

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра "Автоматизації виробничих процесів"

"Допущено до захисту"

Зав.кафедрою АВП

к.т.н., доцент

_____ Дідик О.К.

" ____ " _____ 2025р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему

"Система автоматичного керування повітряним транспортером"

"Automatic control system for air conveyor"

Виконав: здобувач вищої освіти

IV курсу, групи АК-22мб

ОПП «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

спеціальність 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

_____ Дмитро КИРИЛОВ

" ____ " _____ 2025р.

Керівник роботи

професор, канд. техн.наук

_____ Віктор КАЛІЧ

" ____ " _____ 2025р.

Рецензент _____

ЗМІСТ

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП..... | 2 |
| 1 Призначення та область застосування повітряного транспортера..... | 4 |
| 1.1. Опис технологічного процесу виготовлення та використання ПЕТ-пляшок..... | 4 |
| 1.2. Опис лінії розливу..... | 9 |
| 1.3. Транспортувальні лінії для пляшок..... | 10 |
| 1.4. Опис повітряного транспортера..... | 11 |
| 2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу..... | 17 |
| 2.1 Методи частотного регулювання швидкості..... | 17 |
| 2.2 Вибір типу електроприводу..... | 24 |
| 2.3 Вимоги до обладнання системи керування..... | 26 |
| 3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій..... | 28 |
| 3.1 Розрахунок і вибір силового обладнання..... | 28 |
| 3.2 Розробка функціональної схеми системи керування..... | 32 |
| 3.3 Розробка структурної схеми системи керування..... | 33 |
| 3.4 Розрахунок статичних характеристик системи керування..... | 37 |
| 3.4.1 Характеристика в розімкнутій системі..... | 37 |
| 3.4.2 Характеристика в замкненій системі..... | 42 |
| 3.5 Виведення математичної моделі двигуна..... | 43 |
| 3.6 Розрахунок схеми заміщення..... | 47 |
| 4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи..... | 50 |
| 4.1 Дослідження динаміки системи керування..... | 50 |
| Висновок..... | 57 |
| Література..... | 58 |

ВСТУП

Пластикова тара з поліетилентерефталату (ПЕТ) є однією з найпоширеніших у світі для фасування напоїв та інших рідких харчових продуктів. Вона приваблює своєю доступною ціною, невеликою вагою, прозорістю та довговічністю. Завдяки хорошій герметичності та здатності набувати різноманітних форм, ПЕТ-пляшки стали провідним рішенням у сфері харчового пакування.

Зростання ринку рідких харчових продуктів та поява великих гравців у сфері виробництва води і напоїв зумовили підвищений попит на устаткування для виготовлення ПЕТ-пляшок. На етапі становлення цього сегмента особлива увага приділялася напівавтоматичним лініям для видування і розливу, які, попри розвиток технологій, залишаються затребуваними й нині.

Необхідна площа для встановлення такого обладнання є досить компактною, а фінансові витрати на його придбання – помірними.

Завдяки цьому подібні технічні рішення особливо підходять для невеликих виробництв, що активно з'являються на внутрішньому ринку.

Серед основних вузлів лінії виготовлення ПЕТ тари та розливу продукції важливу роль відіграє повітряний транспортер. У межах цього дипломного проєкту передбачено створення електромеханічної системи автоматизованого управління його роботою. Основна увага приділяється регулюванню швидкості обертання асинхронного двигуна шляхом впровадження частотного регулювання за допомогою інвертора.

Електропривод – це електромеханічна система, що включає електродвигун, пристрої керування, перетворення та передачі енергії. Його основне завдання – трансформація електричної енергії у механічний рух з метою приводу виконавчих механізмів обладнання та здійснення контролю над цим рухом.

Електропривод забезпечує реалізацію двох ключових завдань: трансформацію енергетичного потоку в механічну дію та формування

керуючих сигналів для ефективного управління споживанням енергії згідно з вимогами виробничого процесу конкретного обладнання.

На початкових етапах розвитку регульованих електроприводів швидкість обертання змінювали, переважно коригуючи кінематичний ланцюг механічної частини, зокрема, шляхом регулювання передаточного числа редуктора між двигуном і робочим механізмом. Проте така методика мала суттєві мінуси: обмежену точність налаштування, складність у досягненні плавного переходу між режимами та недостатню надійність системи в цілому.

Раніше для створення регульованого електропривода змінного струму використовували схеми з додатковими резисторами у ланцюгах ротора або статора. Проте така реалізація виявилася незручною через складність обслуговування, великі габарити та низьку ефективність, тому вона не здобула широкого поширення в промисловості.

Електроприводи змінного струму, де регулювання здійснювалося шляхом зміни напруги, не стали масовим рішенням через їхні м'які механічні характеристики та обмежену ефективність з техніко-економічної точки зору. У зв'язку з цим регулювання частоти стало основним методом керування швидкістю обертання двигунів. До середини ХХ століття для цього застосовували електромеханічні перетворювачі частоти, однак через їхню складність та громіздкість вони не набули широкого впровадження в промисловості.

Використання тиристорних перетворювачів частоти дало змогу розробити ефективні системи регульованого електропривода змінного струму з твердими механічними характеристиками та широким діапазоном керування швидкістю. Такі системи (типу ТПЧ-Д) ґрунтувалися на застосуванні асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором. Проте одним із недоліків тиристорних ПЧ була потреба у використанні додаткових схем для примусового виключення тиристорів. Із розвитком технологій, зростанням надійності та зниженням ціни напівпровідникових елементів, усе більшого поширення набули перетворювачі, побудовані на IGBT транзисторах, які позбавлені зазначеного недоліку.

1 Призначення та область застосування повітряного транспортера

1.1. Опис технологічного процесу виготовлення та використання ПЕТ-пляшок

Для виготовлення пластикових пляшок застосовують поліетилентерефталат – полімерний матеріал, що слугує основною сировиною у виробництві тари типу ПЕТ.

Поліетилентерефталат уперше синтезували в 1941 році у Великобританії працівники компанії "British Calico Printers", де його створили як штучне волокно. Згодом права на комерційне застосування цього матеріалу викупили корпорації "DuPont" і "ICI", які надалі передавали ліцензії на його виробництво різним промисловим підприємствам по всьому світу.

До 60-х років поліетилентерефталат здебільшого застосовували у текстильній промисловості для виробництва волокон. Згодом він почав активно використовуватись у виготовленні плівкової упаковки. У 70-х роках компанія DuPont створила першу пляшку з ПЕТ, прагнучи розробити пластикову альтернативу склу для тари під газовані та негазовані напої. (напоїв). Станом на сьогодні, однією з провідних сфер використання ПЕТ-грануляту є виробництво упаковки для харчових продуктів. Першими, хто запровадив промислове обладнання для видуву тари, стали фірми "Sidel" із Франції та "Krupp Corpoplast" із Німеччини.

Пластик ПЕТ має низку важливих переваг, що роблять його популярним у пакувальній промисловості. Наприклад, стандартна пляшка з цього матеріалу об'ємом 0,5 л важить лише близько 28 г, тоді як скляна аналогічної місткості може сягати ваги 350 г. Матеріал має природну прозорість, що створює привабливий вигляд тари – вона здається чистою,

сучасною і відповідає естетичним очікуванням споживачів. За потреби ПЕТ можна легко пофарбувати, наприклад, у відтінки зеленого чи коричневого, що дає змогу адаптувати дизайн під стиль бренду. Порівняно зі склом, пластикові пляшки значно стійкіші до пошкоджень під час транспортування, адже не б'ються. При цьому ПЕТ так само, як і склотара, підлягає повному вторинному переробленню. Сьогодні ПЕТ-упаковка сприймається не лише як альтернатива склу, а як платформа для впровадження нових дизайнерських рішень і освоєння нових ніш на ринку.

Одним із суттєвих недоліків тари з поліетилентерефталату (ПЕТ) є недостатні бар'єрні характеристики. Така упаковка не здатна ефективно затримувати проникнення ультрафіолетового випромінювання та молекул кисню всередину пляшки, а також пропускає вуглекислий газ назовні. У результаті відбувається зниження якості напою та скорочення терміну його придатності. Це пов'язано з тим, що структура ПЕТ не здатна надійно стримувати дрібні газові молекули, які легко проходять крізь полімерні ланцюги. Тривалість зберігання продукту в такій тарі варіюється залежно від умов і регіональних стандартів виробництва.

Багатошарова пляшка.

Багатошарова технологія виготовлення тари наразі вважається однією з найпоширеніших і перевірених практикою. Пляшки, створені за цією методикою, мають структуру, подібну до листового тіста: між шарами поліетилентерефталату вміщено один або кілька прошарків спеціального полімеру. Ці вставки виконують роль бар'єру – або блокують проникнення газів та ультрафіолетового випромінювання (пасивна функція), або активно нейтралізують кисень (активна функція). Внутрішню й зовнішню поверхні тари зазвичай формують з чистого ПЕТ. Загальна кількість плівкових шарів змінюється в межах трьох-п'яти, залежно від конструкції бар'єрного захисту. Основним мінусом таких пляшок залишається їх вартість – виробниче обладнання для створення багатошарової тари вдвічі перевищує за ціною техніку для одношарових виробів.

Одним із суттєвих мінусів багатошарової технології виготовлення ПЕТ-пляшок є складність їх подальшої утилізації. Водночас у таких країнах, як Швеція, Німеччина, Швейцарія, Австралія й Нова Зеландія, застосовується тришарова конструкція, яка дає змогу безпечно використовувати вторинну сировину: перероблений поліетилентерефталат розміщується між шарами нового матеріалу. Хоча захисні властивості тари при цьому не покращуються, з точки зору екології це рішення виглядає цілком обґрунтованим.

Виробництво ПЕТ-пляшок

Активне впровадження ПЕТ-тари, як сучасного та перспективного виду упаковки, тісно пов'язане з удосконаленням технологій і запуском новітнього обладнання для формування пляшок і їхнього наповнення. Сучасні машини характеризуються високим рівнем автоматизації: забезпечують контроль якості продукції, виявлення дефектів, гнучке налаштування параметрів під конкретні вимоги до тари або рідини, а також оснащені сенсорною системою моніторингу в реальному часі й підтримкою від виробника через мережу Інтернет.

Однією з ключових переваг використання ПЕТ-тари є можливість легкої інтеграції обладнання для її виготовлення безпосередньо у виробничий процес на підприємстві. Такий підхід значно знижує собівартість упаковки, що особливо вигідно для виробників пива, безалкогольних напоїв і води. Автоматизована система формування пляшок дозволяє подавати готову тару прямо на розлив, уникаючи потреби в окремих складах і витратах на логістику.

Крім того, виробник може самостійно задавати об'єм тари (найчастіше – від 0,5 до 3 літрів) і створювати унікальний зовнішній вигляд пляшки. Завдяки малій вазі та ударостійкості ПЕТ-пляшок, відпадає необхідність у використанні ящиків – достатньо лише поліетиленової плівки або навіть мінімальної упаковки. Це додатково зменшує витрати на пакування, мийку тари та транспортування. Зараз на ринку з'являються ПЕТ-

пляшки великої місткості, які використовуються для фасування олії чи питної води – їх об'єм сягає 10–20 літрів.

Преформи

Пляшки з ПЕТ матеріалу створюють шляхом технології розтяжного формування з попереднім нагрівом та внутрішнім надуванням (ISBM). Цей метод за роки активно вдосконалювали, що дозволило досягти високої стабільності, передбачуваності та точності в управлінні процесом.

ISBM являє собою процес у два етапи: спочатку формується преформа – за формою вона нагадує подовжену скляну колбу. Потім її нагрівають до пластичного стану, після чого за допомогою стисненого повітря преформу роздувають у готову пляшку. Шийці пляшки надають остаточної форми ще на етапі виготовлення заготовки, тому в подальшому формується лише основна частина тари. Характерною деталлю кожної ПЕТ-пляшки є кільце під горлечком – його виготовляють разом із преформою. Воно розміщується нижче різьби і виконує функції фіксації при транспортуванні, а також допомагає автоматизованим системам переміщувати заготовки на етапі роздування.

Виробництво ПЕТ тари здійснюється за допомогою двох основних типів обладнання: однофазного та двофазного. У першому варіанті увесь процес – від формування преформи з поліетилентерефталатних гранул до фінального видування пляшки – відбувається в одній установці. Завдяки цьому етапи не розділяються в часі, і заготовки, як правило, надходять до етапу видування ще не встигнувши охолонути.

У двофазному методі виготовлення спочатку формують преформу на одному обладнанні, після чого її або переміщують на інший автомат для видування тари, або тимчасово зберігають на складі до подальшого використання. Такий підхід часто виправданий, адже преформи займають у багато разів менше місця, ніж повноцінні пляшки – приблизно в 12 разів. Крім того, з однієї стандартної заготовки можна сформувати пляшки різної форми й об'єму. Оскільки етап видування триває значно менше часу, ніж

виготовлення преформи, це дозволяє суттєво підвищити ефективність виробничої лінії, особливо за умови наявності достатнього запасу преформ. У середньому одна машина здатна випускати від 1200 до 1400 одиниць тари за годину.

На ефективність роботи обладнання впливає кількість видувних комірок у конкретному пристрої, а також тривалість одного виробничого циклу. Цей час, своєю чергою, обумовлений товщиною стінок преформи та періодом її охолодження.

Виробник напоїв, що обрав двоетапну схему виготовлення ПЕТ тари, має змогу або організувати власне виробництво преформ, або закуповувати їх у сторонніх постачальників. Останній варіант забезпечує більшу гнучкість на старті, позбавляючи необхідності ретельно контролювати якість та вологість сировини, що впливає на придатність її до переробки. До того ж, у майбутньому компанія може перейти на самостійне виготовлення преформ, якщо виникне така потреба. Закупівля готових преформ також спрощує зміну їх характеристик – форми, маси, розмірів – без потреби у витратах на переналаштування або придбання нового оснащення для видувного обладнання.

У стандартній високошвидкісній ротаційній машині SBM типу, преформи подаються з основного бункера до системи подачі за допомогою вертикального підйомника. Після цього вони потрапляють у розподільний вузол, де автоматично орієнтуються у правильне положення. Далі по спіральному транспортному механізму преформи піднімаються до робочого блоку машини. Спеціальна спіральна подача забезпечує точне положення кожної преформи та спрямовує її на подаюче зубчасте колесо, що передає її в зону нагріву.

Кожна заготовка фіксується за комірець за допомогою спеціальних захватів і в перевернутому стані подається на обертову карусель, яка переміщує її через нагрівальну камеру. У середині камери преформи безперервно обертаються навколо своєї осі для рівномірного прогріву. Після

виходу з нагрівального відділення, де температура забезпечує достатню пластичність матеріалу, вони залишаються в короткочасній зоні витримки для стабілізації теплового режиму.

Після термостабілізації преформи надходять у відкриті прес-форми, які можуть бути розташовані збоку або під камерою нагріву. Як тільки форма закривається, преформа механічно витягується спеціальним стрижнем, який проходить через горловину та рухається донизу, розтягуючи її до необхідного розміру. Глибина занурення стрижня встановлюється відповідно до параметрів пляшки.

У фінальній стадії надування, яка триває менш як секунду, на преформу подається стиснене повітря під високим тиском, що надає пляшці остаточну форму. Після охолодження виріб вивільняється з прес-форми, і цикл повторюється.

1.2 Опис лінії розливу

Сучасні підприємства активно впроваджують автоматизацію виробничих процесів задля підвищення темпів виготовлення продукції та збільшення її обсягів. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив помилок людини, що особливо важливо для забезпечення стабільної якості при серійному випуску. Аналогічні рішення застосовують і на заводах, які спеціалізуються на фасуванні напоїв у пластикову тару. Автоматизована лінія розливу зазвичай включає такі основні елементи:

- сиропне відділення;
- видувна машина
- повітряний транспортер;
- машина розливу;
- парамікс;
- пляшковий транспортер;
- етикетировочна машина;

- пакувальна машина;
- палетизатор;
- машина обмотки;
- палетний транспорт.

У сиропному цеху розпочинається процес виготовлення: цукор розчиняється в гарячій очищеній воді для отримання прозорого сиропу. До отриманої суміші, згідно з рецептурою, додають відповідні інгредієнти напою. Далі сироп направляється у спеціальні ємності для ретельного перемішування, після чого проходить термічну обробку та надходить у купажні резервуари. На етапі параміксу сироп у точних пропорціях змішують із попередньо дегазованою водою та насичують вуглекислим газом. Завершальний етап – передача готового напою на лінію розливу.

