі;

M_e – електромагнітний момент АД, Нм;

M_m – механічні втрати моменту АД, Нм;

ω - кутова швидкість вентилятора, c^{-1} ;

За рівнянням (3.1) обчислюються реальні значення $H(Q)$, що порівнюються в елементі (ПЕ) із заданим значенням $H_{\text{зад}}^* (Q_{\text{зад}}^*)$, сигнал похибки $\Delta H(\Delta Q)$ подається на вхід частотного перетворювача і є функцією задання швидкості обертання.

Для реалізації алгоритму (3.1) визначаються параметри H і η_m , що отримуються експериментальним способом або із довідкової літератури і апроксимуються наступними виразами:

$$H = -A \cdot Q^2 + B \cdot Q \cdot \omega + C \cdot \omega^2; \quad (3.2)$$

$$\eta_m = -D \cdot \omega^2 + E \cdot \omega + F \cdot Q^2 + G \cdot Q + L, \quad (3.3)$$

де A, B, C, D, E, F, G, L – коефіцієнти апроксимації, які визначаються для конкретного вентилятора.

Коефіцієнти виразу (3.3) визначаються методом найменших квадратів із системи рівнянь:

$$\begin{cases} D \sum \omega^4 + E \sum \omega^3 + F \sum Q^2 \omega^2 + G \sum Q \omega^2 + L \sum \omega^2 = \sum \eta_m \omega^2 \\ D \sum \omega^3 + E \sum \omega^2 + F \sum Q^2 \omega + G \sum Q \omega + L \sum \omega = \sum \eta_m \omega \\ D \sum \omega^2 Q^2 + E \sum Q^2 \omega + F \sum Q^4 + G \sum Q^3 + L \sum Q^2 = \sum \eta_m Q^2 \\ D \sum \omega^2 Q + E \sum Q \omega + F \sum Q^3 + G \sum Q^2 + L \sum Q = \sum \eta_m Q \\ D \sum \omega^2 + E \sum \omega + F \sum Q^2 + G \sum Q + L n = \sum \eta_m \end{cases} \quad (3.4)$$

Для вентилятора типу ВД №4 вираз (3.3) на основі системи рівнянь (3.4) прийме вигляд:

$$\eta(Q, \omega) = -8.325 \cdot 10^{-8} \cdot \omega^2 - 4.414 \cdot 10^{-4} \cdot \omega - 0.527 \cdot Q^2 + 0.815 \cdot Q + 0.427 \quad (3.5)$$

Реалізація даного способу можлива шляхом застосування регульованого електроприводу, коли з системи регулювання виводиться момент двигуна M і його кутова швидкість ω . Тоді отримуємо :

$$P = \omega \cdot M. \quad (3.6)$$

Рішення рівнянь (3.1),(3.2),(3.5) і (3.6) при відомих M , ω дозволяє визначити тиск в системі.

Для приводу вентиляційної установки доцільно застосовувати асинхронний електродвигун з частотним керуванням. Вдосконалення такого приводу можливе при використанні законів другого рівня до яких відносяться закони, при яких забезпечується постійне значення різних магнітних потокозчеплень асинхронного двигуна: статора ψ_1 (відповідає постійному значенню відношення $E_{\text{зовн.}}/f$), повітряного зазору ψ_0 (E/f), ротора ψ_2 ($E_{\text{внутр.1.}}/f$). Останній закон дозволяє безпосереднє керування моментом електродвигуна і при цьому якість керування електроприводом в статичних і динамічних режимах суттєво підвищується в порівнянні з іншими законами.

Для визначення основних співвідношень асинхронного електродвигуна при різних законах частотного регулювання використовуємо Т – подібну схему заміщення електродвигуна із змінними параметрами при частотному регулюванні.

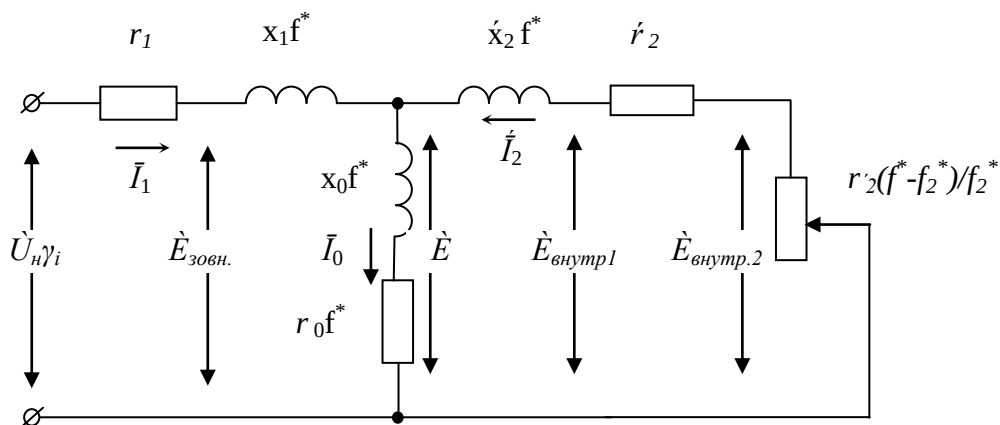


Рис. 3.2. Схема заміщення асинхронного короткозамкнутого електродвигуна із змінними параметрами при частотному керуванні.

В приведеній схемі заміщення (рис. 3.2) всі опори за виключенням активних опорів обмоток статора r_1 і ротора r_2' змінюються пропорційно коефіцієнту $f^* = f_1/f_{1н.}$,

де f_1 – поточне значення частоти;

$f_{1н.}$ – номінальне значення частоти перетворювача.

Прикладена напруга змінюється пропорційно коефіцієнту $\gamma = U_1/U_{1н.}$,

де U_1 – поточне значення напруги, В;

$U_{1н.}$ – номінальне значення напруги перетворювача, В.

Навантаження на валу електродвигуна еквівалентне приведену опорі, який залежить від коефіцієнта f^* і коефіцієнта абсолютного ковзання

$$f_2^* = f_2 / f_{1н.} = f^* \cdot s,$$

де f_2 – частота ротора;

s – ковзання двигуна.

При використанні першого закону другого рівня, при якому забезпечується постійне значення потокозчеплення ψ_1 , тобто підтримування постійним значення $E_{зобн.}/f$ при компенсації падіння напруги на активному опорі статора.

Так як $f_2^* = f^* s$, то вимірюючи швидкість електродвигуна при заданій частоті напруги живлення f^* , визначають f_2^* і коефіцієнт збільшення напруги, яка прикладається до затискачів електродвигуна.

Реалізація закону $\psi_1 = const$ при частотному регулюванні наведена на рис. 3.3. Система керування виконана у нерухомих координатах a і b .

З виходу задавача частоти у функції заданого кута θ , який отримується інтегруванням сигналу частоти f_1 , формуються дві зсунуті на 90° синусоїдальні складові завдання потокозчеплення статора $\psi_{1aзад}$ і $\psi_{1bзад}$. При порівнянні заданого і фактичного значення потокозчеплення за кожною складовою виробляється керуючий сигнал, який перетворюється регулятором потокозчеплення у відповідний сигнал завдання струму статора. Після перетворення отриманого сигналу у трифазну систему координат відпрацьовується релейним регулятором струму, який виконаний на основі транзисторного автоматичного інвертора напруги з давачами струму у фазах двигуна.

Двофазно-трифазні (2/3) координатні перетворення виконуються за відомими формулами [8].

$$i_{1Aзад} = i_{1aзад}; \quad i_{1Bзад} = \frac{i_{1aзад}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1bзад}; \quad i_{1Cзад} = \frac{i_{1aзад}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1bзад}, \quad (3.7)$$

де A,B,C – індекси змінних позначають належність її до трифазної системи, індекси a і b – до двофазної нерухомої системи координат, індекси 1,2 – належність змінної відповідно до статора і ротора.

В обертаючій dq системі координат

$$\begin{aligned} i_d &= i_a \cos \theta + i_b \sin \theta; \\ i_q &= -i_a \sin \theta + i_b \cos \theta, \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\text{де } \Theta = \int_0^t f_1 dt.$$

Для формування сигналів зворотних зв'язків (струмів, напруг) використовується перетворення (3.8), яке називають зворотнім. При прямому перетворенні координат (від системи координат, яка обертається з частотою f_1 до нерухомої)

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos \theta - i_q \sin \theta; \\ i_b &= i_d \sin \theta + i_q \cos \theta. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Аналогічні залежності мають місце для напруг і потокозчеплень. Трифазно-двофазні координатні перетворення давачів напруги виконані таким чином:

1). Перетворення виміряних давачами напруг $ДН_1$ і $ДН_2$ лінійних напруг у фазні (U_n / U_ϕ):

$$U_{1A} = \frac{2U_{AB} + U_{BC}}{3}; U_{1C} = \frac{-2U_{BC} - U_{AB}}{3}; \quad (3.10)$$

2). Перетворення трифазно-двофазне (3/2):

$$\begin{aligned} U_{1a} &= U_{1A}; i_{1a} = i_{1A}; \\ U_{1b} &= \frac{-2U_{1C} - U_{1A}}{3}; i_{1b} = \frac{-2i_{1C} - i_{1A}}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Керувати асинхронним електродвигуном можна, якщо для формування струмів фаз i_{1A}, i_{1B}, i_{1C} , що задаються, використовувати інформацію про потокозчеплення статора $\bar{\psi}_1$, знайшовши його складові в нерухомій системі координат.

На основі рівняння Горєва-Парка, які записані у векторній формі, випливає, що вектор потокозчеплення статора рівний:

$$\bar{\psi}_1 = \int_0^t (\bar{U}_1 - \bar{I}_1 r_1) dt, \quad (3.12)$$

або

$$\begin{aligned} \psi_{1a} &= \int_0^t (U_{1a} - i_{1a} r_1) dt, \\ \psi_{1b} &= \int_0^t (U_{1b} - i_{1b} r_1) dt. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Задаючи $\psi_{1H} = const$ і потрібне значення швидкості f_1 , схема рис. 3.3. відпрацьовує заданий закон регулювання.

Застосування закону керування $\psi_2 = const$ дозволяє більш ефективно регулювати координати електропривода.

