МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему: Дослідження показників роботи асинхронного електропривода дробарки в умовах нестабільного електропостачання

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1414
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
М. С. Черкас
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф., Биковський О.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент д.т.н., проф., Артемчук В.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____другий (магістерський) рівень_____
Спеціальність __141___Електроенергетика,_____ електротехніка___та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф._____В.Л. Коваленко
«_____»_____2025__року

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

_____Черкас Максим Сергійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи: Дослідження показників роботи асинхронного електропривода дробарки в умовах нестабільного електропостачання
_____

керівник роботи ___Биковський О.Г., д.т.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_27_»_02__2025__року №_313 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2025 р._____
3 Вихідні дані до роботи: Технічна характеристика, навантажувальні діаграми роботи електропривода, характеристика існуючої системи керування електропривода дробарки
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Аналіз показників якості електроенергії 2) Аналіз роботи електропривода дробарки в умовах неякісної електроенергії 2) Модернізація та дослідження динамічних властивостей електропривода дробарки
5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _1) постановка задачі дослідження; 2) схема після модернізації; 3,4) математичні моделі електропривода; 5) дослідження динамічних властивостей електропривода; 6) техніко-економічні показники

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Биковський О.Г., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Биковський О.Г., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Биковський О.Г., д.т.н., проф.		

7 Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз показників якості електроенергії	30.09.2025	
2	Аналіз роботи електропривода дробарки в умовах неякісної електроенергії	15.10.2025	
3	Модернізація та дослідження динамічних властивостей електропривода дробарки	25.11.2025	

Студент _____ М. С. Черкас
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.Г. Биковський
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Черкас Максим Сергійович. Дослідження показників роботи асинхронного електропривода дробарки в умовах нестабільного електропостачання.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, науковий керівник Биковський О.Г. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2025.

Об'єкт розробки – електропривод дробарки для подрібнення металевої стружки АТ «ІНТЕРПАЙП Дніпропетровський втормет»

Мета роботи – модернізація електропривода дробарки для подрібнення металевої стружки шляхом інтеграції в існуючу систему керування перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування та дослідження його техніко – економічних показників роботи в умовах неякісної електроенергії.

Метою роботи є синтез математичного аналога асинхронного двигуна, що дозволяє персоналу підприємства оперативно оцінювати енергетичні показники АД, що працює в мережі з неякісною електроенергією.

Для досягнення мети в роботі поставлені і вирішені наступні завдання:

– удосконалення електромагнітної моделі АД, що дозволяє визначати його енергетичні показники при довільній зміні в часі якості електричної енергії;

– розрахунок енергетичних показників асинхронного двигуна шляхом розв’язання системи диференціальних рівнянь заданих у формі Коші, які описують його роботу у часовій області відомим чисельним методом, а саме: методом Ейлера.

Об'єкт дослідження - асинхронний двигун, що працює в мережі з неякісною електроенергією.

Предмет дослідження - електромагнітні процеси в асинхронному електродвигуні, що працює в мережі з неякісною електроенергією.

Методи дослідження. При вирішенні завдань дослідження використовувалися теорія ймовірності, математична статистика, теорія диференціального обчислення, чисельного інтегрування, фундаментальні положення електротехніки - для складання математичних моделей асинхронного двигуна, чисельні методи оптимізації.

У магістерській роботі розглянуто проблему забезпечення ефективної роботи асинхронного електропривода дробарки для подрібнення металевої стружки АТ «ІНТЕРПАЙП Дніпропетровський втормет» в умовах неякісної електроенергії. Метою дослідження є модернізація електропривода шляхом інтеграції перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування, а також розроблення математичної моделі асинхронного двигуна, що забезпечує можливість оперативного оцінювання його енергетичних показників при довільних змінах параметрів живлення.

У роботі здійснено аналіз нормативної бази щодо показників якості електроенергії, узагальнено відомі математичні моделі асинхронних двигунів та досліджено вплив відхилень якості напруги на їх роботу в усталених і перехідних режимах. Удосконалена електромагнітна модель двигуна сформована на основі просторово-часових комплексів, що дало змогу врахувати несиметрію та несинусоїдальність живильної напруги та оцінити енергетичні втрати, спектральні характеристики струмів і моменту.

Для визначення енергетичних параметрів асинхронного двигуна застосовано чисельне розв’язання системи диференціальних рівнянь у формі Коші методом Ейлера. Виконано вибір потужності приводного двигуна дробарки та проведено моделювання роботи електропривода як у нерегульованому, так і в частотно-регульованому режимах. На основі моделювання в середовищі Matlab/Simulink виконано синтез структурної моделі системи «перетворювач частоти – асинхронний двигун», визначено параметри її силової частини та обґрунтовано режими керування.

Окрему увагу приділено питанням електропостачання, охорони праці та захисту навколишнього середовища. У економічній частині встановлено фактори, що впливають на економічну доцільність модернізації, та оцінено ефективність запропонованих технічних рішень.

Результати дослідження підтверджують, що застосування частотно-регульованого електропривода підвищує енергоефективність, стабільність роботи дробарки та зменшує негативний вплив неякісної електроенергії на асинхронний двигун. Робота може бути використана як методична основа для модернізації аналогічних електромеханічних систем у промисловості.

Ключові слова: асинхронний частотно-регульований електропривод, енергозбереження, частотний перетворювач, електропривод дробарки.

ABSTRACT

Cherkas Maksym Serhiiovych. Investigation of Performance Indicators of the Asynchronous Electric Drive of a Shredder under Conditions of Unstable Power Supply.

Master's Qualification Thesis for obtaining the Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Scientific Supervisor: Bykovskyi O.H. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebnia, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, 2025.

The object of development is the electric drive of a shredder for crushing metal chips at JSC "INTERPIPE Dnipropetrovskvtormet".

The purpose of the work is to modernize the electric drive of the shredder for metal chip crushing by integrating a frequency converter with a microprocessor-based control system into the existing control architecture, as well as to investigate its technical and economic performance under conditions of poor-quality electrical energy.

The aim of the work is the synthesis of a mathematical analogue of an asynchronous motor that enables enterprise personnel to promptly assess the energy indicators of an induction motor operating in a network with degraded power quality.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved:

– improvement of the electromagnetic model of the induction motor, enabling the determination of its energy indicators under arbitrary time-varying power quality conditions;

– calculation of the energy indicators of the induction motor by solving a system of differential equations in the Cauchy form, describing its behavior in the time domain using a well-known numerical method, namely the Euler method.

The object of research is an asynchronous motor operating in a network with non-standard (poor-quality) electrical energy.

The subject of research is the electromagnetic processes in an asynchronous motor under conditions of degraded power quality.

Research methods. The study employed probability theory, mathematical statistics, differential calculus, numerical integration, the fundamental principles of electrical engineering for developing mathematical models of induction machines, and numerical optimization methods.

The master's thesis examines the problem of ensuring the efficient operation of the asynchronous electric drive of a metal-chip shredder at JSC "INTERPIPE Dnipropetrovskvtormet" under conditions of poor-quality electrical energy. The research aims to modernize the electric drive through the integration of a frequency converter equipped with a microprocessor control system, as well as to develop a mathematical model of the induction motor capable of providing prompt evaluation of its energy indicators under arbitrary variations in supply parameters.

The work includes an analysis of the regulatory framework related to power quality indicators, a generalization of known mathematical models of induction motors, and an investigation of the impact of power quality deviations on motor performance in both steady-state and transient modes. The enhanced electromagnetic model of the motor, developed on the basis of space–time complexes, makes it possible to account for voltage asymmetry and waveform distortion and to evaluate energy losses, spectral characteristics of currents, and electromagnetic torque.

To determine the motor's energy parameters, numerical solutions of the system of differential equations in the Cauchy form were obtained using the Euler method. The power rating of the shredder drive motor was selected, and simulation of the electric drive operation in both unregulated and frequency-controlled modes was performed. Based on modelling in Matlab/Simulink, a structural model of the "frequency converter – induction motor" system was synthesized, the parameters of its power section were determined, and appropriate control modes were substantiated.

Special attention is given to issues of power supply, occupational safety, and environmental protection. The economic section identifies factors influencing the feasibility of modernization and evaluates the effectiveness of the proposed technical solutions.

The results of the research confirm that the application of a frequency-controlled electric drive improves energy efficiency, operational stability of the shredder, and reduces the negative impact of poor-quality electrical power on the induction motor.

The work can serve as a methodological basis for the modernization of similar electromechanical systems in industry.

Keywords: asynchronous frequency-controlled electric drive, energy saving, frequency converter, shredder electric drive.

ЗМІСТ

ВСТУП……12

1 Аналіз показників якості електроенергії……15

1.1 Нормування якості електроенергії……...15

1.2 Методики розрахунку показників якості електроенергії……25

1.3 Аналіз математичних моделей асинхронних двигунів……37

1.4 Вплив якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна в усталеному режимі……...44

1.5 Вплив якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна в перехідному режимі…….....49

1.6 Шляхи підвищення якості електоенергії на промислових підприємствах……..

1.7 Опис дробарки для подрібнення металевої стружки та основні етапи модернізації та шляхи дослідження роботи нерегульованого електропривода в умовах неякісної електроенергії……54

2 АНАЛІЗ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДРОБАРКИ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ……57

2.1 Вибір потужності електричного двигуна електропривода дробарки…57

2.1.1 Розрахунок потужності приводного двигуна……57

2.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна при використанні електроенергії зниженої якості ……63

2.3 Реалізація моделі АД при довільній напрузі живлення……73

2.3.1 Постановка задачі дослідження……..73

2.3.2 Розробка моделі дослідження…….81

2.3.3 Програмна реалізація і перевірка адекватності моделі……82

2.3.4 Аналіз результатів досліджень проведених на моделі…….89

3 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДРОБАРКИ …….....91
3.1 Методи управління частотно-регульованим електроприводом…….91
3.2 Побудова силової частини системи ПЧ-АД……..94
3.3 Електропривод на базі ПЧ із проміжною ланкою постійного струму….97
3.4 Вибір перетворювача частоти……..99
3.5 Синтез структурної моделі електропривода, моделювання технологічного режиму роботи установки…….100
3.5.1 Моделювання системи ПЧ - АД в середовищі Matlab Simulink……..100
3.5.2 Розрахунок параметрів структурної схеми та результати моделювання……..……101
ВИСНОВКИ……..……107
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ……...…...109

ВСТУП

Асинхронний двигун - найбільш поширений вид електричної машини, споживаючий в даний час близько 40% всієї електроенергії, що виробляється, встановлена потужність якого постійно зростає. Практично немає галузі техніки і побуту, де вони б не використовувалися.

Одним з основних чинників підвищення ефективності енергетичного господарства промислових підприємств є підвищення якості енергії.

Комплексне вирішення питань поліпшення якості енергії і підвищення надійності енергопостачання, зокрема таких показників надійності, як безвідмовність, ремонтопридатність і довговічність елементів енергопостачання, є основою забезпечення належної якості систем енергопостачання об'єктів промисловості.

Поліпшення якості енергії у будь-якій галузі промисловості є одним із ключових чинників забезпечення стабільності й ефективності роботи технологічного обладнання. Підвищення показників якості електроенергії створює умови для нормального, безперервного та оптимального перебігу технологічних процесів, що, своєю чергою, забезпечує виконання виробничих планів, досягнення запланованої продуктивності та підтримання необхідного рівня якості готової продукції. За наявності відхилень показників якості електричної енергії від нормативних значень ускладнюється функціонування електротехнічних систем, зростає частота відмов і погіршується енергоефективність підприємства загалом, що може призводити до значних економічних втрат.

Під якістю енергії у її приймачів розуміють комплекс споживчих характеристик, які визначають придатність електроенергії забезпечувати виконання заданих функцій відповідно до призначення конкретного електроприймача. До таких властивостей належать стабільність напруги та частоти, відсутність значних гармонічних спотворень та несиметрії напруги, мінімальна кількість провалів, імпульсних перешкод і перенапружень. Саме ці

параметри визначають, наскільки надійно і довговічно працюватиме обладнання, чи буде воно функціонувати в оптимальних режимах, витрачаючи мінімум енергії при максимальній продуктивності. Таким чином, якість енергії є важливим системним показником, що впливає не лише на технічні характеристики технологічних процесів, а й на безпеку експлуатації електроустановок та тривалість їхнього життєвого циклу.

Якість енергопостачання галузей народного господарства — об’єднань, підприємств, окремих споживачів — можна представити як сукупність властивостей та параметрів системи електропостачання, що визначають її здатність задовольняти потреби споживачів в електричній енергії заданої якості при необхідному рівні надійності. До таких властивостей належать стабільність режимів роботи мережі, відповідність параметрів електроенергії нормативним вимогам, достатня пропускна здатність мережевої інфраструктури, а також ефективність системи керування режимами споживання та компенсації реактивної потужності. Високий рівень якості енергопостачання забезпечує мінімізацію аварійних ситуацій, зменшення простоїв обладнання, підвищення продуктивності виробництва та раціональне використання енергетичних ресурсів, що має вирішальне значення для стійкого функціонування і розвитку підприємств різних галузей економіки.

Під управлінням якістю енергії можна розуміти встановлення і підтримку необхідного рівня якості енергії при її виробництві, розподілі і споживанні, здійснювані шляхом систематичного контролю якості і цілеспрямованої дії на умови і чинники, що впливають на якість енергії.

Сучасний електропривод, що реалізовує процеси електромеханічного перетворення енергії, який в основному базується на використанні як приводні пристрої асинхронних електродвигунів з короткозамкнутим ротором, конструктивно не складний. Разом з тим експлуатація даного класу двигунів в даний час пов'язана з багатьма проблемами. Найбільшою, на мою думку, є проблема живлення асинхронних двигунів неякісною електроенергією. Достовірно відомо, що навіть незначні відхилення якості живлячої напруги приводять до

негативних наслідків, пов'язаних із старінням ізоляції і зниженням таких енергетичних показників роботи асинхронних двигунів як коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності.

Вирішення даної проблеми неможливе без наявності єдиної математичної моделі, яка дозволяла б аналізувати енергетичну ефективність асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором при різних значеннях всіх показників якості електричної енергії в мережі.

Для асинхронного електродвигуна як такого все це перестало бути проблемою з появою спеціалізованого програмного забезпечення (т.з. CAD-программ). Воно дозволяє будувати графіки перехідних процесів, отримувати залежності необхідних параметрів від вхідних чинників і так далі

Проте, ситуація ускладнюється, коли необхідно враховувати якісні показники вхідної напруги, такі як несиметрія і несинусоїдальність. Проблема полягає в тому, що сама модель в цьому випадку стає часто неадекватною через прийняті допущення. У разі ж використання складніших аналогів, опис процесів настільки ускладнюється, що пошук необхідних залежностей стає взагалі неможливим.

Запропонована модель в данній роботі дозволяє аналізувати як перехідні процеси, так і сталі режими роботи даних електричних машин, заснована на аналізі миттєвих значень живлячої напруги з використанням просторово-часових комплексів (ПЧК). При цьому вона одночасно описує дві категорії параметрів – по-перше, тимчасові зміни струму статора, моменту і швидкості при довільній формі живлячої напруги, їх спектральні характеристики, по-друге, енергетичні показники (ККД, коефіцієнт потужності, сумарні втрати).

1 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Нормування якості електроенергії

З огляду на те, що ефективність, надійність, і економічність експлуатації всіх електротехнічних установок, а особливо систем електричного приводу, що використовують електричну енергію змінного струму, багато в чому залежить від її якості в електричних мережах, останньому пред'являються підвищені вимоги [1,2,3,4].

В даний час існують наступні стандарти, що визначають якість використовуваної електричної енергії:

- міждержавний стандарт на електроенергію 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення»;

- європейський стандарт EN50.006;

- міжнародні стандарти МЕК 861, МЕК 1000-3-2, МЕК 1000-3-3, МЕК 1000-4-1;

- публікації МЕК 1000-2-1, МЕК 1000-2-2 в частині рівнів електромагнітної сумісності в системах електропостачання і методів вимірювання електромагнітних перешкод.

Вказані нормативно-технічні документи визначають вплив якості електроенергії на справний електричний магнітно–симетричний електромеханічний перетворювач в частині збільшення додаткових втрат і його перегріву. По суті, все це свідчить про те, що у електропостачальників і електроспоживачів існує одне загальне і досить серйозне завдання – поліпшення і оптимізація якості електричної енергії з метою підвищення ефективності її використання і забезпечення надійності електроустаткування.

Європейські вимоги по питаннях якості напруги можна розділити на три групи:

1. Нормативна база повинна забезпечувати єдину систему показників якості напруги, а також єдину методику проведення і оцінки результатів їх вимірювання. Ця нормативна база включає міжнародні європейські стандарти.

2. Нормативно-правова база Євросоюзу повинна передбачати єдиний підхід до проведення організаційно-технічних заходів щодо забезпечення необхідних норм якості електроенергії. Ці заходи засновані на концепції забезпечення ЕМС, яка розроблена Технічним комітетом 77 МЕК і затверджена Технічним комітетом 210 CENELEC і Єврокомісією. Ця нормативно-правова база включає міжнародні стандарти і європейські Директиви.

3. Національна нормативно-правова база по питаннях якості електроенергії повинна враховувати особливості побудови енергетичної інфраструктури різних держав. Вона включає документи (Мережеві кодекси, Інженерні рекомендації і Правила підключення навантажень, Технічні регламенти за якістю напруги), що мають національні відмінності.

Для порівняння системи параметрів і показників якості напруги, а також забезпечення єдності методики проведення і оцінки результатів їх вимірювання здійснений порівняльний аналіз міждержавного (країн СНД) стандарту ГОСТ 13109-97 і європейських міжнародних стандартів EN 50160, EN 61000-2-2, EN 61000-2-12, EN 61000-4-7, EN 61000-4-30.

У зв'язку з тим, що параметри якості напруги в мережі більшою мірою визначаються характером навантаження, проведені дослідження також стосувалися порівняння українських і європейських документів, що регламентують емісію перешкод в мережу відповідно до концепції МЕК по забезпеченню ЕМС в електричних мережах. При цьому з погляду балансу має рацію і обов'язків споживачів розглядалася взаємна ув'язка нормативно-технічних документів (стандартів) і правових актів (законів і технічних регламентів), що забезпечують обов'язкове виконання норм цих стандартів. З цією метою проводилося порівняння «Технічного регламенту з підтвердження відповідності електромагнітної сумісності» і Директиви Євросоюзу 2004/108/ЕС, а також закону України «Про електроенергетику» і Директиви Євросоюзу 2003/54/ЕС.

Для апаратури, споживаючої струм не більше 75 А на фазу і що підключається до європейських мереж з напругою до 1000 В, обов'язкові вимоги по емісії перешкод і перешкодостійкості повинні забезпечуватися на етапі виробництва цієї апаратури. Дані вимоги викладені в міжнародних гармонізованих стандартах, вказаних в переліку до Директиви 2004/108/ЕС. Окрім цього, встановлено, що вся одночасно працююча апаратура, яка підключена до даної електричної мережі, повинна мати таку величину емісії гармонік струму, щоб рівень викликаною цією емісією гармонік напруги в даній мережі не перевищував заздалегідь узгоджений рівень (рівень електромагнітної сумісності) з вірогідністю більше 95%. Для європейських електричних мереж напругою до 35 кВ рекомендовані показники якості напруги встановлені міжнародним стандартом EN 50160:2007. Оскільки Україна є аффилированным членом CENELEC, то з 01.01.2008 на неї розповсюджуються нові правила для аффилированных членів, в числі яких є обов'язок вилучати національні стандарти, що суперечать європейським при впровадженні європейських стандартів як національні. Окрім рекомендованих стандартом EN 50160:2007 показників якості напруги кожна країна визначає свій національний перелік обов'язкових показників якості напруги і величини норм для них. Ці обов'язкові норми встановлюються національним Технічним регламентом за якістю напруги.

Для забезпечення необхідних показників якості напруги на операторів європейських мереж покладаються наступні функції:

- забезпечити параметри електричних мереж не гірше певного рівня;

- обмежити підключення споживачів, рівень емісії перешкод від яких погіршить показники якості напруги в мережі нижче планованого рівня (зазвичай величина планованого рівня показників якості напруги в мережі рівна або декілька нижче, ніж величина рівня електромагнітної сумісності).

У зв'язку з цим проведено порівняння українських і європейських документів, що встановлюють правила підключення споживачів, а саме «Правил приєднання електроустановок до електричних ятерів» і умов підключення споживачів, які встановлені мережевими кодексами Польщі, Німеччини,

Великобританії. Окрім цього вивчалися особливості ухвалення національних видань міжнародних стандартів, враховуючи права і обов'язки України як афілірованого члена CENELEC.

Враховуючи, що на багатьох підприємствах широко використовується нерегульований електропривод, як його основне устаткування більш ніж в 90% випадків застосовується асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором. Це обумовлено простотою конструкції останнього, і, як наслідок - високою надійністю, низькою вартістю і мінімальними експлуатаційними витратами.

Як відомо, будь-які відхилення якості живлячої напруги призводять до зростання втрат і зміни величини моменту, що розвивається, знакозмінні складові якого є причиною додаткових вібрацій елементів конструкції даних електродвигунів. При цьому прискорюється старіння ізоляції в них і, в результаті, підвищується аварійність, знижуються також макропоказники роботи, такі як коефіцієнт потужності і, коефіцієнт корисної дії [5]. Одним з шляхів забезпечення надійної роботи вказаного електроустаткування змінного струму є зараз створення систем контролю і управління якістю електроенергії, перспективи розвитку яких пов'язані з наявністю і розробкою необхідних методів і засобів, що дозволяють коректувати відповідні показники якості.

Поняття якості електричної енергії відрізняється від аналогічного поняття інших видів продукції, що випускається. Кожен електроприймач призначений для роботи при певних значеннях таких показників якості електричної енергії як відхилення напруги (ΔU), розмах зміни напруги (δU_t), інтенсивність фликера (P_t), коефіцієнт спотворення синусоидальности кривої лінійної (фазного) напруги (K_U), коэффициет n-й вищої гармоніки ($K_{U(n)}$), коефіцієнт зворотної (ε_2) і нульової (ε_0) послідовностей напруги, тривалість провалу напруги (Δt_n), імпульс напруги ($U_{имп}$), коефіцієнт тимчасового перенапруження ($K_{перU}$), відхилення частоти (Δf) [2].

Частина показників якості електроенергії (ПЯЕ) характеризує сталі режими роботи електроустаткування енергозабезпечуючої організації і споживачів електроенергії і дає кількісну оцінку за якістю електроенергії особливостям

технологічного процесу виробництва, передачі, розподілу і споживання електроенергії.

Для характеристики вищеперелічених показників стандартом встановлені чисельні нормально і гранично допустимі значення ПЯЕ або норми. Відхилення частоти від номінального значення в нормальному режимі роботи допускається в межах ±0,1 Гц. При цьому розбіжність між астрономічним і синхронним часом допускається не більш ±2 хв. Допускається тимчасова робота енергетичної системи з відхиленням частоти в межах ±0,2 Гц. Коливання частоти не повинні перевищувати 0,2 Гц понад допустимі відхилення.

Для несинусоїдальності форми кривої напруги встановлений такий норматив, при якому значення всіх вищих гармонік, що діє, не перевищує 5% значення напруги основної частоти, що діє. При несиметрії кривої напруга зворотної послідовності, як правило, не повинна перевищувати 2% номінального значення напруги.

Напруга нульової послідовності не повинна мати значень, при яких (з урахуванням інших впливаючих чинників) значення напруги, що діють, виходять за допустимі межі.

Інша частина ПЯЕ характеризує короткочасні перешкоди, що виникають в електричній мережі в результаті комутаційних процесів, грозових атмосферних явищ, роботи засобів захисту і автоматики і в після аварійних режимах. До них відносяться провали і імпульси напруги, короткочасні перенапруження. Для цих ПЯЕ стандарт не встановлює допустимих чисельних значень. Для кількісної оцінки цих ПЯЕ повинні вимірюватися амплітуда, тривалість, частота їх появи і інші характеристики, встановлені, але не нормовані стандартом. Статистична обробка цих даних дозволяє розрахувати узагальнені показники, що характеризують конкретну електричну мережу з погляду вірогідності появи короткочасних перешкод.

Для оцінки відповідності ПЯЕ вказаним нормам (за винятком тривалості провалу напруги, імпульсної напруги і коефіцієнта тимчасового перенапруження) стандартом встановлюється мінімальний розрахунковий період, рівний 24 годин.

У зв'язку з випадковим характером зміни електричних навантажень вимога дотримання норм ЯЕ протягом всього цього часу практично нереально, тому в стандарті встановлюється вірогідність перевищення норм ЯЕ. Виміряні ПЯЕ не повинні виходити за нормально допустимі значення з вірогідністю 95% за встановлений стандартом розрахунковий період часу (це означає, що можна не зважати на окремі перевищення нормованих значень, якщо очікувана загальна їх тривалість складе менше 0,05 за встановлений період часу).

Іншими словами, ЯЕ по зміряному показнику відповідає вимогам стандарту, якщо сумарна тривалість часу виходу за нормально допустимі значення складає не більше 5% від встановленого періоду часу, тобто 1 ч 12 хв, а за гранично допустимі значення – 0 % від цього періоду часу.

Загальна тривалість вимірювань ПЯЕ, що рекомендується, повинна вибиратися з урахуванням обов'язкового включення робочих і вихідних днів і складає 7 діб.