Пляшки з ПЕТ виготовляються методом видування із попередньо сформованих заготовок у спеціалізованих машинах. Готові ємності переміщуються повітряним транспортером до розливної лінії, де проходять етапи очищення на ринзері, наповнення напоєм і герметичне закупорювання. Далі продукція перевіряється на відповідність рівню наливу й прямує до обладнання для нанесення етикеток. Після маркування дати виготовлення за допомогою друкувального пристрою, пляшки транспортуються до пакувального вузла Kisters, де відбувається формування партій відповідно до заданого асортименту.

Готову продукцію обгортають у термозбіжну плівку, а за потреби – додатково розміщують на картонних піддонах. Упаковані вироби подаються на палетизатор для формування палет, які далі обгортаються плівкою в обмотувальній машині. Завершальний етап – доставка палет з продукцією на склад, звідки товари потрапляють до торговельних точок.

1.3 Транспортувальні лінії для пляшок

Після виготовлення пляшка повністю підготовлена до подальших технологічних етапів, зокрема – до розливу продукції. Через надзвичайно малу вагу порожні ПЕТ-пляшки є нестабільними у вертикальному положенні, що було враховано при конструюванні обладнання для транспортування тари на розливні ділянки. Завдяки легкості, переміщення здійснюється шляхом захоплення за спеціальне кільце на горловині, що спрощує узгодження з розливним устаткуванням. Це забезпечує постійну відстань від горловини до зони наливу, що однакова для всіх ємностей певної серії.

Крім традиційних механічних систем переміщення, часто застосовують пневматичне транспортування: потік повітря направляєтся уздовж спеціальних напрямних з низьким коефіцієнтом тертя, утворюючи підйомну силу під кільцем горловини, що й дозволяє стабільно пересувати тару. При цьому пляшка не торкається бокових поверхонь, що знижує ризик механічних пошкоджень. Такий спосіб транспортування активно використовується на більшості сучасних виробничих ліній. Для точного регулювання руху система керування транспортерами автоматично налаштовує потужність подачі повітря від вентилятора.

1.4 Опис повітряного транспортера

Повітряний транспортер виконує функцію з'єднання між видувною установкою Віомах 12С SHІb та обладнанням FR-EM 49, яке призначене для миття та санітарної обробки пляшок перед подачею їх на розливну частину лінії. Конструкція транспортера модульна – він складається з повторюваних секцій, що дозволяє масштабувати його залежно від потреб виробництва. У цьому випадку передбачено дев'ять таких сегментів, однакових за будовою, тому достатньо проєктного розрахунку лише одного елемента.

Транспортер застосовується для переміщення ПЕТ-пляшок, які мають фланцеве кільце на шийці. Пересування ємностей відбувається у

підвішеному положенні за допомогою напрямних, а рух створюється повітряними форсунками, що живляться потужними вентиляторами.

Ефективність функціонування всієї лінії розливу значною мірою залежить від правильного налаштування системи керування транспортуванням тари. Конструктивна схема та загальний вигляд повітряного транспортера наведені на рис.1.1.

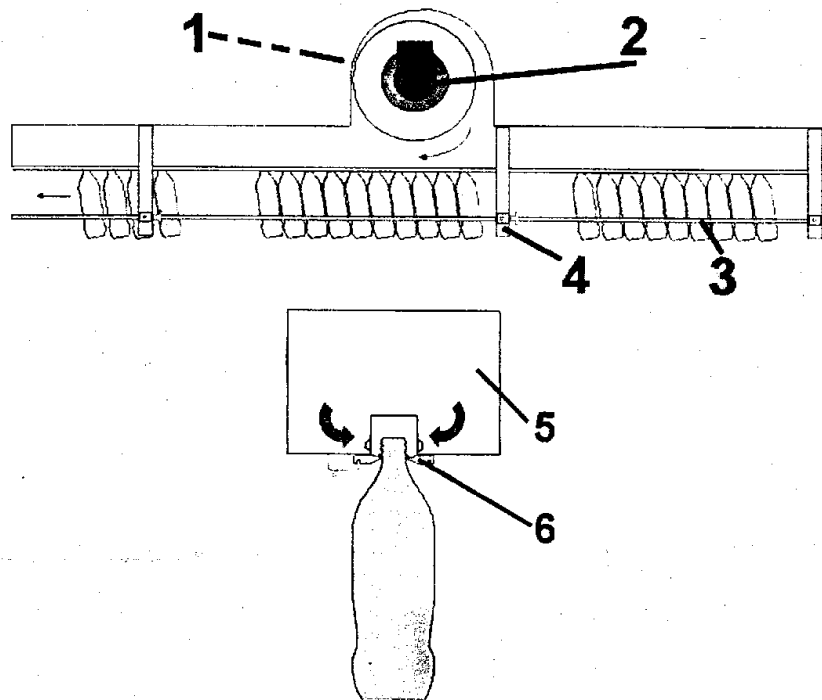


Рисунок 1.1 - Повітряний транспортер

На рис. 1.1 зображені:

1. Повітряний фільтр
2. Приводний двигун
3. Обмежувальні напрямні
4. Тримач обмежувальної напрямної
5. Повітряний канал
6. Напрямна рейка

Для керування електродвигунами, що встановлені на повітряному транспортері, застосовується спосіб регулювання частоти. Обертання вентилятора забезпечується безпосередньо через вал двигуна. Конструктивно

вентилятори розміщені всередині повітряного каналу. Існують дві основні схеми їх встановлення, які проілюстровано на рис. 1.2 та 1.3.

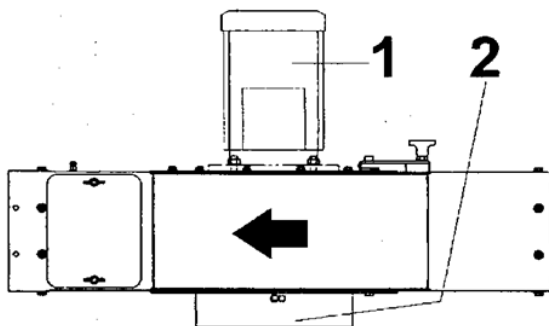


Рисунок 1.2 - Вузол привода вентилятора, привод праворуч

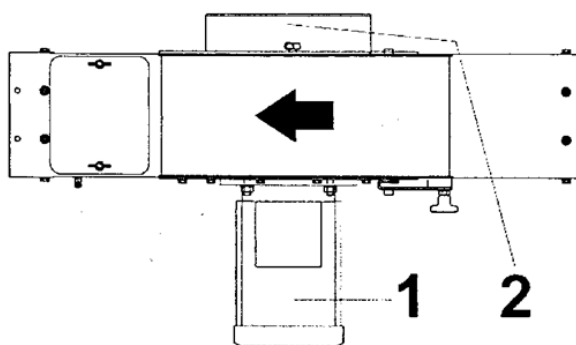


Рисунок 1.3 - Вузол привода вентилятора, привод ліворуч

На рис. 1.2 і рис. 1.3 зображені: 1. Двигун 2. Повітрязабірник.

Фільтрувальні елементи у складі повітряного транспортера встановлюються відповідно до визначеної конструктивної схеми.

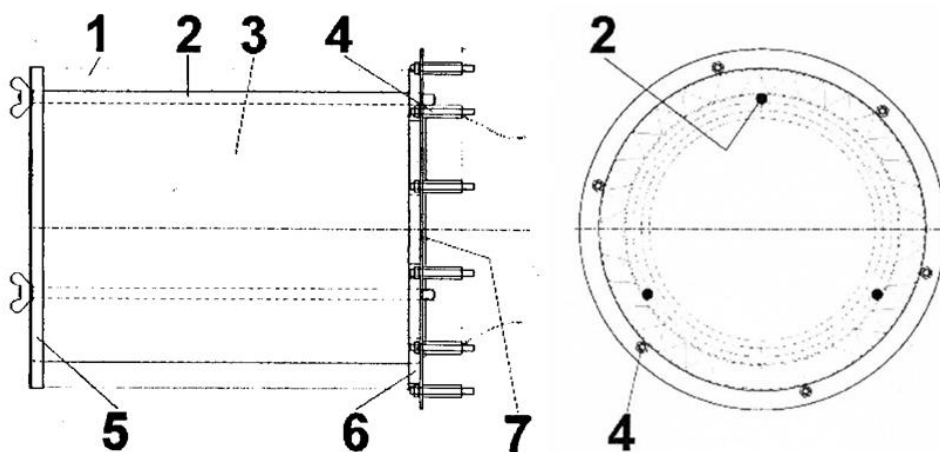


Рисунок 1.4 – Фільтр:

1 - фільтруючий елемент; 2 - розпірка; 3 - фільтр-патрон; 4 – вставка; 5 – кришка; 6 – фланець; 7 - ущільнювач

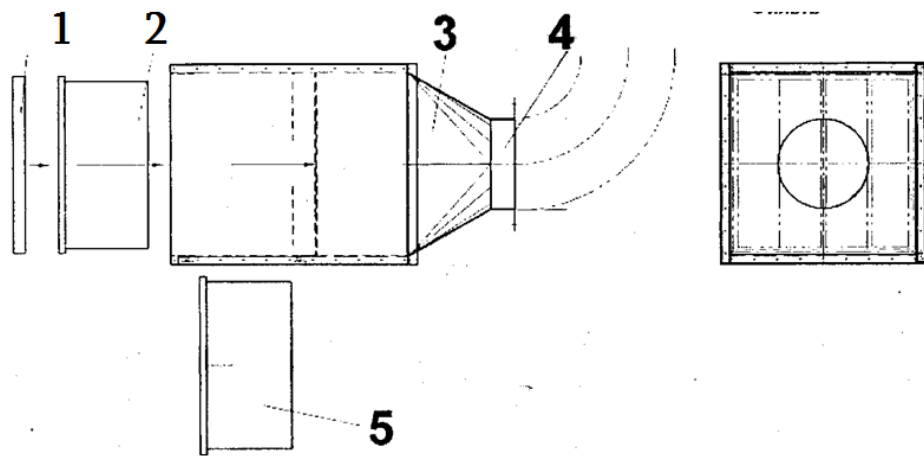


Рисунок 1.5 – Фільтр:

1 - фільтр грубого очищення; 2 - попередній фільтр; 3 – корпус; 4 - шлангове з'єднання БІЧ-ЗО; 5 - фільтр тонкого очищення

Від типу та різновиду пляшок, архітектурних особливостей приміщення й технологічних умов на виробництві залежить спосіб встановлення повітряного транспортера та його конструктивне виконання. У подальшому розглядаються варіанти таких рішень.

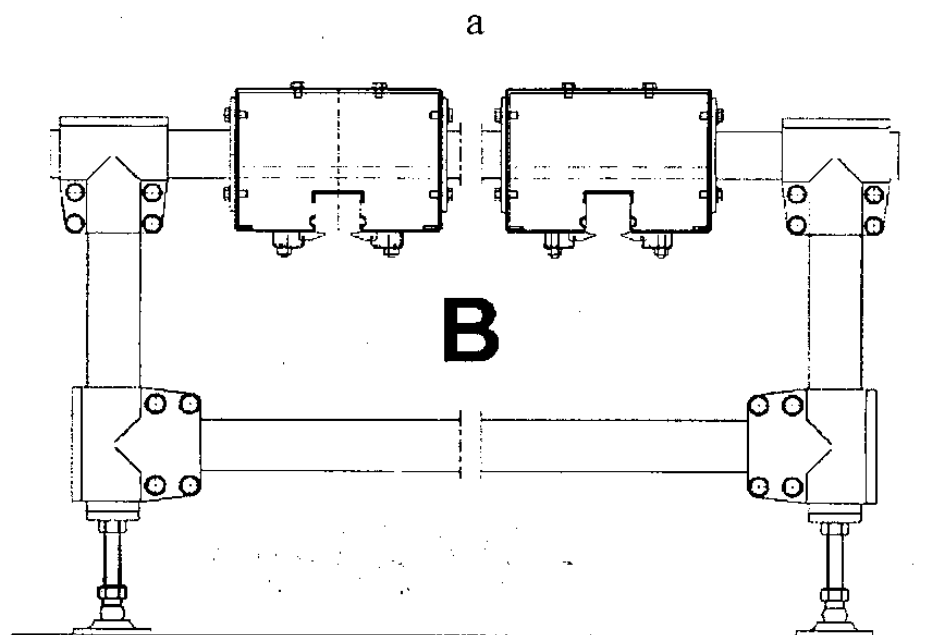
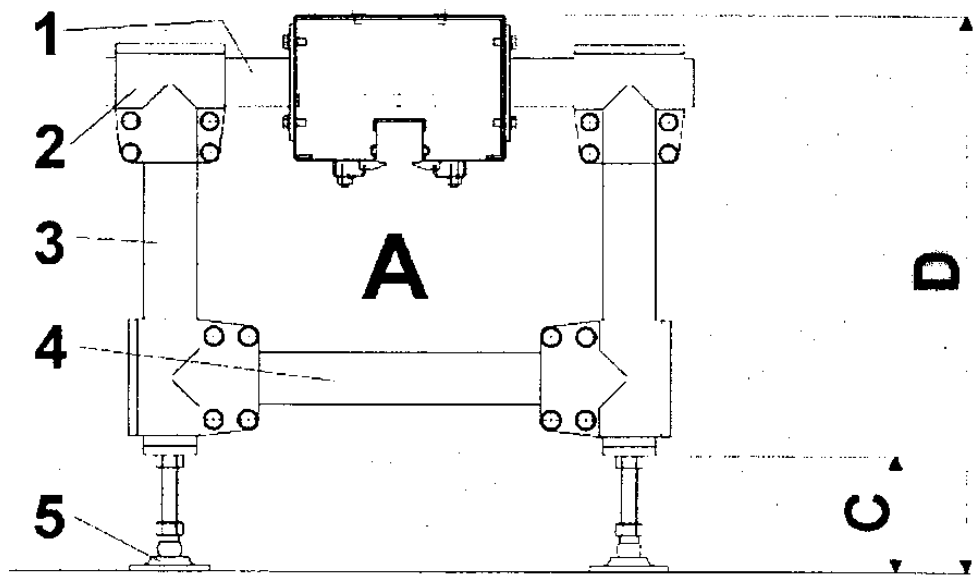


Рисунок 1.6 - Опори транспортера:

А – стандарт; В - паралельна лінійна напрямна; С - монтажна висота; D - діапазон регулювання; 1 – консоль; 2 - притискна труба; 3 - труба опори; 4 – поперечка; 5 - одинарна сферична опора із пластиковою опорною пластиною

Транспортер оснащується різними тримачами обмежувальних напрямних.

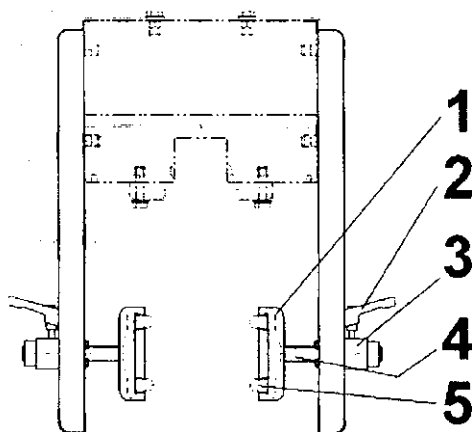


Рисунок 1.7 - Тримач обмежувальної напрямної з ручним регулюванням

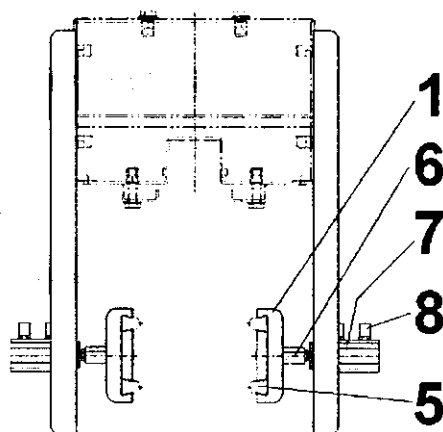


Рисунок 1.8 - Тримач обмежувальної напрямної із пневматичним регулюванням (2 формати пляшок)

1. Затискний важіль
2. Затискний елемент
3. Регулювальний болт
4. Рейка обмежувальної напрямної
5. Перехідний пристрій
6. Пневматичний циліндр
7. Шлангове з'єднання

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу

2.1 Методи частотного регулювання швидкості

Для регулювання швидкості асинхронного двигуна за допомогою частотного методу потрібно одночасно змінювати частоту живлення f_1 та напругу U_1 . Це дозволяє уникнути насичення магнітопроводу та зберегти необхідний запас потужності при перевантаженнях. У разі нехтування падінням напруги в обмотках статора, величина магнітного потоку визначається за формулою:

$$\Phi = U_1 / (4,44 W_1 K_{w1} f_1) \text{ , ,} \quad (2.1)$$

де f_1, U_1 - частота та напруга живлення обмотки статора; W_1 - кількість витків обмотки статора; K_{w1} - коефіцієнт обмотки статора.