Простота представлення частотно-керованого електропривода збільшується при раціональному виборі кутової швидкості та орієнтації координатних осей у перехідному режимі. При синусоїдальній напрузі живлення, результуючі вектори струмів, напруг і потокозчеплень статора і ротора в усталеному режимі взаємно нерухомі, то будь яка система координат, прив'язана до одного з цих векторів (назвем його "базовим"), придатна для оптимізації [8]. Базовим вектором при реалізації закону $|\psi_2| = const$ є вектор потокозчеплення ротора. Направимо вектор $\bar{\psi}_2$ по осі d, а вісь q – у випереджаючому її на 90° напрямку. При цьому рівняння електропривода спрощуються, оскільки проекція узагальненого базового вектора – потокозчеплення ротора на вісь q дорівнює нулю.

При значних змінах ковзання на робочому відрізку механічної характеристики, для врахування електромагнітних перехідних процесів а також при пусках електродвигуна застосовують моделі, що реалізують систему диференціальних рівнянь, які пов'язують вектори струмів, напруг і потокозчеплень, представлених у системі координат d, q.

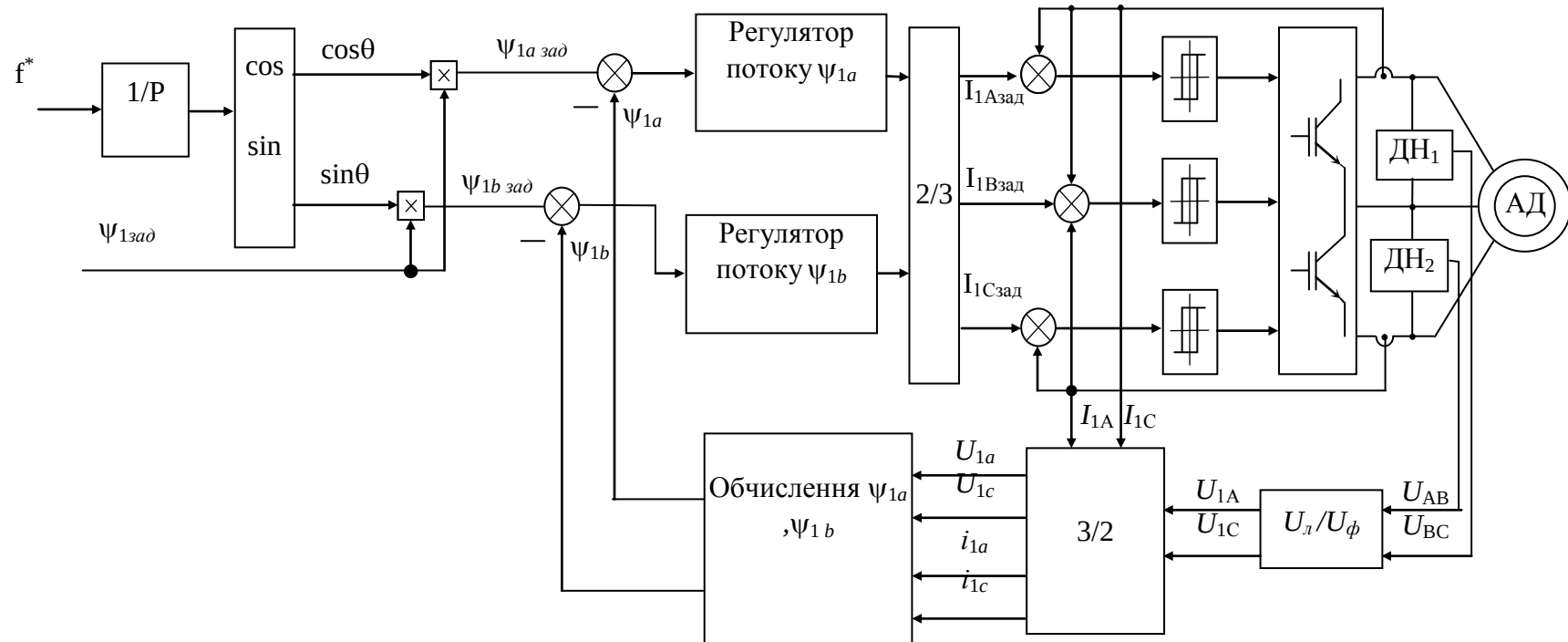


Рис.3.3. Функціональна схема асинхронного електропривода з підтримкою $\psi_1 = \text{const}$.

Вектор потокозчеплення статора можна записати у вигляді

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 l'_1 + \kappa_2 \bar{\psi}_2, \quad (3.14)$$

$$\text{де: } l'_1 = l_1 + \kappa_2 l_2; \kappa_2 = \frac{1}{(1 + l_2)}.$$

При реалізації векторного способу керування частоти обертання асинхронного електродвигуна, коли $\psi_2 = \text{const}$, рівняння в операторній формі запишуться у вигляді:

$$\begin{aligned} U_{1d} &= i'_{1d} r'_1 (1 + p T_1') - f^* l'_{1q} i'_{1d} - \frac{r'_2}{T_2} \psi_{2d}; \\ U_{1q} &= i'_{1q} r'_1 (1 + p T_1') + f^* l'_{1d} i'_{1d} + \kappa_2 \omega^* \psi_{2d}; \\ 0 &= -\kappa_2 i'_{1d} r_2 + \frac{1}{T_2} \psi_{2d} + p \psi_{2d}; \\ 0 &= -\kappa_2 i'_{1q} r_2 + (f^* - \omega^*) \psi_{2d}; \end{aligned} \quad (3.15)$$

З третього і четвертого рівнянь системи (3.15) отримаємо:

$$\begin{aligned} \psi_{2d} &= \frac{\kappa_2 r_2 T_2 i'_{1d}}{T_2 p + 1}, \\ f_c^* &= \omega^* + \frac{\kappa_2 r_2 i'_{1q}}{\psi_{2d}} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Момент електродвигуна при векторному керуванні :

$$\mu = \kappa_2 \psi_2 i_{1q}. \quad (3.17)$$

Враховуючи (3.15), (3.16) і (3.17) та рівняння руху електропривода, побудовано функціональну схему асинхронного регульованого електропривода з підтриманням $|\psi_2| = \text{const}$, яка приведена на рис. 3.4.

Принцип її функціонування подібний до схеми на рис. 3.3. Вектор потокозчеплення ротора рахується за відомим значенням потокозчеплення статора $\bar{\psi}_1$ (3.16, 3.17) :

$$\bar{\psi}_2 = \frac{1}{\kappa_2} (\bar{\psi}_1 - \bar{I}_1 l'_1), \text{ а в нерухомих координатах } a, b$$

$$\begin{aligned}\psi_{2a} &= (1+l_2) \int_0^{\tau} (U_a - i_a r_1) d\tau - i_{1a} l'_1 (1+l_2); \\ \psi_{2b} &= (1+l_2) \int_0^{\tau} (U_b - i_b r_1) d\tau - i_{1b} l'_1 (1+l_2).\end{aligned}\tag{3.18}$$

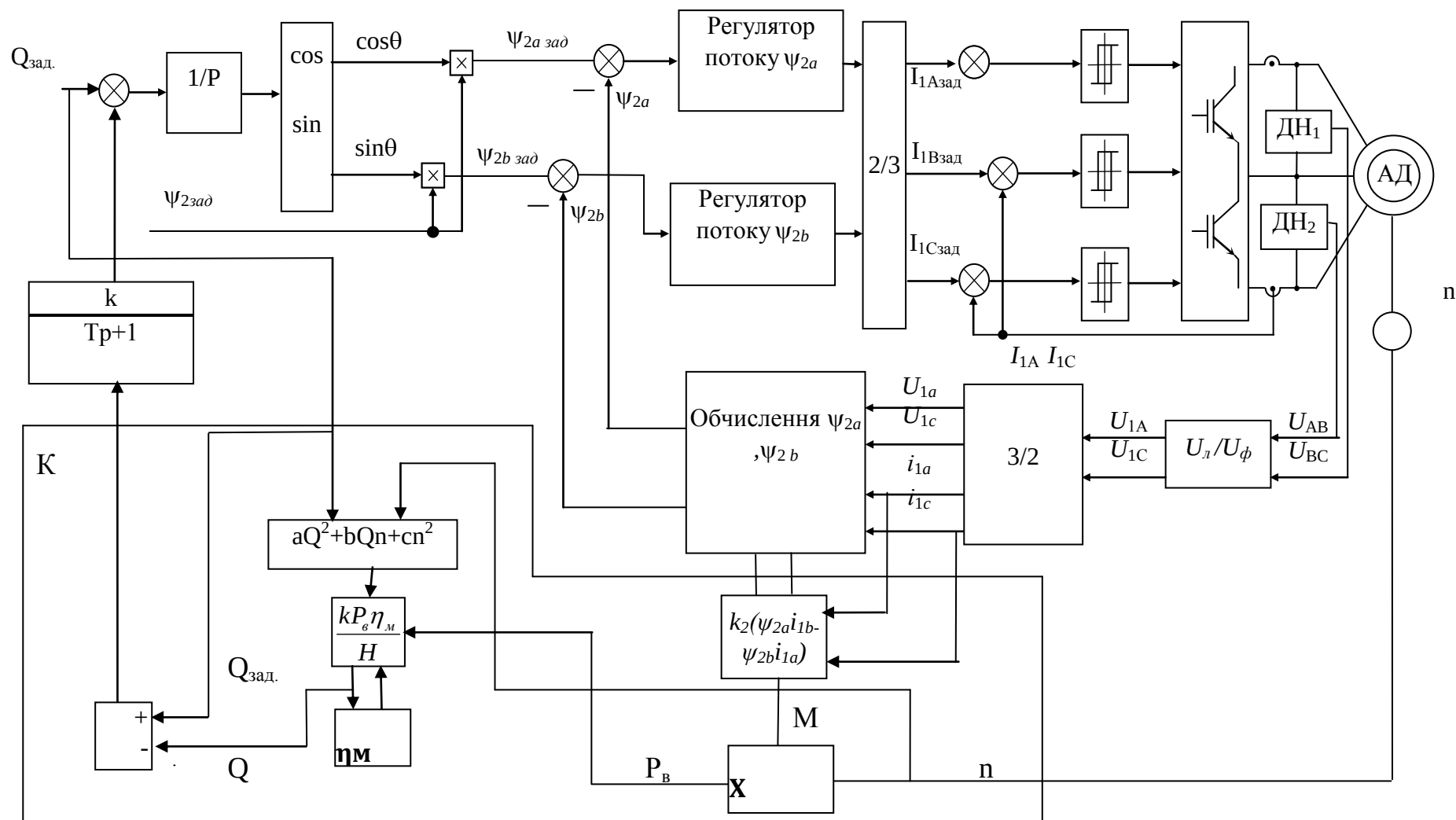
Модуль поточкозчеплення і кутове положення визначають співвідношеннями:

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2a}^2 + \psi_{2b}^2}; \quad \cos \theta = \frac{\psi_{2a}}{|\psi_2|}; \quad \sin \theta = \frac{\psi_{2b}}{|\psi_2|}.\tag{3.19}$$

При реалізації $|\psi_{2H}| = \text{const}$ величина поточкозчеплення розраховується за формулою:

$$\psi_{2H} = \frac{\sqrt{2} I_H L_m}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_2 2\pi f_1 s_H}{p_n} \right)^2}}.\tag{3.20}$$

Оскільки $M = \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} + \psi_{2b} i_{1a})$, то $M\omega = P$,



а $P = kQH$, то $Q = \frac{P}{kH}$ при векторному керуванні $M = \frac{L_m}{L} \psi_{2m} i_{1q}$.

