

**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» грудня 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 із асинхронним двигуном і частотним перетворювачем»

**Виконав(ла)**

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

Олексій ФІАЛКОВ  
(ім'я, прізвище)

  
(підпис)

**Керівник роботи**

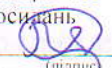
д.т.н., проф. Борис КУЗНЕЦОВ  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

  
(підпис)

**Рецензент роботи**

д.т.н., проф. Валентина ШЕВЧЕНКО  
(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 інститутКафедра Електромеханічних та комп'ютерних системРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханікаОсвітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

## ЗАТВЕРДЖУЮ



(підпис)

Завідувач кафедри

Інна НЕФЬОДОВА

(ім'я, прізвище)

«08» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)Фіалков Олексій Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Синтез електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотним перетворювачемкерівник роботи Кузнецов Борис Іванович, д. т. н., професор

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

затверджені наказом по університету від «08» жовтня 2024 року № 5101-5/3232

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 із асинхронним двигуном і частотним перетворювачем
5	Розробка електромеханічної системи із асинхронним двигуном і частотним перетворювачем
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)

Олексій ФІАЛКОВ

(ім'я, прізвище)

Керівник роботи

  
(підпис)

Борис КУЗНЕЦОВ

(ім'я, прізвище)

## АНОТАЦІЯ

У рамках роботи виконано розрахунки параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронного двигуна, а також його природних електромеханічних характеристик. При цьому були враховані впливи параметрів перетворювача частоти на схему заміщення, що дозволило провести розрахунки електромеханічних і енергетичних характеристик електропривода під час регулювання частоти та амплітуди живлячої напруги відповідно до закону Костенко ( $U/f = \text{const}$ ).

Використано широкий спектр методів дослідження, включаючи математичні розрахунки, графічні побудови, математичні залежності, а також теоретичні положення з курсів «Теорія електропривода», «Електричні машини», «Теоретичні основи електротехніки» і «Теорія автоматичного керування». Це дозволило здійснити комплексний підхід до аналізу та модернізації електропривода.

Додатково було проведено моделювання роботи електропривода у програмному пакеті MATLAB, що дало змогу візуалізувати результати та підтвердити отримані теоретичні дані.

Запропоновані в рамках роботи рішення можуть мати істотний вплив на підвищення ефективності систем електроприводів, що, в свою чергу, сприятиме зменшенню енергетичних витрат та поліпшенню експлуатаційних характеристик у промислових застосуваннях. Результати досліджень також можуть слугувати основою для подальших розробок у сфері автоматизації і електротехніки, підвищуючи конкурентоспроможність виробництв.

**АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ.**

## ABSTRACT

As part of the work, calculations of the parameters of the T-shaped equivalent circuit of an asynchronous motor, as well as its natural electromechanical characteristics, were performed. At the same time, the effects of the frequency converter parameters on the equivalent circuit were taken into account, which allowed calculations of the electromechanical and energy characteristics of the electric drive during frequency and amplitude control of the supply voltage in accordance with Kostenko's law ( $U/f = \text{const}$ ).

A wide range of research methods was used, including mathematical calculations, graphical constructions, mathematical dependencies, as well as theoretical provisions from the courses "Theory of Electric Drive", "Electric Machines", "Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering" and "Theory of Automatic Control". This allowed for a comprehensive approach to the analysis and modernization of the electric drive.

Additionally, simulation of the operation of the electric drive was performed in the MATLAB software package, which made it possible to visualize the results and confirm the obtained theoretical data.

The solutions proposed in the work can have a significant impact on increasing the efficiency of electric drive systems, which, in turn, will contribute to reducing energy costs and improving operational characteristics in industrial applications. The research results can also serve as the basis for further developments in the field of automation and electrical engineering, increasing the competitiveness of industries.

ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY CONVERTER, SUBSTITUTION SCHEME, MATHEMATICAL MODEL, ENERGY CONSUMPTION.

## ВСТУП

Сьогодні гірничо-металургійний комплекс України стикається зі структурними недоліками і технологічним відставанням у розвитку підприємств, що зумовлене кількома факторами. По-перше, понад 70% металопродукції в Україні виготовляється за застарілими технологіями. По-друге, частка безперервного розливання сталі становить лише 20%, тоді як у світовій практиці цей показник перевищує 80%.

Значні витрати енергії на підтримку життєдіяльності підприємств негативно впливають на обсяги виробництва, що, у свою чергу, призводить до збільшення енергозатрат у собівартості продукції. Обмежене фінансування змушує підприємства вирішувати технічні проблеми за тимчасовими схемами без належного техніко-економічного аналізу, що призводить до подальших фінансових втрат у довгостроковій перспективі.

Висока енергоємність металургійних виробництв на тлі зростання цін на паливно-енергетичні ресурси вимагає термінового вирішення питань енергозбереження. Застосування системного підходу є ефективним методом оптимізації енергетичного управління на підприємствах чорної металургії. Це дозволяє розглядати енергогосподарство як складну систему, де оптимізація роботи кожного елемента, а також врахування їхнього взаємного впливу, можуть суттєво поліпшити загальні результати, особливо на реконструйованих та нових об'єктах.

Потенціал енергозбереження в металургійній галузі значний, оскільки відзначається значне фізичне та моральне зношування основного енергетичного обладнання разом із нерегулярною роботою металургійних комбінатів на сучасному ринку. Ці два аспекти, разом із проблемою обліку і контролю витрат паливно-енергетичних ресурсів, що вимагає значних поліпшень на всіх рівнях виробництва, визначають основну частину нераціональних втрат енергії, що може досягати до 70% від потенціалу енергозбереження.

# 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Привод вантажопідіймальних кранів має ряд особливостей, які відрізняють його від приводів інших загальнопромислових і спеціальних механізмів. Механічні характеристики електропривода простягаються в усіх чотирьох квадрантах, що дозволяє плавно переходити від рухового режиму до генераторного під час спуску вантажу. Діапазон регулювання швидкості зазвичай не перевищує 10:1 при одно-зонному регулюванні, що є відносно невисоким.

У цьому контексті не вимагається висока жорсткість механічних характеристик, а також немає суворих вимог до швидкодії системи. Температура навколишнього середовища може варіюватися від  $-40$  до  $+40$  °С, в той час як у металургійних технологічних цехах вона становить від  $-10$  до  $+50$  °С. Середня вологість повітря може сягати 90% при температурі 25 °С, а пил у повітрі осаджується у кількості 5 г/м<sup>2</sup> на добу. Також важливо враховувати осадження парів кислот на рівні 500 мг/м<sup>2</sup> на добу. Вібрації і удари, викликані роботою механізмів, характеризуються частотою 1-50 Гц і прискоренням до 5 м/с<sup>2</sup>, з окремими ударами до 30 м/с<sup>2</sup>.

Електроприводи кранових механізмів поділяються на дві категорії в залежності від характеру навантаження: ті, що здебільшого залежать від активного статичного моменту, і ті, що переважно працюють з реактивним статичним моментом. В першу групу входять електроприводи для вантажних лебідок і лебідок зі стрілою, у той час як другу групу складають електроприводи механізмів горизонтального пересування.

Бажані механічні характеристики електроприводів для підйому і горизонтального пересування повинні забезпечувати стабільність у всьому діапазоні навантажень. Показники, які визначають процес опускання вантажу, можуть перебувати у третьому (силовий спуск) та четвертому (гальмівний спуск) ква-

дрантах. Для кранів з великою висотою підйому, що вимагають підняття легких вантажів чи порожнього гака на швидкостях, більших за номінальні, необхідно застосування двозонного регулювання швидкості.

Електропривод механізмів горизонтального пересування також повинен мати жорсткі характеристики в усіх режимах навантаження. Для забезпечення гальмування з вищих до нижчих швидкостей важливо, щоб електропривод забезпечував автоматичний перехід із рухового в гальмівний режим, обмежуючи гальмівний момент.

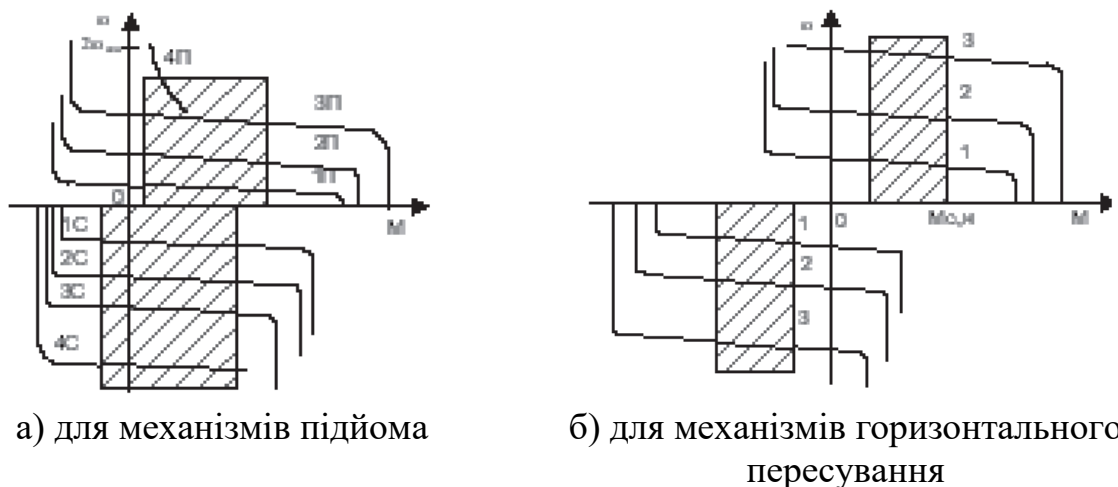


Рисунок 1.1. Бажані механічні характеристики електропривода кранових механізмів.

Візок оснащений механізмами, що забезпечують підйом вантажу та пересування самого візка. У випадку мостового крана, механізм підйому представляє собою вантажну лебідку, що складається з кількох елементів. Основними частинами є двигун, муфта, гальмо, редуктора, вантажний барабан, поліспаст з важелем обмежника підйому та гак для кріплення вантажу.

Механізм пересування візка містить електродвигун, редуктор, муфту, колеса та гальмо. Для постачання електроенергії до електропривода візка використовується кабель, який намотаний на спеціальний барабан. Це забезпечує зручне переведення електроенергії до системи крана та безперебійну роботу механізмів.

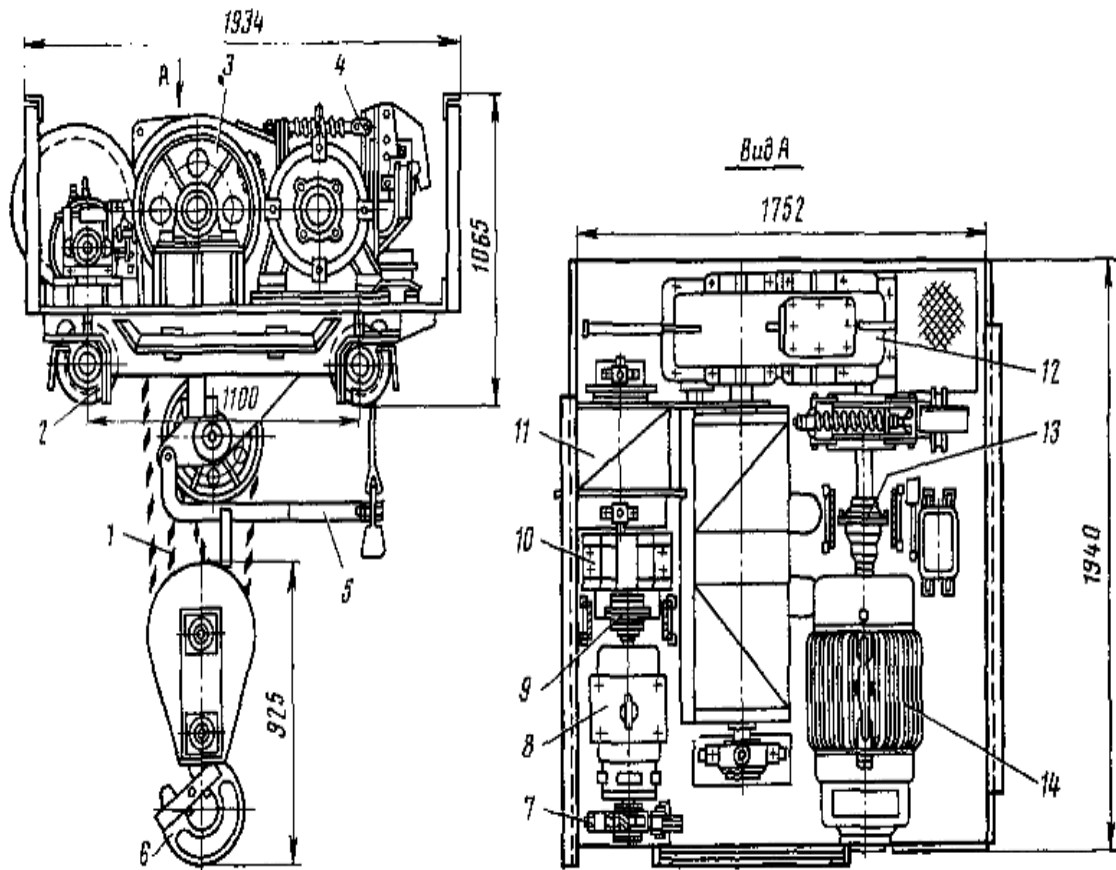


Рисунок 1.2. Вантажний візок мостового крана.

Виконання циклічних операцій, пов'язаних з переміщенням вантажів по певних траєкторіях, відбувається підйом вантажу на висоту, його опускання, а також горизонтальне пересування в поздовжньому і поперечному напрямках щодо кранових шляхів. У процесі підйому вантажу спостерігаються витрати електроенергії, однак частину енергії можна рекуперувати під час опускання. З іншого боку, горизонтальне переміщення також потребує електроенергії, що веде до втрат.

Крім того, в циклі навантаження включено розгону до номінальної швидкості для механізму підйому, пересування крана та візка, що також вимагає витрат енергії. Додаткові витрати енергії спостерігаються під час регулювання швидкості та гальмування в електроприводах.

Витрати енергії на розгін залежать від квадрата кінцевої швидкості крана та візка підйомного механізму, а також прямо пропорційні масі вантажу,

що переміщується. У зв'язку з цим об'єктивним критерієм для оцінки енергоспоживання є питомий (середній) витрата електроенергії за годину на переміщення одного тонни вантажу за один цикл роботи крана, виражений у кВт·год/цикл.

Крани загального призначення класифікуються за конструктивними особливостями, серед яких виділяють два основних типи залежно від способу спираючого на крановий шлях. Підвісні крани підвішуються до нижніх полиць двотаврових балок, верхні полиці яких закріплені до стельових конструкцій. Ходові колеса таких кранів спираються на внутрішню сторону нижніх полиць балок, що забезпечує їх переміщення.

Опорні крани використовують ходові колеса, які спираються на рейки, закріплені на підкранових балках, що встановлюються на платформах цехів. Що стосується конструкції моста, він може бути одно- або двобалочним. Однобалочні крани мають одну головну балку, тоді як двобалочні — дві, з'єднані кінцевими балками, де встановлені ходові колеса.

Крани також розрізняються за типом приводу, включаючи ручний та електричний. У кранах з ручним приводом використовують черв'ячні талі для підйому і переміщення вантажів, тоді як в електричних кранах застосовують електричні талі та механізми типу електричних лебідок, які встановлені на спеціальних самохідних кранах.

Однобалочні крани опорного типу піднімають вантажі за допомогою електричної талі, що рухається уздовж головної балки. У разі великих прольотів, головні балки зміцнюються горизонтальними фермами для підвищення несучої здатності. Двобалочний міст крана складається з двох головних балок та кінцевих, де також встановлені ходові колеса, які спираються на кранові рейки.

Кранова візок переміщається по верхньому поясу головних балок моста, що дозволяє рухатися перпендикулярно до напрямку руху крана. Візок обладнано механізмами для підйому, а також для власного пересування по мосту, який має окремий привід для кожного з ведучих коліс.

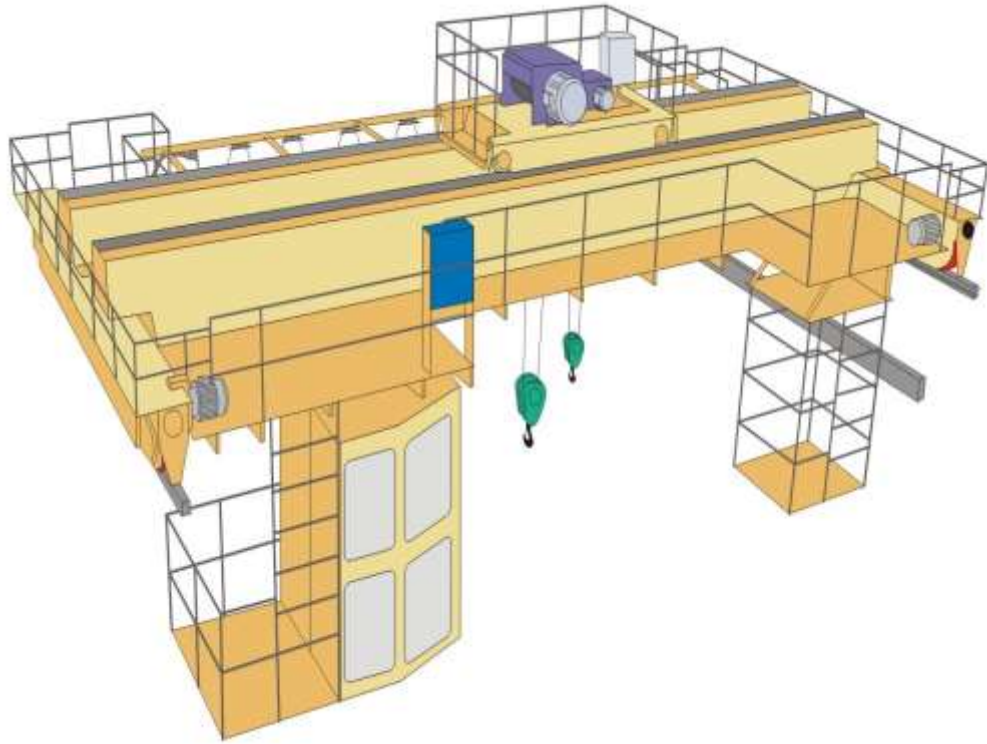


Рисунок 1.3 Двобалочний мостовий кран опорного типу

Схема розташування електромеханічного обладнання на металевих конструкціях крана приведена на рис.1.4.

