

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут
Кафедра електромеханічних та комп'ютерних систем

До захисту допущено

Завідувач кафедри


(підпис)

Інна НЕФЬОДОВА
(ім'я, прізвище)

«05» зрудня 2024 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

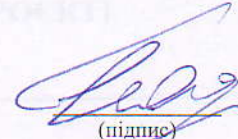
спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

освітньо-професійна Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
тема «Синтез електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора»

Виконав(ла)

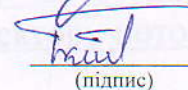
здобувач(ка) групи БД-П23мг
(шифр групи)

Гліб МАТВІЙЧУК
(ім'я, прізвище)


(підпис)


Керівник роботи

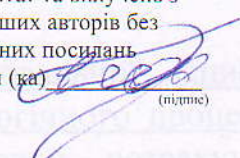
к.т.н., доц. Борис КОБИЛЯНСЬКИЙ
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)


(підпис)

Рецензент роботи

к.т.н., доц. Ольга ЧОРНА
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)


(підпис)

Засвідчую, що у цій роботі
немає цитат та вилучень з
праць інших авторів без
відповідних посилань
здобувач (ка) 
(підпис)

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Факультет/ІНІ Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут

Кафедра Електромеханічних та комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)



(підпис)

«08» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

Матвійчук Гліб Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора

керівник роботи Кобилянський Борис Борисович, к. т. н., доцент

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

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3236

2. Строк подання здобувачем роботи «02» грудня 2024 р.


3. Перелік питань, які потрібно розробити: В пояснювальній записці необхідно відобразити аналітичний огляд та опис технологічного процесу, формулювання вимог до електроприводу, енергосиловий розрахунок параметрів технологічного об'єкта, обґрунтування вибору потужності двигуна, вибір електродвигуна та силового електрообладнання, математична модель електромеханічного об'єкта, розрахунок статичних та динамічних параметрів електроприводу, синтез системи керування та дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи шляхом моделювання.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Огляд літературних джерел, нових розробок, опублікованих даних та іншої інформації, пов'язаної з темою роботи
2	Обґрунтування теоретичної бази обраної проблеми.
3	Характеристика об'єктів галузі: стан і стратегії розвитку
4	Дослідження синтезу електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора
5	Розробка електромеханічної системи частотного керування швидкістю асинхронного двигуна із орієнтацією по вектору потокозчеплення ротора
6	Оформлення першого варіанту тексту, подання його на ознайомлення науковому керівнику
7	Усунення недоліків, написання остаточного варіанту тексту, оформлення дипломної роботи
8	Подання роботи на кафедру, перевірка на плагіат та зовнішнє рецензування роботи
9	Захист дипломної роботи у ЕК

5. Дата видачі завдання «08» жовтня 2024 р.


Здобувач(ка)


(підпис)

Гліб МАТВІЙЧУК

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Борис КОБИЛЯНСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі проведено аналітичний огляд об'єкта, виконано розрахунок та вибір двигуна. Розроблена математична модель, у процесі математичних обчислень визначено всі її параметри. В ході дослідження проаналізовано алгоритм компенсації критичного моменту на низьких швидкостях. Аналіз графіків перехідних процесів та механічних характеристик свідчить про те, що запроваджений метод підвищення критичного моменту забезпечує статичну та динамічну стійкість роботи асинхронного двигуна в розширеному діапазоні регулювання кутової швидкості. Проте тривала робота двигуна в такому режимі є недопустимою.

Наведено рекомендації щодо практичної реалізації електроприводу. В якості керуючого пристрою обрано мікроконтролер на основі цифрового сигнального процесора. Для силової частини використано типове рішення з проміжною ланкою постійного струму та трифазним інвертором на виході.

Отримані результати досліджень можуть бути корисними при проектуванні та експлуатації ряду механізмів, де необхідно забезпечити надійний запуск з підвищеним моментом.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ,
АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, СИНТЕЗ

ABSTRACT

The work includes an analytical review of the object, calculation and selection of the engine. A mathematical model has been developed, and all its parameters have been determined in the process of mathematical calculations. The study analyzed the algorithm for compensating the critical torque at low speeds. Analysis of the graphs of transient processes and mechanical characteristics indicates that the introduced method of increasing the critical torque provides static and dynamic stability of the operation of the asynchronous motor in the extended range of angular velocity regulation. However, long-term operation of the motor in this mode is unacceptable.

Recommendations are given for the practical implementation of the electric drive. A microcontroller based on a digital signal processor was chosen as the control device. A typical solution with an intermediate DC link and a three-phase inverter at the output was used for the power part.

The obtained research results can be useful in the design and operation of a number of mechanisms where it is necessary to ensure reliable start-up with increased torque.

ELECTROMECHANICAL SYSTEM, FREQUENCY CONTROL,
INDUCTION MOTOR, SYNTHESIS

ВСТУП

Розглянемо основні особливості роботи електроприводу. Для цих приводів характерна тривала експлуатація протягом великих проміжків часу (змін або декількох змін). Це суттєво відрізняє більшість електроприводів машин від інших типів машин, які зазвичай функціонують в циклічному повторно-короткочасному режимі. Завантаження машин, транспортування та зняття вантажу проводиться, як правило, без зупинок, без пауз у роботі самої машини. Такий режим роботи значно впливає на розрахунок і вибір двигунів. Для цих механізмів характерні відносно рідкісні пуски, які зазвичай відбуваються кілька разів на добу, а їх тривалість майже не впливає на продуктивність машини. У багатьох випадках тривалість пуску спеціально збільшують, щоб зменшити перевантаження та прискорення під час розгону.

Напрямок обертання механізмів, а отже, і вала електропривода, зазвичай залишається незмінним або змінюється дуже рідко. Переходи від холостого ходу до максимального навантаження є досить рідкісними. Також спостерігаються коливання навантаження. Значні перевантаження, особливо якщо вони тривають довго, можуть виникати в машинах, що працюють на відкритому повітрі в складних атмосферних умовах.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Загальні відомості

Стрічкові конвеєри відносяться до механізмів безперервної дії і характеризуються постійним переміщенням вантажів по визначеній траєкторії без зупинок для завантаження або розвантаження. Сипучий вантаж розташовується суцільним шаром на несучому елементі — стрічці, або ж частинами. Штучний вантаж також транспортується безперервним потоком у заданій послідовності, один за одним. Завдяки безперервності переміщення, відсутності зупинок для завантаження і розвантаження, а також поєднанню робочого і оборотного рухів вантажонесучого елемента, машини безперервної дії демонструють високу продуктивність, що є важливим критерієм для сучасних підприємств з великими вантажопотоками.

Стрічкові конвеєри знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості завдяки своїм високим експлуатаційним якостям: можливості транспортування вантажів на великі відстані, значній продуктивності, простоті конструкції, високій надійності та відносно легкій вазі.

Конструкція конвеєра визначається характером вантажів, які переміщуються, їх масою та швидкістю. Сипучі вантажі перевозять стрічковими конвеєрами, тоді як штучні — за допомогою пластинчастих, роликів і підвісних конвеєрів. На промислових підприємствах зазвичай використовуються стрічкові та підвісні ланцюгові конвеєри. Стрічкові конвеєри в основному застосовуються на металургійних заводах, в гірничих розробках, для подачі пального на електростанції, а також у будівельній і харчовій промисловості. Підвісні ланцюгові конвеєри використовуються на машинобудівних заводах, а також у хімічних, фарбувальних та інших виробничих цехах.

Механізми безперервного транспорту простіші в конструкції та експлуатації, ніж крани та підйомники, які працюють за циклічним принципом. За обсягом перевезених вантажів і довжиною трас стрічкові

конвеєри часто можуть успішно конкурувати з автомобільним та залізничним транспортом.

Стрічковий конвеєр можна назвати транспортний механізм, призначений для переміщення насипних та штучних вантажів у горизонтальному та похилому напрямках в безперервному потоці, без зупинок на завантаження і розвантаження. Основною конструктивною частиною механізмів безперервного транспорту, зокрема конвеєрів, є замкнутий, постійно рухомий тяговий орган, виготовлений зі спеціальної текстильної, прогумованої або сталевий стрічки. Тяговий орган також може бути виконаний з ланцюгів та канатів. Вибір конструкції тягового органу залежить не лише від характеру переміщуваного вантажу, а й від умов навколишнього середовища, в яких працює механізм. Зазвичай тяговий орган приводиться в рух за допомогою приводних барабанів, зірочок, багатогранних блоків та інших подібних пристроїв, які експлуатуються електричними двигунами.

Температура зовнішнього повітря при встановленні конвеєрів на відкритих майданчиках може коливатися в межах від -50 до $+45$ °С.

Перевагою стрічкових конвеєрів є їх здатність забезпечувати високу продуктивність (до 30000 тонн на годину) незалежно від довжини установки зі швидкістю транспортування до 6,3 м/с. Конвеєри можуть використовуватися при значних кутах нахилу траси (до $18...20$ °). Використання конвеєрного транспорту дозволяє суттєво підвищити продуктивність праці під час транспортування, оскільки цей вид транспорту легко автоматизується.

Серед недоліків стрічкових конвеєрів варто відзначити вимогу суворій прямолінійності траси в плані, короткий термін служби конвеєрної стрічки, яка може становити до половини вартості всієї конвеєрної установки. Також стрічковий конвеєр чутливий до типу перевезених вантажів. Звичайні стрічкові конвеєри здатні переміщати вантажі крупністю до 300...400 мм. Транспортування липких, сильно зволжених вантажів викликає труднощі, пов'язані з очищенням стрічки після розвантаження.

1.2 Класифікація конвеєрів

На сьогодні існує кілька видів конвеєрів, класифікація яких ґрунтується на їх конструкції.

По тяговому органу конвеєри поділяються на:

- стрічкові;
- інерційні;
- гвинтові;
- канатні;
- ланцюгові.

За типом вантажонесучого органу:

- ковшові;
- скребкові;
- люлькові;
- стрічкові;
- пластинчасті.

За способом виконання конвеєри класифікуються на:

- конвеєри великої протяжності;
- горизонтальні і похилі;
- вигнуті (поворотні);
- стаціонарні та пересувні;
- реверсивні.

З можливістю повороту в вертикальній і/або горизонтальній площині:

- телескопічні;
- крутопохилі зі стрічкою типу «кишеня».

Також розрізняють обладнання за типом переміщуваного вантажу (сипучі та штучні) і за умовами експлуатації (стаціонарні, пересувні, модульні, підвісні тощо).

1.3 Особливості конструкції

Розглянемо конструкцію стрічкового конвеєра (рис.1.1).

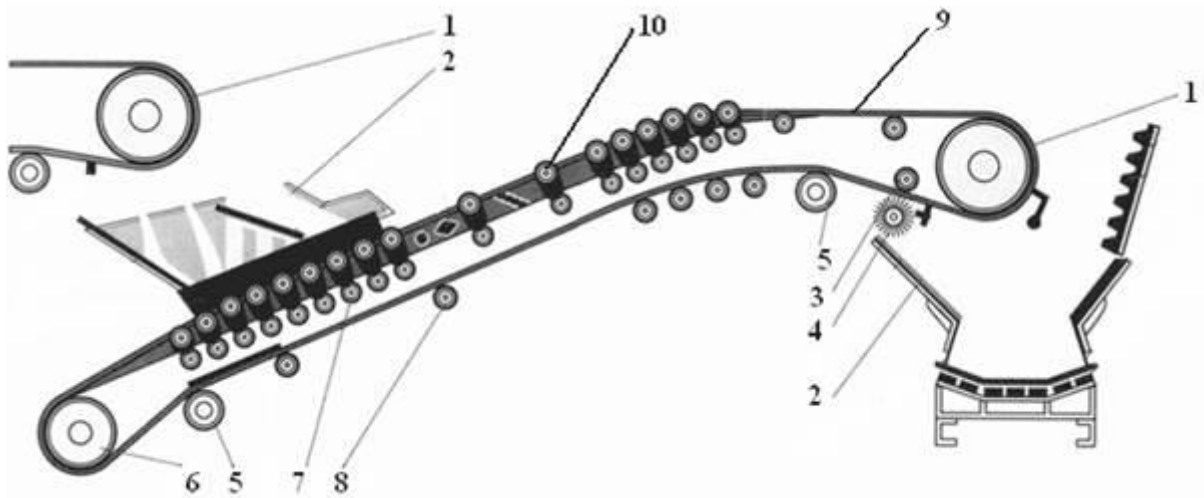


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд стрічкового конвеєра

1 - приводний барабан; 2 - завантажувальний лоток; 3 - притискний ролик; 4 - очисний пристрій; 5 - відхиляючий барабан; 6 - кінцевий барабан; 7 - амортизуючі роликоопори; 8 - нижні роликоопори; 9 - стрічка; 10 - верхні роликоопори.

Такі конструктивні елементи, як привідна і натяжна станції, характерні не тільки для стрічкових конвеєрів; вони є необхідними компонентами ланцюгових, канатних та інших механізмів безперервного транспорту.

Найважливішою і найдорогою частиною стрічкових конвеєрів є їх ведуча частина — стрічка. Вона обмежує можливості конвеєра щодо температури навколишнього середовища та характеру транспортуваних вантажів, оскільки легко піддається термічному впливу, пробоям, розривам і зносу. Тому стрічкові конвеєри в основному використовуються для транспортування сипучих вантажів, таких як зерно, корми, пісок, глина, руда, паливо тощо.

Підвісні ланцюгові конвеєри встановлюються на спеціальних конструкціях або колонах уздовж цехів, а іноді використовуються балки

поверхових перекриттів тощо. Підвісні конвеєри забезпечують безперервне транспортування вантажів в межах цехів і навіть між кількома цехами. Вони не перешкоджають установці основного технологічного обладнання. Оскільки ведучою частиною конвеєра є сталеві ланцюги, ці конвеєри можуть працювати, наприклад, в умовах з високим вмістом агресивних парів, таких як сушильні або термічні цехи.

Призначення і характеристики підвісних конвеєрів дуже різноманітні. Швидкості руху ланцюгів можуть варіюватися від декількох міліметрів до десятків метрів на хвилину, маса переміщуваних вантажів коливається від кількох грамів до кількох тонн, а довжина може сягати сотень метрів.

1.4 Основні вимоги до електроприводу

Розглянемо основні характеристики роботи електроприводу машин безперервного транспорту. Для цих приводів характерна тривала експлуатація протягом великих проміжків часу (змін або декількох змін). Це суттєво відрізняє більшість електроприводів у машинах безперервного транспорту від інших підйомно-транспортних машин, які функціонують в циклічному повторно-короткочасному режимі. Завантаження, транспортування та розвантаження у машинах безперервного транспорту, зазвичай, відбуваються без зупинок і пауз в роботі. Це суттєво позначається на розрахунках і виборі двигунів. Для таких механізмів характерні відносно рідкісні пуски, які зазвичай відбуваються кілька разів на добу, причому їх тривалість мало впливає на продуктивність машини. У багатьох випадках тривалість пуску навмисно збільшують, щоб зменшити перевантаження та прискорення вантажу на стрічці при розгоні, уникнути його розсипання та пробуксовування стрічки.

Напрямок обертання механізмів, а відповідно, і вала електропривода машин безперервного транспорту, зазвичай залишається стабільним або змінюється рідко. Наприклад, конвеєр, як правило, тривалий час транспортує сипучі матеріали або штучні вантажі в одному напрямку, а ескалатор працює

на підйом або спуск пасажирів протягом тривалого часу. Лише окремі машини безперервного транспорту, такі як канатні дороги, вимагають частого реверсу механізмів.

Конвеєри, елеватори та інші машини безперервного транспорту функціонують при певному стабільному навантаженні. Переходи від холостого ходу до максимального навантаження є досить рідкісними. Коливання навантаження на ескалаторі та його періодичність можуть залежати від кількості пасажирів, узгодженості розкладів руху поїздів тощо. Ще більш стабільним є навантаження на конвеєри, встановлені на теплових станціях, гірничозбагачувальних комбінатах та інших промислових об'єктах. Стабільне навантаження спостерігається в лініях безперервного транспорту в машинобудуванні, приладобудуванні та при складанні радіоапаратури. Значні перевантаження, особливо тривалі, можуть виникати в конвеєрах, що працюють на відкритому повітрі в складних атмосферних умовах, через змерзання матеріалів або зміни температури мастила механізмів.

При розрахунку ЕМС стрічкового конвеєра необхідно мати наступні вихідні дані [3]:

- План та вертикальний профіль траси конвеєра, з вказаними довжиною та висотою кожної ділянки від єдиної мітки – рівня приміщення чи місцевості, в якій розташований конвеєр, а також місця завантаження і розвантаження.

- Основне призначення конвеєра у технологічному процесі виробництва та характеристика взаємозв'язку конвеєра з технологічними машинами, якщо такі є.

- Характеристика вантажу, що транспортується. Для насипних вантажів – назва, гранулометричний склад із відсотковим вмістом кожної фракції вантажу та максимального розміру шматків, густина при вільному насипу, кут природного нахилу, вологість у відсотках, абразивність, липкість (наявність глинистих включень), температура (якщо відрізняється від температури навколишнього середовища), коефіцієнт розрихленості (якщо продуктивність задається в щільному масиві) та особливі властивості, наприклад, хімічна

активність або вибухонебезпечність. Для штучних вантажів – назва, опис з габаритними розмірами, маса однієї одиниці, температура і особливі властивості (крихкість, абразивність, вибухонебезпечність). Якщо на конвеєр подається кілька різних насипних або штучних вантажів, то зазначені параметри надаються для кожного з них.

- Запланована масова (т/г) або об'ємна ($\text{м}^3/\text{г}$) продуктивність – середня експлуатаційна та максимальна за способом завантаження. Для конвеєрів підвищеної відповідальності – графік зміни продуктивності в робочу зміну або протягом доби для визначення найбільш вірогідної розрахункової продуктивності. Якщо на конвеєрі має транспортуватися кілька різних вантажів, продуктивність вказується для кожного вантажу з зазначенням порядку подачі на конвеєр.

- Способи завантаження і розвантаження конвеєра, періодичність подачі вантажу; планований коефіцієнт використання конвеєра за часом.

- Кількість годин роботи за добу, кількість робочих днів у році, планований коефіцієнт використання конвеєра.

- Умови експлуатації конвеєра та характеристика навколишнього середовища; місце встановлення конвеєра – в опалювальному чи неопалювальному приміщенні, на відкритому повітрі, в закритій галереї (опалюваній чи неопалюваній) з місцевим захистом стрічки тощо; температура навколишнього середовища та межі її коливання впродовж року; група кліматичного виконання конвеєра згідно з ГОСТ 15150-69; вологість повітря в оточенні та межі її змін, запиленість повітря, наявність хімічно активних газів чи парів, а також інші особливі характеристики, що можуть впливати на роботу конвеєра.

- Номінальна потужність електричної мережі та тип струму.

- Коефіцієнт готовності конвеєра.