Щоб досягти мінімального питомого масо-габаритного показника на одиницю потужності, при проектуванні електродвигуна номінальний магнітний потік Φ_H обирається наближеним до межі насичення. Це означає, що будь-яке перевищення цього значення викликає магнітне перенасичення осердя. Величина Φ_H узгоджується з паспортними параметрами – зокрема, стандартною напругою живлення U_{1H} та відповідною частотою f_{1H} .

Механічна характеристика двигуна описується уточненою формулою Клосса

$$M = \frac{2M_k(1+aS_k)}{\frac{S}{S_k} + \frac{S_k}{S} + 2aS} \quad (2.2)$$

де M_k - критичний момент; S_k - критичне ковзання; M - момент; S – ковзання.

Критичне ковзання:

$$S_k = \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}} \quad (2.3)$$

де R_1 - активний опір фази статора; R_2 - активний опір фази ротора, приведене до статора; $x_k = x_1 + x_2$ - індуктивний опір короткого замикання двигуна; x_1 - індуктивний опір фази статора; x_2 - індуктивний опір фази ротора.

Критичний момент:

$$M_k = \frac{3u_1^2}{2 \frac{2\pi f}{p_n} [R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2}]} \quad (2.4)$$

де u_1 - діюче значення напруги статора; f - частота напруги статора; p_n - кількість пар полюсів.

Зрозуміло, що під час варіації амплітуди прикладеної напруги зазнає змін лише значення критичного моменту, що ілюструється на рис. 2.1.

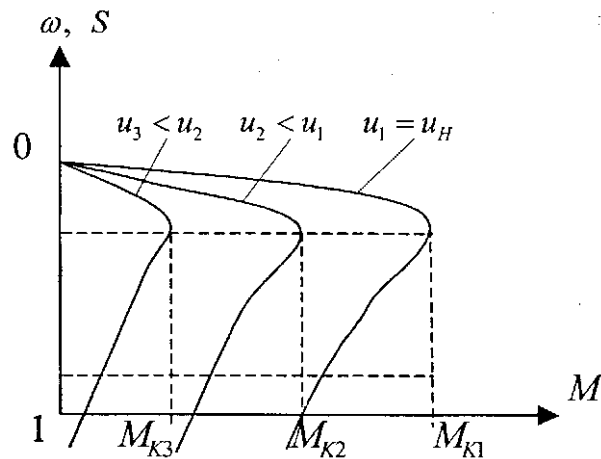


Рисунок 2.1 - Механічні характеристики електропривода при зміні амплітуди напруги живлення

У разі, коли керування швидкістю базується на зміні частоти f_1 , відповідно до формули (2.1), її дозволено лише підвищувати порівняно з номінальним значенням f_{1h} . Це необхідно для уникнення перенасичення магнітного кола електродвигуна.

Збільшення частоти приводить до пропорційного збільшення синхронної швидкості ω_c

$$\omega_c = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (2.5)$$

Це призводить до зниження значення критичного моменту M_k пропорційно до квадрата частоти, оскільки як синхронна швидкість, так і індуктивні опори обмоток ротора та статора змінюються відповідно до частоти живлення.

$$\begin{aligned} X_1 &= 2\pi f_1 L_1 \\ X_2' &= 2\pi f_1 s L_2' \end{aligned} \quad (2.6)$$

Механічні характеристики в робочому діапазоні залишаються стабільними, адже зі зростанням синхронної швидкості у такому ж співвідношенні зменшується критичне ковзання. На рис.2.2 зображено набір змодельованих механічних характеристик, які ілюструють цю залежність.

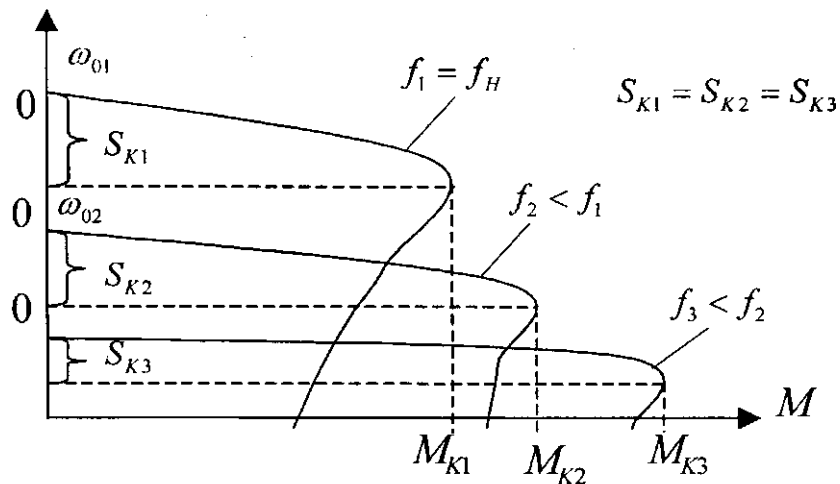


Рисунок 2.2 - Сімейство штучних механічних характеристик при зміні частоти напруги живлення

Одним із плюсів такого методу є можливість плавного регулювання швидкості обертання без впливу на жорсткість механічної характеристики. До мінусів можна віднести зниження здатності двигуна витримувати перевантаження та обмеження в керуванні – воно можливе лише при швидкостях, що перевищують номінальну.

У випадку, коли активний опір обмотки статора Rl приймається наближеним до нуля, критичний момент електродвигуна виявляється пропорційним квадрату прикладеної напруги та квадрату частоти живлення статора.

$$M_k = K \frac{U_1^2}{f_1^2}, \quad (2.7)$$

де K - коефіцієнт пропорційності.

На цій основі формулюється головний принцип частотного регулювання швидкості асинхронного електродвигуна, відомий також як правило Костенка.

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = \text{const}. \quad (2.8)$$

Відповідно до виразу (2.8), частота змінюється прямо пропорційно рівню прикладеної напруги. Така залежність дозволяє підтримувати сталий критичний момент і постійну величину номінального магнітного потоку в широкому інтервалі регулювання швидкості – від повної зупинки до максимально допустимого значення. Зазвичай ця межа збігається з номінальною швидкістю, що відповідає стандартному рівню напруги на обмотці статора. Перевищення цього рівня обмежується граничною електричною міцністю ізоляційного шару обмотки.

На рис.2.3 зображено набір штучно сформованих механічних характеристик, робочі зони яких ідуть майже паралельно одна до одної.

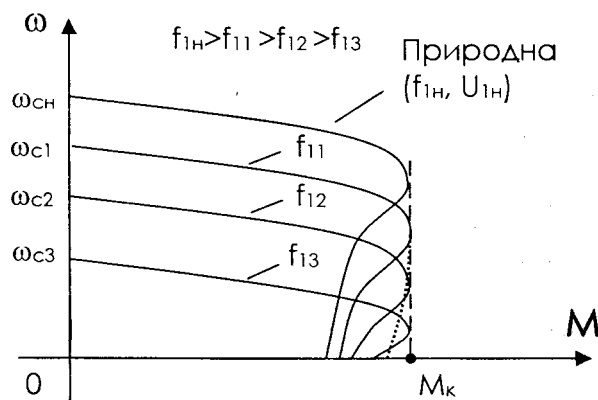


Рисунок 2.3 - Сімейство штучних механічних характеристик при зміні частоти та амплітуди живлячої напруги

За умов повільного зменшення напруги в обмотці статора, яке зазвичай ігнорується під час формулювання закону керування, це зниження вже не є У цьому режимі вплив стає малозначущим і наближається за рівнем до самої величини напруги живлення статора, що, у свою чергу, спричиняє зниження критичного моменту (що ілюструється пунктирною кривою на рис. 2.3). Щоб усунути цей недолік на малих швидкостях обертання, слід незначно зменшувати напругу, відходячи від співвідношення (2.8), або ж за допомогою замкненої системи регулювання підтримувати постійне співвідношення ЕРС статора до частоти. Це дозволяє утримати магнітний потік незмінним відповідно до виразу (2.1). Окрім того, на етапі запуску двигуна, коли частота прямує до нуля, необхідно задати початкове значення напруги U_{10} , щоб створити потрібне значення магнітного потоку Φ , як наслідок, забезпечити пусковий момент.

Пуск здійснюється зі стартової частоти в межах 3–5 Гц та відповідної їй напруги, або шляхом коригування співвідношення (2.8), що показано на рис. 2.4. У другому варіанті це співвідношення може встановлюватися як вручну, так і автоматизовано – з урахуванням динамічного моменту, необхідного для досягнення потрібного прискорення в роботі електроприводу.

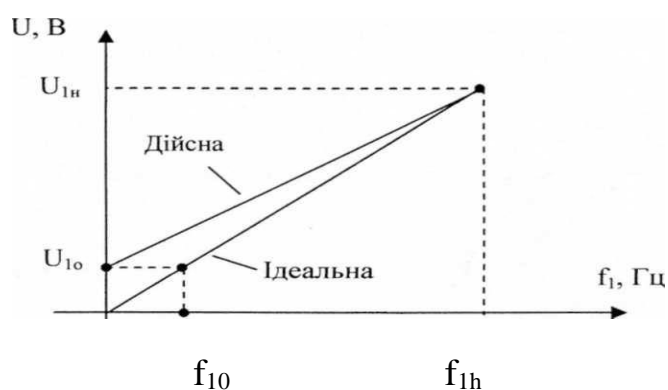


Рисунок 2.4 – Графік пуску двигуна

У більшості випадків для впровадження обраного методу регулювання застосовують частотні перетворювачі, які мають проміжну ланку постійного струму.

Загальна схема такого зображена на рис. 2.5.

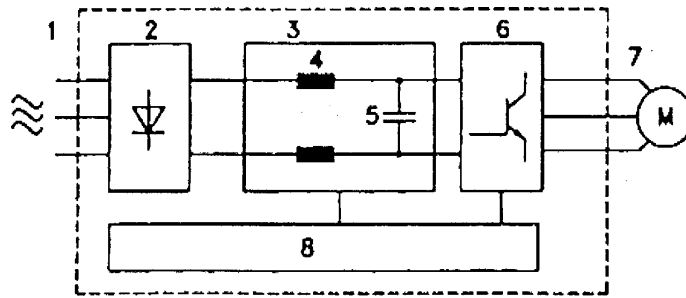


Рисунок 2.5 – Конструкція частотного перетворювача з проміжною ланкою постійного струму

Пунктами на малюнку позначені:

1. Напруга мережі

3 x 380-480 В~ 50/60 Гц.

2. Випрямляч

Трифазна схема випрямлення забезпечує перетворення змінної напруги на постійну, що дозволяє жити відповідні елементи електропривода або інші споживачі постійного струму.

3. Проміжний ланцюг

Значення напруги в цій ланці визначається за формулою: постійна напруга дорівнює кореню квадратному з двох, помноженому на ефективну напругу живильної мережі (в вольтах).

4. Котушки індуктивності проміжного ланцюга

Виконують функцію згладжування струму в проміжному контурі, зменшуючи навантаження на енергосистему та її елементи, зокрема трансформатори, силові кабелі, захисні запобіжники й комутаційні пристрої.

5. Конденсатор проміжного ланцюга Згладжує напругу проміжного ланцюга.

6. Інвертор

Здійснює перетворення постійної напруги у змінну з можливістю регулювання її частоти, забезпечуючи живлення споживачів змінного струму.

7. Напруга двигуна

Змінна напруга змінного струму, що залежить від напруги живлення.
Регульована частота 0,2 -132/1 -1000 Гц.

8. Плата керування

На даній платі розміщено мікропроцесорний блок, що здійснює керування інвертором та генерує послідовність імпульсів, яка дозволяє перетворювати постійну напругу у змінну з можливістю регулювання частоти. Це забезпечує керування електродвигуном у широкому діапазоні режимів.

Частотний метод регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна вважається одним із найбільш поширених. Його основна перевага полягає в можливості плавного регулювання швидкості – від повної зупинки до номінального значення – при збереженні стабільності механічної характеристики та здатності витримувати перевантаження. У відкритих системах діапазон регулювання зазвичай складає 5-10, тоді як у замкнених може перевищувати 1000. Такий режим називають зоною сталого моменту.

Основним недоліком частотного регулювання є складність реалізації системи та вартість обладнання, зокрема перетворювача частоти. Для пристроїв із моментом, який залежить від квадрату кутової швидкості (наприклад, насосів чи вентиляторів), найекономічнішим варіантом є використання квадратичного закону регулювання.

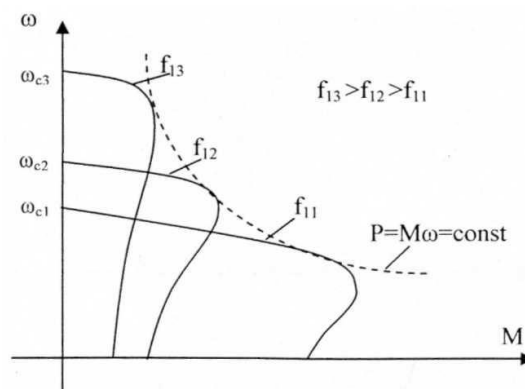


Рисунок 2.6 - Сімейство штучних механічних характеристик при законі

$$\text{керування } \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{f_{1H}}}$$

У розділі, присвяченому вибору типу електроприводу, було обґрунтовано доцільність застосування частотного регулювання для асинхронного двигуна. Такий спосіб дозволяє змінювати швидкість обертання, підключаючи двигун до електромережі через частотний перетворювач. Це забезпечує оптимальні умови для стабільної та ефективної роботи технологічного процесу.

2.2. Вибір типу електроприводу

У сучасних умовах не існує універсального рішення щодо вибору оптимальної системи електропривода. Зменшити кількість можливих варіантів можна, порівнюючи їх за ключовими характеристиками: вартістю, споживаною потужністю, розмірами й масою, а також рівнем автоматизації, з урахуванням специфіки технологічного процесу.

При порівнянні двигунів постійного струму з асинхронними агрегатами, перевага часто віддається останнім – через їхню вищу зносостійкість, компактність та економічну ефективність.

Системи регулювання асинхронних двигунів потребують детального аналізу. Стабільне та ефективне керування досягається через впровадження складних алгоритмів. Однак досі значна кількість таких двигунів застосовується у схемах без активного регулювання.

Змінити крутний момент i , як наслідок, регулювати швидкість обертання електродвигуна можна за допомогою таких методів:

1. Зміна напруги статора U_1 ;
2. Зміна частоти напруги f_1 , у тому числі й одночасно зі зміною напруги U_1
3. Зміна електричного опору ланцюга ротора R_2 (для АД з фазним ротором);
4. Зміна числа пара полюсів;

5. Використання енергії ковзання в спеціальних каскадних схемах (для АД з фазним ротором);

6. Подвійне живлення двигуна (для АД з фазним ротором);

7. Зміна опору ланцюга статора.

Щоб змінити напругу на статорі U_1 , використовують силовий регулятор, зібраний на резистивних або транзисторних елементах. Подана напруга компенсується ЕРС та втратою напруги в статорному колі. Такий спосіб дозволяє лише знижувати значення напруги, що призводить до квадратичного зменшення критичного моменту двигуна.

Для регулювання опору в роторному ланцюзі використовують асинхронні двигуни з фазним ротором, у схему яких під'єднують трифазний реостат. Щоб уникнути проблем при комутації струму великої сили, зміна опору здійснюється ступінчасто – через послідовне вимикання або замикання окремих ділянок реостата. Такий підхід дозволяє впливати на значення критичного ковзання двигуна.