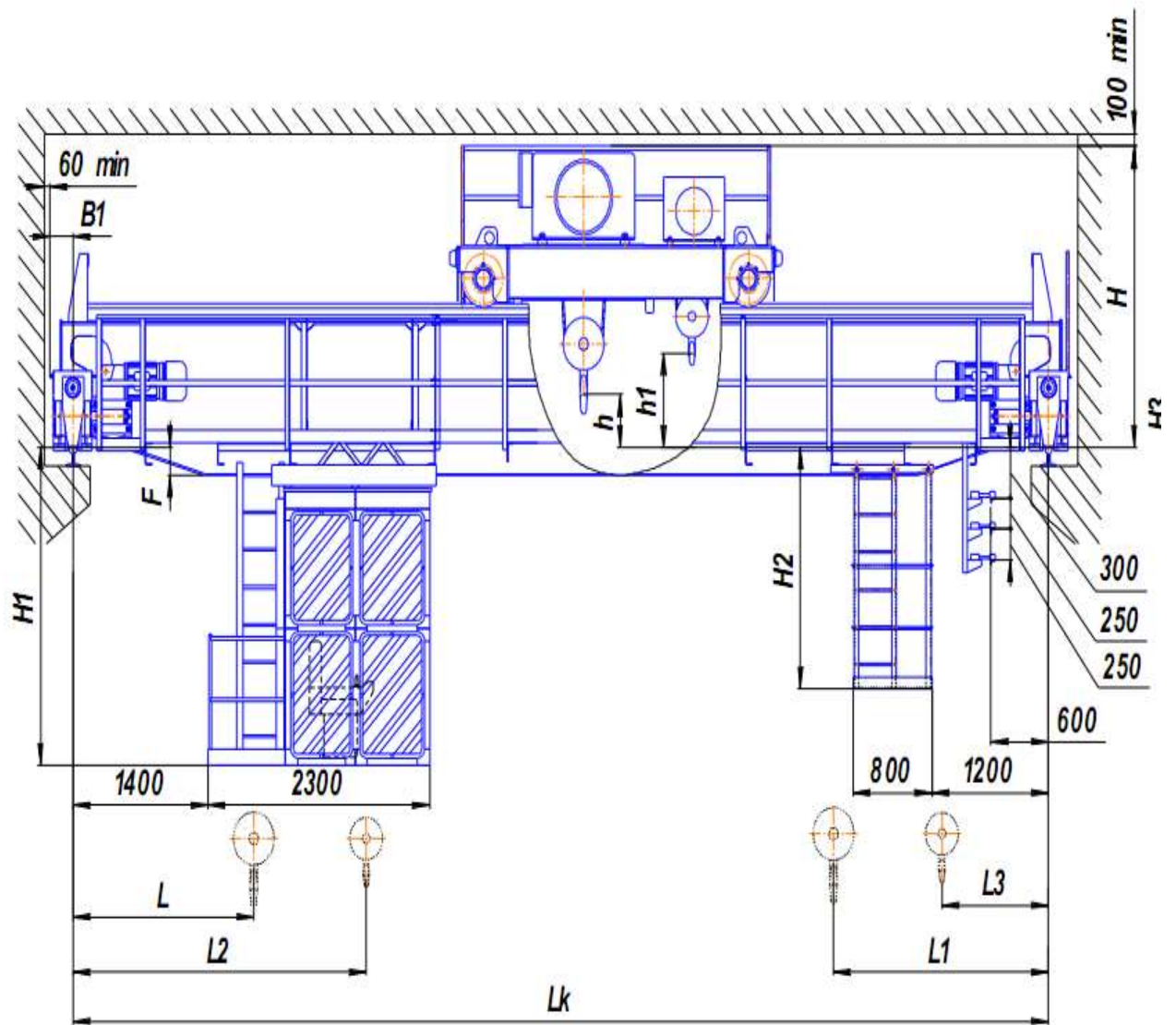


Рисунок 1.4 Схема розташування електромеханічного обладнання мостового крана.

Всіма механізмами крана відбувається з кабіни, що закріплена на мосту. Електродвигуни, які обслуговують механізми, живляться від цехових тролей, зазвичай виготовлених з кутової сталі та прикріплених ізоляторами до стіни будівлі. Черевики струмознімачів, закріплені на металоконструкції моста, ковзають по цих троллях. Для обслуговування струмознімачів і тролей до мосту кріплять допоміжну кабінку, що забезпечує доступ як з кабіни крана, так і з майданчика на мосту.

Кабель, що живить електродвигуни візка, виконаний у вигляді гнучкого кабелю. В деяких конструкціях мостових кранів електродвигуни візків живляться від тролей, розташованих вздовж однієї з головних балок моста, при цьому струмопідвід забезпечується струмознімачами, які встановлені на рамі візка.

Досить популярною є схема, що включає кабеленесучу каретку, яка рухається разом із крановою візком уздовж мосту. Цей підхід дозволяє зменшити зусилля натягу на кабелі, запобігаючи різким перегибам, що зазвичай є причинами їх пошкодження під час експлуатації.

Металоконструкції мостових кранів мають специфічну форму. Двобалочний міст в плані виглядає як рама, що складається з двох головних і двох кінцевих балок, у яких розміщуються ходові колеса. Головні балки часто мають коробчасту зварену конструкцію прямокутної форми, що складається з чотирьох стінок зі сталевих листів або з гнутих елементів, а іноді й з ґратчастих ферм, що забезпечує більшу стійкість до згинаючих навантажень.

Внутрішня частина головних балок містить великі і малі діафрагми — вертикальні сталеві листи, які приварюються до стінок і верхнього поясу, надаючи структурі додаткову жорсткість. Між нижньою крайкою великих діафрагм і нижнім поясом балки створюється зазор. Ці елементи підвищують жорсткість вертикальних стінок, слугують опорами для рейок і контролюють вигини верхнього поясу в цілому.

Для компенсації значних прогинів головних балок, які виникають при підйомі важких вантажів, у конструкцію вносять вигин вгору, відомий як будівельний підйом. Це передбачає спеціальне розкроювання вертикальних листів під час виготовлення моста.

На верхньому поясі головної балки закріплюється рейка для пересування кранової візки. У кінцях рейки встановлюються упори для обмеження руху візка. Зовнішні стінки головних балок оснащені кренами робітників і пе-

рехідними майданчиками, які необхідні для монтажу та обслуговування обладнання, електроапаратури та тролей. Ці майданчики складаються з кронштейнів, приварених до стінок балок, суцільного настилу та поручнів для безпеки.

Металоконструкції мостів включають не лише основні елементи, але і додаткові складові, такі як сходи для спуску і виходу з кабін кранів, а також сходи та перила, які забезпечують перехід по кінцевій балці моста з одного боку на інший. Кінцеві балки мають коробчасту конструкцію прямокутної форми, незалежно від конструкції головних балок моста. На кінцях цих балок встановлюються букси для ходових коліс крана або осі балансирів, а також кінцеві вимикачі обмежувачів пересування кранів і буфера. У середині кінцевих балок мостових кранів, що працюють на відкритому повітрі, розміщені протиугінні пристрої, які запобігають уганню крана вітром.

Головні балки з кінцевими з'єднуються за допомогою накладок, зварювання або опорних листів на високоміцних болтах. При постачанні моста крана двома блоками у вигляді півмилі (одна головна балка з двома половинами кінцевих балок), кінцеві балки скріплюються монтажними накладками.

Кранові візки, які використовуються в мостових кранах, мають різну конструкцію, але складаються з основних елементів: рами, що спирається на візкові рейки, механізму підймання вантажу, а також механізму пересування візка по мосту. Відстань між осями рейок візкового шляху називається колією візка, а відстань між вертикальними осями передніх і задніх коліс — базою візка.

Електродвигун через горизонтальний редуктор приводить в обертання барабан, на який намотуються канати зведеного поліспасти з крюковою підвіскою. Вал електродвигуна з'єднаний із вхідним валом редуктора за допомогою зубчастої муфти. Механізм пересування візка включає електродвигун, редуктор, гальмо, а також ходову частину з коліс.

На рамі візка змонтовані кінцеві вимикачі механізму підйому, які відключають його при досягненні крайніх положень, а також лінійка, що обмежує шлях пересування візка. Корпуси рам візків виготовляються зварними з прокату або гнутих профілів, а настил — з листа з вирізами для проходу канатів.

Запобіжні пристрої механізмів пересування і підйому вантажів необхідні для забезпечення безпеки при роботі мостових кранів. До них належать обмежувачі пересування, буфера, упори та протиугонні пристрої. Обмежувачі пересування автоматично відключають електродвигуни механізмів при досягненні крайніх положень, використовуючи кінцеві вимикачі та лінійки, що впливають на їх важелі.

На кінцях кранових і візкових шляхів встановлюються тупикові упори, які фіксують крайні положення кранів і візків. На кінцевих балках кранів, балансірів і рамах візків розташовані буфера, призначені для пом'якшення ударів крана і візків об упори, а також для запобігання зіткнення кранів між собою. Існують різні типи буферів: еластичні, пружинні, пружинно-фрикційні та гідравлічні.

Для запобігання потрапляння сторонніх предметів під колеса кранів та візків перед колесами встановлюють щитки. Зазор між щитками і поверхнею головки рейки не повинен перевищувати 10 мм.

У механізмах підйому вантажів використовуються різні обмежувачі вантажопідйомності, серед яких торсіонні. Основним робочим елементом торсіонного обмежувача є торсіонний (гнучкий) валик. Один кінець валик закріплений нерухомо в опорі, а інший кінець через важіль прикріплений до зрівняльного блока вантажного поліспасти. Крім того, валик з'єднаний з рухливим контактом потенціометра, який входить до ланцюга управління роботою електродвигуна механізму підйому.

При підйомі вантажу зусилля на зрівняльному блоці, пропорційне масі вантажу, створює момент, що закручує валик на кут, величина якого пропорційна цьому зусиллю, а отже - масі вантажу. Закручуючись, валик повертає

рухливий контакт потенціометра на такий же кут. Якщо маса вантажу, що піднімається, перевищує допустиму величину, зміна опору в ланцюзі управління викликає відключення електродвигуна механізму підйому, призупиняючи його роботу.

Кінематична схема механізму підйому кранового візка ілюструє ці принципи, показуючи, як елементи взаємодіють для забезпечення безпеки та ефективності підйому вантажів.

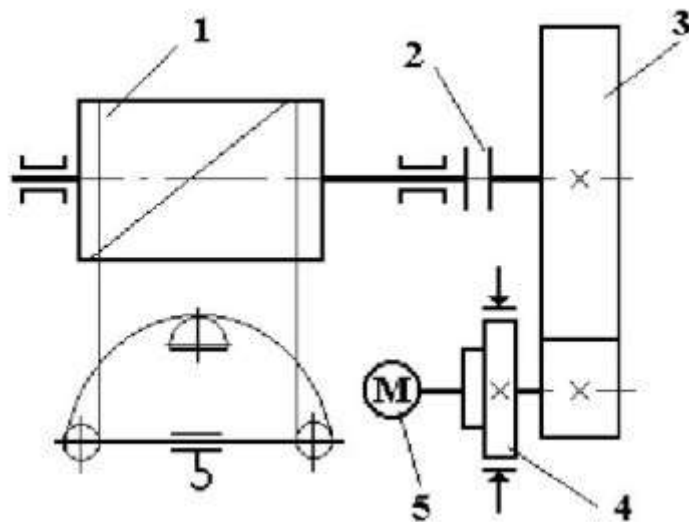


Рисунок 1.5 – Кінематична схема механізму підйому: 1 - барабан; 2 - муфта; 3 - редуктор; 4 - гальмо; 5 - електродвигун

Кранові колії використовують різноманітні типи залізничних рейок, серед яких вузькоколіїні варіанти, такі як Р18, Р24 і Р38, а також ширококоліїні рейки, включаючи Р43, Р50 і Р65. Окрім того, існують спеціалізовані кранові рейки, такі як КР50, КР70, КР80, КР100 і КР120, а також квадратні сталеві секції з округленими кряями. Для підвісних кранів часто застосовують двотаврові балки, які забезпечують необхідну міцність і стабільність.

Електроприводи для вантажопідіймальних кранів мають особливі характеристики, що відрізняють їх від звичайних електричних приводів. Однією з ключових особливостей є наявність механічних характеристик у всіх чотирьох

квадрантах, що дозволяє забезпечити плавний перехід між режимами роботи, зокрема при спуску вантажу. Діапазон регулювання швидкості зазвичай обмежений, не перевищуючи десяти до одного, що є важливим для ефективної роботи. Також варто зазначити, що електроприводи не мають надвисоких вимог до жорсткості механічних характеристик або швидкості реакції.

Температурний режим навколишнього середовища, в якому працюють ці електроприводи, коливається від  $-40$  до  $+40$  °C, а в умовах металургійних цехів цей діапазон може сягати від  $-10$  до  $+50$  °C. Вологість повітря може досягати 90% при певній температурі, а також можливі осадки пилу та парів кислот, що вимагає додаткової уваги до матеріалів та конструкцій. Вібрації і удари, що виникають під час роботи механізмів, також мають вплив на їхню надійність.

Електроприводи кранових механізмів можна класифікувати залежно від характеру навантаження. В одній групі знаходяться приводи, які працюють з активним статичним моментом, до яких відносяться вантажні і стрілові лебідки. Інша група включає механізми, що забезпечують горизонтальне переміщення, які зазвичай мають реактивний момент.

Механічні характеристики електроприводів повинні залишатися жорсткими на всіх етапах навантаження, що є критично важливим для безпеки та ефективності роботи. Для точного управління вантажем необхідно забезпечити знижену швидкість під час вибору слабини канату, а також дотримуватися вимог до гальмування. Гальмівні режими можуть варіюватися, включаючи як силові, так і гальмівні.

Механізми горизонтального переміщення, такі як крани і вантажні візки, також потребують електроприводів з жорсткими характеристиками. Гальмування в цих механізмах займає короткий проміжок часу і зазвичай відбувається при переході з вищих швидкостей на нижчі. У зв'язку з великим моментом інерції, електроприводи повинні обмежувати прискорення під час запуску

та гальмування, щоб уникнути надмірних динамічних навантажень на конструкції.

У зв'язку з великим моментом інерції електродвигуни таких механізмів вибираються з урахуванням підвищених пускових втрат, тому статичний момент на валу електродвигунів в сталому режимі не перевищує, як правило, 50% номінального моменту.

Маса переміщуваного вантажу, як правило, надає невеликий вплив на статичний момент електроприводу механізму пересування, тому маса металоконструкції крана зазвичай більше маси вантажу.

Маса вантажу та маса вантажного візка мостового крана вже сумірні, а маса вантажного візка баштового крана набагато менше маси вантажу. Тому маса переміщуваного вантажу надає значний вплив на завантаження механізмів.

Алгоритм керування гальмом в електроприводах механізмів горизонтального переміщення простіше, ніж в електроприводах механізмів підйому. З "за реактивного моменту навантаження зняття гальма в більшості випадків можна проводити, не чекаючи, поки момент електродвигуна зросте до значення статичного моменту. Основною вимогою є накладення гальма при швидкості, близькій до нульової, для зниження динамічних навантажень і зменшення зносу гальмівних накладок.

У кранових механізмах традиційно використовують асинхронні електроприводи як приводні двигуни. Частота обертання таких двигунів визначається формулою, що дозволяє виділити кілька методів регулювання. Серед них можна виділити частотне регулювання, зміну числа полюсів, реостатне регулювання та зміну величини напруги.

Регулювання за допомогою зміни числа полюсів забезпечує ступінчасту зміну частоти обертання. Для отримання трьох або чотирьох частот на статора додається додаткова обмотка, що дозволяє отримати дві додаткові частоти. Такі асинхронні двигуни називають багатошвидкісними. Проте, до недоліків

цього методу відносять великі габарити, вагу та вартість, а також те, що зміна частоти обертання відбувається великими ступенями.

Реостатне регулювання включає в себе додавання активних опорів в ланцюг ротора, що змінює механічні характеристики двигуна. Цей метод підходить лише для двигунів з фазним ротором і дозволяє регулювати частоту обертання в широких межах. Однак, він має свої недоліки, зокрема великі енергетичні втрати в реостаті та м'яку механічну характеристику при великих опорах.

Зміна величини напруги є ще одним методом регулювання, але він не підходить для звичайних двигунів, оскільки зменшення напруги призводить до різкого зниження максимального моменту. Це також може призвести до збільшення втрат потужності і зниження ККД, через що даний метод є придатним лише для мікродвигунів.

Частотне регулювання, у свою чергу, дозволяє використовувати надійні та економічні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Для цього потрібно джерело електричного струму змінної частоти, яке може бути представлене синхронними генераторами або перетворювачами частоти. Цей спосіб регулювання є найбільш ефективним у випадках, коли необхідно значно змінювати частоту обертання.

Регулювання частоти та вихідної напруги у таких системах здійснюється за допомогою алгоритмів високочастотного широтно-імпульсного модуляції (ШІМ). Частота ШІМ зазвичай коливається від 2 до 12 кГц, що перевищує вихідну частоту. В результаті формується високочастотна послідовність імпульсів, яка моделюється за синусоїдальним законом.

У режимі гальмування електроприводи переходять з режиму інвертування у режим випрямлення, при цьому полярність напруги залишається незмінною, але струм змінює напрямок. Для реалізації гальмування необхідно додаткове введення силових елементів, таких як зворотний керований випрямляч або гальмові резистори.

Системи електроприводу з асинхронними двигунами мають численні переваги, включаючи широкий діапазон регулювання частоти, високу точність підтримки швидкості, можливість роботи в режимі холостого ходу, а також високе значення коефіцієнта потужності у всіх режимах. Крім того, синусоїдальність вихідного струму та високі динамічні характеристики роблять ці системи особливо привабливими.

Сучасний етап розвитку кранових електроприводів характеризується активним впровадженням частотно регульованих приводів. Використання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором разом з перетворювачами частоти забезпечує високі енергетичні та експлуатаційні показники. Це досягається за рахунок поліпшення динамічних характеристик, зменшення динамічних навантажень на конструкції, істотного скорочення споживаної електроенергії, підвищення надійності приводів та оптимізації робочих циклів.

Максимальне зусилля в канаті  $S$  обчислюємо за формулою

$$S = \frac{(Q_2 + Q_1 + J_t)}{a \cdot \eta_{bl} \cdot t} = 4942 \text{ кг}$$

Статичний моменту на валу двигуна  $M_{st}$  дорівнює

$$M_{st} = \frac{S \cdot a \cdot D_b \cdot g}{2 \cdot i \cdot \eta} = 1370 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Динамічний моменту на валу двигуна  $M_d$  дорівнює

$$M_d = \frac{\delta(2 \cdot \sum J) \cdot N_{dv} \cdot g}{375t} + \frac{0.975(J + \sum Q) \cdot V^2 \cdot g}{N_{dv} \cdot t \cdot \eta \cdot \eta_{bl}} = 696 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де  $\delta$  – коефіцієнт впливу мас механізмів, (1,1 – 1,25)

$\Sigma J$  – сумарний маховий момент роторів двигунів, гальмівних шківів, і з'єднувальних муфт;

$N_{dv}$  – швидкість обертання ротора двигуна, 960 об/хв

Розрахункове значення максимального моменту двигуна при запуску механізму підйому дорівнюватиме

$$M_{max} = \frac{M_{ст} + M_d}{f_t \cdot f_h \cdot f_u \cdot f_\omega} = 2551 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Розрахункова потужність електроприводу підйому може бути обчислена за таким виразом:

$$P_0 = \frac{(Q_2 + Q_1 + J_t) \cdot g \cdot V}{\eta \cdot \eta_{bl}} = 142 \text{ кВт}$$

У механізмі підйому встановлено два двигуни. Двигун вибирається по номінальній потужності та мусить забезпечувати необхідну перевантажувальну здібність.