1.5 Приводи конвеєрних ліній

Мотор-барабан

Розвиток підйомно-транспортного машинобудування, в тому числі й стрічкових конвеєрів, гальмувалося через відсутність відповідної сучасної номенклатури редукторів, які є основою приводу будь-якої підйомно-транспортної машини. Наразі як вітчизняні, так і зарубіжні компанії пропонують розробникам та виробникам практично будь-які необхідні редуктори, мотор-редуктори (включаючи варіатори), а також тиристори для безступінчатого регулювання частоти обертання приводу в широкому діапазоні.

У якості приводу для конвеєрів популярно використовуються мотор-барабани. Мотор-барабан поєднує в єдиному приводному агрегаті всі елементи, необхідні для приводу стрічкового конвеєра: електродвигун, редуктор і барабан. При такій компоновці весь привід розміщується всередині барабана. Відсутність перекосів валів електродвигуна, редуктора і барабана, а також виготовлення без з'єднувальних муфт, які притаманні звичайним приводам, значно спрощує монтаж конвеєра, усуває необхідність налагодження та з'єднання цих компонентів, а також підвищує ККД системи.

Монтаж мотор-барабана на конвеєрі зводиться до встановлення шийок валу в спеціальні пази рами конвеєра. Надійний захист двигуна та редуктора значно зменшує знос і шум під час роботи конвеєра. Відсутність спеціальної рами для приводу, чавунного корпусу редуктора, з'єднувальних муфт і корпусу електродвигуна дозволяє значно зменшити вагу мотор-барабана, роблячи його легшим, компактнішим і простішим в експлуатації, ніж звичайні приводи відповідної потужності. Пило- та водонепроникне виконання, яке є природним конструктивним рішенням для мотор-барабанів, особливо зручно при установці конвеєрів на відкритому повітрі або в умовах підвищеної запиленості та вологості.

Завдяки вказаним перевагам мотор-барабани зараз широко використовуються як приводні пристрої для стрічкових конвеєрів різного типу

та призначення. Прикладом сучасного конструктивного виконання можуть слугувати мотор-барабани діаметром 160, 215, 315, 400, 510 і 630 мм та довжиною від 310 до 1800 мм, які виробляє компанія "Bauer" (ФРН), з номінальною потужністю від 0,55 до 18,5 кВт і швидкістю стрічки від 0,14 до 3 м/с.

Системи електроприводів механізмів безперервної дії

В електроприводах стрічкових конвеєрів довжиною до 3000 м і потужністю до 100 кВт зазвичай використовуються асинхронні двигуни з коротким замиканням. Перевагами таких електроприводів є їхня простота та відносно низька ціна, проте недоліками є підвищений пусковий момент, що може призвести до великих натягнень і пробуксовування стрічки.

Асинхронні електроприводи з муфтами ковзання (гідромуфти, електромагнітні муфти) також стали популярними. Ці системи забезпечують рівномірний розподіл навантаження між двигунами в багатодвигунному електроприводі та плавний пуск конвеєра. Зарубіжна практика використовує дводвигунний електропривод, в якому, окрім основного двигуна, встановлений додатковий двигун меншої потужності, що забезпечує вже плавний розгін конвеєрної стрічки з меншим прискоренням. Потужність електроприводу з короткозамкненим асинхронним двигуном може досягати 200 кВт. Для більш потужних електроприводів стрічкових конвеєрів широко використовуються асинхронні двигуни з фазним ротором, які дозволяють забезпечити однакову жорсткість характеристик, що є вкрай важливим для конвеєрних електроприводів.

Якщо характеристики двигунів відрізняються, кожен з них може генерувати тягове зусилля, що відрізняється від розрахункового. Тому застосовуються асинхронні двигуни з фазним ротором, оскільки ввімкнення резисторів у роторні кола двигунів забезпечує плавний пуск конвеєра та, у випадку багатодвигунного електроприводу, рівномірний розподіл навантаження.

Для конвеєрів часто доцільно використовувати регульовані електроприводи. Перспективними є системи з асинхронними двигунами і частотним керуванням, асинхронні вентильні каскади, а також електроприводи постійного струму з перетворювачами. Використання лінійних двигунів дозволяє уникнути складних і металоемних редукторних механічних передач, створюючи безконтактні й безредукторні електроприводи.

Конвеєрний транспорт широко використовується в гірничих і геологорозвідувальних роботах. Наразі на кар'єрах впроваджені конвеєрні лінії з продуктивністю до 10 000 м³/год і протяжністю 10–15 км. Оскільки кількість конвеєрів на лінії може бути значною, застосовується централізоване управління приводами конвеєрних установок з автоматизованим запуском. У цьому випадку оператор подає лише початковий командний імпульс для запуску першого конвеєра, а решта двигунів включається автоматично в установленій послідовності.

Керування приводом

Характерною рисою сучасних потужних стрічкових конвеєрів є використання кількох, зазвичай уніфікованих приводів барабанів, які розташовані в головній і хвостовій частинах конвеєра. У цих приводах встановлюються асинхронні електродвигуни, циліндричні та конічно-циліндричні редуктори, а також жорсткі й гідродинамічні муфти. Конвеєри обладнані автоматичними натяжними пристроями, які забезпечують необхідний натяг стрічки.

Для підвищення ефективності сумісної роботи кількох приводів конвеєра важливо застосовувати системи регулювання. Основними завданнями регулювання є максимальне використання встановленої потужності приводів, зменшення ковзання стрічки на барабанах, а також обмеження пускового і гальмівного моментів. Способи керування асинхронними ЕД (тяговим елементом, швидкістю, жорсткістю механічної

характеристики) визначаються рівняннями, що описують роботу асинхронного електродвигуна

$$M = \frac{2M_k(1 + R_1 \varepsilon_k / R_2)}{\varepsilon / \varepsilon_k + \varepsilon_k / \varepsilon + 2R_1 \varepsilon_k / R_2}$$
$$\omega_0 = 2\pi f_n / N_p \quad (1.1)$$

де M - момент електродвигуна, M_k - критичний момент, ω_0 - кутова швидкість холостого ходу (рад / с), f_n - частота струму що живить статор (Гц), N_p - число пар полюсів, ε_k - критичне ковзання, R_1 і R_2 - приведені опори статора і ротора.

На основі рівнянь (1.1) реалізуються три основних методи управління: частотне управління, управління напругою та комбіноване управління. Частотне управління базується на змінах частоти живильної мережі. Цей метод використовується рідше, оскільки зменшення або збільшення частоти призводить до одночасних змін моменту та швидкості, що ускладнює регулювання конкретного параметра приводу.

При управлінні напругою регульоване значення, момент електродвигуна, змінюється пропорційно квадрату напруги. Найпоширенішим є комбіноване управління, що здійснюється одночасно за частотою та напругою, і використовується для регулювання моменту та швидкості електродвигуна. У цьому випадку жорсткість робочої ділянки механічної характеристики електродвигуна майже залишається сталою. Наразі системи управління електродвигунами, що ґрунтуються на комбінованому методі, набули великої популярності. Вартість таких систем приблизно оцінюється в співвідношенні 100 доларів за кВт. Системи, що використовують лише регулювання напруги, є більш простими і дешевими.

Основні принципи автоматизації конвеєрних ліній

Лінія складається з послідовно розташованих стрічкових пристроїв, які приводяться в рух асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.

Для запобігання перевантаження перевантажувальних пристроїв у багатосекційних стрічкових конвеєрах необхідна певна послідовність в увімкненні та вимкненні їх двигунів. При запуску секцій конвеєра двигуни вмикаються по черзі, починаючи з хвостової ділянки розвантаження в порядку, протилежному напрямку вантажопотоку. Команда на запуск наступного конвеєра подається лише після того, як вантажонесучий орган вже увімкненої секції розганяється до номінальної швидкості. Таке блокування здійснюється за допомогою реле швидкості, яке контролює рух вантажонесучого елемента.

Схема управління включає блокування, що забезпечує автоматичну зупинку всіх конвеєрів лінії, які подають вантаж на конвеєр, що зупинився через аварію. Інші конвеєри продовжують працювати, щоб звільнити тяговий орган від вантажу.

Контроль часу пуску конвеєрів є важливим. У випадку тривалого пуску конвеєр повинен вимкнутися і завадити запуску інших конвеєрів. Тривалий пуск може вказувати на несправність електроприводу або проковзування стрічки, що може призвести до її займання.

Система управління повинна забезпечувати аварійну зупинку конвеєра та всіх конвеєрів, що подають вантаж на зупинившийся у результаті аварії конвеєр, зниження швидкості стрічки, обрив тягового органу, перевантаження електродвигуна, перегрів підшипників приводних барабанів, утворення завалів у місцях перевантаження та сходження стрічки з конвеєра. Також вона повинна надавати можливість зупинки конвеєрної лінії з кількох точок.

Перший конвеєр, що слідує після другого за напрямком потоку вантажу, продовжує працювати. Одним з перспективних напрямків у автоматизації конвеєрного транспорту є впровадження мікропроцесорних технологій і мікро-ЕОМ. Використання мікропроцесорної техніки дозволяє зменшити габарити і вагу апаратури для управління, розширити спектр вирішуваних управлінських задач, а також забезпечити моніторинг технічного стану різних компонентів конвеєрної системи. Найбільш ефективно застосування

мікроЕОМ виявляється на великих розгалужених конвеєрних лініях з великою кількістю маршрутів і конвеєрів. У цьому випадку мікроЕОМ отримує інформацію про обсяги виробленої гірничої маси і може видавати команди на корекцію швидкості руху стрічки кожного з конвеєрів, забезпечуючи рівномірне навантаження магістральних конвеєрів великої потужності. Одночасно мікроконтролер, отримуючи дані від відповідних датчиків, вчасно визначає причину та місце аварійної ситуації і надсилає повідомлення диспетчеру.

Зважаючи на широке впровадження автоматизації в виробничі процеси, в останні роки почали використовувати автоматичні конвеєрні ваги безперервної дії. Ці ваги призначені для вимірювання маси сипучих вантажів, що транспортуються стрічковими конвеєрами. Вагове обладнання складається з вантажоприймального пристрою і вагового терміналу, а також блоку індикації і управління, з'єднаних дротами. Вантажопідйомний пристрій встановлюється замість наявної роликоспоори конвеєра на тензодатчиках TWO і має аналогічні габаритно-установчі розміри. Ваговий термінал містить два цифрових індикатора: верхній для відображення поточної продуктивності, лінійної швидкості або щільності (на вибір) та нижній для відображення загальної кількості переміщеного матеріалу. Ваги виготовлені відповідно до стандарту ГОСТ 30124-94.

У конструкціях конвеєрів все частіше використовують порожнистий прокат круглого і прямокутного перетину, що дозволяє значно знизити вагу конструкцій і надати їм сучасний естетичний вигляд. Пил, бруд і залишки вантажу не затримуються на гладких поверхнях і легко змиваються струменем води.

При проектуванні конвеєрів, які піддаються інтенсивному корозії (наприклад, при транспортуванні сірки, поташу та інших агресивних вантажів), для захисту металевих конструкцій від корозії іноді застосовують спеціальні захисні покриття. На попередньо очищену піскоструменевою

установкою сталеву поверхню наносять гарячий алюмінієвий сплав способом розбризкування.

Висновки по розділу

Стрічкові конвеєри отримали широке застосування завдяки кільком перевагам у порівнянні з іншими видами підйомно-транспортного обладнання, зокрема: високій продуктивності, що забезпечується великою швидкістю руху стрічки; невеликим енерговитратам; простоті конструкції та експлуатації; а також високій надійності.

Попри численні переваги, конвеєри мають ряд недоліків. До них відносяться: висока вартість стрічки та роликів, обмеження на переміщення при кутах нахилу траси (менше 18-20°), а також обмежене використання для транспортування пилоподібних, гарячих і важких штучних вантажів.

Стрічкові конвеєри звичайної конструкції мають певні серйозні недоліки:

1) оскільки стрічка піддається значним тяговим зусиллям, необхідно використовувати дорогі та важкі багатошарові стрічки;

2) бічні краї стрічки, якщо вона перекошена, швидко зношуються, і це, особливо за наявності вологи, призводить до швидкого загнивання оголеної тканини і руйнування стрічки;

3) численні опорні ролики вимагають постійного контролю та обслуговування.

Тому в останні роки стали популярними більш довговічні канатно-стрічкові конвеєри, в яких два сталевих канати, розташовані по обидва боки стрічки, несуть основне навантаження. Стрічка виконує роль лише підтримуючого елемента, тому, сприймаючи лише незначні тягові зусилля, вона може бути виготовлена з одного шару бавовняного текстилю, покритого з двох сторін гумовим шаром.

Вдосконалення механічного обладнання ведеться шляхом впровадження на конвеєрах мотор-барабанних або навісних мотор-редукторних приводів, та створення більш досконалих конструкцій і технологій роликкоопор.

Зважаючи на значні зміни, які сталися зі стрічковими конвеєрами за останні десятиліття, їх подальше вдосконалення, як очікується, зосередиться на розвитку конструктивних виконань та використанні невеликих стрічкових конвеєрів як елементів різних вантажно-розвантажувальних машин безперервної дії для насипних і штучних вантажів, а також на полегшенні і здешевленні технології виробництва сучасних типів високопродуктивних конвеєрних стрічок.

2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ, ВИБІР ДВИГУНА

2.1 Тяговий розрахунок параметрів стрічкового конвеєра

Проведемо розрахунок основних елементів електромеханічної частини стрічкового конвеєра. Розрахункова схема та її параметри приведені відповідно на рисунку 2.1 та в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Вихідні дані для розрахунків

Назва параметра		Значення параметра	Розмірність
Продуктивність	Π	7300	кг/год
Швидкість	V	1,1	м/с
Маса одного метра стрічки	m_0^*	10	кг/м
Кут обхвату приводного барабану	α_n	205	град'
Кут обхвату натяжного барабану	α_n	210	град'
Довжина ділянки 1-2	l_{12}	15	м
Довжина ділянки 3-4	l_{34}	76,5	м
Довжина ділянки 5-6	l_{56}	20	м
Довжина ділянки 7-8	l_{78}	75	м
Довжина ділянки 9-10	l_{910}	34	м
Кут нахилу до горизонту ділянки 1-2	β_{12}	20	град
Кут нахилу до горизонту ділянки 3-4	β_{34}	35	град
Кут нахилу до горизонту ділянки 5-6	β_{56}	55	град
Кут нахилу до горизонту ділянки 7-8	β_{78}	35	град
Кут нахилу до горизонту ділянки 9-10	β_{910}	0	град
Допустиме прискорення	$a_{дон}$	0,4	м/с ²

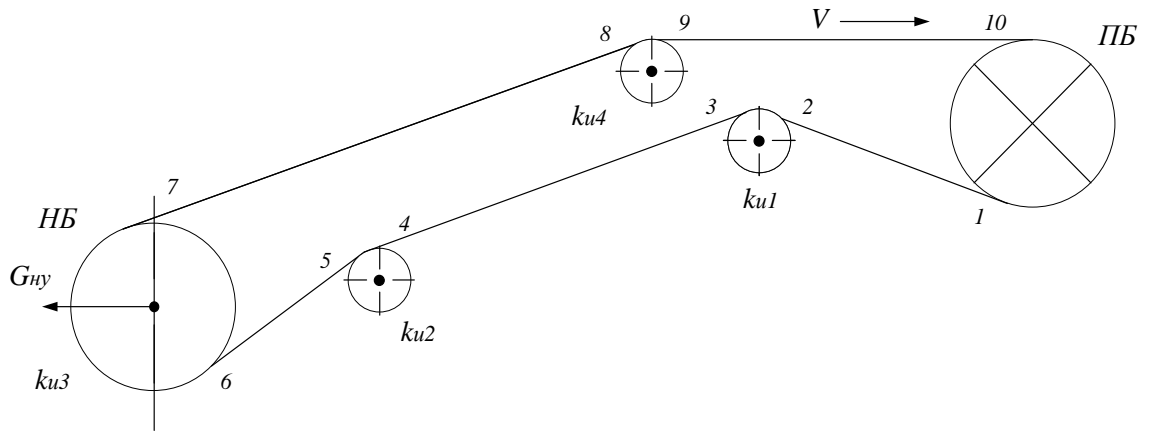


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема стрічкового конвеєра

Для проведення розрахунків приймаємо наступні значення результуючого коефіцієнту опору руху на прямолінійних ділянках та коефіцієнт тертя в підшипниках [6]:

$m = 0.2$ – коефіцієнт тертя в підшипниках приводних елементів;

$C_{II} = 0.022$ – результуючий коефіцієнт опору руху для конвеєрів.

В залежності від виду ділянки вигину та кута обхвату приймаємо результуючий коефіцієнт опору на ділянках вигину рівним:

$$C_{u1} = 0.05; C_{u2} = 0.05; C_{u3} = 0.05; C_{u4} = 0.03; C_{u5} = 0.02.$$

Відповідно коефіцієнт збільшення натягу на ділянці вигину буде рівним:

$$k_{u1} = 1 + C_{u1} = 1.05;$$

$$k_{u2} = 1 + C_{u2} = 1.05;$$

$$k_{u3} = 1 + C_{u3} = 1.03;$$

$$k_{u4} = 1 + C_{u4} = 1.02;$$

$$k_u = k_{u1} \cdot k_{u2} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} = 1.158.$$

Розрахуємо масу одного метра транспортованого вантажу у відповідності з заданою продуктивністю:

$$m_6^* = \frac{П}{3600\text{Ч}} = \frac{7300}{3600\text{Ч.1}} = 1.843 \text{ кг} / \text{м}.$$

Знаходимо маси окремих ділянок конвеєра:

$$m_{12} = m_0^* \text{Ч}_{12} = 10\text{Ч}5 = 150 \text{ кг};$$

$$m_{34} = m_0^* \text{Ч}_{34} = 10\text{Ч}6.5 = 765 \text{ кг};$$

$$m_{56} = m_0^* \cdot \ell_{56} = 10 \cdot 20 = 200 \text{ кг};$$

$$m_{78} = (m_0^* + m_B^*) \cdot \ell_{78} = (10 + 1.843) \cdot 75 = 888.258 \text{ кг};$$

$$m_{910} = (m_0^* + m_B^*) \cdot \ell_{910} = (10 + 1.843) \cdot 34 = 402.677 \text{ кг}.$$

Знаходимо розрахункову сумарну масу:

$$\begin{aligned} m'_\Sigma &= m_{910} + m_{78} \cdot k_{u4} + m_{56} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} + m_{34} \cdot k_{u2} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} + m_{12} \cdot k_{u1} \cdot k_{u2} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} = \\ &= 402.677 + 888.258 \cdot 1.02 + 200 \cdot 1.03 \cdot 1.02 + 765 \cdot 1.05 \cdot 1.03 \cdot 1.02 + \\ &+ 150 \cdot 1.05 \cdot 1.05 \cdot 1.03 \cdot 1.02 = 2536.457 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Радіус приведення:

$$\rho = \frac{D}{2i_p} = \frac{0.5}{2 \cdot 23} = 0.011 \text{ м},$$

де, D – діаметр барабану, i_p – передаточне число редуктора, які будуть вибрані пізніше.