Щоб змінити частоту обертання електродвигуна через регулювання кількості пар полюсів, застосовують двигуни з короткозамкненим ротором, конструктивно адаптовані для цього способу. Оскільки кількість пар полюсів може приймати лише певні цілі значення, швидкість обертання змінюється дискретно – у межах приблизно від 3000 до 500 обертів за хвилину.

У системах потужного електропривода часто застосовують каскадні варіанти керування. При цьому в асинхронному двигуні з фазним ротором виникають втрати енергії, величина яких залежить від рівня ковзання. Регулювання частоти обертання досягається шляхом підключення додаткової електрорушійної сили до роторного кола. Існують два основні підходи до використання енергії ковзання – електромеханічний та електричний. Залежно від типу перетворювачів, що працюють з цією енергією, каскадні схеми класифікують як електромашинні, вентильно-машинні або вентильні.

Схему з подвійним живленням двигуна можна віднести до каскадних рішень. У ній ротор під'єднано до перетворювача частоти, завдяки чому

можливо як знімати надлишкову енергію, так і подавати додаткову, реалізуючи керування в двох зонах. При сталих умовах роботи швидкість обертання визначається співвідношенням синхронних швидкостей полів ротора та статора.

Регулювання швидкості шляхом зміни опору в статорному колі застосовується нечасто, оскільки такий метод вважається малоефективним з точки зору енергоспоживання. Зазвичай до однієї, двох або трьох фаз підключають додаткові електричні опори, що дозволяє частково змінювати характеристики приводу.

Найбільш розповсюдженим рішенням у сучасних системах електропривода є регулювання частоти обертання за допомогою інверторів. У такій схемі асинхронний електродвигун з короткозамкненою обмоткою ротора під'єднується до мережі через частотний перетворювач, який забезпечує широкий діапазон регулювання швидкості. Завдяки цьому способу вдається досягти потрібних динамічних параметрів із мінімальними втратами енергії та зберегти надійність і простоту конструкції.

2.3. Вимоги до обладнання системи керування

Повітряний транспортер входить до складу складної технологічної лінії, ефективність якої визначається злагодженістю роботи кожного її елемента. Система автоматичного керування повинна гарантувати точне, адаптивне регулювання всього процесу. Щоб забезпечити стабільну швидкість переміщення пляшок, необхідно підтримувати постійний рівень повітряного тиску в каналі транспортера. Значення тиску задається контролером, який орієнтується на стан обладнання на вході та виході лінії, а також на ситуацію в технологічному потоці.

Допустиме відхилення по тиску в системі не повинне перевищувати 15% від встановленого значення навіть за умови зміни кількості тари чи

забруднення фільтрувального елемента. У цьому випадку показник перерегулювання швидкості не впливає на ефективність роботи.

Щоб гарантувати безпечну роботу персоналу та надійність обладнання, слід передбачити захист від випадкового проникнення сторонніх об'єктів, скупчення тари в аварійних умовах та перебоїв з електроживленням. Важливо забезпечити стабільність параметрів напруги й частоти, а також зручне керування пристроєм та оперативне інформування оператора про можливі несправності через систему сигналізації.

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень та конструкцій

3.1 Розрахунок і вибір силового обладнання

З метою стабільного функціонування технологічного процесу та спрощення пусконаладжувальних операцій необхідно створити в повітряному конвеєрі тиск близько 1900 Па, а також забезпечити подачу повітря з витратою орієнтовно 2500 кубічних метрів на годину.

Для досягнення вказаних параметрів обрано стійкий до корозії радіальний вентилятор з нержавіючої сталі моделі ВР-300-45-2,5ДО1, який має відповідні технічні характеристики.

- Частота обертання робочого колеса - $n_d = 2850$ об /хв,
- Продуктивність - $Q = 2400 \dots 2700$ м³/год,
- Повний тиск - $H = 1950 \dots 2000$ Па,
- Маса вентилятора – $m = 36.6$ кг
- Розміри вихідного сопла - 175x175

На цей вентилятор монтується фільтр типу ФясПНІБОА, розміри якого становлять 610×610×150 мм. Він забезпечує рівень фільтрації повітря не нижче 95%, аеродинамічний опір на початку експлуатації – 55 Па, а граничний – 600 Па.

Графік залежності витрати повітря від тиску вентилятора представлений на рис.3.1.

Задану частоту обертання вентилятора для досягнення необхідного режиму роботи визначимо за відповідною формулою.

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (3.1)$$

Через те, що в технічній документації вказано номінальну частоту обертання, а не лінійну швидкість, обчислимо останню, скориставшись відповідною формулою:

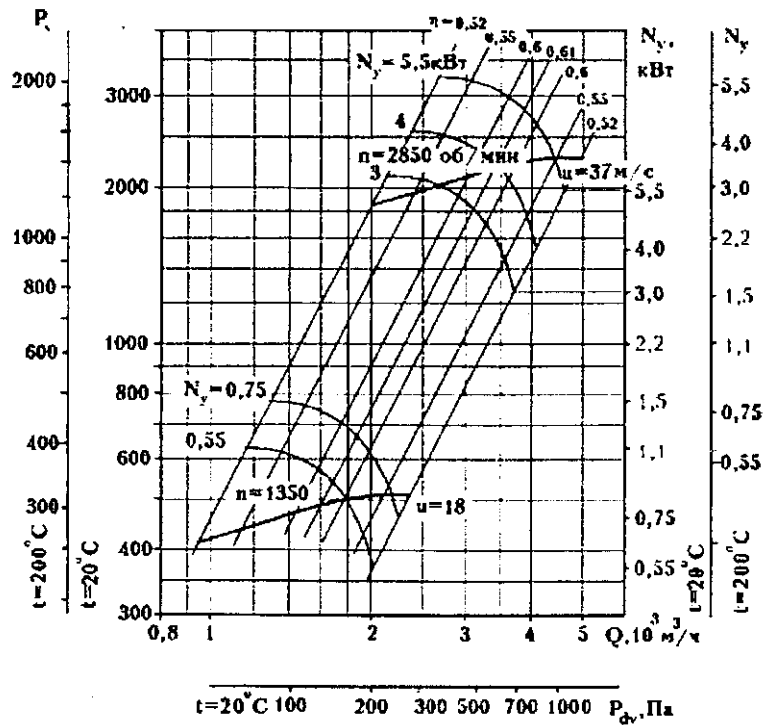


Рисунок 3.1 – Q - N характеристика вентилятора типу ВР-300-45-2,5ДО 1

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30},$$

де n_2 – частота обертання вентилятора. Отже одержуємо

$$\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30} = \frac{3.14 \cdot 2850}{30} = 298.3 \text{ рад/с.}$$

На основі рівняння (3.1) визначаємо потрібну частоту обертання вентилятора, що відповідає заданому режиму його роботи

$$\omega_1 = \omega_2 \cdot \frac{Q_1}{Q_2} = 298.3 \cdot \frac{2.5}{2.7} = 276.2 \text{ рад/с.}$$

Використовуючи формулу

$$N = N_{0N} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 - a_\phi Q^2 \tag{3.2}$$

Визначимо значення аеродинамічного опору вентилятора за умов номінального режиму. У використуваному рівнянні залишаються дві невідомі – тиск при нульовій подачі за номінальної швидкості обертання (H_{0H}) та сам опір вентилятора (a_ϕ). Для їх обчислення обираємо з робочої характеристики вентилятора дві точки, на основі яких формуємо систему рівнянь 3.3

$$\begin{cases} H_1 = H_{0H} - a_\phi Q_1^2 \\ H_2 = H_{0H} - a_\phi Q_2^2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Після вираження з другого рівняння параметра H_{0H} та підстановки числових значень, що відповідають робочій точці системи, визначається конкретне значення коефіцієнта a_ϕ (3.4)

$$a_\phi = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2} = \frac{2100 - 1900}{3000^2 - 2500^2} = 7.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Па}}{\text{м}^6 / \text{час}^2} = 946 \frac{\text{Па}}{\text{м}^6 / \text{с}^2} = 74.52 \frac{1}{\text{м}^5 / \text{с}^2} \quad (3.4)$$

Отже H_{0H} дорівнює (3.5):

$$H_{0H} = H + a_\phi \cdot Q_2^2 = 1900 + 7.3 \cdot 10^{-5} \cdot 3000^2 = 2557 \text{ Па} \quad (3.5)$$

Тиск задано в паскалях [Па], однак у розрахунках використовується величина напору в метрах [м], тому необхідно виконати відповідне перетворення одиниць. Для цього скористаємося формулою статичного тиску (3.6), що дозволяє перевести значення в необхідну форму

$$P = \rho g h \quad (3.6)$$

де ρ - 1.29 кг/м³ - щільність повітря.

Отже одержуємо:

$$h_{OH} = \frac{P}{\rho g} = \frac{2557}{1.29 \cdot 9.8} = 202.26 \text{ м}$$

$$h_n = \frac{P}{\rho g} = \frac{1900}{1.29 \cdot 9.8} = 150.29 \text{ м}$$

Фіктивний гідравлічний опір мережі визначаємо в такий спосіб:

$$a = \frac{H_n - H_{cm}}{Q_n^2} = \frac{(150.29 - 0) \cdot 3600^2}{2500^2} = 311.64 \frac{1}{\text{м}^5 / \text{с}^2}$$

Для обраного вентилятора виконаємо підбір електродвигуна з лінійки серії 4А. Необхідна потужність приводу вентилятора обчислюється за наступною формулою:

$$P = k \frac{\rho g Q H}{\eta} \quad (3.7)$$

де $\rho = 1.29 \text{ кг/м}^3$ - щільність повітря, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ - прискорення вільного падіння, η - ККД механізму.

Виконаємо перетворення паскалів у метри, застосовуючи формулу гідростатичного тиску, подану у виразі 3.6.

Отже отримаємо:

$$h = \frac{P}{\rho g} = \frac{1900}{1.29 \cdot 9.8} = 150.29 \text{ м}$$

З (3.7) одержуємо

$$P = 1.2 \frac{1.29 \cdot 2500 \cdot 150.29 \cdot 9.8}{0.575 \cdot 3600} = 2753.57 \text{ Вт} = 2.753 \text{ кВт}$$

Число 3600 у знаменнику використовується для перетворення одиниць вимірювання швидкості з метрів за годину в метри за секунду.

Необхідна швидкість електродвигуна

$$n_H = \frac{30}{\pi} \cdot \omega_H = \frac{30}{3.14} \cdot 298.3 = 2849 \text{ об/хв}$$

В результаті здійснених розрахунків було обрано асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, що має маркування 4А90L2У3, як оптимальний варіант для реалізації приводу.

Паспортні дані двигуна:

номінальна потужність $P_{2H} = 3.0 \text{ кВт}$

фазна напруга $U_\phi = 220 \text{ В}$

синхронна частота обертання $n_c = 3000 \text{ об/хв}$

індукція в повітряному зазорі $B_\delta = 0.68 \text{ Тл}$

лінійне струмове навантаження статора $A = 233 \text{ А/см}$

щільність струму $J = 6.4 \text{ А/мм}$

| | |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------|
| номінальний коефіцієнт корисної дії | $\eta_n - 0.845$ |
| номінальний коефіцієнт навантаження | $\cos(\varphi) = 0.88$ |
| пусковий момент | $m_{II} = 2.1 \text{ о.е.}$ |
| критичний момент | $m_K = 2.5 \text{ о.е.}$ |
| номінальне ковзання | $S_H = 0.043$ |
| критичне ковзання | $S_K = 0.325$ |
| головний індуктивний опір | $X_\mu = 3.4 \text{ о. е.}$ |
| активний опір обмотки статора | $R'_1 = 0.072 \text{ о. е.}$ |
| індуктивний опір розсіювання обмотки статора | $X = 0.057 \text{ о. е.}$ |
| Активні опори ротора наведені до обмотки статора: | |
| активне | $R''_2 = 0.047 \text{ о. е}$ |
| індуктивне розсіювання | $X''_2 = 0.1 \text{ о.е.}$ |
| динамічний момент інерції ротора | $J_D = 0.0035 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ |
| кратність пускового струму | $i_{II} = 6.5 \text{ о.е}$ |

Частотний перетворювач типу "Danfoss" FCD 300 використовується для прямого керування електродвигуном та реалізації ПД-регулювання. Пристрій функціонує на основі таких характеристик електромережі:

Параметри живлення: трифазна мережа 380/400/415 В з частотою 50 або 60 Гц, допустиме відхилення – до $\pm 2\%$ від заданої напруги.

Показник потужності при напрузі 400 В: $\cos\varphi$ знаходиться в межах від 0.9 до 1.0 за умов номінального навантаження.

Число комутацій ланцюгів живлення $L1 \ L2 \ L3$: 2 рази/хвилину;

Макс. струм к. з. (плавкі запобіжники) : 100000А;

Макс. струм к. з. (автоматичні вимикачі): 10000А.

3.2 Розробка функціональної схеми системи керування

На рис 3.1 представлена функціональна схема системи, що розроблюється.

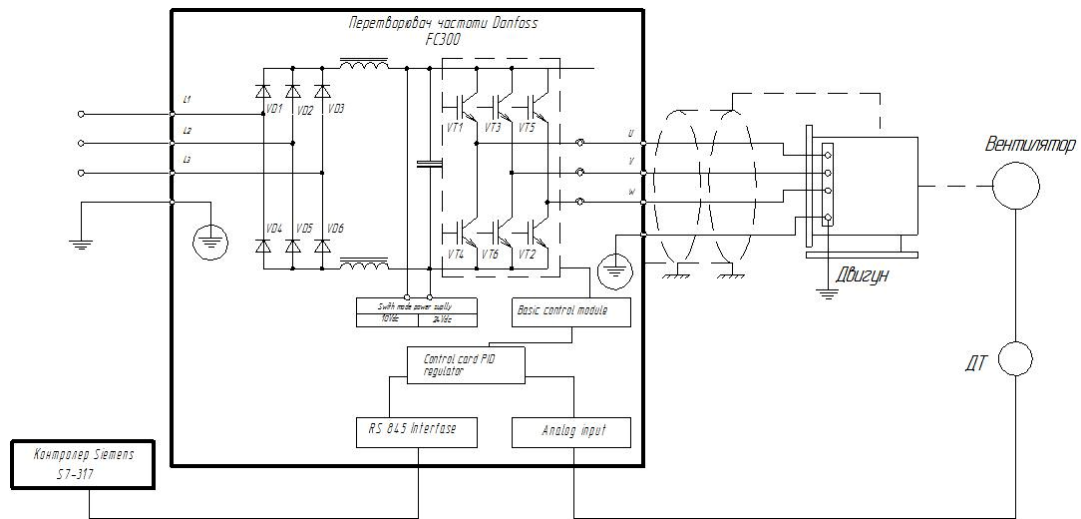


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи керування повітряним транспортом

Система регулювання, що розглядається, побудована за одноконтурним принципом і відповідає за стабілізацію швидкості асинхронного електродвигуна. Формування сигнальної команди здійснюється мікроконтролером Siemens S317, який взаємодіє з частотним перетворювачем через інтерфейс RS845. За якість регулювання обертів відповідає ПІД-регулятор, що входить до складу керуючого модуля. Зворотній зв'язок організовано на основі датчика тиску ДТ, котрий постійно фіксує значення параметра. При зміні тиску щодо встановленої норми, аналоговий сигнал надходить до регулятора PID на платі Control card, який через модуль базового керування (Basic control module) коригує оберти двигуна, забезпечуючи стабільний тиск у системі. Частотний перетворювач, у свою чергу, спочатку випрямляє мережеву напругу, а далі генерує змінну напругу з необхідними частотними та амплітудними характеристиками.

3.3 Розробка структурної схеми системи керування

Узагальнене зображення структури системи автоматичного регулювання наведено на рис.3.3.



Рисунок 3.3 - Структурна схема системи керування

На рисунку прийняті наступні позначення: $U_{зН}$ - напруги завдань тиску; U_H - напруги зворотних зв'язків; $k_{ТП}$ - коефіцієнт зворотного зв'язку по технологічному параметру; $W_{РТП}(p)$ - передаточна функція регулятора технологічного параметра

$$k_{тп} = \frac{U_{зQ_{\max}}}{Q_{\max}},$$

або у випадку регулювання H .