Реалізація корекції заданого значення швидкості (продуктивності вентиляційної установки) при зміні навантаження здійснюється схемою К рис. 3.4, яка є складовою системи управління електроприводом.

Схема складена на основі синтезу наступних рівнянь. Електромагнітний момент електродвигуна при відомих потокозчепленнях і струмах в нерухомій системі координат визначається за виразом:

$$M = k_2(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \quad (3.21)$$

а потужність виражається формулою (3.6).

Потужність на валу електродвигуна з урахуванням механічних витрат визначається виразом:

$$P_g = (1 - \kappa_{\text{мех}}) P. \quad (3.22)$$

Важливим параметром режимів роботи продуктопроводів є швидкість руху аеросуміші або продуктивність.

Якщо задається продуктивність $Q_{\text{зад}}$, яка забезпечує швидкість руху аеросуміші такою, щоб з однієї сторони не виникав завал продуктопровода, а з іншої забезпечувалися мінімальні витрати енергії на реалізацію режиму, то за виразом (3.2) можна вирахувати значення напору вентиляційної установки $H_{\text{зад}}$.

При відомому значенню потужності, яку споживає вентиляційна установка, та її коефіцієнту корисної дії визначається значення продуктивності:

$$Q = \frac{k P_g \eta_m}{H_{\text{зад}}}. \quad (3.23)$$

Якщо $Q_{\text{зад}} - Q \neq 0$, то коректується значення заданої швидкості обертання, при $Q_{\text{зад}} - Q = 0$ така корекція не проводиться.

У блоці η_m схеми К вираховується значення ККД вентиляційної установки при відомому значенні Q .

Алгоритм керування асинхронним електродвигуном при векторному законі керування реалізується, якщо здійснювати живлення статорних обмоток

від перетворювача частоти, що працює в режимі джерела струму. У цьому випадку рівняння після деяких перетворень приводяться до вигляду

$$\begin{aligned} i_{1d} &= T_2 p \psi_2 + \psi_2; \\ i_{1q} &= \frac{f_2^* \psi_2}{\kappa_2 r_2}; \\ \omega^* &= \frac{\mu - \mu_c}{T_\mu p}; \\ \mu &= \kappa_2 \psi_2 i_{1q}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Потокозчеплення ротора і статора в системі координат dq через струми $\bar{I}_1$ і $\bar{I}_2$ мають вигляд:

$$\bar{\psi}_1 = \bar{I}_1 L_1 + \bar{I}_2 L_m; \quad \bar{\psi}_2 = \bar{I}_1 L_m + \bar{I}_2 L_2, \quad (3.25)$$

де $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$; $L_{2\sigma} = L_2 + L_m$; $L_m = \frac{3}{2} L_{1m}$;

а у відносних одиницях

$$\bar{\psi}_1 = \bar{i}_1 (1 + l_1) + \bar{i}_2, \quad \bar{\psi}_2 = \bar{i}_2 (1 + l_2) + \bar{i}_1. \quad (3.26)$$

Вирази для струмів ротора з (3.26)

$$\begin{aligned} i_{2d} &= \kappa_2 (\psi_2 - i_{1d}) \\ i_{2q} &= -\kappa_2 i_{1q}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Амплітуда вектора струму статора відповідно до рівняння (3.26) визначається за виразом:

$$i_1 = T_2 \sqrt{\left(p \psi_{2d} + \frac{\psi_{2d}}{T_2} \right)^2 + f_2^2 \psi_{2d}^2}, \quad (3.28)$$

а фаза

$$\theta_1 = \omega_0 t + \arctg \frac{f_2^* \psi_2}{p \psi_2 + \psi_2 / T_2}. \quad (3.29)$$

Наведені рівняння показують, що в динамічній системі: асинхронний електродвигун – робоча машина, фазовий стан якої визначається вектором потокозчеплення ротора, можливе регулювання координат при підтриманні $\psi_2 = const$ і регулюванні амплітуди і фази струму статора i_1 при зміні ковзання.

Тобто при векторному керуванні потрібно не тільки стабілізувати потокозчеплення ротора на заданому рівні, а й контролювати кутове положення його вектора. Для цього доповнюється система рівнянь електропривода рівняннями перетворення вектора струму статора з нерухомої системи координат a, b в систему відліку, пов'язану з вектором потокозчеплення ротора d, q .

Повний струм статора в усталеному режимові

$$I_1 = \psi_2 \sqrt{1 + f_2^2 T_2^2}. \quad (3.30)$$

Складові напруги на виводах статора

$$\begin{aligned} U_{1d} &= \psi_2 f_c^* \left[r' - \frac{r_2}{(1+l_2)^2} - \frac{s l_1' (1+l_2)}{r_2} \right]; \\ U_{1q} &= \psi_2 f_c^* \left[\frac{r' s (1+l_2)}{r_2} + l_1' + \frac{\omega^*}{(1+l_2) f_c^*} \right]. \end{aligned} \quad (3.31)$$

На рис. 3.5 представлена структурна схема векторного частотно-регульованого електропривода. Силова частина системи, регулятори фазних струмів, датчики напруги і струмів, швидкості і координатні перетворювачі ПК для зв'язку частин частотно-регульованого електропривода, синтезованих у різних системах відліку (нерухомі й обертаючі), представлені в системі відліку, зв'язаній із статором. Сигнали i_{1d}^* і i_{1q}^* , що надходять на вхід виконавчої частини системи, є вихідними сигналами результуючої частини електроприводу, яка аналізується і синтезується в системі відліку, пов'язаній із вектором $\bar{\psi}_2$. Сигнали i_{1d}^* і i_{1q}^* формують струми $I_{1A3\Delta d}, I_{1B3\Delta d}, I_{1C3\Delta d}$ на вході регуляторів фазних струмів РТФ за допомогою координатних перетворювачів ПК1 і ПК2 та сигналів спостерігача координат потоку СКП. У ПК2 здійснюються нелінійні перетворення згідно з формулами (3.13).

Перетворювач ПК1 здійснює перетворення $a, b \rightarrow A, B, C$ згідно з (3.11). У ПК3 дійсні значення змінних струмів і напруг, виміряні відповідними

датчиками, перетворюються для таких розрахунків ($A, B, C \rightarrow a, v$) відповідно до виразів (3.14-3.15).

Із ПК4 і ПК3 сигнали датчиків струму переводяться в систему пов'язану з $\psi_2(a, v \rightarrow dq)$ – відповідно до виразів (3.12). Обчислення змінних, що вводяться в регулюючу частину системи, здійснюється в блоках:

- в РП розраховуються складові потокозчеплення ротора в системі координат a, v ;
- в СКП розраховується модуль і кут вектора потокозчеплення ротора.

На рис. 3.6. подана система векторного керування асинхронним електроприводом із спостерігачем (С). Математична модель – спостерігач С використовується для отримання поточного значення модуля $\psi_{2d} = |\psi_2|$ і кута повороту θ вектора потокозчеплення ротора. Вхідним сигналом є фазні струми статора i_{1A} і i_{1C} та частота обертання ротора ω асинхронного електродвигуна.

Спостерігач побудований на основі перших двох рівнянь (3.24) і, по суті, є моделлю асинхронного електродвигуна з виключеним каналом електромагнітного моменту. У схемі з спостерігачем відсутні датчики напруги.

Дослідження поданих схем векторного частотного керування асинхронним електроприводом свідчать:

1. Регулювання напруги, потокозчеплення та струму впливають на складову струму i_{1d} , яка створює магнітний потік, а через регулювання числа обертів та поперечної складової струму можна безпосередньо впливати на електричний обертаючий момент. Регулювання потоку можна проводити лише із затримкою часу T_2 .
2. Регулювання струму в координатах поля ротора (d, q) виправдано внаслідок меншої чутливості до параметрів, а також меншого зсуву фаз при регулюванні стаціонарних постійних i_{1d} та i_{1q} . Регулювання струму значно зменшує навантаження в динамічних режимах.
3. В області слабого поля двигун працює із сталим навантаженням і зменшеним максимальним обертаючим моментом. Регулятор напруги

видає додатковий потік відповідно до розрахованої за основним потоком напруги $\omega_0 \psi_2$, величина якої обмежується 0,9 від номінальної напруги інвертора.

При приведенні диференціальних рівнянь напруг статора до системи координат, що обертається, необхідна інформація про кут орієнтації ротора та його кількість обертів, яка отримується від давача швидкості електропривода.

Керування електродвигуном приводу вентиляційної установки можна здійснювати без давача частоти обертання електропривода, оскільки установка тахогенератора викликає ряд недоліків, до яких слід віднести такі, як зниження надійності і підвищення вартості системи.