У стандарті вказані вірогідні винуватці погіршення ЯЕ. Відхилення частоти регулюється живлячою енергосистемою і залежить тільки від неї. Окремі ЕП на промислових підприємствах (а тим більше в побуті) не можуть зробити впливу на цей показник, оскільки потужність їх несумірно мала в порівнянні з сумарною потужністю генераторів електростанцій енергосистеми. Коливання напруги, несиметрія і несинусоидальность напруга викликаються, в основному, роботою окремих могутніх ЕП на промислових підприємствах, і лише величина цих ПЯЕ залежить від потужності живлячої енергосистеми в даній точці підключення споживача. Відхилення напруги залежать як від рівня напруги, яка подається енергосистемою на промислові підприємства, так і від роботи окремих промислових ЕП, особливо з великим споживанням реактивної потужності. Тому питання ЯЕ слід розглядати в безпосередньому зв'язку з питаннями компенсації реактивної потужності. Тривалість провалу напруги, імпульсна напруга, коефіцієнт тимчасового перенапруження, як вже наголошувалося, обуславливаются режимами роботи енергосистеми.

У таблиці 1.1 приведені властивості електричної енергії, показники їх характеризують і найбільш вірогідні винуватці погіршення ЯЕ.

Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик, при яких електроприймачі можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції. При відхиленнях вказаних показників, нормальна робота електромеханічних перетворювачів утруднена або можлива тільки при значному зниженні навантаження. Необхідно також відзначити, що зниження ефективності роботи такого устаткування все ж таки має місце і при змінах показників якості електроенергії в допустимих стандартами діапазонах.

Таблиця 1.1 – Властивості електричної енергії, показники і найбільш вірогідні винуватці погіршення ЯЕ

Властивості електричної енергії	Показник ЯЕ	Найбільш вірогідні винуватці погіршення ЯЕ
Відхилення напруги	Стале відхилення напруги	Енергозабезпечуюча організація
Коливання напруги	Розмах зміни напруги δV Доза фликера	Споживач із змінним навантаженням
Несинусоїдальность напруги	Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_y Коефіцієнт n – ої гармонійної складової напруги	Споживач з нелінійним навантаженням
Несиметрія трифазної системи напруги	Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U} Коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності	Споживач з несиметричним навантаженням
Відхилення частоти	Відхилення частоти	Енергозабезпечуюча організація
Провал напруги	Тривалість провалу напруги	Енергозабезпечуюча організація
Імпульс напруги	Імпульсна напруга	Енергозабезпечуюча організація
Тимчасове перенапруження	Коефіцієнт тимчасового перенапруження	Енергозабезпечуюча організація

До теперішнього часу накопичений багатий досвід в області дослідження впливу відхилення показників якості електроенергії від гостованих значень на роботу асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором. Так, наприклад, при вивченні питань, пов'язаних з кількісною оцінкою збитку вищезгаданих електромеханічних перетворювачів, що працюють в умовах несимметррии живлячої напруги, автори роботи [6] зробили вивід, що при значенні ε_2=3,5% температура обмоток двигуна підвищується на 25%, а в роботі [7] встановлено, що при збільшенні ε_2 до 4 % термін служби асинхронного двигуна знизиться в два рази.

У роботі [8] указується, що при роботі асинхронних двигунів в умовах несинусоїдальності живлячої напруги мають місце такі негативні чинники, як зниження коефіцієнта потужності і що обертає момент на валу електричної машини. Встановлено також, що кожні 2,5% приростів живлячої напруги приводять до зростання втрат в асинхронному двигуні на 3 - 3,9 % і збільшенні споживаної реактивної потужності майже на 5%, що негативно позначається на енергоефективності його роботи [9].

Аналіз попередніх досліджень дозволяє зробити висновок, що робота електромеханічних перетворювачів в умовах неякісної електроенергії призводить до зниження працездатності і надійності такого класу устаткування. Проте опубліковані результати не містять економічної оцінки і отриманих при цьому втрат. Розглянуті в них питання впливу неякісної електроенергії на роботу двигуна не зачіпають головного - фінансового аспекту проблеми. Питання вартісного характеру до теперішнього часу практично не розглядалися і, як наслідок, немає можливості провести порівняльну оцінку економічних втрат, пов'язаних з неякісною електроенергією, і необхідних для забезпечення її якості витрат.

У зв'язку з вищевикладеним представляють інтерес експериментальні дослідження реального стану якості електроенергії, спожитої промисловими підприємствами. Так, приведені в [10] результати дають підставу говорити про те, що перевищення нормованих рівнів вищих гармонік навіть такого порядку як 23-

38 (парних і непарних) на Алчевському металургійному комбінаті у ряді випадків доходить до семи і більше разів. При цьому граничні значення коефіцієнтів гармонійних складових напруги у півтори і більше разів більше їх допустимих значень.

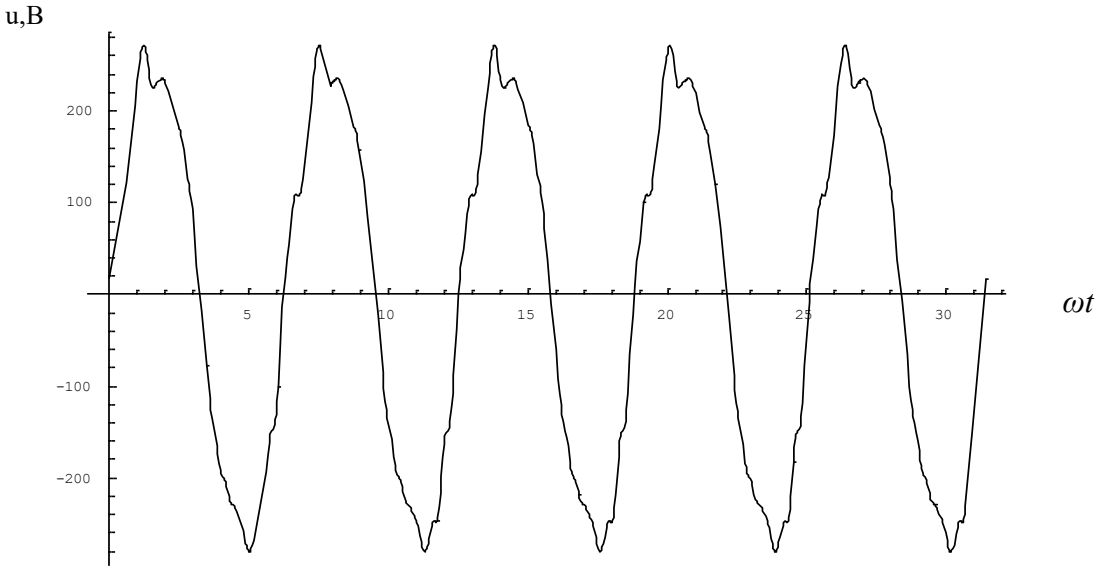
Не краща ситуація і на інших українських підприємствах. Як приклад на рисунку 1.1 приведений спектр напруги в мережі ВАТ «Запоріжтрансформатор». Очевидно, що така електроенергія повинна мати відмінну від відповідної вимогам стандартів країн СНД ГОСТ 13109-97 вартість. Проте оцінка останньої, унаслідок тієї ж відсутності даних про величину економічного збитку, що наноситься, є досить складним завданням. Встановити ціну на таку електроенергію можна поки що тільки суб'єктивно.

Таким чином, спостерігається парадоксальна ситуація, коли використовуване гостування показників якості електроенергії виглядає як повчальне попередження про те, що технічні параметри електроспоживачів зміняться в гіршу сторону, якщо показники якості не відповідатимуть потрібним, без оцінки того, в що обійдеться забезпечення цих вимог в ситуації, що реально склалася на підприємстві. На нашу думку, вирішити вказану проблему можливо тільки за допомогою техніко-економічної моделі, на основі якої необхідно сформулювати і вирішити задачу оптимізації економічного характеру.

У таку модель повинні вводитися реальні показники якості електроенергії, що роблять негативний вплив на роботу асинхронного двигуна, ціни на устаткування (у тому числі і на електричну машину) і тарифи на електроенергію можливо і неякісну. Залежно від ситуації, що склалася, така модель дозволить встановити, на скільки економічно доцільно підвищувати якість електроенергії в масштабах всього підприємства, і чи сумірні втрати, викликані неякісною електроенергією з капітальними витратами по відновленню необхідної якості.

Зараз, на думку авторів, для багатьох підприємств виникла ситуація, коли в умовах існуючих цін і тарифів економічно доцільніше не приводити споживану електроенергію до вимог ГОСТів. Викликані неякісною електроенергією втрати, за попередньою оцінкою, істотно менше необхідних витрат на приведення її до

необхідної якості. І може опинитися, що вигідніше частіше міняти електродвигуни, чим встановлювати відповідні блоки силової електроніки.



а)



б)

Рисунок 1.1 Осцилограма форми кривої напруги (а) і лінійчатий спектр амплітуд гармонік напруги (б)

За наявності ж на підприємстві особливо відповідального електроустаткування, що вимагає підвищеної надійності, необхідно застосовувати засоби технічної діагностики (ЗТД), які дозволять попередити несподіваний вихід з ладу такого устаткування і виконати його своєчасну заміну і ремонт. Очевидно, що вартість ЗТД, створення яких є самостійним завданням, також необхідно враховувати в запропонованому завданні економічної оптимізації.

1.2 Методики розрахунку показників якості електроенергії

У роботі [1, 2] детально розглянуто методики розрахунку існуючих показників якості електроенергії.

Відхилення частоти Δf є усередненою за 10 хвилин різницею між фактичним значенням частоти f в кожен даний момент часу і номінальним її значенням $f_{ном}$ при швидкості зміни частоти менше 0,2 Гц/с, Гц:

$$\Delta f = f - f_{ном}, \qquad (1.1)$$

або у відносних величинах %:

$$\Delta f = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100.$$

Коливання частоти Δf_t є різниця між максимальним f_{max} і мінімальним значеннями f_{min}частоти при швидкості зміни частоти не менше 0,2 Гц/с, Гц:

$$\Delta f_t = f_{\max} - f_{\min}, \qquad (1.2)$$

або у відносних величинах %:

$$\Delta f_t = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{ном}} \cdot 100 .$$

Відхилення напруги V є різницею між фактичним значенням напруги U і його номінальним значенням для мережі $U_{ном}$, що виникає при швидкості зміни напруги менше 1% в секунду, В:

$$V = U - U_{ном} , \qquad (1.3)$$

або у відносних величинах %:

$$V = \frac{U - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100 .$$

Як дійсна напруга U в трифазних електричних мережах приймається напруга прямої послідовності основної частоти. Відхилення напруги на затискачах електродвигунів допускається в межах 5 – 10 % номінального.

Коливання напруги δV визначається різницею між найбільшим U_{max} і найменшим U_{min} значеннями напруги, що діють, В:

$$\delta V = U_{max} - U_{min} , \qquad (1.4)$$

або у відносних величинах %:

$$\delta V = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{ном}} \cdot 100 .$$

Частота (або середня частота) змін напруги при числі їх *m* за время *T* (1/с, 1/ч):

$$F=m/T. \qquad (1.5)$$

При розрахунку *F* враховуються тільки зміни напруги із швидкістю більше 1% в секунду. Дві зміни напруги розглядаються як одне, якщо інтервал між ними складає менше 40 мс.

На рисунку 1.2 показано коливання напруги у мережі.

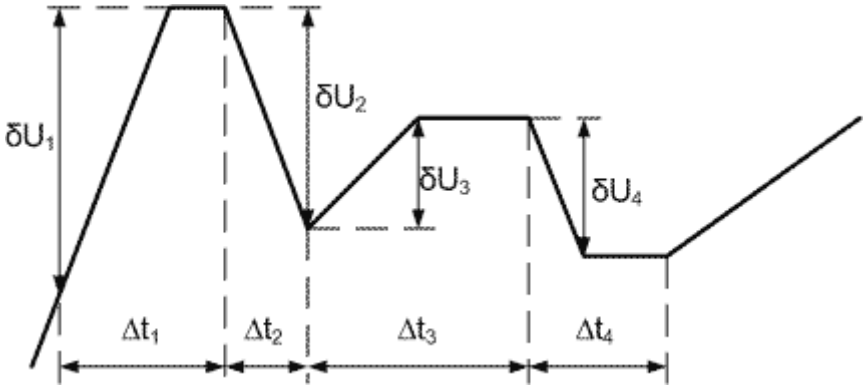


Рисунок 1.2 – Коливання напруги

Інтервал часу між змінами напруги рівний:

$$\Delta t_{i,i+1} = t_{i,i+1} - t_i . \qquad (1.6)$$

Оцінка допустимості розмахів зміни напруги (коливань напруги) здійснюється за допомогою кривих залежності допустимих розмахів коливань від частоти повторень змін напруги або інтервалу часу між подальшими змінами напруги.

ЯЕ в точці загального приєднання при періодичних коливаннях напруги, що мають форму меандра (прямокутну) (рисунок 1.3) вважають відповідним вимогам стандарту, якщо виміряне значення розмаху змін напруги не перевищує значень,

визначуваних по кривим рисунку 1.3 для відповідної частоти повторення змін напруги, або інтервалу між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$.

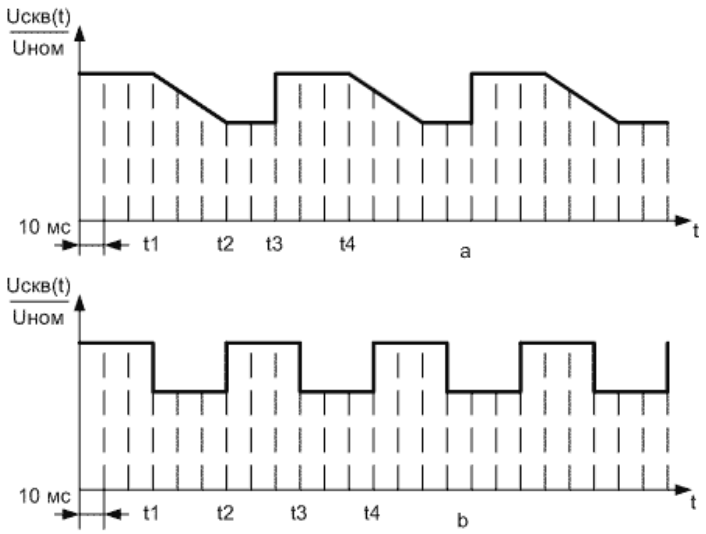


Рисунок 1.3 - Коливання напруги довільної форми (а) і що мають форму меандра (б)

Гранично допустиме значення суми сталого відхилення напруги δU_y і розмаху змін напруги δU_t в точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ рівно ±10 % від номінальної напруги.

Доза флікера - це міра сприйнятливості людини до дії коливань світлового потоку, викликаних коливаннями напруги в живлячій мережі, за встановлений проміжок часу.

Стандартом встановлюється короткочасна (P_{Ct}) і тривала доза флікера (P_{Lt}) (короткочасну визначають на інтервалі часу спостереження, рівному 10 хв, тривалу на інтервалі – 2 ч). Початковими даними для розрахунку є рівні флікера, вимірювані за допомогою флікерметра, - приладу, в якому моделюється крива чутливості (амплітудно-частотна характеристика) органу зору людини.

ЯЕ по дозі флікера відповідає вимогам стандарту, якщо короткочасна і тривала дози флікера, визначені шляхом вимірювання в перебігу 24 ч або розрахунку, не перевищують гранично допустимих значень: для короткочасної

дози флікера – 1,38 і для тривалої – 1,0 (при коливаннях напруги з формою, що відрізняється від меандра) .

Гранично допустиме значення для короткочасної дози флікера в точках загального приєднання споживачів електроенергії, що мають в своєму розпорядженні лампи розжарювання в приміщеннях, де потрібна значна зорова напруга, рівне 1,0, а для тривалої - 0,74, при коливаннях напруги з формою, що відрізняється від меандра.

Несинусоїдальність форми кривої напруги (рисунок 1.4) характеризується значенням коефіцієнта спотворення кривої напруги K_U, %, який визначається відношенням значення вищих гармонік напруги U_γ, що діє, до напруги основної частоти U_1 або номінальній напрузі:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=2}^{\infty} U_\gamma^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{\gamma=2}^{n} U_\gamma^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \qquad (1.7)$$

де U_γ - значення напруги гармонік, що діє, В;

n – номер останньою з гармонік, що враховуються.

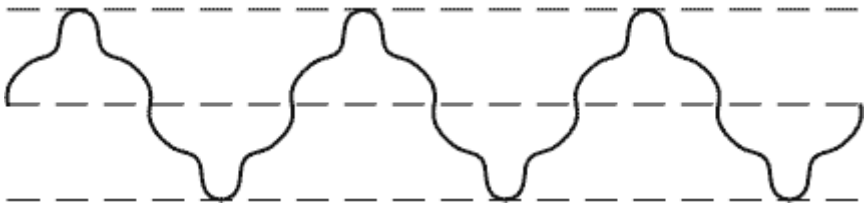


Рисунок 1.4 - Несинусоїдальність напруги

Допустиме значення K_U складає 5%.

При оцінці K_U в стандарті не встановлений номер останньої з гармонік, що враховуються. Можна прийняти, що він визначається допустимою погрішністю оцінки величини, що становить 5%, що відповідає загальноприйнятому в електротехнічній практиці рівню значущості.

Несинусоїдальность напруги також характеризується і коефіцієнтом *n*-ой гармонійної складової напруги.

Коефіцієнт *n*-ой гармонійної складової напруги рівний, %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_1}. \qquad (1.8)$$

Допускається $K_{U(n)}$ обчислювати по виразу, %:

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{ном}}. \qquad (1.9)$$

Для обчислення необхідно визначити рівень напруги окремих гармонік, що генеруються нелінійним навантаженням.

Фазну напругу гармоніки в розрахунковій точці мережі знаходять з виразу:

$$U_{(n)} = \frac{I_{(n)} \cdot n \cdot U_{нн} \cdot U_{ном}}{S_k}, \qquad (1.10)$$

де I_n – значення фазного струму *n* – ой гармоніки, що діє;

$U_{нн}$ – напруга нелінійного навантаження (якщо розрахункова крапка співпадає з точкою приєднання нелінійного навантаження, то $U_{нн} = U_{ном}$);

$U_{ном}$ – номінальна напруга мережі;

$S_к$ - потужність короткого замикання в точці приєднання нелінійного навантаження.

Для розрахунку $U_{(n)}$ необхідно заздалегідь визначити струм відповідної гармоніки, який залежить не тільки від електричних параметрів, але і від виду нелінійного навантаження.

Нормально допустимі і гранично допустимі значення K_U в точці загального приєднання до електричних мереж з різною номінальною напругою приведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Значення коефіцієнта скривлення синусоїдальності кривої напруги

Нормально допустимі значення при $U_{ном}$, кВ				Гранично допустимі значення при $U_{ном}$, кВ			
1	2	3	4	5	6	7	8
0,38	6 –20	35	110–330	0,38	6 –20	35	110–330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Значення коефіцієнтів *n*-ої гармонічної складової напруги представлено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнта *n*-ої гармонічної складової напруги у відсотках, де *n* - номер гармонічної складової напруги

Непарні гармоніки, не кратні 3, при $U_{ном}$, кВ					Непарні гармоніки, кратні 3*, при $U_{ном}$, кВ					Парні гармоніки при $U_{ном}$, кВ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
n	0,38	6-20	35	110-330	n	0,38	6-20	35	110-330	n	0,38	6-20	35	110-330
5	6.0	4.0	3.0	1.5	3	5.0	3.0	3.0	1.5	2	2.0	1.5	1.0	0.5
7	5.0	3.0	2.5	1.0	9	1.5	1.0	1.0	0.4	4	1.0	0.7	0.5	0.3
11	3.5	2.0	2.0	1.0	15	0.3	0.3	0.3	0.2	6	0.5	0.3	0.3	0.2
13	3.0	2.0	1.5	0.7	21	0.2	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.3	0.3	0.2
17	2.0	1.5	1.0	0.5						10	0.5	0.3	0.3	0.2
19	1.5	1.0	1.0	0.4						12	0.2	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1.0	1.0	0.4										
25	1.5	1.0	1.0	0.4										

* Нормально допустимі значення, приведені для *n* = 3 і 9, відносяться до однофазних електричних мереж. У трифазних електричних мережах ці значення приймаються вдвічі менші, ніж приведені в таблиці.

Несиметрія напруги характеризується наступними показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруги по зворотній послідовності;

- коефіцієнтом несиметрії напруги по нульовій послідовності.

Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності рівний, %:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \qquad (1.11)$$

де – $U_{2(1)}$ значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруги, що діє, В;

$U_{1(1)}$ - значення напруги прямої послідовності основної частоти, що діє, В.

Допускається обчислювати по виразу, %:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{ном\,мф}} \cdot 100, \qquad (1.12)$$

де $U_{ном\,мф}$ – номінальне значення міжфазної напруги мережі, В.

Коефіцієнт несиметрії напруги по нульовій послідовності рівний, %:

$$K_{0U} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \qquad (1.13)$$

де – значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруги, що діє, В.

Допускається обчислювати за формулою, %:

$$K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{ном\,ф}}, \qquad (1.14)$$

де – номінальне значення фазної напруги, В.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруги по нульовій послідовності проводять в чотирипровідній мережі.

Відносна погрішність визначення і по формулах (1.13) і (1.14) чисельно рівна значенню відхилень напруги від $U_{ном}$.

Несиметрія трифазної системи напруги виникає в результаті накладення на систему прямої послідовності напруги системи зворотної послідовності, що приводить до змін абсолютних значень фазної і міжфазної напруги (рисунок 1.5).

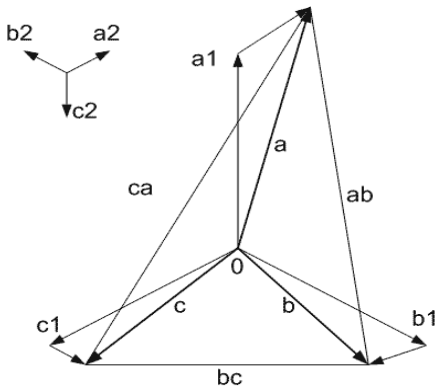


Рисунок 1.5 – Векторна діаграма напруги прямої та зворотньої послідовності

Крім несиметрії, системи зворотної послідовності, що викликається напругою, може виникати несиметрія від накладення на систему прямої послідовності напруги системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазної напруги при збереженні симетричної системи міжфазної напруги (рисунок 1.6).

До провалів напруги відноситься раптова значна зміна напруги у точці електричної мережі нижче за рівень 0,9, за яким слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до декількох десятків секунд (рисунок 1.7).

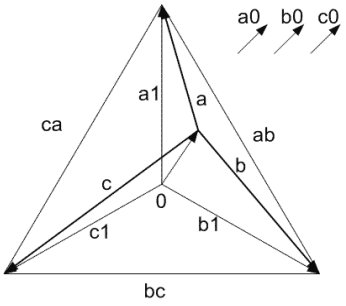


Рисунок 1.6 – Векторна діаграма напруги прямої та нульової послідовності

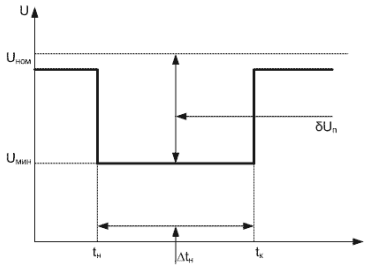


Рисунок 1.7 - Провал напруги

Характеристикою провалу напруги є його тривалість Δt_n, рівна:

$$\Delta t_n = t_K - t_П, \tag{1.15}$$

де $t_П$ та t_K – початковий і кінцевий моменти часу провалу напруги.

Провал напруги характеризується також глибиною провалу напруги – різницею між номінальним значенням напруги і мінімальним значенням напруги, що діє, вираженою в одиницях напруги або у відсотках від його номінального значення. Провал напруги обчислюється по виразах:

$$\delta U_n = U_{ном} - U_{\min}, \tag{1.16}$$

або у відносних величинах %:

$$\delta U_n = \frac{U_{ном} - U_{\min}}{U_{ном}} \cdot 100.$$

Гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно рівне 30 с. Тривалість провалу напруги, що автоматично усувається, в будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається витримками часу релейного захисту і автоматики.

Спотворення форми кривою живлячої напруги може відбуватися за рахунок появи високочастотних імпульсів при комутаціях в мережі, роботі розрядників і т. д. Імпульс напруги - різка зміна напруги в крапці електричної мережі, за яким слідує відновлення напруги до первинного або близького до нього рівня.

Величина спотворення напруги при цьому характеризується показником імпульсної напруги (рисунок 1.8).

Імпульсна напруга рівна, в.о:

$$\delta U_{імп} = \frac{U_{імп}}{\sqrt{2} U_{ном}}, \tag{1.17}$$

де $U_{імп}$ – значення імпульсної напруги, В.

Амплітудою імпульсу називається максимальне миттєве значення імпульсу напруги. Тривалість імпульсу - це інтервал часу між початковим моментом імпульсу напруги і моментом відновлення миттєвого значення напруги до первинного або близького до нього рівня.

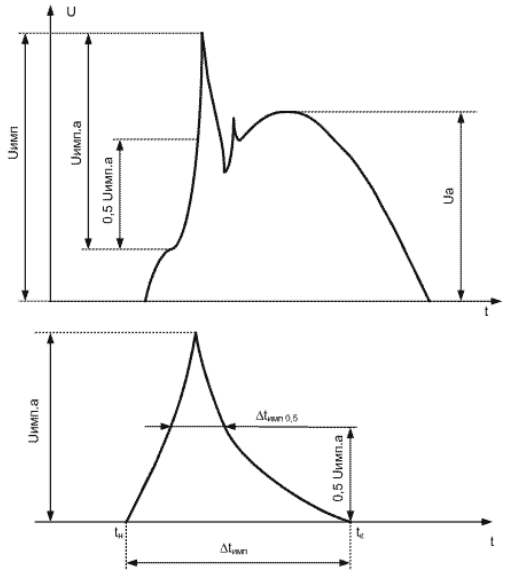


Рисунок 1.8 - Параметри імпульсної напруги

Імпульсна напруга стандартом не нормується.