Коефіцієнти підсилення пропорційної k_P , інтегральної k_I та диференціальної k_D складових ПД-регулятора встановлюються відповідно до вимог, що пред'являються до точності та швидкодії системи. За умови нехтування інерційністю частотного перетворювача і електромагнітними процесами в обмотках двигуна, які значно менші за постійну часу самого технологічного процесу, а також при жорсткому зв'язку об'єкта з електроприводом через МС і високій механічній жорсткості характеристики приводу, допускається спрощення моделі. У такому випадку можна побудувати структурну схему регулювання у варіанті H (див. рис. 3.3). спростити. Лінеаризованна модель системи керування представлена на рис.3.4

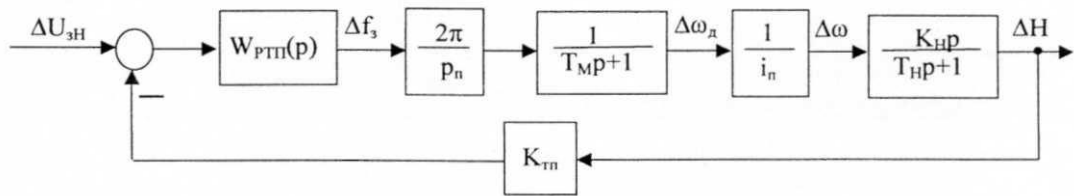


Рисунок 3.4 - Структурна схема системи керування продуктивністю:

T_M - механічна постійна двигуна; i_{II} - модуль жорсткості робочої ділянки механічної характеристики; k_n - коефіцієнт передачі об'єкта за тиском; T_n - постійна стала часу об'єкта при регулюванні тиску.

Проведемо розрахунок цих величин.

$$m = \rho \cdot s^2 \cdot l = 1.29 \cdot 0.030625 \cdot 10 = 0.4 \text{ кг} - \text{ маса повітря,}$$

$$J_k = 0.0007 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 - \text{ момент інерції вентилятора,}$$

$i_n = 1$ - передаточне число між двигуном і вентилятором, отже отримаємо:

$$\beta = \frac{2 \cdot M_k}{\omega_0 \cdot s_k} = \frac{2 \cdot 2.5 \cdot M_n}{\omega_0 \cdot s_k} = \frac{2 \cdot 2.5 \cdot 11.81}{314 \cdot 0.043} = 4.37$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{0.024}{4.37} = 0.0055 \text{ с}$$

$$\text{де } J_\Sigma = J_d + J_k \frac{1}{i_n^2} + m \frac{Q^2}{s^2 \omega_d}$$

$$J_\Sigma = 0.0035 + 0.0007 \cdot \frac{1}{1^2} + 0.4 \cdot \frac{0.69^2}{0.030625 \cdot 314} = 0.024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

$$k_n = \frac{m \cdot H_{om}}{s^2 \cdot \rho \cdot g \cdot a_\psi \cdot \omega_n \cdot Q_n} = \frac{0.4 \cdot 2557 \cdot 3600}{0.000938 \cdot 1.29 \cdot 9.8 \cdot 946.08 \cdot 298.3 \cdot 2500} = 0.44 \quad ($$

$$T_n = \frac{m}{2 \cdot s^2 \cdot \rho \cdot g \cdot a_\psi \cdot Q_n} = \frac{0.4 \cdot 3600}{2 \cdot 0.000938 \cdot 1.29 \cdot 9.8 \cdot 74.52 \cdot 2500} = 0.33$$

При аперіодичному регулюванні системи отримаємо ПІ-регулятор

$$W_{\text{ПІ}}(p) = k_n + k_i \frac{1}{p}$$

За умови, що виконується співвідношення $k_{\text{П}}$ до k_I дорівнює T_H , контур управління можна реалізувати як аперіодичну ланку, що має відповідну передавальну функцію

$$W(p) = \frac{k'_H}{T'_H p + 1},$$

$$\text{де } k'_H = \frac{k_{\Sigma}}{1 + k_{\text{тн}} k_{\Sigma}};$$

$$T'_H = \frac{T_M}{1 + k_{\text{тн}} k_{\Sigma}};$$

$$k_{\Sigma} = \frac{2k_i \pi k_H}{p_n i_n}.$$

Задамося величиною $T'_H = 0.005$ с. Знаходимо величину k_{Σ}

$$k_{\Sigma} = \left(\frac{T_M}{T'_H} - 1 \right) \cdot \frac{1}{k_{\text{тн}}} = \left(\frac{0.0055}{0.005} - 1 \right) \cdot \frac{1}{0.067} = 16.42$$

Знаходимо величину k_I :

$$k_i = \frac{k_{\Sigma} \cdot p_n \cdot i_{\text{П}}}{2 \cdot \pi \cdot k_H} = \frac{16.42 \cdot 1 \cdot 1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.44} = 5.94$$

Зі співвідношення $k_{\text{П}}/k_I = T_H$ знаходимо величину $k_{\text{П}}$:

$$k_{\text{П}} = T_H k_i = 5.94 \cdot 0.33 = 1.96$$

У такий спосіб одержуємо передаточну функцію аналогового ПІ-регулятора.

Змінюючи k_I можна змінювати швидкодію системи

$$W(p) = 1.96 + \frac{5.94}{p} \quad (3.8)$$

У зв'язку з використанням у розробленій системі цифрового ПІ-регулятора, визначимо його передаточну функцію, застосувавши Z-перетворення до рівняння (3.8). Оскільки пропорційна частина регулятора є сталою величиною, згідно з властивостями Z-перетворення, вона залишається незмінною.

Інтегральна складова формується з декількох множників. Один із них має сталу величину та не змінює значення, тоді як інший компонент набуває наступного вигляду: $\frac{T_0}{z-1} \cdot 5.94 \cdot \frac{1}{p}$

У такий спосіб отримаємо передаточну функцію цифрового ПІ-регулятора системи керування:

$$W(z) = 1.96 + 5.94 \cdot \frac{0.0001}{z-1}$$

3.4 Розрахунок статичних характеристик системи керування

3.4.1 Характеристика в розімкнутій системі

Щоб визначити механічну характеристику електродвигуна, застосуємо рівняння Клосса, яке дозволяє описати залежність моменту від ковзання в асинхронних машинах

$$M = \frac{2M_K \left(1 + S_K + \frac{R_1}{R'_2}\right)}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S} + 2S_K \frac{R_1}{R'_2}}$$

де M_K - критичний момент, розраховується він по формулі:

$$M_k = \frac{3 \cdot U^2}{\frac{4\pi f}{p_n} \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right)}$$

Природна механічна характеристика двигуна зображена на рис. 3.5.

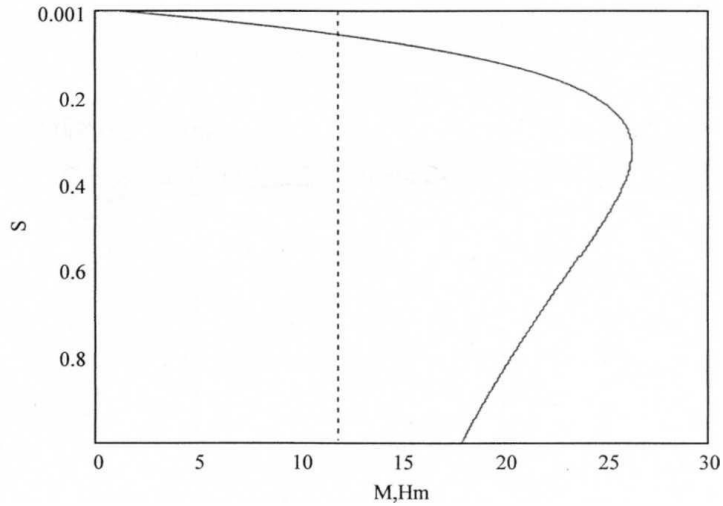


Рисунок 3.5 - Природна механічна характеристика двигуна

На рисунку 3.6 представлено набір штучно сформованих механічних характеристик електродвигуна, які отримані в умовах частотного регулювання згідно з вентиляторним законом зміни частоти.

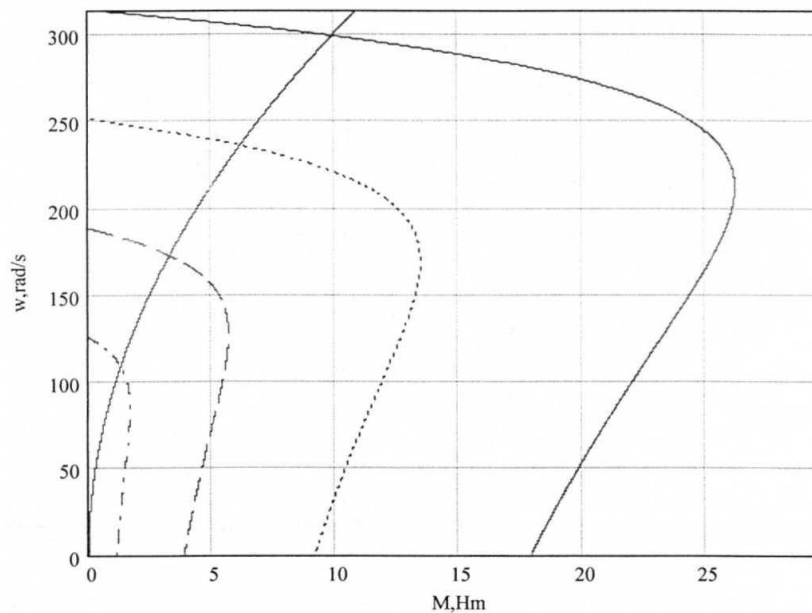


Рисунок 3.6 - Сімейство штучних механічних характеристик двигуна при частотному керуванні з вентиляторним законом керування.

Щоб визначити статичну характеристику вентилятора, формують набір значень витрати повітря та відповідного напору на різних частотах обертання, що подано у таблицях 3.1–3.9. На основі цих даних можна побудувати залежність Q – H для кожного режиму роботи.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для побудови статичної характеристики вентилятора

| | $\omega = 298.3 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|------|--------|
| Q, м ³ /год. | 2142.8 | 2357 | 2571.2 | 2749.7 | 3000 | 3300 | 3550 | 3750 |
| H, Па | 2142.8 | 2140 | 2071.4 | 2000 | 1916.6 | 1749.8 | 1583 | 1332.8 |

Розрахунок величин Q і H проводиться у відповідності з наступними

співвідношеннями:

$$\frac{\omega_n}{\omega_m} = \frac{Q_n}{Q_m} \qquad \frac{\omega_n^2}{\omega_m^2} = \frac{H_n}{H_m}$$

$$Q_m = Q_n \cdot \frac{\omega_m}{\omega_n} \qquad H_m = H_n \cdot \frac{\omega_m^2}{\omega_n^2}$$

Таблиця 3.2

| | $\omega_1 = 0.9 \cdot \omega = 268.47 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|
| Q1, м ³ /год. | 1928,5 | 2121,3 | 2314,1 | 2474,7 | 2700 | 2970 | 3195 | 3375 |
| H1, Па | 1735,7 | 1717 | 1677,8 | 1636 | 1552,4 | 1417 | 1282 | 1079 |

Таблиця 3.3

| | $\omega_2 = 0.8 \cdot \omega_n = 238.64 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Q2, м ³ /год. | 1714,2 | 1885,6 | 2056,9 | 2199,7 | 2400 | 2640 | 2840 | 3000 |
| H2, Па | 1371,3 | 1356,8 | 1325,6 | 1292,8 | 1226,6 | 1119,8 | 1013,1 | 852,9 |

Таблиця 3.4

| | $\omega_3 = 0.7 \cdot \omega_n = 208.81 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Q3, м /год. | 1499,9 | 1649,9 | 1799,8 | 1924,7 | 2100 | 2310 | 2485 | 2625 |
| H3, Па | 1049,9 | 1038,8 | 1014,9 | 989,8 | 939,11 | 857,42 | 775,61 | 653,1 |

Таблиця 3.5

| | $\omega_4 = 0.6 \cdot \omega_n = 178.98 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|---------|
| Q4, м ³ /год. | 1285,6 | 1414,2 | 1542,7 | 1649,8 | 1800 | 1980 | 2130 | 2250 |
| H4, Па | 771,4 | 763,2 | 745,74 | 727,2 | 689,9 | 629,9 | 569,88 | 479,808 |

Таблиця 3.6

| | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------------------------------------------------------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|--|
| | | $\omega_5 = 0.5 \cdot \omega_n = 149.15 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
| Q5, м /год. | 1071,4 | 1178,5 | 1285,6 | 1374,85 | 1500 | 1650 | 1775 | 1875 | |
| H5, Па | 535,7 | 530 | 517,8 | 505 | 479,15 | 437,4 | 395,75 | 333,2 | |

Таблиця 3.7

| | | | | | | | | | |
|-------------|--------|--------------------------------------------------------|--------|---------|-------|--------|--------|--------|--|
| | | $\omega_6 = 0.4 \cdot \omega_n = 119.32 \text{ рад/с}$ | | | | | | | |
| Q6, м /год. | 857,1 | 942,8 | 1028,4 | 1099,88 | 1200 | 1320 | 1420 | 1500 | |
| H6, Па | 342,84 | 339,2 | 331,42 | 323,2 | 306,6 | 279,96 | 253,28 | 213,24 | |

Таблиця 3.8

| | | | | | | | | |
|-------------|--------|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | $\omega_7 = 0.3 \cdot \omega_n = 89.49 \text{ рад/с}$ | | | | | | |
| Q7, м /год. | 642,84 | 707,1 | 771,36 | 824,91 | 900 | 990 | 1065 | 1125 |
| H7, Па | 192,8 | 190,8 | 186,42 | 181,8 | 172,49 | 157,48 | 142,47 | 119,95 |

Таблиця 3.9

| | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | | $\omega_8 = 0.2 \cdot \omega_n = 59.66 \text{ рад/с}$ | | | | | | |
| Q8, м ³ /год. | 428,56 | 471,4 | 514,24 | 549,94 | 600 | 660 | 710 | 750 |
| H8, Па | 85,712 | 84,8 | 82,856 | 80,812 | 76,664 | 69,992 | 63,32 | 53,312 |

На основі інформації, наведеної в табл.3.1–3.9, формується статична характеристика роботи вентилятора, що відображена на рис.3.7.