Момент інерції системи, приведений до валу двигуна:

$$J' = m_\Sigma \cdot \rho^2 = 2536.457 \cdot (0.011)^2 = 0.3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Розраховуємо сили опору на прямолінійних ділянках:

$$q_0 = g \cdot m_0^* = 9.81 \cdot 10 = 98.1 \text{ Н};$$

$$q_B = g \cdot m_B^* = 9.81 \cdot 1.843 = 18.07 \text{ Н}.$$

q_0 - вагове навантаження на 1м шляху;

q_B - вагове навантаження на ділянках стрічки з вантажем.

$$\begin{aligned} \Delta F_{12} &= q_0 \cdot \ell_{12} (C_n \cos \beta_{12} + \sin \beta_{12}) = 98 \cdot 15(0.022 \cdot \cos(20) + \sin(20)) = \\ &= 533.703 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{34} &= q_0 \cdot \ell_{34} (C_n \cos \beta_{34} + \sin \beta_{34}) = 98 \cdot 76.5(0.022 \cdot \cos(35) + \sin(35)) = \\ &= -4169.247 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{56} &= q_0 \cdot \ell_{56} (C_n \cos \beta_{56} + \sin \beta_{56}) = 98 \cdot 20(0.022 \cdot \cos(55) + \sin(55)) = \\ &= 1631.934 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{78} &= (q_0 + q_B) \cdot \ell_{78} (C_n \cos \beta_{78} + \sin \beta_{78}) = \\ &= (98 + 1.843) \cdot 75(0.022 \cdot \cos(35) + \sin(35)) = 5155.069 \text{ Н} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{910} &= (q_0 + q_B) \cdot \ell_{910} (C_n \cos \beta_{910} + \sin \beta_{910}) = \\ &= (98 + 1.843) \cdot 34(0.022 \cdot \cos(0) + \sin(0)) = 86.906 \text{ Н} \end{aligned}$$

Розрахункове результуюче зусилля на прямолінійних ділянках траси:

$$\begin{aligned} F'_n &= \Delta F_{910} + \Delta F_{78} \cdot k_{u4} + \Delta F_{56} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} + \Delta F_{34} \cdot k_{u2} \cdot k_{u3} \cdot k_{u4} + \\ &+ \Delta F_{12} \cdot k_{u4} \cdot k_{u3} \cdot k_{u2} \cdot k_{u1} = 86.906 + 5155.069 \cdot 1.02 + \\ &+ 1631.934 \cdot 1.03 \cdot 1.02 + (-4169.247) \cdot 1.05 \cdot 1.03 \cdot 1.02 + \\ &+ 533.703 \cdot 1.05 \cdot 1.05 \cdot 1.03 \cdot 1.02 = 3078.546 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Знайдені значення m_e та F'_n дозволяють розрахувати мінімально допустимий натяг в точці збігання стрічки з приводного барабану.

Розраховуємо мінімально допустимий натяг в точці збігу стрічки з привідного барабана:

$$\begin{aligned} T_{зб\ min} &= \frac{F'_n + m_s \Psi_{дон}}{e^{m(a_{\Pi} \Psi / 180)} - k_{u4} \Psi_{u3} \Psi_{u2} \Psi_{u1}} = \\ &= \frac{3078.546 + 2536.457 \Psi_{0.4}}{e^{0.2 \Psi_{210} / 180} - 1.02 \Psi_{0.03} \Psi_{0.05} \Psi_{0.05}} = 4614.075 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Так як при визначенні розрахункової сумарної маси не враховувались маси опорних роликів та привідних барабанів, то $T_{зб}$ слід взяти з деяким коефіцієнтом запасу відносно значення $T_{зб\ min}$:

$$T_{зб} = 1.2 \Psi_{зб\ min} = 1.2 \Psi_{4614.075} = 5536.89 \text{ Н}.$$

Для визначення попереднього натягу стрічки, що забезпечує прийняте значення $T_{зб}$, визначимо мінімальний натяг, котрий має місце в точці 2 на рис.2.1:

$$\begin{aligned} T_2 = T_0 &= (T_{зб} + \Delta F_{12}) + k_{u1} + \Delta F_{34} + \Delta F_{56} = (5536.89 + 533.703) + \\ &+ 1.05 - 4169.247 + 1631.934 = 3836.811 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Для створення такого натягу потрібен натяжний вантаж вагою:

$$G_y = 2\Psi_0 = 2\cdot 3836.811 = 7673.621 \text{ H.}$$

Максимальний натяг має місце в точці набігу приводного барабану і дорівнює:

$$T_{нб} = k_u \cdot T_{зб} + F'_{II} = 1.158 \cdot 5536.89 + 3078.546 = 9491.851 \text{ H.}$$

Знаходимо потужність приводної станції конвеєра:

$$P_c = k_3 \Psi \frac{T_{нб} - T_{зб}}{h_p} \Psi = 1.1 \Psi \frac{9491.851 - 5536.89}{0.9} \Psi = 5317.226 \text{ Вт,}$$

де, $h_p = 0.9$ – коефіцієнт корисної дії механізму, $k_3 = 1.1$ – коефіцієнт запасу, що враховує неточності розрахунку сил опору.

2.2 Розрахунок епюри натягу стрічкового конвеєра уздовж замкнутого контуру

Для побудови епюри натягу потрібно розрахувати всі $T_{зб}$ та $T_{нб}$ на ділянках стрічкового конвеєра:

$$T_{нб1} = 1.2 \cdot T_{зб} + \Delta F_{12} = 1.2 \cdot 5536.89 + 533.703 = 7177.971 \text{ H,}$$

$$T_{нб2} = T_{нб1} \cdot k_{u1} + \Delta F_{34} = 7177.971 \cdot 1.05 - 4169.247 = 3367.623 \text{ H,}$$

$$T_{нб3} = T_{нб2} \cdot k_{u2} + \Delta F_{56} = 3367.623 \cdot 1.05 + 1631.934 = 5167.939 \text{ H,}$$

$$T_{нб4} = T_{нб3} \cdot k_{u3} + \Delta F_{78} = 5167.939 \cdot 1.03 + 5155.069 = 10478.045 \text{ H,}$$

$$T_{нб5} = T_{нб4} \cdot k_{u4} + \Delta F_{910} = 10478.045 \cdot 1.02 + 86.906 = 10774.512 \text{ H,}$$

$$T_{зб1} = T_{нб1} - \Delta F_{34} = 7177.971 - 4169.247 = 11347.218 \text{ H,}$$

$$T_{зб2} = T_{нб2} - \Delta F_{56} = 3367.623 - 1631.934 = 1735.689 \text{ H,}$$

$$T_{зб3} = T_{нб3} - \Delta F_{78} = 5167.939 - 5155.069 = 12.87 \text{ H,}$$

$$T_{зб4} = T_{нб4} - \Delta F_{910} = 10478.045 - 86.906 = 10391.14 \text{ H.}$$

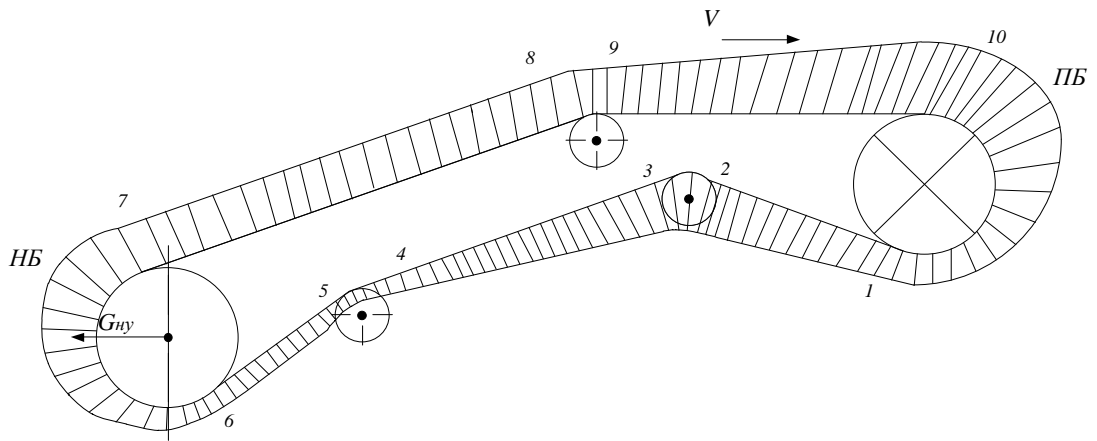


Рисунок 2.2 - Натяг стрічки

2.3 Вибір електродвигуна

За визначеною потужністю приводної станції конвеєра обираємо асинхронний двигун з короткозамкненим ротором типу 4А132S6У3 [7].

Кутова швидкість вектора напруги статора:

$$\omega_{0c} = 2p f = 2 \cdot 3 \cdot 50 = 314.159 \text{ рад/с};$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$\omega_{xx} = \frac{2\pi \cdot 50}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104.72 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальна швидкість двигуна

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - S_n) = 104.72 (1 - 0.033) = 101.264 \text{ с}^{-1}.$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{5500}{101.264} = 54.313 \text{ Нм}.$$

Критичний момент двигуна (на перевантажувальну здатність із каталогу):

$$M_k = m_k M_n = 2.5 \cdot 54.313 = 135.784 \text{ Нм}.$$

Перевіримо вибраний двигун по пусковому моменту та по нагріву .

Номінальна частота обертання двигуна: $n_n=1000$ об/хв.

Виберемо привідний барабан з діаметром: $D=0.5$ м.

Розрахуємо передаточне число редуктора:

$$i_p = \frac{D \cdot n_n \cdot \pi}{60 \cdot V} = \frac{0.5 \cdot 1000 \cdot 3.14}{60 \cdot 1.1} = 23.015.$$

За допомогою стандартного ряду передаточних чисел виберемо передаточне число редуктора $i_p = 23$.

Момент на привідній станції:

$$M_n = \frac{(T_{нб} - T_{сб}) \cdot D}{2 \cdot i_p} = \frac{(9491.851 - 5536.89) \cdot 0.5}{2 \cdot 23} = 42.988 \text{ Нм}.$$

Максимальний момент на валу двигуна:

$$M_{max} = k_3 \frac{(T_{нб} - T_{сб}) \Psi_{\delta}}{2 \Psi_p \Psi_p} = 1.1 \frac{(9491.851 - 5536.89) \Psi_{\delta}}{2 \Psi_p \Psi_p} = 52.541 \text{ Нм}.$$

Перевіримо двигун за умовами перевірки по пусковому моменту:

$$M_n = 54.313 \text{ Нм} > M_{max} = 52.541 \text{ Нм}$$

Бачимо, що момент номінальний більший за максимальний, отже двигун проходить перевірку по пусковому моменту.

Проводимо перевірку двигуна по нагріву.

Для перевірки достатньо щоб момент на валу двигуна був не більше номінального, оскільки двигун працює з ПВ=100%.

$$M = \frac{M_B}{i_p} = \frac{988.74}{23} = 42.988 \text{ Нм}$$

$$M = 42.988 \text{ Нм} < M_n = 54.313 \text{ Нм}$$

Як видно, момент є меншим за номінальний, тому перевірка за нагрівом може бути проведена. Обидві умови, що використовуються для перевірки двигунів, виконані, отже, обраний двигун відповідає критеріям за нагрівом і пусковим моментом.

2.4 Математична модель асинхронного двигуна

Електрична машина (ЕМ) є ключовим компонентом електроприводу, а також електромеханічних систем, де вона забезпечує процес електромеханічного перетворення енергії. Незалежно від конструкційних

особливостей, всі ЕМ за принципом електромеханічного перетворення енергії поділяються на машини постійного струму, асинхронні та синхронні. Більш детальна класифікація включає конструктивні аспекти, такі як ЕМ лінійної дії та обертові; способи збудження: електромагнітне, від постійних магнітів або реактивних; наявність явнополлюсності; характер магніторушійної сили (МРС) у повітряному зазорі: синусоїдальний або трапецеїдальний тощо.

Коректний математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії в ЕМ є критично важливим для розробки алгоритмів управління цими процесами, їх аналітичного дослідження та моделювання. Загалом, процеси перетворення електричної енергії в механічну і навпаки у всіх ЕМ базуються на фундаментальних законах електродинаміки, електромагнетизму та механіки. Водночас, створити загальний математичний опис, що охоплює всі ЕМ і враховує специфіку машин конкретного класу, мабуть, неможливо. Повномасштабне моделювання конкретного типу ЕМ з глибокою деталізацією процесів зазвичай призводить до складної багатовимірної моделі, яка важко застосовується для цілей управління.

У зв'язку з цим математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії реалізується на основі так званих ідеалізованих електричних машин, що ґрунтується на таких принципах:

- адекватне відображення фундаментальних процесів, що відбуваються у певному класі електричних машин;
- відкидання ефектів другого порядку, таких як недосконалість магнітних матеріалів та геометрії, несинусоїдальність МРС, асиметрія магнітних та електричних параметрів трифазних обмоток та інші.

Процеси в ідеалізованих ЕМ зазвичай описуються так званою узагальненою ЕМ, до якої можуть бути віднесені основні типи електричних машин. [7]. Ось перефразований текст:

Щодо ефектів другого порядку, їх можна врахувати на етапі математичного моделювання конкретної електричної машини. Важно зазначити, що вплив цих ефектів значною мірою залежить від конструкції

машини. Сучасні електричні машини, які спеціально проектуються для певних методів управління, такі як асинхронні двигуни для частотного та векторного керування, демонструють характеристики, які з високою точністю відповідають характеристикам ідеалізованих машин.

У електричних машинах електромагнітні процеси визначаються магнітними полями в повітряному зазорі, які виникають внаслідок струмів, що протікають вздовж осі машини. Струми в лобових частинах мають менший вплив і створюють магнітні потоки розсіювання. У більшості випадків можна вважати, що силові лінії магнітного поля в зазорі перпендикулярні циліндричним поверхням статора і ротора, які формують повітряний зазор. Розподіл магніторухійної сили (МРС) у повітряному зазорі електричної машини, а також характер її зміни з часом, визначають тип машини та її характеристики. Розподіл струмів, в свою чергу, залежить від типу обмотки, а характер зміни струмів з часом залежить від виду напруги, що подається на обмотки.

У багатополюсних електричних машинах усі електромагнітні процеси повторюються з кожною парою полюсів, тому для вивчення теорії ідеалізованих електричних машин достатньо розглядати двополюсну електричну машину.

Електромеханічний перетворювач можна уявляти як таку систему, що складається з двох частин: електричної та механічної, як показано на рисунку 2.3.

Реальна електрична машина містить n статорних і m роторних обмоток, що призводить до наявності $n+m$ вхідних напруг, які зв'язують електромеханічний перетворювач з керуючим пристроєм. Вихідною координатою електричної частини є електромагнітний момент M , який одночасно слугує вхідною координатою для механічної частини електроприводу, до якої також прикладається збурювальний момент T . Швидкість ω і кутове положення ротора θ визначаються за допомогою рівнянь руху механічної частини. Таким чином, механічні змінні θ , ω , M пов'язують

електричну і механічну частини в єдину взаємодіючу електромеханічну систему.

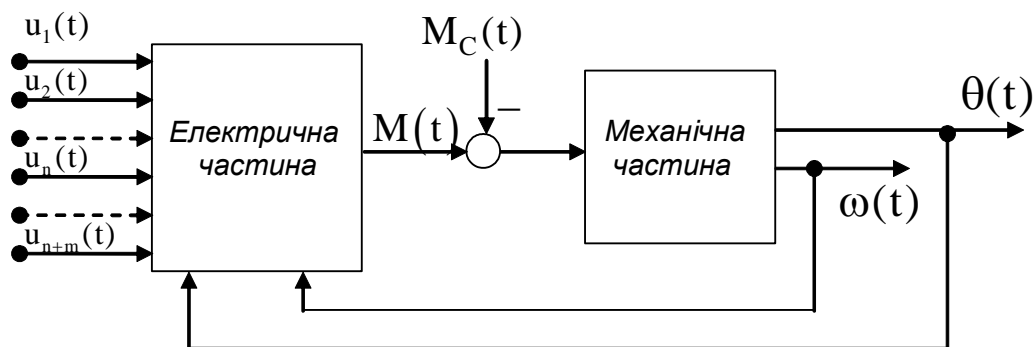


Рисунок 2.3 - Декомпозиція електромеханічного перетворювача

Розглядатимемо клас електричних машин, які спроектовані з урахуванням таких умов:

1. Магнітне коло машини не піддається насиченню і має нескінченну магнітну проникність, при цьому втрати на гістерезис і вихрові струми є незначними і можуть бути проігноровані.

2. Електрична машина не накопичує потенційну енергію, тобто може мати постійні магніти на одній зі сторін — статора або ротора, при цьому явноплюсність може бути присутня на тій стороні, де розташовані постійні магніти.

3. Матриця індуктивностей має симетричну і позитивно визначену структуру, тобто .

4. Індуктивності розсіювання не залежать від кутового положення ротора.

При виконанні цих умов процес електромеханічного перетворення енергії можна описати в загальному вигляді наступним чином. Сформуємо вектори напруг, струмів та потокозчеплень електричної машини:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u} &= (u_{1s}, u_{2s}, \dots, u_{ns}; u_{1r}, u_{2r}, \dots, u_{mr})^T \\
 \mathbf{i} &= (i_{1s}, i_{2s}, \dots, i_{ns}; i_{1r}, i_{2r}, \dots, i_{mr})^T \\
 \Psi &= (\psi_{1s}, \psi_{2s}, \dots, \psi_{ns}; \psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{mr})^T,
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

де частина індексу s - відноситься до статора, а r - до ротора.

Взаємозв'язок між струмами і потокозчепленнями задається лінійним алгебраїчним рівнянням

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}(\theta)\mathbf{i}, \quad (2.2)$$

Узагальнене рівняння електричної рівноваги записується в формі рівняння Кірхгофа

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \dot{\boldsymbol{\psi}} \quad (2.3)$$

де $\mathbf{R} = \text{diag}(R_{1S}, R_{2S}, \dots, R_{nS}; R_{1R}, R_{2R}, \dots, R_{mR})$ – діагональна матриця активних опорів обмоток статора і ротора.

У теорії ідеалізованих машин вважається, що активні опори обмоток статора (ротора) є рівними. Після підстановки (2.2) у (2.3) ми отримуємо векторне диференціальне рівняння, яке встановлює зв'язок між вектором струмів та вектором напруги живлення.

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \left(-\mathbf{R}\mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right). \quad (2.4)$$

В рівнянні (2.4) зворотна матриця індуктивностей завжди існує в силу умови $\mathbf{L}(\theta) = \mathbf{L}^{-1}(\theta) > 0$. Оскільки розглядаються електричні машини з лінійною магнітною характеристикою, то функції ко-енергії і електромагнітної енергії співпадають і дорівнюють

$$W_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \mathbf{L}(\theta) \mathbf{i}. \quad (2.5)$$

При виконанні умови А.4 момент, який розвивається електричною машиною, знаходиться у вигляді

$$M = \frac{\partial W_e(\theta)}{\partial \theta}. \quad (2.6)$$

З урахуванням останнього виразу, момент двигуна запишеться

$$M = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} \quad (2.7)$$

Доповнивши рівняння (2.4), які описують динамічні процеси в електричній частині машини, а також рівняння моменту (2.7) рівняннями руху механічної частини з постійним моментом інерції, ми отримаємо узагальнену модель електричної машини у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} [M - v\omega - M_c(t)], \quad M = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i}, \\ \mathbf{i} &= \mathbf{L}^{-1}(\theta) \left(-\mathbf{R}\mathbf{i} - \omega \frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} \mathbf{i} + \mathbf{u} \right), \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $v > 0$ коефіцієнт в'язкого тертя.