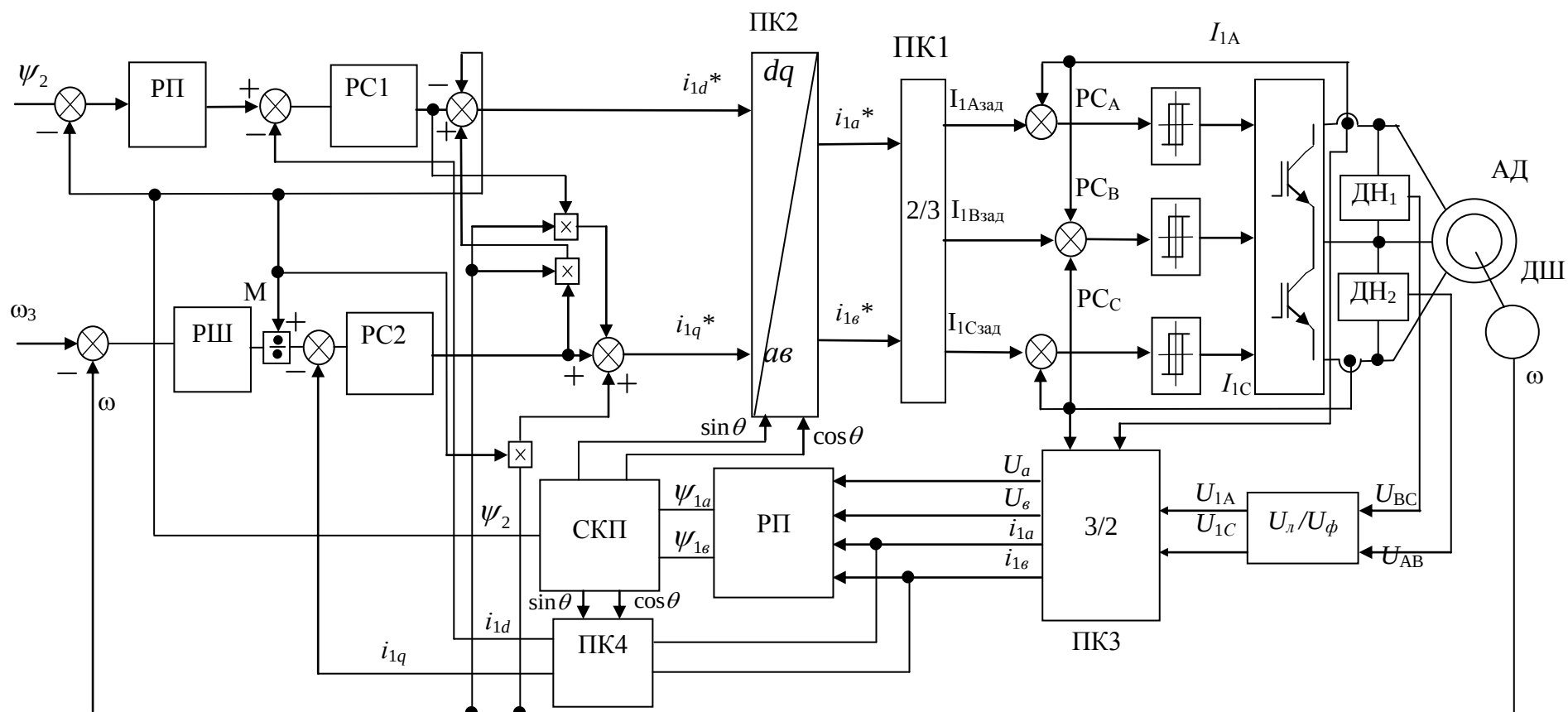


Рис.3.5. Структурная схема векторного частотно-регулируемого электропривода.

Розрахунок кутової частоти вектора потоку на основі балансу реактивної потужності не вимагає використання для розрахунку значно залежного від температури активного опору статора. Для моделі потрібні лише індуктивності L_{11} і L_m .

На рис. 3.7 подана функціональна схема векторного частотно-регульованого електропривода зі спостерігачем побудованим на основі рівняння напруг, що відповідають основному магнітному потокові.

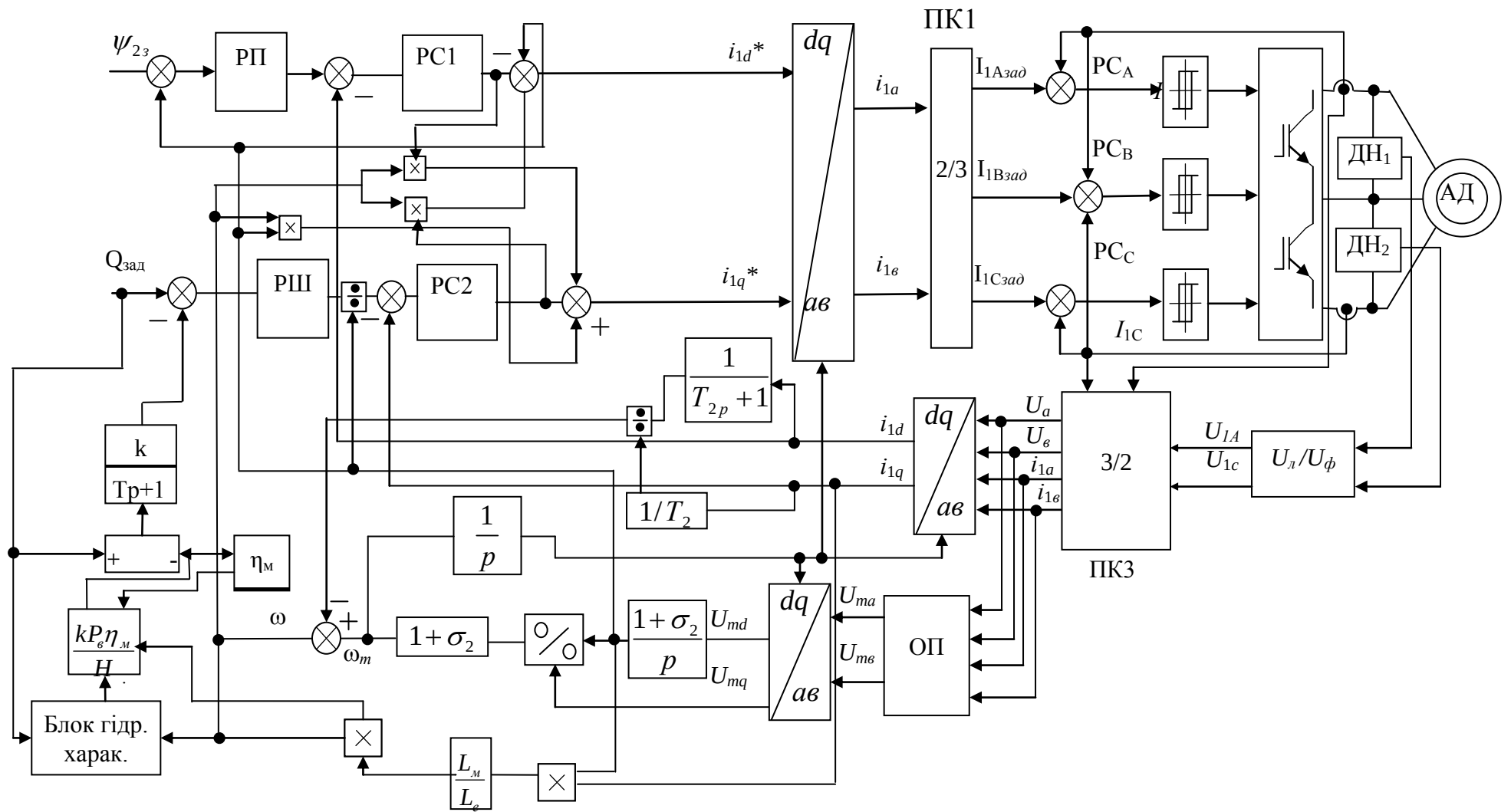


Рис.3.7. Функціональна схема векторного частотно-регульованого електропривода зі спостерігачем, побудованим на основі балансу реактивної потужності.

Таким чином, при реалізації закону $\psi_1 = \text{const}$ доцільно використовувати схему, подану на рис. 4.3, при реалізації закону $\psi_2 = \text{const}$ – схему, представлену на рис. 3.4, при реалізації векторної системи керування при $\psi_2 = \text{const}$ – доцільне використання наведеної на схемі, рис. 3.5, а при векторному керуванні без давачів швидкості використовують схему, зображену на рис. 3.7.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянута задача зменшення енерговитрат на пневмотранспортування продукції борошномельних підприємств шляхом визначення енергоефективних режимів руху аеросуміші і реалізації їх засобами регульованого електроприводу.

1. На основі теоретичних досліджень встановлено, що збільшення швидкості руху аеросуміші на 2 м/с. призводить до втрат тиску 500 Па, а збільшення навантаження пневмотранспорту на 20 % - 300 Па. Це свідчить про значимість впливу швидкості руху аеросуміші на енергоємність пневмотранспортної установки.

2. На основі системного аналізу результатів досліджень режимів роботи пневмотранспортної установки млина типу Р6 – АВМ – 15 доведено, що потужність вентиляційної установки завищена, тому з метою заощадження електричної енергії потрібно замінити вентиляційну установку типу ЦП – 30 з приводним електродвигуном потужністю 11 кВт. на вентиляційну установку типу ВД №4 з двигуном 7.5 кВт.

3. Математична модель системи електропривод – пневмотранспортна установка з похибкою 5% відтворює в динаміці залежності гідравлічних опорів пневмовіток від їх завантаження та швидкості руху аеросуміші. Встановлено, що мінімальні витрати енергії і стійка робота пневмотранспортної установки забезпечується при швидкості руху аеросуміші в межах 12 – 13 м/с.