Тимчасове перенапруження – підвищення напруги в крапці електричної мережі вище 1,1$U_{ном}$ тривалістю більше 10 мс, електропостачання, що виникають в системах, при комутаціях або коротких замиканнях (рисунок 1.9).

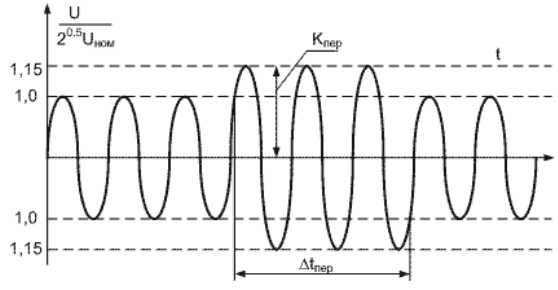


Рисунок 1.9 - Тимчасове перенапруження

Тимчасове перенапруження характеризується коефіцієнтом тимчасового перенапруження $K_{перU}$ - це величина, рівна відношенню максимального значення що огинає амплітудних значень напруги за час існування тимчасового перенапруження до амплітуди номінальної напруги мережі.

$$K_{перU} = \frac{U_{a\max}}{\sqrt{2}U_{ном}}. \quad (1.18)$$

Тривалістю тимчасового перенапруження називається інтервал часу між початковим моментом виникнення тимчасового перенапруження і моментом його зникнення.

$$\Delta t_{перU} = t_{К\ пер} - t_{П\ пер}. \quad (1.19)$$

Коефіцієнт тимчасового перенапруження стандартом також не нормується.

Значення коефіцієнта тимчасового перенапруження в точках приєднання електричної мережі загального призначення залежно від тривалості тимчасових перенапружень не перевищують значень приведених у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Залежність коефіцієнта тимчасового перенапруження від тривалості перенапруження

Тривалість тимчасових перенапружень, з	До 1	До 20	До 60
Коефіцієнт тимчасового перенапруження, о.е	1,47	1,31	1,15

В середньому за рік в точці приєднання можливі близько 30 тимчасових перенапружень.

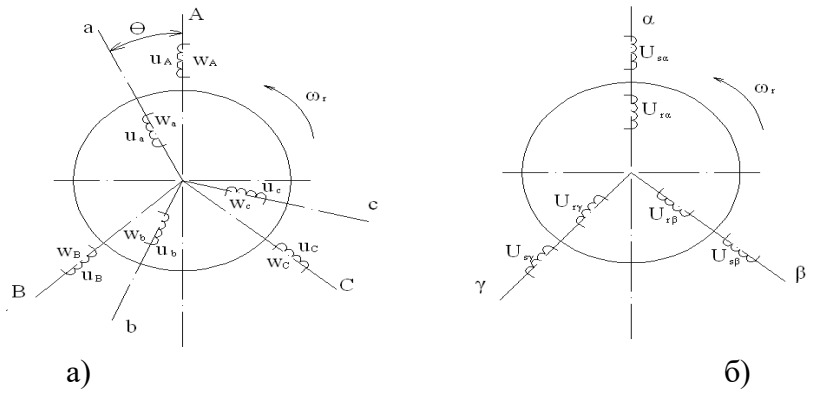
При обриві нульового провідника в трифазних електричних мережах напругою до 1 кВ, що працюють з глухозаземленной нейтраллю, виникають тимчасові перенапруження між фазою і землею. Рівень таких перенапружень при значній несиметрії фазних навантажень може досягати значень міжфазної напруги, а тривалість декількох годинників.

1.3 Аналіз математичних моделей асинхронних двигунів

Існує два підходи до моделювання електромеханічного перетворення енергії: на базі теорії поля і теорії електричних ланцюгів, заснованих відповідно на рівняннях Максвела і Кірхгофа. Але в даний час найбільш прогресивним методом аналізу процесів електромеханічного перетворення енергії є узагальнений підхід, що поєднує в собі обидві вказані теорії, коли виходячи з картини поля в повітряному зазорі електричної машини складаються рівняння для напруги, а потім вже через струми або потокосцепления записуються рівняння для електромагнітного моменту [11].

На сьогоднішній день відомі достатньо повні математичні моделі асинхронних електродвигунів. Поведінка їх в різних умовах експлуатації розглянуто у вже класичних дослідженнях [12, 13]. Але питання моделювання роботи асинхронних двигунів при неякісному живленні так і залишилося невирішеним.

Найбільш поширена математична модель асинхронного електромеханічного перетворювача енергії приведена в роботі Копилова І.П. [11]. Ця просторова модель ідеалізованої трифазної машини (рисунок 1.10а) має ряд допущень: машина двополюсна, має гладкий повітряний зазор, всі її параметри лінійні і напруга синусоїдальна. На малюнку представлені по три обмотки статора і ротора з кількістю витків w_A, w_B, w_C і w_a, w_b, w_c відповідно, зрушені на 120º. У неперетвореній системі координат при переміщенні обмоток взаємні індуктивності між ними змінюються, а $(d\theta/dt)=\omega_r$.



а) б)

Рисунок 1.10 - Просторові моделі трифазної асинхронної машини:
а) ідеалізована; б) у загальмованій системі координат

Для даної машини в неперетвореній системі координат *A, B, C, a, b, c* справедлива система диференціальних рівнянь вигляду:

$$\left.\begin{aligned} u_A &= \frac{d\Psi_A}{dt} + i_A R_A; u_B = \frac{d\Psi_B}{dt} + i_B R_B; \\ u_C &= \frac{d\Psi_C}{dt} + i_C R_C; u_a = \frac{d\Psi_a}{dt} + i_a R_a; \\ u_b &= \frac{d\Psi_b}{dt} + i_b R_b; u_c = \frac{d\Psi_c}{dt} + i_c R_c; \end{aligned}\right\}, \qquad (1.20)$$

$$M_c + J\frac{d\omega_r}{dt} = M_э,$$

де R — активні опори обмоток фаз статора і ротора; ψ — результуючі потокосчеплення цих обмоток.

Потокосчеплення фази А:

$$\Psi_A = i_A L_A + i_B M_{AB} + i_C M_{AC} + i_a M_{Aa} + i_b M_{Ab} + i_c M_{Ac}. \qquad (1.21)$$

Аналогічно записуються потокосчеплення для п'яти інших контурів. У даній системі координат індуктивності (L), взаємні індуктивності (M) в рівнянні для потокосчеплення є періодичними коефіцієнтами, які змінюються по гармонійному закону при обертанні ротора машини. Для усунення цього здійснюється перехід до загальмованої системи координат, де кругове поле в повітряному зазорі представляють результуючими векторами.

Просторова модель ідеалізованої трифазної машини в загальмованій трифазній системі координат представлена на рис.1.10б. Рівняння, відповідні даній моделі в координатах α,β,γ, нерухомих щодо статора, мають наступний вигляд:

$$\left.\begin{aligned}
u_{sa} &= \frac{d\Psi_{sa}}{dt} + i_{sa} r_{sa};\\
u_{s\beta} &= \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + i_{s\beta} r_{s\beta};\\
u_{s\gamma} &= \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} + i_{s\gamma} r_{s\gamma};\\
u_{ra} &= \frac{d\Psi_{ra}}{dt} + i_{ra} r_{ra} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\gamma} + \Psi_{r\beta})}{\sqrt{3}};\\
u_{r\beta} &= \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + i_{r\beta} r_{r\beta} + \omega_r \frac{(-\Psi_{ra} + \Psi_{r\gamma})}{\sqrt{3}};\\
u_{r\gamma} &= \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + i_{r\gamma} r_{r\gamma} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\beta} + \Psi_{r\alpha})}{\sqrt{3}}.
\end{aligned}\right\}. \qquad (1.22)$$

Тут потокосчеплення:

$$\left.\begin{aligned}
\Psi_{sa} &= i_{sa} L_{sa} - 0.5 M i_{s\beta} - 0.5 M i_{s\gamma} + (i_{ra} - 0.5 i_{r\beta} - 0.5 i_{r\gamma}) M;\\
\Psi_{s\beta} &= i_{s\beta} L_{s\beta} - 0.5 M i_{s\gamma} - 0.5 M i_{sa} + (i_{r\beta} - 0.5 i_{ra} - 0.5 i_{r\gamma}) M;\\
\Psi_{s\gamma} &= i_{s\gamma} L_{s\gamma} - 0.5 M i_{sa} - 0.5 M i_{s\beta} + (i_{r\gamma} - 0.5 i_{ra} - 0.5 i_{r\beta}) M;\\
\Psi_{ra} &= i_{ra} L_{ra} - 0.5 M i_{r\beta} - 0.5 M i_{r\gamma} + (i_{sa} - 0.5 i_{s\beta} - 0.5 i_{s\gamma}) M;\\
\Psi_{r\beta} &= i_{r\beta} L_{r\beta} - 0.5 M i_{r\gamma} - 0.5 M i_{ra} + (i_{s\beta} - 0.5 i_{sa} - 0.5 i_{s\gamma}) M;\\
\Psi_{r\gamma} &= i_{r\gamma} L_{r\gamma} - 0.5 M i_{ra} - 0.5 M i_{r\beta} + (i_{s\gamma} - 0.5 i_{sa} - 0.5 i_{s\beta}) M.
\end{aligned}\right\}. \qquad (1.23)$$

При цьому електромагнітна енергія, сконцентрована в повітряному зазорі:

$$W\text{э} = 0{,}5 \sum_{k=1}^{n} \psi_k \cdot i_k \ , \qquad (1.24)$$

а електромагнітний момент:

$$M_э = \frac{\sqrt{3}}{2} p M (i_{r\gamma} i_{sa} + i_{ra} i_{s\beta} + i_{r\beta} i_{s\gamma} - i_{r\beta} i_{sa} - i_{r\gamma} i_{s\beta} - i_{ra} i_{s\gamma}). \qquad (1.25)$$

Дана система складається з чотирнадцяти рівнянь, в якій залежними змінними є по шість струмів і потокосчеплень, електромагнітний момент і швидкість обертання. Система в загальному випадку – нелінійна.

Дану модель, як вказано в [12], доцільно застосовувати, для дослідження асинхронної електричної машини в динамічному режимі при синусоїдальній живлячій напрузі. Для аналізу ж сталого режиму, як граничного випадку динамічного, рівняння для напруги можуть бути отримані з рівнянь електромеханічного перетворення шляхом заміни в початкових рівняннях оператора диференціювання $d( )/dt$ на $j\omega$. Недоліком такої моделі є те, що, вона розрахована на живлення асинхронного двигуна тільки від симетричної системи синусоїдальної напруги. При несиметрії напруги з'являється необхідність розкладати їх пряму, зворотну і нульову послідовності, і розглядати момент на валу як суму від кожної з цих послідовностей. Таким чином, для аналізу роботи асинхронного двигуна в умовах живлення неякісною електроенергією необхідне істотне ускладнення початкової моделі.

Ряд досліджень [14,15,16] присвячено питанням математичного моделювання електричних машин з метою визначення впливу конструктивної несиметрії асинхронного двигуна на його електромагнітні параметри. Такі моделі доцільно використовувати, як відзначають автори, при проектуванні і виробництві серійних асинхронних машин, а так само в дослідженнях, пов'язаних з визначенням ресурсу електричної машини. Проте дані математичні аналоги електричних машин не відповідають вимогам поставленого завдання дослідження.

Інтерес представляють роботи [17-19], де автором запропонована математична модель, що описує асинхронний двигун з короткозамкнутим ротором як об'єкт регулювання. Вона складена з допущенням, що машина симетрична, а напруга на її входах синусоїдальна. Вказаний математичний аналог дозволяє лише частково виконати аналіз втрат в електромеханічному перетворювачі.

Дослідження [20,21,22] дозволяють провести класифікацію математичних аналогів асинхронного двигуна. Автори указують, що в даний час використовуються два види: на базі узагальненої двофазної машини, α-β, d-q, а також x-y і в природних трифазних осях на основі фазної або лінійної напруги. Відмічено, що моделі d-q, а також x-y жорстко прив'язані до швидкості поля статора або ротора, і їх застосування можливе тільки у разі живлення обмоток

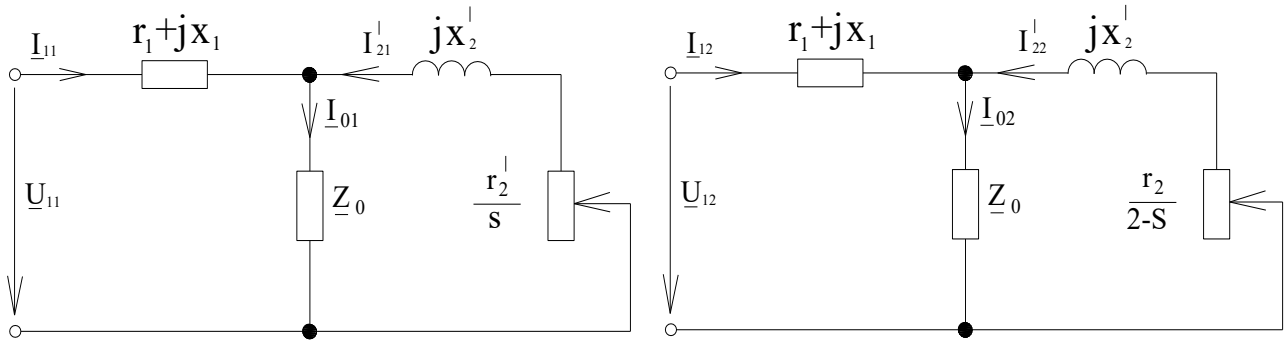
статора двигуна синусоїдальною напругою. Якщо ж статор харчується несинусоїдальною напругою, то використовуються α-β моделі і моделі в природних осях.

Особливої уваги заслуговує математична модель електромеханічного перетворювача, що працює в умові несиметрії первинної напруги, розглянута в [23]. Для аналізу роботи асинхронної машини в умовах несиметричного режиму автором застосований метод симетричних складових. Система несиметричної первинної напруги статора ($\underline{U}_{A1}, \underline{U}_{B1}, \underline{U}_{C1}$) представляється як сума прямої ($\underline{U}_{A11}, \underline{U}_{B11}, \underline{U}_{C11}$) і зворотної послідовностей, що становлять ($\underline{U}_{A12}, \underline{U}_{B12}, \underline{U}_{C12}$):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{A11} &= \underline{U}_{11} = \frac{(\underline{U}_{A1} + a\underline{U}_{B1} + a^2\underline{U}_{C1})}{3}; \\ \underline{U}_{A12} &= \underline{U}_{12} = \frac{(\underline{U}_{A1} + a^2\underline{U}_{B1} + a\underline{U}_{C1})}{3}, \end{aligned} \qquad (1.26)$$

де $a = e^{j2\pi/3}$.

При цьому струми в обмотці статора представляють сумою струмів прямий ($\underline{I}_{A11} = \underline{I}_{11}, \underline{I}_{B11}, \underline{I}_{C11}$) і зворотною ($\underline{I}_{A12} = \underline{I}_{12}, \underline{I}_{B12}, \underline{I}_{C12}$) послідовностей, які обумовлені симетричними системами напруги прямої і зворотної послідовностей відповідно. У даній роботі струм прямої послідовності $\underline{I}_{11}$ у фазі «А» статора знаходять за допомогою схеми заміщення асинхронної машини, яка приведена на рисунку 1.11.



а) б)

Рисунок 1.11 - Схема заміщення асинхронного двигуна для напруги прямої (а) і зворотної (б) послідовностей

Ковзання ротора щодо поля прямої послідовності:

$$s_1 = \frac{(\Omega_1 - \Omega)}{\Omega_1}, \tag{1.27}$$

де Ω_1 — кутова швидкість поля прямої послідовності;

Ω — кутова швидкість ротора.

Струм прямої послідовності

$$\underline{I}_{11} = \frac{\underline{U}_{11}}{\underline{Z}_{11}}, \tag{1.28}$$

де $\underline{Z}_{11}$ - опір фази обмотки статора для струмів прямої послідовності

Для визначення струму зворотної послідовності $\underline{I}_{12}$ у фазі «А» статора використовується схема заміщення, приведена на рисунку 1.11б, що відрізняється від схеми заміщення для струму прямої послідовності тим, що в неї введено ковзання ротора по відношенню до поля зворотної послідовності:

$$s_2 = \frac{(-\Omega_1 - \Omega)}{\Omega_1} = 2 - s, \tag{1.29}$$

де $(-\Omega_1)$— кутова швидкість поля зворотньої послідовності.

Струм зворотньої послідовності:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_{12}}, \tag{1.30}$$

де Z_{12}- опір фази обмотки статора для струмів зворотної послідовності. За допомогою схем заміщення рисунку 1.11 розраховують струми прямої і зворотної послідовностей I_{11} і I_{12} у фазі «А», а потім знаходять повні струми в кожній з фаз статора.

Результуючий момент асинхронного двигуна (М), що обертає, при спотворенні симетрії напруги складається з моменту M_1 пов'язаного з напругою прямої послідовності, і моменту M_2, який пов'язаний з напругою зворотної послідовності:

$$M = M_1 + M_2. \tag{1.31}$$

Дана модель дозволяє виконати аналіз енергетичної ефективності двигуна тільки в умові несиметрії живлячої напруги.

Заслуговує також уваги математичний аналог асинхронного двигуна, описаний в роботі [24]. Тут досліджується робота машини при несинусоїдальній несиметричній напрузі живлення в сталому режимі. Автор проводить заміну диференціальних рівнянь трифазної асинхронної машини в осях α-β-0 комплексними:

$$\begin{Vmatrix} \underline{U}_a^s \\ \underline{U}_\beta^s \\ U_a^r \\ U_\beta^r \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} r^s + jx^s & 0 & jx_m & 0 \\ 0 & r^s + jx^s & 0 & jx_m \\ jx_m & vM' & r^r + jx^r & vL^r \\ -vM' & jx_m & -vL^r & r^r + jx^r \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} I_a^s \\ I_\beta^s \\ I_a^r \\ I_\beta^r \end{Vmatrix}. \tag{1.32}$$

Потім вводяться складові прямої і зворотної послідовностей напруги і струмів по осях α-β. За відсутності нульової послідовності отримуємо наступні вирази :

$$\begin{aligned} &\underline{U}_a = \underline{U}_{пр} + \underline{U}_{обр}; \underline{I}_a = \underline{I}_{пр} + \underline{I}_{обр}; \\ &\underline{U}_b = a^2 \underline{U}_{пр} + \underline{aU}_{обр}; \underline{I}_b = a^2 \underline{I}_{пр} + a\underline{I}_{обр}; \\ &\underline{U}_c = a\underline{U}_{пр} + \underline{a^2 U}_{обр}; \underline{I}_c = a\underline{I}_{пр} + a^2 \underline{I}_{обр}. \end{aligned} \tag{1.33}$$

Виконаний перехід від диференціальних рівнянь щодо напруги трифазної машини в осях α-β-0 до комплексних рівнянь відповідає загальновідомим схемам заміщення. Як відзначає автор, параметри останніх можуть бути визначені

досвідченим або розрахунковим шляхом. Виконавши попередній розрахунок струмів визначається значення середнього за період електромагнітного моменту по формулі:

$$M_э = \frac{1}{T}\int_0^T M(t)dt \quad . \qquad (1.34)$$

В результаті розраховується значення коефіцієнта корисної дії машини (η) і коефіцієнта потужності (cosφ). Розглянута модель дозволяє виконати аналіз енергетичної ефективності асинхронного двигуна при несиметричній несинусоїдальній напрузі в живлячій мережі, проте і вона вимагає певного доопрацювання, оскільки не враховує зміни частоти живлячої напруги.

1.4 Вплив якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна в усталеному режимі

При відхиленні напруги на затискачах асинхронного електродвигуна змінюються частота обертання ротора, а також значення активних втрат і споживаної реактивної потужності; це приводить до зміни економічних показників, що характеризують роботу електродвигуна. Зміни активних втрат в асинхронних електродвигунах при відхиленнях напруги в межах 5 – 10 % $U_{ном}$ невеликі (не більше 0,03 $\Delta P_{ном}$); проте вони виявляються того ж порядку, що і втрати в живлячих мережах.

Зниження напруги приводить також до помітного зростання реактивної потужності, що втрачається в реактивних опорах АД.

Підвищення напруги на виводах двигуна приводить до збільшення споживання ними реактивної потужності. При цьому питоме споживання реактивної потужності росте із зменшенням коефіцієнта завантаження двигуна. В

середньому на кожен відсоток підвищення напруги споживана реактивна потужність збільшується на 3 % і більш (в основному за рахунок збільшення струму холостого ходу двигуна), що у свою чергу приводить до збільшення втрат активної потужності в елементах електричної мережі.

На практиці вважають, що для двигунів серії А потужністю 20-100 кВт в діапазоні допустимих відхилень напруги зміна напруги на 1% спричиняє за собою зміну спожитої реактивної потужності на 3%. Збільшення споживання реактивної потужності із зростанням напруги пояснюється підвищеною витратою її на намагнічування сталі.

Відхилення напруги впливає на значення втрат в електродвигунах, тому тепловий знос ізоляції залежить від відхилення напруги і завантаження електродвигуна. При позитивних відхиленнях напруги термін служби ізоляції Тс у порівнянні із значенням $T_{ном}$ при номінальних значеннях напруги і навантаження змінюється обернено пропорційно до квадрату коефіцієнта завантаження m:

$$Tc = T_{ном}/m^2. \qquad (1.35)$$

Очевидно, при m < 1 тепловий знос ізоляції зменшується.

При негативних відхиленнях напруги термін служби ізоляції скорочується і визначається рівнянням:

$$T_c = \frac{T_{ном}}{[47(V)^2 - 7{,}55V + 1]m^2}. \qquad (1.36)$$

Якщо відхилення напруги знаходяться в нормованих межах, вважають Тном ≈ Тс.

При зміні напруги змінюється механічна характеристика АД – залежність його моменту М від ковзання S або частоти обертання (рисунок 1.12).

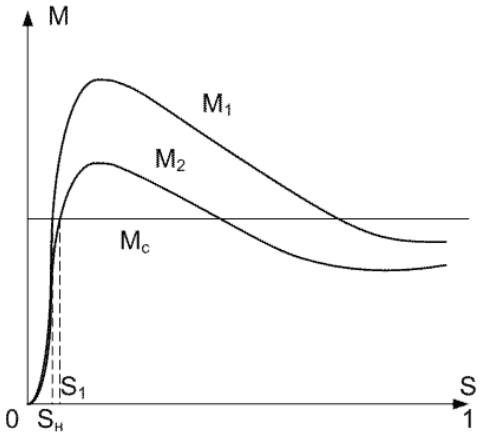


Рисунок 1.12 – Механічна характеристика двигуна при номінальній (M_1) і зниженій (M_2) напрузі.

З достатньою точністю можна вважати, що момент двигуна, що обертає, пропорційний квадрату напруги на його виводах. При зниженні напруги зменшується момент, що обертає, і частота обертання ротора двигуна, оскільки збільшується його ковзання. Зниження частоти обертання залежить також від закону зміни моменту опору Мс (на рисунку 1.12 Мс прийнятий постійним) і від завантаження двигуна. Залежність частоти обертання ротора двигуна від напруги можна визначити:

$$n = n_c(1 - k_з \frac{U^2_{ном}}{U^2} S_{ном}), \qquad (1.37)$$

де n_c– синхронна частота обертання;

$k_з$– коефіцієнт завантаження двигуна;

$U_{ном}, S_{ном}$– номінальні значення напруги і ковзання відповідно.

З формули (1.37) видно, що при малих завантаженнях двигуна частота обертання ротора буде більше номінальної частоти обертання (при номінальному завантаженні двигуна). У таких випадках пониження напруги не приводять до зменшення продуктивності технологічного устаткування, оскільки зниження частоти обертання двигунів нижче номінальною не відбувається.

Для двигунів, що працюють з повним навантаженням, пониження напруги приводить до зменшення частоти обертання. Якщо продуктивність механізмів залежить від частоти обертання двигуна, то на виводах таких двигунів рекомендується підтримувати напругу не нижче номінального. При значному зниженні напруги на виводах двигунів, що працюють з повним навантаженням, момент опору механізму може перевищити момент, що обертає, що приводить до “перекидання” двигуна, тобто до його зупинки. Щоб уникнути пошкоджень двигун необхідно відключити від мережі.

Зниження напруги погіршує і умови пуску двигуна, оскільки при цьому зменшується його пусковий момент.

При значних коливаннях напруги (більше 15%) можуть бути порушені умови нормальної роботи електродвигунів, можливе відпадання контактів магнітних пускачів з відповідним відключенням працюючих двигунів.

При роботі електродвигуна з номінальним моментом, що обертає, і коефіцієнті зворотної послідовності напруги, рівному 4 %, термін служби ізоляції його скорочується приблизно в 2 рази тільки за рахунок додаткового нагріву. Якщо напруга на одній з фаз буде значно привышать номінальне значення, скорочення терміну служби буде ще більшим.