Перший критерій - номінальна потужність двигуна повинна бути більшою ніж

$$P_{ном} \geq P_0/2 \geq 71 \text{ кВт}$$

Другий критерій – перевантажувальна здібність двигуна повинна забезпечувати максимальний розрахунковий момент :

$$M_{ном} = \frac{M_{max}}{2 \cdot \lambda_{max}} = \frac{2551}{2 \cdot 2} = 638 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

У якості приводного двигуна механізму пересування візка обираємо короткозамкнутий асинхронний двигун типу K21F 315 S6 TWS.

За технічним завданням потужність ПЧ повинна перевищувати потужність електродвигуна не менш ніж на 20 %. Тоді потужність ПЧ складе

$$P_{пч} \geq 1,2 \cdot P_d \geq 1,2 \cdot 71 = 106 \text{ кВт}$$

За номінальною потужністю обираємо перетворювач частоти. За номінальним струмом обираємо перетворювач частоти SV1100 iP5a-4 виробництва LS Industrial Systems потужністю 110 кВт у кількості 2 шт.

### **Висновки**

Проведено детальний аналіз вимог до електроприводів для пересування кранових механізмів, а також їх електроприводів. В результаті розрахунків визначено необхідну потужність електроприводу, яка склала 142 кВт. Також виконано розрахунок потужності перетворювача частоти та проведено перевірку запасу зчеплення коліс візка.

На основі порівняння основних експлуатаційних та енергетичних характеристик різних систем регульованого електроприводу, для електроприводу пересування візка мостового крану обрано систему «перетворювач частоти – асинхронний двигун». У результаті вибору було прийнято асинхронний електродвигун типу K21F 315 S6 TWS з номінальною потужністю 88 кВт. Для забезпечення необхідної потужності обрано два перетворювача частоти типу SV1100 iP5a-4 виробництва LS Industrial Systems, кожен з яких має потужність 110 кВт.

Цей вибір забезпечує відповідність електроприводу вимогам до потужності та надійності, а також оптимізує енергетичні витрати, що є критично важливим для ефективної роботи кранових механізмів.

## 2. АНАЛІЗ РОЗІМКНЕНОЇ СИСТЕМИ

T-подібна схема заміщення асинхронного двигуна має наступний вигляд:

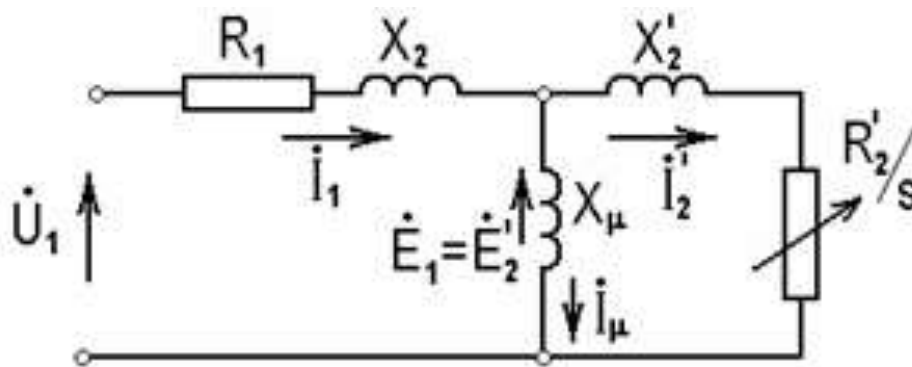


Рисунок 2.1 T-подібна схема заміщення асинхронного двигуна: де  $R_1$ ,  $X_1$  – активний та індуктивний опір фази статора АД;  $R_2$ ,  $X_2$  – активний та індуктивний опір фази ротора АД;  $X_\mu$  – індуктивний опір контуру намагнічування АД;

За паспортними даними знаходимо параметри схеми заміщення. Для спрощення розрахунків допустимо знехтувати активним опором контуру намагнічування.

Номинальна кутову швидкість:

$$\omega_{\text{ном}} = n_{\text{ном}} \cdot \frac{\pi}{30} = 102,90 \text{ 1/с}$$

Кутова швидкість холостого ходу:

$$\omega_0 = n_0 \cdot \frac{\pi}{30} = 104,97 \text{ 1/с}$$

Номінальне ковзання:

$$S_n = \frac{\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}}{\omega_0} = 0,02$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{НОМ}} = 1000 \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = 796,89 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначаємо номінальний струм статора за формулою:

$$I_{1\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{3 \cdot U_{1\text{H}} \cdot \eta_{\text{H}} \cdot \cos\varphi_{\text{H}}} = 173,6 \text{ А}$$

де  $P_{\text{H}}$  – номінальна потужність двигуна;

$U_{1\text{H}}$  – номінальна фазна напруга;

$\eta_{\text{H}}$  – номінальний к.к.д.;

$\cos\varphi_{\text{H}}$  – номінальний коефіцієнт потужності;

Визначаємо струм статора при 75% навантаженні:

$$I_{1p} = \frac{p_* \cdot P_{\text{H}}}{3 \cdot U_{1\text{H}} \cdot \eta_{p_*} \cdot \cos\varphi_{p_*}} = 132,87 \text{ А}$$

,

де  $p_* = P/P_{\text{H}}$  – коефіцієнт завантаження двигуна;

$\eta_{p_*}$  – ККД при частковому завантаженні;

$\cos\varphi_{p_*}$  – коефіцієнт потужності при частковому завантаженні;

Сучасні асинхронні двигуни проектуються таким чином, що найбільший ККД досягається при завантаженні на 10-15% менше номінального. Двигуни розраховуються так, тому що більшість з них в силу стандартної дискретної

шкали потужностей працюють з деяким недозавантаженням. Тому ККД при номінальному навантаженні і навантаженні  $p_* = 0,75$  практично рівні між собою, тобто:

$$\eta_H = \eta_{0,75}$$

Коефіцієнт потужності при тому ж навантаженні  $p_* = 0,75$  сильно відрізняється від коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні, причому ця відмінність в значній мірі залежить від потужності двигуна і для відомих серій асинхронних двигунів з достатньою для практики точністю підпорядковується залежності, приведений на рисунку 2.3.

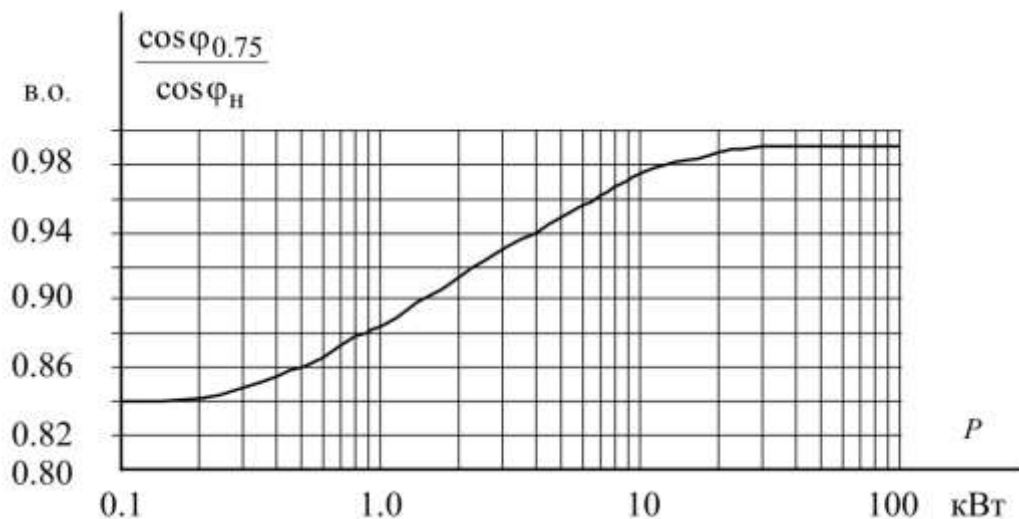


Рисунок 2.3 Залежність  $\cos\varphi_{0,75}/\cos\varphi_H$  від потужності асинхронного двигуна

З вище приведеної залежності маємо, що для двигуна пересування візка:

$$\cos\varphi_{0,75} \approx \cos\varphi_H;$$

Визначаємо струм холостого ходу:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - [p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H)]^2}{1 - [p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H)]^2}} = 44.33 \text{ A}$$

де  $I_{1H}$  – номінальний струм статора;

$I_{1p}$  – струм статора при 75% навантаженні;

$s_H$  – номінальне ковзання;

Визначаємо критичне ковзання:

$$S_k = S_H \frac{(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_m - 1)]})}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_m - 1)} = 0,079$$

де  $k_m$  – перевантажувальна здатність двигуна;

$\beta$  – коефіцієнт, значення якого лежить у межах 0,6-2,5 (для асинхронних двигунів серії 4А  $\beta = 1.3$ );

Визначаємо коефіцієнт  $C_I$ :

$$C_I = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_I \cdot I_{1H}} = 1.0232$$

де  $k_I$  – кратність пускового струму;

Визначасмо коефіцієнт  $A_I$  :

$$A_I = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_I \cdot k_m \cdot P_H} = 0.4217$$

Активний опір ротора, приведений до обмотки статора АД:

$$R_2' = \frac{A_I}{(\beta + 1/s_H) \cdot C_I} = 0.0295 \text{ Ом}$$

Активний опір обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 0.0493 \text{ Ом}$$

Визначимо параметр  $\gamma$ , який дозволяє знайти індуктивний опір короткого замикання  $R_{2k}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2)^2 - \beta^2} = 12,5832$$

Тоді:

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot R_2' \cdot C_1 = 0,3803 \text{ Ом}$$

Для того, щоб виділити з індуктивного опору короткого замикання  $L_{2k}$  опори розсіювання фаз статора  $L_1$  та ротора  $L_2$ , скористаємося співвідношеннями, які справедливі для серійних асинхронних двигунів.

Індуктивний опір розсіювання фази роторної обмотки, приведеної до статорної, може бути розрахований за формулою:

$$X_2' = 0.58 \cdot X_{\text{кн}} / C_1 = 0,2156 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір розсіювання фази статорної обмотки може бути розрахований за наступною формулою:

$$X_1 = 0.42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,1597 \text{ Ом}$$

ЕРС ланки намагнічування  $E_m$ , наведена потоком повітряного зазору в обмотці статора у номінальному режимі, дорівнює:

$$E_m = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos\varphi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_H} - X_1 \cdot I_{1H})^2} = 197.48$$

Тоді індуктивний опір контуру намагнічування буде дорівнювати:

$$X_\mu = E_m / I_0 = 4.4552 \text{ Ом}$$

$$\gamma = \alpha \cdot \sqrt{\mu} \quad (2.1)$$

де  $\mu M / M_{\text{ном}}$  – відносний електромагнітний момент. Якщо магнітний ланцюг машини слабо насичений і активним опором статора можна зневажити, то АД в цьому випадку буде працювати при практично постійному коефіцієнті потужності, запасі статичної стійкості й абсолютнім ковзанні.

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\phi_1^2}{\phi_2^2} \rightarrow \frac{\phi_1}{\phi_2} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \quad (2.2)$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\phi_1 \cdot f_1}{\phi_2 \cdot f_2} \quad (2.3)$$

Підставляючи (2.2) в (2.3), одержимо закон Костенко

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \cdot \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \rightarrow U\alpha \cdot \quad (2.4)$$

Для деяких найпростіших випадків із закону Костенко можна виключити відносний момент. Вважаючи із точністю до ковзання  $\omega_1 = \omega$  представимо рівняння механічної характеристики навантаження статичною функцією  $M_s \cdot \omega^k$  або, у відносних одиницях, як  $\mu\alpha^k$ . Тоді вираз (2.1) прийме вигляд

$$\gamma = \alpha^{1+k/2} \quad (2.5)$$

Таке керування можливо виконати за допомогою зворотного зв'язку по швидкості відповідно до виразу  $\omega = \omega_{1\text{НОМ}} \cdot (\alpha - \beta_0)$ .

Для механізмів з активним навантаженням стосовно до номінальних параметрів сіткової напруги одержимо закон частотного керування:

$$\frac{U}{f} = \frac{U_{\text{НОМ}}}{f_{\text{НОМ}}} = \frac{220}{50} = 4.5 \quad (2.6)$$

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна скористаємося символьним методом комплексним методом розрахунку кіл змінного струму.

Комплексний опір ротора

$$Z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$$

Комплексний опір ланцюгу намагнічування

$$Z_\mu = j \cdot x_\mu$$

Комплексний опір роторного кола схеми заміщення

$$Z_{20}(s) = \frac{Z_2(s) \cdot Z_\mu}{Z_2(s) + Z_\mu}$$

Комплексний опір ланцюгу статора

$$Z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$$

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_2(s)$$

Струм статора АД

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_0(s)}$$

Напруга на затискачах роторного кола

$$E_{20}(s) = U - I_1(s) \cdot Z_1(s)$$

Струм ротора АД

$$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{Z_2(s)}$$

Електромагнітний момент АД

$$M_{\text{эм}}(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \mathbf{Re} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right); Q_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \mathbf{Im} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta(s) = \frac{M_{\text{эм}}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1 - s)}{P_{\text{АД}}(s)}$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$k_m(s) = \cos(\arg(Z_0(s)))$$

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою програми MATHCAD. Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електродвигуна приведені нижче на рис.2.4.

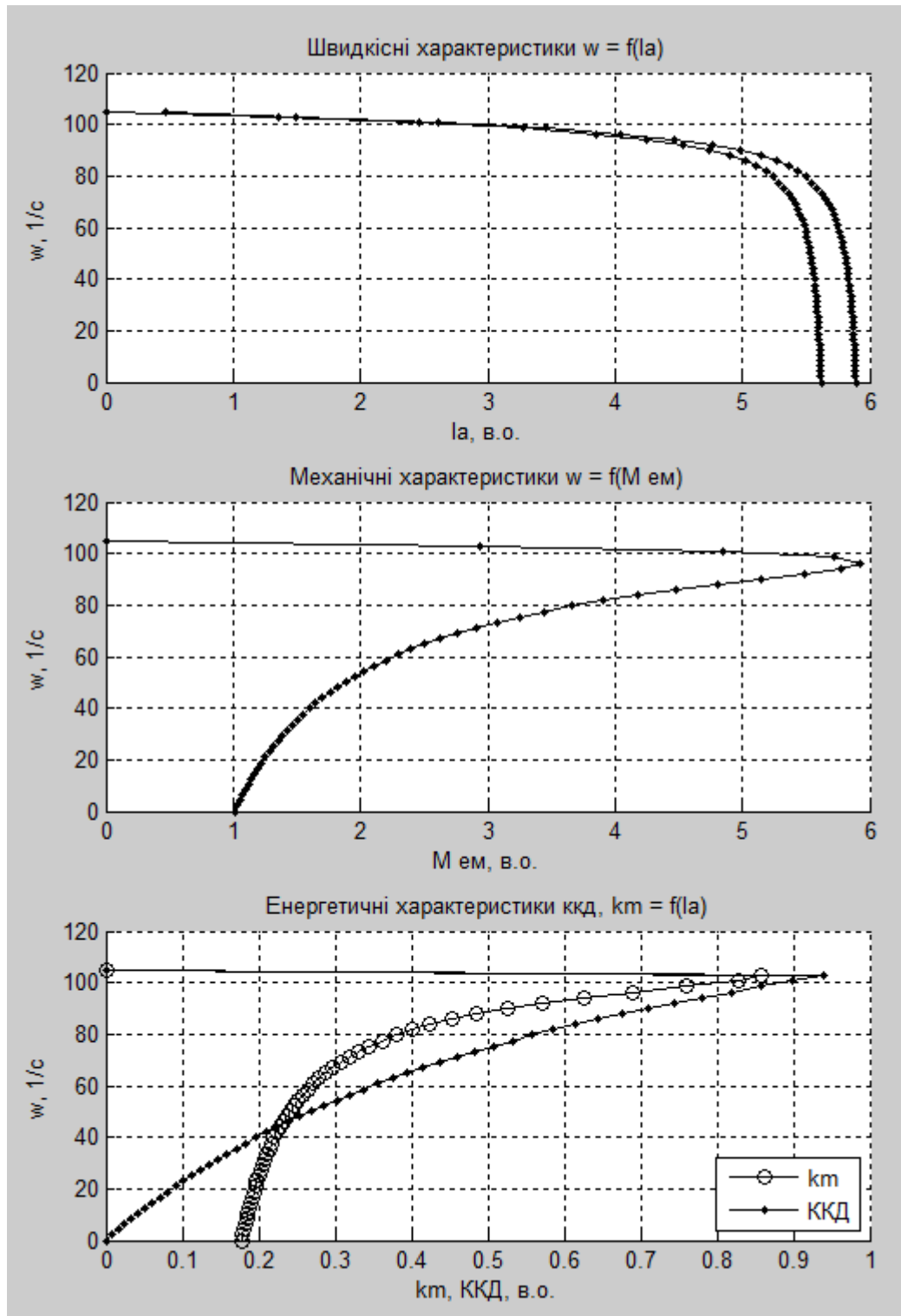


Рисунок 2.4. Natural static and energy characteristics of a synchronous motor.

Параметри схеми заміщення частотно-керованого асинхронного електроприводу відрізнятимуться від природних характеристик за рахунок впливу опорів згладжуючого дроселя та динамічних опорів силових напівпровідникових ключів. Повний активний опір фази статора обчислюємо за формулою:

$$R_{1\Sigma} = R_1 + R_{др} = 0.16 \text{ Ом}$$

При частотному керуванні слід враховувати, що індуктивні опори асинхронного двигуна також будуть змінюватися. Індуктивні опори асинхронного двигуна при частоті живлячої мережі  $f$  Гц можна обчислити по відомим значенням опорів при частоті живлячої мережі 50 Гц за формулою:

$$X_f = X_{50} \cdot \frac{f}{50}$$

Також при розрахунках характеристик електропривода у розімкненій системі керування необхідно враховувати взаємопов'язане керування напруги та частоти за законом Костенко. Згідно з формулою 2.6 при заданій частоті живлячої мережі  $f$  Гц діюче значення фазної напруги складатиме

$$U = 4.5 \cdot f \text{ В}$$

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна скористаємося символьним методом комплексним методом розрахунку кіл змінного струму.