4. Розроблені заходи з охорони праці та техніки безпеки, проведене техніко-економічне обґрунтування системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Снижение энергоемкости мельничных пневмотранспортных установок //Н.П.Володин, А.И.Кривошеин, М.Г.Касторных, А.В.Тантлевский. – М.; 1978. – 224 с.
2. Птушкин В.В. Основы автоматизации и вычислительной техники для систем хлебопродуктов. – М.: Колос, 1989. – 170 с.
3. Зенков Р.Л., Иванов И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта – М.: Машиностроение, 1987 – 432 с.
4. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины – М.: Машиностроение, 1983 – 487 с.
5. Зуев Ф.Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. – М.: Колос, 1976. – 344 с.
6. Бутаков С.Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции – М.: Профиздат, 1949 – 271 с.
7. Вейсман М. Р. Вентиляционные и пневмотранспортные установки – М.: Колос, 1984
8. Птушкин А.Т., Новицкий О.А. Автоматизация производственных процессов в отрасли хранения и переработки зерна. –М.: Агропромиздат, 1985. –318с.
9. Федоренко В.С. Автоматизация технологических процессов мукомольных заводов. – М.: Колос, 1990 – 289 с.
10. Мисаренко Г.А. Основы автоматизации технологических процессов переработки и хранения зерна. М.: Колос, 1971. – 161 с.
- 11.Кулак В.Г., Максимчук Б.М. Технология производства муки. – М.: Агропромиздат, 1991. – 224 с.
- 12.Егоров Г.А. Мельников Е.М., Максимчук Б.М. Технология муки, крупы и комбикормов. – М.: Колос, 1984 – 376 с.
- 13.Володин Н.П., Касторный М.Г., Кривошин А.И. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам. М.: Колос, 1984. – 288 с.

14. Вайсман М.Р., Грубиян И.Я. Вентиляционные и пневмотранспортные установки. – М.: Колос, 1984.
15. Дэниел Н. Применение статистики в промышленном эксперименте. – М.: Мир, 1979. – 299 с.
16. Коршунов Б.П. Ю.М. Математические основы кибернетики. – М.: Энергия, 1980. – 422 с.
17. Справочник по транспортирующим и погрузочно – разгрузочным машинам/ Ф.Г. Зуев, Н.А. Лотков, А.И. Полухин, А.В. Тантлевский – М.: Колос, 1983. – 319 с.
18. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: Учеб. пособ. – К.: Техніка, 1966. – 436 с.
19. Довідник сільського електрика /В. С. Олійник, В.М. Гайдук, В.Ф. Гончар та ін.; За ред. В.С. Олійника – 3 – є.. перероб. і доп. - К.: Урожай, 1989 – 264 с.
20. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 688 с.
21. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Вид. 3-є, перероб і доп. / В. Ц. Жидецький. – Львів: УАД, 2006. – 336 с.
22. Практикум з охорони праці. / [Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І.]. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.
23. Босов Є. П. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва: Навчальний посібник. / Є. П. Босов, Р. В. Жесан, В. М. Каліч. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 112 с.
24. Конституція України. – К.: Вид-во Паливода А. В., 2019. – 76 с.
25. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>.
26. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80>.

ДОДАТКИ

ОХОРОНА ПРАЦІ

1 Законодавчі та нормативні акти України з питань охорони праці

Охорона життя і здоров'я людей, які працюють в різних галузях харчової промисловості є важливим питанням, яке вирішується шляхом застосування заходів, спрямованих на полегшення праці, підвищення її продуктивності та зниження виробничого травматизму.

Правовою основою вітчизняного законодавства щодо охорони праці є Конституція України, Закони України: «Про охорону праці», «Про охорону здоров'я», «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про пожежну безпеку», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», а також Кодекс законів про працю України (КЗпП) [21, 22, 23].

Спеціальними юридичними документами в галузі охорони праці є: Нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП), Міжнародні стандарти з питань безпеки праці (ГОСТ ССБТ), Державні стандарти України (ДСТУ), Будівельні норми і правила (СНиП), Санітарні правила і норми (СанПіН), Правила улаштування електроустановок (ПУЕ), Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, норми технічного проектування та інші нормативні акти, виходячи із сфери їх дії [21, 22].

В Основному Законі України – Конституції, питанням охорони праці присвячено статті 43, 45 та 46.

В ст. 43 Конституції України записано: «Кожен має право на працю, що включає можливість заробляти собі на життя працею, яку він вільно обирає, або на яку вільно погоджується», «Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці, на заробітну плату, не нижчу від визначеної законом», «Використання праці жінок і неповнолітніх на небезпечних для

їхнього здоров'я роботах забороняється» [24].

Кожен, хто працює, має право на відпочинок (ст. 45 Конституції України) [24]. Це право забезпечується наданням днів щотижневого відпочинку, а також оплачуваної щорічної відпустки, встановленням скороченого робочого дня щодо окремих професій і виробництв, скороченої тривалості роботи у нічний час.

У тексті ст. 46 Конституції України вказано на те, що громадяни мають право на соціальний захист, яке включає право на забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом [24].

Основоположним законодавчим документом в галузі охорони праці є Закон України «Про охорону праці» [25], дія якого поширюється на всі підприємства, установи та організації незалежно від форм власності та видів їх діяльності, на всіх громадян, які працюють, а також залучені до праці на цих підприємствах. Він був прийнятий Верховною радою України 14 жовтня 1992 року. Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за допомогою відповідних державних органів, відносини між власником підприємства, установи та організації або уповноваженим ним органом і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Специфічною особливістю закону України «Про охорону праці» є високий рівень прав та гарантій робітникам. Вперше в історії держави працівникам було надано право відмовитися від роботи у випадку існування на виробництві загрози для їхнього здоров'я і життя. Розширені права робітників у соціальних гарантіях відшкодування збитків у випадку пошкодження їх здоров'я на виробництві. Передбачена система фінансування охорони праці, формування системи страхування від

нешасних випадків та професійних захворювань, посилена централізація планування. Договірне регулювання з питань охорони праці поставлено на високий рівень, передбачається участь громадських інституцій у цьому процесі. За державою закріплено функції нагляду та управління охороною праці [21, 25].

З позиції законодавчої регламентації прав і гарантій робітникам у сфері охорони праці та їх забезпечення Закон України «Про охорону праці» та нормативно-правові документи щодо його реалізації отримали високу оцінку експертів Міжнародної організації праці [21].

Закон України «Про охорону здоров'я», прийнятий 3 лютого 1993 року, складає кістяк Основ Законодавства «Про охорону здоров'я», які визначають правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я в Україні, регулюють суспільні відносини у цій галузі, з метою забезпечення гармонійного розвитку фізичних і духовних сил, високої працездатності і довголітнього активного життя громадян, усунення факторів, що шкідливо впливають на їх здоров'я, попередження і зниження захворюваності, інвалідності та смертності, поліпшення спадковості [21, 22].

В системі законодавства щодо гігієни праці ключове місце займає Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», від 17 грудня 1993 року [21]. Він передбачає розробку і здійснення адміністрацією підприємств санітарних та протиепідемічних заходів; здійснення, в необхідних випадках, лабораторного контролю за дотриманням вимог санітарних норм стосовно рівнів шкідливих факторів виробничого середовища; формування органів та установ державної санепідеміологічної служби при надзвичайній події та ситуаціях, що становлять небезпеку для здоров'я населення; відшкодування, в установленому порядку, працівникам й іншим громадянам збитків, завданих їх здоров'ю в результаті порушення санітарного законодавства.

Основним законодавчим документом, що регламентує вимоги до пожежної безпеки є Закон України «Про пожежну безпеку», прийнятий 17 грудня 1993 року. Цей Закон визначає загальні правові, економічні та соціальні основи забезпечення пожежної безпеки на території України, регулює відносини державних органів, юридичних і фізичних осіб у цій галузі, незалежно від виду їх діяльності та форм власності.

Забезпечення пожежної безпеки підприємств, установ та організацій покладається на їх власників і уповноважених ними осіб, якщо інше не передбачено відповідними договором [21, 22, 23].

Законом України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», від 8 лютого 1995 року, передбачені основні вимоги до правил безпеки при використанні ядерних та радіоактивних матеріалів і гарантія захисту населення від наслідків радіоактивних аварій [26]. Він є основоположним у ядерному законодавстві України і встановлює пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища, права і обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, а також закріплює правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії. В ньому сформульовано основні принципи державної політики щодо використання ядерної енергії та радіаційного захисту [21, 26]:

- пріоритет захисту людини й довкілля від впливу іонізуючого випромінювання;
- забезпечення безпеки при використанні ядерної енергії; відкритість і доступність відповідної інформації;
- встановлення відповідальності за порушення правового режиму безпеки в цій сфері; розмежування функцій державного управління в галузі використання ядерної енергії та державного регулювання ядерної й радіаційної безпеки;
- створення правового та фінансового механізму відповідальності

експлуатуючої організації перед громадянами та суб'єктами господарювання за заподіяну ядерну шкоду тощо.

Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», що набув чинності з 1 січня 2001 року, визначає правову основу, економічний механізм та організаційну структуру загальнообов'язкового державного соціального страхування громадян від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які призвели до втрати працездатності або загибелі застрахованих на виробництві [21, 23].

Загальнообов'язкове державне соціальне страхування – це система прав, обов'язків і гарантій, яка передбачає надання соціального захисту, що включає матеріальне забезпечення громадян у разі хвороби, повної, часткової або тимчасової втрати працездатності, втрати годувальника, безробіття, з незалежних від них обставин, а також у старості та в інших випадках, передбачених законом, за рахунок грошових фондів, що формуються шляхом сплати страхових внесків власником або уповноваженим ним органом, громадянами, а також бюджетних та інших джерел, передбачених законом [21].

Страхування від нещасного випадку є самостійним видом загальнообов'язкового державного соціального страхування, за допомогою якого здійснюється соціальний захист, охорона життя та здоров'я громадян у процесі їх трудової діяльності [21, 23].

Основні положення законодавства про працю, що регулюють всі ситуації, виникаючі у трудових відносинах між роботодавцями і працівниками, відображені в КЗпП України [21, 22].

В КЗпП зазначені наступні положення [21, 22, 23]: забороняється залучати до надурочних робіт вагітних жінок і жінок, які мають дітей віком до трьох років (ст. 176), а також осіб молодших 18 років (ст. 192); забороняється застосовувати працю жінок на важких роботах і роботах із

шкідливими або небезпечними умовами праці, а також на підземних роботах (ст. 174). В ст. 153 КЗпП зазначено про обов'язковість створення власником підприємства безпечних та нешкідливих умов праці.