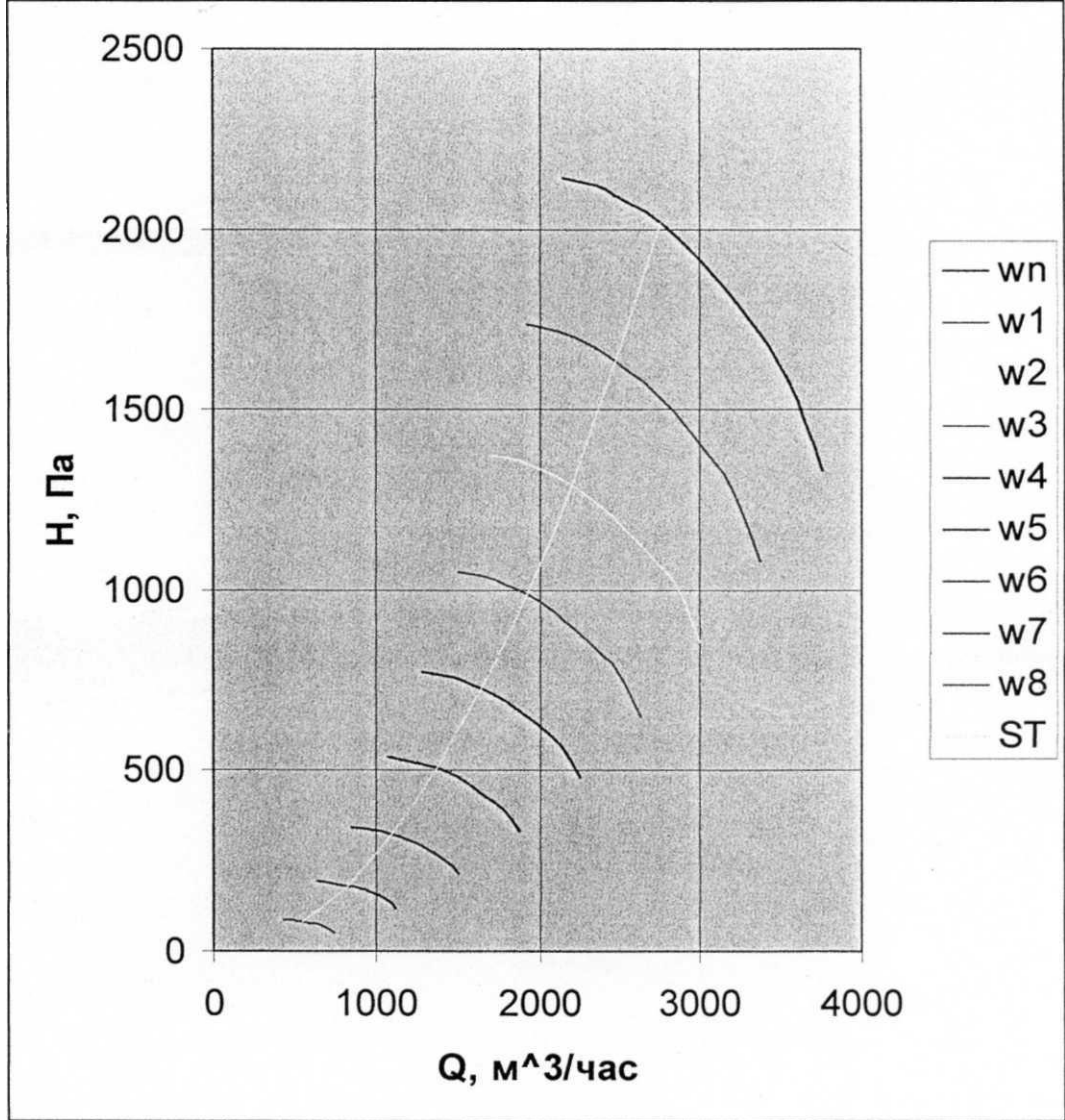


Рисунок 3.7 - Статична характеристика вентилятора

Оскільки в системі використовується ПІ-регулятор, то для забезпечення статичного режиму на вході ПІ-регулятора сигнал повинен дорівнювати нулю тобто $U_{3H} - K_{ТП}H = 0$

Тоді рівняння статичної характеристики буде мати вигляд:

$$H = \frac{1}{K_{ТП}} \cdot U_{3H}$$

Інакше кажучи, рівень тиску встановлюється без врахування значень аеродинамічного опору чи витрати – він визначається безпосередньо параметрами завдання, за умови, що ПІ-регулятор працює в межах допустимого діапазону. Ілюстрація цього наведена на рис.3.8.

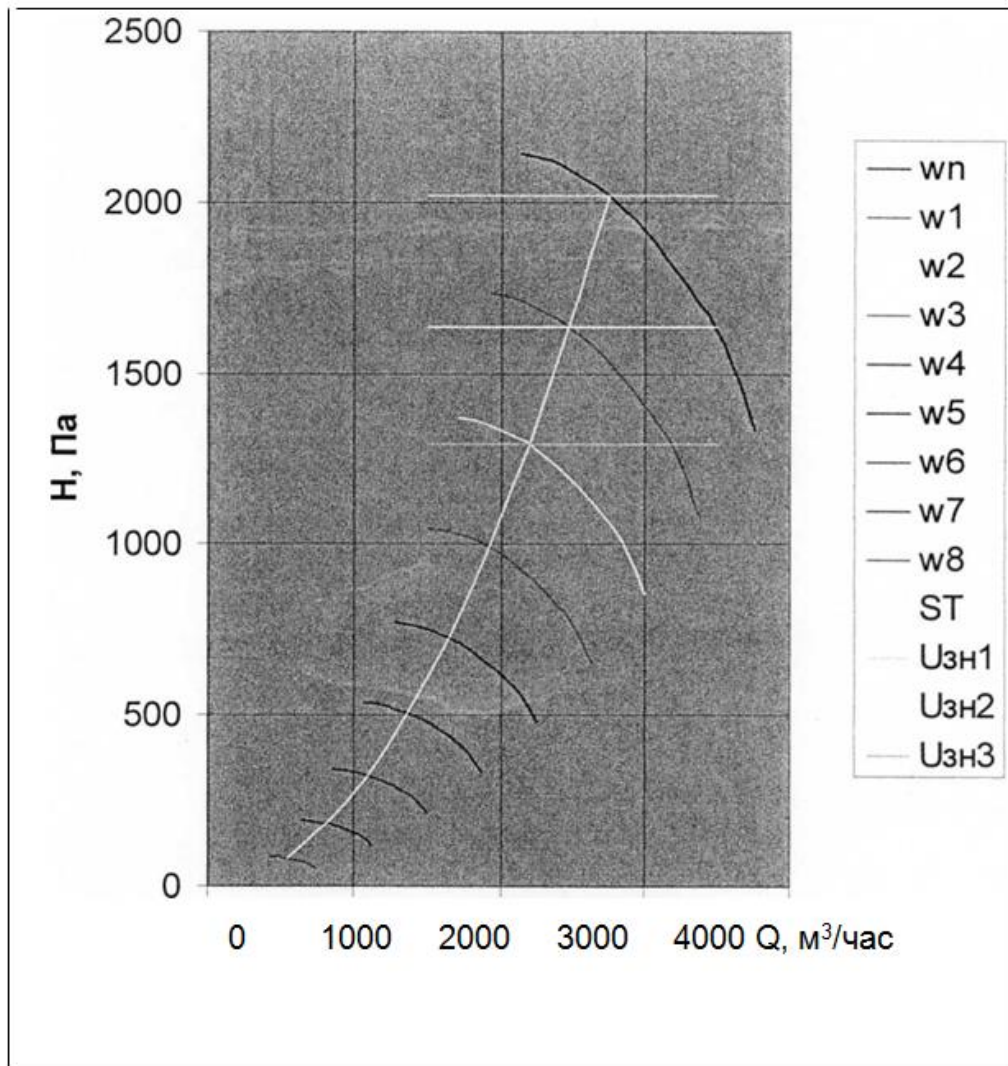


Рисунок 3.8 – Залежність тиску від завдання

3.4.2 Характеристика в замкненій системі

Модель цієї системи не надає можливості безпосередньо визначити механічну характеристику в умовах замкнутого контуру, оскільки об'єкт керування є частиною самого контуру. Тому для аналізу статичних властивостей використовується та ж модель, що була застосована при дослідженні динамічної поведінки системи у розділі «Дослідження динаміки системи керування». Проводячи моделювання з поетапною зміною навантаження M_{ci} та записуючи відповідні усталені значення швидкості обертання ω_i до і після завершення перехідних процесів, можна побудувати графік механічної характеристики, що наведений на рис.3.9.

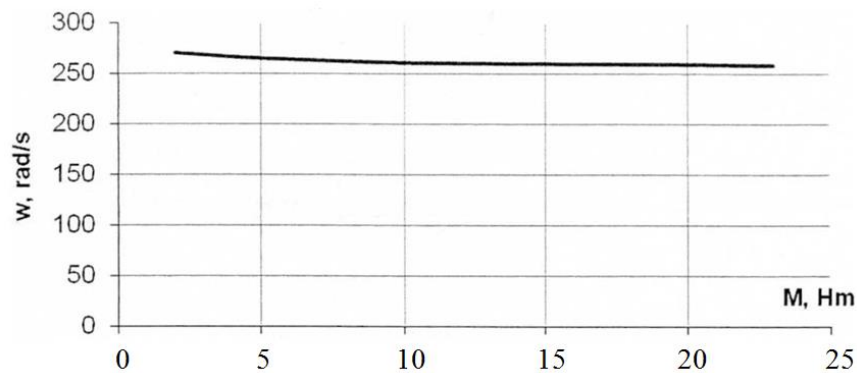


Рисунок 3.9 – Механічна характеристика

3.5 Виведення математичної моделі двигуна

Електрична машина виступає ключовим компонентом у складі електроприводів та різноманітних електромеханічних систем, виконуючи функцію перетворення енергії з електричної форми в механічну. Для ефективного управління цим процесом, його аналізу та імітаційного моделювання необхідне точне математичне відображення електромеханічного перетворення, що відбувається в машині.

Математичне моделювання процесів електромеханічного перетворення енергії ґрунтується на використанні узагальнених моделей так званих ідеалізованих електричних машин. Основу такого підходу становлять:

- точне відображення ключових фізичних явищ, характерних для визначеного типу електромеханічних пристроїв;
- спрощення моделі шляхом нехтування впливом другорядних ефектів, зокрема недосконалостей магнітних матеріалів, відхилень у конструктивній геометрії, неідеальної форми ЕРС, асиметрії фазних обмоток та інших аналогічних факторів.

У рамках теорії ідеалізованих електричних машин значно полегшується математичне моделювання електромеханічного перетворення енергії завдяки переходу до рівнозначної двофазної схеми. Такий підхід

дозволяє зменшити складність розрахунків і покращити наочність аналізу процесів.

Заміна дозволяє створити спрощену математичну модель процесів перетворення енергії в електромеханічних системах з обертальними електричними машинами. Це досягається завдяки використанню умовного двофазного електромеханічного перетворювача, відомого як узагальнена електрична машина.

Узагальнена електрична машина являє собою умовну спрощену модель, що описує основні принципи роботи реального електричного пристрою. В її основі лежить припущення про синусоїдальний розподіл магнітних потоків і магніторушійних сил (МРС), що генеруються обмотками статора та ротора вздовж периферії машини. Якщо ж форма МРС обмоток відхиляється від синусоїди, береться до уваги лише її перша просторова гармоніка, тоді як вплив вищих гармонік зазвичай враховується як частина потоку розсіювання.

За симетричного живлення, перебіг динамічних процесів у електричній частині спрощеної моделі узагальненої електричної машини (схема подана на рис. 3.10) описується чотирма рівняннями, що виражають електричну рівновагу в колах обмоток. Крім того, враховується рівняння, яке визначає електромагнітний момент двигуна залежно від значень струмів у цих обмотках і відповідних механічних параметрів.

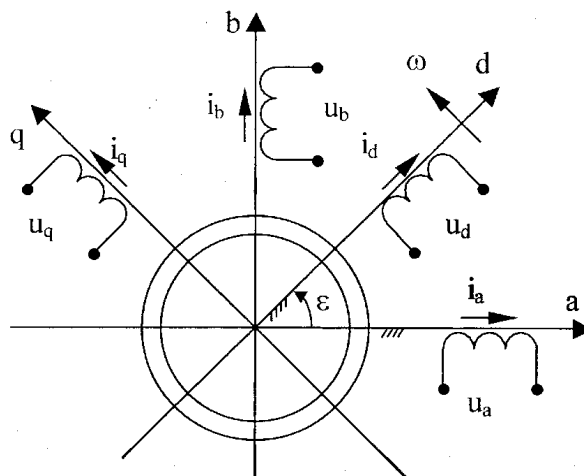


Рисунок 3.10 - Схема елементарної узагальненої двофазної машини

Розглянемо модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором у координатній системі, прив'язаній до обмоток статора. Складемо рівняння електромагнітної рівноваги, які відображають взаємозв'язок між векторними величинами струму, напруги та потокозчеплення.

$$\vec{U} = R_1 \vec{i}_1 + \frac{d\vec{\psi}_1}{dt} \quad (3.9)$$

$$\vec{U}_2 = R_2 \vec{i}_2 + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\psi}_2$$

Рівняння для потокозчеплення мають вигляд:

$$\vec{\psi}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \vec{i}_2 \quad (3.10)$$

$$\vec{\psi}_2 = L_2 \vec{i}_2 + L_m \vec{i}_1$$

Щоб побудувати модель для подальшого аналізу, потрібно представити асинхронний двигун у вигляді математичної залежності через струм статора i_1 та потокозчеплення ротора ψ_2 . З цією метою з рівнянь (3.9) і (3.10) вилучаємо зайві змінні, залишаючи лише ті, що нас цікавлять для обраного способу опису процесу. i_2 й ψ_1 :

$$\begin{aligned} \vec{\psi}_1 &= L_1 \vec{i}_1 + L_m \left(\frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_2}{L_2} \right) = \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2 \\ \vec{i}_2 &= \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Отримані вирази підставимо в рівняння (3.9) і (3.10)

$$\begin{aligned} \vec{U}_2 &= R_2 \frac{\vec{\psi}_2 - L_m \vec{i}_1}{L_2} + \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} - J\omega p_n \vec{\psi}_2 \\ \vec{U}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + \frac{d}{dt} \left(\left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \vec{i}_1 + \frac{L_m}{L_2} \vec{\psi}_2 \right) \\ \vec{U}_1 &= R_1 \vec{i}_1 + \left(L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \right) \frac{d\vec{i}_1}{dt} + \frac{L_m}{L_2} \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Введемо заміни

$$\sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2}$$

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}$$

$$\beta = \frac{L_m}{\sigma L_2},$$

і отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} &= -\frac{R_2}{L_2}\bar{\psi}_2 + J\omega p_n\bar{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2}\bar{i}_1 + \bar{U}_2 \\ \frac{d\bar{i}_1}{dt} &= -\frac{R_1\bar{i}_1}{\sigma} - \frac{L_m}{\sigma L_2}\left(-\frac{R_2}{L_2}\bar{\psi}_2 + J\omega p_n\bar{\psi}_2 + \frac{R_2 L_m}{L_2}\bar{i}_1 + \bar{U}_2\right) + \frac{\bar{U}_1}{\sigma} \\ \frac{d\bar{i}_1}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma}\bar{i}_1 - \alpha\beta L_m\bar{i}_1 + \alpha\beta\bar{\psi}_2 - \beta J\omega p_n\bar{\psi}_2 - \beta\bar{U}_2 + \frac{\bar{U}_1}{\sigma} \\ \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} &= -\alpha\bar{\psi}_2 + J\omega p_n\bar{\psi}_2 + \alpha L_m\bar{i}_1 + \bar{U}_2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

З огляду на що

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

одержимо

$$\begin{aligned} \frac{di_{1a}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1a} - \alpha\beta L_m i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta\omega p_n\psi_{2b} - \beta U_{2a} + \frac{U_{1a}}{\sigma} \\ \frac{di_{1b}}{dt} &= -\frac{R_1}{\sigma}i_{1b} - \alpha\beta L_m i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta\omega p_n\psi_{2a} - \beta U_{2b} + \frac{U_{1b}}{\sigma} \\ \frac{d\psi_{2a}}{dt} &= -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a} + U_{2a} \\ \frac{d\psi_{2b}}{dt} &= -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b} + U_{2b} \end{aligned}$$

Вираз для моменту, що розвиває двигун

$$M = L_m \bar{i}_1^T J \bar{i}_2 = \frac{L_m}{L_2} \bar{i}_1^T J (\bar{\psi}_2 - L_m \bar{i}_1) = \frac{L_m}{L_2} (i_{1a} \ i_{1b}) \begin{bmatrix} L_m i_{1b} - \psi_{2b} \\ \psi_{2a} - L_m i_{1a} \end{bmatrix} = \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a})$$

Отже динамічна модель АД з короткозамкненим ротором має вигляд:

$$\omega = \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\Psi_{2a} i_{1b} - \Psi_{2b} i_{1a}) - M_c \right]$$

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1a} - \alpha \beta L_m i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta \omega p_n \psi_{2b} + \frac{U_{1a}}{\sigma}$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\frac{R_1}{\sigma} i_{1b} - \alpha \beta L_m i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta \omega p_n \psi_{2a} + \frac{U_{1b}}{\sigma}$$

$$\frac{d\psi_{2a}}{dt} = -\alpha \psi_{2a} - \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}$$

$$\frac{d\psi_{2b}}{dt} = -\alpha \psi_{2b} + \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}$$

де

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2} \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma L_2} \quad \sigma = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} \quad L_1 = L_m + L_{1\sigma} \quad L_2 = L_m + L_{2\sigma}$$

У рівняннях:

ω - кутова швидкість;

$\frac{di_{1a}}{dt}, \frac{di_{1b}}{dt}$ - компоненти вектора струму статора;

$\frac{d\psi_{2a}}{dt}, \frac{d\psi_{2b}}{dt}$ - компоненти вектора потокощеплення ротора;

U_{1a}, U_{1b} - компоненти вектора напруги статора;

M_c - момент навантаження;

R_1, R_2 - активні опори статора та ротора;

L_1, L_2 - індуктивність статора та ротора;

L_m - індуктивність контуру, що намагнічує;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ - індуктивність розсіювання статора та ротора;

p_n - число пар полюсів;

$M = \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_{2a} i_{1a} - \psi_{2b} i_{1b})$ - момент, що розвиває двигун.