На Рис. 2.4. представлена структурна схема довільної електричної машини, яка відповідає рівнянням (2.8)

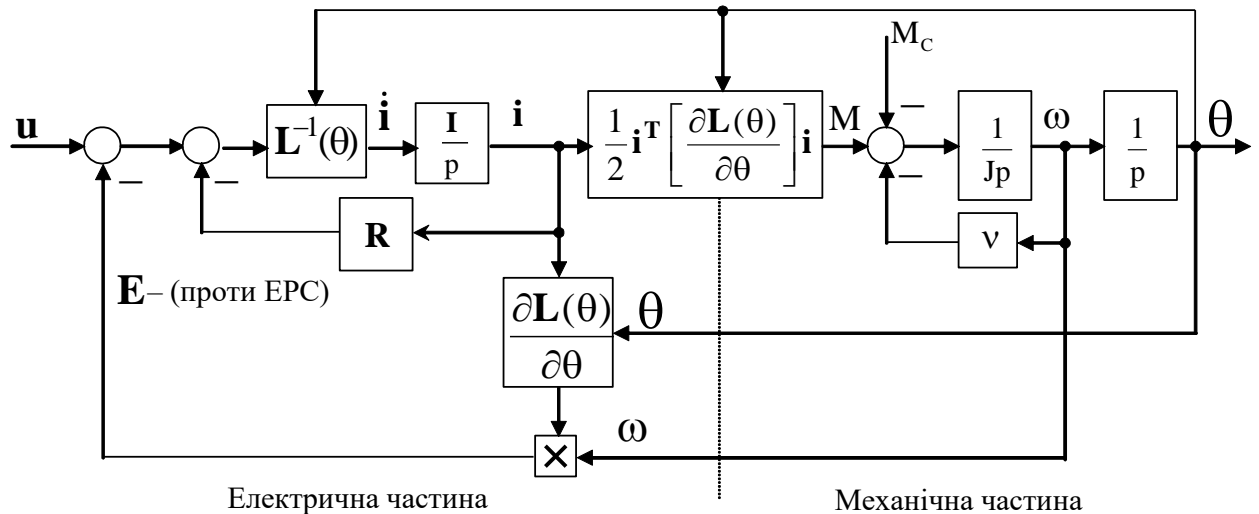


Рисунок 2.4 - Узагальнена структурна схема електричної машини

У теорії ідеалізованих електричних машин процеси електромеханічного перетворення енергії можна значно спростити, завдяки переходу до еквівалентної двофазної моделі. Ця заміна дозволяє сформулювати узагальнений математичний опис процесів електромеханічного перетворення енергії для

обертальних електричних машин за допомогою ідеалізованого двофазного електромеханічного перетворювача, відомого як узагальнена електрична машина.

Узагальнена електрична машина є спрощеною моделлю реальної машини. Окрім наведених припущень 1 – 4, вона оснований на тому, що магнітні потоки та магніторухійна сила (МРС), що генеруються обмотками статора і ротора, мають синусоїдальний розподіл вздовж довжини кола машини. У випадку обмоток з несинусоїдальним МРС враховується лише перша просторова гармоніка поля, а магнітні потоки від вищих гармонік розглядаються як потоки розсіювання.

Згідно (2.2) і (2.3), а також за умовами симетричного живлення, динамічні процеси в електричній частині елементарної узагальної електричної машини, схема якої представлена на рисунку 2.5, описуються чотирма рівняннями електричної рівноваги в обмотках, а також рівнянням електромагнітного моменту двигуна, який є функцією струмів обмоток та механічних координат ..

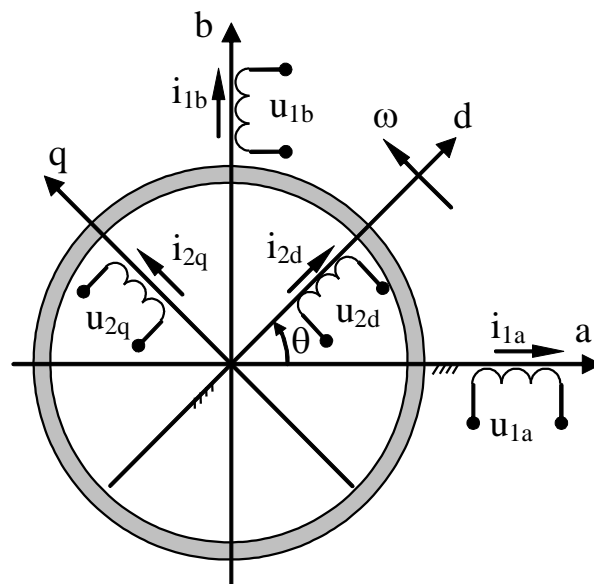


Рисунок 2.5 - Схема елементарної узагальної двофазної машини.

На Рис. 2.5 позначено: (a – b) – стаціонарна система координат статора, (d – q) – система координат ротора, що жорстко зв'язана з ним. Індекси 1 та 2

в позначеннях напруг та струмів вказують на відношення до статора та ротора, $(a, b), (d, q)$ – визначають розташування обмоток по осям систем координат $(a - b)$ та $(d - q)$.

Для електричної машини, еквівалентна схема якої показана на Рис. 2.5, сформуємо вектори змінних статора

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 &= (u_{1a}, u_{1b})^T, \\ \mathbf{i}_1 &= (i_{1a}, i_{1b})^T, \\ \boldsymbol{\Psi}_1 &= (\Psi_{1a}, \Psi_{1b})^T,\end{aligned}\tag{2.9}$$

а також вектори змінних ротора

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_2 &= (u_{2d}, u_{2q})^T, \\ \mathbf{i}_2 &= (i_{2d}, i_{2q})^T, \\ \boldsymbol{\Psi}_2 &= (\Psi_{2d}, \Psi_{2q})^T.\end{aligned}\tag{2.10}$$

Визначимо: $\mathbf{u} = (\mathbf{u}_1^T, \mathbf{u}_2^T)^T$ – вектор прикладених напруг; $\mathbf{i} = (\mathbf{i}_1^T, \mathbf{i}_2^T)^T$ – вектор струмів; $\boldsymbol{\Psi} = (\boldsymbol{\Psi}_1^T, \boldsymbol{\Psi}_2^T)^T$ – вектор потокозчеплень; $\mathbf{L}(\theta) \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ – матриця індуктивностей, $\mathbf{R} = \text{diag}(R_1, R_1, R_2, R_2)$ – матриця активних опорів машини, R_1, R_2 – активні опори статора і ротора.

Виходячи із конфігурації узагальненої електричної машини, Рис. 2.5, матриця індуктивностей запишеться у наступному вигляді

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_{12} \cos \theta & -L_{12} \sin \theta \\ 0 & L_1 & L_{12} \sin \theta & L_{12} \cos \theta \\ \hline L_{12} \cos \theta & L_{12} \sin \theta & L_2 & 0 \\ -L_{12} \sin \theta & L_{12} \cos \theta & 0 & L_2 \end{bmatrix},\tag{2.11}$$

де L_1, L_2 – власні індуктивності обмоток статора і ротора, L_{12} – максимальне значення взаємної індуктивності між обмотками статора і

ротора, коли їх магнітні осі співпадають. За умови неявнополюсності власні індуктивності статора (ротора) прийняті однаковими.

Матрицю (2.11) записують також у блочному вигляді

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 \mathbf{I} & L_{12} e^{j\theta} \\ L_{12} e^{-j\theta} & L_2 \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

де $\mathbf{I} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ – одинична матриця,

$$e^{j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad e^{-j\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Необхідно відмітити, що оператори $e^{j\theta}$ і $e^{-j\theta}$ забезпечують координатні перетворення векторів з системи координат що обертається в стаціонарну і навпаки.

Рівняння електричної рівноваги для кіл статора і ротора мають вигляд

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= R_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\psi_1}{dt}, \\ \mathbf{u}_2 &= R_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\psi_2}{dt}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Рівняння потокозчеплень АД з (2.2), (2.12) записуються

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 \mathbf{i}_1 + L_{12} e^{j\theta} \mathbf{i}_2, \\ \psi_2 &= L_2 \mathbf{i}_2 + L_{12} e^{-j\theta} \mathbf{i}_1. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Підставивши (2.14) в (2.13), отримаємо рівняння електричної рівноваги АД в такому вигляді

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= R_1 \mathbf{i}_1 + L_1 \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} + L_{12} e^{j\theta} \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} \omega e^{j\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_2, \\ \mathbf{u}_2 &= R_2 \mathbf{i}_2 + L_2 \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} + L_{12} e^{-j\theta} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} - L_{12} \omega e^{-j\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_1. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Система (2.15) – є системою нелінійних диференційних рівнянь 4-го порядку. В векторно-матричній формі вона перепишеться у вигляді

$$\begin{bmatrix} L_1 & L_{12}e^{J\theta} \\ L_{12}e^{-J\theta} & L_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 - R_1\mathbf{i}_1 - \omega L_{12}e^{J\theta}\mathbf{J}\mathbf{i}_2 \\ \mathbf{u}_2 - R_2\mathbf{i}_2 + \omega L_{12}e^{-J\theta}\mathbf{J}\mathbf{i}_1 \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

Після перетворень система (2.16) набуває наступної форми:

$$\begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} = \mathbf{L}^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} -R_1\mathbf{i}_1 - \omega L_{12}\mathbf{J}e^{J\theta}\mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1 \\ -R_2\mathbf{i}_2 + \omega L_{12}\mathbf{J}e^{-J\theta}\mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2 \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

В рівняннях (2.17) враховано, що матриці $e^{J\theta}$ та \mathbf{J} є комутативними, тобто

$$(e^{J\theta}\mathbf{J}) = (\mathbf{J}e^{J\theta}), \quad (e^{-J\theta}\mathbf{J}) = (\mathbf{J}e^{-J\theta}).$$

Для отримання статичних електромеханічних характеристик потрібно в отриманих диференціальних рівняннях встановити умову для відповідного усталеного режиму. У такому разі ці рівняння перетворюються на алгебраїчні.

Враховуючи, що похідна від матриці індуктивностей (2.12) має вигляд

$$\frac{\partial \mathbf{L}(\theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} 0 & L_{12}e^{J\theta}\mathbf{J} \\ -L_{12}e^{-J\theta}\mathbf{J} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

рівняння моменту узагальненої ЕМ (2.7) запишеться

$$\mathbf{M} = L_{12}\mathbf{i}_1^T \mathbf{J}e^{J\theta}\mathbf{i}_2. \quad (2.19)$$

Доповнюючи (2.17) та (2.19) рівняннями руху ротора з постійним моментом інерції J , повні рівняння динаміки АД набувають вигляду

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (\mathbf{L}_{12} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} e^{J\theta} \mathbf{i}_2 - M c), \\ \begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{i}_1}{dt} \\ \frac{d\mathbf{i}_2}{dt} \end{pmatrix} &= \mathbf{L}^{-1}(\theta) \begin{pmatrix} -R_1 \mathbf{i}_1 - \omega L_{12} e^{J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_2 + \mathbf{u}_1 \\ -R_2 \mathbf{i}_2 + \omega L_{12} e^{-J\theta} \mathbf{J} \mathbf{i}_1 + \mathbf{u}_2 \end{pmatrix}.\end{aligned}\quad (2.20)$$

У випадку АД з короткозамкненим ротором приймається $\mathbf{u}_2 = 0$.

Рівняння (2.20) є нелінійними диференціальними рівняннями з періодичними коефіцієнтами, права частина яких залежить від кутового положення (див. вирази для $e^{J\theta}$, $e^{-J\theta}$).

Для подолання цієї проблеми виконаємо перетворення моделі (2.13) та (2.14) у нову систему координат $(u-v)$, яка характеризується кутовим положенням $\theta_k(t)$ відносно стаціонарної системи $(a-b)$ і обертається з кутовою швидкістю $\omega_k = \dot{\theta}_k$. Розташування систем координат $(a-b)$, $(d-q)$, та $(u-v)$ показано на рис. 2.6.

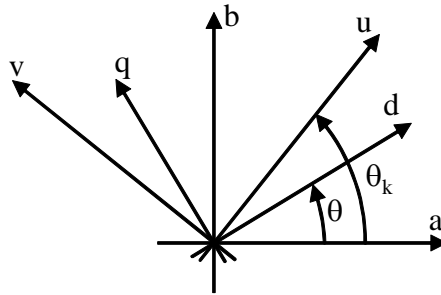


Рисунок 2.6 - Просторове розташування систем координат

В нових координатах вектори змінних статора і ротора запишуться

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_1^{(u-v)} &= e^{-J\theta_k} \mathbf{x}_1^{(a-b)}, \\ \mathbf{x}_2^{(u-v)} &= e^{-J(\theta_k - \theta)} \mathbf{x}_2^{(d-q)},\end{aligned}\quad (2.21)$$

$$\text{де } \mathbf{x}_1^{(u-v)} = (x_{1u}, x_{1v})^T, \quad \mathbf{x}_2^{(u-v)} = (x_{2u}, x_{2v})^T.$$

Після перетворень з використанням (2.21) рівняння електричної рівноваги (2.13), а також рівняння для потокозчеплень і моменту набувають вигляду

$$\mathbf{u}_1 = R_1 \mathbf{i}_1 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_1}{dt} + \omega_k \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_1, \quad (2.22)$$

$$\mathbf{u}_2 = R_2 \mathbf{i}_2 + \frac{d\boldsymbol{\psi}_2}{dt} + (\omega_k - \omega) \mathbf{J} \boldsymbol{\psi}_2,$$

$$\boldsymbol{\psi}_1 = L_1 \cdot \mathbf{i}_1 + L_{12} \cdot \mathbf{i}_2, \quad (2.23)$$

$$\boldsymbol{\psi}_2 = L_{12} \cdot \mathbf{i}_1 + L_2 \cdot \mathbf{i}_2,$$

$$M = L_{12} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2. \quad (2.24)$$

де вектори $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \boldsymbol{\psi}_1, \boldsymbol{\psi}_2$ представлені в системі координат $(u - v)$.

Для АД з короткозамкненим ротором в (2.22) необхідно прийняти $\mathbf{u}_2 = 0$.

Рівняння (2.22) – (2.24), що описують динамічну модель електричної частини асинхронного двигуна (АД) у системі координат, які рухаються з кутовою швидкістю, не залежать від кутового положення. Це пов'язано з тим, що у фіктивній машині в цій системі координат обмотки статора та ротора залишаються взаємно нерухомими, як це показано на рисунку 2.7.

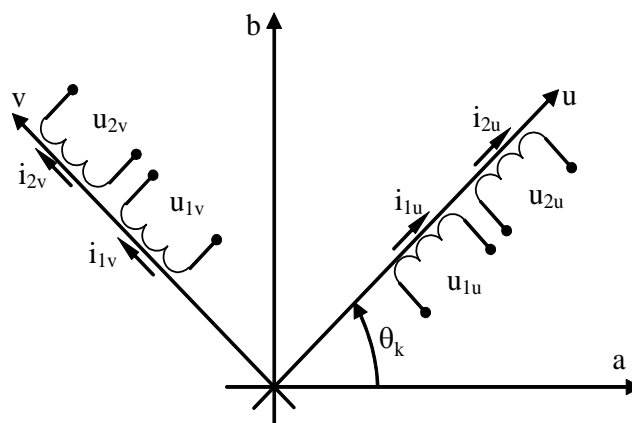


Рисунок 2.7 - Схематизація узагальненої електричної машини в системі координат $(u - v)$

Найбільш часто застосовуються наступні системи координат $(u - v)$:

а) $\omega_k = 0$ система координат $(u - v)$ трансформується до стаціонарної системи координат статора $(a - b)$;

б) $\omega_k = \omega$ – система координат $(u - v)$ стає системою координат ротора $(d - q)$;

в) $\omega_k = \omega_0$, де ω_0 – частота обертання поля електричної машини; при такому виборі маємо синхронну систему координат.

Відповідно до задач дослідження, система координат статора $(a - b)$ при $\omega_k = 0$ використовується при моделюванні АД з короткозамкненим ротором; система координат ротора $(d - q)$ $\omega_k = \omega$ – при дослідженні синхронних машин; синхронна система координат $\omega_k = \omega_0$ – є базовою при дослідженні та синтезі алгоритмів керування.

Виходячи з рівняння (2.22), в рамках обраної системи координат можуть бути сформульовані моделі асинхронного двигуна (АД), записані через різні комбінації пар векторів, що входять до рівнянь (2.22) – (2.24).

Для опису взаємозв'язку реальних трифазних електричних змінних електричної машини та двофазних змінних узагальненої машини використовуються наступні вирази:

$$\mathbf{x}_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \mathbf{x}_{(abc)} \square [3 \rightarrow 2] \mathbf{x}_{(abc)}. \quad (2.25)$$

де $[3 \rightarrow 2]$ – матриця перетворення векторів трифазних змінних $\mathbf{x}_{(abc)}$ до двофазних $\mathbf{x}_{(\alpha\beta)}$; $\mathbf{x}_{(\alpha\beta)}$ – вектор у будь-якій двофазній системі координат $(a - b)$, $(d - q)$, $(u - v)$.

Зворотне перетворення визначається у вигляді

$$\mathbf{x}_{(abc)} = [2 \rightarrow 3] \mathbf{x}_{(\alpha\beta)}, \text{ де } [2 \rightarrow 3] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (2.26)$$

При використанні перетворення (2.25) амплітудні значення трифазних та двофазних змінних зберігаються в усталеному режимі.

Потужності в трифазній $P_{(abc)}$ та двофазній $P_{(\alpha\beta)}$ системах пов'язані коефіцієнтом $3/2$, тобто

$$P_{(abc)} = \frac{3}{2} P_{(\alpha\beta)}. \quad (2.27)$$

У теорії зазвичай застосовують T-подібну схему еквівалентного кола (АД), яка представлена на рисунку 2.8.