На роботу АД впливають також вищі гармоніки (ВГ). Так при роботі АД в умовах несинусоїдної напруги його коефіцієнт потужності і обертовий момент на валу знижуються. Наприклад, якщо амплітуди 5-ої і 7-ої ВГ напруги складуть відповідно 20% і 15% амплітуди 1-ої гармоніки, коефіцієнт потужності двигуна зменшиться на 26% у порівнянні зі значенням його при синусоїдній напрузі. Практично вплив ВГ на коефіцієнт потужності асинхронного двигуна можна не враховувати. Те ж відноситься і до моментів, які розвивають ВГ струму. Вони не перевищують декількох десятих відсотка моменту, що розвивається при промисловій частоті.

Суттєво впливають ВГ на ізоляцію електричних машин. Спотворення форми кривої напруги активізує появу і протікання іонізаційних процесів в ізоляції

електричних машин. При цьому розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що призводять до збільшення діелектричних втрат і скороченню строку служби.

В [25] розглянуто вплив параметрів енергосистеми на стійкість вузлів навантаження з асинхронними двигунами. У цьому дослідженні енергосистему представлено множиною параметрів до якої входять еквівалентні ЕРС прямої та зворотної послідовності та еквівалентний комплексний опір. В [25] проведено дослідження стійкості роботи навантаження в симетричних аварійних та післяаварійних режимах, які є найважчими, внаслідок чого ЕРС зворотної послідовності не було враховано. Однак, слід зазначити, що найпоширенішими (до 90% випадків) є саме несиметричні аварійні режими та спричинені ними післяаварійні режими, при дослідженні яких обов’язково слід враховувати зворотну складову несиметричного режиму.

В [26] проведено аналіз впливу напруги зворотної послідовності на кратність пускового та максимального моментів асинхронного двигуна, але при цьому не проведено аналіз її впливу на механічну характеристику асинхронного двигуна та запас його статичної стійкості.

В [27] розраховано залежність ККД та коефіцієнту потужності асинхронного двигуна від коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг при різних значеннях навантаження на валу двигуна. В статті зазначено, що при збільшенні коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг зростає споживання двигуном активної та реактивної потужності, але при цьому не проаналізовано кількісний вплив несиметрії напруги живлення на запас статичної стійкості асинхронного двигуна. Таким чином, враховуючи дослідження [25-27] та той факт, що несиметрія напруги живлення часто має місце в мережах промислових підприємств, внаслідок великої кількості несиметричного однофазного навантаження, можна зробити висновок про актуальність дослідження впливу несиметрії напруги на стійкість асинхронних двигунів.

1.5 Вплив якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна в перехідному режимі

Зміна режиму роботи асинхронної машини пов'язана з перехідними процесами, якими супроводжується перехід від одного сталого режиму її роботи до іншого. Вони характеризуються виникненням зрівняльних струмів і магнітних полів, поступово затухаючих до нульових значень.

Перехідні процеси в асинхронній машині значно складніші, ніж в трансформаторі, оскільки одна з її обмоток обертається щодо іншої, при цьому зрівняльні струми і поля створюють змінні моменти, що обертають, які впливають на ротор машини і викликають зміну його частоти обертання. Вони зазвичай досліджуються приблизно при ряду допущень.

Розглянемо процеси при включенні.

При включенні короткозамкнутого двигуна на сталий пусковий струм накладатиметься вільний струм, який приблизно можна вважати аперіодичним, швидко затухаючим до нуля. Вільний струм буде найбільшим в одній з фаз обмотки статора. У момент включення при найбільш несприятливому випадку він рівний амплітуді початкового сталого струму $\sqrt{2}I_{поч}$. Опісля приблизний півперіоду, він складається із сталим пусковим струмом. Тоді максимальне миттєве значення струму у фазі обмотки статора виходить приблизно рівним: $t_{\max} = (1.7 \div 2.5)I_{поч}$.

Оскільки у малих машин загасання вільного струму відбувається значно швидше із-за щодо великих активних опорів обмоток, то для них Imax має менше значення.

При включенні двигунів з контактними кільцями їх обмотка ротора замкнута, як правило, на великий пусковий опір. Тому тут не виходить великих кидків струму. Якщо ж двигун включається при розімкненій обмотці ротора, то виникають процеси, аналогічні процесам при включенні трансформатора, що має розімкнену вторинну обмотку. Магнітний потік, що зчіплюється з однією з фаз обмотки статора, в найсприятливішому випадку може бути рівний, опісля зразковий

півперіоду після включення, 1,8 — 1,9 його номінального значення. При цьому, враховуючи насичення сталевих ділянок магнітного ланцюга, отримаємо найбільший миттєвий струм в даній фазі, що перевищує амплітуду номінального струму в 2 — 2,5 разу.

Слід також відзначити, що після включення короткозамкнутого двигуна в нім разом із сталим пусковим моментом виникають змінні перехідні моменти, які, накладаючись на перший, можуть значно підвищити результуючий момент в початковий період пуску. Вони виникають із-за наявності зрівняльних струмів в обмотках і викликаних ними магнітних полів. Найбільший результуючий момент виходить, приблизно, опісля (0,6 ÷ 0,8) періоду після включення, і може бути більше сталого початкового моменту в 3 — 4 рази.

Процеси при виключенні двигунів також заслуговують уваги. В цьому випадку магнітна енергія, запасена головним чином в повітряному зазорі, після швидкого відключення двигуна робиться вільною і може викликати в обмотках підвищену напругу. Якщо роторна обмотка при виключенні двигуна розімкнена, то магнітне поле швидко зникає. Магнітна енергія переходить в теплову в іскрових проміжках між контактами вимикача, що розходяться. Унаслідок швидкої зміни потокосцеплений обмоток в них можуть виникнути небезпечні перенапруження, особливо у разі могутніх двигунів. Тому не слідує двигун з контактними кільцями вимикати при розімкненій обмотці ротора. Пусковий реостат, отже, повинен виконуватися так, щоб роторний ланцюг не міг бути розімкненим. При виключенні короткозамкнутих двигунів магнітне поле зникає відносно поволі, оскільки воно підтримуватиметься наведеними ним струмами в роторній обмотці. Перенапруження тут практично не виникають.

При короткому замиканні асинхронного двигуна також виникають перехідні процеси, при яких виходять великі струми в обмотках і великі моменти, що обертають. Тут під коротким замиканням двигуна розуміється випадок, коли відбулося раптове коротке замикання в мережі, від якої двигун отримує живлення. Найбільший миттєвий струм, що виходить в одній з фаз статора опісля приблизний півперіоду після короткого замикання, досягає значення, в 1,2 — 1,35 разу що

перевищує значення амплітуди сталого початкового пускового струму. Найбільший обертає момент, що виникає при цьому, буде гальмуючим, тобто направленим проти обертання ротора. Він приблизно рівний 2,3 — 2,7 Мпоч.

Приведені значення моментів, що обертають, діють на ротор і статор в початкові періоди перехідних процесів, необхідно враховувати при конструюванні двигунів. Момент, що діє на вал двигуна, залежить від відношення зовнішнього махового моменту робочої машини до махового моменту ротора двигуна. Він тим більше, чим більше це відношення.

1.6 Шляхи підвищення якості електоенергії на промислових підприємствах

Для підтримки необхідного рівня напруги у електроприймачів застосовуються засоби централізованого і місцевого регулювання. До централізованого регулювання відноситься, в основному, установка трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням (РПН) на районних підстанціях енергосистем і на головних понизительных підстанціях промислових підприємстві.

До засобів місцевого регулювання слід віднести вольтодобавочные трансформатори і компенсуючі пристрої в різних пунктах підприємств. До компенсуючих пристроїв належать синхронні двигуни, що працюють в режимі перезбудження, двигуни з автоматичним регулюванням збудження і статичні конденсатори з автоматичним регулюванням потужності, що включається і відключається. При необхідності жорсткого дотримання рівня напруги у електроприймачів доводиться встановлювати стабілізатори напруги.

Для зниження впливів коливань напруги на режим роботи слідує до електроприймачів з резкопеременной ударним навантаженням (електродвигуни при прокатних станах, дугові електропечі) підводити живлення безпосередньо від головних понизительных підстанцій і центральних розподільних пунктів підприємств, а також застосовувати швидкодіючі синхронні компенсатори і надалі

статичні джерела реактивної потужності. Для зменшення несинусоидальности і несиметрії напруги велике значення мають відповідні фільтри і симметрирующие пристрої, що складаються з индуктивностей і ємкостей. Необхідно прагнути до комплексного використання вказаних засобів, з тим щоб з їх допомогою підтримувати необхідний рівень якості електроенергії.

При розробці організаційно-технічних заходів, направлених на поліпшення якості енергії, треба перш за все виявити причини його пониження (неприпустимо великі втрати напруги в мережі, дефіцит реактивної потужності у вузлі навантаження, неправильний закон регулювання напруги, неправильний вибір відгалужень обмоток цехових трансформаторів, нерівномірний розподіл навантажень по фазах і т. п.). Після цього слід намітити можливі шляхи поліпшення якості енергії і провести їх техніко-економічний аналіз, за наслідками якого і приймати необхідні заходи. Практика показує, що дуже часто причиною неприпустимого підвищення напруги є неправильний режим роботи компенсуючих пристроїв, а неприпустимого пониження — неправильний вибір відгалужень цехових трансформаторів і тому подібне В таких випадках проведення заходів щодо підвищення якості електроенергії не вимагає значних витрат.

Виходячи з вищесказаного можна зробити такі висновки, якість електроенергії є фундаментом якості продукції, що виробляється, адже очевидно, що підприємство може мати якісну сировину або напівфабрикати, але через неякісні енергоносії воно не в змозі буде виробити якісну продукцію. ЯЕ характеризується різними порушеннями і спотвореннями форми напруги. Ці порушення можуть надходити з енергосистеми — наприклад, грозові імпульси, комутаційні перенапруги, що викликаються комутацією ділянок електричної мережі, провали і відхилення напруги під час роботи пристроїв автоматичного включення резерву і перемикання споживачів на інші джерела живлення. Самі електроприймачі можуть вносити спотворення до електричної мережі.

Такими властивостями володіють електроприймачі з різкозмінним і нелінійним характером навантаження: перетворювачі, промислові споживачі, електричний транспорт і т.п.

Якість електричної енергії впливає на працездатність і ефективність функціонування електроприймачів. Стосовно інфокомунікаційних систем ЯЕ слід розглядати як дію кондуктивних завад (електромагнітних завад, що розповсюджуються по елементах електричної мережі) на устаткування. При цьому, якщо рівень завад (показників ЯЕ) не перевищує норм, устаткування функціонує справно і порушень (збоїв, зниження ефективності) інфокомунікаційних систем немає.

При розробці заходів, направлених на поліпшення якості енергії, треба перш за все виявити причини його пониження (неприпустимо великі втрати напруги в мережі, дефіцит реактивної потужності у вузлі навантаження, неправильний закон регулювання напруги, нерівномірний розподіл навантажень по фазах і т. п.). Після цього слід намітити можливі шляхи поліпшення якості енергії і провести їх техніко-економічний аналіз, за наслідками якого і приймати необхідні заходи.

Зростання несиметрії живлячої напруги супроводжується зниженням енергетичних показників електродвигуна. При номінальному навантаженні із зростанням несиметрії максимуми коефіцієнта несиметрії і коефіцієнта корисної дії зміщуються в область нижчих значень напруги прямої послідовності.

При несиметрії живлячої напруги зниження напруги прямої послідовності максимуми коефіцієнта несиметрії і коефіцієнта корисної дії зміщуються в область нижчих навантажень.

Тому при зниженні напруги прямої послідовності зменшення навантаження на валу електродвигуна для виконання умови $\Theta^* = 1$ приводить до незначного погіршення його енергетичних показників.

При несиметрії живлячої напруги виникає необхідність до зниження навантаження на валу двигуна від 8 % до 13% номінального навантаження. Несиметрія напруги і відхилення параметрів мережі і навантаження від номінальних умов викликає перегрів і вихід двигуна з ладу.

1.7 Опис дробарки для подрібнення металевої стружки та основні етапи модернізації та шляхи дослідження роботи нерегульованого електропривода в умовах неякісної електроенергії

Стружкодробарка (рисунок 1.13) містить корпус із завантажувальним і розвантажувальним вікнами та нерухомими ножами, два встановлених у корпусі зі зміщенням один щодо іншого по вертикалі паралельних валу з рухомими ножами та пружними радіальними пластинами на поверхні та привод. Пружні пластини укріплені на поверхні кожного валу між ножами, при цьому вони виконані з прорізами для проходу через них ножів іншого валу та ножів корпусу та виготовлені з ресорної сталі. Нерухомі ножі корпусу виконані прямокутної та криволінійної форми та виготовлені зі зносостійкої сталі. Рухливі ножі валів виконані шаблезубою форми з бічною ріжучою кромкою і також виготовлені зі зносостійкої сталі. Привод стружкодробарки включає електродвигун, з'єднаний через гідромуфту та редуктор з одним валом, а через зубчасту передачу – з іншим. У гідромуфти є датчик, приєднаний до системи управління роботою електродвигуна і забезпечує його реверсування (за рахунок перемикання подачі струму на обмотки електродвигуна) під час перевантаження.

Розглянемо механізм роботи стружкодробарки. Включається електродвигун і через приводні ланки, гідромуфту, редуктор і зубчасту передачу вали наводяться назустріч один одному. Стружка подається пучками через завантажувальне вікно в корпус, де захоплюється ножами переднього валу, переміщується ними зону взаємодії ножів обох валів. Тут стружка розривається і подрібнюється цими ножами і ножами корпусу, що взаємодіють з ними. При цьому пружні пластини, через прорізи яких на кожному обороті валів проходять ножі іншого валу і нерухомі ножі корпусу, очищають всі ці ножі від стружки, що намоталася на них. Подрібнена стружка розвантажується через вікно корпусу. У разі попадання в корпус предметів (валків, прокату і т.д.) у гідромуфті приводу підвищується тиск масла, спрацьовує датчик, і електродвигун реверсується – вали починають обертатися у зворотному

напрямку. Після вилучення нездрібнюваного предмета та відновлення тиску олії в гідромуфті електродвигун перемикається і вали знову наводяться назустріч один одному.

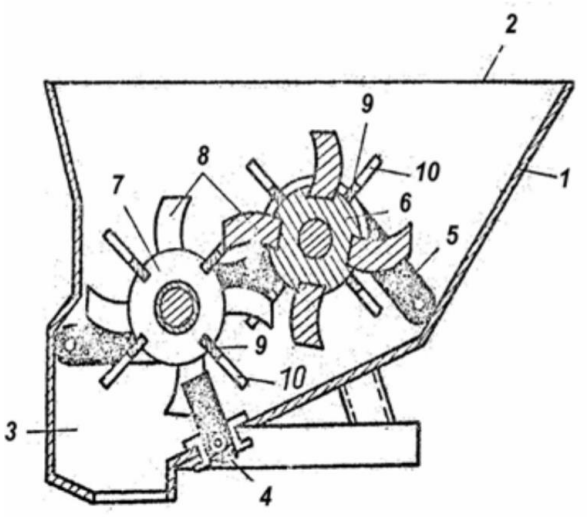


Рис. 1.13 Стружкодробарка: 1 – корпус; 2 – завантажувальне вікно; 3 – розвантажувальне вікно; 4, 5 – нерухомі ножі; 6, 7 – вали; 8 – рухомі ножі; 9 – пружні пластини; 10 – прорізи

Електропривод стружкодробарки працює в умовах колесопрокатного цеху АТ «ІНТЕРПАЙП Дніпропетровський втормет». Електропривод стружкодробарки нерегульований. В якості приводного двигуна встановлено двигун 4А112М4У3, потужністю 5,3 кВт.

Великі втрати виникають при роботі електропривода за рахунок його роботи в умовах неякісної електричної енергії, оскільки поруч встановлений потужний перетворювач, який є джерелом викиду в електричну мережу вищих гармонійних складових, що призводе до зниження техніко – економічних показників коефіцієнта корисної дії двигуна дробарки та коефіцієнта потужності останнього. Щоб частково уникнути вищезгаданих негативних факторів, та зменшити вплив неякісної електроенергії в свою чергу нами запропоновано модернізація електропривода дробарки, шляхом інтеграції в існуючу систему керування перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування.

Завдання роботи:

Провести оцінку втрат споживання електроенергії двигуном електропривода дробарки при роботі в умовах неякісної електричної енергії.

Провести модернізацію електропривода шляхом інтеграції в існуючу систему керування перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування.

Удосконалити електромагнітну модель асинхронного двигуна, що дозволе визначати його енергетичні показники при довільній зміні в часі якості електричної енергії;

Виконати розрахунок енергетичних показників асинхронного двигуна шляхом розв’язання системи диференціальних рівнянь заданих у формі Коші, які описують його роботу у часовій області відомим чисельним методом, а саме: методом Ейлера.

2 АНАЛІЗ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДРОБАРКИ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Вибір потужності електричного двигуна електропривода дробарки

2.1.1 Розрахунок потужності приводного двигуна

Вихідні дані для розрахунку:

Продуктивність Q = 2,5 $м^3/г$ для подрібнення металевої стружки, від початкового розміру $d_н$ = 2.80 мм до $d_к$ = 6.0 мм.

Таблиця 2.1 Параметри матеріалу

Межа міцності руйнованого матеріалу на стиснення $\sigma_{сж}$, Па	Модуль пружності руйнованого матеріалу E, Па	Насипна щільність початкового матеріалу ρ, $кг/м^3$	Коефіцієнт розпушування матеріалу μ
$150 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-10}$	2800	0,3

Визначимо ступінь подрібнення матеріалу:

$$i = \frac{d_н}{d_к} = \frac{28.0}{6.0} = 4.667 \qquad (2.1)$$

Визначимо кут захоплення:

Щоб шматки матеріалу не викидалися з пасти дробарки, кут захоплення повинен бути менше кута тертя.

По практичних рекомендаціях приймають кут захоплення $\alpha = 20^\circ$

Визначимо робочу частоту ексцентрикового валу:

$$n = 0{,}5 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot tg\alpha}{2 \cdot s}}, \text{ об/с}, \qquad (2.2)$$

де g – прискорення вільного падіння, $м/с^2$;

S – величина ходу рухомої щоки, м.

$S = 0{,}008 + 0{,}25 \cdot d_к$, м, (2.3)

$S = 0{,}008 + 0{,}25 \cdot 0{,}06 = 0{,}027$ м

$n = 0{,}5 \cdot \sqrt{\frac{9{,}8 \cdot tg20}{2 \cdot 0{,}0236}}$ = 4,025 об/с · 60 = 241 об/хв.

Враховуючи наявність гальмування матеріалу між щоками, число оборотів зменшуємо на 10%.

N = n – (nX0,1)

N =241 – (241 X0,1)=235 об/хв. = 4 об/с.

Остаточно приймаємо n =235 об/хв.

Визначимо геометричні розміри камери дроблення:

Визначимо ширину завантажувального отвору:

$B = d_н + (0{,}3X\ d_н)$, мм (2.4)

B = 28.0 + 0,3X28.0 = 33.6 мм

Остаточно приймаємо B = 33.0 мм

визначимо висоту камери дроблення:

$H = \frac{B - a'}{tg\alpha}$, мм (2.5)

$a' = \frac{2 \cdot d_K - S}{2}$, мм

$a' = \frac{2 \cdot 60 - 27}{2} = 46$ мм

$H = \frac{440 - 46}{tg20} = 1075.$ мм

Зазвичай висота камери дроблення в 2 ч 2,5 разу перевищує ширину завантажувального отвору.

H = B·(2 X 2,5) = 660 X 1100 =0,6 мм

Остаточно приймаємо висоту камери дроблення H = 1000 мм.

Визначимо довжину завантажувального пристрою з формули продуктивності:

$$Q = d_{cp} L n k_p \frac{S}{tg\alpha}, \text{ м}^3/\text{год} \qquad (2.6)$$

$$L = \frac{Q \cdot tg\alpha}{n \cdot d_{cp} \cdot S \cdot k_p},$$

де $к_р$ – коефіцієнт розпушування.

Виходячи з практичних рекомендацій приймають:

$к_р$ =0,25X0,6

Вважаємо, що при відведенні рухомої щоки з дробарки випадають шматки розміром d_{min}= a, d_{max} = a+ S тоді середній розмір випадаючих шматків:

$$d_{cp} = \frac{2a + S}{2}$$

$$d_{cp} = \frac{2 \cdot 6.0 + 2.36}{2} = 7.0 \text{ мм}$$

$$L = \frac{0{,}0042 \cdot 0{,}364}{4 \cdot 0{,}07 \cdot 0{,}027 \cdot 0{,}3} = 76.7 \text{ мм}$$

Спираючись на геометричні розміри дробарок в стандартному ряді найближче значення L = 900 мм. Обираємо стандартну дробарку з параметрами 600X900.

Визначимо потужність дробарки:

а) визначимо потужність щокової дробарки по формулі Левінсона:

$$N = \frac{k_{пр} \cdot \sigma_{сж}^2 \cdot \pi \cdot b \cdot L \cdot n}{12 E \eta} \left(D_{cp} - d_{cp} \right) \qquad (2.7)$$

де $k_{пр}$ – коефіцієнт пропорційності, що враховує зміну міцності матеріалу із зміною шматків, $k_{пр} = 1$;

b – поправочний коефіцієнт, що враховує, що число шматків, що укладаються по довжині камери, не повинно бути дробом. Оскільки для дробарки розміром 600Х900 довжина камери рівна 900;

η – ККД приводу, η = 0,85;

$D_{ср}$ – середня величина шматка, що поступає в дробарку.

$D_{ср} = 0,5 \cdot d_н = 0,5 \cdot 0,28 = 0,07$ м.

$d_{ср}$ – середня величина шматка подрібненого в дробарці.

$d_{ср} = 0,5 \cdot d_к = 0,5 \cdot 0,06 = 0,03$ м.

L – довжина завантажувального пристрою, м;

n – число оборотів ексцентрикового валу, об/с;

n = 4 об/с;

$D_{ср}$ = 0,07 м, при цьому L/ $D_{ср}$ = 2,33. Фактично можуть поміститися 5 шматків → b = 5 / 2,33= 2,1.

$$N1 = \frac{1 \cdot \left(15.0 \cdot 10^6\right)^2 \cdot 3,14 \cdot 2,1 \cdot 2,1 \cdot 4}{12 \cdot 4 \cdot 10^{10} \cdot 0,85}\left(0,07 - 0,03\right) = 3.9 \text{ кВт}$$

б) Визначимо потужність дробарки по формулі Кирпичева-Кирка:

$$N = \frac{\sigma_{сж}^2 \cdot \pi \cdot L}{12E\eta}\left(d_н^2 - d_к^2\right) \cdot n \qquad (2.8)$$

$$N2 = \frac{\left(15.0 \cdot 10^6\right)^2 \cdot 3,14 \cdot 2,1}{12 \cdot 4 \cdot 10^{10} \cdot 0,85} \cdot \left(0,39^2 - 0,06^2\right) \cdot 4 = 3.25 \text{ кВт}$$

в) визначимо потужність щокової дробарки по формулі Баумана:

$$N = \frac{735 \cdot 10^3 \cdot S_н \cdot n \cdot L \cdot H}{\eta} \qquad (2.9)$$

де $S_н$ – величина ходу щоки, м

$$N3 = \frac{73.5 \cdot 10^3 \cdot 0,027 \cdot 4 \cdot 2,1 \cdot 1}{0,85} = 7.35 \text{ кВт}$$

по питомим енерговитратам масова продуктивність складе:

$$Q_m = \frac{Q \cdot \rho_н}{1000}, \text{ т/г} \qquad (2.10)$$

$$Q_m = \frac{25 \cdot 2800}{1000} = 3.75 \text{ т/год}$$

Питомі витрати енергії на 1 т матеріалу приймаємо U_d=1,2 кВт. Тоді потужність, яку споживає дробарка складе:

$$N4 = Q_m \cdot 1,2, \text{ кВт} \qquad (2.11)$$

$$N4 = 3.75 \cdot 1,2 = 4.5 \text{ кВт.}$$

Потужність необхідного електродвигуна визначається з обліком ККД приводу:

$$N4 = \frac{N4}{\eta}, \text{ кВт} \qquad (2.12)$$

$$N4 = \frac{4.5}{0,85} = 5.29 \text{ кВт}$$

Необхідна потужність двигуна, в середньому:

$$N_{ср} = \frac{N1 + N2 + N3 + N4}{4}, \text{ кВт} \qquad (2.13)$$

$$N_{ср} = 4.14 \text{ кВт}$$

Спираючись на результат, вибираємо із стандартного ряду електродвигун потужністю N = 5,5 кВт, 4А112М4У3.

Таблиця 2.1 Параметри обраного двигуна

Тип електродвигуна	$P_{2ном}$, кВт	Енергетичні показники		Параметри схеми заміщення, відн. Од.							
		ККД, %	Cosφ	X_μ	В номінальному режимі				При короткому замиканні		
					$R`_1$	$X`_1$	$R``_2$	$X``_2$	$R``_{2п}$	$R_{кп}$	$X_{кп}$
4А112М4У3	5,5	85,5	0,85	2,8	0,064	0,078	0,041	0,13	0,048	0,11	0,14

Значення параметрів схеми заміщення наведені у відносних одиницях:

$$X=x\cdot I_{1ном,ф}/U_{1ф};$$
$$R=r\cdot I_{ном1,ф}/U_{1ф}, \qquad (2.14)$$

де *X, R* — опір у відн. од.; *x, r* — опір у Ом; $I_{1ном,ф}$—номінальний фазний струм статора А ; $U_{1ф}$—номінальна фазна напруга, В.

Переведемо значення опорів з відносних одиниць в Ом.