НПАОП, які до початку 2003 року носили назву Державні нормативні акти про охорону праці (ДНАОП), – це правила, стандарти, норми, положення, інструкції та інші документи, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання [21, 22]. Законодавством передбачено, що, залежно від сфери дії, НПАОП можуть бути міжгалузевими і галузевими. Всі НПАОП вносяться до Державного Реєстру. Реєстр ДНАОП, що діють на території України, виданий Держнаглядом охорони праці в 1997 році. З 2003 року ведеться реєстр НПАОП, який постійно поповнюється [21].

ГОСТ ССБТ колишнього СРСР застосовуються на території України до їх заміни іншими нормативними документами, якщо вони не суперечать чинному законодавству України. Відповідно до Угоди про співробітництво в галузі охорони праці, укладеної керівниками урядів держав СНД у грудні 1994 року, стандарти ССБТ надалі визнаються Україною як міждержавні стандарти за узгодженим переліком, що переглядається в міру необхідності з урахуванням національного законодавства держав СНД та результатів спільної роботи, спрямованої на удосконалення Системи стандартів безпеки праці [21, 23].

Серед державних нормативно-технічних актів про охорону праці важливе місце посідають ДСТУ. Державна система стандартів з питань охорони праці – це комплекс взаємопов'язаних стандартів, спрямованих на забезпечення безпеки праці, збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці. ДСТУ почали розроблятися з 1992 року [21, 22, 23].

Складовою частиною права в галузі гігієни праці є постанови та положення (норми), затверджені Міністерством охорони здоров'я України (наприклад, «Положення про медичний огляд працівників певних категорій», «Перелік важких робіт і робіт з шкідливими і небезпечними

умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх»), СанПіН стосовно окремих факторів виробничого середовища, певних технологічних процесів і конкретних виробництв.

Правове поле в галузі пожежної безпеки доповнюють постанови Верховної Ради України, укази та розпорядження Президента України, декрети, постанови та розпорядження Кабінету Міністрів України, рішення органів державної виконавчої влади, місцевого та регіонального самоврядування, прийняті у межах їх компенсації. Забезпечуючи пожежну безпеку слід також керуватись Правилами пожежної безпеки [21].

Вимоги щодо охорони праці регламентуються також Будівельними нормами і правилами – СНиП, Правилами улаштування електроустановок – ПУЕ, Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ) та іншими нормативними актами [21, 22].

Власники підприємств, установ, організацій або уповноважені ними органи розробляють, на основі НПАОП, і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про охорону праці, що діють в межах підприємства, установи, організації [21]. При цьому відхилення вимог щодо охорони праці в нормативних актах підприємства від НПАОП допускається виключно у бік покращення умов для працівника.

Відповідно до наказу Держнаглядохоронпраці №132 від 12.12.1993 р., до основних нормативних актів підприємства належать:

- Положення про систему управління охороною праці на підприємстві;
- Положення про службу охорони праці підприємства;
- Положення про комісію з питань охорони праці підприємства;
- Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань охорони праці;
- Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони праці;
- Положення про організацію і проведення первинного та

повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму;

- Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативних актів про охорону праці;

- Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників;

- Положення про санітарну лабораторію підприємства;

- Інструкції з охорони праці для працюючих за професіями і видами робіт;

- Інструкції про порядок зварювання і проведення інших вогневих робіт на підприємстві;

- Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки;

- Перелік робіт з підвищеною небезпекою;

- Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці;

- Наказ про організацію безкоштовної видачі працівникам певних категорій лікувально-профілактичного харчування;

- Наказ про організацію безкоштовної видачі молока або інших рівноцінних харчових продуктів працівникам підприємства, що працюють у шкідливих умовах;

- Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

Виходячи із специфіки виробництва та чинного законодавства, власник затверджує нормативні акти із вищезазначеного списку та інші акти, що регламентують питання охорони праці на конкретному підприємстві.

В Україні держава виступає гарантом створення безпечних і нешкідливих умов роботи для працівників підприємств, установ і організацій всіх форм власності.

2 Шкідливі та небезпечні фактори виробництва, що впливають на персонал в процесі експлуатації автоматизованої системи розподілення продукції аграрних підприємств шляхом регулювання режимів роботи електрообладнання

На здоров'я людини, її життєдіяльність і життєздатність великий вплив мають небезпечні та шкідливі фактори. На будь-якому виробництві існує та чи інша загроза травматизму, тому в ДСТУ 2293-93 «Охорона праці. Терміни та визначення» й інших стандартах вводяться визначення основних понять та термінів в галузі охорони праці.

Небезпека – це наслідок такої дії певних факторів на людину, яка при їх невідповідності фізіологічним характеристикам людини зумовлює феномен самої небезпеки.

Шкідливий виробничий фактор – виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я, зниження працездатності працівника.

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого за певних умов може привести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

Здоров'я – стан фізичного, душевного і соціального благополуччя, а не тільки відсутність хвороб і фізичних дефектів.

Дія окремих несприятливих факторів виробничого середовища може призвести до *виробничої травми* – порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів [1, 2, 3].

Відповідно до ГОСТ 12.0.003-74, небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

Психофізіологічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори – це фізичні і нервово-психічні перевантаження різної природи [21].

До *біологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів*, що присутні фактично у всіх процесах і етапах сільськогосподарського виробництва, належать патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, мікроскопічні гриби та ін.) й продукти їх життєдіяльності, а також макроорганізми (рослини, комахи, тварини) [22, 23].

До *хімічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів* належать хімічні речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на загальнотоксичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні, такі, що впливають на репродуктивну функцію [21]. Тому дуже важливого значення набувають процеси вентиляції та очистки повітря на робочих місцях, а до умов роботи персоналу, охороні їх здоров'я та життя слід відноситись особливо уважно.

До *фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів* в процесі експлуатації автоматизованої системи розподілення продукції аграрних підприємств шляхом регулювання режимів роботи електрообладнання належать: небезпечне значення напруги в електричному колі: можливість ураження персоналу електричним струмом, через несправність електропроводки, електродвигунів, світильників та їх ізоляції; статична електрика; підвищені рівні електричного чи магнітного полів, іонізуючих випромінювань; відсутність або нестача природного світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; пряме та відбите випромінювання, що створює засліплюючу дію; рухомі механізми, частини обладнання що обертаються (зокрема, вентилятори); підвищені температури, зокрема гарячі частини обладнання; підвищена запиленість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації; підвищені чи понижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря. Приміщення, де знаходяться оператори автоматизованої системи, можуть бути небезпечними у пожежному відношенні.

Слід відзначити, що один і той же небезпечний і шкідливий

виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до різних груп [21, 22, 23].

3 Заходи з усунення чи зменшення впливу шкідливих та небезпечних факторів виробництва, що впливають на персонал в процесі експлуатації автоматизованої системи розподілення продукції аграрних підприємств шляхом регулювання режимів роботи електрообладнання

Загальні вимоги до виробничого приміщення та розташованого у ньому обладнання.

Операторський пункт автоматизованої системи розподілення продукції аграрних підприємств шляхом регулювання режимів роботи електрообладнання (включно із щитами керування) може бути розташований як безпосередньо в приміщенні із виробничим устаткуванням, так і в окремому приміщенні.

Робоче місце оператора забезпечує вільне візуальне та слухове сприймання аварійних та світлових сигналів, які потребують швидкої реакції та швидкого прийняття заходів по керуванню технологічними процесами.

Все устаткування і арматура повинні мати чітке маркування, в якому вказано:

- найменування чи товарний знак;
- стрілки і написи, що інформують про призначення елемента керування чи арматури, напрям вмикання (вимикання).

Ширина проходу для обслуговуючого персоналу складає не менше 1,5 м.

На видних місцях мають бути вивішені інструкції з техніки безпеки.

Нормативно-технічна документація, яка знаходиться на робочому місці:

- змінний журнал;
- журнал інструктажів з техніки безпеки та охорони праці;
- журнал дефектів та несправностей в роботі;
- журнал експлуатаційних інструкцій.

Категорично забороняється проводити ремонтні роботи на працюючому обладнанні для запобігання нещасним випадкам.

Найбільш дієвим способом *захисту від психофізіологічних небезпечних і шкідливих впливів* на працівника є правильна організація його робочого часу та місця роботи. Тому для зняття нервово-психічного навантаження працівників передбачені технологічні перерви, а також одна обідня перерва протягом однієї робочої зміни. Має бути створений позитивний моральний клімат у трудовому колективі. Не припустимі некоректні й показові зауваження від керівництва до підлеглих, здійснені у грубій формі.

Для того, щоб монотонність праці не викликала негативних реакцій в організмі працюючого, які можуть досить різко проявлятися через невідповідність психотипу особистості характерові роботи, необхідно проводити добір персоналу виключно на підставі попередніх психологічних тестувань на наявність схильностей і здатності виконувати роботу [21, 23].

Оцінка ступеня підготовки обслуговуючого персоналу проводиться по загальних правилах та на підставі діючих нормативів для інженерно-технічних працівників.

Перед допуском до роботи необхідно провести інструктаж із записом і підписами у спецжурналі.

Для *захисту працівників від біологічних факторів* – вірусів, бактерій та алергенів рослинного і тваринного походження у виробничих приміщеннях застосовуються системи вентиляції та засоби індивідуального захисту – ватно-марлеві пов'язки, респіратори, протигази. Для захисту шкіряних покривів – спецодяг. Періодично і регулярно мають проводитись заходи з дератизації, дезінсекції, дезінфекції [21, 23].

Для захисту працівників від хімічних та окремих фізичних факторів (хімічних речовин та сполук, у вигляді газів, парів, зависів, суспензій, а також виробничого пилу) забезпечують видалення забрудненого повітря із виробничих приміщень і робочих зон крізь вентиляційні отвори, фрамуги, дефлектори. Також застосовують різноманітні відсмоктувачі й димососи.

Необхідна чистота повітря у виробничих приміщеннях може бути досягнута шляхом [21, 22, 23]:

- удосконалення технологічних процесів та устаткування, в результаті чого виключається або зменшується виділення шкідливих парів, газів та пилу в повітря виробничих приміщень;

- використання ефективної та надійної примусової вентиляції.