Комплексний опір ротора

$$Z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$$

Комплексний опір ланцюгу намагнічування

$$Z_{\mu} = j \cdot x_{\mu}$$

Комплексний опір роторного кола схеми заміщення

$$Z_{20}(s) = \frac{Z_2(s) \cdot Z_{\mu}}{Z_2(s) + Z_{\mu}}$$

Комплексний опір ланцюгу статора

$$Z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$$

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_2(s)$$

Струм статора АД

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_0(s)}$$

Напряга на затискачах роторного кола

$$E_{20}(s) = U - I_1(s) \cdot Z_1(s)$$

Струм ротора АД

$$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{Z_2(s)}$$

Електромагнітний момент АД

$$M_{\text{эм}}(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \mathbf{Re} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right); Q_{\text{АД}}(s) = 3 \cdot \mathbf{Im} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta(s) = \frac{M_{\text{эм}}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1 - s)}{P_{\text{АД}}(s)}$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$k_m(s) = \cos \left( \arg(Z_0(s)) \right)$$

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою програми MATLAB. Результати розрахунків статичних і енергетичних характеристик електродвигуна приведені нижче на рис.2.5 – 2.8.

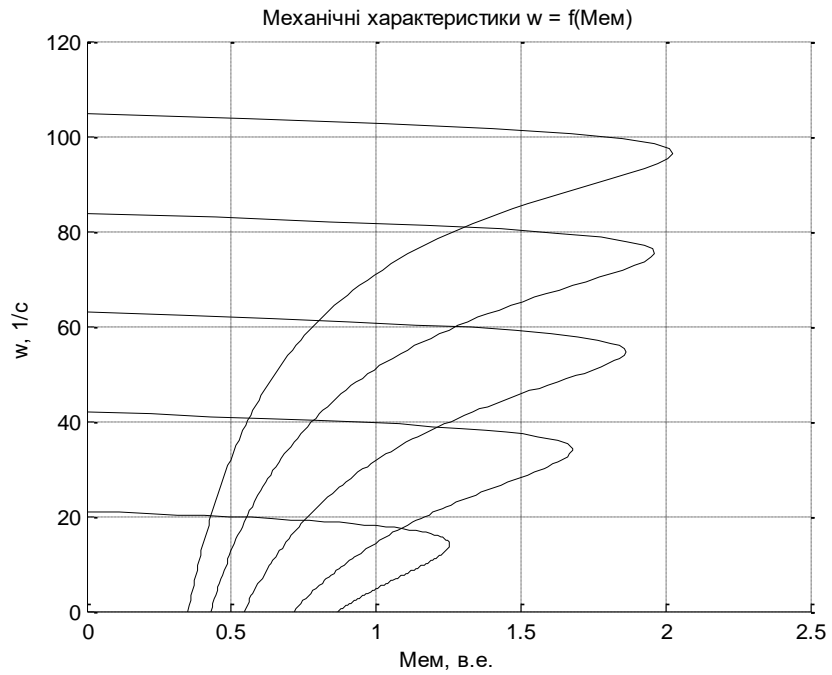


Рисунок 2.5 Механічні характеристики АД при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

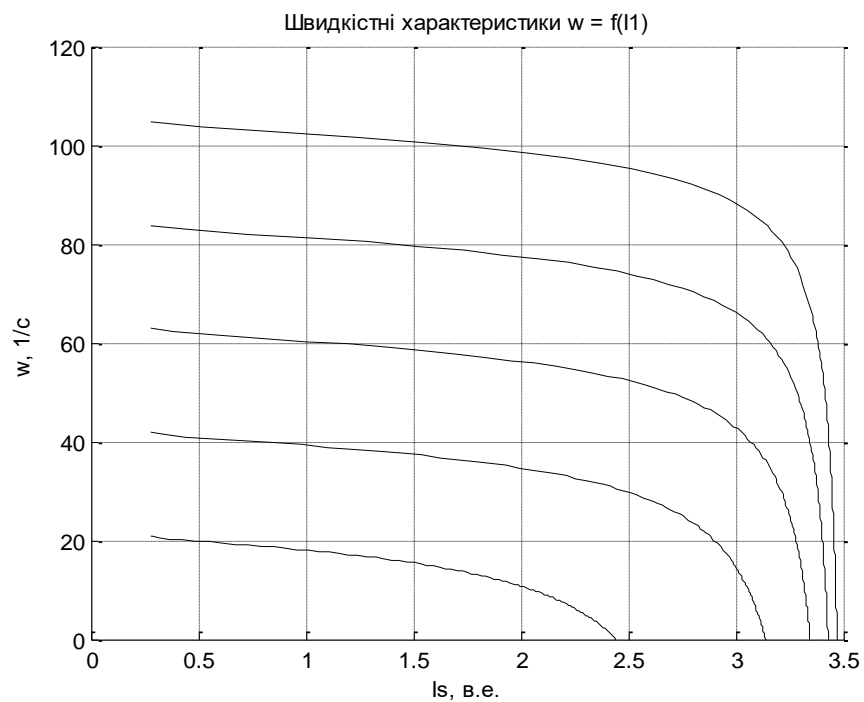


Рисунок 2.6 Швидкісні характеристики АД по струму статора при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

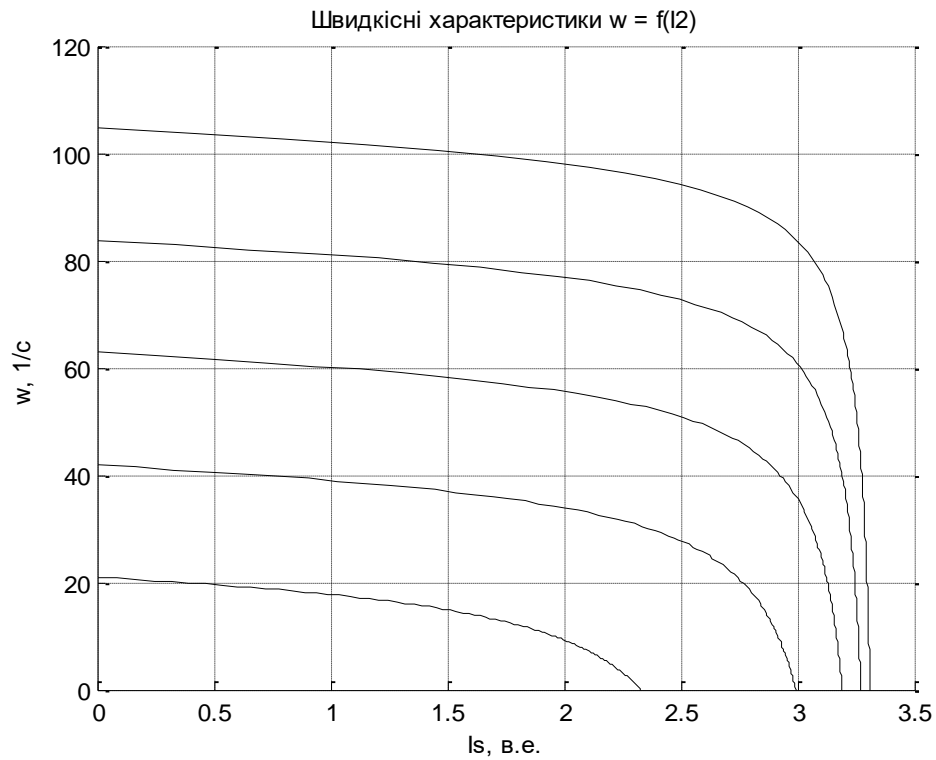


Рисунок 2.7 Швидкісні характеристики АД по ротору при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

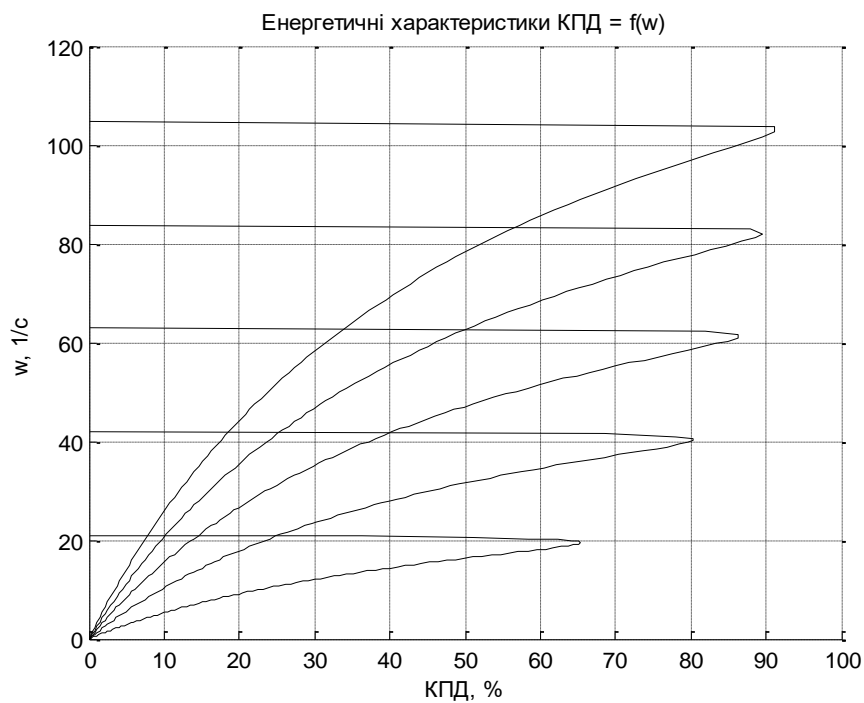


Рисунок 2.8 Залежність ККД АД при частотному регулюванні. Частота живлячої напруги – 50, 40, 30, 20, 10 Гц

## **Висновки**

У другому розділі проведено розрахунки природних характеристик приводного двигуна, а також електромеханічних і енергетичних показників електроприводу в умовах розімкненої системи керування. Виявлено, що характеристики електроприводу демонструють меншу жорсткість у порівнянні з природними характеристиками приводного двигуна.

Зниження частоти напруги живлення призводить до того, що жорсткість механічних характеристик залишається на прийнятному рівні, проте суттєво знижується коефіцієнт корисної дії електроприводу. Це свідчить про те, що зменшення частоти може негативно вплинути на ефективність роботи електроприводу, незважаючи на збереження певних механічних характеристик.

### 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Рівняння в трифазній системі координат є досить складними та важко піддаються аналізу. Для спрощення системи диференціальних рівнянь асинхронного двигуна (АД) доцільно застосувати метод лінійної заміни змінних, як це розглянуто в [12].

Координатна система, що залишається нерухомою відносно статора АД, позначається як « $\alpha, \beta, 0$ », де кутова швидкість ортогональної системи координат дорівнює  $\omega_k = 0$ . Ця система координат є корисною при моделюванні АД в симетричних режимах роботи. Вісь  $\alpha$  співпадає з віссю «А», що дозволяє спростити аналіз.

У такій системі всі перетворені змінні на осі  $\alpha$  відповідають реальним фазним змінним. Рівняння АД в ортогональній системі координат можуть бути представлені як відносно струмів, так і відносно потокозчеплень. Проте найчастіше система диференціальних рівнянь АД у системі « $\alpha, \beta, 0$ » формується саме відносно потокозчеплень. Ця система має специфічний вигляд, що дозволяє ефективно аналізувати динаміку роботи асинхронного двигуна.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{\alpha s}}{dt} = U_{\alpha s} - AR_s(\psi_{\alpha s}L'_r - \psi_{\alpha r}L_\mu); \\ \frac{d\psi_{\beta s}}{dt} = -U_{\beta s} - AR_s(\psi_{\beta s}L'_r - \psi_{\beta r}L_\mu); \\ \frac{d\psi_{\alpha r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\alpha r}L_s - \psi_{\alpha s}L_\mu) + \psi_{\beta r}\omega; \\ \frac{d\psi_{\beta r}}{dt} = -AR'_r(\psi_{\beta r}L_s - \psi_{\beta s}L_\mu) + \psi_{\alpha r}\omega; \\ M = \frac{3}{2}pL_\mu A(\psi_{\alpha s}\psi_{\beta r} - \psi_{\beta s}\psi_{\alpha r}); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}pM - M_c. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де  $A = \frac{I}{L_s L_r - L_\mu^2}$ ,  $R_s$ ,  $R_r$  - активний опір фази відповідно статора і ротора;

$L_s$ ,  $L_r$  - повна індуктивність обмоток відповідно статора і ротора;  $L_\mu$  - взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Значення струмів зв'язані з потокозчепленнями такими рівняннями:

$$i_{\alpha s} = A(L_s \Psi_{\alpha s} - L_\mu \Psi_{\alpha r}); \quad (3.2)$$

$$i_{\beta s} = A(L_r \Psi_{\beta s} - L_\mu \Psi_{\beta r}); \quad (3.3)$$

$$i_{\alpha r} = A(L_s \Psi_{\alpha r} - L_\mu \Psi_{\alpha s}); \quad (3.4)$$

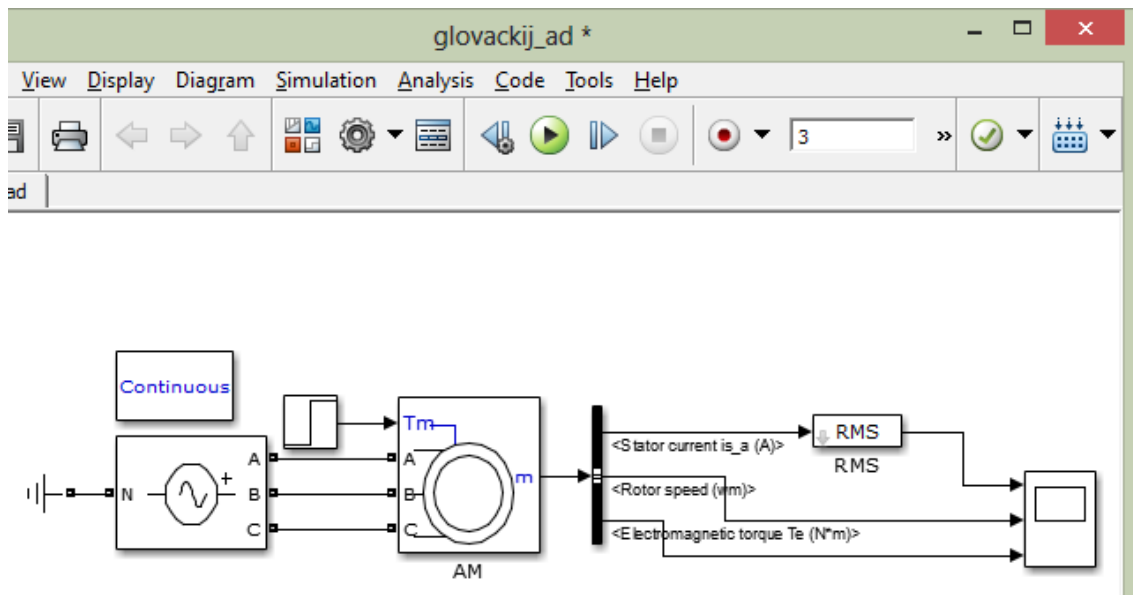
$$i_{\beta r} = A(L_r \Psi_{\beta r} - L_\mu \Psi_{\beta s}); \quad (3.5)$$

Перетворені напруги

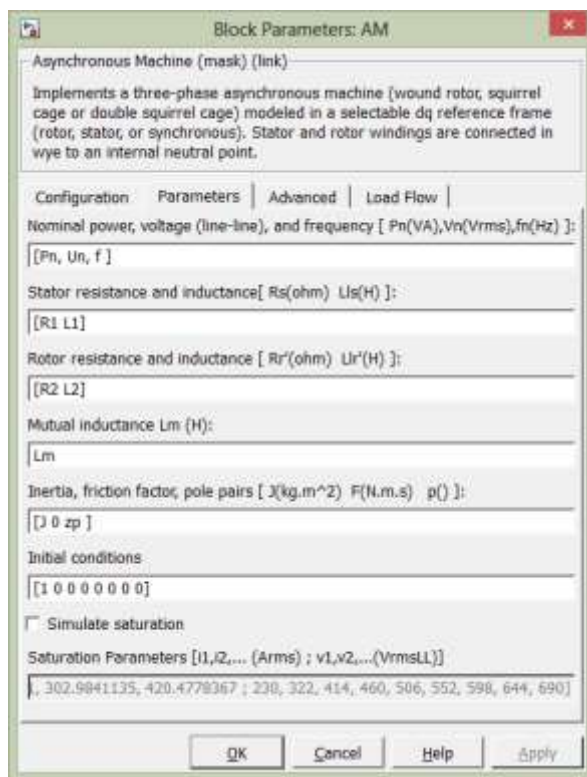
$$\begin{cases} U_\alpha = U_A = U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0); \\ U_\beta = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0). \end{cases} \quad (3.6)$$

Рівняння АД у системі ортогональних координат « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0» використовуються для створення віртуальної моделі АД у бібліотеці SimPower програми Simulink.

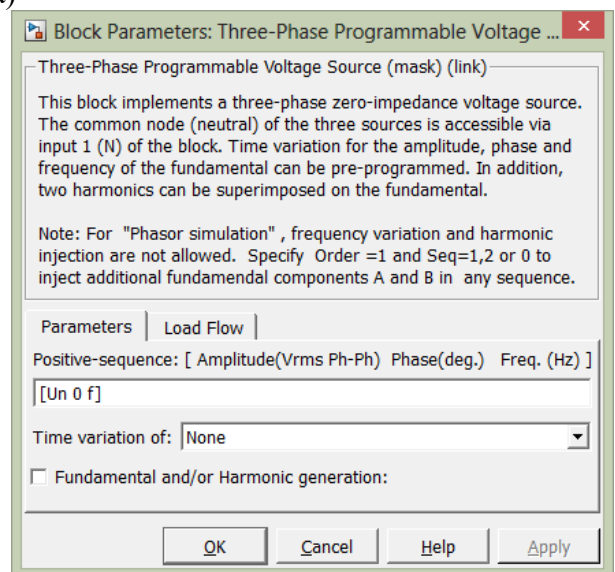
Віртуальна модель АД з використанням елементів бібліотеки SimPower наведена на рис. 3.1, а.



a)



б)



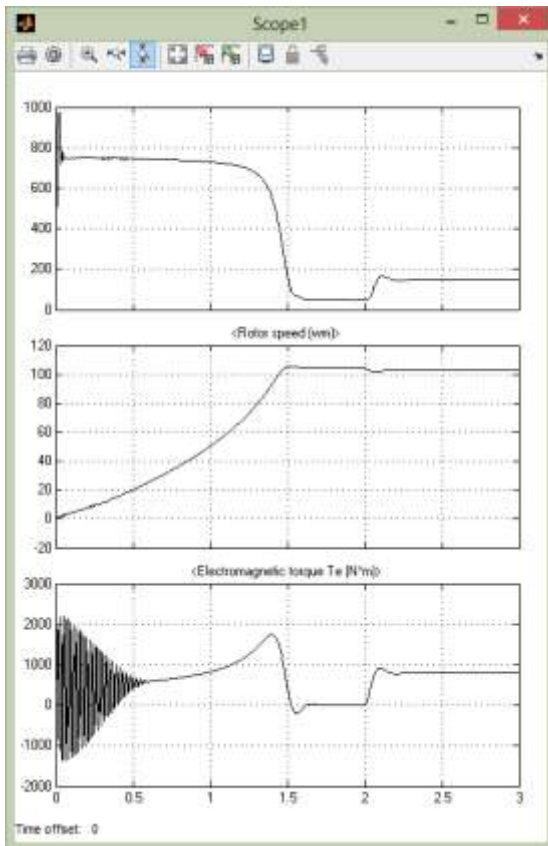
в)

Рисунок 3.1 Віртуальна модель АД з використанням елементів бібліотеки SimPower

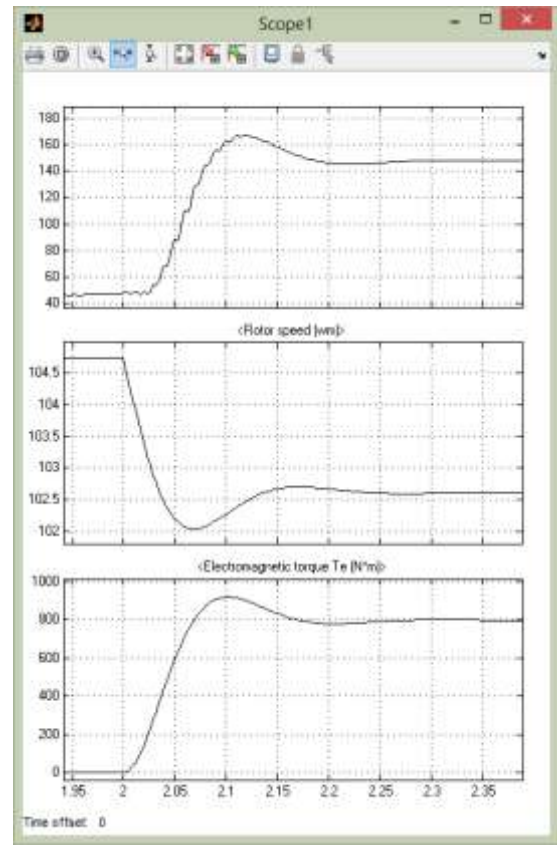
На рис.3.1.б, в зображено діалогові вікна налаштування параметрів асинхронного двигуна та трифазного джерела живлення відповідно.