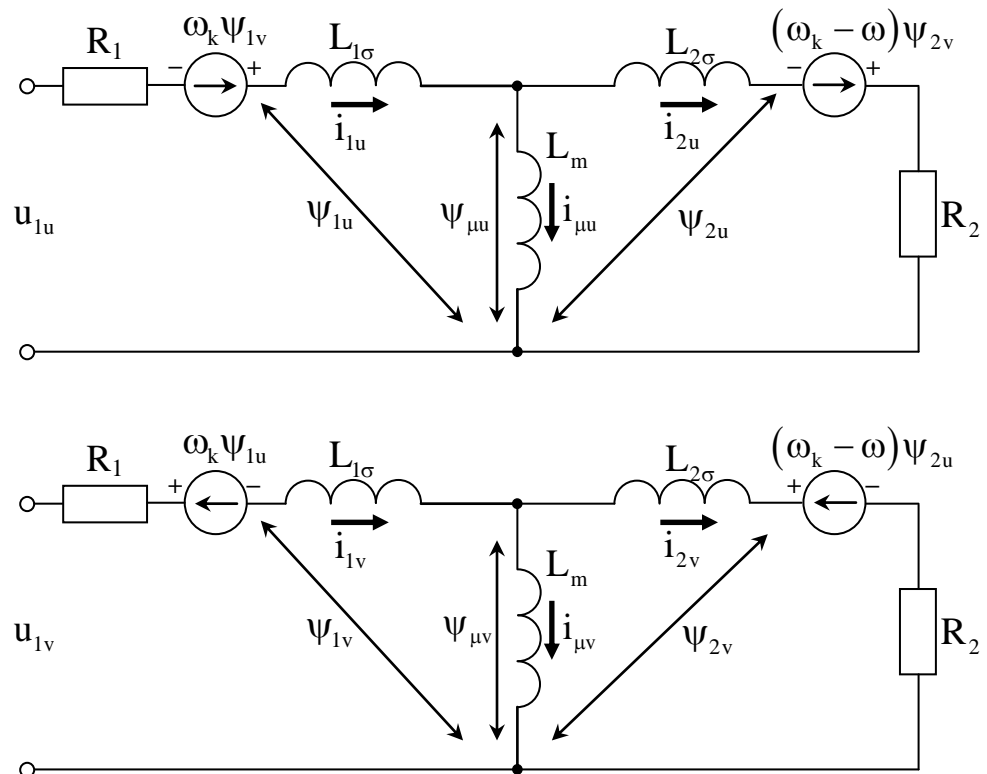


Рисунок 2.8 - Схема заміщення фази асинхронного двигуна в системі координат $(u - v)$

На схемі заміщення позначено: L_m – індуктивність намагнічування (контур намагнічування), яка дорівнює $L_m = \frac{m}{2}L_{12}$, де m – фазність обмотки; $L_{1\sigma}$, $L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора і ротора, які визначаються з виразів

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m, \quad (2.28)$$

$$L_2 = L_{2\sigma} + L_m,$$

i_μ, Ψ_μ – струм намагнічування та головне потокозчеплення.

У трифазних АД $m = 3$, тому при використанні перетворення (2.25), рівняння для потокозчеплень (2.23) та моменту запишуться у вигляді

$$\Psi_1 = L_1 \mathbf{i}_1 + L_m \mathbf{i}_2, \quad (2.29)$$

$$\Psi_2 = L_m \mathbf{i}_1 + L_2 \mathbf{i}_2,$$

$$M = \frac{3}{2} L_m \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \mathbf{i}_2. \quad (2.30)$$

За допомогою рівнянь електричної рівноваги (2.22) та виразів для потокозчеплень і моменту (2.30) можна отримати основні моделі асинхронного двигуна (АД), які використовуються при дослідженні електромеханічних систем з асинхронними двигунами.

Динамічна модель короткозамкненого асинхронного двигуна в системі координат статора (а – б) виражена через вектори струму статора та потокозчеплення ротора. Необхідно виключити з рівняння (2.22) вектори i_2 та ψ_1 , встановивши $u_2=0$ і $\omega_k=0$, шляхом використання виразу (2.29).

Вираз для i_2 з другого рівняння (2.29) буде

$$\mathbf{i}_2 = L_2^{-1} (\Psi_2 - L_m \mathbf{i}_1). \quad (2.31)$$

Підстановка (2.31) в друге рівняння (2.22) дає

$$\dot{\Psi}_2 = -\alpha \Psi_2 + \omega \mathbf{J} \Psi_2 + \alpha L_m \dot{\mathbf{i}}_1, \quad (2.32)$$

де $\alpha = R_2/L_2 = T_R^{-1}$, T_R – стала часу роторного кола.

Після підстановки виразу для ψ_1 з (2.29) в перше рівняння (2.22), а також перетворень з урахуванням (2.31), отримаємо рівняння динаміки струму статора

$$\dot{\mathbf{i}}_1 = -\frac{R_1}{\sigma} \mathbf{i}_1 - \beta \dot{\psi}_2 + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_1, \quad (2.33)$$

$$\text{де } \sigma = L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \quad \beta = \frac{L_m}{L_2 \sigma}.$$

З урахуванням (2.31) рівняння моменту АД набуває вигляду

$$\mathbf{M} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} \mathbf{i}_1^T \mathbf{J} \dot{\psi}_2. \quad (2.34)$$

При розгляді узагальненої електричної машини вважається, що кількість пар полюсів дорівнює одиниці. Якщо ж машина має кількість пар полюсів, відмінну від одиниці, то рівняння моменту (2.34) та складова в (2.32) масштабуються множителем.

Поєднуючи рівняння (2.32), (2.33), (2.34) з рівняннями руху механічної частини, що має момент інерції, ми отримаємо математичну модель асинхронного двигуна у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (\mathbf{M} - M_c), \quad \mathbf{M} = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2a} \dot{\mathbf{i}}_{1b} - \psi_{2b} \dot{\mathbf{i}}_{1a}), \\ \dot{\mathbf{i}}_{1a} &= -\gamma \mathbf{i}_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} + \beta p_n \omega \psi_{2b} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1a}, \\ \dot{\mathbf{i}}_{1b} &= -\gamma \mathbf{i}_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} - \beta p_n \omega \psi_{2a} + \frac{1}{\sigma} \mathbf{u}_{1b}, \\ \dot{\psi}_{2a} &= -\alpha \psi_{2a} - p_n \omega \psi_{2b} + \alpha L_m \dot{\mathbf{i}}_{1a}, \\ \dot{\psi}_{2b} &= -\alpha \psi_{2b} + p_n \omega \psi_{2a} + \alpha L_m \dot{\mathbf{i}}_{1b}, \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta.$$

Динамічна модель асинхронного двигуна (АД) у синхронній системі координат, що обертається з кутовою швидкістю ω , визначаємо змінні в цій системі координат наступним чином:

$$\mathbf{x}^{(d-q)} = e^{-j\theta_0} \mathbf{x}^{(a-b)}, \quad (2.36)$$

де \mathbf{x} – двомірні вектори напруги, струму, потокозчеплення.

Тут і далі позначення $(d-q)$ прийнято також для обертової системи координат $(u-v)$.

В силу перетворення (2.36) модель (2.35) набуває вигляду

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_2} p_n (\psi_{2d} i_{1q} - \psi_{2q} i_{1d}), \\ \dot{i}_{1d} &= -\gamma i_{1d} + \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta \psi_{2d} + \beta p_n \omega \psi_{2q} + \frac{1}{\sigma} u_{1d}, \\ \dot{i}_{1q} &= -\gamma i_{1q} - \omega_0 i_{1d} + \alpha \beta \psi_{2q} - \beta p_n \omega \psi_{2d} + \frac{1}{\sigma} u_{1q}, \\ \dot{\psi}_{2d} &= -\alpha \psi_{2d} + \omega_2 \psi_{2q} + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\psi}_{2q} &= -\alpha \psi_{2q} - \omega_2 \psi_{2d} + \alpha L_m i_{1q}, \end{aligned} \quad (2.37)$$

де частота ковзання дорівнює $\omega_2 = \omega_0 - p_n \omega$.

Динамічна модель короткозамкненого АД в синхронній системі координат, записана через вектори струму ротора та потокозчеплення статора.

Для виключення струму статора з рівнянь (2.22) використаємо вираз

$$\mathbf{i}_1 = L_1^{-1} (\boldsymbol{\psi}_1 - L_m \mathbf{i}_2), \quad (2.38)$$

що отримується з (2.23).

Підстановка (2.38) в (2.22) дає

$$\dot{\Psi}_1 = -\alpha_1 \Psi_1 - \omega_0 \mathbf{J} \Psi_1 + \alpha_1 L_m \dot{\mathbf{i}}_2 + \mathbf{u}_1, \quad (2.39)$$

де $\alpha_1 = R_1/L_1$.

Після перетворень другого рівняння в (2.22) отримаємо

$$\dot{\mathbf{i}}_2 = -\gamma_1 \dot{\mathbf{i}}_2 - \omega_2 \mathbf{J} \dot{\mathbf{i}}_2 + \alpha_1 \beta_1 \Psi_1 + \beta_1 p_n \omega \mathbf{J} \Psi_1 + \frac{1}{\sigma_1} \mathbf{u}_2 - \beta_1 \mathbf{u}_1, \quad (2.40)$$

$$\text{де } \sigma_1 = L_2 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \beta_1 = \frac{L_m}{L_1 \sigma_1}, \gamma_1 = \frac{R_2}{\sigma_1} + \alpha_1 L_m \beta_1.$$

Рівняння моменту отримується шляхом підстановки (2.38) в (2.30)

$$\begin{aligned} M &= \frac{3}{2} L_m p_n (\dot{\mathbf{i}}_1^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{i}}_2) = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\Psi_1 - L_m \dot{\mathbf{i}}_2)^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{i}}_2 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n \Psi_1^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{i}}_2 = \\ &= \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\Psi_{1q} \dot{\mathbf{i}}_{2d} - \Psi_{1d} \dot{\mathbf{i}}_{2q}). \end{aligned} \quad (2.41)$$

В скалярному вигляді динамічна модель АД з урахуванням (2.39), (2.40), (2.41) запишеться у вигляді

$$\dot{\theta} = \omega,$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_1} p_n (\Psi_{1q} \dot{\mathbf{i}}_{2d} - \Psi_{1d} \dot{\mathbf{i}}_{2q}),$$

$$\dot{\Psi}_{1d} = -\alpha_1 \Psi_{1d} + \omega_0 \Psi_{1q} + \alpha_1 L_m \dot{\mathbf{i}}_{2d} + \mathbf{u}_{1d},$$

$$\dot{\Psi}_{1q} = -\alpha_1 \Psi_{1q} - \omega_0 \Psi_{1d} + \alpha_1 L_m \dot{\mathbf{i}}_{2q} + \mathbf{u}_{1q}, \quad (2.42)$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{2d} = -\gamma_1 \dot{\mathbf{i}}_{2d} + \omega_2 \dot{\mathbf{i}}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \Psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \Psi_{1q} + \frac{1}{\sigma_1} \mathbf{u}_{2d} - \beta_1 \mathbf{u}_{1d},$$

$$\dot{\mathbf{i}}_{2q} = -\gamma_1 \dot{\mathbf{i}}_{2q} - \omega_2 \dot{\mathbf{i}}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \Psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \Psi_{1d} + \frac{1}{\sigma_1} \mathbf{u}_{2q} - \beta_1 \mathbf{u}_{1q}.$$

2.5 Розрахунок параметрів динамічної моделі

Знайдемо значення параметрів електродвигуна для створення динамічної моделі.

Виконаємо перерахунок параметрів з Г-подібної схеми еквівалентного кола електродвигуна в Т-подібну. Дані електродвигуна, необхідні для розрахунків, наведені в таблиці 2.2. Г-подібні та Т-подібні схеми представлені на рисунках 2.9 та 2.10 відповідно.

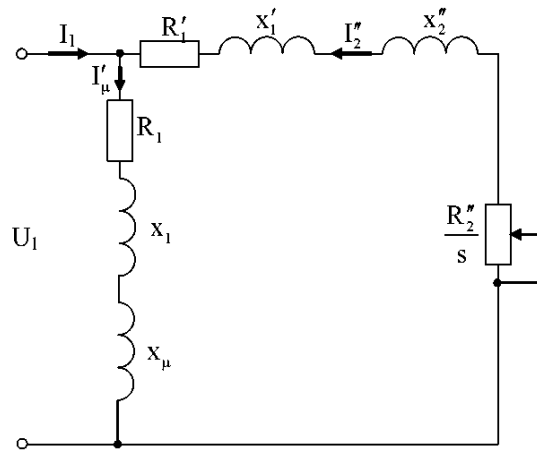


Рисунок 2.9 – Г-подібна схема заміщення АД

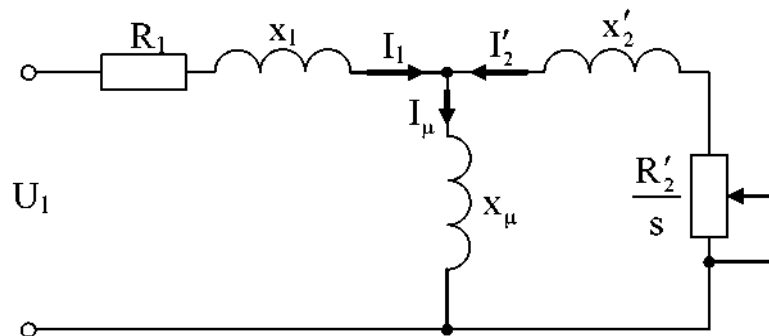


Рисунок 2.10 – Т-подібна схема заміщення АД

Визначимо коефіцієнт перерахунку параметрів з Г-подібної схеми заміщення в Т-подібну:

$$c_1 = \frac{X_m + \sqrt{X_m^2 + 4X_1 X_m}}{2X_m} = \frac{2.8 + \sqrt{2.8^2 + 4 \cdot 0.13 \cdot 2.8}}{2 \cdot 2.8} = 1.044;$$

Параметри Т- подібної схеми заміщення у відносних одиницях:

Активний опір статора:

$$R_{\check{y}} = \frac{R_1'^G}{c_1} = \frac{0.067}{1.037} = 0.065 \text{ в.о.};$$

Індуктивний опір статора:

$$X_1' = \frac{X_1'^G}{c_1} = \frac{0.072}{1.037} = 0.069 \text{ в.о.};$$

Активний опір ротора, приведений до статора:

$$R_2'' = \frac{R_2''^G}{c_1^2} = \frac{0.041}{1.037^2} = 0.038 \text{ в.о.};$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$X_2'' = \frac{X_2''^G}{c_1^2} = \frac{0.11}{1.037^2} = 0.102 \text{ в.о.};$$

Знаходимо параметри Т- подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях:

Активний опір статора:

$$R_1 = R_{\check{y}} \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.0646 \frac{219.393}{12.435} = 1.14 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір статора:

$$X_1 = X_{\check{y}} \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.695 \frac{219.393}{12.435} = 1.225 \text{ Ом};$$

Активний опір ротора, приведений до статора:

$$R_{\check{z}} = R_2'' \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.0382 \frac{219.393}{12.435} = 0.673 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір ротора, приведений до статора:

$$X_{\check{z}} = X_2'' \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 0.1024 \frac{219.393}{12.435} = 1.806 \text{ Ом};$$

Індуктивний опір розсіювання:

$$X_m = X_{\check{m}} \frac{U_{1\phi n}}{I_{1\phi n}} = 1.9 \frac{219.393}{12.435} = 33.521 \text{ Ом}.$$

Індуктивність намагнічуючого контуру:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_{0c}} = \frac{33.521}{314.159} = 0.106 \text{ Гн};$$

Індуктивність розсіювання статора:

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega_{0c}} = \frac{1.225}{314.159} = 0.0039 \text{ Гн};$$

Індуктивність розсіювання ротора:

$$L_{2s} = \frac{X_2^{\check{y}}}{\omega_{0c}} = \frac{1.806}{314.159} = 0.0057 \text{ Гн};$$

Індуктивність статора:

$$L_1 = L_m + L_{1s} = 0.106 + 0.0039 = 0.1106 \text{ Гн};$$

Індуктивність ротора:

$$L_2 = L_m + L_{2s} = 0.106 + 0.0057 = 0.1124 \text{ Гн}.$$

Розрахуємо параметри динамічної моделі електродвигуна:

$$s = L_1 - \frac{L_m^2}{L_2} = 0.111 - \frac{0.107^2}{0.112} = 0.009 \text{ Гн};$$

$$a = \frac{R_2^{\check{y}}}{L_2} = \frac{0.673}{0.112} = 5.986 \text{ с}^{-1};$$

$$b = \frac{L_m}{L_2 \Psi} = \frac{0.106}{0.112 \cdot 0.0093} = 101.414 \text{ Гн}^{-1};$$

$$g = \frac{R_1}{s} + a \Psi L_m = \frac{1.14}{0.009} + 5.986 \cdot 0.112 \cdot 0.106 = 186.668 \text{ с}^{-1}.$$

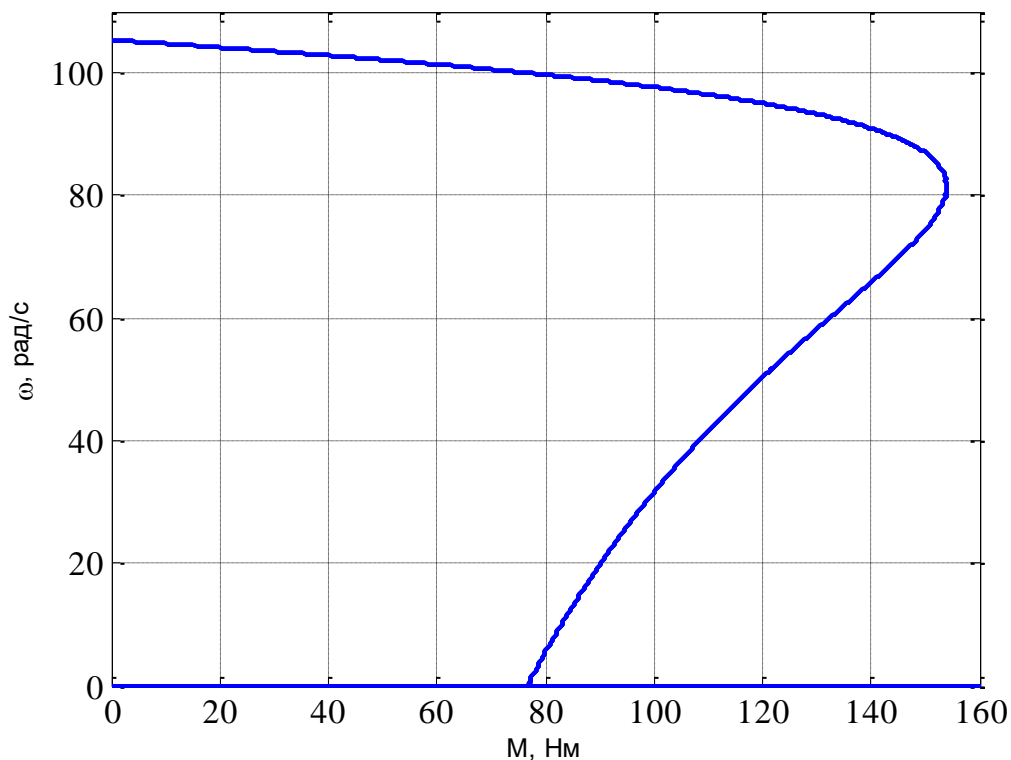


Рисунок 2.11 – Механічна характеристика АД 4A132S6Y3

Значення критичного моменту (див. рис. 2.11) не збігається з розрахованими значеннями в пункті (2.2), оскільки механічна характеристика двигуна, представлена на рисунку 2.11, була отримана на основі спрощеної математичної моделі асинхронного двигуна.