Опори X_1 й R_1можуть бути знайдені по наступних формулах:

$$X_1 \approx \frac{2X'_1X_\mu}{X_\mu+\sqrt{X_\mu^2+4X'_1X_\mu}}=\frac{2\cdot 0.078\cdot 2.8}{2.8+\sqrt{2.8^2+4\cdot 0.078\cdot 2.8}}=0.075\text{Ом} \qquad (2.15)$$

$$R_1=R'_1X_1/X'_1=0.064\cdot 0.078/0.075=0.066\text{Ом} \qquad (2.16)$$

Номінальний фазний струм статора визначається по формулі:

$$I_{1ном,ф}=P_{2ном}/3U_{1ф}\eta\cos\varphi=\frac{5500}{3\cdot 220\cdot 0.855\cdot 0.85}=11.46\text{A} \qquad (2.17)$$

$$x_2''=XU_{1ф}/I_{1ном,ф}=0.13\cdot 220/11.46=2.49\text{Ом};$$
$$r_2''=RU_{1ф}/I_{ном1,ф}=0.041\cdot 220/11.46=0.78\text{Ом},$$

2.2 Моделювання роботи асинхронного двигуна при використанні електроенергії зниженої якості

Моделювання електромеханічних систем, як відомо, дозволяє на передпроектній стадії оцінити процеси, що протікають в них. На основі цих даних можуть бути скоректовані параметри силових установок і систем управління ними. Для асинхронного електродвигуна як такого все це перестало бути проблемою з появою спеціалізованого програмного забезпечення (т.з. CAD-программ). Воно дозволяє будувати графіки перехідних процесів, отримувати залежності необхідних параметрів від вхідних чинників і так далі.

Проте, ситуація ускладнюється, коли необхідно враховувати якісні показники вхідної напруги, такі як несиметрія і несинусоидальность. Проблема полягає в тому, що сама модель в цьому випадку стає часто неадекватною через прийняті допущення. У разі ж використання складніших аналогів, опис процесів настільки ускладнюється, що пошук необхідних залежностей стає взагалі неможливим.

Відомо декілька підходів, що дозволяють врахувати параметри живлячої напруги при моделюванні процесів в електромеханічних системах [31]. Так при несинусоїдальності живлячої напруги в класичному варіанті виконується його спектральний аналіз, потім необхідні рівняння записуються для кожної гармоніки з урахуванням її амплітуди і фази. Ці рівняння зважаться аналітично або чисельно, а шукана величина знаходиться як геометрична сума всіх гармонійних складових.

У разі несиметрії живлячої напруги використовується метод симетричних складових. Недоліком такого підходу є істотне ускладнення системи рівнянь, що описують об'єкт. Крім того, у разі несинусоїдального живлення необхідно визначати симетричні складові для кожної гармоніки, що враховується. Тоді, у випадку якщо останніх буде, наприклад, 10 при несиметричному живленні, для

кожного базового рівняння, що описує систему, потрібно скласти вже 30 рівнянь. Для спрощення ж їх запису, пропонується використовувати диференціальні рівняння, записані щодо просторово-часових комплексів (ПЧК) [21].

Просторово-часовий комплекс, т.з. узагальнений вектор, для будь-якої величини *Y*, що змінюється, розраховується таким чином:

$$Y = \frac{2}{3}\left(Y_A + \alpha Y_B + \alpha^2 Y_C\right), \qquad (2.18)$$

де Y_A, Y_B, Y_C – значення даної величини по фазах. Проекції цього комплексу на осі фаз відповідають вказаним значенням.

Записані відносно ПЧК рівняння Парка– Горева [29], що є основою відомих моделей АД, мають вигляд:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt}, \qquad (2.19)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt} - j\omega_m \underline{\psi}_2, \qquad (2.20)$$

де $\underline{U}_1$ - ПЧК напруги статора, $\underline{I}_1, \underline{I}_0, \underline{I}_2$ - ПЧК струмів статора, ротора, і струму намагнічення, $\underline{\psi}_1, \underline{\psi}_2$ - ПЧК потокозчеплень статора і ротора, ω_m - кутова швидкість обертання АД, R_1, R_0, R_2 - активні опори статора і ротора.

Структурна схема об'єкту моделювання, що відображає рівняння (2.19), (2.20), представлена на рисунку 2.1.

Використання просторово-часових комплексів характерне для багатьох моделей. Оскільки в них враховуються миттєві значення струмів і напруги, відпадає необхідність спектрального аналізу і запису рівнянь для кожної гармоніки. Крім того, оскільки такі рівняння фактично є згорнутим записом всіх трьох фаз, в них враховується і можлива несиметрія живлячої напруги. Дана система є, фактично, універсальною моделлю, що дозволяє аналізувати

процеси як в сталих, так і в перехідних режимах (пуск, вибігання, зміна навантаження).

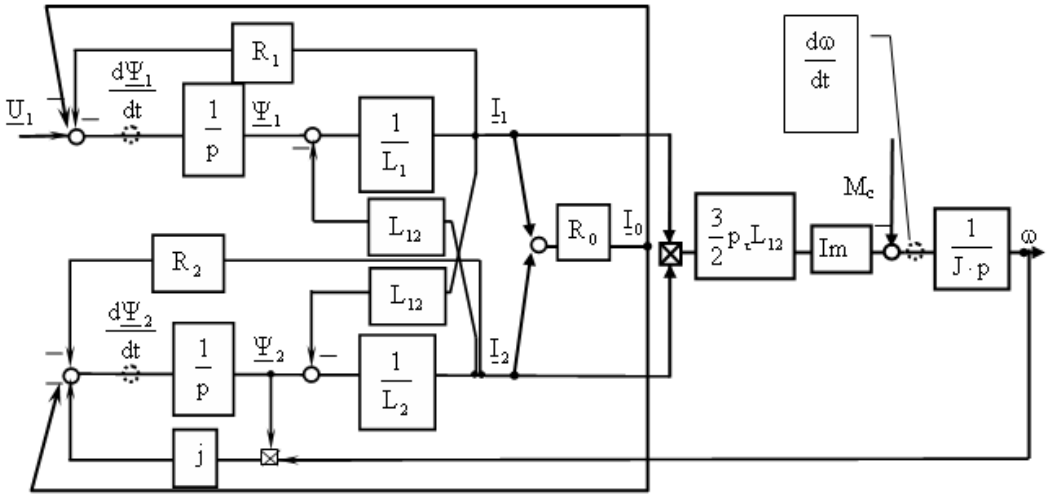


Рисунок 2.1 - Структурна схема асинхронного двигуна як об'єкту моделювання

Аналітичне вирішення системи рівнянь (2.19), (2.10) утруднено і пов'язано з поряд істотних допущень [21]. У таких випадках удаються до відомих чисельних методів, суть яких зводиться до уявлення нескінченно малих приростів шуканої функції деякими кінцевими приростами (метод Ейлера) і представленням рівнянь у формі Коші [32].

Змінними стану модельованого об'єкту в даному випадку є швидкість асинхронного двигуна, а також просторово-часові комплекси потокосчеплення статора і ротора. Для знаходження останніх початкова система рівнянь доповнена відомими залежностями:

$$\underline{\psi}_1 = \underline{I}_1 L_1 + \underline{I}_2 L_{12}, \tag{2.21}$$

$$\underline{\psi}_2 = \underline{I}_2 L_2 + \underline{I}_1 L_{12}, \tag{2.22}$$

$$M = \frac{3}{2} p_\tau \; L_{12} \operatorname{Im}(\underline{I}_1 \cdot \underline{I}_2), \tag{2.23}$$

$$M - M_C = J \frac{d\omega_m}{dt}, \tag{2.24}$$

де M_c – момент статичний; J – момент інерції механічної частини приводу; p_τ – число пар полюсів.

Визначення енергетичних показників при несинусоїдальній напрузі живлення в динамічних режимах має важливе значення при проектуванні машин, що працюють в автономних системах з напівпровідниковими перетворювачами. Слід мати на увазі, що і напруга мережі часто в деяких її ділянках – несиметричне і відрізняється від синусоїди.

Уявлення про енергетичні показники при несинусоїдальній несиметричній напрузі живлення значно ускладнюється в порівнянні з ідеальною машиною. Модель для цього випадку виходить з моделі узагальненого перетворювача, якщо уявити, що на статорі і роторі є однакове число обмоток m, що не мають в ненасиченій машині між собою зв'язки. При цьому враховується тільки форма живлячої напруги, а машина вважається ідеальною і не вносить до зазору просторових гармонік.

Електромагнітний момент визначається по схемі з m статорами або m статорами і загальним ротором (рисунок 2.2). Схема рисунку 2.2 дозволяє враховувати пульсуючі моменти від творів струмів різних частот. Проте в перехідних процесах не облік пульсуючих складових дає погрішність в опредеоении ударних моментів і часу перехідного процесу в межах 10-15%.

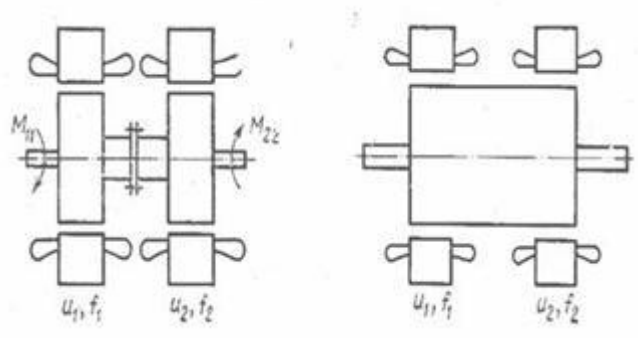


Рисунок 2.2 – Схема машини для визначення електромагнітного моменту з m статорами та m роторами

При несинусоїдальній напрузі на затисках машини прийнято повну потужність (S) представляти у вигляді :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}\,, \qquad (2.25)$$

де P - активна потужність;

Q – реактивна потужність;

T – потужність спотворення .

Це уявлення справедливе і для динамічних режимів.

За умови, що ротор короткозамкнутий, з моделі узагальненого електромеханічного перетворювача для несинусоїдального живлення активна потужність:

$$P = u_{1\alpha}i_{1\alpha} + u_{1\beta}i_{1\beta} + u_{2\alpha}i_{2\alpha} + u_{2\beta}i_{2\beta} + ... + u_{m\alpha}i_{m\alpha} + u_{m\beta}i_{m\beta}\,, \qquad (2.26)$$

Реактивна потужність:

$$Q = u_{1\alpha}i_{1\alpha} - u_{1\beta}i_{1\beta} + u_{2\alpha}i_{2\alpha} - u_{2\beta}i_{2\beta} + ... + u_{m\alpha}i_{m\alpha} - u_{m\beta}i_{m\beta}\,, \qquad (2.27)$$

Потужність спотворення визначається перемноженням всіх пар напруги і струмів, що залишилися:

$$\begin{aligned} T = {} & u_{1\alpha}i_{2\alpha} + u_{1\beta}i_{2\beta} + ... + u_{1\alpha}i_{m\alpha} + u_{1\beta}i_{m\beta} + ... + u_{m\alpha}i_{1\alpha} + u_{m\beta}i_{m\beta} + ... + \\ & + u_{m-1\alpha}i_{m\alpha} + u_{m-1\beta}i_{m\beta} + u_{1\beta}i_{2\alpha} + ... + u_{1\alpha}i_{m\beta} + u_{1\beta}i_{m\alpha} + ... + u_{m\alpha}i_{1\beta} + u_{m\beta}i_{1\alpha} + ... + \\ & + u_{m-1\alpha}i_{m\beta} + u_{m-1\beta}i_{m\alpha} \end{aligned} \qquad (2.28)$$

Таким чином, в рівнянні для визначення потужності спотворення входять пари напруги і струмів по одній осі і по різних осях. У цьому сенсі потужність спотворення має активну і реактивну складові. Потужність спотворення визначається перебором творів струмів і напруги різних частот. Ці складові не створюють моменту, що обертається, але побічно беруть участь в процесі перетворення енергії в електричній машині, збільшуючи втрати – перетворення електроенергії в теплоту. У динаміці потужність спотворення витрачається на

створення пульсуючих моментів і на покриття частини електричних і магнітних втрат (частини т.з. додаткових втрат).

При такому розгляді процесів перетворення енергії в моделі машини беруть участь всілякі комбінації пар струмів і напруги, створюючи активну, реактивну частини загальної потужності і потужність спотворення.

При несиметричній несинусоїдальній напрузі представляють кожну гармоніку що складається з прямої і зворотної послідовностей. При цьому модель машини залишається колишньою, і у виразах для визначення активної і реактивної потужності і потужності спотворення з'являються нові пари творів, струмів і напруги.

Для визначення середніх за період енергетичних показників при несинусоїдальній напрузі живлення в перехідних процесах період вибирається рівним періоду першої гармоніки в сталому режимі.

Загальний вираз активній потужності для її середнього значення:

$$P_C(t) = \sum_{k=1}^{m} 1/T \int_{1}^{1+T} P(t)dt = \sum_{k=1}^{m} 1/T \int_{1}^{1+T} (u_{0k} + u_{1k} + ... + u_{nk} + ...)(i_{0k} + i_{1k} + ...i_{nk} + ...) = \sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} 1/T \int_{t}^{1+T} u_{nk} i_{nk} dt + \sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} 1/T \int_{m}^{1+T} u_{nk} i_{nk} dt = \sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} 1/T \int_{0}^{1+T} u_{nk} i_{nk} dt = \sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} P_{nk} \quad , \qquad (2.29)$$

З (2.29) витікає, що середня за період активна потужність рівна сумі активних потужностей постійної і всіх гармонійних складових.

Середній за період коефіцієнт потужності:

$$k_m(t) = \frac{P_C(t)}{\sum_{k=1}^{m} U_{nk} I_{nk}} = \frac{\sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} P_{nk}}{\sum_{k=1}^{m} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2} \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}}, \qquad (2.30)$$

де U_{nk}, I_{nk} – поточні значення n-х гармонік напруги і струму, що діють, у фазі «*k*». Вони визначаються як середні квадратичні значення за період основної гармоніки:

$$U_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_{nk}^2}\,, \tag{2.31}$$

$$I_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}^2}\,, \tag{2.32}$$

де $U_{nk}^2 = 1/T\int_0^T u_{nk}^2(t)dt$; $I_{nk}^2 = 1/T\int_0^T i_{nk}^2(t)dt$.

Середні за період коефіцієнт потужності і ККД дозволяють при проектуванні врахувати енергоспоживання в перехідних процесах і правильно вибрати геометрію електричної машини.

Середній коефіцієнт потужності для ланцюга з лінійним активним опором $k_{мс}(t) = 1$, в решті випадків $k_{мс}(t) < 1$.

Для режиму двигуна в перехідному режимі при несинусоїдальній напрузі доцільно говорити про середній ККД за період як відношенні середньої механічної потужності на валу до активної потужності, споживаної з мережі:

$$\eta_C(t) = \frac{P_{2C}(t)}{P_C(t)}, \tag{2.33}$$

де $P_{2C}(t) = T^{-1}\int_t^{1+T} P_2(t)dt = \omega_r T^{-1}\int_t^{1+T} M_Э(t)dt$.

Середні за період коефіцієнт потужності і ККД - енергетичні показники електричної машини при несинусоїдальній напрузі перехідних процесах. Знаючи ці показники, можна раціонально проектувати електричні машини, що працюють в динамічних режимах, використовуючи методики проектування в сталих режимах, правильно визначати необхідність регулювання напруги і частоти в електроприводах, що працюють при навантаженні, що змінюється.

Середні за період коефіцієнт потужності і ККД при несинусоїдальній напрузі менше, ніж в сталому режимі, і залежить від параметрів машини і характеру перехідного процесу.

При несинусоїдальній напрузі живлення вищі гармоніки напруги викликають додаткові втрати, спотворення, що характеризуються потужністю:

$$P_{un}(t) = U\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\sum_{n=0}^{\infty} I_{nk}(t)}\,. \qquad (2.34)$$

На збільшенні потужності при несинусоїдальній напрузі живлення позначається також несиметрія живлячої напруги. Потужність несиметрії:

$$P_{н}(t) = \sum_{\substack{k,q=1\\k\neq 1}}^{m}\sqrt{(P_{ck}(t) - P_{cq}(t))^2 + (q_{ck}(t) - q_{cq}(t))^2}\,. \qquad (2.35)$$

При несинусоїдальній несиметричній напрузі живлення повна потужність:

$$S_{c}(t) = \sqrt{(P_C^2(t) + q_C^2(t) + P_{un}^2(t) + P_{н}^2(t)}\,. \qquad (2.36)$$

Коефіцієнт фазового зрушення характеризет ступінь зсуву основної гармоніки струму щодо основної гармоніки напруги:

$$k_C(t) = \frac{P_C(t)}{\sqrt{P_C^2(t) + q_C^2(t)}}\,. \qquad (2.37)$$

У сталому режимі це коефіцієнт фазового зрушення і має сенс $cos\ \varphi_{ср}$.

Коефіцієнт спотворення:

$$k_u(t) = \sqrt{\frac{I_1^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_k^2}}, \qquad (2.38)$$

де I_1– значення першої гармоніки струму, що діє; $I_к$ - значення *к-й* гармоніки, що діє.

Коефіцієнт несиметрії, що характеризує несиметричну розподілу навантаження по фазах:

$$k_н(t) = \frac{E_1(t)}{E_2(t)}. \qquad (2.39)$$

Тоді коефіцієнт потужності:

$$k_m(t) = k_C(t)k_u(t)k_n(t). \qquad (2.40)$$

Коефіцієнт нелінійних спотворень $k_{нu}(t) = k_u(t)k_n(t)$ дозволяє судити про сумісний вплив на коефіцієнт потужності спотворення форми струмів і несиметрії напруги.

Якщо провести порівняння процесів перетворення енергії в простій машині при синусоїдальній і несинусоїдальній напрузі живлення, то слід зазначити, що при тому ж моменті на валу споживання електроенергії при несинусоїдальній напрузі більше, ніж при синусоїдальній напрузі. В більшості випадків зниження ККД із-за несинусоїдальності складає 10-15%.

Погіршення енергетичних показників можна оцінити коефіцієнтом спотворення K_u, який характеризує вплив вищих гармонік на додаткові втрати. Збільшення втрат при несинусоїдальній напрузі характеризується потужністю спотворення, що враховує потужності всіх гармонік, окрім першої:

$$P_u(t) = U_{nk}\sqrt{\sum_{k=1}^{m}\sum_{n=2}^{\infty} I_{nk}}. \qquad (2.41)$$

Значний вплив на процеси перетворення в електромеханічних перетворювачах надає: насичення, нелінійності інших параметрів, електрична і магнітна несиметрія і ін. Всі вони впливають на форму поля в повітряному зазорі машини. Тому доцільно ввести поняття коефіцієнта спотворення ($K_и$), що враховує декілька чинників, що впливають на зниження енергетичних характеристик машини.

Коефіцієнт спотворення поля в повітряному зазорі $K_и$ можна визначити як відношення корисної потужності на валу при несинусоїдальному магнітному полі в повітряному зазорі машини ($P_{2пн}$) до корисної потужності при круговому полі ($P_{2пк}$):

$$K_и = \frac{P_{2ПН}}{P_{2ПК}}. \qquad (2.42)$$

Коефіцієнт спотворення завжди менше одиниці і залежить від параметрів машини і незалежних змінних в рівняннях, а також від часу і характеру протікання перехідних процесів.

Знаючи $K_и$ і динамічні показники машини при круговому полі в повітряному зазорі, можна визначити енергетичний коефіцієнт за період:

$$K_Э = ККД_{дп} K_{МП} K_{ИП}, \qquad (2.43)$$

де $K_{дп}$ – ККД динамічний за період; $K_{МП}$ - коефіцієнт потужності за період; $K_{ИП}$ - коефіцієнт спотворення за період.

Енергетичний коефіцієнт за час перехідного процесу:

$$K_{ЭПП} = ККД_{ДПП} K_{МПП} K_{ИПП}. \qquad (2.44)$$

Знаючи середнє значення коефіцієнтів спотворення за період і за час перехідного процесу, можна визначити $K_{ПДД}$ і $K_{мд}$ для більшості режимів електричних машин.

Коефіцієнти спотворення в більшості практичних випадків, що зустрічаються в електромеханіці, змінюються в межах:

$$1 > K_u > 0{,}5$$

Коефіцієнт спотворення для більшості електромеханічних систем, що зустрічаються в практиці, може бути определн достатньо швидко і точно.

При $K_u = 1$ процеси електромеханічного перетворення відбуваються в ідеальній машині. $K_u = 0$ – в багатовимірній, багатофазній машині коли вся електрична енергія в руховому режимі перетвориться в тепло. Таку машину можна представити, коли рідкий кульовий ротор має m - фазну несиметричну систему статора. Обидва крайні випадки можуть існувати лише в нашій уяві, оскільки не буває ідеальних машин, а багатовимірні багатофазні машини з нелінійними коефіцієнтами і несинусоїдальним живленням можна представити лише нескінченним числом рівнянь.

У перехідних режимах, також, як і в сталому режимі на процеси електромеханічного перетворення енергії впливають енергетичні показники ЕП, їх визначення має важливе значення при проектуванні електричних машин, що працюють в динамічних режимах.

2.3 Реалізація моделі АД при довільній напрузі живлення

2.3.1 Постановка задачі дослідження

Власники електроустановок останнім часом все частіше стикаються з новою серйозною проблемою. Її суть в тому, що мережі електропостачання

«заражені» вищими по відношенню до промислової частоти (50 Гц) гармоніками.

У випадках, коли потужність нелінійних електроспоживачів не перевищує 10-15%, яких-небудь особливостей в експлуатації системи електропостачання, як правило, не виникає. При перевищенні вказаної межі слід чекати появи різних проблем в експлуатації і наслідків, причини яких не є очевидними. У будівлях, що мають частку нелінійного навантаження понад 25%, окремі проблеми можуть виявитися відразу.

Найбільш поширеним устаткуванням, що генерує вищі гармоніки струму в мережу, є:

- комп'ютерні мережі;

- статичні перетворювачі (випрямлячі, системи безперебійного живлення, регулятори тиристорів, імпульсні джерела живлення і так далі);

- газорозрядні освітлювальні пристрої і електронні баласти;

- печі електродуг постійного і змінного струму;

- зварювальні апарати;

- пристрої з електромагнітними елементами, що насищаються;

- електродвигуни змінного струму з регульованою швидкістю обертання;

- спеціальні медичні прилади і так далі.

Ефект гармонік кратних трьом

Вищі гармоніки струму кратні трьом (тобто 3, 9, 15, 21 і т. д.), визначають високе значення коефіцієнта амплітуди, що генеруються однофазними навантаженнями, мають специфічну результуючу дію в трифазних системах. У збалансованій (симетричною) трифазній системі гармонійні (синусоїдальні) струми у всіх трьох фазах зрушені на 120 градусів по відношенню один до одного, і в результаті сума струмів в нейтральному провіднику рівна нулю. Отже, не виникає і падіння напруги на провіднику нейтралі в кабелі.

Це твердження залишається справедливим для більшості гармонік. Проте деякі з них мають напрям обертання вектора струму в ту ж сторону, що і основна гармоніка (перша, "фундаментальна", тобто 50 Гц), тобто вони мають

пряму послідовність. Інші ж обертаються у зворотному напрямі і, таким чином, мають зворотну послідовність. Це не відноситься до гармонік, кратних третьою.

У трифазних ланцюгах вони зрушені на 360 градусів один до одного, співпадають по фазі і утворюють нульову послідовність. Непарні гармоніки, кратні трьом, підсумовуються в провіднику нейтралі. В результаті, з урахуванням того, що вони складають велику частку в значенні фазних струмів, що діє, загальний струм в нейтралі може перевищувати фазні струми.

Так, наприклад, при фазних струмах рівних 37 А, струм нейтралі складає 55 А при частоті, рівній 150 Гц. Неправильно спроектовані чотирипровідні кабелі трифазних мереж можуть перегріватися аж до займання, підтверджуючи тим самим необхідність збільшення перетину провідників нейтралі трифазних кабелів мережі електроживлення комп'ютерного устаткування. Гармоніки, кратні трьом, призводять до падінь напруги як в нейтралі, так і у фазних провідниках, викликаючи спотворення форми напруги на інших навантаженнях, підключених до цієї мережі.

Негативна дія вищих гармонік

Вищі гармонійні складові в струмах нелінійних електроспоживачів призводять до негативних, а іноді і катастрофічних наслідків.

1. Резонансні явища на частотах вищих гармонік

За наявності вищих гармонік в електричних ланцюгах із зосередженими і розподіленими параметрами, якими можуть бути представлені блоки, вузли і розподільні мережі системи електроживлення, виникає небезпека появи резонансних явищ. При виникненні резонансного або близького до нього режиму на якій-небудь вищій гармоніці струму або напруги ця складова виявляється більше, ніж амплітудне значення першої гармоніки струму (напруга) на тих же ділянках ланцюга. Це негативним чином може відбитися на працездатності окремих елементів і вузлів системи.

2. Можливий перегрів і руйнування нульових робочих провідників кабельних ліній унаслідок їх перевантаження струмами третьої гармоніки. Це відбувається тоді, коли струми в нульових робочих провідниках значно

перевершують струми фазних провідників, а захист від струмових перевантажень в ланцюгах нульових провідників не передбачений. Відзначимо також прискорене старіння ізоляції при підвищенні робочої t_0 струмопровідних провідників.