Для розрахунку динамічних режимів використовувався метод Дорманда-Прінса з максимальним кроком інтегрування  $h = 0.001$  с.

Отримані графіки електромеханічних процесів у моделі з визначеними у п.2.1. параметрами наведено на рис. 3.2. Показано діаграми для струмів статора та ротора, а також швидкість та електромагнітний момент АД при запуску вхолосту. При  $t = 2,5$  с момент навантаження АД зростає до номінального  $M_{ст} = 220$  Нм. На рис.3.2.б наведено діаграми процесів АД при зростанні навантаження у збільшеному масштабі часу.



а) запуск



б) збільшення навантаження.

Рисунок 3.2 Часові діаграми запуску АД та реакції на збільшення навантаження.

Як видно з рис.3.2.б, значення струмів та кутової швидкості при номінальному навантаженні задовільно співпадають з паспортними даними асинхронного двигуна, табл. 3.1.

При створенні віртуальної моделі електромеханічної системи слід ураховувати ті важливі особливості, що привносяться системою керування швидкістю електропривода та технологічним механізмом.

### *Особливості побудови перетворювачів частоти для ПЧ-АД*

Почнемо розглядати ШІМ з однократною модуляції, коли на напівперіоді вихідної напруги розташовується тільки один імпульс (рис. 3.3). Функція  $u(\omega t)$  на цьому рисунку представлена у вигляді парної  $u(\omega t) = u(-\omega t)$ , крім того, існує симетрія даної функції щодо осі  $\omega t$ . Отже, в спектрі напруги повинні бути відсутні парні гармоніки, а коефіцієнти ряду Фур'є, що визначають амплітуди і фази гармонік, знаходяться із співвідношення [3]:

$$U_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(\omega t) \cos n\omega t d\omega t, \quad (3.7)$$

де  $n = 1, 3, 5, \dots$  – номер гармоніки;  $\omega = 2\pi/T$  – частота основної (першої) гармоніки.

З (3.7) для імпульсної напруги отримаємо:

$$U_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi D/2} u(\omega t) \cos n\omega t d\omega t = \frac{4U}{\pi n} \sin n \frac{\pi D}{2}. \quad (3.8)$$

Функція  $u(\omega t)$ , показана на рис.3.3, замінюється тригонометричною сумою:

$$u(\omega t) = U_1 \cos \omega t + U_3 \cos 3\omega t + \dots + U_n \cos n\omega t,$$

де коефіцієнти  $U_1, U_3, \dots, U_n$ , мають позитивний або негативний знак, визначаються відповідно до (3.8).

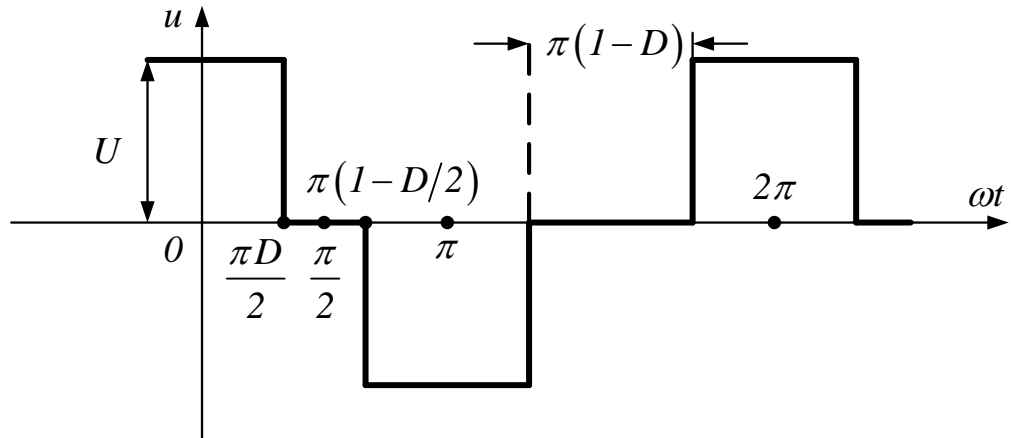


Рисунок 3.3 ШІМ з однократною модуляцією.

Для виключення третьої гармоніки тривалість половини імпульсу в кутових одиницях згідно (29) повинна дорівнювати:

$$\frac{\pi D}{2} = \pi/3.$$

П'ята гармоніка буде відсутня, якщо має місце рівність:

$$\frac{\pi D}{2} = \pi/5.$$

Очевидно, що одночасне виключення третьої і п'ятої гармонік у кривій на рисунку 3.3 неможливе при будь-яких кутах. Для графічного показу того, як відбувається виключення певної гармоніки зі спектру імпульсної напруги, важливо звернути увагу на загальний вираз (3.8) для імпульсної напруги, яка має парність функції і симетрію щодо осі. Інтеграл у (3.9) відображає сумарну площу за чверть періоду тих ділянок кривої n-ої гармоніки, які відповідають ненульовим значенням імпульсної напруги.

Наприклад, функція при імпульсній напрузі (рис. 3.3) та певному значенні обертається в нуль. При цьому значенні всі гармоніки, кратні трьом, також дорівнюють нулю. Це підтверджується на рисунку 3.4, де видно, що позитивна і негативна площі косинусної функції на інтервалі, де не дорівнює нулю, є рівними. Якщо на рисунку 9 показати п'яту гармоніку, а  $n$  визначити з (3.9), можна побачити, що сума позитивних і негативних площ на інтервалі не дорівнює нулю.

Розглянемо складніші види однополярної напруги за напівперіод, коли імпульс, показаний на рисунку 3.3, ділиться на два або більше імпульсів на напівперіоді, тобто коли широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) стає багатократною.

На рисунку показана напруга, в якій початковий імпульс на напівперіоді ділиться на два з нульовим проміжком (паузою) між ними. Для визначення  $n$ -го коефіцієнта ряду Фур'є, де коефіцієнти при парних номерах гармонік дорівнюють нулю, використовуємо формулу (28) для розрахунків. Це дозволить більш детально проаналізувати спектр напруги та вплив різних гармонік на загальну форму імпульсної напруги.:

$$\begin{aligned}
 U_n &= \frac{4}{\pi} \int_{\alpha - \frac{\pi D}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D}{2}} U \cos n\omega t = \frac{4U}{\pi n} \sin n\omega t \Bigg|_{\alpha - \frac{\pi D}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D}{2}} = \\
 &= \frac{8U}{\pi n} \sin \left( n \frac{\pi D}{2} \right) \cos n\alpha.
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

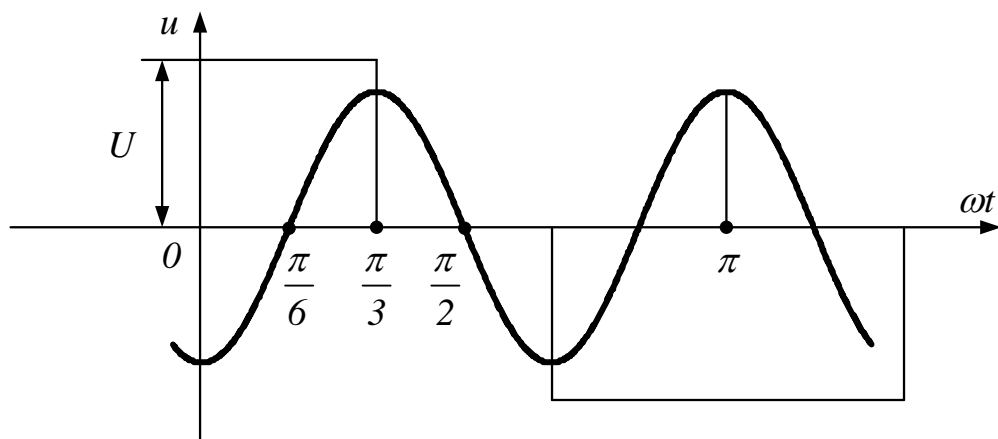


Рисунок 3.4 Рівність позитивної і негативної площі функції  $-\cos(\omega t)$  на інтервалі  $0 \dots \pi/3$  показує, що третя гармоніка виключається з ряду Фур'є.

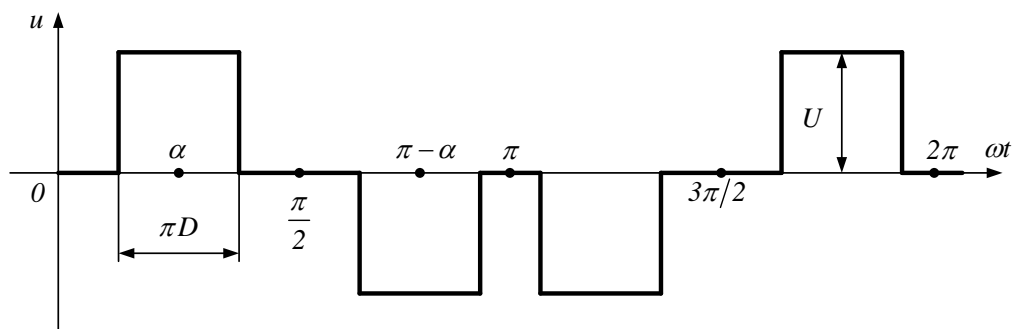


Рисунок 3.5 Напряга з одним нульовим проміжком між імпульсами.

Як показує останнє співвідношення, вибираючи кут  $\alpha = \pi/6$ , можна усунути третю гармоніку при будь-якому значенні  $\pi D$  від 0 до  $\pi/3$ ; при  $\alpha = \pi/10$  буде відсутня п'ята гармоніка, значення  $\pi D$  може при цьому змінюватися від 0 до  $\pi/5$ . Одночасно не можуть бути усунені обидві низькі гармоніки – третя і п'ята.

Нехай тепер на напівперіоді розташовуються три імпульси з двома нульовими інтервалами напруги між ними (рис.3.6). Для даної тут імпульсної напруги характерно, що вона може бути виражена у вигляді парної функції, причому тривалість середнього імпульсу може бути відмінною від тривалості

двох крайніх. Кут  $\alpha$  на рис.3.5 відповідає середині останнього імпульсу на чверті періоду, тривалості середнього і крайніх імпульсів рівні відповідно  $\pi D_1$  і  $\pi D_2$  (в кутових одиницях).

Коефіцієнти ряду Фур'є ( $n = 1, 3, 5, \dots$ ) визначаються завідомими формулами:

$$U_n = \frac{4}{\pi} U \left( \int_0^{\pi D_1/2} \cos n\omega t + \int_{\alpha - \frac{\pi D_2}{2}}^{\alpha + \frac{\pi D_2}{2}} \cos n\omega t \right) = \quad (3.10)$$

$$= \frac{4U}{\pi n} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi D_1}{2}\right) + \sin\left[n\left(\alpha + \frac{\pi D_2}{2}\right)\right] - \sin\left[n\left(\alpha - \frac{\pi D_2}{2}\right)\right] \right\}.$$

Нехай кут, при якому закінчується останній імпульс в першій чверті періоду, тобто  $\alpha + \frac{\pi D_2}{2}$ , рівний  $\pi/3$ . Використаємо (3.10) та визначимо при даній умові, чи можливе одночасне усунення третьої та п'ятої гармонік в спектрі. З (2.33) отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \sin(3\pi D_1/2) - \sin[3(\alpha - \pi D_2/2)] = 0; \\ \sin(5\pi D_1/2) - \sin[5(\alpha - \pi D_2/2)] = \sqrt{3}/2. \end{cases}$$

Вирішуючи останню систему рівнянь чисельним методом, надамо значення тривалості імпульсу  $\pi D_1$  і різниці  $\alpha - \pi D_2/2$ :

$$\begin{aligned} \pi D_1 &= \frac{4}{15} \pi; \\ \alpha - \pi D_2/2 &= \frac{3}{15} \pi. \end{aligned} \quad (3.11)$$

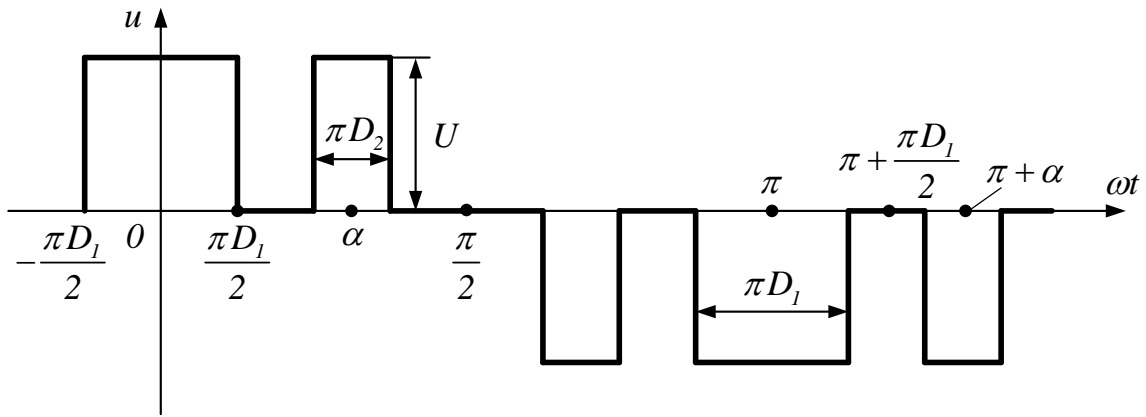


Рисунок 3.6 Напряга з двома нульовими проміжками між імпульсами.

Оскільки сума кутів  $\alpha + \pi D_2/2$  дорівнює  $\pi/3$ , отримаємо:

$$\alpha = \frac{4}{15} \pi; \pi D_2 = \frac{2}{15} \pi. \quad (3.12)$$

Таким чином, значення кутів (2.34), (2.35) дозволяє виключити із спектру дві низькі гармоніки – третю і п'яту. При цих же значеннях кутів із спектру усуваються всі гармоніки кратні трьом, але залишається частина гармонік кратних п'яти.

Розглянемо аналіз ще одного виду однорівневої імпульсної напруги, в якому на напівперіоді розташовуються чотири імпульси з трьома нульовими інтервалами між ними (рис.3.7). Тривалість кожного імпульсу в кутових одиницях  $\pi D$ , середини імпульсів, відлічувані від початку координат, відповідають кутам  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ .

Коефіцієнти, що визначають амплітуди непарних гармонік (амплітуди парних гармонік дорівнюють нулю), визначаються з (2.30):

$$U_n = \frac{4}{\pi} U \left( \int_{\alpha_1 - \pi D/2}^{\alpha_1 + \pi D/2} \cos n\omega t d\omega t + \int_{\alpha_2 - \pi D/2}^{\alpha_2 + \pi D/2} \cos n\omega t d\omega t \right) =$$

$$= \frac{8}{\pi n} U \sin \left( n \frac{\pi D}{2} \right) \cdot \cos [\cos n\alpha_1 + \cos n\alpha_2].$$

Складемо систему рівнянь, яка визначає відсутність всіх гармоніки кратних трьом і п'яти одночасно:

$$\begin{cases} \cos k3\alpha_1 + \cos k3\alpha_2 = 0; \\ \cos k5\alpha_1 + \cos k5\alpha_2 = 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

де  $k$  – номер кратності гармоніки (1,3,5...). Для вирішення системи (3.13) приведемо її до вигляду:

$$\begin{cases} \cos \left( k3 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) + \cos \left( k3 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) = 0; \\ \cos \left( k5 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right) + \cos \left( k5 \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2} \right) = 0. \end{cases}$$

Остання система дозволяє отримати аналітичне рішення:

$$\alpha_1 = \frac{1}{15} \pi; \quad \alpha_2 = \frac{4}{15} \pi.$$

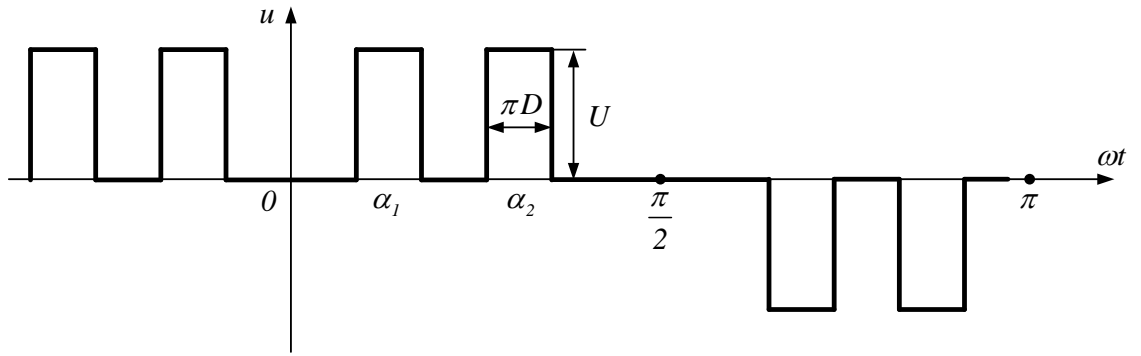


Рисунок 3.7 Напряга з трьома нульовими проміжками між імпульсами.