Параметри мікрокліматичних умов та складу повітря в виробничих приміщеннях підтримуються у відповідності до ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне», наступними:

- у холодний період року: температура – 18...20°C, швидкість повітря – до 0,3 м/с, відносна вологість повітря – 75%.

- у теплий період року: температура – 25...27°C, швидкість повітря – 0,3...0,5 м/с, відносна вологість повітря – 60...70%.

Підтримання параметрів мікроклімату в указаних межах здійснюється загальнообмінною змішаною витяжною вентиляцією. Кратність вентилявання складає 2 рази на годину. Забруднене повітря видаляється з верхньої частини приміщення природною вентиляцією через фрамуги аераційного ліхтаря, а свіже подається вентилятором через нижній та верхній ряди фрамуг.

Підтримання параметрів досягається також ефективною теплоізоляцією устаткування та допоміжним обладнанням (температура на поверхні ізоляції не перевищує 45°C). Крім того ізоляція є надійним захисником від інфрачервоного випромінювання, джерелом якого є поверхні нагріті до високої температури.

Заходи по захисту від електротравматизму передбачають роботу по декількох напрямках.

Для забезпечення електробезпеки застосовані технічні засоби, які запобігають ураженню людей від електричного струму (згідно ДНАОП 0.00-1.211-84 «Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів і правила техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів»).

Все електрообладнання заземлене. Це захищає обслуговуючий персонал від ураження електрострумом у випадку короткого замикання (припустимий опір заземлення $R_{прп.} \leq 4 \text{ Ом}$).

Кожна одиниця електрообладнання заземлена в двох місцях. Повітропроводи на відстані до 100 мм з'єднані перемичками і заземлені. Розташування кабелів і проводів здійснено на недоступній висоті та в зачинених колодязях. Ефективна ізоляція всіх струмопровідних елементів має опір $R_{із} \geq 0,5 \text{ МОм}$.

Для індивідуального захисту від ураження електричним струмом персонал забезпечується справним інструментом із електроізольованими руків'ями.

Широко використовуються малі напруги 12 В та 36 В. Обладнання відключається автоматично при досягненні струму короткого замикання $I_{кз}$ (тип автоматів АВМ10). При ремонтах устаткування для підсвічування місця безпосередньої роботи для освітлення також користуються тільки низьковольтними переносними електроосвітлювальними приладами з напругою 12 В.

Для захисту від впливу електромагнітних полів та іонізуюч випромінювань використовують різноманітні способи та засоби [1, 2, 3]: зменшують напруженість та густину потоку електромагнітного випромінювання; екранують робочі місця; віддаляють робочі місця від джерела електромагнітного поля; раціонально розміщують в робочому приміщенні обладнання, що випромінює; встановлюють раціональні

режими роботи обладнання та обслуговуючого персоналу; застосовують засоби попереджувальної сигналізації, засоби індивідуального захисту.

Для забезпечення нормованого освітлення виробничих приміщень і робочих зон необхідно передбачити поєднання природного і штучного освітлення, у відповідності з вимогами нормативних документів [21, 22, 23]. Коефіцієнт природно-комбінованого (двостороннього бічного та аварійного ліхтаря) освітлення становить $e_{cp} = 0,9\%$.

Для створення сприятливих умов зорової роботи, які б виключали швидку втомлюваність очей, виникнення професійних захворювань, нещасних випадків і сприяли підвищенню продуктивності праці та якості продукції, виробниче освітлення повинно відповідати наступним вимогам:

- створювати на робочій поверхні освітленість, що відповідає характеру зорової роботи і не є нижчою за встановлені норми;
- забезпечити достатню рівномірність та постійність рівня освітленості у виробничих приміщеннях, щоб уникнути частой переадаптації органів зору;
- не створювати засліплювальної дії, як від самих джерел освітлення, так і від інших предметів, що знаходяться в полі зору;
- не створювати на робочій поверхні різких та глибоких тіней (особливо рухомих);
- забезпечений достатній для розрізнення деталей контраст поверхонь, що освітлюються;
- повинно бути надійним та простим в експлуатації, економічним та естетичним.

Штучне освітлення виробничих приміщень поділяють на робоче, місцеве і аварійне [21]. Інтенсивність робочого освітлення, згідно СНиП 11-4-79 «Естественное и искусственное освещение», для різних ділянок виробничого приміщення зведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Інтенсивність робочого освітлення для різних ділянок виробничого приміщення

Найменування обладнання і приміщень	Інтенсивність освітлення, лк
Рівномірне робоче.	100
Пульти керування (комбіноване).	540
Вимірювальні прилади, вказівники рівня, теплові щити.	50
Димососне, вентиляційне та компресорне устаткування, прилади автоматики, прилади керування.	40
Коридори, сходи.	10
Аварійне освітлення.	6

Аварійне освітлення живиться від загальної електроосвітлювальної мережі (джерелом є акумуляторна батарея). Світильники аварійного освітлення мають спеціальне пофарбування.

Контроль освітленості виробничих приміщень проводиться раз на три місяці.

Для зниження рівня шумів і вібрацій застосовується раціональне планування приміщень, при якому джерело шуму або ізольоване звукопоглинальними кожухами і капотами, або відокремлене від працівників пересувними звукопоглинальними перегородками. Крім того стіни приміщень обладнуються звукопоглинальним личкуванням. електродвигуни та інше вібруюче обладнання має бути встановлене на гумових або пружинних підкладках-амортизаторах; з'єднання вентиляторів і повітропроводів на гнучких вставках.

Загальний рівень шуму становить 75...78дБа, а загальний рівень вібрації – 85 дБ, що не перевищує допустимі значення (ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ «Вибрационная безопасность. Общие требования.» та ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности.»).

Для запобігання механічному травматизму від рухомих (обертових) частин обладнання та нагрітих елементів конструкцій застосовуються різноманітні капоти, екрани, огороження, що унеможливають безпосередній

контакт устаткування із частинами тіла працівника.

Пожежо- та вибухобезпека. Протипожежна профілактика передбачає заходи по попередженню та ліквідації пожеж, включаючи обмеження сфери розповсюдження вогню та забезпечення успішної евакуації людей та майна із приміщень, які горять.

Улаштування на території підприємства складів для зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин виконуються із суворим дотриманням протипожежних вимог, згідно ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования.».

Всі виробничі приміщення обладнуються протипожежними щитами, засобами пожежогасіння планами евакуації, інструкціями та знаками безпеки [21, 22, 23].

Регулярно повинні проводитися інструктажі з протипожежної безпеки і об'єктові тренування з евакуації та уміння використовувати засоби пожежогасіння.

Розрахуємо необхідну мінімальну кількість води на 3-годинне пожежогасіння, яка має бути доступною, у разі виникнення пожежі.

4 Розрахунок необхідної мінімальної кількості води на 3-годинне пожежогасіння

Витрати води на внутрішнє пожежогасіння становлять $n_{\text{внутр.}} = 5$ л/с. Витрата води на зовнішнє пожежогасіння становить $n_{\text{зовн.}} = 10$ л/с (згідно із паспортом виробничого приміщення).

Розрахований запас води можна обчислити за співвідношенням:

$$Q = t \cdot n, \quad (1)$$

де t – розрахунковий час пожежогасіння, с; n – норма витрат води на пожежогасіння.

Оскільки розрахунок проводиться для 3-годинного гасіння, то

$$t = 3600 \text{ с/год.} \cdot 3 \text{ год.} = 10800 \text{ с.}$$

А, враховуючи можливість одночасного виникнення необхідності й у внутрішньому, й у зовнішньому пожежогасінні,

$$n = n_{\text{внутр.}} + n_{\text{зовн.}} = 5 \text{ л/с} + 10 \text{ л/с} = 15 \text{ л/с}.$$

Тепер, підставивши значення у співвідношення (1), одержуємо:

$$Q = 10800 \text{ с} \cdot 15 \text{ л} = 162000 \text{ л} = 162 \text{ м}^3.$$

Враховуючи наявність стандартних ємностей, що серійно випускаються промисловістю, і, резервуючи невеликий запас води, встановимо ємність (цистерну) об'ємом $V = 200 \text{ м}^3$.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

Для оцінки економічної ефективності застосування частотно-регульованого асинхронного електропривода для створення енергозберігаючої системи пневмотранспортування продукції борошномельних підприємств використовувалися ряд показників, які в розрахунках використовують дисконтування і широко застосовуються в сучасних ринкових відносинах. До таких показників відносяться:

- Чистий приведений дохід (NPV);
- Індекс рентабельності (PI);
- Внутрішня норма доходності (IRR);
- Строк окупності (PP).

Як базу для порівняння прийнято основні технічні засоби, що використовуються в типових технологіях агропромислового комплексу.

Ціни для визначення економічної ефективності взяті на період 2021 року як середні по Україні.

Перелік обладнання діючого і запропонованого, а також його ціни приведені в таблиці 1

Річна вартість заощадженої електричної енергії для виконання технологічного процесу визначалась за виразом:

$$C_e = \frac{P_{НОМ} \cdot \gamma_e k_T t_p}{\eta_{НОМ}}, \quad (1)$$

де $P_{НОМ}$ – номінальна потужність електроприводу, кВт;

$\gamma_e = (A_n - A_p) / A_n$ – середнє відносне збереження електроенергії після впровадження регульованого електропривода;

A_n - середньо - річне споживання електричної енергії при діючій технології, кВтгод;

A_p - середньо - річне споживання електричної енергії при застосуванні регульованого електроприводу, кВтгод;

k_T – тарифна ставка електроенергії, грн/кВт·год;

$\eta_{НОМ}$ – номінальний ККД;

t_p – час роботи.

$$C_e = \frac{7,5 \cdot 0,4 \cdot 0,3688 \cdot 2560}{0,875} = 3237 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.1. Перелік обладнання і його вартість.