3.6 Розрахунок схеми заміщення

Виконаємо визначення параметрів для Т-подібної еквівалентної схеми, поданої на рис.3.11.

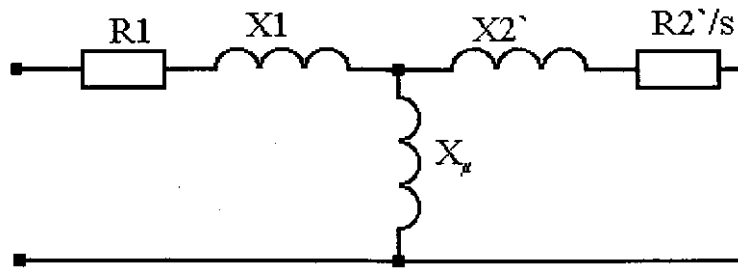


Рисунок 3.11 - Т-подібна схема заміщення

Номінальний струм статора двигуна:

Активний опір статора:

Активний опір ротора, наведений до статора

Реактивний опір статора

Реактивний опір ротора, наведений до статора

$$I_{1\phi} = \frac{P_{2H}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_H \cdot \cos(\varphi)} = \frac{3000 \text{ Вт}}{3 \cdot 220 \text{ В} \cdot 0.845 \cdot 0.88} = 6.113 \text{ А}$$

$$R_1 = R'_1 \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0.072 \cdot \frac{220 \text{ В}}{6.113 \text{ А}} = 2.59 \text{ Ом}$$

$$R'_2 = R''_2 \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0.047 \cdot \frac{220 \text{ В}}{6.113 \text{ А}} = 1.69 \text{ Ом}$$

$$X'_2 = X''_2 \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0.1 \cdot \frac{220 \text{ В}}{6.113 \text{ А}} = 3.6 \text{ Ом}$$

$$X_{12} = X_{\mu} \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 3.4 \cdot \frac{220 \text{ В}}{6.113 \text{ А}} = 122.4 \text{ Ом}$$

$$X_1 = X'_1 \frac{U_{\phi}}{I_{1\phi}} = 0.057 \cdot \frac{220 \text{ В}}{6.113 \text{ А}} = 2.05 \text{ Ом}$$

Номінальна синхронна частота обертання двигуна

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{3.14 \cdot 3000 \text{ об/мин}}{30} = 314 \text{ рад/с.}$$

Номінальна частота обертання двигуна

$$\omega_{\text{дн}} = \omega_0(1 - s_n) = 314 \cdot (1 - 0.043) = 300.498 \text{ рад/с.}$$

Номинальний електромагнітний момент

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_{\text{дн}} \eta} = \frac{3000 \text{ Вт}}{300.498 \text{ об/мин} \cdot 0.845} = 11.81 \text{ Нм.}$$

Взаємна індуктивність статора і ротора

$$L_{12} = \frac{x_{12}}{2\pi f_n} = \frac{122.4}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.3896 \text{ Гн.}$$

Індуктивність статора

$$L_1 = \frac{x_1 + x_{12}}{2\pi f_n} = \frac{2.05 + 122.4}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.3961 \text{ Гн.}$$

Індуктивність ротора

$$L_2 = \frac{x'_2 + x_{12}}{2\pi f_n} = \frac{3.6 + 122.4}{2 \cdot 3.14 \cdot 50} = 0.4 \text{ Гн}$$

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2} = \frac{0.3961 \cdot 0.4 - 0.3896^2}{0.4} = 0.0166296$$

$$\alpha = \frac{R'_2}{L_2} = \frac{1.69}{0.4} = 4.225 \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}}$$

$$\beta = \frac{L_{12}}{L_2 \cdot \sigma} = \frac{0.3896}{0.4 \cdot 0.016629} = 58.57$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot \beta \cdot L_{12} = \frac{2.59}{0.016629} + 4.225 \cdot 58.57 \cdot 0.3896 = 252.16$$

4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність системи

4.1 Дослідження динаміки системи керування

Проаналізуємо нашу систему при пуску із законом керування:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}^2} = const.$$

Для дослідження динамічних характеристик системи буде застосовано програмне середовище MATLAB із модулем Simulink, що спеціалізується на моделюванні процесів у реальному часі. Додатково використано результати, отримані раніше під час побудови схеми заміщення, а також дані, зібрані при виборі відповідного силового обладнання.

Модель розроблено відповідно до структурної схеми системи керування, наведеної в пункті 3.3. Система ПЧ-АД із вентилятором, представлена на рис.4.1, побудована з окремих функціональних блоків, кожен з яких відповідає за реалізацію конкретного елемента схеми. На рис.4.2 зображено підсистему асинхронного двигуна, а на рис.4.3 – підсистему вентилятора. Окрім них, модель також включає підсистеми ПІ-регулятора та частотного перетворювача, які забезпечують стабільну роботу системи та надають можливість аналізувати отримані результати моделювання.