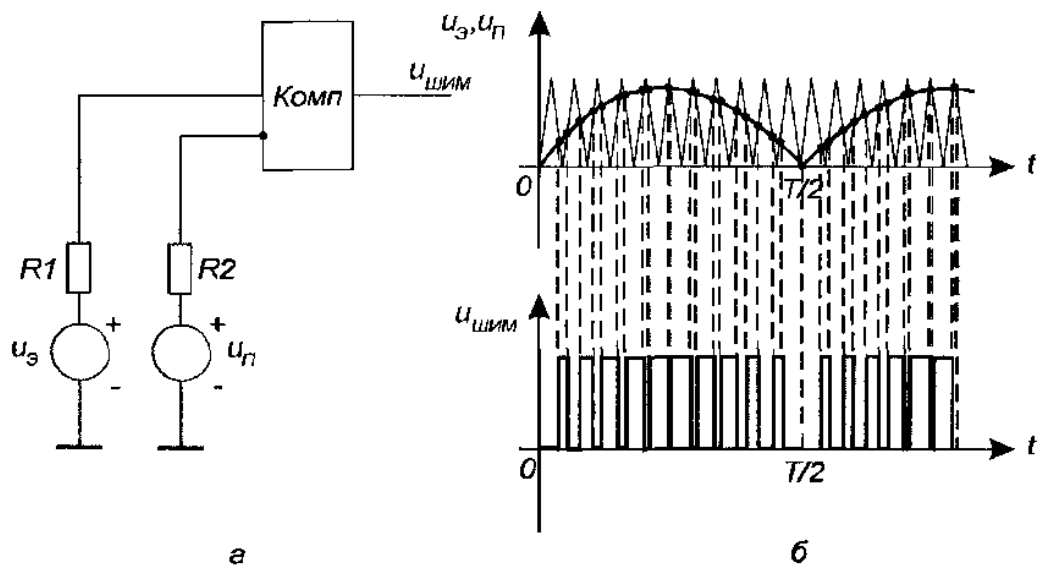


Рисунок 3.8 Отримання послідовності імпульсів, модульованої по синусоїдальному закону: а) схема включення компаратора з аналоговим синусоїдальним і пилкоподібним високочастотним сигналами на його входах; б) діаграми напруг на входах компаратора і його виході

В даному прикладі всі гармоніки кратні трьом і п'яти будуть виключені із спектру при кутах  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  знайдених вище. Більш того, всі названі гармоніки виключаються при модуляції коефіцієнта заповнення  $D$ .

Розроблена віртуальна модель електроприводу підйому з частотно-регульованим асинхронним електроприводом, представлена на рисунку 3.13, демонструє важливі аспекти управління підйомними механізмами. У цій структурній схемі реалізовано активний момент опору, характерний для підйомних машин, які не обладнані противагою, що дозволяє моделі адекватно відтворювати умови роботи таких систем.

Крім того, у моделі здійснено взаємопов'язане регулювання частоти живлення та напруги асинхронного двигуна (АД) за законом Костенко. Це регулювання враховує механічну характеристику типу сухого тертя, що є критично важливим для стабільної та ефективної роботи електроприводу. Завдяки такій інтеграції, модель забезпечує точне відтворення динамічних характеристик системи, що сприяє оптимізації роботи підйомного механізму та підвищенню його енергоефективності. Це може бути корисним для подальшого аналізу динаміки системи та розробки ефективних управлінських стратегій.

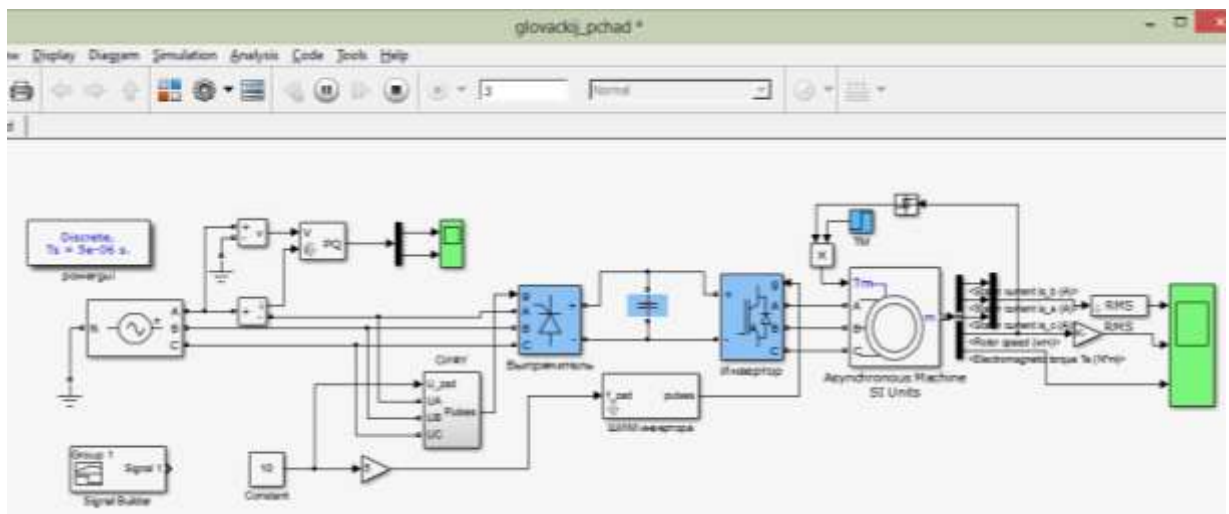
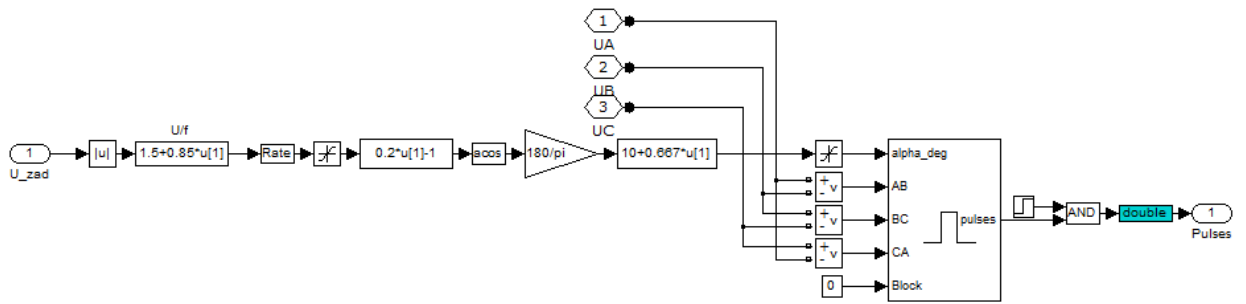
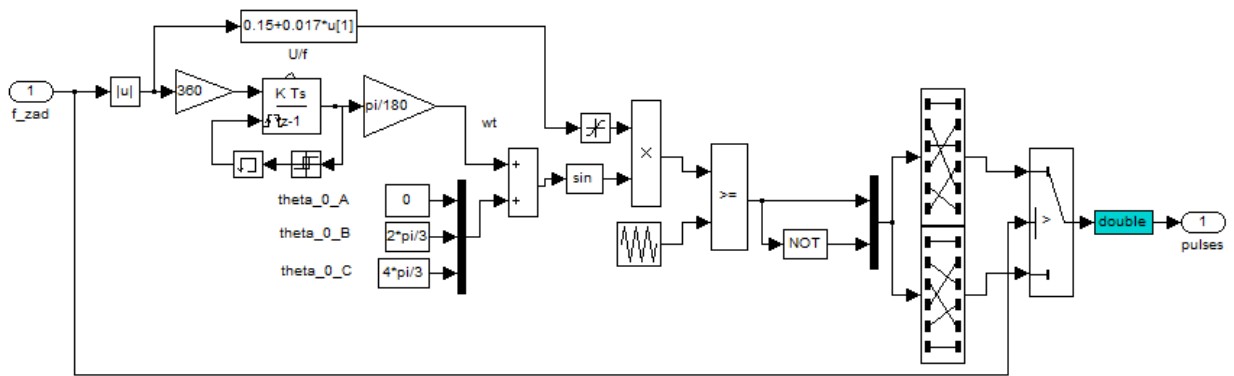


Рисунок 3.13 Структурна схема ПЧ-АД у програмі Simulink.

Наведемо структурні схеми блоків керування випрямлячем та інвертором перетворювача частоти, рис.3.14.



а) схема керування випрямлячем



б) схема керування інвертором

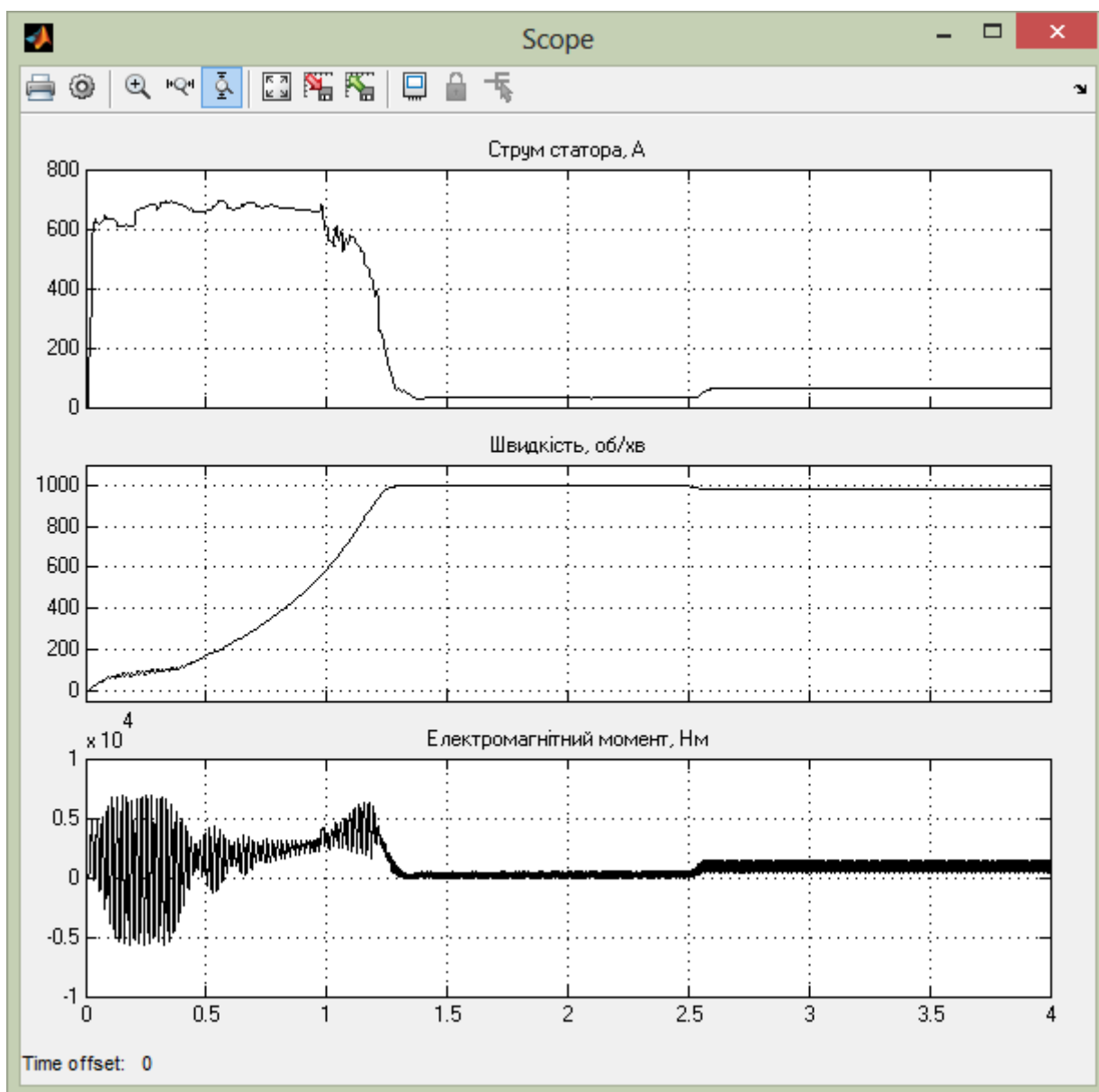
Рисунок 3.14 Структурні схеми пристроїв керування вузлами перетворювача частоти.

Для керування випрямлячем у цій моделі використовується стандартний блок генерації шестифазної системи керуючих імпульсів, Synchronized 6-Pulse Generator. Цей блок було доопрацьовано ланцюгом для перетворення керуючої напруги 0-10 В у кут керування від 0 до 90 градусів, що дозволяє більш точно регулювати вихідні параметри системи.

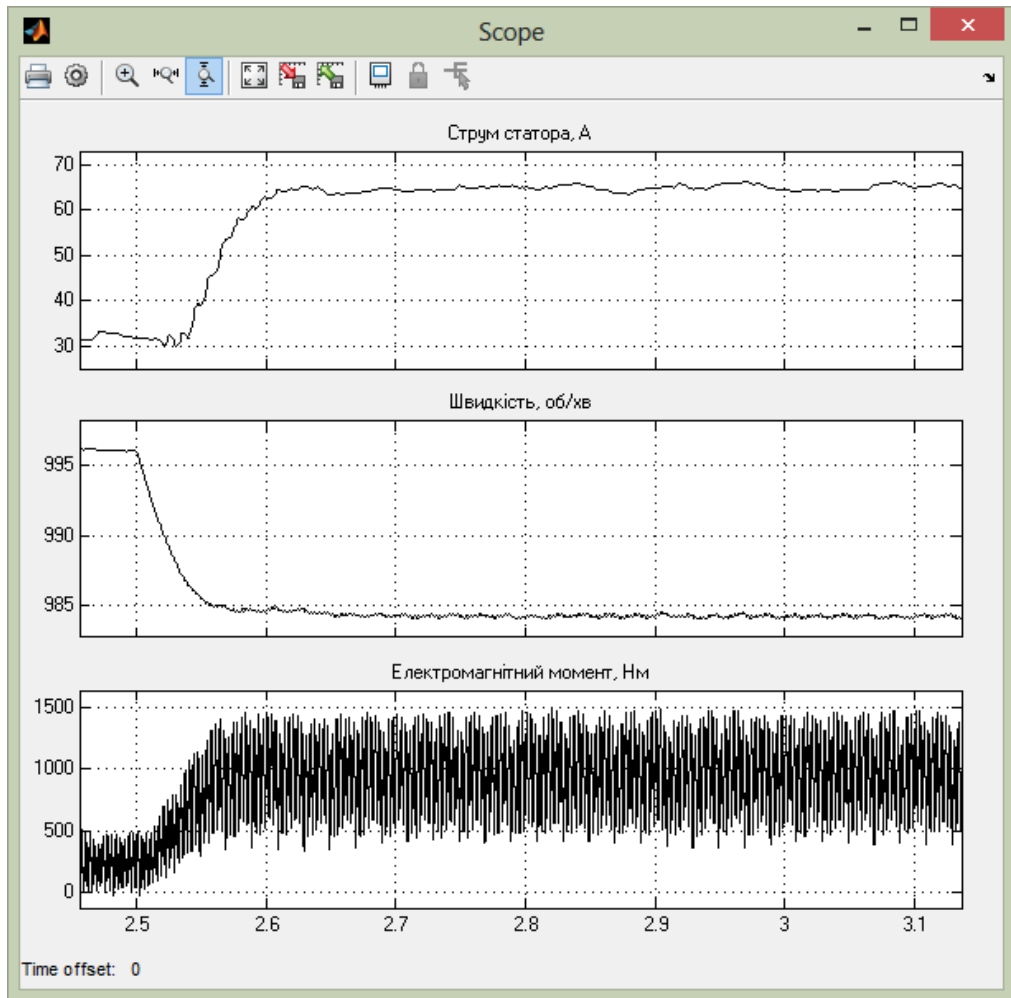
Для управління інвертором застосовано інший стандартний блок – PWM generator for 6-pulse IGBT/MOSFET inverter, який працює з несучою частотою 4000 Гц. Це забезпечує необхідну швидкість та точність модуляції ширини імпульсів, що є критично важливим для стабільної роботи інвертора.

При розрахунку динамічних режимів було використано метод змінних станів без безперервних станів з фіксованим кроком інтегрування  $h = 5 \cdot 10^{-5}$  с. Це дозволяє отримати точні результати при моделюванні динаміки системи.

Отримані графіки електромеханічних процесів у цій моделі наведені на рисунку 3.15. На діаграмах представлені струми статора та ротора, а також швидкість і електромагнітний момент під час запуску електродвигуна вхолосту. При  $t = 2,5$  с момент навантаження підйомно-канального асинхронного двигуна (ПЧ-АД) зростає до номінального значення  $M_{ст} = 250$  Нм. На рисунку 3.15.б показано діаграми процесів ПЧ-АД при зростанні навантаження у збільшеному масштабі часу, що дозволяє детальніше проаналізувати динамічні характеристики системи під навантаженням.



a)



б)

Рисунок 3.15 Часові діаграми запуску ПЧ-АД та збільшення навантаження на валу.

Важливою проблемою, яка стоїть перед підвищенням експлуатаційної надійності кранових механізмів, є зменшення динамічних ударів та поштовхів під час запуску електроприводу. Це питання можна вирішити шляхом реалізації плавного запуску механізму візка за допомогою регульованого електроприводу.

Для цього використовують перетворювач частоти, який формує лінійно зростаючу напругу на затискачах статора, переходячи від нульового значення до номінального. Це дозволяє контролювати процес запуску, зменшуючи динамічні навантаження на систему.

У математичній моделі плавного запуску лінійно зростаючий сигнал створюється за допомогою блоку Signal Builder, як показано на рисунку 3.16. Використання такого підходу забезпечує контрольоване підвищення моменту, що, в свою чергу, знижує ризик динамічних ударів і покращує загальну стабільність роботи механізму. Це є важливим кроком до підвищення надійності та безпеки експлуатації кранових механізмів.