Нульовий робочий провідник не захищений від перегріву автоматичними вимикачами або запобіжниками. «Старі» системи електропостачання проектувалися тільки під лінійне навантаження, тобто споживаний електроприймачами струм містив лише основну гармоніку (50 Гц). Отже, струм в нульовому робочому провіднику не міг перевершувати струм в найбільш навантаженій фазі, тобто захист на фазних провідниках одночасно захищав від перегріву і нульовий робочий провідник.

Крім того, в процесі експлуатації нерівномірність розподілу струмів по фазах повинна бути не більше 10%. Тому при визначенні тривало допустимих струмів за умовами нагріву проводів і кабелів нульовий робочий провідник чотирипровідної системи трифазного струму, заземляючі і нульові захисні провідники в розрахунок не приймаються, оскільки струм в цих провідниках за наявності лінійних електроспоживачів істотно менше струмів у фазних провідниках.

3. Спотворення синусоїдальності живлячої напруги. Наслідком характеру струму, споживаного імпульсним навантаженням, є деформація синусоїди напруги, навантаження, що діє на затисках. Синусоїда напруги стає «плоскою», оскільки у момент імпульсу струму збільшується падіння напруги на внутрішньому опорі мережі.

Якщо припустити, що опір мережі щодо затисків кожного окремого електроспоживача рівний нулю, то спотворення синусоїдальності напруги не існувало б. У реальності мережа для будь-якого електроспоживача є якимось опором. Несинусоїдальні струми, протікаючи по цьому опору, викликають падіння напруги на ньому. В результаті на затисках нелінійного електроспоживача, а також на затисках решти всіх електроспоживачів, включених паралельно йому, з'являється несинусоїдальна напруга, зазвичай -

«плоска» синусоїда. «Плоска» синусоїда, впливаючи на імпульсне джерело живлення, знижує рівень випрямленої напруги; збільшує тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення; знижує стійкість до короткочасних провалів напруги.

Зниження рівня випрямленої напруги. Деформація синусоїди живлячої напруги призводить до зниження значення амплітуди вхідної напруги, внаслідок цього знижується напруга на конденсаторі.

Зниження рівня напруги на конденсаторі, з якого здійснюється живлення високочастотного перетворювача, а далі і ланцюгів постійного струму, повинно було б привести до зниження рівня випрямленої напруги. Але в більшості імпульсних джерел живлення передбачена система стабілізації вихідної напруги, наприклад методом широко-імпульсного регулювання. Зниження рівня вхідної напруги в допустимих межах не викличе зниження рівня вихідної постійної напруги.

Збільшення тепловиділення в елементах імпульсного джерела живлення. При методі широко-імпульсного регулювання зниження вхідної напруги викличе збільшення тривалості імпульсів струму високочастотного перетворювача по відношенню до тривалості пауз. Це означає збільшення струму, споживаного високочастотним перетворювачем, в середньому за період і збільшення швидкості розряду конденсатора. Більший струм, споживаний високочастотним перетворювачем, збільшує теплові втрати в елементах імпульсного джерела живлення. Так, зниження вхідної напруги на 10% викличе збільшення струму на 11%, а теплових втрат - на 23%.

Зниження стійкості до короткочасних провалів напруги. У разі провалу або навіть повного зникнення напруги на затисках імпульсного джерела живлення, ланцюги постійного струму можуть продовжувати свою нормальну роботу протягом деякого, дуже короткого проміжку часу. Енергія, необхідна для роботи протягом цього проміжку часу, - це енергія згладжуючого конденсатора. Не дивлячись на те, що цей конденсатор володіє вельми великою

ємкістю, енергія, що запасається ним, залежить ще і від напруги, до якої він був спочатку заряджений.

При синусоїдальній формі кривої живлячої напруги конденсатор може заряджати до напруги більшого, ніж він може заряджати при «плоскій» формі живлячої напруги. У такому разі запасеній в конденсаторі енергії може не вистачити для підтримки нормальної роботи ланцюгів постійного струму до моменту відновлення живлячої напруги при його короткочасному провалі або зникненні.

4. Гармоніки, що генеруються нелінійним навантаженням, створюють додаткові втрати в трансформаторах. Ці втрати можуть привести до значних втрат енергії і бути причиною виходу з ладу трансформаторів унаслідок перегріву.

Протікання по обмоткам трансформатора несинусоїдальних струмів, унаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості, приводить до збільшення активного опору обмоток трансформатора і, як наслідок, до додаткового нагріву. Термін служби трансформатора залежить від нагріву його частин і не дозволяє при несинусоїдальному струмі використовувати трансформатор на всю його номінальну потужність, її доводиться занижувати. Наприклад, повне завантаження трансформатора може наступити при використанні лише 80% номінальній потужності, вказаній в його паспортних даних.

Якщо не враховувати перевищення температури і спробувати використовувати трансформатор «відповідно до його номінальних даних, термін його служби цілком може скоротитися з 40 років до 40 днів.

Крім того, високочастотні гармоніки струму - це причина появи вихрових струмів в обмотках трансформатора, що викликає додаткові втрати потужності і перегрів трансформатора. Для лінійних навантажень втрати на вихрові струми складають в загальних втратах приблизно 5%, з нелінійним навантаженням вони іноді зростають в 15-20 разів.

5. В умовах несинусоїдальності струму погіршуються умови роботи батарей конденсаторів. Батареї конденсаторів призначені для компенсації

реактивної потужності навантаження, тобто для підвищення коефіцієнта потужності електроустановки будівлі.

Проте в умовах несинусоїдальності струму батареї конденсаторів одночасно є елементами, що абсорбують гармоніки зі всієї мережі, оскільки опір конденсатора обернено пропорційно до частоти. Батареї конденсаторів змінюють нормальний шлях гармонік струму від нелінійного споживача до джерела живлення, замикаючи частину цього струму через себе. Оскільки опори елементів мережі мають індуктивний характер, то при застосуванні установок компенсації реактивній потужності і наявності нелінійних електроспоживачів з'являється вірогідність прояву резонансних явищ (як по струму, так і по напрузі) на окремих елементах системи електропостачання.

6. Скорочення терміну служби електроустаткування із-за інтенсифікації теплового і електричного старіння ізоляції. При робочих t_0 в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, що приводять до поступової зміни їх ізоляційних і механічних властивостей. Із зростанням t_0 ці процеси прискорюються, скорочуючи термін служби устаткування. У конденсаторах втрати енергії пропорційні частоті, тому несинусоїдальний струм приводить до їх додаткового нагріву. У електричних машинах струми нульової послідовності створюють додаткове підмагнічування сталі, що призводить до погіршення їх характеристик і додаткового нагріву сердечників (статори асинхронних двигунів, магнітопроводи трансформаторів).

Суть електричного старіння - у виникненні так званих часткових розрядів, які розповсюджуються лише на частину ізоляційного проміжку, наприклад, часткові розряди в газових включеннях. Часткові розряди пов'язані з розсіянням енергії, наслідком якого є електрична, механічна і хімічна дії на навколишній діелектрик. В результаті розвиваються місцеві дефекти в ізоляції, що приводить до скорочення терміну служби.

7. Необгрунтоване спрацьовування запобіжників і автоматичних вимикачів унаслідок додаткового нагріву внутрішніх елементів захисних

пристроїв. Цей процес обумовлений протіканням несинусоїдальних струмів і, отже, дією поверхневого ефекту і ефекту близькості.

8. Прискорене старіння ізоляції проводів і кабелів. Старіння ізоляції провідників і кабелів обумовлене протіканням несинусоїдального струму, що приводить до підвищеного нагріву зовнішньої поверхні жил кабелю унаслідок поверхневого ефекту і ефекту близькості.

9. Перешкоди в мережах телекомунікацій можуть виникати там, де силові кабелі і кабелі телекомунікацій розташовані відносно близько. Унаслідок протікання в силових кабелях високочастотних гармонік струму, в кабелях телекомунікацій можуть наводитися перешкоди. Магнітні поля вищих гармонік прямої і зворотної послідовності частково компенсують один одного, тому найбільший вплив на телекомунікації роблять гармоніки, кратні трьом. Чим вище порядок гармонік, тим більше рівень перешкод, наведених ними в телекомунікаційних кабелях.

10.Акустичний шум

У трансформаторах, дроселях і інших електромагнітних елементах вищі гармоніки струму, створюючи електродинамічні зусилля, викликають додаткові акустичні шуми.

11.Вібрація в електромашинних системах

Наявність вищих гармонік в напрузі живлення індукційних електродвигунів є причиною виникнення в магнітному потоці складових на частотах вищих гармонік, які у свою чергу наводитимуть гармоніки ЕДС і, як наслідок цього, в обмотках ротора з'являються вищі гармоніки струму. Ці гармоніки взаємодіятимуть з основним магнітним потоком, створюючи додаткові механічні моменти на валу електричної машини. В результаті створюються гармонійні пульсації моменту, що обертає, на валу двигуна. У екстремальних випадках може виникнути вібрація на резонансній частоті маси ротора, що обертається, що приводить до накопичення втоми металу і можливого розриву валу ротора електродвигуна.

2.3.2 Розробка моделі дослідження

У роботі [35] авторами була запропонована модель, яка має вигляд:

$$\left.\begin{aligned}
u_{sa} &= \frac{d\Psi_{sa}}{dt} + i_{sa}r_{sa};\\
u_{s\beta} &= \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + i_{s\beta}r_{s\beta};\\
u_{s\gamma} &= \frac{d\Psi_{s\gamma}}{dt} + i_{s\gamma}r_{s\gamma};\\
u_{ra} &= \frac{d\Psi_{ra}}{dt} + i_{ra}r_{ra} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\gamma} + \Psi_{r\beta})}{\sqrt{3}};\\
u_{r\beta} &= \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + i_{r\beta}r_{r\beta} + \omega_r \frac{(-\Psi_{ra} + \Psi_{r\gamma})}{\sqrt{3}};\\
u_{r\gamma} &= \frac{d\Psi_{r\gamma}}{dt} + i_{r\gamma}r_{r\gamma} + \omega_r \frac{(-\Psi_{r\beta} + \Psi_{r\alpha})}{\sqrt{3}}.
\end{aligned}\right\}. \qquad (2.45)$$

Тут потокозчеплення:

$$\left.\begin{aligned}
\Psi_{sa} &= i_{sa}L_{sa} - 0.5Mi_{s\beta} - 0.5Mi_{s\gamma} + (i_{ra} - 0.5i_{r\beta} - 0.5i_{r\gamma})M;\\
\Psi_{s\beta} &= i_{s\beta}L_{s\beta} - 0.5Mi_{s\gamma} - 0.5Mi_{sa} + (i_{r\beta} - 0.5i_{ra} - 0.5i_{r\gamma})M;\\
\Psi_{s\gamma} &= i_{s\gamma}L_{s\gamma} - 0.5Mi_{sa} - 0.5Mi_{s\beta} + (i_{r\gamma} - 0.5i_{ra} - 0.5i_{r\beta})M;\\
\Psi_{ra} &= i_{ra}L_{ra} - 0.5Mi_{r\beta} - 0.5Mi_{r\gamma} + (i_{sa} - 0.5i_{s\beta} - 0.5i_{s\gamma})M;\\
\Psi_{r\beta} &= i_{r\beta}L_{r\beta} - 0.5Mi_{r\gamma} - 0.5Mi_{ra} + (i_{s\beta} - 0.5i_{sa} - 0.5i_{s\gamma})M;\\
\Psi_{r\gamma} &= i_{r\gamma}L_{r\gamma} - 0.5Mi_{ra} - 0.5Mi_{r\beta} + (i_{s\gamma} - 0.5i_{sa} - 0.5i_{s\beta})M.
\end{aligned}\right\}. \qquad (2.46)$$

Дану модель доцільно застосовувати, для дослідження асинхронної електричної машини в динамічному режимі при синусоїдальній живлячій напрузі, т.я. періодичні коефіцієнти індуктивності (L), взаємні індуктивності (M) в рівнянні для потокосчеплення залишаються постійними.

Для аналіза режиму роботи асинхронного двигуна авторами [36] була запропонована програма, в якій аналізується робота двигунів в умовах неякісної електроенергії.

І так, перерахуємо основні достоїнства MathCAD`а.

По-перше, це універсальність пакету MathCAD, який може бути використаний для вирішення найрізноманітніших інженерних, економічних, статистичних і інших наукових завдань.

По-друге, програмування на загальноприйнятій математичній мові дозволяє подолати мовний бар'єр між машиною і користувачем. Потенційні користувачі пакету - від студентів до академіків.

І, по-третє, сумісне застосування текстового редактора, формульного транслятора і графічного процесора дозволяє користувачеві в ході обчислень отримати готовий документ.

2.3.3 Програмна реалізація і перевірка адекватності моделі

Записуємо функцію напруги в програмі MathCAD:

Функция напряжения

$$u_{fnom} := \frac{U_{nom} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 310.269$$

$$u_{boost} := 20$$

управляющее воздействие в функции времени

$$ramp_time := 2$$

$$Z(t) := \left| \begin{array}{l} f \leftarrow \frac{1}{2} t \cdot \frac{f_{nom}}{ramp_time} \\ u \leftarrow 2f \cdot \frac{u_{fnom} - u_{boost}}{f_{nom}} + u_{boost} \\ z \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \begin{pmatrix} f \\ u \end{pmatrix} & \text{if } t \le ramp_time \\ \begin{pmatrix} f_{nom} \\ u_{fnom} \end{pmatrix} & \text{otherwise} \end{array} \right. \\ z \end{array} \right.$$

$$t := 0, 0.001 .. 2 \cdot ramp_time$$

Записуємо функції, які описують роботу двигуна:

Функции, описывающие двигатель

$U_1(X) := U(X_0)$

Функция напряжения

$I_1(X) := k\sigma \cdot (L_2 \cdot X_1 - L_{12} \cdot X_2)$

функции токов от переменных состояния

$I_2(X) := k\sigma \cdot (L_1 \cdot X_2 - L_{12} \cdot X_1)$

$I_0(X) := I_1(X) + I_2(X)$

$M(X) := \frac{3}{2} \cdot p_\tau \cdot Im(\overline{X_1} \cdot I_1(X))$

момент двигателя

$t_1 := 1$

$M_c := 1 \cdot M_{nom} = 57.841$

$$Mc(X) := \begin{cases} 0 & \text{if } X_0 \le t_1 \\ M_c & \text{otherwise} \end{cases}$$

Функция момента сопротивления

Матрица переменных состояния

Начальные условия

$$STATE(X) := \begin{pmatrix} 1 \\ U_1(X) - I_1(X) \cdot R_1 - I_0(X) \cdot R_0 \\ -I_2(X) \cdot R_2 - I_0(X) \cdot R_0 + j \cdot p_\tau \cdot X_3 \cdot X_2 \\ \frac{M(X) - Mc(X)}{Jm} \end{pmatrix}$$

$$Xn := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Програмна реалізація такої моделі АД, що працює в умовах неякісного живлення, перевірена шляхом опису процесу пуску, наброса навантаження і сталого режиму двигуна типу 4А112-М4 потужністю 5,5 кВт, що характеризується наступними значеннями: $U_{1н}$=380 В, $n_{ном}$=1480 об/хв, J=0,08 кг·м^2, R_1=1,61 Ом, R_2=2,19 Ом, R_0=6,2 Ом, $L_{1\sigma}$=0,00362 Гн, $L_{2\sigma}$=0,00365 Гн, L_{12}=0,294 Гн. Як живлення в першому випадку використане відповідне показникам якості, по суті ідеальна, трифазна напруга, в другому - несиметричне несинусоїдальне, відповідне реальному, показники якого представлені в таблиці 2.2. Годографи ПЧК вказаної напруги представлені на рис. 2.3, з яких видно, що несиметричне живлення обумовлює еліптичну форму годографа, а несинусоїдальність спотворює його форму.

Таблиця 2.2 - Показники якості живлячої напруги

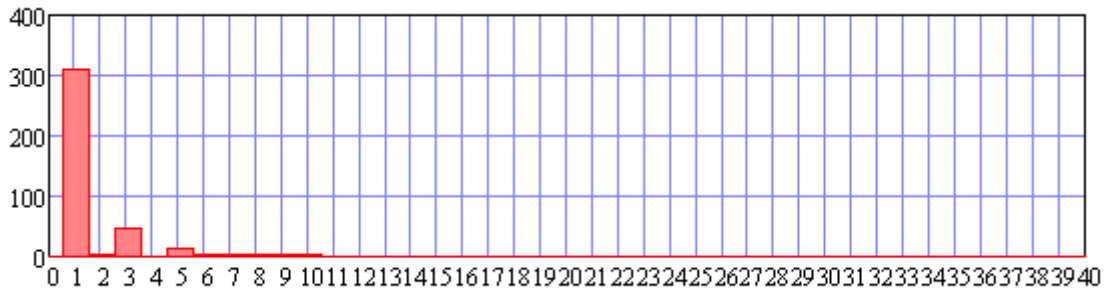
Відхилення напруги по фазах, %	A	11,2
	B	18,8
	C	1,0
Коефіцієнти гармонійних складових, %	2	5,8
	3	0,83
	4	1,69
	5	0,03
	6	2,78
	7	0,03
	8	0,08
	9	0,23
	10	0,04

Спектральний склад на рівні номінальної напруги у програмі MathCAD матиме вигляд:

$U_{A_{q,1}} := 0$

$U_{A_{q,2}} := 0$

$U_{A_{1,1}} := 1$



$U_{B_{q,1}} := 0$

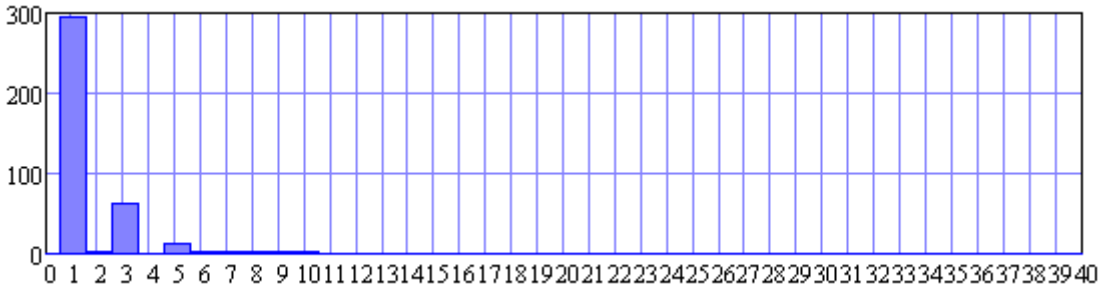
$U_{B_{q,2}} := 0$

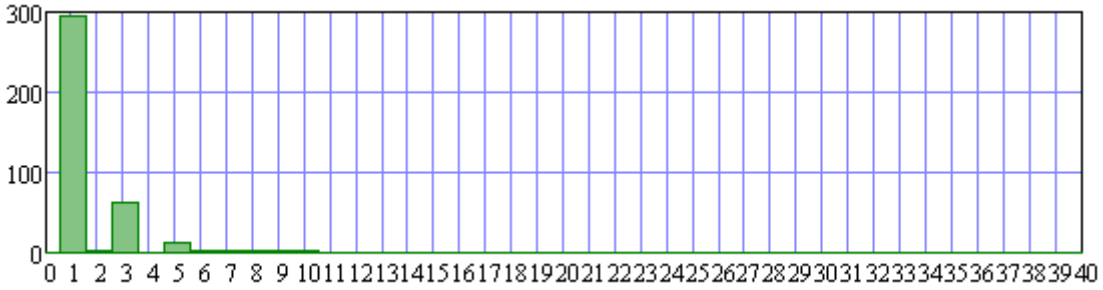
$U_{B_{1,1}} := 1$

$U_{C_{q,1}} := 0$

$U_{C_{q,2}} := 0$

$U_{C_{1,1}} := 1$





Перерахунок фазових зсувів в радіани, зсув фазових для фаз "B" и "C"

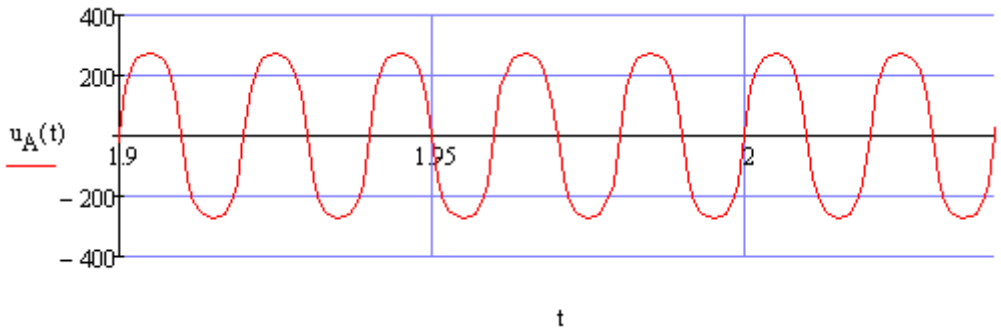
$$U_A^{\langle 2\rangle} := U_A^{\langle 2\rangle} \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$U_B^{\langle 2\rangle} := U_B^{\langle 2\rangle} \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{2 \cdot \pi}{3}$$

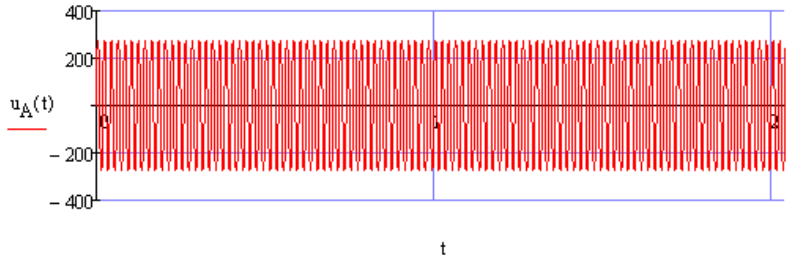
$$U_C^{\langle 2\rangle} := U_C^{\langle 2\rangle} \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{4 \cdot \pi}{3}$$

Завдання функції часу

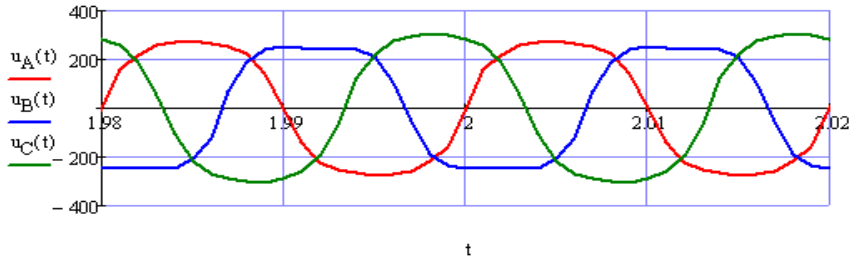
$$u_A(t) := \left| \begin{array}{l} V \leftarrow U_A \\ \omega_0 \leftarrow Z(t)_0 \cdot 2 \cdot \pi \\ U_{max} \leftarrow Z(t)_1 \\ u \leftarrow \sum_{k=0}^{N_{harm}} \left[\left(V_{k,1} \cdot U_{max} \right) \cdot \sin\left[k \cdot \left(\omega_0 \cdot t + V_{k,2} \right) \right] \right] \\ u \end{array} \right.$$



$$u_B(t) := \left| \begin{array}{l} V \leftarrow U_B \\ \omega_0 \leftarrow Z(t)_0 \cdot 2 \cdot \pi \\ U_{max} \leftarrow Z(t)_1 \\ u \leftarrow \sum_{k=0}^{N_{harm}} \left[\left(V_{k,1} \cdot U_{max} \right) \cdot \sin\left[k \cdot \left(\omega_0 \cdot t + V_{k,2} \right) \right] \right] \\ u \end{array} \right.$$



$$u_C(t) := \left| \begin{array}{l} V \leftarrow U_C \\ \omega_0 \leftarrow Z(t)_0 \cdot 2 \cdot \pi \\ U_{max} \leftarrow Z(t)_1 \\ u \leftarrow \sum_{k=0}^{N_{harm}} \left[\left(V_{k,1} \cdot U_{max} \right) \cdot \sin\left[k \cdot \left(\omega_0 \cdot t + V_{k,2} \right) \right] \right] \\ u \end{array} \right.$$



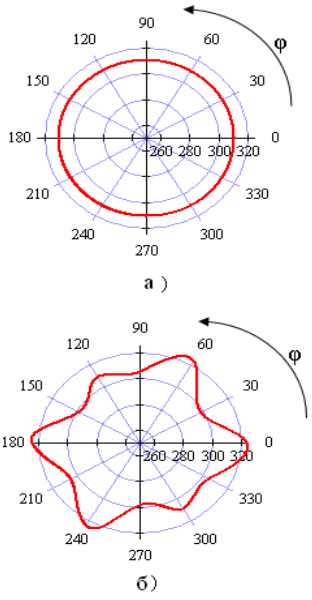


Рисунок 2.3 - Годографи просторово-часових комплексів напруги, відповідної показникам якості (а) і несиметричної несинусоїдальної напруги (б).

На рисунку 2.4 наведені графіки основних координат двигуна. Наявність гармонійних складових в живленні АД приводить, як видно, до виникнення пульсацій моменту.

Миттєві значення струмів статора і ротора мають форму, представлені на рисунку 2.5, а годограф моменту асинхронного двигуна протягом одного обороту має вигляд, показаний на рисунку 2.6.

На рисунку 2.6 показані годографи моменту асинхронного двигуна при ідеальному (а) і неякісному (б) живленні в сталому режимі.