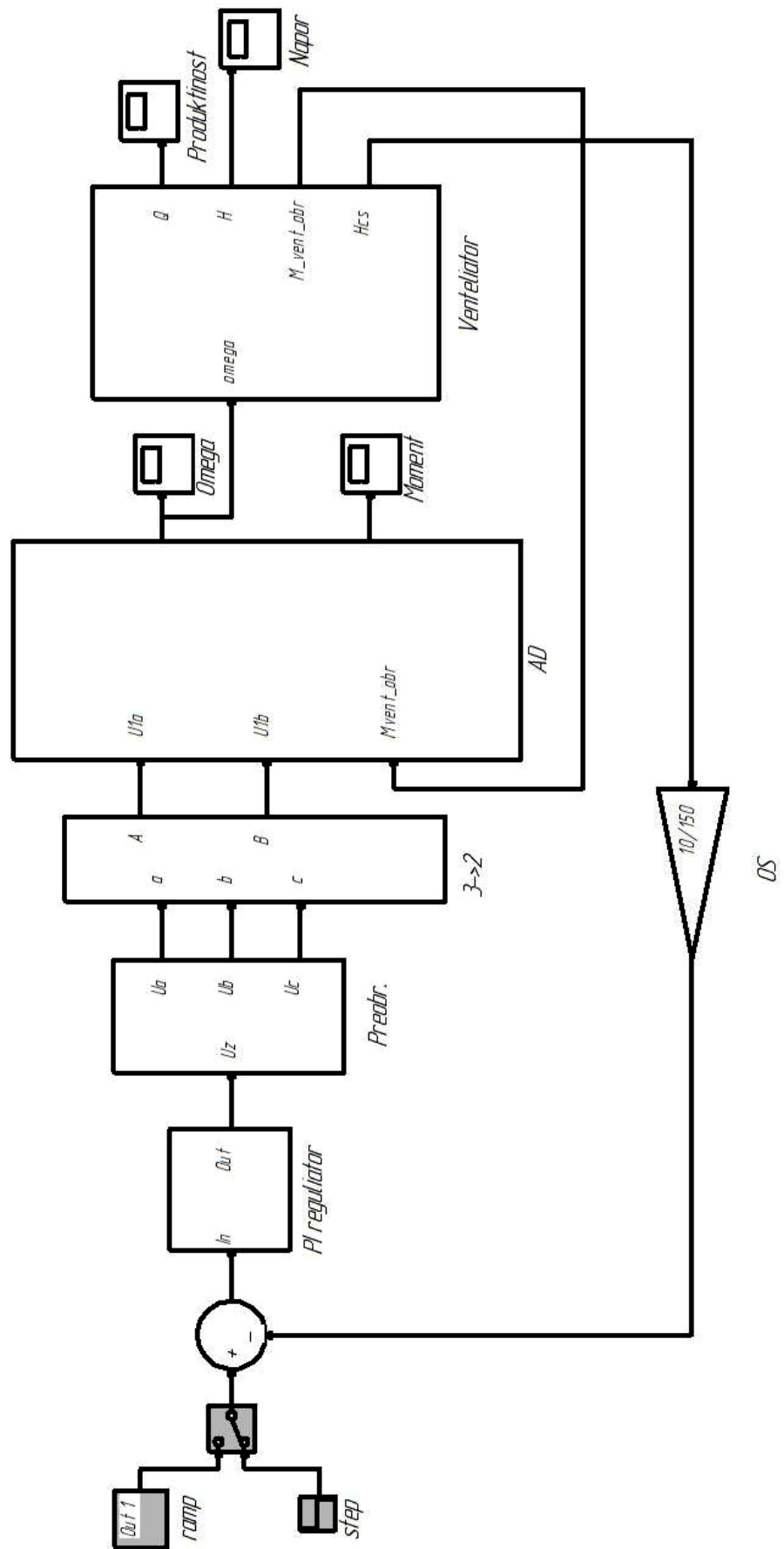


Рисунок 4.1 – Система ПЧ-АД з вентилятором

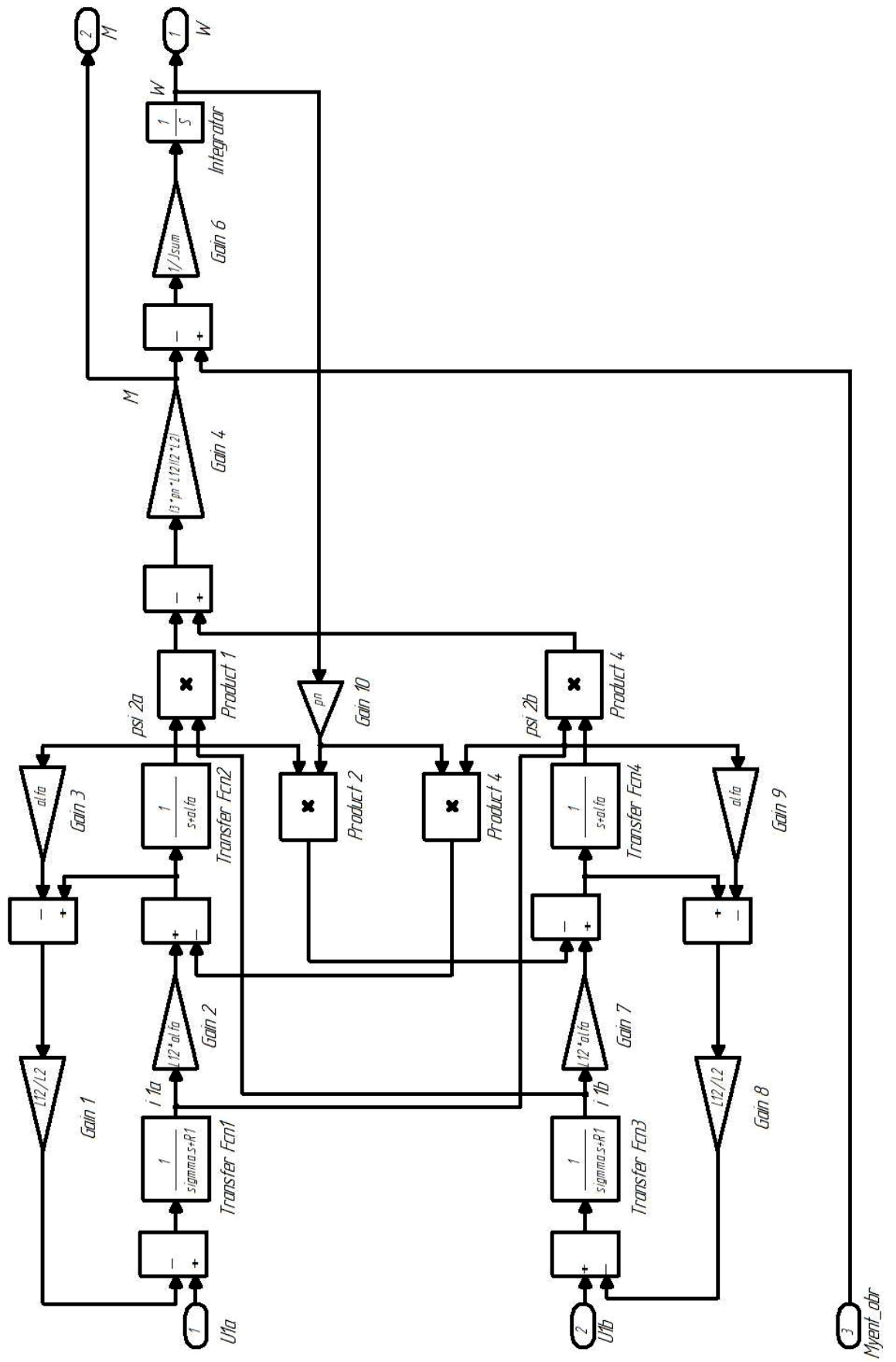


Рисунок 4.2 – Підсистема AD

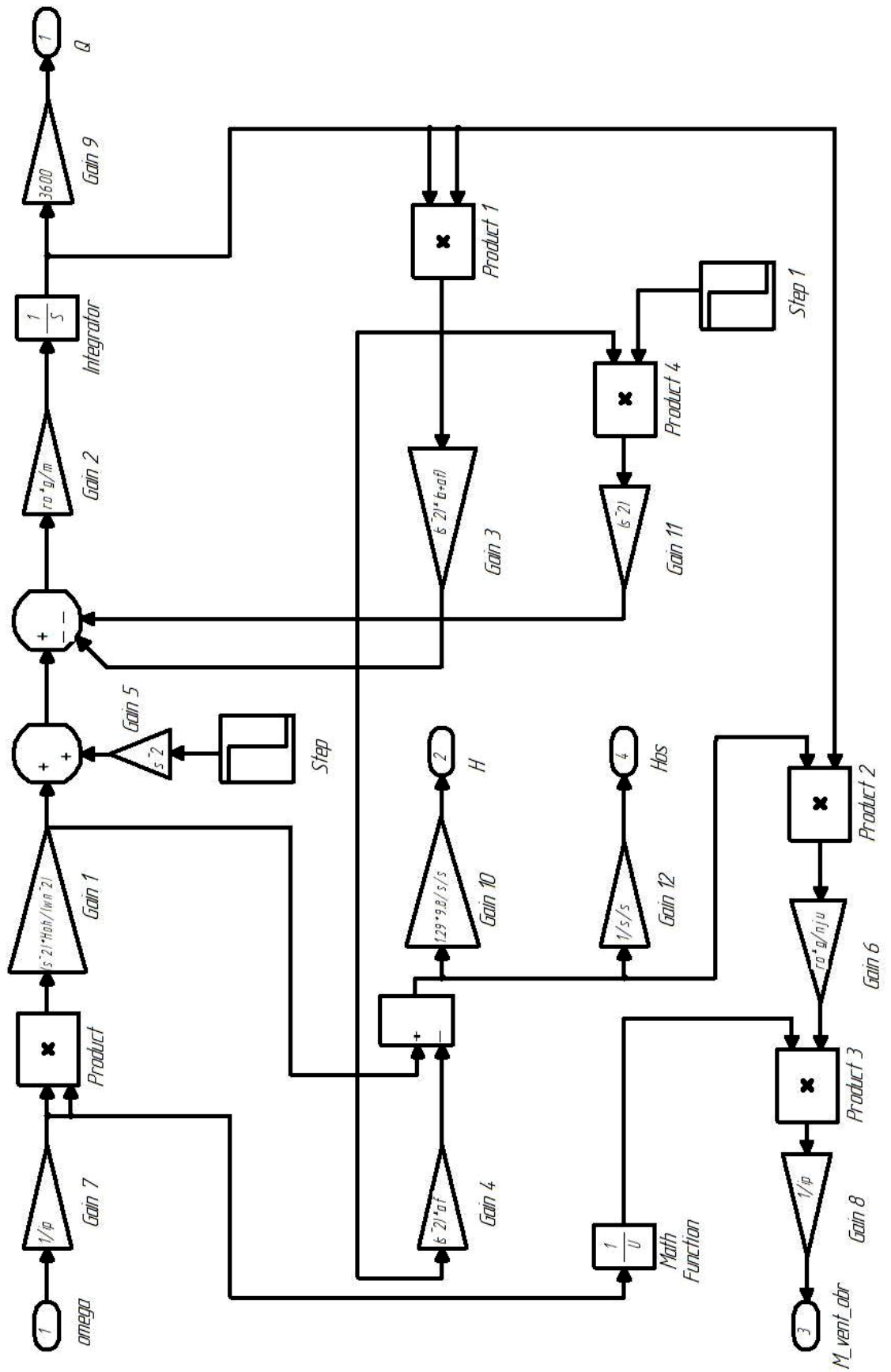


Рисунок 4.3 – Підсистема Venteliator

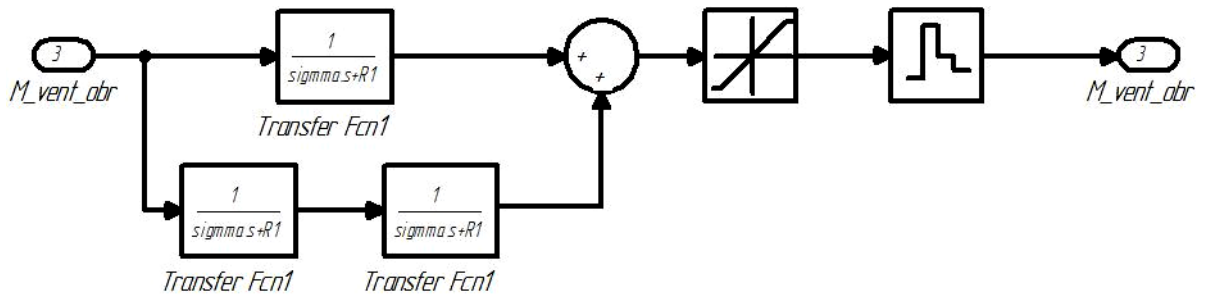


Рисунок 4.4 – Підсистема PI regulator

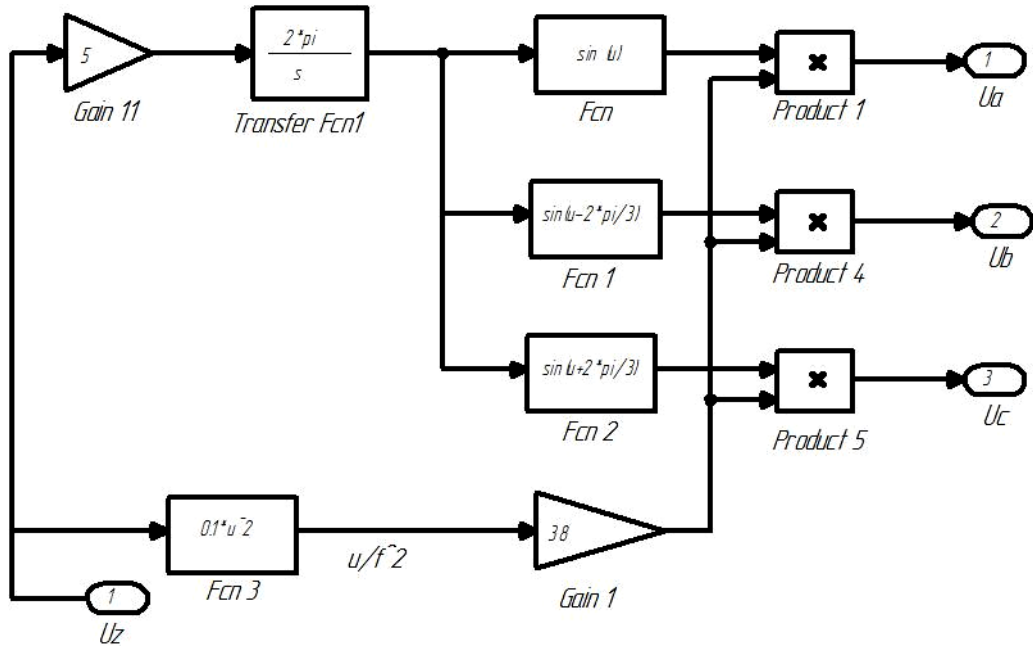


Рисунок 4.5 – Підсистема Preobr

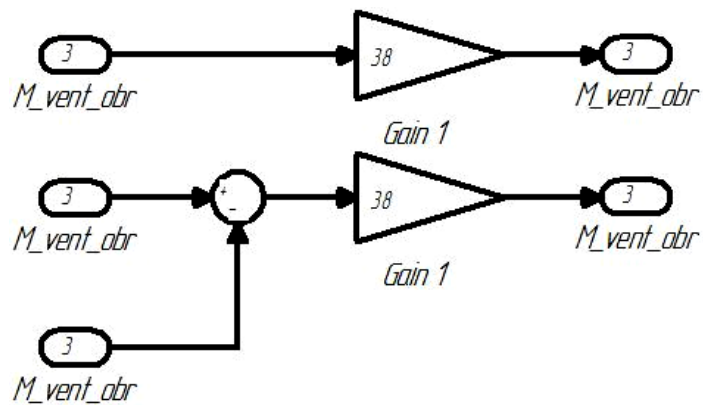


Рисунок 4.6 – Підсистема 3 > 2

У результаті моделювання розробленої системи одержано графіки перехідних процесів, зображені на рис.4.7–4.9.

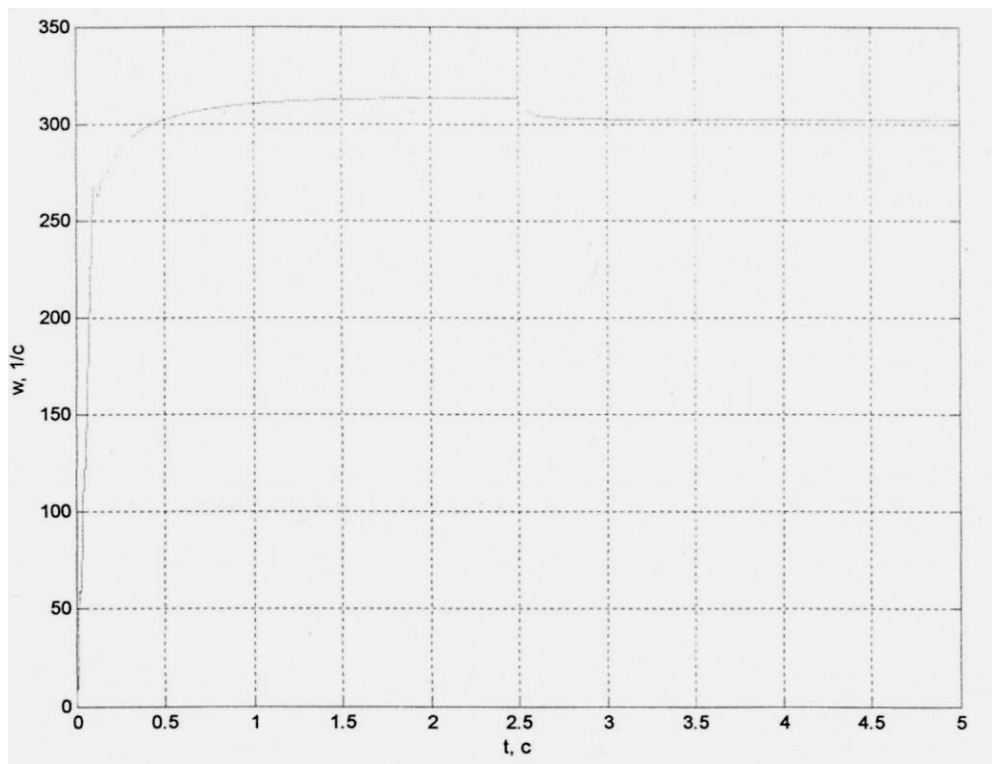


Рисунок 4.7 – Графік перехідного процесу по швидкості

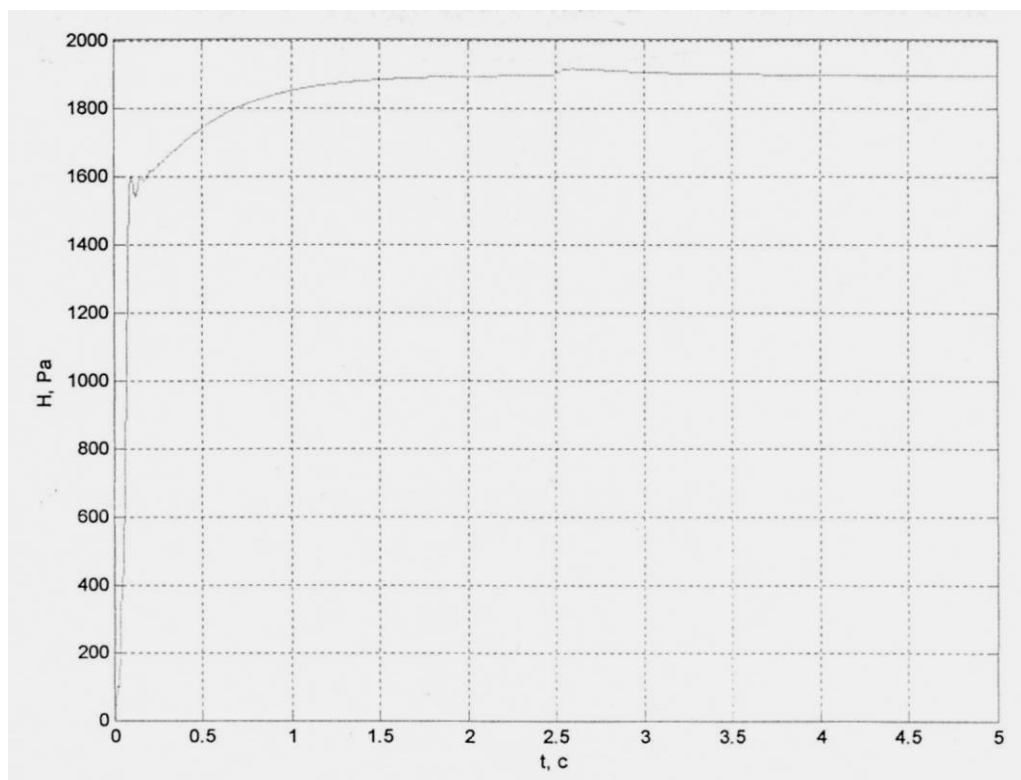


Рисунок 4.8 – Графік перехідного процесу по тиску

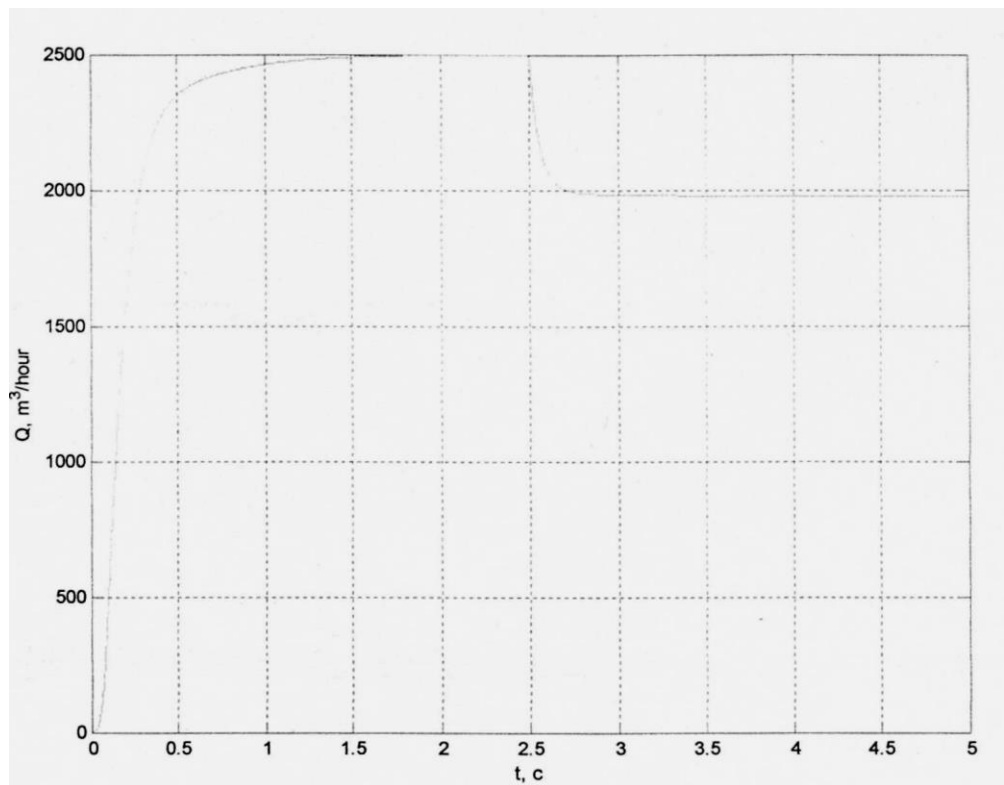


Рисунок 4.9 – Графік переходного процесу по продуктивності

Запуск електродвигуна виконується у холостому режимі. Аналізуючи графіки динаміки, видно, що стабілізація системи завершується приблизно через 1,5 секунди. У жодному з переходних процесів не спостерігається перерегулювання. За наявності навантаження відзначається зниження частоти обертання та відповідне зменшення ефективності роботи вентилятора. Водночас ПІ-регулятор ефективно підтримує постійне значення тиску, що відповідає вимогам до роботи системи.

ВИСНОВОК

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було спроектовано систему керування швидкістю електропривода для транспортування ПЕТ-пляшок, з урахуванням специфіки технологічного процесу. Налаштування системи в аперіодичному режимі дозволило отримати ПІ-регулятор, що ефективно усуває статичну похибку регулювання тиску. Відсутність диференційної складової у структурі регулятора забезпечує м'який перехідний процес, завдяки чому виключається деформація тари під час руху між напрямними.

На основі розрахункових характеристик системи підібрано вентилятор типу ВР-300-45-2.5ДО1, виготовлений з нержавіючої сталі та оснащений фільтрувальним елементом Фяс11Н16ОА. Враховуючи параметри електроживлення, обрано асинхронний двигун серії 4А90L2У3.

Система регулювання, реалізована з використанням частотного перетворювача у поєднанні з мікроконтролером, забезпечує стабільну роботу як у сталих, так і в перехідних режимах. Для оцінки функціональності системи створено її математичну модель, за якою виконано імітаційне моделювання. Результати підтвердили відповідність параметрів перехідного процесу встановленим вимогам: похибка по тиску не перевищила 1%, час виходу на режим по швидкості становив 1,25 с, по тиску – 1,6 с, по продуктивності – 1,25 с.

Таким чином, розробка повністю відповідає завданню випускної кваліфікаційної роботи та може бути впроваджена в реальні технологічні лінії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Момот В.Ю. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Частина 1. Автоматизований електропривод механізмів безперервної дії: Навчальний посібник / В.Ю. Момот, А.А. Видмиш. – Вінниця: ВДГУ, 1998. – 129 с.
2. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування: Підручник / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.
3. Кравчик А.З., Шлаф М.М. и др. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. - М: Энергоиздат, 1982.
4. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для ВУЗов. - Л. : Энергоиздат, 1982.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: Учебник. – М: «Академия», 2006.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для ВУЗов – М: «Академия», 2007.
7. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. - М.: Энергия, 1977.
8. Казьмерковский М., Вуйцак А. Схемы управления и измерения в промышленной электронике. - К.: Наукова думка, 1986.
9. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для ВУЗов. - М.: Энергия, 1980.
10. Охрана труда в машиностроении. Под ред. Е.Я. Юдина: Учебник для ВУЗов.-М.: Машиностроение, 1976.
11. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей редакцией И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1.-М.: Энергоатомиздат, 1988.
12. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. -М.: 1982.
13. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода : Учебник для ВУЗов. - 6-е изд., доп, и перераб. - М. : Энергоиздат, 1981.

14. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. «Электрические машины». - М.: Высшая школа, 1987.
15. Котеленец М. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Электромеханика». - М.: Высшая школа, 1988.
16. Кравчик А. З. и др. Выбор и применение асинхронных двигателей. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Марти Хармойнен. Преобразователи частоты с запираемыми тиристорами и микропроцессорным управлением. - Хельсинки: Стремберг, 1987.
18. Паньков О. Д. Автоматизированный электропривод металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов. Аналитический обзор, - М.: ВНИИ-ТЗМР, 1990.
19. Соболев О. В. Развитые функции контроля и управления в автоматических системах управления непрерывными технологическими процессами. // Приборы, средства автоматизации и системы управления: ТС - «Автоматизированные системы управления» - М.: Информприбор, 1990.