№ п/п	діюче обладнання		запропоноване обладнання	
	Назва і тип	Ціна ,грн.	Назва і тип	Ціна, грн.
1	Електродвигун АИР132М2	1650	Електродвигун АИР112М2	1125
2	Вентилятор ЦП - 30	2700	Вентилятор ВД №4	1500
3	Автоматичний вимикач ВА51Г25-34	38	Автоматичний вимикач ВА51Г25-34	38
4	Магнітний пускач ПМЛ – 2230002Б	37	Частотний перетворювач OMRON серія 3G3HV	5480
Всього		4425	Всього	8143

Річний технологічний ефект визначався з виразу:

$$C_m = (G_n - G_c) \cdot v \cdot n \quad , \quad (2)$$

де G_n – кількість виробленої продукції за зміну при запропонованому варіанті, кг;

G_c – кількість виробленої продукції за зміну при діючому варіанті, кг;

v – вартість продукції, грн./кг.;

n – річна кількість змін.

$$C_m = (4795 - 4774) \cdot 1.153 \cdot 320 = 7749 \text{ грн.}$$

Чистий приведений дохід (NPV) визначається за формулою:

$$NPV = \sum_0^t \left[\frac{P_n}{(1+E)^t} \right] - K \quad , \quad (3)$$

де t – період від моменту впровадження проекту до моменту визначення його економічної ефективності; E – постійна норма дисконту (прибутку на капітал); P_n – річні грошові надходження протягом n – років; K – сума дисконтованих капітальних вкладень.

Індекс рентабельності (PI) визначається із виразу:

$$PI = \sum_0^t \left[\frac{P_n}{(1+E)^t} \right] : K \quad . \quad (4)$$

При позитивному значенні індексу прибутковості ($PI \geq 1$) впровадження проекту є ефективним.

Внутрішня норма доходності (IRR) визначається із виразу:

$$IRR = E_1 + [NPV_{E_1} : (NPV_{E_1} - NPV_{E_2})] \cdot (E_2 - E_1) \quad . \quad (5)$$

Практичне застосування цього показника зводиться до того, що в процесі аналізу вибирається два значення ставки дисконту $E_1 < E_2$ таким чином, щоб в інтервалі (E_1, E_2) функція $NPV = f(E)$ змінювала своє значення з “+” на “-” або навпаки і характеризує максимально допустимий відносний рівень витрат, які мають місце при реалізації інвестиційного проекту.

Економічні результати впровадження систем регулювання швидкісних режимів розраховуються за формулою:

$$P_n = C_e + C_m \quad , \quad (6)$$

де C_e – вартість заощадженої енергії; C_m – вартість заощадженої продукції.

$$P_n = 3237 + 7749 = 10986 \text{ грн.}$$

Капітальні вкладення в даному випадку будуть тільки в першому етапі експлуатації і розраховуються за формулою:

$$K = B_{cp} + B_M \quad , \quad (7)$$

де B_{cp} – вартість системи регулювання; B_M – вартість електромонтажних робіт.

$$K = 8143 + 1629 = 9772 \text{ грн.}$$

Норма дисконту приймається постійною і рівна $E = 0,2$.

Термін окупності – мінімальний часовий інтервал (від початку здійснення проекту), за межами якого інтегральний економічний ефект стає і в подальшому залишається позитивним і визначається за такою формулою:

$$PP = \frac{K}{P_c} \quad (8)$$

де P_c – щорічний середній чистий прибуток.

$$PP = \frac{9772}{9155} = 1 \text{ р. 1 міс.}$$

Згідно (3) NPV – дисконтована вартість набуває відповідних значень (рис. 2.)

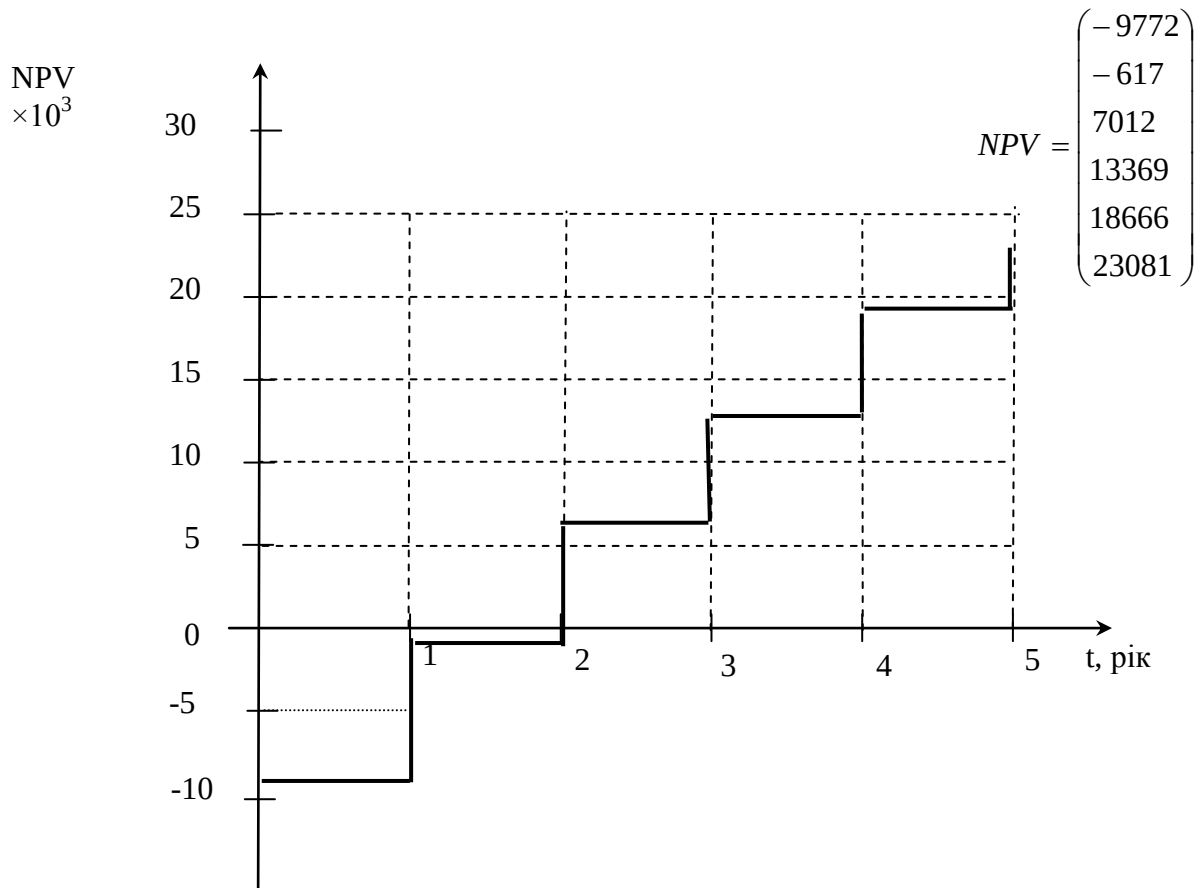


Рис. 2. Чистий дисконтований прибуток (NPV) залежно від тривалості розрахункового періоду окупності. NPV реалізує поняття вартості грошей у часі.

Внутрішня норма прибутковості при терміні один рік становить більше встановленої норми дисконту, тим самим показуючи, що інвестиції в даний проект виправдані.

Індекс прибутковості визначений згідно (4) по роках приведено на рис 3.

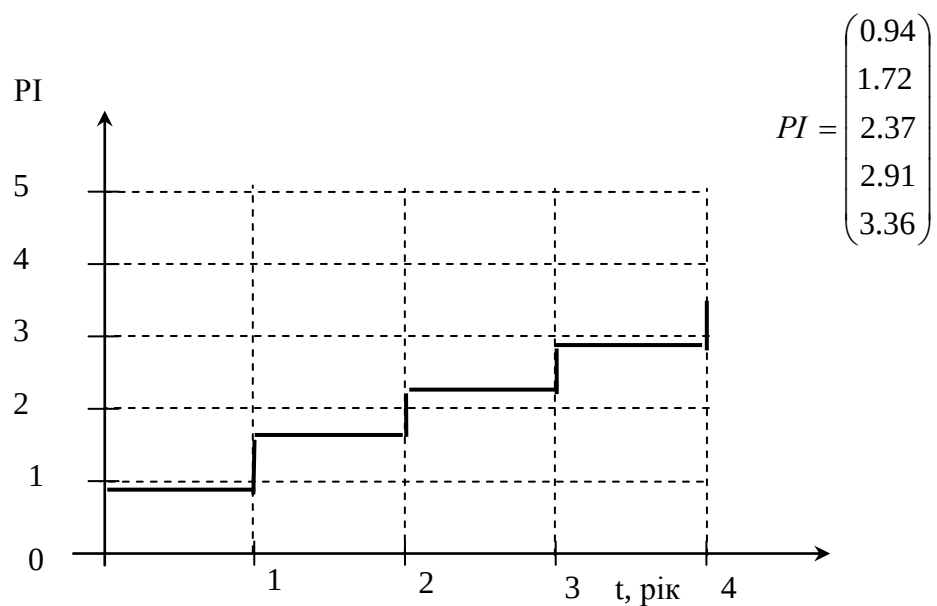


Рис. 3. Індекс прибутковості проекту.

У відповідності до рис. 3 індекс прибутковості становить 3.36, тобто проект є прибутковим.

Таблиця 2 Енергетичні характеристики системи електрообладнання пневмотранспорту.

№ п/п	Порівняльні показники	Системи електрообладнання	
		діюча	запропонована
1	Встановлена потужність, кВт	11	7.5
2	Річне споживання електроенергії, кВт год	23712	14352
3	Діапазон регулювання частоти вентиляційної установки, об/хв	2900	2155 – 2990

Таблиця 3. Показники економічної ефективності енергозберігаючої системи.

№ п/п	Показники економічно ефективності	Значення показників
1	Річна вартість заощадженої енергії	3237 грн.
2	Річний технологічний ефект	7749 грн.
3	Чистий приведений дохід (NPV)	23082 грн.
4	Індекс рентабельності (PI)	3.36
5	Внутрішня норма доходності (IRR);	117%
6	Строк окупності (PP).	1 рік 1 місяць

На основі проведених розрахунків та порівнянь можна зробити наступний висновок, що застосування регульованого електроприводу в пневмотранспортній установці борошномельних підприємств, дає економію електричної енергії до 40%, а термін окупності нового обладнання становить 1 рік 1 місяць.

Економічний ефект від впровадження регульованого електроприводу склав 3237 грн. Економічний ефект від підвищення якості ведення технологічного процесу і зменшення втрат продуктів помолу складає 7749 грн.