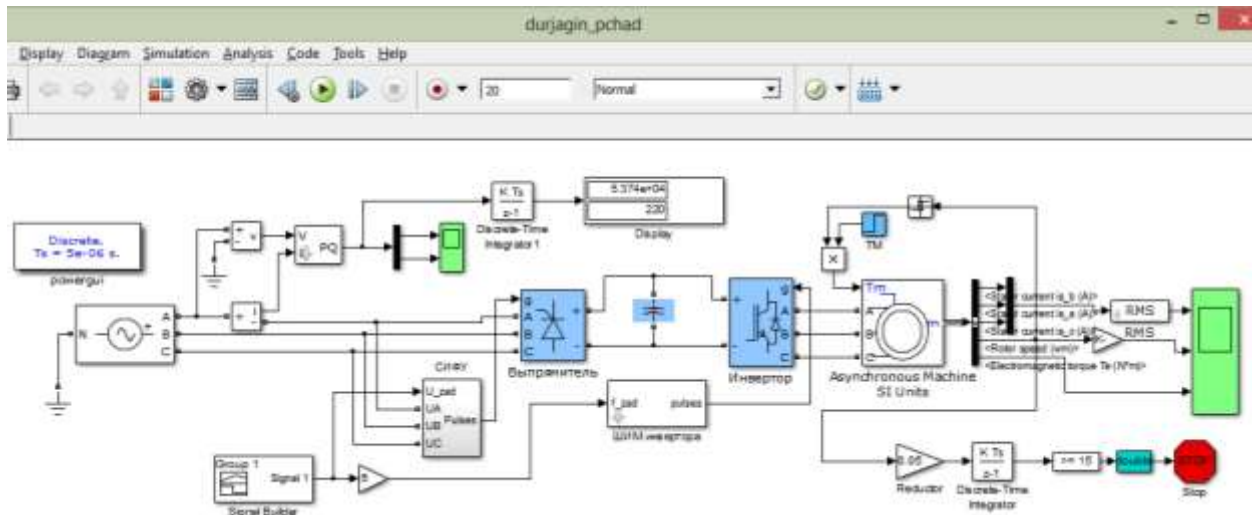


Рисунок 3.16 Математична модель механізму підйому з плавним запуском електроприводу.

На рисунку 3.17 зображені часові діаграми плавного запуску механізму.

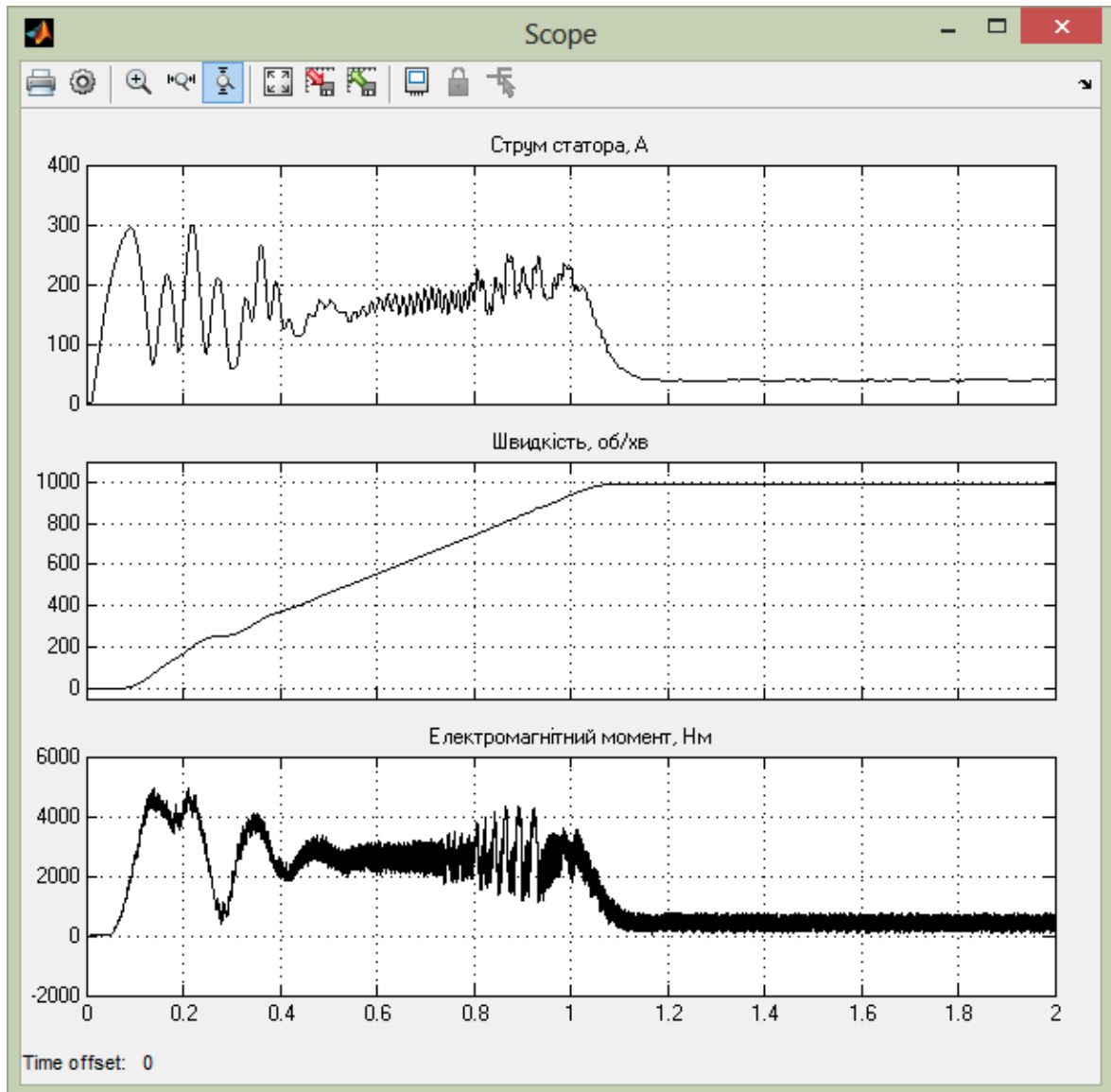


Рисунок 3.17 Часові діаграми плавного запуску електроприводу підйому при  $U_{z0} = 0$  В

З отриманих графіків видно, що візок починає рухатися з певним запізненням відносно моменту включення, оскільки при низьких значеннях напруги електромагнітний момент приводного двигуна виявляється недостатнім для ініціювання руху. Таким чином, рух починається лише тоді, коли напруга зростає до необхідного порогового значення, що забезпечує достатній момент для запуску механізму.

На рисунку 3.18 наведено часові діаграми плавного запуску механізму підйому, а також споживання активної потужності з живлячої мережі. У цьому випадку початкове значення керуючої напруги перетворювача частоти становить 6 В, що є значно вищим, ніж значення 0 В, представлено на рисунку 3.17. Це підвищене значення напруги дозволяє зменшити час запізнення перед початком руху, що позитивно впливає на динамічні характеристики системи та знижує ризик динамічних ударів при запуску.

Таким чином, коригування початкового значення керуючої напруги є важливим аспектом для оптимізації роботи кранових механізмів і підвищення їх експлуатаційної надійності.

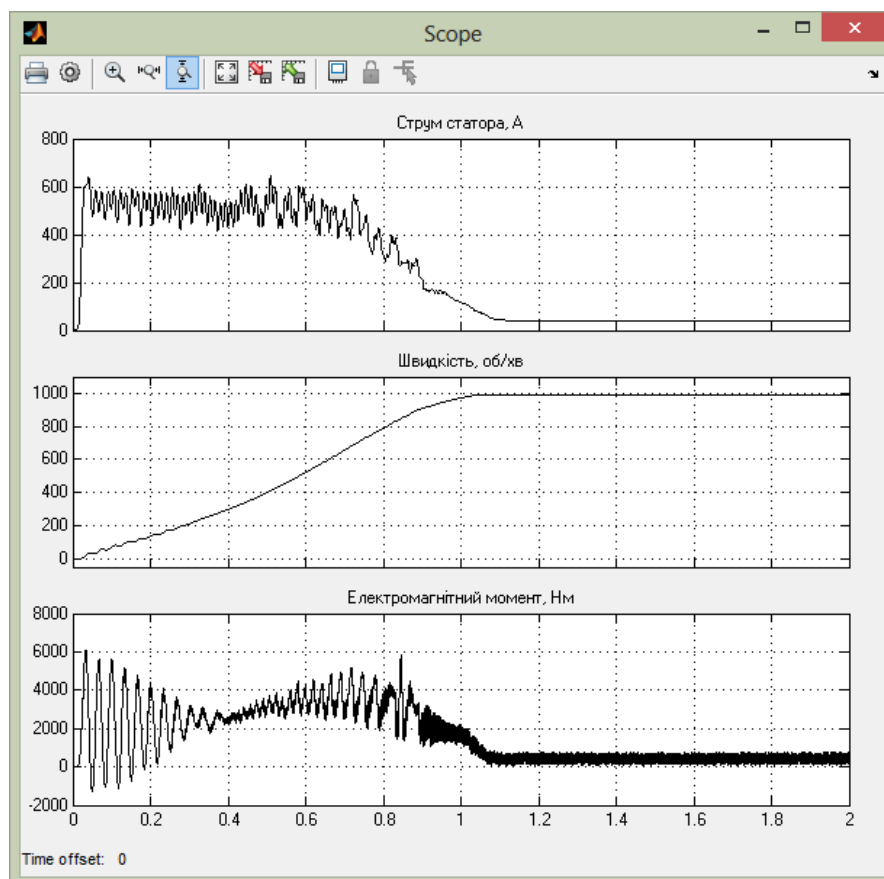


Рисунок 3.18 Часові діаграми плавного запуску а) та енергоспоживання б) електроприводу підйому при  $U_{z0} = 6$  В

З наведених діаграм видно, що за рахунок збільшення початкового значення керуючої напруги вдалося зменшити час запуску з 1.2 с до 1 с, а також зменшити енергоспоживання електроприводу підйому на 1,5 %.

## **Висновки**

У третьому розділі розглядаються теоретичні основи математичного моделювання асинхронного двигуна в ортогональній системі координат « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0», яка залишається незмінною відносно статора ( $\omega_k = 0$ ). Для реалізації досліджень була використана програма Matlab/Simulink, в рамках якої створено віртуальну модель асинхронного двигуна. Це дозволило дослідити типові електромеханічні процеси, що відбуваються під час запуску двигуна та при збільшенні навантаження.

Крім того, розроблено віртуальну модель частотно-керованого асинхронного електропривода з дворівневим автономним інвертором напруги. У процесі дослідження були вивчені експлуатаційні режими електроприводу підйому, включаючи прямий та плавний запуск з лінійно зростаючою керуючою напругою.

Для покращення експлуатаційних та енергетичних характеристик системи було виявлено, що необхідно задавати ненульове значення початкової керуючої напруги перетворювача частоти. Це дозволяє зменшити час запізнення перед початком руху та забезпечити більш плавний запуск, що позитивно впливає на надійність та ефективність роботи електропривода.

## 4. КОНСТРУКТОРСЬКА РОЗРОБКА

Найпоширенішим типом перетворювачів частоти є двоступінчасте перетворювальне обладнання, яке складається з випрямляча трифазної змінної напруги мережі та автономного інвертора напруги (АІН). АІН перетворює випрямлену напругу в змінну трифазну з регульованою частотою та амплітудою. Незважаючи на те, що цей процес передбачає подвійне перетворення енергії, що може призводити до деякого зниження коефіцієнта корисної дії (ККД), такі перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму здобули широке застосування в різних типах електроустановок.

Важливо зазначити, що на відміну від асинхронних перетворювачів постійного струму, які містять індуктивність на вході, в АІН обов'язковим елементом є паралельно підключена ємність. Це дозволяє формувати криві напруги навантаження за рахунок підключення напівпровідникових ключів до вихідних затисків АІН. Використання некерованого випрямляча забезпечує високий коефіцієнт потужності на вході, а регулювання вихідної напруги може здійснюватися методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Спрощена функціональна схема частотно-керованого асинхронного електроприводу представлена на рисунку 4.1. Ця схема ілюструє основні елементи системи та їх взаємозв'язки, що забезпечують ефективне управління електроприводом.

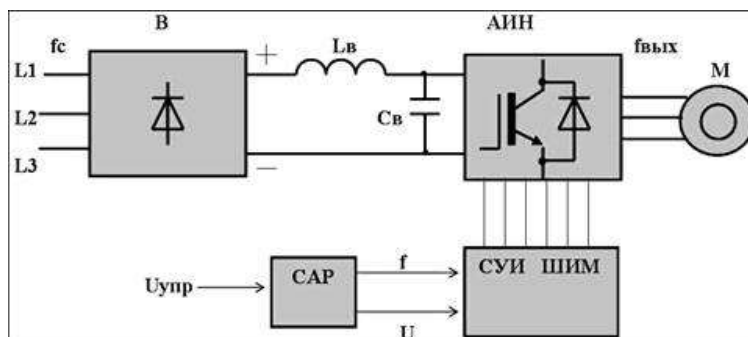


Рисунок 4.1 Структурна схема перетворювача частоти.

Регулювання вихідної частоти ( $f$ ) і напруги ( $U$ ) в автономному інверторі напруги (АІН) здійснюється за допомогою високочастотного широтно-імпульсного (ШІМ) керування. ШІМ характеризується періодом модуляції, протягом якого обмотка статора електродвигуна підключається по черзі до позитивного та негативного полюсів випрямляча. Тривалість цих станів усередині періоду ШІМ модулюється за синусоїдальним законом.

При високих частотах ШІМ, зазвичай в межах 2–15 кГц, в обмотках електродвигуна завдяки їх фільтруючим властивостям протікають синусоїдальні струми. Таким чином, форма кривої вихідної напруги представляє собою високочастотну двохполярну послідовність прямокутних імпульсів. Частота імпульсів визначається частотою ШІМ, а тривалість (ширина) імпульсів протягом періоду вихідної частоти АІН модулюється за синусоїдальним законом.

Форма кривої вихідного струму (струму в обмотках асинхронного електродвигуна) є практично синусоїдальною. Регулювання вихідної напруги АІН можна здійснити двома способами: амплітудним регулюванням (АР) шляхом зміни вхідної напруги ( $U$ ) і широтно-імпульсним (ШІМ) шляхом зміни програми перемикання вентилів ( $V_1$ - $V_6$ ).

Другий спосіб отримав широке поширення в сучасних перетворювачах частоти завдяки розвитку сучасної елементної бази, зокрема мікропроцесорів і IGBT-транзисторів. При ШІМ-модуляції форма струмів в обмотках статора асинхронного двигуна буде близькою до синусоїдальної завдяки фільтруючим властивостям самих обмоток.

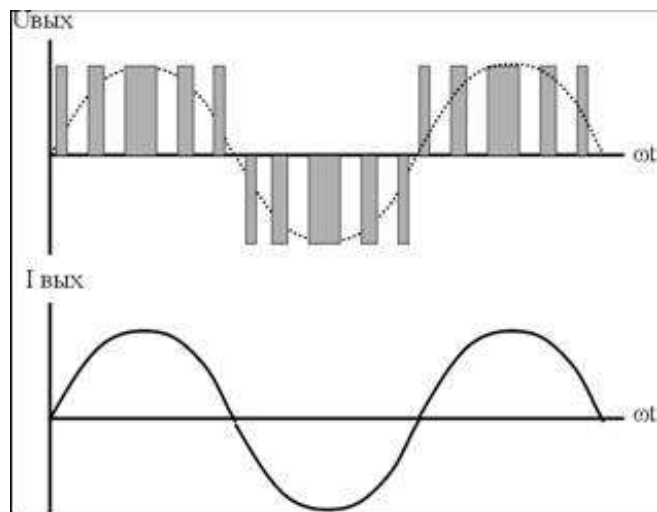


Рисунок 4.2 Форма кривих напруги й струму на виході інвертора з широтно-імпульсною модуляцією.

Таке керування дозволяє досягти високого коефіцієнта корисної дії (ККД) перетворювача, еквівалентного аналоговому керуванню за допомогою частоти й амплітуди напруги. Сучасні інвертори виготовляються на основі повністю керованих силових напівпровідникових пристроїв, таких як GTO-тиристри або біполярні IGBT-транзистори з ізольованим затвором.

На рисунку 4.3 представлена трьохфазна мостова схема автономного інвертора на IGBT-транзисторах. Схема складається з вхідного ємнісного фільтра та шести IGBT-транзисторів, які підключені паралельно до діодів зворотного струму.

Завдяки почерговому перемиканню вентилів за алгоритмом, заданим системою керування, постійна вхідна напруга перетворюється на змінну прямокутно-імпульсну вихідну напругу. Через керовані ключі протікає активна складова струму асинхронного електродвигуна (АД), тоді як через діоди протікає реактивна складова струму АД.

Ця схема дозволяє ефективно керувати вихідними параметрами інвертора, забезпечуючи стабільну роботу електроприводу в різних режимах навантаження.

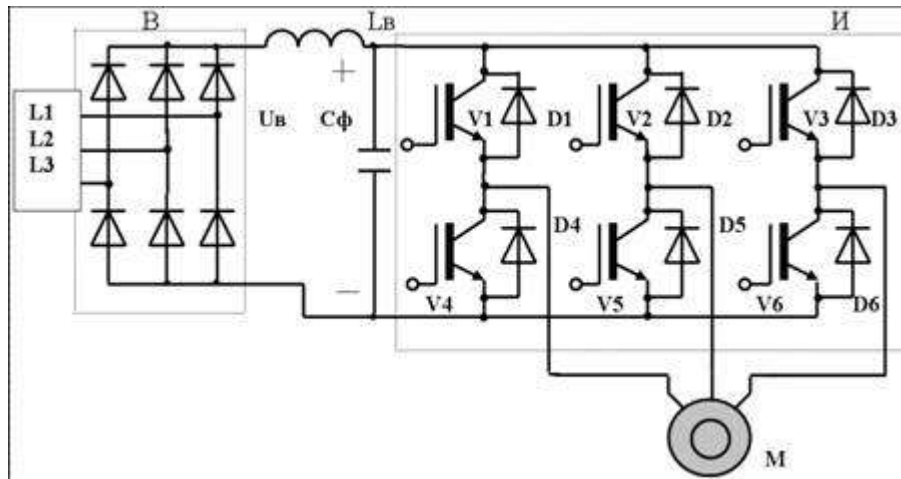


Рисунок 4.3 Спрощена принципова схема перетворювача частоти.