Висновки по розділу

У даному розділі роботи було виконано розрахунок основних елементів електромеханічної частини стрічкового конвеєра. Також було здійснено розрахунок епюри натягу стрічки уздовж замкнутого контуру та розраховано потужність привідної станції стрічкового конвеєра з подальшим вибором електродвигуна. Проводилась перевірка пускового моменту та нагріву обраного двигуна, а також було отримано його природну механічну характеристику.

3 ЧАСТОТНЕ КЕРУВАННЯ КУТОВОЮ ШВИДКІСТЮ АД З НАТУРАЛЬНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ ПО ВЕКТОРУ ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯ РОТОРА

3.1 Частотне керування

Частотне керування АД, автором якого є Костенко М. П. [9], можна вважати ідеальним способом управління асинхронним двигуном, який вважався основним до впровадження векторних методів. Хоча частотне керування не забезпечує можливість регулювання координат електропривода з заданими динамічними та статичними характеристиками, а процеси регулювання кутової швидкості і моменту містять некеровані складові, воно має декілька важливих переваг: простота реалізації та запуску, відсутність потреби в вимірюванні кутової швидкості та струмів статора, а також можливість використання тих параметрів асинхронного двигуна, які легко визначаються, або налаштування лише на основі номінальних даних.

У класичному формулюванні частотне керування ґрунтується на залежностях, отриманих при розгляді усталених режимів роботи асинхронного двигуна. У цій роботі представлено обґрунтування частотного керування, яке базується на динамічному представленні асинхронного двигуна з використанням другого методу Ляпунова. [10].

3.2 Постановка задачі керування

Розглянемо модель АД (3.1), представлену в координатах потокозчеплень статора і струмів ротора

$$\begin{aligned}
\dot{\psi}_{1d} &= -\alpha_1 \psi_{1d} + \omega_0 \psi_{1q} + \alpha_1 L_m \dot{i}_{2d} + u_{1d}, \\
\dot{\psi}_{1q} &= -\alpha_1 \psi_{1q} - \omega_0 \psi_{1d} + \alpha_1 L_m \dot{i}_{2q} + u_{1q}, \\
\dot{i}_{2d} &= -\gamma_1 \dot{i}_{2d} + \omega_2 \dot{i}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1d} - \beta_1 p_n \omega \psi_{1q} - \beta_1 u_{1d}, \\
\dot{i}_{2q} &= -\gamma_1 \dot{i}_{2q} - \omega_2 \dot{i}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \psi_{1q} + \beta_1 p_n \omega \psi_{1d} - \beta_1 u_{1q}, \\
\dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left[\frac{3 L_m}{2 L_1} p_n (\psi_{1q} \dot{i}_{2d} - \psi_{1d} \dot{i}_{2q}) - M_c \right], \\
\dot{\theta}_0 &= \omega_0,
\end{aligned} \tag{3.1}$$

де $(\psi_{1d}, \psi_{1q})^T$, $(i_{2d}, i_{2q})^T$, $(u_{1d}, u_{1q})^T$ - компоненти векторів потокозчеплення статора, струму ротора і напруги статора, ω - кутова швидкість, ω_0 і θ_0 - кутова швидкість та кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної системи координат (a-b), $\omega_2 = \omega_0 - \omega p_n$ - частота ковзання.

Перетворені змінні в (3.1) визначаються у відповідності до (див. (2.36))

$$\mathbf{x}^{(d-q)} = e^{-j\theta_0(t)} \cdot \mathbf{x}^{(a-b)}, \quad e^{-j\theta_0} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & \sin \theta_0(t) \\ -\sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix}. \tag{3.2}$$

В загальній постановці задачі керування кутовою швидкістю та модулем потокозчеплення статора вихідні регульовані змінні задаються наступним чином

$$\begin{pmatrix} \omega \\ |\psi_1| \end{pmatrix} \square \begin{pmatrix} \omega \\ (\psi_{1d}^2 + \psi_{1q}^2)^{\frac{1}{2}} \end{pmatrix}, \tag{3.3}$$

а також припускається, що вектор змінних стану в (3.43) не вимірюваний, тобто розглядається повністю розімкнене керування, при якому вихідні змінні в (3.3) мають регулюватися за допомогою двомірного вектора керуючих напруг статора $\mathbf{u}_1 = (u_{1d}, u_{1q})^T$.

Припустимо, що $\omega^* = \text{const}$, $\psi^* = \text{const}$ визначають задані значення кутової швидкості і модуля потокозчеплення статора, тоді задача регулювання вихідних змінних (3.3) полягає у досягненні умови

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\omega} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi} &= 0,\end{aligned}\tag{3.4}$$

де похибки регулювання дорівнюють

$$\begin{aligned}\tilde{\omega} &= \omega - \omega^*, \\ \tilde{\psi} &= |\psi_1| - \psi^*.\end{aligned}\tag{3.5}$$

Використовуючи концепцію орієнтації по вектору потокозчеплення статора, переформулюємо другу умову в (6.4) [10] наступним чином:

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{1q} &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\psi}_{1d} &= 0,\end{aligned}\tag{3.6}$$

де похибки регулювання потокозчеплення по осям d і q визначені як

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_{1q} &= \psi_{1q}, \\ \tilde{\psi}_{1d} &= \psi_{1d} - \psi^*.\end{aligned}\tag{3.7}$$

Відмітимо, що перша умова в (3.7) визначає досягнення полеорієнтування за вектором потокозчеплення статора.

Досягнення еквівалентних умов (3.4) і (3.6) можливе лише для випадку не навантаженого двигуна, тобто при $M_c=0$. В цьому випадку струми ротора в усталеному режимі дорівнюють нулю. Визначивши $i_{2d} = \tilde{i}_{2d}$, $i_{2q} = \tilde{i}_{2q}$, мета частотного керування може бути формалізована таким чином: знайти керуючі напруги u_{1d} і u_{1q} , які гарантують досягнення умови

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\tilde{\omega}, \tilde{\psi}_{1d}, \tilde{\psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}) = 0, \text{ при } M_c = 0.\tag{3.8}$$

3.3 Конструювання алгоритму частотного керування

В похибках відпрацювання рівняння (3.1) [17] запишуться (при $\omega^* = \text{const}, \psi^* = \text{const}$) у вигляді

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\omega}} &= \mu p_n \left[\tilde{\psi}_{1q} \tilde{i}_{2d} - (\psi^* + \tilde{\psi}_{1d}) \tilde{i}_{2q} \right] - \frac{M_C}{J} \\
\dot{\tilde{\psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\psi}_{1d} + \omega_0 \tilde{\psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d} - \alpha_1 \psi^* + u_{1d} \\
\dot{\tilde{\psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\psi}_{1q} - \omega_0 \tilde{\psi}_{1d} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q} - \omega_0 \psi^* + u_{1q}, \\
\dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2d} + (\omega_0 - \omega p_n) \tilde{i}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega \tilde{\psi}_{1q} + \alpha_1 \beta_1 \psi^* - \beta_1 u_{1d}, \quad (3.9) \\
\dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2q} - (\omega_0 - \omega p_n) \tilde{i}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1q} + \beta_1 p_n \omega \tilde{\psi}_{1d} + \beta_1 p_n \tilde{\omega} \psi^* + \\
&+ \beta_1 p_n \omega^* \psi^* - \beta_1 u_{1q}, \\
\dot{\tilde{\theta}}_0 &= \omega_0,
\end{aligned}$$

$$\text{де } \mu = \frac{3 L_m}{2 L_1} \frac{1}{J}.$$

З рівнянь для потокозчеплень знаходимо

$$\begin{aligned}
u_{1d} &= \alpha_1 \psi^*, \\
u_{1q} &= \omega_0 \psi^*.
\end{aligned} \quad (3.10)$$

Підставивши (3.10) в (3.9), а також прийнявши умову $\omega_0 = \omega^* p_n$, отримаємо рівняння динаміки похибок відпрацювання

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{\omega}} &= \mu p_n \left[\tilde{\psi}_{1q} \tilde{i}_{2d} - (\psi^* + \tilde{\psi}_{1d}) \tilde{i}_{2q} \right] - \frac{M_C}{J}, \\
\dot{\tilde{\psi}}_{1d} &= -\alpha_1 \tilde{\psi}_{1d} + \omega^* p_n \tilde{\psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d}, \\
\dot{\tilde{\psi}}_{1q} &= -\alpha_1 \tilde{\psi}_{1q} - \omega^* p_n \tilde{\psi}_{1d} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q}, \quad (3.11) \\
\dot{\tilde{i}}_{2d} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2d} - \tilde{\omega} \tilde{i}_{2q} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\psi}_{1q} - \beta_1 p_n \tilde{\omega} \tilde{\psi}_{1q}, \\
\dot{\tilde{i}}_{2q} &= -\gamma_1 \tilde{i}_{2q} + \tilde{\omega} \tilde{i}_{2d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\psi}_{1q} + \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\psi}_{1d} + \beta_1 p_n \tilde{\omega} \tilde{\psi}_{1d} + \beta_1 p_n \psi^* \tilde{\omega}.
\end{aligned}$$

Для аналізу стійкості системи (3.11) розглянемо наступну функцію Ляпунова:

$$V = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu} \tilde{\omega}^2 + \frac{1}{L_m} (\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + \frac{1}{\beta_1} (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2) \right]. \quad (3.12)$$

Похідна від V в силу розв'язків (3.11) буде (при $M_C = 0$)

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\frac{\alpha_1}{L_m}(\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + 2\alpha_1(\tilde{\psi}_{1d}\tilde{i}_{2d} + \tilde{\psi}_{1q}\tilde{i}_{2q}) + \\ & + \omega^* p_n (\tilde{\psi}_{1d}\tilde{i}_{2q} - \tilde{\psi}_{1q}\tilde{i}_{2d}) - \frac{\gamma_1}{\beta_1}(\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2), \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для подальшого аналізу необхідно встановити, при яких значеннях ω^* похідна $\dot{V} < 0$. Для цього перепишемо (3.13) у наступному вигляді:

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2, \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -\frac{\alpha_1}{L_m}\rho_1(\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + 2\alpha_1(\tilde{\psi}_{1d}\tilde{i}_{2d} + \tilde{\psi}_{1q}\tilde{i}_{2q}) - \\ & - \left(\alpha_1 L_m + \rho_2 \frac{R_2 L_1}{L_m} \right) (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2), \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -\frac{\alpha_1}{L_m}(1-\rho_1)(\tilde{\psi}_{1d}^2 + \tilde{\psi}_{1q}^2) + \omega^* p_n (\tilde{\psi}_{1d}\tilde{i}_{2q} - \tilde{\psi}_{1q}\tilde{i}_{2d}) - \\ & - (1-\rho_2) \frac{R_2 L_1}{L_m} (\tilde{i}_{2d}^2 + \tilde{i}_{2q}^2), \end{aligned} \quad (3.16)$$

де $0 < (\rho_1, \rho_2) < 1$.

З (3.16) встановлюємо, що $\dot{V}_1 \leq 0$ при виконанні співвідношення

$$\rho_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1}{L_m} \right)^2 \rho_2}. \quad (3.17)$$

Друга складова (6.16) [10] буде від'ємною при виконанні умови

$$\left| \omega^* p_n \right| < 4 \frac{\left[\left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1}{L_m} \right)^2 \rho_2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(\frac{L_1}{L_m} \right)^2 \rho_2 \right]} (1 - \rho_2) \frac{R_1 R_2}{L_m^2}. \quad (3.18)$$

При виконанні умови $\dot{V} \leq 0$, тому сигнали $(\tilde{\Psi}_{1d}, \tilde{\Psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}, \tilde{\omega})$ будуть обмеженими, а отже обмеженими будуть і їх похідні $(\dot{\tilde{\Psi}}_{1d}, \dot{\tilde{\Psi}}_{1q}, \dot{\tilde{i}}_{2d}, \dot{\tilde{i}}_{2q}, \dot{\tilde{\omega}})$.

Виконавши лінеаризацію системи в початку координат при $M_C = 0$, представимо її в стандартному вигляді

$$\begin{pmatrix} \dot{\tilde{\Psi}}_{1d} \\ \dot{\tilde{\Psi}}_{1q} \\ \dot{\tilde{i}}_{2d} \\ \dot{\tilde{i}}_{2q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_1 \tilde{\Psi}_{1d} + \omega^* p_n \tilde{\Psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2d} \\ -\omega^* p_n \tilde{\Psi}_{1d} - \alpha_1 \tilde{\Psi}_{1q} + \alpha_1 L_m \tilde{i}_{2q} \\ \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1d} - \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\Psi}_{1q} - \gamma_1 \tilde{i}_{2d} \\ \beta_1 p_n \omega^* \tilde{\Psi}_{1d} + \alpha_1 \beta_1 \tilde{\Psi}_{1q} - \gamma_1 \tilde{i}_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \beta_1 \psi^* p_n \end{pmatrix} \tilde{\omega}, \quad (3.19)$$

$$\dot{\tilde{\omega}} = -\mu p_n \psi^* \tilde{i}_{2q}.$$

Система (3.19) може бути записана у наступній стандартній формі:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x} + \mathbf{\Gamma}^T \mathbf{z}, \\ \dot{\mathbf{z}} &= -\mu \mathbf{\Gamma} \mathbf{P} \mathbf{x}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

де $\mathbf{x} = (\tilde{\Psi}_{1d}, \tilde{\Psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q})^T$, $\mathbf{z} = \tilde{\omega}$; \mathbf{P} має вигляд $\mathbf{P} = \text{diag}\left(\frac{1}{L_m}, \frac{1}{L_m}, \frac{1}{\beta_1}, \frac{1}{\beta_1}\right)$.

Оскільки $\mathbf{A}(t)$ відповідає вимогам Гурвіца при виконанні умови, $\mathbf{\Gamma}(t) = \text{const}$, то положення рівноваги $(\tilde{\Psi}_{1d}, \tilde{\Psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}, \tilde{\omega}) = 0$ лінеаризованої системи, а отже і нелінійної при $M_C = 0$, буде локально експоненційно стійким.

З практичної точки зору це означає, що при $M_C = 0$ консервативна умова гарантує асимптотичність регулювання положення рівноваги $\omega_0 = \omega^* p_n = \omega p_n$ з підтриманням постійного значення модуля вектора потокозчеплення $|\psi_1| = \psi^*$ при одночасному досягненні умови орієнтації за вектором потокозчеплення статора $\psi_{1q} = 0$. Консервативність умови полягає у тому, що дослідження стійкості за Ляпуновим дає лише достатні умови.

При $M_C \neq 0$ асимптотичність регулювання змінних $\mathbf{x} = (\tilde{\psi}_{1d}, \tilde{\psi}_{1q}, \tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q}, \tilde{\omega})^T$ порушується, статичні властивості відносно збурення M_C визначаються розв'язками системи рівнянь. При цьому система залишається локально стійкою при дії обмеженого збурення M_C/J .

Фізичні напруги, які прикладаються до обмоток АД дорівнюють

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0(t) & -\sin \theta_0(t) \\ \sin \theta_0(t) & \cos \theta_0(t) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \psi^* \\ \omega^* p_n \psi^* \end{pmatrix}, \quad (3.21)$$

$$\dot{\theta}_0 = \omega^* p_n.$$

Відмітимо, що для практичної реалізації алгоритму частотного керування (3.21) необхідно знати параметр $\alpha_1 = R_1/L_1$, який легко визначається на основі стандартних тестів. Потреби у вимірюванні струмів статора та кутової швидкості для реалізації алгоритму (3.21) немає.

Для встановлення зв'язку алгоритму частотного керування (3.21) з наведеними в технічній літературі запишемо вирази для модуля напруги статора

$$U_{1m} = (u_{1d}^2 + u_{1q}^2)^{\frac{1}{2}} = \psi^* \sqrt{\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2}. \quad (3.22)$$

Залежність $U_{1m} = f(\omega^*, \psi^*)$ представлена на рис. 3.1 суцільною лінією.

Якщо сформулювати $\psi^* = \psi_0^* + \psi_1^*(\omega^*)$, то можливе отримання різних регулювальних характеристик U/f .

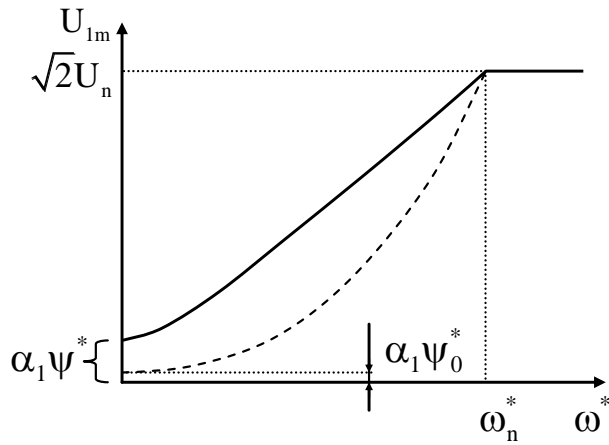


Рисунок 3.1 – Графік залежності амплітуди керуючої напруги від заданої швидкості при частотному керуванні

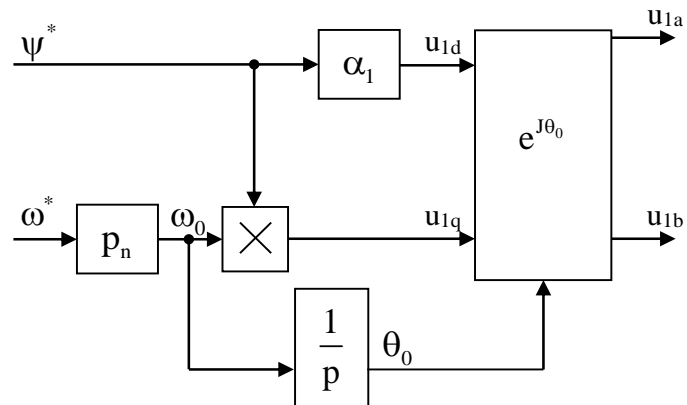


Рисунок 3.2 - Структурна схема алгоритму частотного керування

На рис.3.2 показана структурна схема алгоритму частотного керування (3.21).

Механічні характеристики двигуна 4A132S6Y3 при використанні алгоритму частотного керування, заданого рівняннями (3.10) $U/f = \text{const}$, при різних завданнях на кутову швидкість показані на рис.3.3.