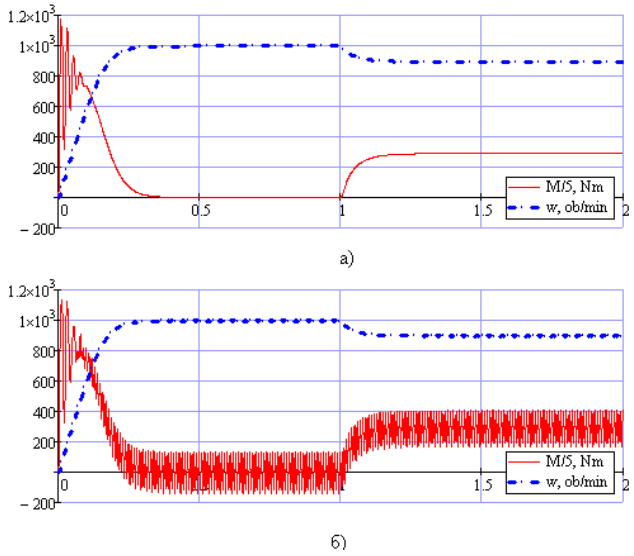


Рисунок 2.4 - Момент і швидкість АД при пуску і набросе навантаження при ідеальній (а) і несиметричній несинусоїдальній (б) живлячій напрузі.

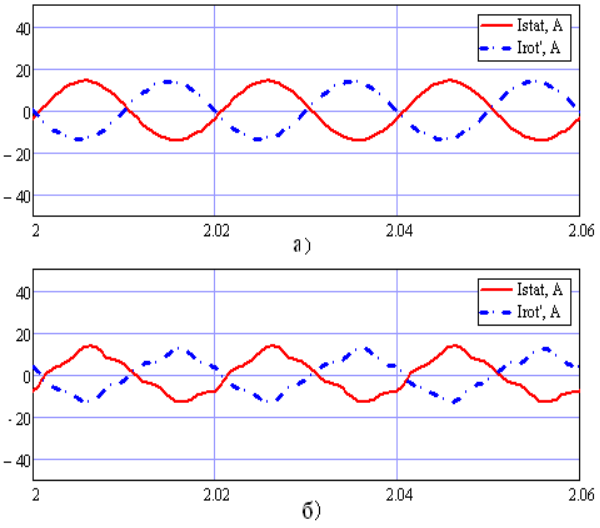


Рисунок 2.5 - Струми статора і ротора при ідеальному (а) і неякісному (б) живленні в сталому режимі.

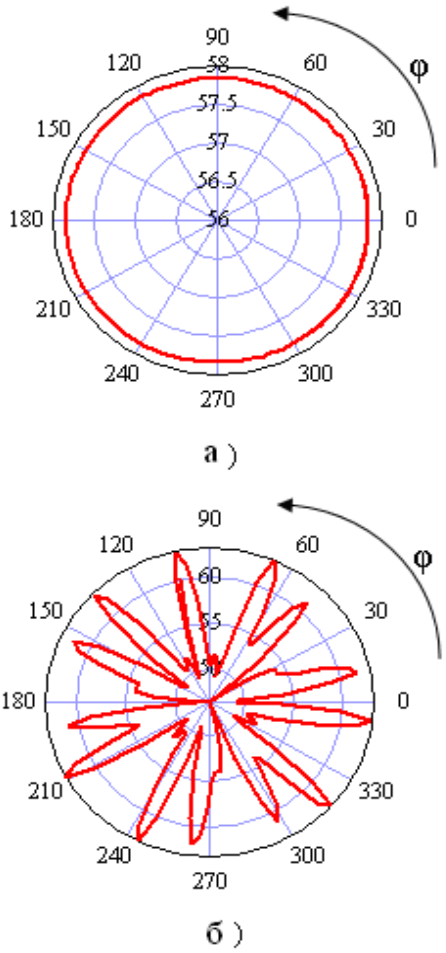


Рисунок 2.6 - Годограф моменту АД при ідеальному (а) і неякісному (б) живленні в сталому режимі.

Аналіз отриманих енергетичних показників роботи АД, представлених в таблиці 2.3, підтверджує, що неякісність живлячої напруги обумовлює зростання всіх видів втрат, і, відповідно, зниження ККД і коефіцієнта потужності двигуна. При цьому зростання «гріючих» втрат від неякісності живлячої напруги, який визначається, як відомо, станом двигуна і характером навантаження, в роботі не розглядався.

Таблиця 2.3 - Енергетичні показники АД

Показники	Од.	Ідеальне живлення	Неякісне живлення
Втрати у статорі	Вт	491,3	498,3
Втрати у роторі	Вт	652,2	661,5
Втрати у сталі	Вт	89,2	90
Сумарні втрати	Вт	1235	1250
ККД	%	81,4	81,2
Коефіцієнт потужності	о.е.	0,98	0,9

2.3.4 Аналіз результатів досліджень проведених на моделі

Для дослідження впливу неякісної напруги авторами [33] було проведено моделювання роботи електродвигунів з номінальною напругою 380 В у діапазоні потужностей 0,75 – 250 кВт. Використана модель АД, що дозволяє оцінювати енергетичні і динамічні показники при довільній формі напруги живлення [34].

Основними критеріями оцінки якості роботи електродвигуна приймаємо складові споживаної потужності (активна *P*, реактивна *Q* і повна *S*), ККД, коефіцієнт потужності, рівень пульсацій (струму статора і) моменту. Для дослідження впливу кожної гармоніки задамо живлення, що складається з основної гармоніки і однією «паразитною» (вищою). Досліджуємо вплив вищих гармонік аж до 15-ої.

Значення вищої гармоніки, що діє, задамо на рівні 10% номінальної напруги двигуна. Для зручності порівняльного аналізу результати досліджень представлені у відносних одиницях. За базову величину кожного показника (*P, Q, S* і так далі) прийнято відповідне значення при ідеальній напрузі живлення. На рис. 2.7 для прикладу показана гістограма зміни досліджуваних параметрів від номера гармонійної складової для двигуна потужністю 5,5 кВт.

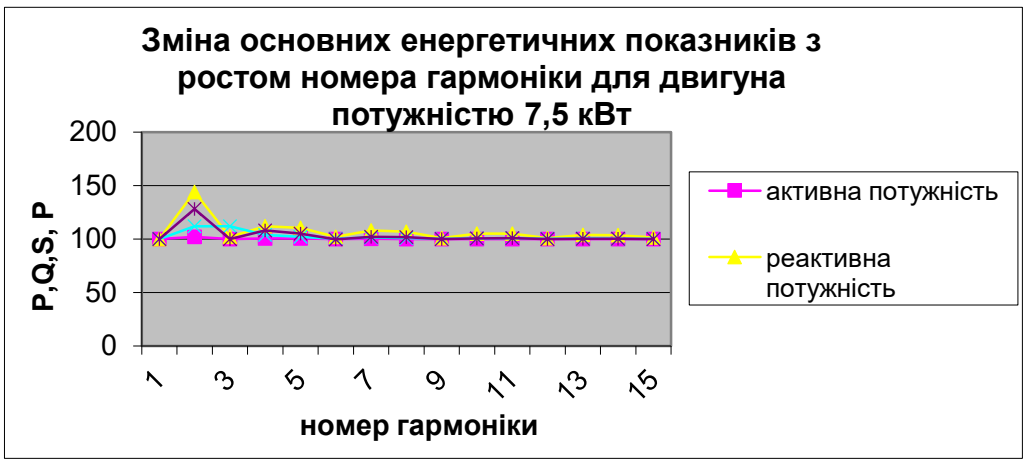


Рисунок 2.7 – Зміна основних енергетичних показників з ростом номера гармоніки для двигуна потужністю 5,5 кВт

Нами досліджувалися двигуни при з'єднанні обмоток статора в зірку за відсутності нульового дроту (це найбільш поширений спосіб підключення обмоток АД в промисловості). Тому гармоніки напруга, кратна трьом, не викликає зміни енергетичних параметрів АД, оскільки вони відсутні в спектрах струмів. Це пов'язано з тим, що ці гармоніки утворюють нульову послідовність і за відсутності нульового дроту не мають контура для протікання. У решті випадків, наявність в спектрі живлячої напруги додаткової гармоніки призводить до зростання споживаних потужностей, що становлять, і сумарних втрат. У процентному співвідношенні найбільший приріст відбувається по реактивній потужності. Тобто введення гармоніки погіршує коефіцієнт потужності двигуна, як це показано на рисунку 2.8 (для прикладу взятий двигун 5,5 кВт).

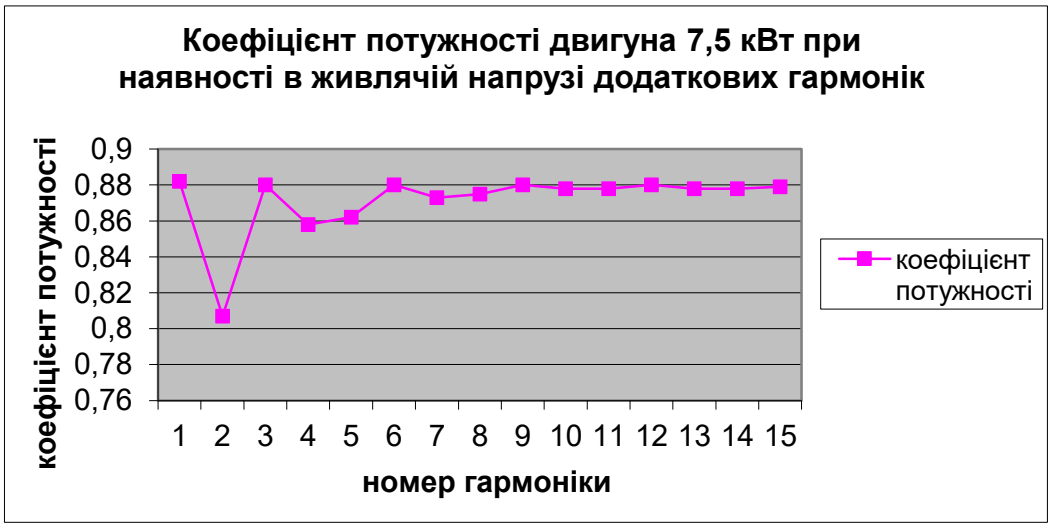


Рисунок 2.8 – Коефіцієнт потужності двигуна 5,5 кВт при наявності в живлячій напрузі додаткових гармонік

В цілому, аналіз представлених даних показує, що для двигунів в досліджуваному діапазоні потужностей дія гармоніки падає із зростанням її частоти. Це відбувається тому, що обмотки АД є природним індуктивним фільтром, опір якого пропорційно частоті гармоніки. Із збільшенням номера гармоніки живлячої напруги при постійності її амплітуди средньоквадратичне значення гармонік струму падає. Це справедливо також для пульсацій моменту, що розвивається двигуном.

3 МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДРОБАРКИ

У загальному випадку можна виділити два основні завдання, розв'язувані регульованим електроприводом: керування моментом і швидкістю обертання електродвигуна.

Необхідність регулювання моменту диктується пропонованими до електропривода технічними й технологічними вимогами. Для нормального функціонування привода необхідно обмежувати момент і струм двигуна припустимими значеннями в перехідних процесах пуску, гальмування й прикладання навантаження. Для механізмів, що мають при роботі значні перевантаження аж до стопоріння робочого органа (наприклад, електроприводи млинів), виникає необхідність безперервного регулювання моменту двигуна з метою обмеження динамічних ударних навантажень. У багатьох випадках потрібно також точне дозування зусилля на робочому органі (електроприводи металообробних верстатів, намотувальні машини та ін.).

Технологічні режими багатьох виробничих механізмів на різних етапах роботи вимагають руху робочого органа з різною швидкістю, що забезпечується або механічним шляхом, або шляхом електричного регулювання швидкості електропривода. При цьому вимоги до діапазону й точності регулювання швидкості можуть змінюватися в найширших межах залежно від області застосування електропривода.

3.1 Методи управління частотно-регульованим електроприводом

Для рішення завдань регулювання швидкості й моменту в сучасному електроприводі застосовують два основних методи частотного керування:

- скалярне керування;

•векторне керування.

Асинхронний електропривод зі скалярним керуванням є на сьогоднішній день найпоширенішим. Він застосовується в складі приводів насосів, вентиляторів, компресорів й інших механізмів, для яких важливо підтримувати або швидкість обертання вала двигуна (при цьому використовується датчик швидкості), або технологічний параметр (наприклад, тиск у трубопроводі, при цьому використовується відповідний датчик).

Основний принцип скалярного керування – зміна частоти й амплітуди живлячої напруги за законом $U/f^n = const$, де $n \geq 1$. Конкретний вид залежності визначається вимогами до електропривода за навантаженням. Звичайно за незалежний вплив приймається частота, а значення напруги при даній частоті визначає вид механічної характеристики, значення пускового й критичного моментів. Скалярне керування забезпечує сталість перевантажувальної здатності електропривода не залежно від частоти напруги, однак має місце зниження моменту, що розвиває двигун, при низьких частотах (при $f<0,1f_{ном}$). Максимальний діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору для електроприводів зі скалярним керуванням досягає 1:10.

Метод скалярного керування відносно простий у реалізації, але має два істотні недоліки. По-перше, при відсутності датчика швидкості на валу двигуна неможливо регулювати швидкість обертання вала, тому що вона залежить від навантаження. Наявність датчика швидкості вирішує цю проблему, однак залишається другий істотний недолік - не можна регулювати момент на валу двигуна. З одного боку, цю проблему можна вирішити установкою датчика моменту, однак такі датчики мають дуже високу вартість, що найчастіше перевищує вартість усього електропривода. Але навіть при наявності датчика керування моментом виходить дуже інерційним. Більше того, при скалярному керуванні не можна одночасно регулювати й момент і швидкість, тому доводиться вибирати те, що є найбільш важливішим для даного технологічного процесу.

Для усунення недоліків, властивому скалярному керуванню, фірмою Siemens ще в 1971 році був запропонований метод векторного керування. Перші варіанти електроприводів з векторним керуванням вимагали використання двигунів з вбудованими датчиками потоку. Це істотно обмежило застосування таких приводів.

У сучасних електроприводах у систему керування заставляється математична модель двигуна, що дозволяє розраховувати момент на валу й швидкість обертання вала. При цьому необхідними є тільки датчики струму фаз статора двигуна. Завдяки спеціальній структурі системи керування забезпечується незалежне й практично безінерційне регулювання двох основних параметрів - моменту на валу й швидкості обертання.

На сьогоднішній день сформувалося два основних класи систем векторного керування - бездатчикові системи (без датчика швидкості на валу двигуна) і системи зі зворотним зв'язком по швидкості. Застосування того або іншого методу векторного керування визначається областю застосування електропривода. При невеликих діапазонах зміни швидкості (не більше 1:100) і вимогах до точності її підтримки не більше ±0,5% застосовують бездатчикове векторне керування. Якщо ж швидкість обертання вала змінюється в широких межах (1:10000 і більше), є вимоги до високої точності підтримки швидкості обертання (до ±0,02% при частотах обертання менш 1 Гц) і є необхідність позиціонування вала, а також при необхідності регулювання моменту на валу двигуна на дуже низьких частотах обертання, застосовують методи векторного керування зі зворотним зв'язком по швидкості.

При використанні методу векторного керування досягаються наступні переваги:

- висока точність регулювання швидкості навіть при відсутності датчика швидкості;

- плавне, без ривків, обертання вала в області малих частот;

- можливість забезпечення номінального моменту на валу при нульовій швидкості (при наявності датчика швидкості);

- швидка реакція на зміну навантаження: при різких перегонах навантаження практично не відбувається стрибків швидкості;

- забезпечення такого режиму роботи двигуна, при якому знижуються втрати на нагрівання й намагнічування, а отже, підвищується ККД.

Поряд з очевидними перевагами, методу векторного керування властиві й деякі недоліки, такі, як більш обчислювальна складність і необхідність знання параметрів двигуна. Крім того, при векторному управлінні коливання швидкості на постійному навантаженні більше, ніж при скалярному керуванні. Слід зазначити, що існують області, у яких можливе використання тільки скалярного керування, наприклад у груповому електроприводі, де від одного перетворювача живляться кілька двигунів.

3.2 Побудова силової частини системи ПЧ-АД

Найбільше поширення одержали перетворювачі частоти із проміжною ланкою постійного струму, побудовані за схемою випрямляч - автономний інвертор. Принцип роботи й області застосування таких перетворювачів частоти залежать від типу використовуваного випрямляча й автономного інвертора (інвертор напруги або інвертор струму).

Існує кілька різних схем випрямлячів. За принципом дії вони можуть бути розділені на три групи: керовані, напівкеровані й некеровані. Схематично всі випрямлячі будуються по трифазній мостовій схемі.

Найбільше поширення одержали некеровані випрямлячі. Виконані на найпростішому й дешевому напівпровідниковому приладах - діодах, вони характеризуються максимальною простотою й надійністю, високим ККД, а також досить високою якістю вихідної (випрямленої) напруги й гармонічного складу струму, споживаного з мережі. Однак некерованість процесу перетворення енергії не дозволяє реалізувати режими рекуперації, необхідні в багатьох випадках.

Керовані випрямлячі, виконувані звичайно на низькочастотних тиристорах, позбавлені як недоліків, так і більшості переваг діодних випрямлячів. Вони володіють високим ККД і властивістю оборотності за напрямком перетворення енергії й звичайно використовуються разом з автономними інверторами струму для регулювання величини вихідного струму перетворювача. Недоліки керованих випрямлячів полягають у підвищеному рівні пульсацій випрямленої напруги, у зниженому значенні коефіцієнта потужності, що зменшується пропорційно вихідній напрузі, і в однобічному напрямку вихідного струму. При необхідності забезпечити протікання випрямленого струму в обох напрямках використовують реверсивні тиристорні перетворювачі, що складаються із двох включених паралельно тиристорних випрямлячів, один із яких призначений для протікання струму навантаження в прямому, а інший у зворотному напрямку. Це ускладнює й здорожує перетворювач. Напівкеровані випрямлячі займають проміжне положення між керованими й некерованими випрямлячами, дозволяючи регулювати значення випрямленої напруги без можливості рекуперації енергії в мережу. У випадку керованих і напівкерованих випрямлячів з'являється можливість відключення силової схеми перетворювачів частоти від мережі без використання додаткового устаткування. Залежно від типу автономного інвертора контур постійного струму може бути виконаний як ланка, що забезпечує постійну напругу (звичайно С- або LC фільтр), або як ланка, що підтримує сталість струму (фільтр у вигляді реактора зі значною індуктивністю). Величина ємності конденсатора в ланці постійного струму звичайно становить 2000-20000 мкФ; такі конденсатори мають більші габарити й високу вартість.

Характерними рисами автономних інверторів струму (АІС, рис. 3.1) є живлення від джерела струму (у коло джерела включений дросель значної індуктивності), обмін реактивною енергією навантаження з комутуючим конденсатором, значне коливання напруги на вході інвертора при постійному струмі джерела, а також залежність форми кривої напруги на виході й вході інвертора від характеру навантаження. АІС технічно реалізуються простіше, ніж АІН, тому що в них відсутній зворотний діодний міст. У перетворювачах частоти на основі АІС при використанні керованих випрямлячів можлива

рекуперація енергії в мережу, що важливо для електроприводів, що працюють у повторно-короткочасних режимах роботи.

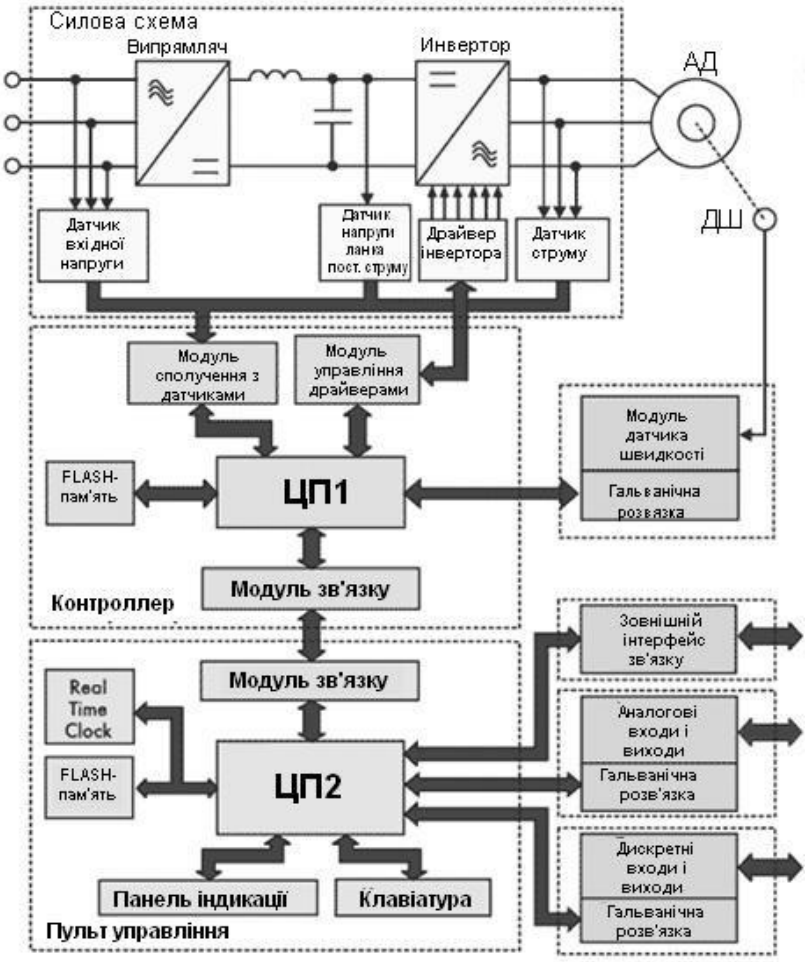


Рисунок 3.1 – Частотно-регульований електропривод на базі АІН

Характерним недоліком АІС є те, що він не може працювати на холостому ходу (з відключеним двигуном). Крім того, при використанні АІС можливі істотні втрати потужності й формування додаткових моментів, що призводять до коливань швидкості. При необхідності формування струмів двигуна, близьких до синусоїдальних, потрібне значне ускладнення схеми АІС.

Особливостями автономних інверторів напруги є живлення від джерела напруги, замикання контуру реактивного струму навантаження через зворотні діоди й незалежність форми кривої напруги на виході інвертора від характеру навантаження. Недоліком АІН є необхідність використання реверсивних випрямлячів для організації рекуперативних режимів роботи електропривода. Однак застосування інверторів напруги дозволяє без ускладнення схеми

одержати високі енергетичні показники й забезпечити вихідні струми, близькі до синусоїдального. Саме це спричиняє широке застосування АІН у сучасному електроприводі.

Для побудови силових ключів в області струмів, що комутують, до 50 А використаються біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT) і польові транзистори з ізольованим затвором (MOSFET), а також низькочастотні й високочастотні діоди й тиристори. Силові біполярні транзистори в діапазоні до 50 А знаходять основне застосування в дешевому промисловому устаткуванні. В області струмів, що комутують, більше 50 А основними використовуваними приладами є силові модулі на базі біполярних транзисторів, що замикають тиристори (GTO, GCT, IGCT). Особливо варто виділити транзисторні й діод-транзисторні модулі, виконані на інтегральній технології на основі транзисторів типу IGBT. Низькі втрати потужності в ключових режимах, більші значення робочих напруг і струмів, малий час включень і відключень цих модулів, а так само можливість їхнього використання при паралельній роботі дозволяє створювати потужні й компактні перетворювальні установки з високою частотою комутації напівпровідникових ключів.

3.3 Електропривод на базі ПЧ із проміжною ланкою постійного струму

Силовий канал містить два комплекти: випрямляча й інвертора залежно від фільтра в ланці постійного струму. Якщо встановлено реактор L, то використовується комплект КДС - АІС, якщо конденсатор С, - це КДН - АІН.

За структурою система керування виконана двоконтурної з підлеглим регулюванням швидкості й струму. Контур швидкості містить пропорційний регулятор швидкості РШ і негативний зворотний зв'язок за швидкістю. Контур струму містить свій регулятор - пропорційно-інтегруючий і негативний зворотний зв'язок.

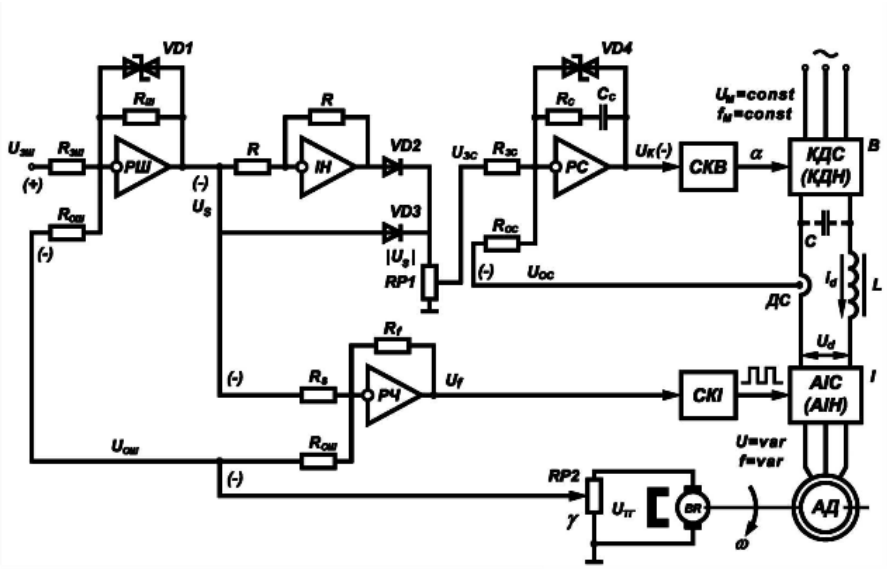


Рисунок 3.2 - Типова схема керування електроприводом за системою ПЧ-АД з ланкою постійного струму

У зворотних зв'язках регуляторів установлені стабілітрони: VD1, VD4. VD1 забезпечує формування екскаваторної характеристики з абсолютно м'якою ділянкою в точці стопоріння. VD4 забезпечує захист вхідних кіл СІФК.