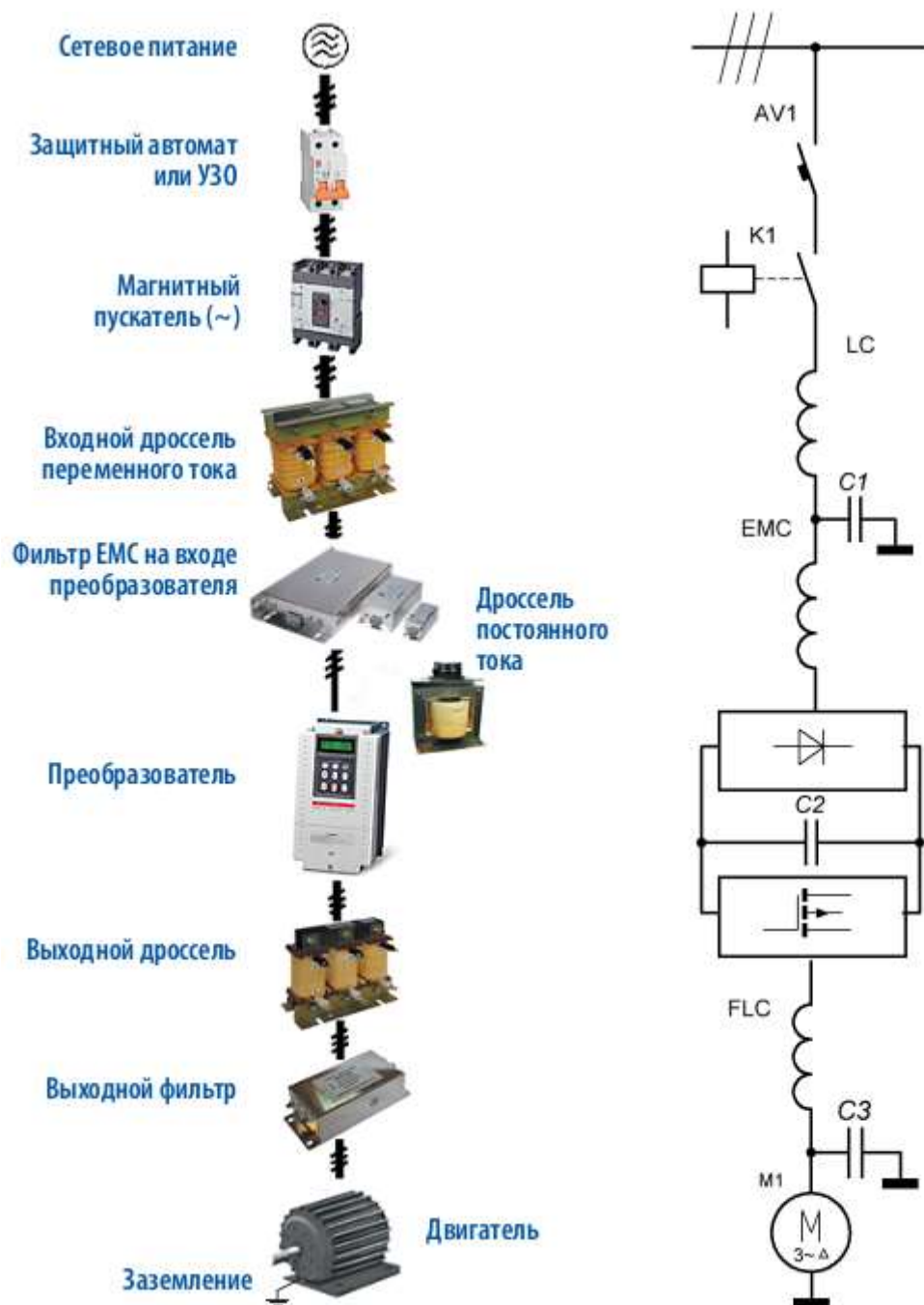
Перетворювачі частоти від LS Industrial Systems є інноваційними та високотехнологічними пристроями, які забезпечують широкий спектр можливостей для регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів. Їхня висока якість і надійність роблять ці пристрої ідеальними для використання в різних сферах, таких як управління насосами, вентиляторами, машинами та механізмами.

Багато моделей обладнані функцією просторово-векторного керування, що дозволяє досягати точності в регулюванні швидкості. Крім того, користувачі можуть програмувати характеристики  $U/f$ , що надає можливість змінювати напругу та частоту як програмно, так і дистанційно. Це забезпечує гнучкість в налаштуванні системи відповідно до конкретних вимог.

Інвертори також пропонують можливість програмування входів і виходів, що сприяє адаптації до різних умов експлуатації. Вони підтримують зміну частоти модуляції до 15 кГц, а також дозволяють задавати до восьми швидкостей, що робить їх універсальними для багатьох застосувань. На малих швидкостях ці пристрої здатні забезпечити збільшення моменту обертання до 1,5 разів. Усі моделі оснащені вбудованими регуляторами, які підвищують їхню ефективність.

Сумісність з різноманітними зовнішніми пристроями, такими як енкодери та інтерфейси, дозволяє легко інтегрувати ці перетворювачі в існуючі системи. Вони використовують високоякісні модулі IGBT від японських виробників, що забезпечує їх надійність. Додатково, функція компенсації ковзання забезпечує стабільну роботу при зміні навантажень, а енергозберігаючі функції допомагають знижувати витрати електроенергії.

Перетворювачі частоти також мають вбудовані захисні механізми, які підвищують їхню надійність. Користувачі можуть зручно керувати налаштуваннями через пульт, який можна при необхідності від'єднати. Загалом, ці пристрої демонструють високу ефективність і надійність у різних промислових застосуваннях.



а) функціональна схема

б) укрупнена принципова схема

Рисунок 4.4 Функціональна та принципова схема силової частини ПЧ-АД з використанням перетворювача частоти SV185 і S5-4NE

## Структура умовногопозначення:

SV	X	X	X	IS5	X	X	X	380V
Перетворювач частоти LS	Потужність двигуна.			Назва серії	Вхідні параметри			Живляча-напруга
	008 – 0,75 кВт; 750 – 75 кВт				4 – 3 фази, 380-480 В	N – без виносного пульта	O - відкритий тип; E - закритий тип UL1	380 В, 440В 460В, 480 В

Спосіб керування частотою в системах LS Industrial Systems включає кілька методів, серед яких U/f керування, бездавачеве векторне керування та векторне керування з давачем, що забезпечує контроль за моментом і кутовою швидкістю. Налаштування частоти має дискретний характер: цифрове регулювання дозволяє змінювати частоту з точністю до 0,01 Гц для значень нижче 100 Гц і до 0,1 Гц для значень вище 100 Гц. Аналогове регулювання забезпечує точність до 0,03 Гц, з максимальною частотою 60 Гц.

Тип U/f керування дає можливість вибору між лінійною та квадратичною залежністю, а також дозволяє користувачеві налаштувати довільну U/f залежність. При цьому допускається перенавантаження: 150% протягом однієї хвилини або 200% протягом 0,5 секунд, причому час-струмова залежність є обернено пропорційною часу. Форсування моменту можливе як автоматично, так і вручну, з регулюванням у межах 0-15%.

Керування здійснюється через пульт, оснащений 4-розрядним 7-сегментним дисплеєм. Джерела керуючих сигналів включають пульт, багатофункціональні входи та можливість комунікації з іншими пристроями. Частота може задаватися аналоговим сигналом (0-10 В або 4-20 мА) або цифровим сигналом з пульта.

Функції керування включають обмеження частоти, можливість підключення другого двигуна, компенсацію ковзання, запобігання реверсу та автоматичний перезапуск після відновлення живлення. Також передбачено гальму-

вання двигуна та вбудований ПІД-регулятор. Стартові сигнали дозволяють задавати рух у прямому або зворотному напрямках. Багатоступінчасте керування дозволяє задавати до восьми уставок швидкості.

Користувач має можливість вибору швидкості та часу розгону або гальмування в межах 0-6000 секунд, а також визначати характеристики розгону та гальмування (лінійна, U-подібна, S-подібна). Аварійна зупинка передбачає відключення силового виходу перетворювача, а перезапуск у випадку збоїв можливий за сигналом перезапуску при активованій захисній функції.

Система має ряд умов спрацьовування, таких як перевищення контрольної швидкості, захист від перенавантаження, струмообмеження, перенапруга, зниження напруги, перегрів перетворювача та інші. Сигналізація включає перекидний контакт, а індикація відображає вихідну частоту, струм, напругу, напругу постійного струму та вихідний момент.

Захисні функції системи включають відключення виходу, захист від перенапруги, зниження напруги, перенавантаження, обрив фази, перегрів двигуна та інші несправності. Клас захисту варіюється: IP20 для потужностей від 0,75 до 7,5 кВт та IP100 для 11-75 кВт.

Вхідний дросель виконує захисну функцію від мережевих та зовнішніх перешкод, особливо в умовах різниці міжфазної напруги більше 1,8%. Це особливо важливо для ліній з низьким опором, де номінальні характеристики силових трансформаторів можуть бути в десять разів нижчими, ніж в інверторах. Якщо використовуються коригувальні конденсатори або інші коригувальні пристрої, дросель також виконує свою функцію.

Основні технічні характеристики включають номінальну напругу 3 фази 380 В/50 Гц або 660 В/50 Гц, робочий струм від 3 А до 2000 А при температурі 40 °С, а також опір ізоляції не менше 100 Мом. Акустичний шум дроселя становить менш ніж 65 дБ на відстані одного метра, а клас ізоляції - F. Вироби відповідають міжнародним стандартам, зокрема IEC289:1987 та іншим.



Рисунок 4.5 Зовнішній вигляд дроселя типу ACL-0050-EISH-EMSB

Вхідний дросель виконує кілька важливих функцій у електричних системах. По-перше, він забезпечує корекцію спотворень форми хвилі, які можуть виникати через конденсаторні фільтри. Це сприяє отриманню стабільного та чистого електричного сигналу, що є критично важливим для підтримки якості електричної енергії.

Крім того, дросель захищає випрямний міст і конденсатори від перегріву та можливих ушкоджень, які можуть виникнути внаслідок перевантажень. Це захист допомагає запобігти серйозним поломкам у системі. Також він підвищує коефіцієнт потужності, зменшуючи імпульси змінного струму, що проходять через шини постійного струму, що, в свою чергу, покращує загальну ефективність електричних установок.

Дросель також забезпечує захист від імпульсних перешкод, які можуть негативно вплинути на роботу електронних компонентів. Завдяки цим функціям він не лише покращує якість електричного сигналу, але й підвищує надійність всієї системи.

Щодо технічних характеристик, дросель має номінальну напругу в діапазоні від 500 до 1000 В, а робочий струм коливається від 3 до 1500 А при

температурі 40 °С. Обмотка розрахована на напругу близько 3000 В при частоті 50 Гц. Опір ізоляції становить понад 100 МОм при 1000 В, що свідчить про високу якість використуваних матеріалів.

Акустичний шум дрoселя не перевищує 65 дБ на відстані одного метра, що робить його придатним для застосування в різних умовах. Клас ізоляції F гарантує надійність, а відповідність міжнародним стандартам, таким як ІЕС 289:1987, підтверджує його ефективність і безпеку в електричних системах.



Рисунок 4.6 Зовнішній вигляд дрoселя типу DCL-0040-EIDH-E1M1

Дросель має ряд особливостей, які роблять його ефективним у різних електричних системах. По-перше, його конструкція з композитного матеріалу та безрамкова структура забезпечують високі теплоізолюючі властивості, що сприяє відмінній теплостійкості. Дросель може бути виконаний у класах теплозахисності F і H, що підвищує його надійність в умовах підвищених температур.

При виготовленні дрoселя застосовується дугове зварювання в середовищі аргону, що забезпечує високу якість з'єднань. Завдяки стабільній індуктивності, низькому рівню шуму та мінімальним магнітним витокам, дрoсель демонструє відмінні експлуатаційні характеристики. Якісна обмотка зменшує

електромагнітні наведення, а сердечник, виготовлений з високоякісної сталі, є легким і надійним.

Для двигунів з певною номінальною потужністю рекомендується використовувати дросель типу DCL-0040-EIDH-E1M1, який має такі технічні характеристики: номінальний струм 40 А, індуктивність 1,3 мГн та вага 4,3 кг.

Клас ізоляції F та відповідність міжнародним стандартам, таким як ІЕС 289:1987, підтверджують його ефективність і безпеку в електричних системах.



Рисунок 4.7 Зовнішній вигляд дроселя типу OCL-0040-EIDH-E114

Вхідні й вихідні фільтри ЕМС призначені для підключення до входу або виходу інверторів і іншого обладнання перетворення частоти для зменшення електромагнітних перешкод.

Вхідні фільтри ЕМС встановлюються між електричною мережею й перетворювачем частоти для захисту зовнішнього встаткування від сплесків напруги, для обмеження максимального струму й гармонік, а також зменшення перешкод.



Рисунок 4.8 Зовнішній вигляд фільтру типу NFI-050

Перед підключенням силових кабелів необхідно упевнитися, що кабелі цілковито ізольовані від живлячої мережі. Кабелі повинні бути у відключеному стані мінімум 5 хвилин., а електродвигун повинен бути вимкнтий.

Схема підключення кабелів до силових контактів перетворювача частоти наведена на рис. 4.9.

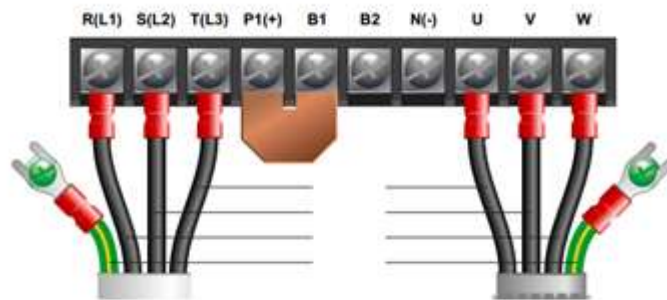


Рисунок 4.9 Схема силових підключень перетворювача частоти.

Порядок підключення фаз двигуна визначатиме напрям обертання двигуна. Порядок підключення фаз мережі не має значення.

Контрольний пристрій перетворювача частоти зберігає ряд параметрів, які можна змінити, адаптувати для його використання в широкому спектрі використань. Параметри, як правило, ідентифікуються за допомогою коду або номера. Наприклад, H21 = Максимальна вихідна частота. Коди усіх параметрів наведено у посібнику з експлуатації.

Деякі параметри задають критично важливу інформацію, необхідну для правильної роботи перетворювача частоти. Таким чином, ці параметри повинні принаймні бути перевірені користувачем, до першого запуску перетворювача частоти.

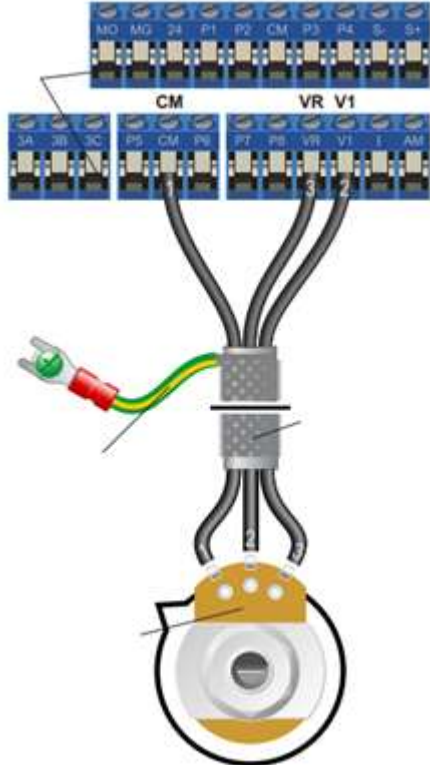
Параметри, перераховані нижче, призначені для забезпечення основної роботи інвертора перетворювача частоти.

Використання зовнішнього потенціометру полегшує керування вихідною частотою інвертора, дозволяє уникнути контакту недостатньо кваліфікованого персоналу безпосередньо з панеллю керування інвертором.

У якості зовнішнього потенціометру необхідно використовувати потенціометр з опором 10 кОм.

Для використання зовнішнього потенціометру необхідно належним чином встановити значення параметру *Frq* :

Параметр	Опис	Налаштування
<i>Frq</i>	Джерело команди Speed	Встановіть 3 для використання зовнішнього потенціометру як джерела завдання вихідної частоти інвертора.

	<p>Потенціометр змінює керуючу напругу від 0 до 10 В.</p> <p>Частота виходу за замовчуванням при 0 В дорівнює 0,5 Гц. Щоб змінити це значення, відредагуйте параметр <b>F25</b>.</p> <p>Частота виходу за замовчуванням при 10 В дорівнює 50 Гц. Щоб змінити це значення, відредагуйте параметр <b>F26</b>.</p> <p>Якщо обертання потенціометра є протилежним тому, який потрібний, переключіть проводи на контактах VR і KM.</p> <p>Використовуйте екранований кабель між потенціометром і інвертором і переконайтеся, що екран кабелю заземлений на зелені клема заземлення інвертора.</p>
--	--

## Висновки

У четвертому розділі роботи проведено детальний аналіз конструкторської розробки регульованого електроприводу, зокрема, вивчено конструкцію та основні складові перетворювача частоти типу SV1100 iP5a-4, виготовленого компанією LG Industrial Systems.

Описані технічні характеристики ключових вузлів силового кола перетворювача, що дозволяє зрозуміти його продуктивність та можливості. Також наведено схеми підключення силових кабелів, що є важливим аспектом для забезпечення коректної роботи системи, а також підключення зовнішнього потенціометру, що дозволяє регулювати параметри роботи електроприводу.

Особливу увагу приділено процесу програмування контролера перетворювача частоти. Розглянуто основні етапи налаштування, а також рекомендації щодо оптимізації роботи електроприводу в залежності від специфіки застосування. Цей розділ надає важливу інформацію для розуміння функціонування та налаштування перетворювача частоти, що є критично важливим для ефективного управління електроприводами в різних промислових умовах.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз вимог до електроприводів та їх характеристик. Розраховано необхідну потужність електроприводу, яка становить 142 кВт, а також виконано розрахунок потужності перетворювача частоти з перевіркою запасу. На основі порівняння експлуатаційних та енергетичних властивостей різних систем регульованого електроприводу обрано систему «перетворювач частоти – асинхронний двигун». Вибрано асинхронний електродвигун типу K21F 315 S6 TWS з номінальною потужністю 88 кВт та перетворювач частоти типу SV1100 iP5a-4 виробництва LS Industrial Systems потужністю 110 кВт у кількості 2 шт.

Виконано розрахунки природних характеристик приводного двигуна, а також електромеханічних та енергетичних характеристик електроприводу в розімкненій системі керування. Визначено, що характеристики електроприводу мають меншу жорсткість у порівнянні з природними характеристиками приводного двигуна. При зниженні частоти живлячої напруги жорсткість механічних характеристик залишається достатньою, але коефіцієнт корисної дії електроприводу різко погіршується.

Наведено теоретичні відомості про математичне моделювання асинхронного двигуна в ортогональній системі координат « $\alpha$ ,  $\beta$ , 0», що не підлягає змінам відносно статора ( $\omega_k = 0$ ). За допомогою програми Matlab/Simulink розроблено віртуальну модель асинхронного двигуна та досліджено типові електромеханічні процеси запуску та збільшення навантаження. Також розроблено віртуальну модель частотно-керованого асинхронного електропривода з дворівневим автономним інвертором напруги. Досліджено експлуатаційні режими електроприводу підйому при прямому та плавному запуску з лінійно зростаючою керуючою напругою. Для покращення експлуатаційних та енергетичних характеристик рекомендовано задавати ненульове значення початкової напруги керування перетворювачем частоти.

Виконано конструкторську розробку регульованого електроприводу. Розглянуто конструкцію та основні складові перетворювача частоти типу SV1100 iP5a-4 виробництва LG Industrial Systems. Приведено технічні характеристики основних технічних вузлів силового кола перетворювача, а також схеми підключення силових кабелів та зовнішнього потенціометру. Особливу увагу приділено особливостям процесу програмування контролера перетворювача частоти, що є важливим для забезпечення ефективної роботи електроприводу.