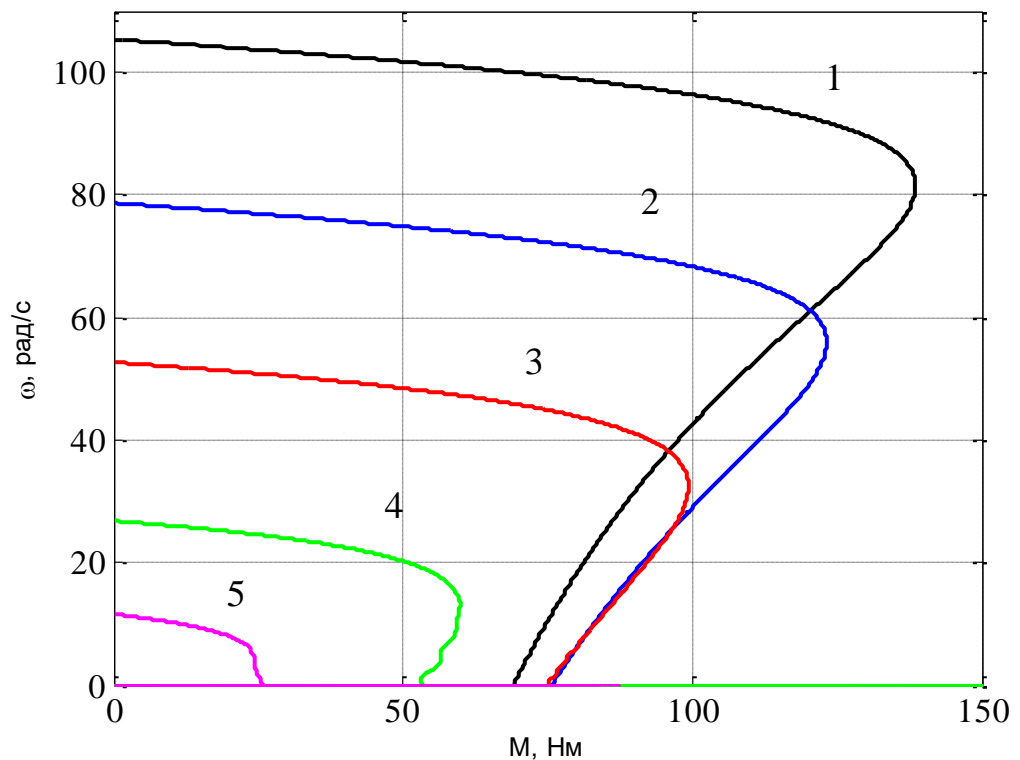


Рисунок 3.3 - Механічні характеристики двигуна 4A132S6Y3

На рисунку 3.3 показані наступні механічні характеристики:

1. Механічна характеристика при $\omega^* = \omega_H$
2. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.75\omega_H$
3. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.5\omega_H$
4. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.25\omega_H$
5. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.1\omega_H$

При роботі двигуна на характеристиках в зоні швидкостей нижче номінальної, зменшення критичного моменту зумовлене тим, що при $M_C \neq 0$ з'являється моментна складова статорного струму двигуна, яка призводить до зменшення магнітного потоку, і, як наслідок, до зменшення перевантажувальної здатності двигуна.

3.4 Компенсація зниження критичного моменту на швидкостях нижче номінальної

Компенсація зниження перевантажувальної здатності двигуна при роботі на швидкостях, що нижчі за номінальні, може бути досягнена шляхом примусового збільшення магнітного потоку двигуна[17]. Для того, щоб отримати вираз для заданого потоку в залежності від кутової частоти, перепишемо формулу для критичного моменту в термінах амплітудного значення напруги статора.

$$M_k = \frac{3p_n U_{1m}^2}{4\omega^* p_n \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right)}, \quad (3.23)$$

З урахуванням виразу для модуля вектора напруги статора (6.22)[10] при використанні алгоритму частотного керування (6.10) [10] та враховуючи, що $x_k = (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})\omega^* p_n$ отримаємо значення критичного моменту

$$M_k = \frac{3p_n \psi^{*2} \left(\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}{4\omega^* p_n \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 (\omega^* p_n)^2} \right)}. \quad (3.24)$$

При номінальній напрузі живлення критичний момент дорівнює

$$M_{kn} = \frac{3p_n \psi_n^{*2} \left(\alpha_1^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{4\omega_{0n} \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \omega_{0n}^2} \right)} \quad (3.25)$$

Умовою незмінності критичного моменту M_k відносно номінального значення є виконання співвідношення

$$M_k = M_{kn}. \quad (3.26)$$

З виразів (3.24) – (3.26) знаходимо значення заданого потоку двигуна, при якому перевантажувальна здатність залишається на номінальному рівні

$$\psi^* = \psi_n^* \sqrt{\frac{\omega^* p_n z \left(\alpha_1^2 + \omega_{0n}^2 \right)}{\omega_{0n} z_n \left(\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2 \right)}}, \quad (3.27)$$

$$\text{де } z = \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 (\omega^* p_n)^2} \right), z_n = \left(R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (L_{1\sigma} + L_{2\sigma})^2 \omega_{0n}^2} \right)$$

Механічні характеристики досліджуваних двигунів з використанням компенсації (3.27) показані на рис.3.4.

Варто підкреслити, що на практиці ефективність компенсації буде значною мірою залежати від характеристики намагнічування електричної машини. Це пов'язано з тим, що для підвищення критичного моменту двигуна на низьких швидкостях магнітний потік потрапляє в область насичення магнітної системи.

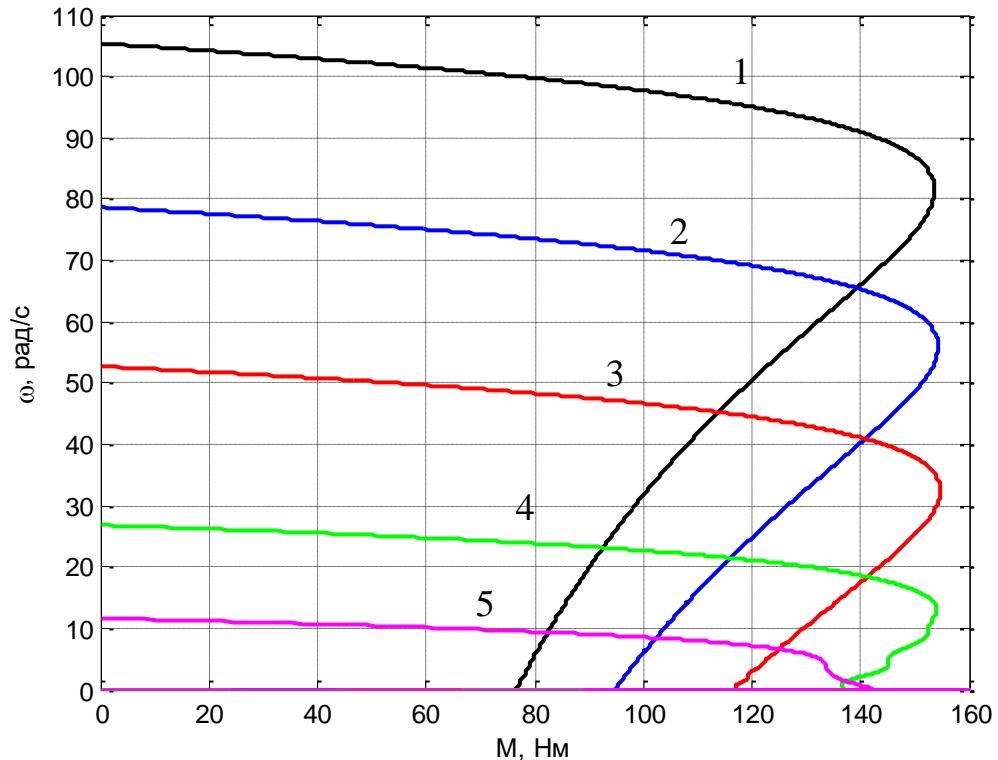


Рисунок 3.4 - Статичні характеристики при модифікованому частотному керуванні АД

На рисунку 3.4 показані наступні механічні характеристики:

1. Механічна характеристика при $\omega^* = \omega_n$
2. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.75\omega_n$
3. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.5\omega_n$
4. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.25\omega_n$
5. Механічна характеристика при $\omega^* = 0.1\omega_n$

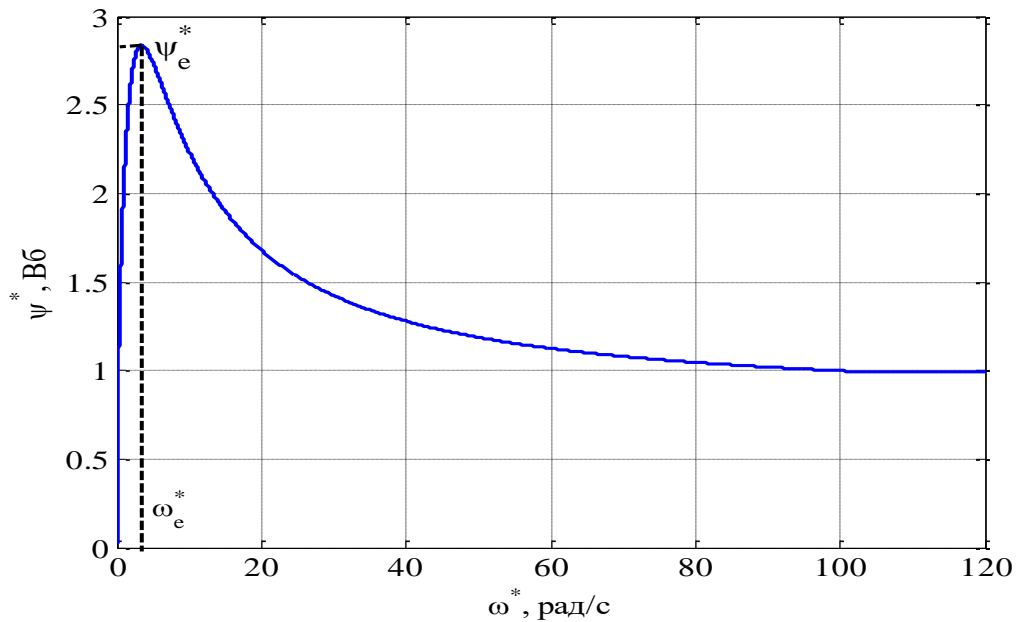


Рисунок 3.5 - Залежність заданого потоку від заданої швидкості

На рис. 3.5 показано залежності заданого магнітного потоку Ψ^* від заданої швидкості ω^* , отримані з використанням (3.27). При роботі із заданими швидкостями нижче значення ω_e^* , рішення, отримане для знаходження значень Ψ^* на основі формули (3.27), вироджується. В цьому випадку, для підтримання переважувальної здатності необхідно приймати заданий потік на рівні значення Ψ_e^* .

Таблиця 3.2

Заданий потік від заданої швидкості

$\omega^* = \omega_H$	$\Psi^*(\omega^*)$
ω_H	0.995
$0.75\omega_H$	1.063
$0.5\omega_H$	1.187
$0.25\omega_H$	1.532
$0.1\omega_H$	2.235

3.5 Дослідження динамічних характеристик при частотному керуванні асинхронного двигуна методом математичного моделювання

З метою порівняння та аналізу динамічних процесів, що виникають в асинхронному двигуні під час частотного керування, проводимо дослідження динамічних характеристик методом математичного моделювання.

Моделююча програма була створена в MATLAB на основі рівнянь динамічної моделі двигуна та алгоритму частотного керування, які представлені в розділах 2 і 3.

При моделюванні припускається, що механічна частина, що складається з ротора двигуна та робочого органу, є одномасовою.

Математичне моделювання проводилось для двох сценаріїв:

1. Пуск двигуна з навантаженою стрічкою, для якого характерний режим пуску з номінальним моментом навантаження.

2. Пуск двигуна з ненавантаженою стрічкою, в якому після досягнення встановленого значення відбувається різкий стрибок в моменті навантаження.

Послідовність керування для дослідження системи під час пуску двигуна з навантаженою кабіною представлена на рисунку 3.1.

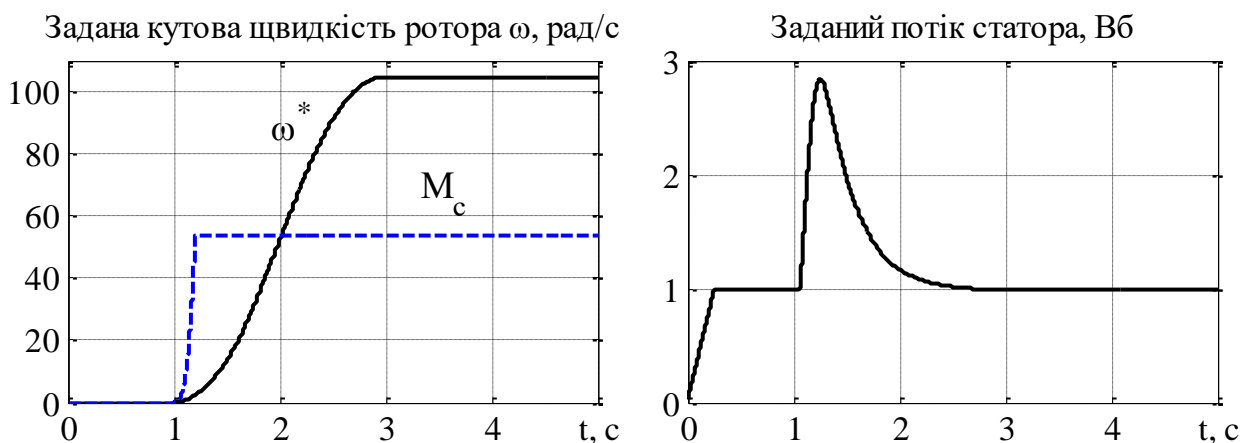


Рисунок 3.1 - Послідовність керування для дослідження системи при пуску двигуна з завантаженою стрічкою

Для порівняння та аналізу динамічних процесів, які відбуваються в асинхронному двигуні під час частотного керування, ми проводимо дослідження динамічних характеристик за допомогою математичного моделювання.

Моделююча програма була розроблена в MATLAB на основі рівнянь динамічної моделі двигуна та алгоритму частотного керування, що були описані в розділах 2 і 3.

У процесі моделювання ми приймаємо, що механічна частина, яка складається з ротора двигуна та робочого органу, є одномасовою.

Математичне моделювання було проведено для двох випадків:

1. Запуск двигуна з навантаженою стрічкою, де пуск відбувається з номінальним моментом навантаження.

2. Запуск двигуна з ненавантаженою стрічкою, де після досягнення установленого значення відбувається раптовий стрибок у моменті навантаження.

Схему керування, використану для дослідження системи під час запуску двигуна з навантаженою кабіною, можна побачити на рисунку 3.1 [10], при цьому збудження машини виконується за час, який визначається заданою траєкторією $\psi^*(t)$.

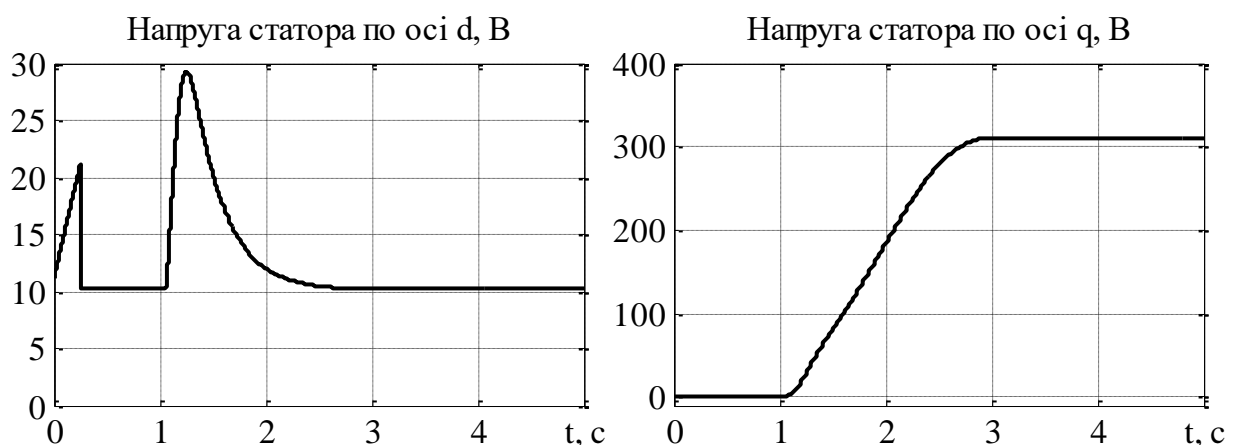


Рисунок 3.2.а - Графіки перехідних процесів пуску двигуна при завантаженій стрічці конвеєра

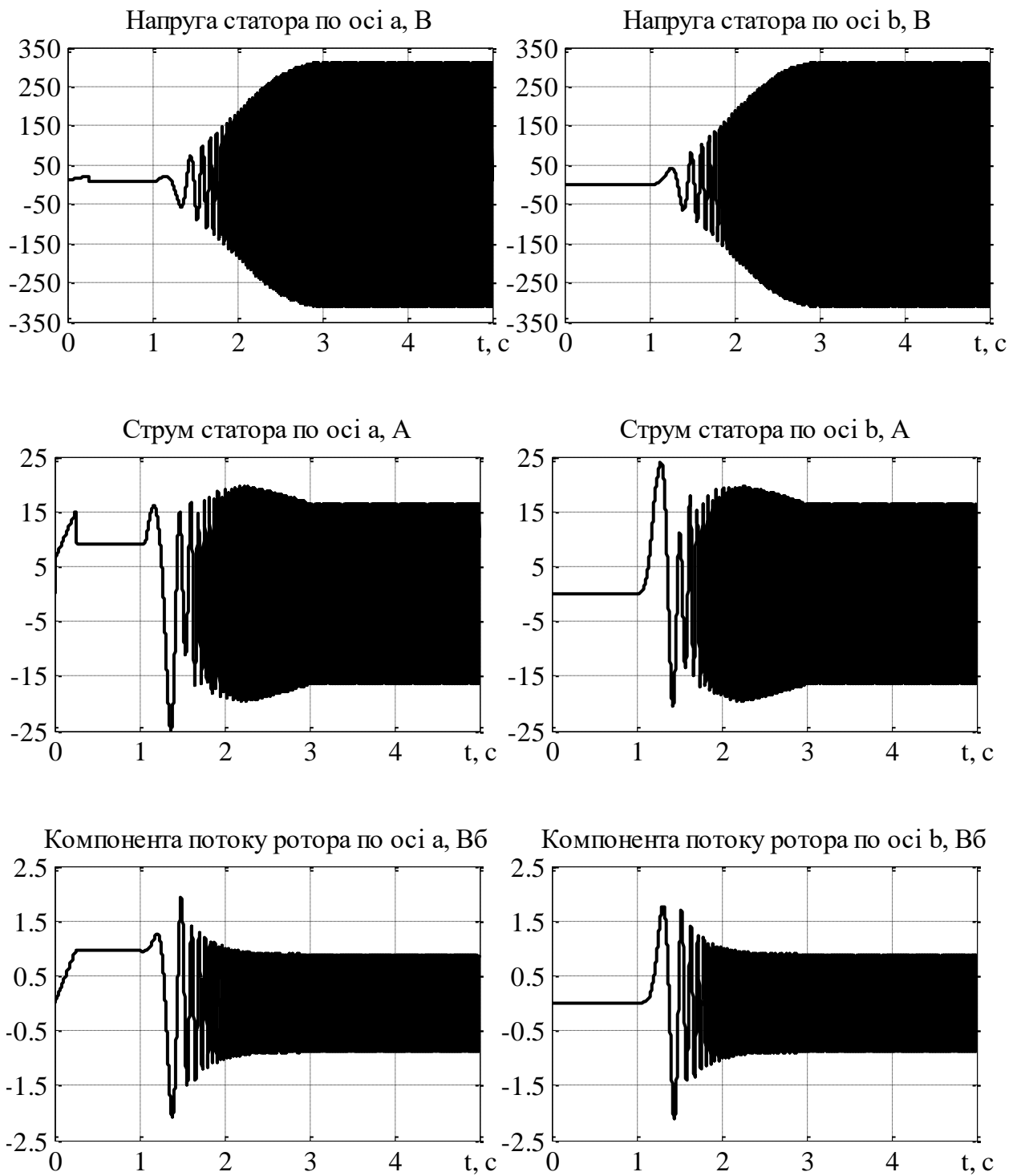


Рисунок 3.2.6 - Графіки перехідних процесів пуску двигуна при завантаженій стрічці конвеєра