Повна структура системи керування відрізняється від класичної. Вона містить додатково два елементи: блок виділення модулів і регулятор частоти. Блок зібраний за допомогою інвертора й двох діодів VD2, VD3. БВМ установлюють у випадку реверсивного ЕП з метою узгодження полярності заданого значення струму $U_{зт}$ і зворотним зв'язком за струмом $U_{от}$.

Це пов'язане з тим, що реверс відбувається за рахунок перемикання фаз, тобто зміни їхньої черговості. При цьому знак зворотного зв'язку за струмом залишається тим самим, що пов'язане з односпрямованістю провідності тиристорів.

Регулятор частоти виконаний пропорційним. Він формує третій контур системи підлеглого регулювання. Його поява пов'язана з необхідністю формування сигналу завдання частоти U_f на вході СІФК.

3.4 Вибір перетворювача частоти

По номінальній потужності двигуна обираємо частотний перетворювач HYUNDAI N300P 5.5 кВт.



Рисунок 3.3 - Частотний перетворювач HYUNDAI N300P 5.5 кВт

Перетворювачі цієї серії по праву вважаються самими потужними у своєму класі (від 5,5 до 160 кВт). Використаються вони в основному для обслуговування вентиляторів і насосів.

Компактні й розумні прилади серії N300P вважаються одними із самих надійних. Виробники постаралися, щоб за допомогою перетворювача можна було діагностувати, контролювати й захищати електродвигун. Додаткова функція - можливість організації позитивного або негативного зворотного зв'язку.

Таблиця 3.1 Параметри перетворювача частоти HYUNDAI N300P 5.5 кВт

Модель		**N300 - 055 HFP**
Потужність двигуна(кВт)		5.5
Робочий струм(А)		11
Повна потужність(KVA)		8.2
Вхідна напруга (V)		3 phase 380~480V
Максимальна вихідна частота(Hz)		400Hz
Вихідна напруга й частота(V / Hz)		3 pahse, 380~480VAC, 50/60Hz
Клас захисту корпуса		IP20 (NEMA1)
Основні характеристики	Метод управління	Просторова широтно-імпульсна модуляція
	Характеристика закону керування	V/f контроль , V/f вільно налаштована (7 точок)
	Вихідна частота	0.1~400Hz

Продовження таблиці 3.1

	Перевантажувальна здатність		120% 60 сек., 150% 0.5 сек.
	Час розгону гальмування		0.01~3600 сек
	Гальмівний момент	Регенеративний	130~150%(при застосуванні гальм. резистора), 10~20%(повернення енергії в ємності)
		Гальмування пост. струмом	Робоча частота(0~60Гц), час гальмування (0~60sec), величина напруги(0~100%)
			Можливе гальмування зовнішнім модулем
	Вхідні сигнали	Аналогові	0~10VDC, 4~20m, -10~10VDC
		Цифрові	На контрольній панелі
		Вибір мультишвидкості	Max. 16-значення (можлив. вибір швидкості у двійковому виді)
Захисні функції			Захист від перевантаження по струму, захист від перевантаження, захист гальмівного резистора, захист по напрузі, EEPROM захист, захист від зниженої напруги, захист від аварії CPU, зовнішня аварія, USP, захист від витоків на землю, захист від перенапруги на вході, захист від перегріву вихідних ключів, і ще захист від інших помилок
Інші функції			стабілізація напруги, вибір кривій V/f, ПІД регулятор і так далі
Навколишнє середовище	Температура навколишнього середовища		-10˚C~50˚C / -20˚C ~65˚C
	Ambient Humidity / Installation Area		90%RH or less (No condensation) / indoors (no corrosive gases or dust)
	Висота над рівнем моря		1,000m

Вся серія володіє декількома режимами керування: тут лінійна й квадратична вольт-частотна характеристика, а також вільна вольт-частотна характеристика, що має 7 програмувальних точок.

3.5 Синтез структурної моделі електропривода, моделювання технологічного режиму роботи установки.

3.5.1 Моделювання системи ПЧ - АД в середовищі Matlab Simulink.

Початкові дані:

Двигун 4А112М4У3 :

$$P_{ном} = 5{,}5 кВт; U_{ном} = 380\ В; I_{ном} = 11.46\ А; n_{ном} = 1430 об/хв;$$

$$n_o = 1500 об/хв\ ; R_1^{'} = 0.066\ Ом;\ X_1^{'} = 0.075\ Ом;\ R_2 = 0.78\ Ом;\ X_2 = 2.49\ Ом;$$

$$\lambda = 2{,}9\ ;\ J_{дв} = 0.02\ кг \cdot м^2;$$

Регулятор швидкості РШ – П-регулятор;

Регулятор струму РС – ПІ-регулятор;

Фільтр;

Коефіцієнт приведення $\frac{J_{мех.пр}}{J_{дв}} = 1$;

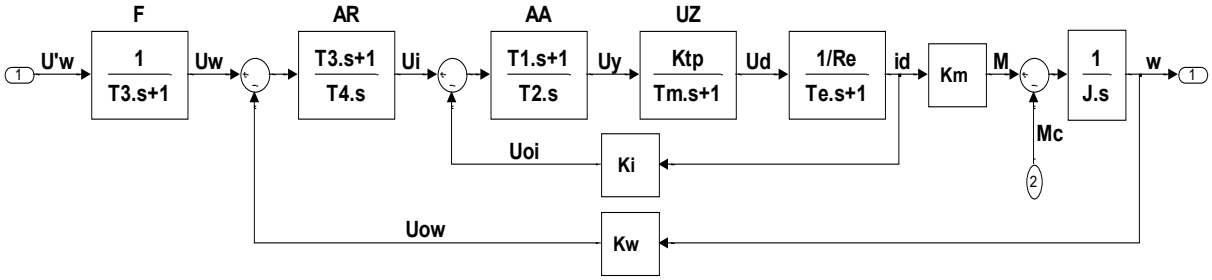


Рисунок 3.4 - Структурна схема системи ПЧ-АД з П-регулятором швидкості

На структурній схемі відсутні блок виділення модулів і регулятор частоти. Відсутність БВМ пов'язана з тим, що для структурної схеми реверс здійснюється зміною полярності основного сигналу керування на вході. Така структура дозволяє аналізувати частотно-регульований електропривод через відсутність каналу частоти тільки в одному випадку, коли для конкретного механізму прийнятий закон зміни напруги від частоти: U/f=const. Така можливість пов'язана з тим, що у відповідній реальній системі автоматично пропорційно буде змінюватися й частота.

3.5.2 Розрахунок параметрів структурної схеми та результати моделювання.

$$J_{мех.пр}/J_{дв} = 1; \qquad (2.48)$$

$$J_{мех.пр} = J_{дв} \cdot 1 = 0,02 \cdot 1 = 0,02 \ кг \cdot м^2; \qquad (2.49)$$

Повний наведений момент інерції системи:

$$J=J_{мех.пр}+J_{дв}=0,02+0,02=0,04\ \ кг\cdot м^2; \tag{2.50}$$

Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_{ном}=\frac{\pi}{30}\cdot n_{ном}=0,105\cdot 1430=150,15\ \ рад/с; \tag{2.51}$$

Конструктивний коефіцієнт двигуна:

$$K_m=\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\frac{M_{ном}}{I_{1ном}}=0,82\cdot\frac{36,63}{11,46}=2,62; \tag{2.52}$$

Кутова швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0=\frac{\pi}{30}\cdot n_0=0,105\cdot 1500=157,5\ \ рад/с; \tag{2.53}$$

Еквівалентний опір двигуна:

$$\begin{aligned}R_e&=2\cdot r_1\cdot S+2\cdot r_2'+\frac{3}{\pi}(x_1+x_2')\cdot S=\\&=2\cdot 0,066\cdot 1+2\cdot 0,78+0,955\cdot(0,075+2,49)\cdot 1=4,142\ \ Ом\end{aligned} \tag{2.54}$$

Еквівалентний індуктивний опір двигуна:

$$L_e=\frac{x_1+x_2'}{\pi\cdot f_н}=\frac{0,075+2,49}{\pi\cdot 50}=0,016\ \ Гн; \tag{2.55}$$

Еквівалентна стала часу:

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,016}{4,142} = 0,0038 \ c\,; \tag{2.56}$$

Записані вираження рекомендовані для інженерних розрахунків, тобто в них враховується значення ковзання S=1,що відповідає найбільш поганому випадку.

Коефіцієнт передатної функції тиристорного перетворювача:

$$K_{tp} = \frac{K_{cx} \cdot U_н}{10} = \frac{1,35 \cdot 380}{10} = 51,3\,; \tag{2.57}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_н = \frac{P_н}{\omega_н} = \frac{5500}{150.15} = 36,63 \ H \cdot м\,; \tag{2.58}$$

Максимальний момент:

$$\mathrm{M_{max}} = \mathrm{M_н} \cdot \lambda = 36,63 \cdot 2,9 = 106,227 H \cdot м\,; \tag{2.59}$$

Коефіцієнт передачі за струмом:

$$K_i = \frac{10}{\frac{M_{\max}}{K_m}} = \frac{10}{\frac{106,227}{2.62}} = 0,246\,; \tag{2.60}$$

Загальний коефіцієнт передачі за швидкістю:

$$K_w = \frac{10}{\omega_н} = \frac{10}{157} = 0,066\,; \tag{2.61}$$

Параметри Пі-регулятора струму системи ПЧ - АД:

$$T_1 = T_e = 0{,}0038\ c;$$

$$T_2 = \frac{a_c \cdot T\mu \cdot K_{tp} \cdot K_i}{R_e} = \frac{2 \cdot 0{,}01 \cdot 51{,}3 \cdot 0{,}246}{4{,}142} = 0{,}061\ c; \quad (2.62)$$

Коефіцієнт П-регулятора швидкості системи ПЧ - АД:

$$K_{ar} = \frac{K_i \cdot J}{a_ш \cdot a_c \cdot T_\mu \cdot K_w} = \frac{0{,}036 \cdot 0{,}02}{2 \cdot 2 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}066} = 0{,}272; \quad (2.63)$$

$a_ш$, a_c – настроювальні параметри системи.

Розрахунок параметрів задатчика інтенсивності 1-го порядку:

$$e_{max} = \frac{0{,}9 \cdot M_{max} - M_н}{J} = \frac{0{,}9 \cdot 106{,}227 - 36{,}63}{0{,}02} = 2948{,}715\ c^{-2}; \quad (2.64)$$

$$K_1 = \frac{e_{max}}{\omega_н} = \frac{2948.715}{150.15} = 19{,}64 \quad (2.65)$$

$$t_1 = \frac{1}{K_1} = \frac{1}{19.64} = 0{,}05\ c. \quad (2.66)$$

На вході структурної схеми передбачена установка задатчика інтенсивності 1-го порядку. Особливістю його є, з одного боку, плавний лінійний перехід на потрібну швидкість, а з іншого - завжди мають місце стрибкоподібні зміни динамічного моменту:

$$M_{дв} - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt};$$
$$M_{дв} - M_c = \varepsilon; \quad (2.67)$$

$$\varepsilon=\frac{M_{дв}-M_c}{J}=\text{const};$$
$$\varepsilon \equiv M_{дв}=\text{const}. \qquad (2.68)$$

File Edit Text Window Help

```
Pn=5500
Un=380
In=11.46
nn=1430
n0=1500
L=2.9
Jdv=0.02
r1=0.066
x1=0.075
r2=0.78
x2=2.49
w0=(2*3.14*n0)/60
wn=(2*3.14*nn)/60
Mn=Pn/wn
Mmax=Mn*L
Jprm=Jdv*1
J=Jdv+Jprm
Re=2*r1+2*r2+(3/3.14)*(x1+x2)
Ll=x1/(2*3.14*50)
L2=x2/(2*3.14*50)
Le=2*Ll+2*L2
Te=Le/Re
Tm=0.001
Ud=1.35*Un
Ktp=Ud/10
Km=((2/3)^(1/2))*(Mn/In)
Idmax=Mmax/Km
Kc=10/Idmax
Kw=10/wn
Kwl=Kw
aw=2
ac=2
bw=2
Krw=(Kc*J)/(aw*ac*Tm*Km*Kw)
Tl=Te
T2=ac*Tm*Ktp*Kc/Re
T3=aw*ac*bw*Tm
T4=T3/Krw
Kl=Mn*(L-1)/(J*wn)
Mxx=0.1*Mn
Ktm=(Mn-Mxx)/wn^2
```

Рисунок 3.5 - Використання m-файлу в середовищі Matlab Simulink

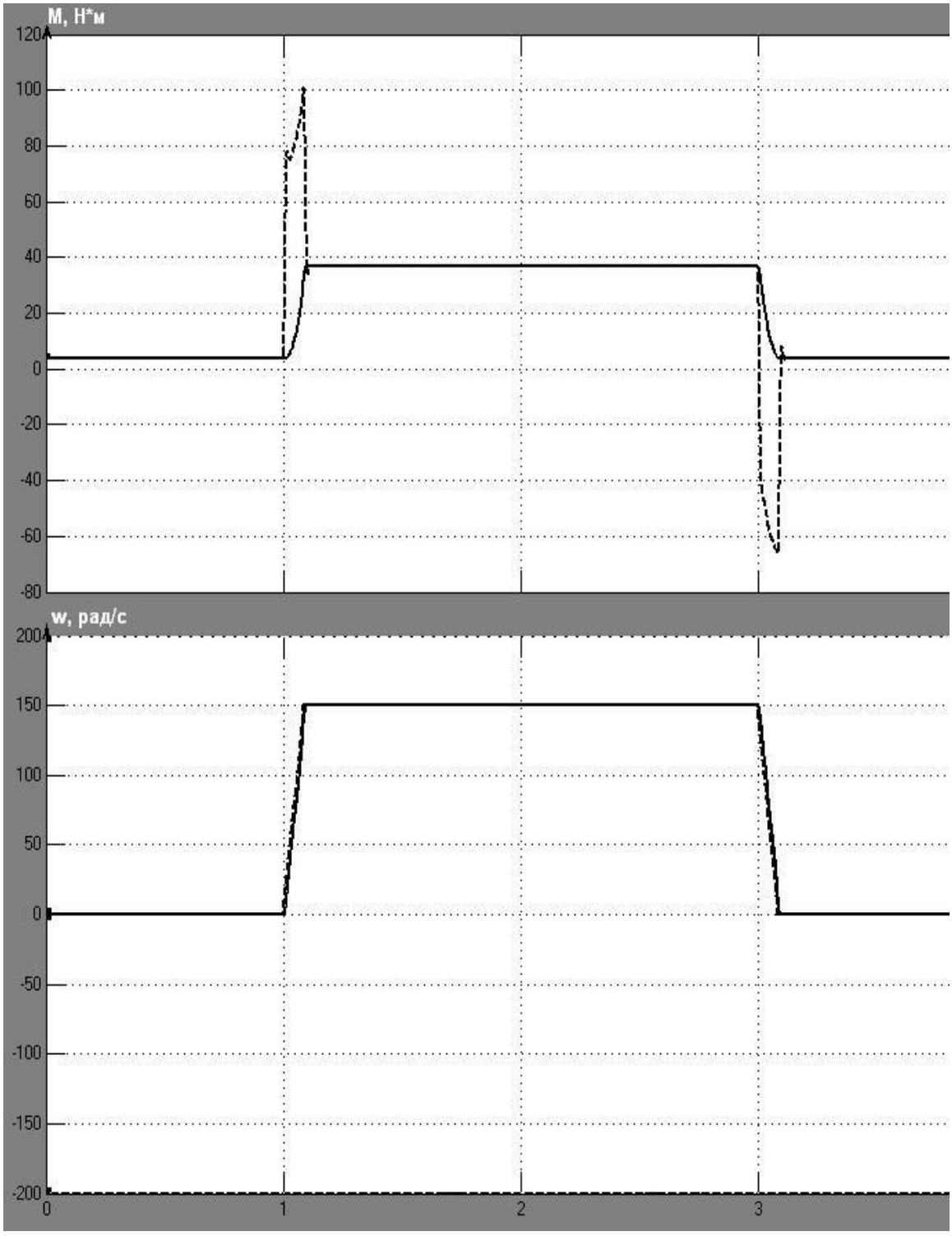


Рисунок 3.6 - Результати моделювання середовищі Matlab Simulink

ВИСНОВКИ

В випускній роботі магістра виконана модернізація електропривода дробарки шляхом інтеграції в існуючу систему керування перетворювача частоти з мікропроцесорною системою керування.

Виконано розрахунок потужності двигуна. Обрано двигун 4А112М4У3 потужністю 5,5 кВт. Обрано перетворювач частоти HYUNDAI N300P 5.5 кВт.

Розроблена модель АД, що працює в умовах неякісної електроенергії.

Аналіз отриманих енергетичних показників роботи АД, підтверджує, що неякісність живлячої напруги обумовлює зростання всіх видів втрат, і, відповідно, зниження ККД і коефіцієнта потужності двигуна.

Основними ПКЕ, що забезпечують ЕМС, роботи ЕП, є вищі гармоніки, коливання і провали напруги і несиметрія трифазної системи напруги. Проблеми, що відносяться до цих показників мають не вирішені аспекти як в області нормування, так і вимірювання, а також розробки технічних засобів їх нормалізації. Роботи в цьому напрямі проводяться у ряді міжнародних організацій.

Питання забезпечення допустимих відхилень напруги і частоти практично не мають наукових аспектів. Для приведення їх в допустимі межі існують технічні засоби, експлуатація яких належним чином може бути налагоджена за допомогою відповідних організаційних мерів.

Вплив ПКЕ на економічні показники роботи промислових підприємств найлегше визначається для відхилення напруги, оскільки вплив цих ПКЕ виражається у формі «уповільнення виробництва». Разом з тим фактичне зменшення об'єму продукції, що випускається, може бути зафіксоване лише на автоматичних цілодобових виробництвах, де немає можливості компенсувати недоотпуск продукції збільшенням часу роботи.

Вплив вищих гармонік, коливань і провалу напруги і несиметрії напруги (для останнього у меншій мірі) виявляється у формі відмови устаткування, збоїв автоматичних пристроїв, перешкод в роботі інших систем. Розрахунок

економічного збитку від цих проявів важчий, ніж від уповільнення виробництва, тому якщо для рівнянь напруги і частоти в принципі може вирішуватися завдання визначення їх оптимальних значень, то для решти ПКЕ практично єдиним шляхом є нормування як їх рівнів в мережах, так і рівнів емісії цих спотворень в мережі індивідуальної ЕП і споживачами в цілому.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жежеленко І.В., Саєнко Ю.Л. Питання якості електроенергії в електроустановках. - Маріуполь:ПГТУ,1996.-173 с.

2. ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. ІПК. Видавництво стандартів.-1998.-15 с.

3. Родькин Д.І., Чорний А.П., Мартиненко В.А. Обгрунтування критеріїв якості перетворення енергії в електромеханічних системах. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - Кременчук: КДПУ. - 2002.-Вип.1.- с.81-85.

4. Луговий А.В., Чорний А.П. Питання практичного енергозбереження промислових підприємств. Проблемі створення нових машин і технологій (Кременчукський державний політехнічний інститут): Збірник наукових праць.-1998.-Вип.1(4).-с.5-15.

5. Зіновкин В.В. Моделювання додаткових втрат в електроустаткуванні системи електротехнічного комплексу при несинусоїдальних струмах. Вісник КДПУ. Випуск 4/2007(45) с. 49-52.

6. Beaty H. Motors reguire voltage limits.-Elec.World,1978,189,№5 p.52-53.

7. Shaller D.,Seidler E. Berechnung des Einflusses einer Zweiphasenlast auf die Strom – und Spannungsunsymmetrie in Energieversorgungsnetzen. - Mitt. Inst. Energ., 1965, H.70 S.586-596.

8. І.В. Жежеленко, Ю.Л. Саєнко Показники якості електроенергії і їх контроль на промислових підприємствах. М.Енергоатоміздат, 2000.-360 с.

9. Луговий А.В., Чорний А.П. Питання практичного енергозбереження промислових підприємств.Вісник КДПУ. -1998.Випуск 1(4) - с.73-77.

10. Полілов Е.В., Зеленов А.Б. Експериментальні дослідження якості електричної енергії в основних цехах «АМК». Аналіз гармонійного складу мережевої напруги. Вісник КДПУ. Випуск 3/2006(39). Частина 1. с. 93-97.

11. І.П. Копилов Математичне моделювання електричних машин. К.1994, 317 с.

12. І.П. Копилов Математичне моделювання електричних машин К.2001, 327 с.

13. Ковач Д., Рац І. Перехідні процеси в машинах змінного струму. -К., Госенергоіздат,1963. -744 с.

14. Нікіян Н.Г. Від математичної моделі реальної електричної машини до її допустимого навантаження. Вісник НГУ №1. – січень, 2006. Том 2., с. 121-127.

15. Нікіян Н.Г. Математичні моделі трифазних асинхронних машин з урахуванням технологічних і експлуатаційних відхилень. Вісник НГУ №1 (4), 2000. – с. 59-64.

16. Калінов А.П., Мамчур Д.Г. Математічні моделі для дослідження впливу конструктивних несиметрій електричних машин на їх електромагнітні параметри. Вісник КДПУ. Випуск 3/2007 (44). Частина 2, с. 150-154.

17. Войнова Т. В. Математична модель для дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором як об'єкту регулювання ним для прямого процесорного управління. Електротехніка №6, 1998. – 51- 61.

18. Войнова Т. В. Програмне забезпечення для моделювання трифазного асингхронного двигуна з короткозамкнутим ротором у складі системи управління електроприводами і для бездатчикового вимірювання регульованих змінних. Електротехніка № 1, 2000. с. -19-25.

19. Беспалов В.Я., Мощинський Ю.А., Петров А.П. Динамічні показники трифазних асинхронних двигунів, що включаються в однофазну мережу. Електротехніка № 1, 2000. с. -13-19.

20. Моделювання асинхронних електроприводів з тиристором керуванням. Петров Л.П. та ін. - К. : Енергія, 1977.

21. Асинхронний електропривод з тиристорними коммутаторами. Петров Л.П. та ін. - К.: Енергія, 1970.

22. Петров Л.П., Херунцев П.Е. Автоматизоване моделювання електроприводів на цифрових обчислювальних машинах.- Дон.:УМКУ, 1991.

23. Іванов – Смоленський А.В. Електричні машини.- М: Енергия 1980., 927 с.

24. Копилов І.П., Щедрін О.П. Розрахунок на ЕВМ характеристик асинхронних машин.-К. Енергия, 1973 - 212 с.

25. Єршов М.С, Єгоров А.В., Яценко Д.Е. Про вплив параметрів енергосистеми на стійкість вузлів електричної напруги промислових підприємств. Промислова енергетика. – 1997. – №5. – С. 26-28.

26. Гусаров А.А. Влияние качества электрической энергии на тепловое состояние трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 95-97.

27. Пінчук О.Г. Енергетичні показники асинхронного двигуна при різних параметрах несиметрії живлячої напруги. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 201-204.

28. Жежеленко І.В. Вищі гармоніки в системах електропостачання промпредприятий. – К.: Енергоатоміздат, 2000.

29. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальній посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006.

30. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. Про моделі функціонування асинхронного двигуна в умовах неякісного живлення. Гірніча електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник.- Вип.81.- Дніпропетровськ, 2008. - с. 51-54.

31. Бессонов Л.А. Теоретичні основи електротехніки. – К.: Вища школа, 1973.

32. Башарин А.В., Постников Ю.В. Приклади розрахунку автоматизованого електроприводу на ЕОМ: Навчальний посібник для вузів. - 3-е видавництво, 1990.

33. Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнєцов, В.Б. Траппер. Про технико – економічну доцільність роботи асинхронного двигуна в мережах з неякісною електроенергією. Гірніча електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. - 2008. - Вип. 80.

34. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнєцов В.В. Реалізація моделі асинхронного двигуна для умов неякісного живлення. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.-2009.-№3. - с.56-58.

35. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнєцов В.В. Моделювання асинхронного двигуна для умов неякісного живлення. Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах. Матеріали міжнародної науково – технічній конференції. Севастополь 2009. с.55-56.

36. Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнєцов В.В. Вплив гармонічного складу живлячої напруги на енергетичні показники асинхронного двигуна. Гірніча електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. - 2009. - Вип. 85.

37.Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006.

38. Колб А.А., Колб А.А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ, НГУ, 2009.

39. Копылов. И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.2012, 317 с.

40. Yevheniia, K., Vitaliy, K., Mykola, T., Alisa, K., Maksym, T., Mykola, B. Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power (2019) Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2019, pp. 350-353.

41. Vitaliy, K., Nikolay, T., Yevheniia, K. Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption (2019) 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2019 - Proceedings, pp. 556-561. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841

42. Zagirnyak, M., Rod'kin, D., Romashykhin, I., Romashykhina, Z., Nikolenko, A., Kuznetsov, V. Refined calculation of induction motor equivalent circuit nonlinear parameters by an energy method (2017) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (5-87), pp. 4-10.

43. Kuznetsov, V., Nikolenko, A. Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity (2015) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (8), pp. 37-42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755

45. K. Vitaliy, T. Nikolay and K. Yevheniia, "Evaluating the Effect of Electric Power Quality upon the Efficiency of Electric Power Consumption," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 556-561. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879841