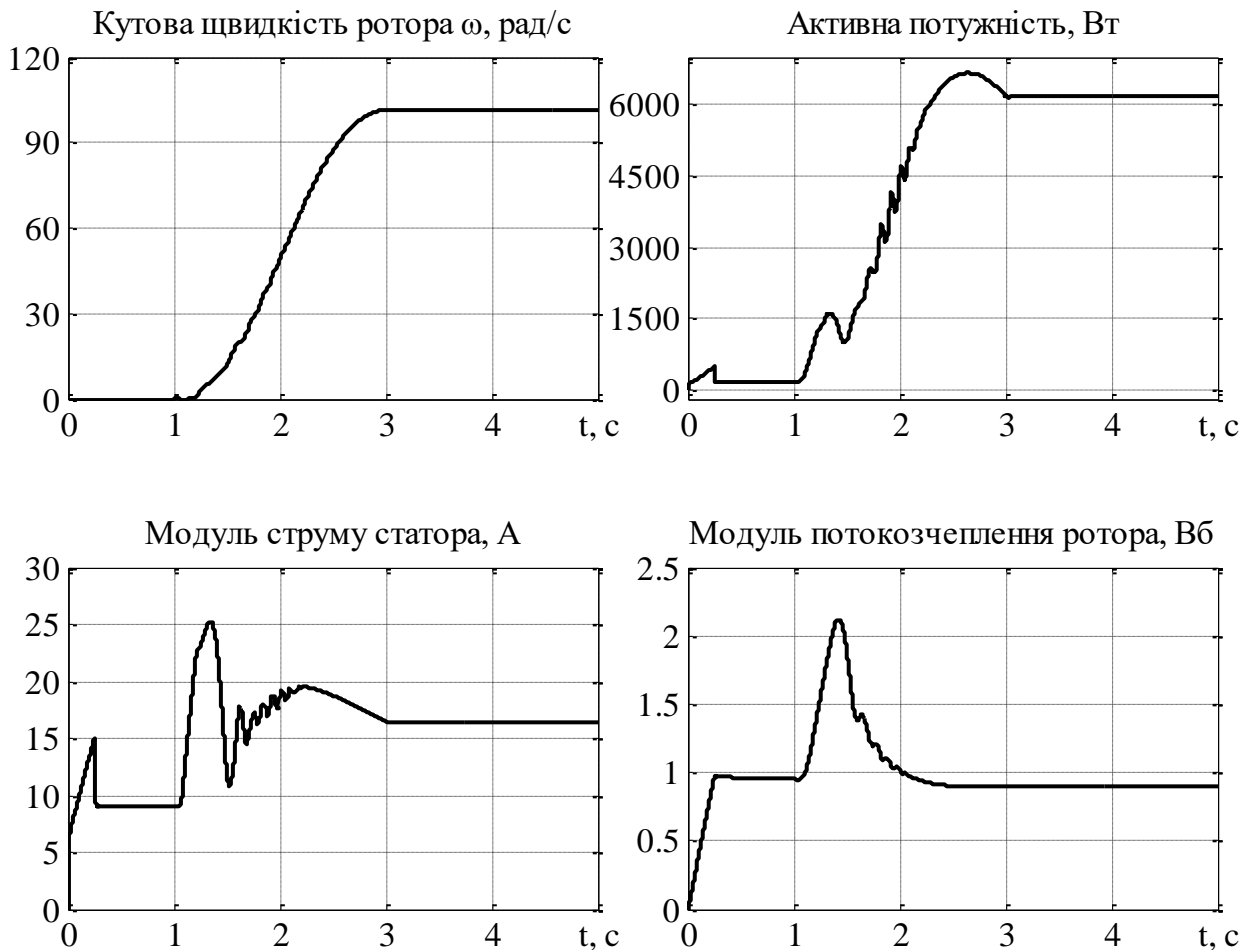


Рисунок 3.2.в - Графіки перехідних процесів пуску двигуна при завантаженій стрічці конвеєра

Результати математичного моделювання, представлені на рисунку 43.2, демонструють роботу асинхронного двигуна (АД) під час компенсації зниження критичного моменту машини шляхом збільшення заданого потоку на низьких швидкостях. Під час проведення тестів, зображених на рисунку 3.1, рівень заданого потоку коригувався відповідно до графіка на рисунку 3.5.

На рисунку 3.2 представлені графіки перехідних процесів розгону АД під навантаженням при підвищеній величині заданого модуля вектора потокозчеплення. Як видно з рисунка 3.2, збільшення заданої величини модуля вектора потокозчеплення в області низьких швидкостей дозволяє забезпечити надійний пуск частотно-керованого АД з моментом навантаження на валу, що приймає значення, близькі до номінального.

Результати проведених тестів підтверджують ефективність компенсації зниження перевантажувальної здатності АД, оскільки при $\omega^* \leq 0.25\omega_n$ і номінальному значенні магнітного потоку частотно-керований АД не забезпечує номінальний момент. [10].

Дослідження динамічних режимів було також проведено з використанням стандартної послідовності операцій управління, показаної на рисунку 3.3, при якій не здійснюється компенсація критичного моменту на низьких швидкостях, а пуск виконується в холостому режимі.:

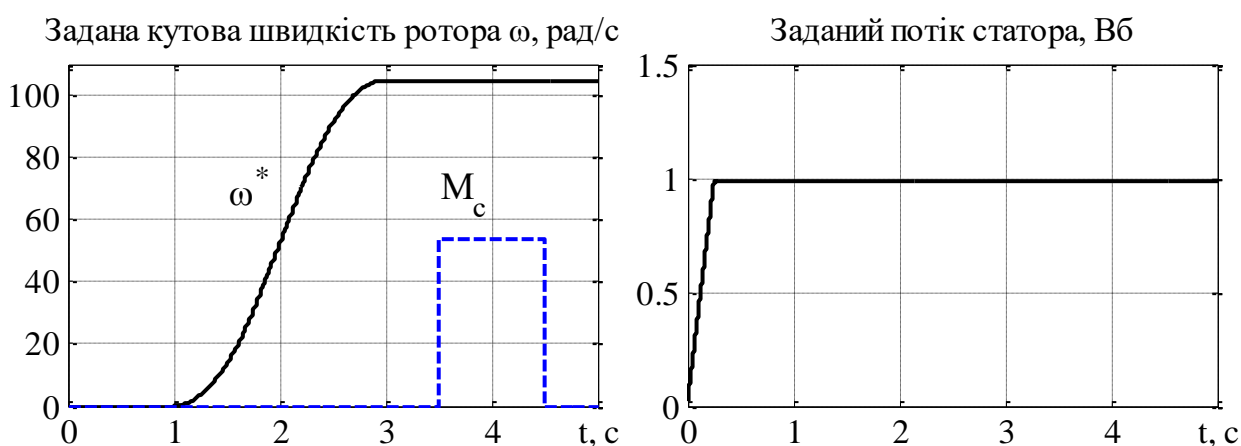


Рисунок 3.3 - Послідовність керування при стандартному тесті

- під час початкового інтервалу час $0 \div 0.25$ с машина збуджується, траєкторія заданого потоку починається з $\psi^*(0)=0.02$ Вб та досягає значення 0.99 Вб з першою похідною, що рівна 3.88 Вб/с;

- починаючи з $t=1$ с двигун без навантаження розганяється по заданій траєкторії швидкості від нуля до заданого значення $\omega^*=104.72$ рад/с з першою та другою похідними від заданої траєкторії швидкості $\dot{\omega}^*=100$ рад/с² та $\ddot{\omega}^*=125$ рад/с³;

- в момент часу $t=3.5$ с до валу двигуна прикладається, а при $t=4.5$ с знімається постійний момент навантаження, рівний номінальному значенню.

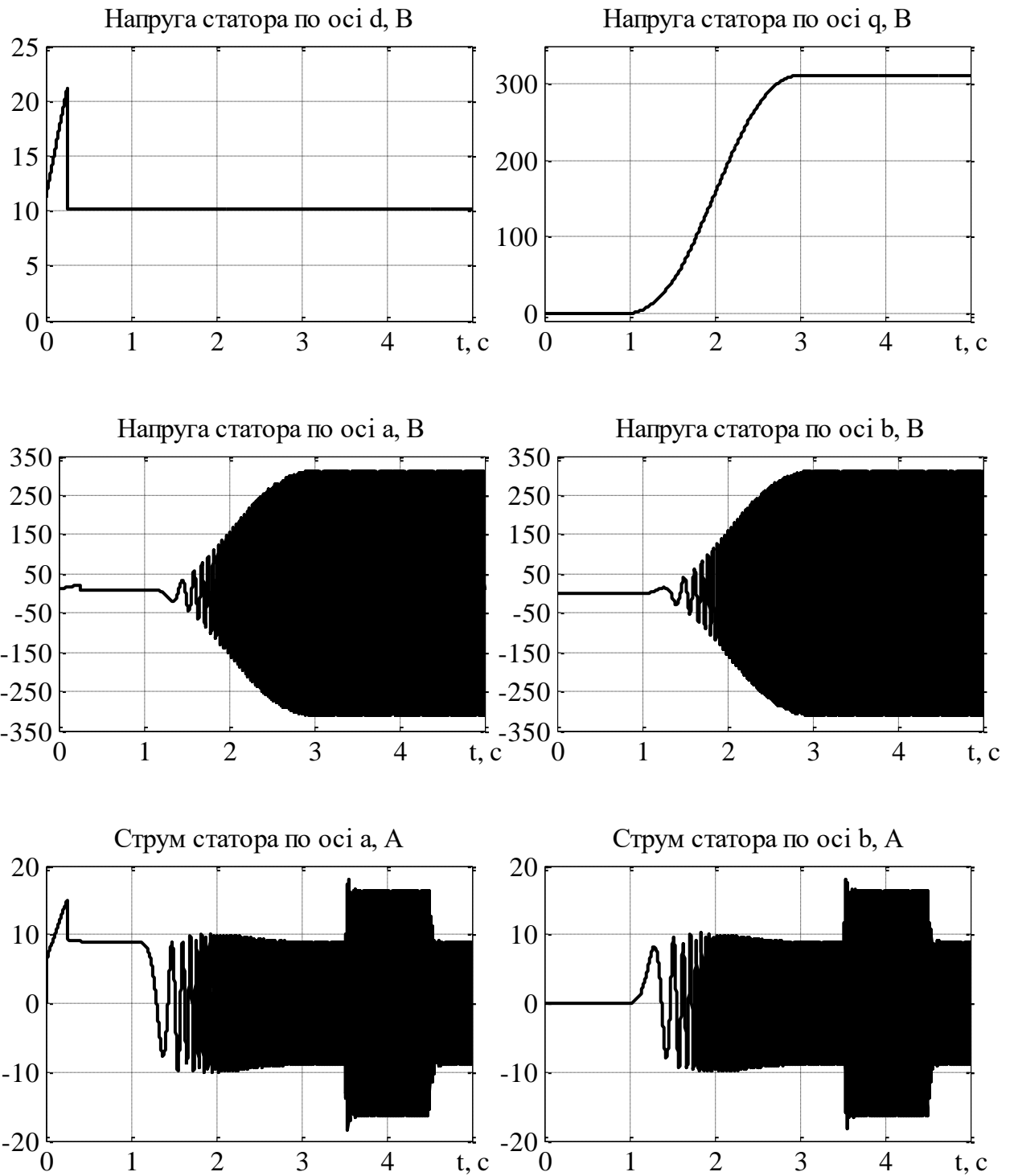


Рисунок 3.4.а – Графіки перехідних процесів

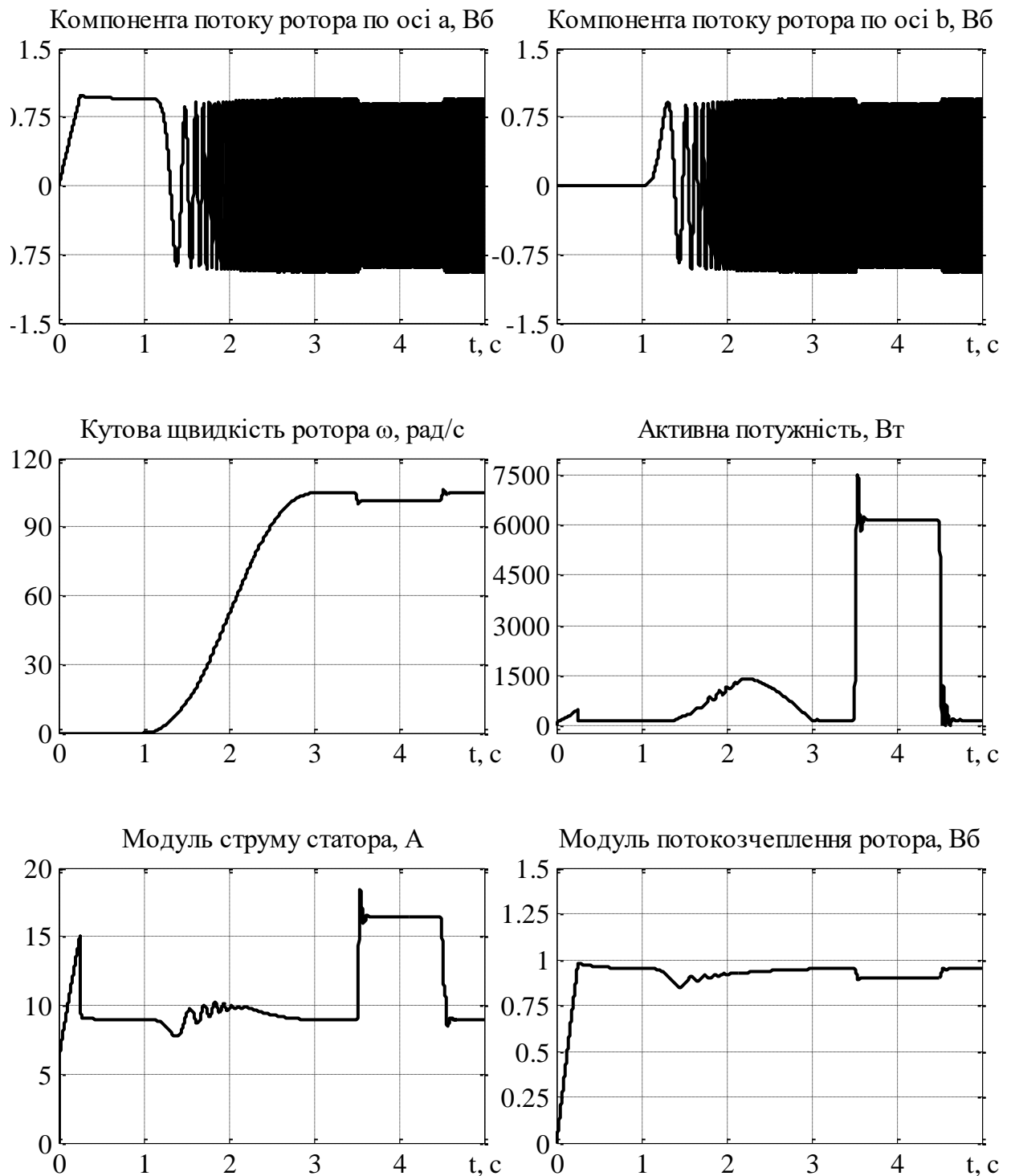


Рисунок 3.4.б – Графіки перехідних процесів

Ось перефразований текст:

На рисунку 3.4 представлені графіки перехідних процесів розгону та стрибкоподібного прикладання/скидання номінального моменту навантаження, отримані методом математичного моделювання.

Під час виконання моменту навантаження частотно-керований асинхронний двигун (АД) демонструє стійкість, оскільки пуск здійснюється в холостому режимі, а момент навантаження прикладається при номінальній швидкості. Максимальна статична похибка у відпрацюванні заданої швидкості становить 3.364 рад/с при виконанні номінального моменту навантаження, а максимальна динамічна похибка досягає 4.564 рад/с.

Висновок по розділу

Аналіз графіків перехідних процесів, представлених на рисунку 3.3, і механічних характеристик, зображених на рисунку 3.4, показує, що запропонований метод підвищення критичного моменту забезпечує статичну та динамічну стійкість роботи асинхронного двигуна (АД) в розширеному діапазоні (приблизно в 3-4 рази для розглянутого типу АД) регулювання кутової швидкості. Однак оскільки струм статора при підвищених значеннях магнітного потоку перевищує номінальний, експлуатація АД в такому режимі протягом тривалого часу є недопустимою. Разом із цим для ряду механізмів, в яких необхідний надійний пуск з підвищеним моментом, таке рішення є виправданим.

Також у цьому розділі представлено синтез алгоритму частотного керування. Було проведено дослідження статичних характеристик, що вказує на значне зниження критичного моменту на низьких швидкостях. Для підвищення пускового моменту в зоні низьких швидкостей було здійснено синтез модифікованого алгоритму частотного керування, що підтверджується статичними характеристиками при різних заданих швидкостях.

ВИСНОВКИ

У цій роботі розроблено електромеханічну систему з поліпшеними пусковими характеристиками на основі асинхронного двигуна змінного струму.

Було проведено аналітичний огляд об'єкта, виконано розрахунок та вибір двигуна. Розроблено математичну модель, в ході математичних обчислень визначено усі її параметри. Також досліджено алгоритм компенсації критичного моменту на низьких швидкостях. Аналіз графіків перехідних процесів та механічних характеристик свідчить про те, що запропонований метод підвищення критичного моменту дозволяє забезпечити статичну і динамічну стійкість роботи асинхронного двигуна (АД) в розширеному діапазоні регулювання кутової швидкості. Проте, експлуатація АД в такому режимі протягом тривального часу є недопустимою.

В роботі також наведені рекомендації щодо практичної реалізації електроприводу. В якості керуючого пристрою обрано мікроконтролер на основі цифрового сигнального процесора TMS320F28335. Для структури силової частини використано типове рішення з проміжною ланкою постійного струму та трьохфазним інвертором на виході.

Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні та експлуатації ряду механізмів, у яких необхідно забезпечити надійний пуск з підвищеним моментом.